

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – CHILE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**Planificación y distribución de la producción en Centro
de Sangre Concepción**

por

Catalina Paz Troncoso Navarrete

Profesor guía

Ph.D. Maichel M. Aguayo Bustos

Concepción, Abril de 2019

Tesis presentada a la

DIRECCIÓN DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN



Para optar al grado de
MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Resumen

Planificación y distribución de la producción en Centro de Sangre Concepción

Catalina Paz Troncoso Navarrete

Abril 2019

PROFESOR GUIA: Ph.D. Maichel M. Aguayo Bustos

PROGRAMA: Magíster en Ingeniería Industrial

Este trabajo, presenta un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MILP) para la planificación de la producción de unidades de glóbulos rojos de la sangre, integrando los procesos de recolección de sangre a través de donantes, así como la producción, control de inventario y localización de centros de distribución para satisfacer la demanda dentro de la Macroregión Sur, reduciendo la caducidad y asegurando stock permanente para la población. El problema se aborda con el objetivo de disminuir los costos totales del diseño de la cadena de suministro de sangre, entre los que se pueden mencionar costos de transporte, costos de almacenamiento y costos de abrir centros de distribución para satisfacer a los pacientes que requieran de productos sanguíneos. A raíz de lo anterior el problema fue resuelto mediante el software CPLEX de OPL Studio versión 12.6. Los resultados obtenidos del estudio fueron sometidos a análisis de acuerdo a la planificación actual del Centro de Sangre Concepción.

Palabras Claves: Cadena de suministro de sangre, Programación Lineal Entera Mixta (MILP), Glóbulos Rojos, Centros de Distribución.

Abstract

Planning and distribution of production in Centro de Sangre

Concepción

Catalina Paz Troncoso Navarrete

April 2019

THESIS SUPERVISOR: Ph.D. Maichel M. Aguayo Bustos

PROGRAM: Master in Industrial Engineering

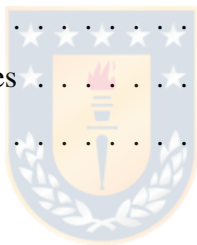
This work, presents Mixed Integer Linear Programming Model (MILP) for the planning of the production of units of red blood cells, integrating the processes of blood collection through the participants, as well as the production, control of inventory and Location of distribution centers to meet the demand within the Southern Macro-region, reducing the expiration and ensuring permanent stock for the population. The problem is addressed with the objective of decreasing the total costs of the design of the blood supply chain, among which can be used transportation costs, storage costs and the costs of opening distribution centers to satisfy patients who require of blood products. The root of the previous problem was solved using the CPLEX software of OPL Studio version 12.6. The results of the study were analyzed in accordance with the current planning of the Blood Center Concepcion.

Keywords: Blood supply chain, Linear Mixed Integer Programming (MILP), Red Blood Cells, Distribution Centers.

Tabla de Contenidos

Resumen	II
Abstract	III
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	IX
Abreviaciones	X
1. Antecedentes generales	1
1.1. Introducción	1
1.2. Cadena de suministro de sangre	4
1.2.1. Selección del donante	6
1.2.2. Productos sanguíneos	9
1.2.3. Manejo de inventarios para productos sanguíneos	11
1.3. Suministro de Sangre en Chile	12
1.4. Justificación del Tema	15
1.5. Hipótesis del Proyecto	16
1.6. Objetivos	16
1.6.1. Objetivo General	16
1.6.2. Objetivo específicos	16
1.7. Organización del trabajo	17
2. Descripción del problema	18
2.1. Centro de Sangre Concepción	18

3. Revisión de la literatura	26
3.1. Programación Lineal Entera(LP) y Entera Mixta (MILP)	28
3.2. Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP)	32
3.3. Programación Dinámica Estocástica (SDP)	34
3.4. Simulación	35
3.5. Sistema de soporte a las decisiones (DSS)	38
3.6. Estructura de artículos estudiados	40
4. Formulación matemática del problema	43
4.1. Definición de parámetros y variables de decisión.	43
4.2. Modelo Matemático	46
5. Resultados Computacionales	51
5.1. Instancias de prueba	51
5.2. Instancias con Datos reales	55
5.3. Análisis de Sensibilidad	65
6. Conclusiones y comentarios	69
Referencias	71
Anexos	75
A1. Archivo.mod OPL	75



Índice de figuras

1.1. Distribución regional de la población y donaciones de sangre por la región de la OMS y el grupo de ingresos del Banco Mundial, 2013.	3
1.2. Cadena de suministro de sangre	5
1.3. Sistema ABO y Factor RhD	7
1.4. Producción de componentes sanguíneos y derivados de la sangre	8
1.5. Productos Sanguíneos para transfusión en pacientes	10
1.6. Ubicación geográfica Centros de Sangre en Chile	13
1.7. Distribución de donaciones en el sistema público centralizado y no centralizado de Chile, año 2014	14
1.8. Transfusiones 2015 Sistema Público de Chile	15
2.1. Sitios Fijos de donación Macro Zona Sur	19
2.2. Modelo de Gestión Centro de Sangre Concepción	20
2.3. Abastecimiento de Salud Públicos y Privados	22
2.4. Ruta de la sangre Centro Sangre Concepción.	23
2.5. Representación del problema.	25
5.1. Instancia de prueba 1	54
5.2. Planificación de la producción Centro de Sangre	58
5.3. Solución obtenida para $T= 52$ semanas	59
5.4. Bolsas de sangre de los 8 grupos sanguíneos recolectadas en el sitio de donación 4 durante el periodo $T=7$ semanas (U_{sgt}).	60
5.5. Bolsas de sangre de los 8 grupos sanguíneos recolectadas en el sitio de donación 5 durante el periodo $T=7$ semanas (U_{sgt}).	60

5.6. Bolsas de sangre de los 8 grupos sanguíneos recolectadas en el sitio de donación 6 durante el periodo T=7 semanas (U_{sgt}).	61
5.7. Número de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos producidos en el centro productor durante el periodo T=7 semanas (P_{gt}).	61
5.8. Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro productor al centro de distribución de Chillán durante el periodo T=7 semanas (Y_{gdt}).	62
5.9. Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 1 y 2 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})	63
5.10. Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 3 y 4 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})	63
5.11. Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 5 y 6 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})	63
5.12. Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 7 y 8 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})	64
5.13. Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 9 y 10 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})	64
5.14. Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 11 y 12 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})	64

5.15. Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán al hospital 13 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})	65
5.16. Costo de producción de bolsas con GRs (C_{gt})	66
5.17. Costo de enviar de bolsas con GRs desde el centro productor al centro distribuidor (C_{gdt}) y hacia los hospitales (C_{gdht}).	67
5.18. Costo de abrir un centro distribuidor (f_d)	68



Índice de tablas

1.1. Estimación de donaciones de sangre por región de la OMS, 2013	2
3.1. Métodos de solución aplicados a cadenas de suministro de sangre	27
3.2. Estructura de artículos estudiados	42
5.1. Instancias de prueba	51
5.2. Parámetros para Modelo Matemático	52
5.3. Resultados MILP para Instancia de Prueba 1	53
5.4. Resultados MILP para Instancia de Prueba 2	53
5.5. Parámetros para Modelo Matemático Instancia Real	56
5.6. Resultados MILP para T= 52 semanas	57



Abreviaciones

- UMTs : Unidad de Medicina transfusional
GRs : Glóbulos Rojos
CSC : Centro de Sangre Concepción
CD : Centro Distribuidor
HGGB : Hospital Guillermo Grantt Benavente
WHA : World Health Assembly
OMS : Organización Mundial de la Salud
VIH : Virus de la Inmunodeficiencia Humana



Capítulo 1

Antecedentes generales

1.1. Introducción

La sangre es un recurso vital utilizado en una amplia gama de servicios clínicos. En los países desarrollados, la transfusión se usa con mayor frecuencia para la atención de apoyo en cirugías cardiovasculares y de trasplantes, traumas masivos, terapias para neoplasias malignas sólidas y hematológicas; en los países en desarrollo se usa con más frecuencia para tratar las complicaciones en el embarazo y en anemia infantil severa.

El acceso seguro al suministro de sangre y productos sanguíneos, además de servicios de transfusión confiables es un componente esencial para la cobertura de salud universal. La sangre puede salvar vidas, pero también puede ocasionar enfermedades infecciosas dañinas, como el VIH y la hepatitis, por lo tanto, de ahí la importancia de contar con un sistema de vigilancia sanguíneo seguro a nivel global y nacional (Organization, 2017).

Desde el año 1975, la Asamblea Mundial de la Salud ha resaltado la necesidad de seguridad y disponibilidad de sangre a través de la adopción de varias resoluciones que le han dado mayor prioridad al tema en las agendas de salud mundial y nacional.

Las resoluciones claves incluyen WHA 28.72, Utilización y suministro de sangre y productos sanguíneos humanos (1975); WHA 56.30, Estrategia global del sector de la salud para el VIH / SIDA (2003); WHA 58.13, Seguridad de la sangre: propuesta para establecer el Día Mundial del Donante de Sangre (2005); WHA 63.12, Disponibilidad, seguridad y calidad de los productos sanguíneos (2010); y WHA 67.6, Hepatitis (2014). Estas resoluciones han instado a

los países miembros a promover su uso apropiado y racional mediante el desarrollo de Servicios Nacionales de Sangre, basados en la donación voluntaria y no remunerada (Organization, 2017).

De acuerdo con el reporte entregado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el año 2016, se realizó una recolección de 112,5 millones de donaciones de sangre en 180 países. De estos, 100,6 millones fueron donaciones de sangre total y 11,9 millones fueron donaciones por aféresis, procedimiento que consiste en extraer sangre de un donante y hacerla circular por una máquina que mediante un proceso de centrifugación separa sus diferentes elementos. Dependiendo del procedimiento realizado, se pueden recolectar solo plaquetas, glóbulos rojos y plasma, retornando el resto de la sangre al donante (ver Tabla 1.1).

Tabla 1.1: Estimación de donaciones de sangre por región de la OMS, 2013

Fuente: (Organization, 2017)

Región	Donación estimada de sangre (Millones)	Donación estimada por aféresis (Millones)	Total (Millones)
África	5.6	0.03	5.6
América	20.4	2.0	22.4
Mediterráneo Oriental	9.9	0.04	9.9
Europa	26.5	6.1	32.5
Asia Sudoriental	16.6	0.06	16.7
Pacífico Occidental	21.6	3.7	25.3
Global (Total)	100.6	11.9	112.5

Cuando los datos de donación y población se correlacionan, además de analizar la región de la OMS y por grupo de ingreso del Banco Mundial, el nivel de disponibilidad de sangre para transfundir varía. Por ejemplo, 46 países de la región de África recolectaron un total de 5.6 millones de donaciones de sangre, representando el 4 % de las donaciones mundiales y siendo el 13 % de la población mundial. Los 11 países de la región Sudoriental Asiático informaron que recolectaron el 15 % de las donaciones de sangre, representando el 26 % de la población mundial.

En la región de Europa, el número de donaciones reportadas represento el 30 % del total mundial, región habitada por el 11 % de la población. Aquellos países de alto ingresos recaudaron el 47 % de las donaciones mundiales, aunque sus poblaciones sólo representan el 19 % de la población mundial, como se puede observar en la Figura 1.1.

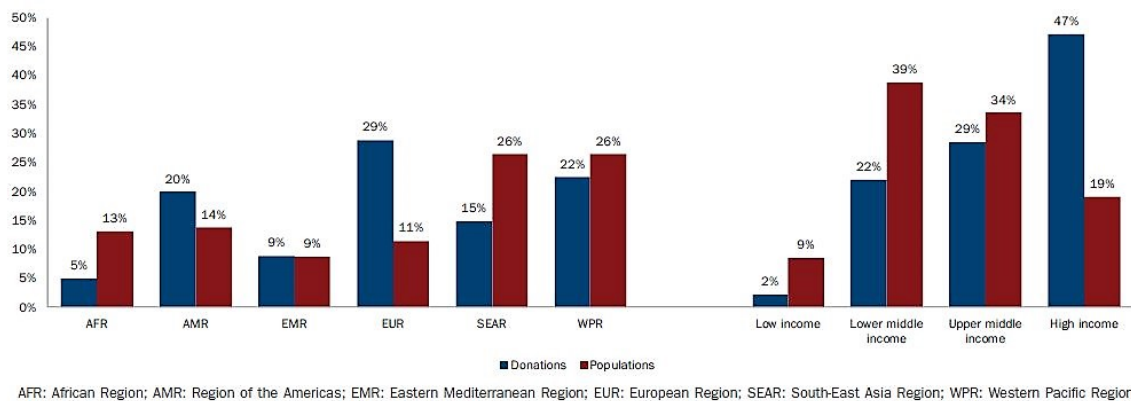


Figura 1.1: Distribución regional de la población y donaciones de sangre por la región de la OMS y el grupo de ingresos del Banco Mundial, 2013.

Fuente: (Organization, 2017)

Existen marcadas diferencias en el nivel de acceso a la sangre entre los países de ingresos altos y los de ingresos bajos. Para conocer la disponibilidad general de sangre en un país se puede utilizar como indicador la tasa de donación de sangre completa. Esta tasa es de 32,1 donaciones por cada 1000 personas en los países de ingresos altos, en comparación con las 14,9 donaciones por cada 1000 en países de ingresos medios altos, 7,8 por cada 1000 personas en los de ingresos medios bajos y 4,6 en los de ingresos bajos (Organization, 2017).

La sangre recogida en bolsas con anticoagulante se puede almacenar y transfundir a pacientes sin someterla a ninguna modificación, lo que constituiría una transfusión de sangre completa. Sin embargo, se puede utilizar la sangre de manera más eficaz si se separa en sus componentes, tales como los concentrados de eritrocitos, plaquetas, plasma y crioprecipitados. De este modo se pueden satisfacer las necesidades de varios pacientes.

La distribución por edades de los pacientes transfundidos varía considerablemente en función del país. Por ejemplo, el grupo de pacientes transfundidos con mayor frecuencia en los países de ingresos altos son los mayores de 65 años, con el 76 % del total de transfusiones, mientras que en los países de ingresos bajos los niños menores de 5 años reciben el 65 % (Organization, 2017).

1.2. Cadena de suministro de sangre

La capacidad de satisfacer la demanda de sangre y componentes sanguíneos es un objetivo principal de los servicios de sangre, realizable a través de buena planificación nacional anual, con donantes voluntarios altruistas, idealmente regulares, manejo efectivo de inventarios, el uso apropiado de la sangre y el conocimiento clínico de las alternativas a la transfusión.

La cadena de suministro de sangre (Figura 1.2) incluye el donante de sangre voluntario, los Centros de sangre, las Unidades de Medicina Transfusional del hospital (UMTs) con sus laboratorios y especialistas en medicina transfusional, el médico que prescribe, la administración de los componentes y la vigilancia del receptor del componente sanguíneo (Wijeyeratne, 2009).



Figura 1.2: Cadena de suministro de sangre

Fuente: Elaboración Propia

Es responsabilidad de los servicios de sangre minimizar la pérdida y el vencimiento de los componentes sanguíneos producidos, empleando buenas prácticas en la gestión de inventario junto con los laboratorios del hospital, mientras que los médicos son responsables de prescribir sangre solo cuando no hay enfoques alternativos y los beneficios exceden los riesgos. La sangre es un recurso gratuito y se requiere un enfoque de colaboración a lo largo de la cadena para garantizar que esté disponible y se utilice su máximo beneficio en la atención del paciente (Wijeyeratne, 2009).

1.2.1. Selección del donante

Un suministro de sangre seguro y suficiente depende del reclutamiento y retención de donantes voluntarios altruistas que tengan bajo riesgo de infección y que se comprometan a donar sangre. La selección del donante tiene dos propósitos: proteger al donante de cualquier daño y al receptor de cualquier efecto patológico de la transfusión.

Una vez efectuada la extracción ya sea en colecta móvil, hospital (sitio fijo) o en la Casa del Donante, la sangre completa (450 ml \pm 10 %) debe procesarse, fraccionarse y analizarse, con el objetivo de que llegue en las mejores condiciones al paciente que la necesita. Es por esto que se realizan pruebas inmunohematológicas de rutina que determinan el grupo sanguíneo a través del sistema ABO y RhD, en el que se han descrito cuatro antígenos esenciales que definen los cuatro grupos sanguíneos que se conocen con las siglas O, A, B y AB. En cada uno de los grupos descubiertos, los eritrocitos tienen en su superficie una sustancia (antígeno), que los diferencia. El grupo A tiene el antígeno A, el grupo B tiene el antígeno B, el grupo AB tiene los dos antígenos y el grupo O no tiene antígeno ni A, ni B (ver Figura 1.3). En el caso del sistema Rh se detecta la existencia del antígeno D en la membrana de los eritrocitos de la mayoría de la población. Las personas Rh negativas (no tienen el antígeno), por lo tanto, solo podrán recibir sangre de donantes Rh negativos.

En las transfusiones, tanto el donante como el receptor deben pertenecer al mismo grupo sanguíneo ABO y a Rh. Solo excepcionalmente, se puede transfundir sangre de otros grupos compatibles (Wijeyeratne, 2009).

También se realizan pruebas microbiológicas, siendo actualmente mandatorios para detectar las siguientes infecciones:

- Infección por VIH con pruebas de detección combinadas antígeno/anticuerpo y detección de antígeno de superficie de VHB producto de hepatitis B.
- Infección por VHC producto de hepatitis C con pruebas que detectan anticuerpos.

- Infección por treponema, a través de detección de anticuerpos específicos e Infección por HTLV, el cual contamina a los glóbulos blancos de la sangre por medio de prueba de anticuerpos y detección de anticuerpos contra *T. cruzi* o Chagas.

Todas estas pruebas obligatorias deben llevarse a cabo en las donaciones, utilizando reactivos estándares validados a nivel nacional, con un control completo del proceso (Contreras, 2015).

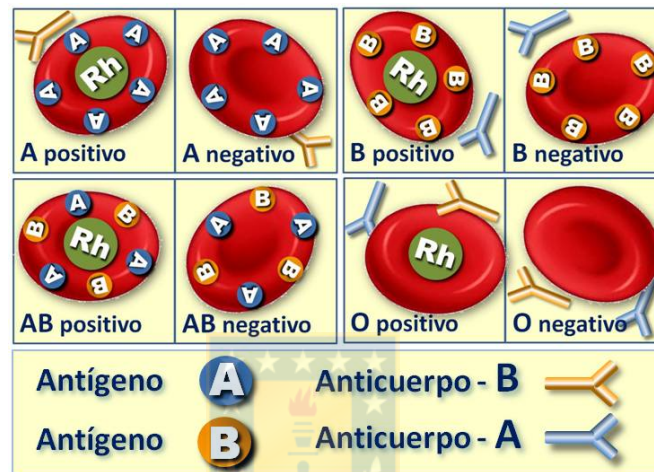


Figura 1.3: Sistema ABO y Factor RhD

Las donaciones de sangre total se procesan en concentrados de glóbulos rojos y, de acuerdo con los requerimientos y tiempo de almacenamiento a diferentes temperaturas, en concentrados plaquetarios, plasma fresco congelado y crioprecipitados (ver Figura 1.4). En Reino Unido todas las donaciones se colectan en bolsas con salidas en sus partes superior e inferior (*top and bottom*) lo que permite separar, por centrifugación, el *buffy-coat* o capa leucoplaquetar, conteniendo los leucocitos y plaquetas, de los glóbulos rojos o eritrocitos en la parte inferior y el plasma en la parte superior. En Chile, solo una parte de las donaciones se procesan con este método de superior calidad. Gran parte del plasma en el mundo desarrollado se congela rápidamente y se somete a fraccionamiento industrial para la obtención de factores de coagulación, inmunoglobulinas y albuminas (Contreras, 2015).

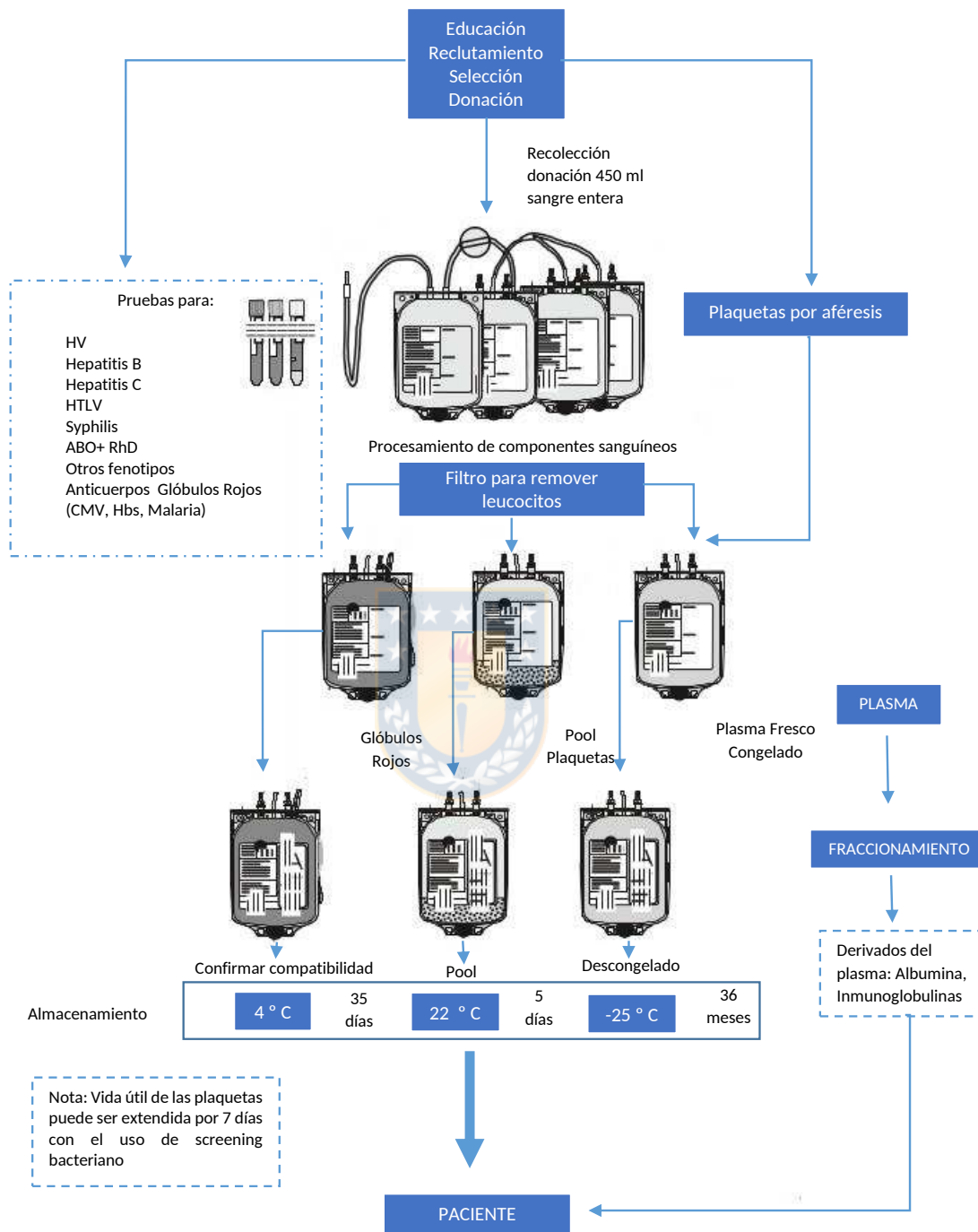


Figura 1.4: Producción de componentes sanguíneos y derivados de la sangre

Fuente: (McClelland, 2007)

1.2.2. Productos sanguíneos

El concentrado de *glóbulos rojos o eritrocitos* (ver Figura 1.5(a)), sin *buffy-coat*, se suspende en una solución aditiva para mantener la viabilidad de estos hasta un volumen final de 220 a 340 ml; puede almacenarse por un período de 35 a 42 días entre 2-4 °C. Las transfusiones de glóbulos rojos se usan para reemplazar pérdidas importantes de sangre (traumatismos, cirugías, partos) o para corregir anemias severas en casos en que la médula ósea esté produciendo una cantidad insuficiente de glóbulos rojos a causa del tratamiento a través de quimioterapia, o enfermedades como es el caso de la leucemia (Wijeyeratne, 2009).

Las *plaquetas* (ver Figura 1.5(b)) pueden obtenerse de sangre total, ya sea en forma individual, por mezcla (pooles) de *buffycoats* de cuatro donaciones o por aféresis de donante único. Se almacenan en plasma (o medio para suspensión de plaquetas) entre 20 °C a 24 °C, hasta por 5 días, en agitadores especiales (Wijeyeratne, 2009). El corto tiempo de almacenaje se debe a la pérdida de viabilidad y al potencial de contaminación bacteriana, lo que hace difícil su abastecimiento en feriados y vacaciones. Las principales transfusiones de plaquetas se realizan en enfermos con leucemia, trasplantes de corazón, trasplantes de hígado y trasplantes de médula ósea. Estas son las encargadas de taponar las heridas; se agrupan y adhieren a la pared vascular, liberando una serie de sustancias químicas que inician el proceso de coagulación (MINSAL, 2018).

El *plasma fresco congelado (PFC)* (ver Figura 1.5(c)) puede almacenarse por dos años a 30°C; puede ser sometido a inactivación viral con azul de metileno, solvente detergente, u otros (Contreras, 2015). En el mundo se usa demasiado PFC a pesar de escasas indicaciones basadas en la evidencia. Las principales transfusiones de plasma se utilizan en enfermos del hígado, sangrados complicados durante una cirugía, enfermedades raras, trasplante de corazón y de hígado.

Los *crioprecipitados* (ver Figura 1.5(d)) se preparan a partir de Plasma fresco descongelado lentamente a 4 °C; quedando en un precipitado el factor VIII: C, factor von Willebrand,

fibrinógeno, fibronectina y factor XIII, los que se re congelan y almacenan a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ por dos años máximo (Wijeyeratne, 2009). Cada unidad debe contener 70 UI de Factor VIII: C y 140 mg de fibrinógeno. Se usan principalmente como fuente de fibrinógeno en Coagulación intra-vascular diseminada (CID), falla hepática severa e hipofibrinogenemia. La dosis estándar de adultos es de 10 unidades (MINSAL, 2018).



(a) Glóbulos Rojos



(b) Plaquetas



(c) Plasma Congelado



(d) Crioprecipitados

Figura 1.5: Productos Sanguíneos para transfusión en pacientes

Fuente: Elaboración Propia.

1.2.3. Manejo de inventarios para productos sanguíneos

La sangre y sus componentes deben ser un bien nacional para los sectores tanto público como privado. Una política de almacenamiento, basada en un servicio nacional, compartiendo unidades entre los diferentes Centros, asegura un abastecimiento justo para todos los pacientes que lo requieran.

Para evitar la caducidad y el desperdicio, se requiere equilibrar las necesidades de glóbulos rojos (GRs) satisfaciendo la demanda contra el exceso de unidades almacenadas. Si los Centros de Sangre tienen altos niveles de stock, los hospitales recibirán glóbulos rojos de corta vida útil, lo que da al hospital menos tiempo para que las unidades puedan ser usadas, aumentando la caducidad. Los hospitales también requieren equilibrar sus niveles de inventarios con el objetivo de tener suficientes GRs que satisfagan su demanda, evitando la caducidad (Contreras, 2015).

Además del desperdicio por caducidad, pueden ocurrir pérdidas en toda la cadena de abastecimiento por diversas razones, como donaciones incompletas, sellados defectuosos, entre otros. Las razones de pérdidas en el hospital incluyen unidades dejadas fuera de temperatura adecuada por más de 30 minutos o fallas en el refrigerador.

En Chile, así como en Latinoamérica, todavía no se ha logrado un adecuado abastecimiento y manejo de inventarios. Se requiere aumentar la tasa de donación por mil habitantes acorde a la demanda, aumentar los donantes altruistas repetidos (actualmente 75 % proviene de donantes familiares o de recepción), gestión de fichero de donantes fidelizados para adaptar la oferta a la demanda por grupo sanguíneo, disminuir las pérdidas por caducidad y las pérdidas de producción por marcadores microbiológicos positivos.

El futuro de la suficiencia en sangre segura depende de un Programa Nacional basado en el donante altruista regular, facilitar el acceso a la donación, con colectas móviles y casas del donante con una grata atención, correctas acciones de marketing, para dar confianza a la población de que su sangre no será usada con fines de lucro (Contreras, 2015).

1.3. Suministro de Sangre en Chile

En Chile, es el Ministerio de Salud (MINSAL) la entidad responsable de gestionar el suministro de sangre para el país. La política nacional de servicios de sangre establece un sistema de provisión coordinado y seguro mediante un conjunto de unidades especializadas, encargadas de las distintas fases del proceso, que va desde la promoción de la donación voluntaria altruista y repetida hasta la transfusión de un componente sanguíneo a un receptor.

El Programa está constituido por cuatro Centros de Sangre nacionales (CS): Valparaíso, Metropolitano de Santiago, Concepción y Austral de Puerto Montt (ver Figura 1.6) y Unidades de Medicina Transfusional adscritas a los hospitales.

Existen 51 lugares fijos de donación de sangre, dependientes de los 29 Servicios de Salud existentes. Algunos sitios fijos tienen equipos que realizan colectas móviles de sangre, en lugares accesibles y cercanos a la comunidad, para entregar la oportunidad de donar sangre, por ejemplo, en el lugar de trabajo. También existen Bancos de Sangre y Unidades de Medicina Transfusional (UMTs), pertenecientes a instituciones de salud privadas que, de igual manera, se rigen por las normativas establecidas por MINSAL.

La suficiencia en sangre segura de un país depende de donantes altruistas; los requerimientos varían en cada país de acuerdo a las condiciones de salud de la población y desarrollo de la medicina. En Europa occidental y Norteamérica la tasa de donación, 100 % voluntaria, en gran parte repetida, es sobre 35 por mil habitantes, lo que suple en gran parte la demanda y hace que la sangre sea significativamente más segura que en Latinoamérica (Contreras, 2015).



Figura 1.6: Ubicación geográfica Centros de Sangre en Chile

Fuente: Elaboración propia. Google maps

Sin embargo, la tasa de donación no es la adecuada en la mayoría de los países de Latinoamérica; en Chile al año 2014 la demanda no fue suplida; se estima una tasa de 17 donaciones por mil habitantes sumando los donantes del sistema público y privado; menos del 25 % de los donantes son voluntarios y una minoría regulares (ver Figura 1.7).

Es por esto que, a contar del año 2015, se implementó una nueva estrategia ministerial de agendamiento y reconversión de los donantes de reposición o familiares a donantes altruistas, mediante un plan de trabajo establecido por el Ministerio de Salud en colaboración con el Ministerio de Salud Francés y el Establecimiento Francés de Sangre.

Este plan considera, agendamiento de hora para atención en todos los sitios fijos de donación, realización de llamados telefónicos, envío de mensajes de texto y correos electrónicos para motivar la donación reiterada y fidelizada de los donantes de reposición. Todo esto con el

objetivo de lograr un 50 % de donantes altruistas al año 2020 (MINSAL, 2018).

La centralización debe asegurar que en el país no exista una pérdida mayor al 6 % en el proceso de extracción y producción, y que no exista una caducidad de los glóbulos rojos mayor a un 3 %, sumando la pérdida de los centros de sangre y las UMTs.

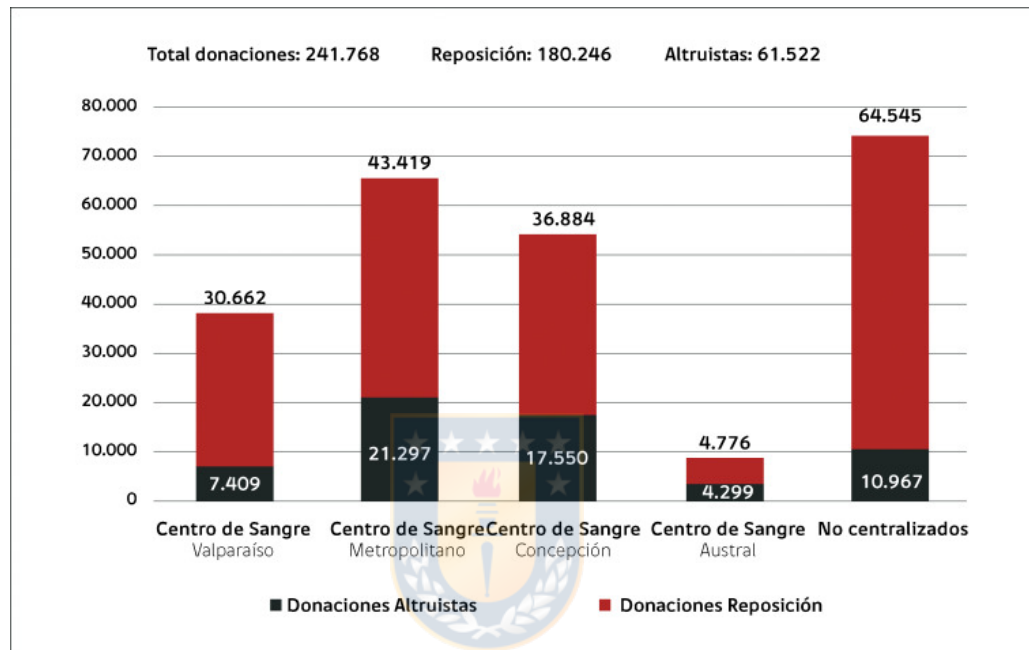


Figura 1.7: Distribución de donaciones en el sistema público centralizado y no centralizado de Chile, año 2014

Fuente: (Contreras, 2015)

En el año 2015, de acuerdo a información obtenida de la Dirección de Estadísticas e Información de Salud (DEIS) de Chile, se transfundieron en el sistema público del país, 209.277 unidades de glóbulos rojos representando el 54 % del total, 75.289 unidades de plasma, 3.289 unidades de plaquetas obtenidas por aféresis, 78.296 unidades de plaquetas estándar, 6.352 pool de plaquetas y 12.049 unidades de crioprecipitados (ver Figura 1.8).

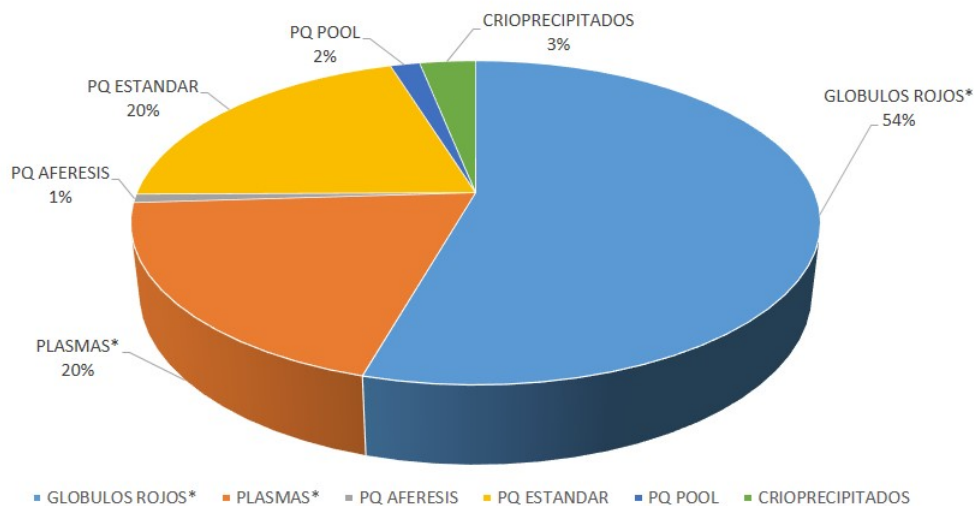


Figura 1.8: Transfusiones 2015 Sistema Público de Chile

Fuente: DEIS 2015



1.4. Justificación del Tema

Los centros productores de componentes sanguíneos son lugares con autorización sanitaria encargados de recibir la sangre donada, analizar las condiciones de esta, separarla en sus componentes, realizar el análisis microbiológico e inmunohematológico, además del almacenamiento y distribución a los hospitales, por lo que juegan un papel fundamental dentro de la cadena de abastecimiento del flujo de sangre y hemoderivados, siendo estos los encargados de garantizar que la demanda sea satisfecha a cabalidad durante todo el año.

La sincronización de cada uno de estos subprocesos resulta vital, si se considera que los componentes sanguíneos son perecibles. Por esto es imprescindible utilizar metodologías para disminuir los tiempos de procesamiento de los componentes sanguíneos, reducir la caducidad de estos y minimizar las rutas para la distribución de los componentes sanguíneos a los recintos hospitalarios.

En base a lo anterior, en esta investigación se propone un método de solución exacto, a través de Programación Lineal Entera Mixta (MILP), concentrándose en la producción de bolsas con Glóbulos Rojos, en varios periodos de tiempo, permitiendo reducir la caducidad y asegurando un stock permanente que satisfaga las necesidades de la población que requiere transfundirse.

1.5. Hipótesis del Proyecto

Al implementar centros de distribución dentro de la Macroregión Sur de Chile se podrán minimizar los tiempos de distribución de los componentes sanguíneos a los recintos hospitalarios y asegurar stock permanente que satisfaga las necesidades de la población.

1.6. Objetivos



1.6.1. Objetivo General

El objetivo general de esta investigación es desarrollar un modelo de optimización de Programación Lineal Entera Mixta (MILP) desarrollado para la planificación de la producción y distribución de la cadena de suministro de sangre.

1.6.2. Objetivo específicos

- Definir los conjuntos, variables de decisión y los parámetros asociados al problema de la cadena de suministro de sangre.
- Formular e implementar el modelo de programación matemática propuesto.
- Aplicar el modelo de optimización desarrollado a un centro de sangre nacional, en esta oportunidad correspondiente al Centro de Sangre Concepción.

1.7. Organización del trabajo

El resto de la tesis está organizada de la siguiente manera.

- En el Capítulo 2 se describe el problema a abordar en esta investigación. Basado en el diseño de la cadena de suministro de Sangre en la Macro Zona Sur de Chile, la cual está a cargo del Centro de Sangre Concepción.
- En el Capítulo 3 se presenta la revisión de la literatura de los artículos más relevantes de los distintos métodos de solución para la gestión de la cadena de suministro de los productos sanguíneos y el manejo del inventario de estos.
- En el Capítulo 4 se realiza la formulación de la propuesta del modelo matemático de Programación Lineal Entera Mixta (MILP) a resolver en esta investigación. Definiendo los sets, parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones de problema.
- En el Capítulo 5 se dan a conocer los resultados computacionales que arrojó la implementación del modelo matemático, utilizando el software *CPLEX de OPL Studio*.
- Finalmente en el Capítulo 6, proporciona las conclusiones del trabajo desarrollado y posibles investigaciones futuras.

Capítulo 2

Descripción del problema

2.1. Centro de Sangre Concepción

En esta investigación nos centraremos en el Centro de Sangre productor de la ciudad de Concepción. En enero del 2000 se dio inicio al Proyecto FONDEF D991005, tendiente a implementar un Modelo de Banco de Sangre Centralizado en la Región del Biobío, con el apoyo de la Cooperación Francesa (MINSAL, 2018).

El Centro de Sangre Concepción es uno de los 9 establecimientos dependientes del Servicio de Salud Concepción, en el reside la función de transformar la sangre colectada en componentes sanguíneos seguros: Glóbulos Rojos, Plaquetas, Plasma y Crioprecipitado para ser distribuidos a la red de establecimientos de salud públicos y privados comprendida por las Regiones del Maule, Ñuble, Biobío y en la provincia de Malleco (desde Curicó a Victoria), conformando la Macro Red Sur de Medicina Transfusional.

Permitiendo que se realicen en ellos transfusiones seguras, con un abastecimiento oportuno y equitativo de los componentes sanguíneos. En la Figura 2.1, se observa la ubicación geográfica de los sitios fijos de donación.



Figura 2.1: Sitios Fijos de donación Macro Zona Sur

Fuente: Elaboración propia. Google Maps

La cadena transfusional del Centro de Sangre Concepción (CSC) se inicia con el marketing y promoción de la donación y finaliza con el seguimiento clínico del paciente transfundido. Cubre diversos aspectos como la planificación de colectas, selección del donante, extracción de sangre total o aféresis de plaquetas/plasma, calificación biológica de las donaciones, separación de componentes sanguíneos, etiquetaje, almacenamiento, gestión de stock, distribución y transporte de componentes a los hospitales, y terapia transfusional (ver Figura 2.2) (MINSAL, 2018).



Figura 2.2: Modelo de Gestión Centro de Sangre Concepción

Fuente: Centro Sangre de Concepción

El proceso logístico productivo de la sangre está compuesto por una secuencia de estaciones interconectadas por flujos de datos y productos.

La primera etapa contempla la donación, la que puede ser llevada a cabo actualmente tanto en los seis sitios fijos de atención de donantes intrahospitalarios (Hospital Las Higueras de Talcahuano, Hospital de Curicó, Hospital de Linares, Hospital Herminda Martin de Chillán, Hospital Víctor Ríos Ruiz de Los Ángeles y Hospital de Victoria), como en otros dos extra-hospitalarios, denominados Casas del donante, cuyo aporte es complementado con colectas móviles (casa del donante altruista de Concepción y Casa del donante de Maule) (ver Figura 2.4). Esta etapa consiste en la extracción de la sangre, donde se realiza un examen de pre-donación para luego proceder a la extracción donde se obtiene una bolsa de 450 ml de producto que será procesado en las siguientes etapas, además de dos muestras para análisis posteriores (Baesler et al., 2011). Al llegar el producto al centro, se ingresan los datos al sistema informático y se pesan las bolsas.

La bolsa principal es ubicada dentro de un recipiente llamado *liner* para su posterior centrifugación, proceso llamado “Preparación Centrifugación”, luego se procede con el “Centrifugado”, logrando la separación de componentes según sus pesos y densidades.

Posterior a ello se procede al “Fraccionamiento”, donde un equipo separa los componentes en una bolsa distinta, quedando los glóbulos rojos en una bolsa, el plasma en otra y dejando en la bolsa original el *buffy-coat*, compuesto de restos de glóbulos rojos, plasma, glóbulos blancos y plaquetas, siendo este último componente el producto final de una nueva separación.

Cada componente sigue caminos distintos, el *buffy-coat* queda almacenado en reposo para su re-procesamiento al día siguiente, los glóbulos rojos son pesados para verificar que cumplan con la norma, se ingresan los datos al sistema informático y se refrigeran a la espera de los estudios microbiológicos e inmuno-hematológicos que permitirán el etiquetado. El plasma fresco también es pesado, congelándose y posteriormente almacenado a -30 grados Celsius. Secuencialmente el proceso continúa con la elaboración de plaquetas a partir de *buffy-coat*, para ello son centrifugadas y luego separadas. Al día siguiente se procede a realizar los análisis microbiológicos e inmuno-hematológicos, para etiquetar los productos que pasan a los análisis.

Como una etapa final se realiza una re-clasificación manual, sistema ABO y factor Rh, en la cual se verifica nuevamente el grupo de sangre en la bolsa y se chequea que sea el mismo impreso en la etiqueta.

El almacenaje se realiza en condiciones distintas dependiendo del producto sanguíneo. Finalmente, serán distribuidos a los hospitales de acuerdo con la demanda que requieran de estos para satisfacer las transfusiones de sus pacientes. (Baesler et al., 2011) (ver Figura 2.4).

El Centro de Sangre Concepción abastece a los 37 establecimientos de salud públicos y privados en convenio (ver Figura 2.3), con el objetivo de satisfacer la demanda de todos los pacientes de la Macro Red Sur, de acuerdo a definición del Ministerio de Salud de Chile.



Figura 2.3: Abastecimiento de Salud Públicos y Privados

Fuente: Elaboración propia

En esta oportunidad abordaremos el diseño de la cadena de suministro de Sangre en la Macrozona Sur de Chile (ver Figura 2.3), la cual está a cargo del Centro de Sangre de Concepción (CSC). Se desea abrir centros de distribución, de tal manera de minimizar los costos de distribución de bolsas con Glóbulos Rojos (GRs) a los recintos hospitalarios, reduciendo la caducidad y asegurando stock permanente que satisfaga las necesidades de la población ante un eventual catástrofe o demanda colectiva.

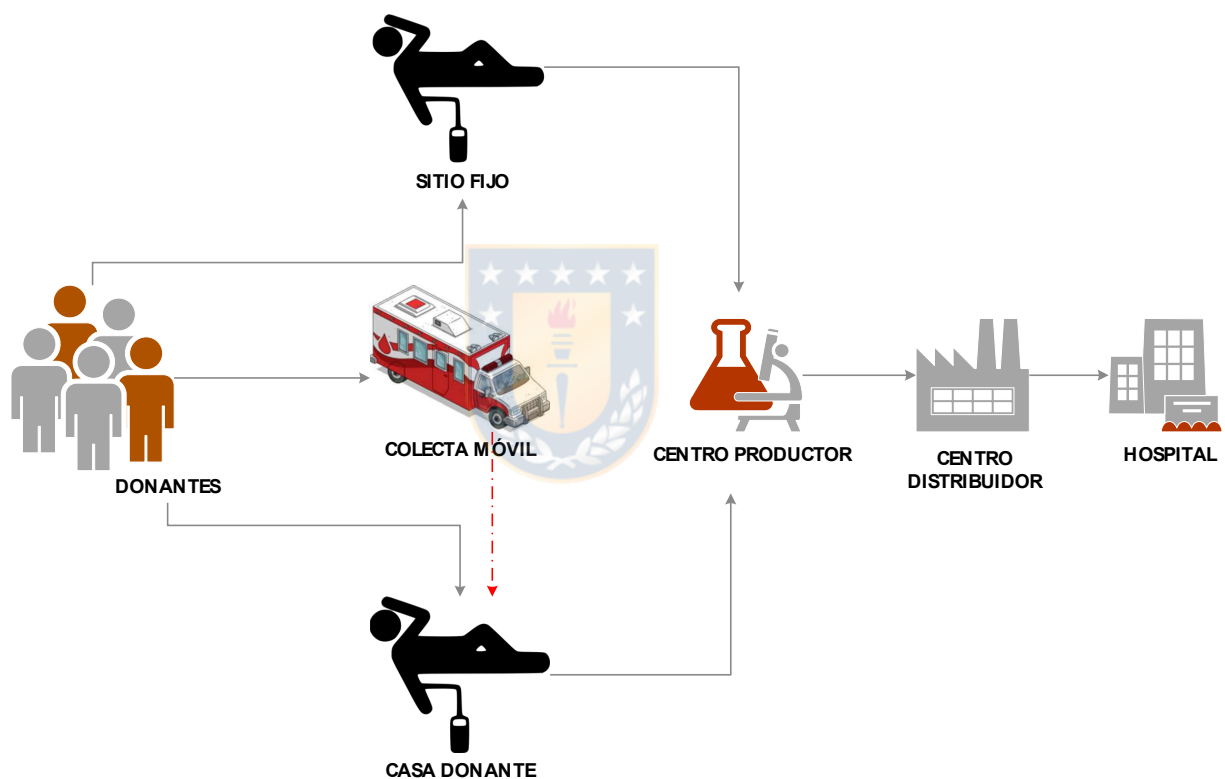


Figura 2.4: Ruta de la sangre Centro Sangre Concepción.

Fuente: Elaboración propia

El modelo que se presenta considera el objetivo de minimizar el costo total que involucran: costos de transportar bolsas de sangre desde los sitios fijos de donación hasta el centro produc-

tor, costos de producir y costos de almacenar bolsas con Glóbulos Rojos (GRs) en el centro productor, costos de inventario para las bolsas con GRs tanto en los centros distribuidores como hospitales, costos de abrir centros de distribución, costos de enviar bolsas con GRs desde el centro productor a los centros distribuidores, costo de enviar bolsas con GRs desde los centros distribuidores a los hospitales durante el horizonte de planificación y costo de demanda insatisfecha de bolsas con glóbulos rojos requeridas por los hospitales.

Resolviendo el modelo propuesto se obtendrá la siguiente información:

- El número y la instalación óptima de los centros de distribución de sangre.
- Cantidad de bolsas con sangre total recolectada en sitios fijos y en cada casa del donante durante cada periodo.
- Cantidad de bolsas con glóbulos rojos producidos en el centro productos (CSC) en cada periodo.
- Nivel de inventario de bolsas con glóbulos rojos en el centro productor (CSC) en cada periodo.
- Cantidad de bolsas con glóbulos rojos transportados desde el centro productor a los centros de distribución en cada periodo.
- Nivel de inventario de bolsas con glóbulos rojos en centros de distribución abierto en cada periodo.
- Cantidad de bolsas con glóbulos rojos transportados desde los centros de distribución a los hospitales en cada periodo.
- Nivel de inventario de bolsas con glóbulos rojos en los hospitales en cada periodo.

En la Figura 2.5 se realiza una representación gráfica de los sitios fijos de donación ($s_1 - s_8$), donde se recolectan las bolsas con sangre de los diferentes grupos sanguíneos ($g_1 - g_8$) que donan durante un periodo de tiempo t (U_{sgt}), luego se envían al centro productor (Centro de

Sangre Concepción), el cual produce mediante varios procesos bolsas con Glóbulos Rojos (GRs) clasificados por grupos sanguíneos ($g_1 - g_8$) en un periodo de tiempo t (P_{gt}), los cuales deben ser enviados (Y_{gdt}) a centros de distribución d . Posterior a esto, los centros distribuidores deben enviar las bolsas de GRs (Z_{gdht}) a los distintos hospitales h , donde requieran los pacientes ser transfundidos, para satisfacer la demanda (d_{ght}).

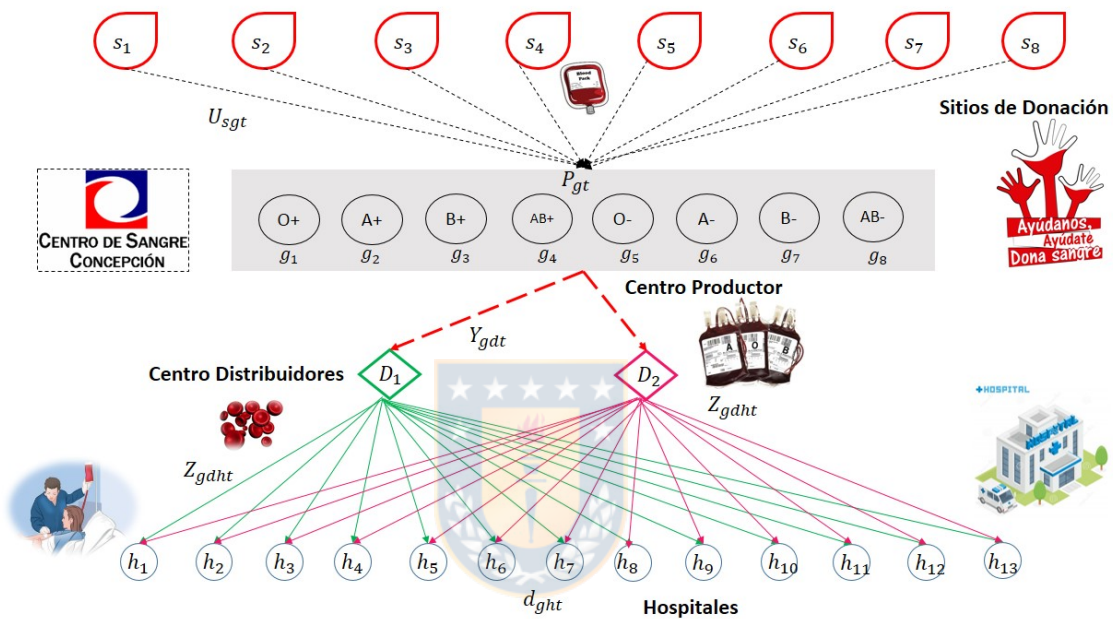


Figura 2.5: Representación del problema.

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3

Revisión de la literatura

En este capítulo se presenta la revisión de la literatura obtenida de las principales fuentes bibliográficas contenidas en las bases de datos de Science Direct, Scopus, Elsevier, entre otras. En ellas se encuentran documentos relevantes de los distintos métodos de solución para la gestión de la cadena de suministro de los productos sanguíneos y el manejo de inventario de estos.

A continuación, se presenta un esquema de los artículos estudiados, clasificados dentro de categorías como es la investigación de operaciones: Programación Lineal Entera (LP), Programación Lineal Entera Mixta (MILP), Programación no Lineal Entero Mixta (MINLP), Programación dinámica estocástica (SDP), Simulación y Sistema de Soporte de Decisiones (DSS).

En la tabla 3.1 se clasifican los artículos científicos revisados de acuerdo con el método de solución empleado por los autores para la cadena de suministro de sangre en sus diversas etapas de producción.

Tabla 3.1: Métodos de solución aplicados a cadenas de suministro de sangre

Métodos de Solución	Artículos Científicos
Programación Lineal Entera (ILP)	<ul style="list-style-type: none"> Supply chain network operations management of a blood banking system with cost and risk minimization. (Nagurney et al., 2012)
Programación Lineal Entera Mixta (MILP)	<ul style="list-style-type: none"> Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services. (Şahin et al., 2007) Blood collection management: Methodology and application. (Zahiri et al., 2015) Optimization of blood sample collection with timing and quality constraints. (Elalouf et al., 2018) Integrated planning for blood platelet production: a robust optimization approach. (Cheraghi et al., 2017) Blood supply chain network design considering blood group compatibility under uncertainty. (Zahiri and Pishvae, 2017) An appointment scheduling framework to balance the production of blood units from donation. (Baş et al., 2018) Designing a bi-objective multi-echelon robust blood supply chain in a disaster. (Habibi-Kouchaksaraei et al., 2018) Green-blood supply chain network design: Robust optimization, bounded objective function and Lagrangian relaxation. (Heidari-Fathian and Pasandideh, 2018) Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty. (Eskandari-Khanghahi et al., 2018)
Programación no lineal Entera Mixta (MINLP)	<ul style="list-style-type: none"> A Blood Bank Location Model: A Multiobjective Approach. (Cetin and Sarul, 2009) A Multi-Objective Proposed Mathematical Model for a Health Care Supply Chain with Perishable Product. (Elahi and Franchetti, 2015) Presenting a stochastic multi choice goal programming model for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals. (Yousefi Nejad Attari et al., 2017)
Programación Dinámica Estocástica (SDP)	<ul style="list-style-type: none"> Blood platelet production: a novel approach for practical optimization. (van Dijk et al., 2009) Blood platelet production with breaks: optimization by SDP and simulation. (Hajjema et al., 2009) A two-stage stochastic programming model for inventory management in the blood supply chain. (Dillon et al., 2017) The inventory centralization impacts on sustainability of the blood supply chain. (Hosseinifard and Abbasi, 2018)
Simulación	<ul style="list-style-type: none"> Tutorial on constructing a red blood cell inventory management system with two demand rates. (Kopach et al., 2008) Cost-effective practices in the blood service sector. (Katsaliaki, 2008) Proceso logístico productivo de un centro de sangre regional: modelamiento y análisis. (Baesler et al., 2011) Analysis of inventory strategies for blood components in a regional blood center using process simulation. (Baesler et al., 2014) A stock-and-flow simulation model of the US blood supply. (Simonetti et al., 2014) Optimization of blood supply chain with shortened shelf lives and ABO compatibility. (Duan and Liao, 2014) Efficiency improvement of blood supply chain system using Taguchi method and dynamic simulation. (Zahraee et al., 2015)
Sistemas de Soporte a las Decisiones (DSS)	<ul style="list-style-type: none"> Using simulation to improve the blood supply chain. (Katsaliaki and Brailsford, 2007) A DSS to manage platelet production supply chain for regional blood centers. (Ghandforoush and Sen, 2010)

3.1. Programación Lineal Entera(LP) y Entera Mixta (MILP)

La Programación Lineal es una de las técnicas de optimización más importantes de la Investigación Operacional. Esta técnica utiliza un modelo de programación matemática para describir el problema. El adjetivo “lineal” indica que todas las funciones matemáticas del modelo deben ser “funciones lineales”.

En esencia deben existir cuatro condiciones fundamentales para que pueda aplicarse la Programación Lineal a un problema:

- Los recursos deben ser limitados (de lo contrario no habría ningún problema).
- Debe existir una función objetivo, es decir un objetivo específico a ser logrado.
- Debe existir una relación lineal en las restricciones y en la función objetivo.
- La programación lineal continua supone que es posible fraccionar las variables y que no son negativas.

Se define un modelo de programación Lineal Entero (LP), es decir, como aquel donde las variables son números enteros no negativos. En las situaciones reales, el analista se enfrenta a “decisiones sí o no”, las que pueden representarse con variable denominadas binarias. Cuando sólo es necesario que algunas de las variables sean enteras y el resto continuas, el modelo recibe el nombre de problema de Programación Lineal Entera Mixta (MILP). Esta clasificación incluye modelos que además de tener variables enteras no negativas y variables continuas, tienen también variables binarias (Hillier y Lieberman, 2002).

Se incluye en esta clasificación la ubicación de las instalaciones, el cual es un problema importante para el área de la industria. Cualquier decisión de ubicación deficiente dará lugar a situaciones no deseadas, como mayores gastos, costo de capital y servicio al cliente disconforme (Daskin and Dean, 2005).

En los temas relacionados con la salud, las decisiones de la ubicación de instalaciones son estratégicas, siendo críticas debido a que cualquier anomalía puede conducir a la mortalidad (Daskin and Dean, 2005).

La disponibilidad y ubicación de los bancos de sangre, que servirán a hospitales o clínicas, también es una decisión estratégica en el sistema de prestación de servicios de salud, es por esto que se ha incorporado a la revisión de la literatura artículos relacionados con problemas de localización y asignación para la cadena de suministro de sangre.

Şahin et al. (2007) formulan varios problemas matemáticos (MILP) para abordar los aspectos de localización– asignación de los servicios de sangre en Turquía basados en una estructura jerárquica. Esto con el objetivo de aumentar a nivel nacional los servicios de sangre, que es una parte integral del sistema nacional de atención de salud. El problema fue considerado como un sistema jerárquico de 2 niveles en el que los centros regionales de sangre son instalaciones de nivel superior, mientras que los centros de sangre, estaciones de sangre y unidades móviles son las instalaciones de nivel inferior. Se descompone el modelo matemático en tres sub-problemas. El primero de ellos es formulado mediante un problema de p - q -median jerárquico de dos niveles, el cual minimiza el total de las distancias promedios ponderadas por población entre las instalaciones de servicios de sangre; entre las instalaciones de servicio y los puntos de demanda de esta. El segundo sub-problema se formula a partir de un modelo de set-covering, cuyo objetivo es encontrar el número mínimo de estaciones de sangre para que cada punto de demanda este cubierto por al menos una instalación dentro de una distancia o tiempo de servicio máximo dado. Finalmente, para ayudar a aumentar aún más el nivel de servicio, se formuló un modelo de programación de enteros como el tercer sub-problema 3 para redistribuir las unidades móviles a cada región de servicio de sangre.

Nagurney et al. (2012) introdujo un modelo de programación lineal (LP) bi-objetivo para la localización de sistemas de bancos de sangre. La ubicación de las instalaciones de recolección y los laboratorios, además de los centros de distribución y los hospitales, se determinó a través del modelo de manera que se obtuvieran la asignación óptima, los riesgos de suministro y el

costo de los desechos. Se consideran como objetivo, minimizar los costos totales, incluidos el costo de operación, el costo de penalización por pérdida y los costos de demandas insatisfechas, además de los riesgos totales de cada ruta.

Zahiri et al. (2015) presentan un modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP) para tomar decisiones estratégicas y tácticas de un sistema de recolección y distribución de sangre. El cual posee sitios fijos de recolección con un costo mayor que los sitios temporales, donde estos últimos al final de cada periodo, deben enviar las donaciones a las instalaciones fijas. El modelo propuesto determina las ubicaciones óptimas de los sitios fijos en el horizonte de planificación, las instalaciones temporales en cada periodo, la cantidad óptima de recintos requeridos y la asignación de zonas de clientes a estos. El objetivo de centrarse en el horizonte de planificación de varios periodos es para reducir los costos totales, el costo de reubicación de instalaciones temporales en periodos sucesivos, costo de enviar la sangre y el costo de extracción de esta a los sitios de donación.

Otro de los artículos estudiados en esta revisión, es la planificación del transporte dentro de una cadena de suministro para muestras de sangre, que comprende clínicas y laboratorios. Elalouf et al. (2018) desarrollan un modelo de programación de enteros mixtos (MILP) que determina el número de vehículos y la secuencia de clínicas visitadas por cada uno de ellos. Debido a la complejidad del problema NP-hard y para obtener una solución óptima en un tiempo razonable se realiza una heurística de procedimiento de búsqueda (advanced heuristic), basado en 3 algoritmos (Basic heurístico, tabu search y búsqueda numérica).

Zahiri and Pishvae (2017) direccionan el diseño de la cadena de suministro de sangre considerando la compatibilidad del grupo sanguíneo. El objetivo es un modelo matemático de programación lineal entero mixto (MILP) bi-objetivo que es desarrollado para minimizar los costos totales como también maximizar la demanda insatisfecha. Debido a la incertidumbre de algunos parámetros de entrada, dos modelos de programación robustos son propuestos, basados en medidas de credibilidad. Las principales contribuciones de esta investigación a diferencia de otras publicaciones son que se diseña una red multi-periodo con fluctuaciones

en suministro y demanda, se considera la caducidad en la derivación de componentes como también la compatibilidad ABO.

La perecibilidad de los productos sanguíneos y la incertidumbre en las cantidades demandadas complican el manejo del suministro de sangre para los centros de sangre. Cheraghi et al. (2017) aborda un modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP) para la planificación de producción de plaquetas sanguíneas al tiempo que integra los procesos de extracción de sangre, así como la producción / prueba, el control de inventario y la distribución. El problema se aborda con el objetivo de minimizar el costo total de la cadena de suministro. Se destaca que en esta investigación se emplea un método de programación robusto debido a la incertidumbre de la demanda de componentes sanguíneos.

Baş et al. (2018) realizan un balance de producción de diferentes tipos de sangre diariamente con el fin de proporcionar el suministro constante en el sistema de donación. Se propone un marco para la reserva de citas que representa tanto los donantes reservados como los que llegan sin reserva previa. Esto consiste en un modelo de programación lineal entero mixto (MILP) para pre-asignar intervalos de tiempo a los diferentes grupos sanguíneos y una política de priorización para asignar los espacios pre-asignados. El enfoque propuesto se ha aplicado con éxito al caso real de un gran centro de recolección de sangre que opera en Italia, AVIS de Milán, cuyos resultados confirman la capacidad del enfoque para equilibrar la producción de cada tipo de sangre diariamente.

Habibi-Kouchaksaraei et al. (2018) plantean un modelo robusto cuyo propósito es determinar el número con la ubicación de instalaciones temporales y fijas que podrían establecerse después de una catástrofe para una cadena de suministro de sangre, tomando en consideración 3 etapas: fuente de suministro, procesamiento y distribución. Se desarrolla una función bi-objetivo, minimizando los costos totales y maximizando la demanda satisfecha, además se determina la estrategia de suministro y distribución de sangre para minimizar los costos de la red y la escasez de esta.

Eskandari-Khanghahi et al. (2018) desarrollan un modelo de programación Lineal de Enteros

Mixtos (MILP) para una cadena de suministro de sangre sostenible de múltiples períodos y objetivos. Los componentes considerados en este estudio son grupos de donantes, centros de recolección de sangre, centros de distribución y hospitales como puntos de demanda. La minimización del costo total, los efectos ambientales, además de la maximización de los efectos sociales, se consideran como los objetivos para aumentar la eficiencia de la red. Luego, a partir del método ε -restricción se utiliza para convertir el modelo matemático multi-objetivo a uno mono objetivo. Para validar el modelo propuesto, se investigan algunos problemas de prueba; para los de gran tamaño, se proporciona un algoritmo meta-heurístico, *simulated annealing* (SA) para resolver el modelo y se compara el rendimiento con el algoritmo de búsqueda *Harmony Search* (HS).

Posterior a ello Heidari-Fathian and Pasandideh (2018) consideran el tema de la sostenibilidad en el diseño de una red de cadena de suministro de sangre mediante la presentación de un modelo de programación matemática de enteros mixtos con múltiples objetivos que apunta a minimizar simultáneamente el costo total de la red de cadena de suministro y los impactos ambientales totales de las actividades de la red de la cadena de suministro. Como la naturaleza del suministro de sangre por parte de los donantes y las demandas de los productos sanguíneos son inciertas, en el modelo se aplica un enfoque de optimización sólido para hacer frente a este tipo de incertidumbre. Para convertir el modelo de objetivo múltiple propuesto en uno único, se utiliza el método de función de objetivo acotado. Luego, como el modelo matemático presentado es un modelo de programación lineal de enteros mixtos complicados, se propuso un algoritmo basado en el enfoque de relajación *Lagrangiano* para resolver el modelo.

3.2. Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP)

Cuando en un modelo se incorpora relaciones no lineales (en la función objetivo o en las restricciones) se obtiene un modelo de Programación No-lineal, el cual normalmente es más complejo de solucionar.

Si el problema incluye variables discretas se puede distinguir entre problemas No Lineales con variables enteras (MINLP) del inglés *Mixed Integer (non) Linear Programming*.

Cetin and Sarul, 2009 realizan un modelo de programación de objetivo no lineal binario, el cual se formula bajo un marco multi-objetivo, para la ubicación de bancos de sangre entre hospitales o clínicas. El modelo es un híbrido entre el modelo de localización discreta y el método de centro de gravedad de modelos de ubicación continua, con tres objetivos; minimizar el costo total fijo de los bancos de sangre de ubicación, la distancia recorrida total entre los bancos de sangre y hospitales y un índice de desigualdad como mecanismo de equidad para las distancias. Los objetivos descritos a través del problema de optimización multi-objetivo son resuelto generando soluciones eficientes mediante la resolución de un problema de programación matemática con un único objetivo, minimizando a través del método de la suma ponderada, restringiendo a una región específica dentro del área geográfica la ubicación de los bancos de sangre, satisfaciendo la demanda que requiere la población de dicho suministro. Luego Elahi and Franchetti (2015) proponen un modelo matemático no lineal (MINLP) multi-objetivo para la planificación de la cadena de suministro de salud y gestión de inventarios con productos perecibles, en múltiples periodos de pedido. Esto reducirá el costo de inventario, ya sea evitando la necesidad de descartar el inventario obsoleto o devolviendo el producto a los fabricantes o proveedores. El segundo objetivo es considerar maximizar los beneficios totales de los distribuidores mayoristas y minimizar las emisiones de CO_2 a los sitios de transporte y en el traslado de productos a los clientes en orden de hacer una cadena de suministros de cuidados de salud más sustentable. Para determinar una solución óptima se utiliza un método de algoritmo genético.

El principal propósito de la investigación realizada por Yousefi Nejad Attari et al. (2017) fue formular un modelo bi-objetivo de programación no Lineal Entero Mixto (MINLP) para el suministro de productos sanguíneos de dos niveles. El primero minimiza los costos de desperdicio y escasez de productos en los hospitales y el segundo minimiza la máxima demanda insatisfecha de diferentes productos entre las demandas hospitalarias suministradas por los

centros de transfusión de sangre. En este artículo se utiliza técnicas de linealización para el modelo no lineal, reduciendo la complejidad del problema. Adicionalmente a través de la programación para objetivos de selección múltiple (MCGP) se convierte el modelo bi-objetivo en uno de objetivo único. Este modelo fue probado en una cadena de suministro con un tipo de producto sanguíneo. Por lo tanto, se puede implementar en una red de suministro con múltiples productos sanguíneos.

3.3. Programación Dinámica Estocástica (SDP)

El desafío de la producción y la gestión del inventario de plaquetas sanguíneas (PLT) es el requisito para satisfacer las demandas altamente inciertas. van Dijk et al. (2009) combina la programación dinámica estocástica con la simulación para desarrollar un enfoque hacia el problema de inventario de las PLT. La programación dinámica estocástica (SDP) es una técnica de optimización matemática para problemas en los que las decisiones se toman periódicamente. Las unidades con las que trabajan son los llamados pools de plaquetas, que es la cantidad generalmente requerida para un paciente. El método SDP se utiliza para minimizar los costos. Aquí se centran en la conocida búsqueda del equilibrio entre evitar la caducidad de las plaquetas y la escasez de estas. Haijema et al. (2009) amplían el enfoque que desarrollaron incluyendo roturas irregulares de producción como son las fechas de semana santa o navidad. Ellos encuentran que, a pesar de estas interrupciones, una regla de orden simple sigue siendo casi óptima y también en estas fechas de descanso, el vencimiento y la escasez pueden mantenerse por debajo del 1 %. También se observa que en los periodos sin producción (no estacionarios) pueden integrarse en los periodos de producción (estacionarios).

El comportamiento estocástico de la demanda es un aspecto desafiante en muchas cadenas de suministro sobre todo con las que poseen caducidad. Además, en la cadena de suministro de sangre, la entrada al inventario del banco de sangre que se ubica en el primer escalón ocurre por donaciones que tienen un comportamiento estocástico e imponen una complejidad e in-

certidumbre adicionales a los problemas de la cadena de suministro.

Dillon et al. (2017) proponen un modelo de programación estocástica de dos etapas para definir políticas óptimas de revisión periódica para la gestión de inventarios de uno de los componentes derivados del proceso de producción de la sangre como son los glóbulos rojos. Centrándose este artículo en minimizar los costos operativos, la escasez de sangre y el desperdicio debido a obsolescencia de esta, teniendo en cuenta la perecibilidad e incertidumbre de la demanda. Posterior a ello Hosseinifard and Abbasi (2018) plantean políticas de centralización de inventario en bancos de sangre, minimizando los costos de escasez y obsolescencia tanto en el banco de sangre como en hospitales, mejorando el rendimiento de la cadena de suministro de sangre cuando la reposición es estocástica.

3.4. Simulación

La simulación se aplica a menudo en los casos que es difícil encontrar una solución óptima. Se utiliza principalmente porque computacionalmente no sufre grandes problemas, permitiendo resultado detallados. El uso de la simulación conduce a la detección de políticas casi óptimas, que pueden ser suficientes en muchos casos donde la toma de decisiones óptimas es imposible o poco práctica Beliën and Forcé (2012).

La mayoría de los trabajos citados en esta revisión incluyen eventos de simulación discretos. Kopach et al. (2008) construye un sistema de inventario para glóbulos rojos con dos tasas de demandas. Su principal modelo es un método de teoría de colas y el uso de técnicas de cruce de nivel, el cual determina una política óptima para apoyar los siguientes criterios: niveles de demanda múltiples (de emergencia y discrecionales), niveles de servicio, costos, así como los objetivos tradicionales de minimizar la escasez y el vencimiento (igualar la oferta y la demanda). Utilizando la simulación, el modelo se comparó con las técnicas de control actuales y se demostró que era efectivo utilizando datos reales obtenidos de Canadian Blood Services.

Katsaliaki (2008) recomiendan políticas alternativas, que se prueban en un modelo de simula-

ción, hacia una gestión más rentable de la cadena de suministro de sangre en el Reino Unido. Con el uso de datos primarios y secundarios del Servicio Nacional de Sangre (NBS) y los hospitales suministrados, se lleva a cabo un análisis estadístico y un modelo detallado de simulación de eventos discretos de una parte vertical de la cadena de suministro de sangre del Reino Unido para evaluar e identificar buenas prácticas de ordenamiento, inventario y distribución.

Utilizando metodologías del ámbito de gestión de operaciones para el análisis de procesos de centros de sangre, Baesler et al. (2011) a través de procesos de simulación determinaron la capacidad máxima de producción, así como los cambios necesarios para que en el mediano plazo aumente su capacidad productiva, debido a que las políticas públicas de Chile apuntan a la centralización de los centros de sangre en el país. Luego Baesler et al. (2014) se centran en el almacenamiento de componentes sanguíneos, debido a que hay productos perecibles, por lo tanto, las políticas de inventario son cruciales para reducir la escasez y las pérdidas de productos. Para esto se utilizó la simulación con eventos discretos, replicando en el modelo las actividades de la cadena de suministro de sangre, tales como los que involucran donación, testeo, producción, gestión de inventario y distribución. Este estudio demuestra que la simulación es una alternativa que se puede usar para modelar componentes de inventario en centros de sangre. Una selección responsable de variables de inventario puede mejorar la capacidad del sistema para responder a los requisitos finales de transfusión del paciente.

Simonetti et al. (2014) desarrollan un modelo de simulación de stock y suministro de sangre en EE. UU para obtener estimaciones de la disponibilidad diaria de sangre por tipo de grupo sanguíneo. El modelo simuló el impacto potencial en el suministro de la utilización de diferentes prácticas de administración de sangre para transfusión: primero en entrar, primero en salir (FIFO), utilizando primero las unidades de glóbulos rojos almacenadas más antiguas; no es FIFO probablemente el más viejo, seleccionando preferentemente sangre más vieja; y no FIFO probablemente el más nuevo, seleccionando preferentemente sangre más joven. De esta forma la investigación realizada permite sugerir la mejor práctica a utilizar para el sistema de

administración de sangre actual y con ello pueda servir como herramienta para el manejo de esta.

Dentro de la literatura estudiada, se observa que uno de los componentes sanguíneos más utilizado en las transfusiones sanguíneas, son los glóbulos rojos (RBC), los cuales tienen una vida útil máxima (MSL) de 42 días aproximadamente. Con este fin Duan and Liao (2014) sugieren administrar el inventario de RBC con una MSL más restrictiva, proponiendo un nuevo marco de optimización de simulación (SO) incorporando un algoritmo metaheurístico híbrido (TA-TS) para la gestión de inventario de la cadena de suministro de glóbulos rojos (RBC) con compatibilidad de grupo sanguíneo ABO en un tiempo de cálculo aceptable. La eficacia del marco propuesto se evalúa en detalle para un sistema con un solo centro de sangre y un hospital, en el cual la vida útil máxima de las unidades de RBC se acorta a 7, 14 y 21 días. Luego la mejor solución encontrada, se simula durante un periodo de tiempo suficiente para estimar el efecto a largo plazo de acortar la MSL en el inventario de este componente sanguíneo.

Osorio et al. (2015) presentan un modelo que combina simulación de eventos discretos (DES) con un modelo de programación lineal entera (ILP) para apoyar las decisiones en la cadena de suministro de sangre, incorporando recolección, producción, almacenamiento y distribución de componentes sanguíneos. El modelo incluye varias características como la cantidad de donantes requeridos por grupo sanguíneo cada día, múltiples productos, diferentes métodos de recolección y producción.

Zahraee et al. (2015) investigan la cadena de suministro de sangre a través de simulación dinámica y un método Taguchi para que el sistema sea robusto y eficiente. Se controlan 4 factores principales: demanda variable, tasa de donantes, nivel de inventario máximo, nivel de inventario mínimo y políticas de entrega de sangre. La eficiencia de la cadena de suministro es la seguridad del paciente.

3.5. Sistema de soporte a las decisiones (DSS)

Los DSS (por sus siglas en inglés Decision Support System) son sistemas informáticos interactivos que ayudan a los encargados a tomar decisiones utilizando datos y modelos para resolver problemas no estructurados (Sprague, 1982).

El DSS está diseñado expresamente para facilitar el proceso de toma de decisiones y planear los procesos; responde puntualmente para realizar las necesidades de funcionarios con poder de decisión en corto y a largo plazo; y es apoyado con inteligencia para tomar la mejor decisión.

La adecuada combinación de los DSS, tecnología y los procesos del cuidado de la salud proporcionan a los pacientes, administradores y personal médico mayor calidad en la información para mejorar la toma de sus decisiones. Un ejemplo de ello es la publicación del año 2007 donde en Inglaterra se analizaron las pólizas para administrar el inventario de sangre de un hospital que le provee el banco regional de sangre. El objetivo del proyecto era mejorar los procedimientos y resultados modelando la cadena de suministro del hospital, desde el donador hasta el receptor. Esto con el objetivo de evitar que se agote la sangre, desperdicios de esta, mejorar los procedimientos y reducir costo a través de una mejor coordinación entre los proveedores y el usuario.

Se incluye además que los bancos de sangre del hospital determinan los niveles de reserva óptimos de Glóbulos Rojos (GRs) según sus propias estimaciones de la demanda potencial. Una orden es colocada en el Centro local cuando el inventario es más bajo del punto de orden predeterminado, o cuando los productos raros no sostenidos en la reserva son solicitados para pacientes particulares. Siendo los médicos del hospital los responsables de la cantidad de productos de sangre requeridos y consumidos para cada paciente.

Otro problema importante abordado en esta investigación es en el proceso de transfusión la substitución o las incompatibilidades. Idealmente el paciente debe de recibir la transfusión con su mismo tipo de sangre, pero esto no es posible en todos los casos. Cuando el tipo de

sangre del paciente no está disponible en el momento que se requiere, un tipo de sangre compatible debe de ser proveído. Por ejemplo, un paciente con sangre A+ puede recibir sangre de un paciente A-, O- u O+. Por lo tanto, en este caso de estudio Katsaliaki and Brailsford (2007) construyeron un modelo de simulación para probar en un ambiente libre de riesgos los efectos de varias políticas, manejando la cadena de suministro de productos de sangre. El modelo capturó todas las actividades de la donación a la transfusión y mostró como algunas modificaciones en las prácticas corrientes de los centros de sangre, los médicos y los bancos de sangre de los hospitales de tamaño medio podían mejorar los niveles de servicio, pudiendo el sistema enfrentarse fácilmente con futuras amenazas de demanda aumentada o suministro disminuidos. Posterior Ghandforoush and Sen (2010) presenta un prototipo de sistema de apoyo a la decisión (DSS) en la producción de plaquetas (PLT) y la programación móvil para un centro de sangre regional. Se basa en un sistema de cadena de suministro eficaz para la producción de plaquetas y la programación implica los siguientes componentes: Planificación de materiales del centro de sangre utilizando móviles de sangre, tabla de demanda para las plaquetas en el centro regional, producción de estas y otros componentes, distribución de plaquetas a los hospitales y transfusión de este componente sanguíneo. Para implementar un DSS en cadena de suministro se incluye una base de datos de un banco regional de sangre, un solucionador de programación lineal entera (ILP), una interfaz de usuario, y las interfaces de datos a los hospitales y centros de donantes. Uno de los elementos clave del DSS es un modelo de optimización de números enteros no convexos que ayuda al administrador regional del centro de sangre a programar el transporte de sangre entera de los sitios de recolección al centro de procesamiento regional. Este modelo propuesto se transforma en un problema lineal 0-1 usando un proceso de conversión de dos pasos, y cuya resolución alcanza la solución óptima para los datos de la prueba. Los resultados sugieren que el DSS propuesto satisface mejor la demanda diaria produciendo un plan de producción superior y un horario de asignación móvil.

3.6. Estructura de artículos estudiados

En tabla 3.2 los artículos son clasificados considerando principalmente modelos integrados, el horizonte de planificación, el tipo de producto sanguíneo y el enfoque del modelo propuesto. Dentro de las investigaciones estudiadas, los autores Cheraghi et al. (2017) al abordar un modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP) para la planificación de producción de plaquetas sanguíneas el control de inventario y la distribución de estos, permiten tomar de base este artículo para desarrollar la investigación descrita en este documento. Agregando al estudio el problema de localización de centros distribuidores.

De acuerdo a los artículos revisados en la literatura de los autores citados, este documento propone llenar la brecha de investigación existente en este tipo de problemas, utilizando el método de solución exacto, a través de Programación Lineal Entera Mixta (MILP), con un enfoque integrado hacia un horizonte de planificación *estratégico* para la cadena de suministro de sangre, dado que uno de los objetivos de esta investigación es localizar centros de distribución de sangre para minimizar los tiempos de entrega de los componentes sanguíneos a los recintos hospitalarios, significando un horizonte de tiempo a largo plazo.

El alcance de este trabajo se concentra en la producción de unidades de bolsas con Glóbulos Rojos, en varios periodos de tiempo, permitiendo reducir la caducidad y asegurando un stock permanente que satisfaga las necesidades de la población ante un eventual catástrofe o demanda colectiva.

A continuación, se presentan las siguientes contribuciones que diferencian este trabajo de otros documentos existentes en la literatura de cadena de suministro de sangre.

1. Planificación integrada para la producción de bolsas con Glóbulos Rojos (GRs) bajo incertidumbre de donantes de Sangre, la cual es bastante irregular.
2. Proyectar la cantidad de Donantes necesarios para incentivar el marketing y la captación de donantes a partir de las demandas requeridas en los establecimientos Hospitalarios

de Glóbulos Rojos (GRs), siendo esta estocástica.

3. Localización de Centros de Distribución para satisfacer la demanda de bolsas con Glóbulos Rojos (GRs), reduciendo la caducidad y asegurando stock permanente para la población.
4. Asegurar niveles de inventario adecuados en centro productor, centros de distribución y establecimientos hospitalarios para cubrir las demandas solicitadas.
5. Disminuir los costos totales de la cadena de suministro de sangre, entre los que se pueden mencionar costos de transporte, costos de almacenamiento y costos de abrir centros de distribución para satisfacer a los pacientes que requieran de producto sanguíneos.



Tabla 3.2: Estructura de artículos estudiados

Autores	Título de Artículo Científico	Horizonte de Planificación			Tipo de Producto Sanguíneo				Enfoque del Modelo					Método de Solución		Periodo de Tiempo	
		Estratégico	Táctico	Operacional	Sangre Total	Glóbulos Rojos	Plaquetas	Plasma	ILP ¹	MILP ²	MINLP ³	SDP ⁴	DSS ⁵	SIMULACIÓN	Exacto	Metaheurístico	Singular
Şahin et al. (2007)	Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services.	•			•												•
Katsaliaki and Brailsford (2007)	Using simulation to improve the blood supply chain.		•		•												•
Kopach et al. (2008)	Tutorial on constructing a red blood cell inventory management system with two demand rates.		•			•							•				•
Katsaliaki (2008)	Cost-effective practices in the blood service sector.		•										•				•
Cetin and Sarul (2009)	A Blood Bank Location Model: A Multiobjective Approach	•			•												•
van Dijk et al. (2009)	Blood platelet production: a novel approach for practical optimization.		•										•				•
Haijema et al. (2009)	Blood platelet production with breaks: optimization by SDP and simulation.			•									•				•
Ghandforoush and Sen (2010)	A DSS to manage platelet production supply chain for regional blood centers.			•									•				•
Baesler et al. (2011)	Proceso logístico productivo de un centro de sangre regional: modelamiento y análisis.		•		•	•	•	•					•				•
Nagurney et al. (2012)	Supply chain network operations management of a blood banking system with cost and risk minimization.	•				•	•	•	•								•
Baesler et al. (2014)	Analysis of inventory strategies for blood components in a regional blood center using process simulation.		•		•	•	•	•					•				•
Simonetti et al. (2014)	A stock-and-flow simulation model of the US blood supply.		•		•	•							•				•
Duan and Liao (2014)	Optimization of blood supply chain with shortened shelf lives and ABO compatibility.		•	•	•								•				•
Zahiri et al. (2015)	Blood collection management: Methodology and application				•												•
Elahi and Franchetti (2015)	A Multi-Objective Proposed Mathematical Model for a Health Care Supply Chain with Perishable Product.				•												•
Zahraee et al. (2015)	Efficiency improvement of blood supply chain system using Taguchi method and dynamic simulation.		•		•								•				•
Elalouf et al. (2018)	Optimization of blood sample collection with timing and quality constraints.		•		•												•
Cheraghi et al. (2017)	Integrated planning for blood platelet production: a robust optimization approach.	•	•		•												•
Zahiri and Pishvae (2017)	Blood supply chain network design considering blood group compatibility under uncertainty.	•	•		•												•
Yousefi Nejad Attari et al. (2017)	Presenting a stochastic multi choice goal programming model for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals.	•	•		•												•
Dillon et al. (2017)	A two-stage stochastic programming model for inventory management in the blood supply chain	•	•		•												•
Baş et al. (2018)	An appointment scheduling framework to balance the production of blood units from donation.	•	•		•												•
Habibi-Kouchaksaraei et al. (2018)	Designing a bi-objective multi-echelon robust blood supply chain in a disaster	•	•		•												•
Heidari-Fathian and Pasandideh (2018)	Green-blood supply chain network design: Robust optimization ,bounded objective function and Lagrangian relaxation.	•			•	•	•	•	•								•
Eskandari-Khanghahi et al. (2018)	Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty	•			•												•
HosseiniFard and Abbasi (2018)	The inventory centralization impacts on sustainability of the blood supply chain	•			•								•				•
Este artículo	Planificación y programación de la producción en Centro de Sangre Concepción	•	•	•		•											•

¹ Programación Lineal Entera

² Programación Lineal Entera Mixta

³ Programación no Lineal Entera Mixta

⁴ Programación Dinámica Estocástica

⁵ Simulación y Sistema de Soporte de Decisiones

Capítulo 4

Formulación matemática del problema

4.1. Definición de parámetros y variables de decisión.

En esta sección se definen los conjuntos, parámetros y las variables de decisión del modelo generalizado de planificación para la producción del Centro de Sangre de Concepción.

Los parámetros y variables de decisión relevantes para el problema de planificación de producción se especifican a continuación, mientras que el modelo de programación lineal se presenta en la Sección 4.2.



Definición de conjuntos.

Se definen los conjuntos y subíndices asociados al modelo de programación matemática propuesto:

- T : Periodos, $t = 0, \dots, T$.
- D : Centros de distribución, $d = 1, \dots, D$.
- H : Hospitales, $h = 1, \dots, H$.
- G : Grupos Sanguíneos, $g = 1, \dots, G$.
- S : Sitios de donación, $s = 1, \dots, S$.

Parámetros.

Los parámetros del modelo están asociados a las características y planificación del año 2017 en el Centro de Sangre Concepción. Estos se estiman a partir de la experiencia de los centros de sangre y profesionales dedicados a las operaciones de producción y distribución de componentes sanguíneos.

- d_{ght} : Demanda de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g requeridos en el hospital h en el periodo t .
- m : Constante de valor alto, que corresponde a la sumatoria de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g requeridos en el hospital h en el periodo t .
- c_{gt} : Costo de producción de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g en el periodo t .
- c_{gt}^{inv} : Costo de inventario del centro productor para almacenar bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g durante el periodo t .
- c_{gdt}^{inv} : Costo de inventario de los centros distribuidores d para almacenar bolsas de glóbulos rojos del grupo sanguíneo g en el periodo t .
- c_{ght}^{inv} : Costo de inventario de los hospitales h para almacenar bolsas de glóbulos rojos del grupo sanguíneo g en el periodo t .
- c_{gdt} : Costo de enviar bolsas de glóbulos rojos del grupo sanguíneo g desde el centro productor a centros distribuidores d durante el periodo t .
- c_{gdht} : Costo de enviar bolsas de glóbulos rojos del grupo sanguíneo g desde los centros distribuidores d hasta los hospitales h durante el periodo t .
- c_{sgt} : Costo de transportar bolsas de sangre desde los sitios de donación s del grupo sanguíneo g durante el periodo t .
- c_{ght}^{ins} : Costo de demanda insatisfecha de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g para los hospitales h durante el periodo t .
- f_d : Costo de abrir un centro de distribución d para todo el horizonte de planificación.

- q_d : Capacidad de almacenamiento de las bolsas con glóbulos rojos del centro distribuidor d .
- k_h : Capacidad de almacenamiento de las bolsas con glóbulos rojos del hospital h .
- cap_t : Capacidad de producción de bolsas con glóbulos rojos del centro productor en el periodo t .
- cap_t^{inv} : Capacidad de almacenamiento de bolsas con glóbulos rojos del centro productor en el periodo t .
- cap_{st}^{inv} : Capacidad de almacenamiento de bolsas con sangre donada desde los sitios de donación s durante el periodo t .
- α : Porcentaje de pérdida al procesar las bolsas de sangre entera.

Variables de decisión.

Las variables de decisión del modelo se clasifican en dos tipos. El primer tipo corresponde a las variables asociadas a los problemas de planificación de la producción. El segundo tipo corresponde a las variables relacionadas con asignación y localización.

- U_{sgt} : Bolsas de sangre del grupo sanguíneo g recolectadas en los sitios de donación s durante el periodo t .
- P_{gt} : Número de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g producidos en el centro productor durante el periodo t .
- I_{gt} : Inventario de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g en el centro productor durante el periodo t .
- Y_{gdt} : Cantidad de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g enviados desde el centro productor al centro de distribución d durante el periodo t .
- I_{gdt} : Inventario de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g en cada centro de distribución d durante el periodo t .

- Z_{gdht} : Cantidad de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g enviados desde el centro de distribución d al hospital h durante el periodo t .
- I_{ght} : Inventario de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g en cada hospital h durante el periodo t .
- R_{ght} : Demanda insatisfecha de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g en cada hospital h durante el periodo t .
- A_{dh} : 1 si el hospital h es asignado al centro distribuidor d ; 0 en caso contrario para todo el horizonte de planificación.
- D_d : 1 si se abre el centro de distribución d ; 0 en caso contrario.

4.2. Modelo Matemático

Una vez definidos los conjuntos, subíndices, parámetros y variables de decisión, se presenta el modelo de programación matemática propuesto:

Función Objetivo

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T (c_{gt} P_{gt} + c_{gt}^{inv} I_{gt}) + \sum_{g=1}^G \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T c_{gdt}^{inv} I_{gdt} + \sum_{g=1}^G \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T c_{ght}^{inv} I_{ght} \\
 & + \sum_{g=1}^G \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T c_{gdt} Y_{gdt} + \sum_{g=1}^G \sum_{d=1}^D \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T c_{gdht} Z_{gdht} + \sum_{d=1}^D f_d D_d \\
 & + \sum_{s=1}^S \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T c_{sgt} U_{sgt} + \sum_{g=1}^G \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T c_{ght}^{ins} R_{ght}
 \end{aligned}$$

La función objetivo minimiza los costos de producir y los costos de almacenar bolsas de Glóbulos Rojos (GRs) del grupo sanguíneo g en el centro productor en el periodo t , costos de inventario para bolsas de GRs del grupo sanguíneo g tanto en los centros distribuidores d como hospitales h en el periodo t , costo de enviar bolsas con GRs del grupo sanguíneo g desde el centro productor a los centros distribuidores d durante el periodo t , costo de enviar bolsas con GRs del grupo sanguíneo g desde los centros distribuidores d a los hospitales h en el periodo t , costos de abrir centros de distribución d , costos de transportar bolsas de sangre desde los sitios fijos de donación s hasta el centro productor durante el periodo t y costos de demanda insatisfecha de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g para los hospitales h durante el periodo t .

Restricciones.

$$I_{gt} = P_{gt} + I_{gt-1} - \sum_{d=1}^D Y_{gdt}, \quad \forall g \in G, \quad \forall t \in T \quad (1)$$

Restricción (1) Balance de la cantidad de bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g enviados desde el centro productor a centros de distribución d durante el periodo t .

$$I_{gdt} = I_{gdt-1} + Y_{gdt} - \sum_{h=1}^H Z_{gdht}, \quad \forall g \in G, \quad \forall d \in D, \quad \forall t \in T \quad (2)$$

Restricción (2) Balance del inventario con bolsas de glóbulos rojos del grupo sanguíneo g en cada centro de distribución d en el periodo t .

$$I_{ght} = I_{ght-1} + \sum_{d=1}^D Z_{gdht} - d_{ght}, \quad \forall g \in G, \quad \forall h \in H, \quad \forall t \in T \quad (3)$$

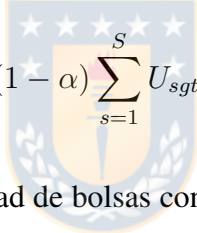
Restricción (3) determina el balance con bolsas de glóbulos rojos del grupo sanguíneo g en cada hospital h en el periodo t .

$$\sum_{d=1}^D A_{dh} = 1, \quad \forall h \in H \quad (4)$$

Cada hospital h es asignado a un centro de distribución d , como se define en la restricción (4).

$$\sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T Y_{gdt} \leq mD_d, \quad \forall d \in D \quad (5)$$

Restricción (5) determina que las bolsas con glóbulos rojos del grupo sanguíneo g , sólo pueden ser enviados desde el centro productor a un centro de distribución d abierto durante el periodo t .



$$(1 - \alpha) \sum_{s=1}^S U_{sgt} \geq P_{gt}, \quad \forall g \in G, \quad \forall t \in T \quad (6)$$

Restricción (6) determina la cantidad de bolsas con sangre donada del grupo sanguíneo g en todos los sitios de donación d durante el periodo t .

$$\sum_{g=1}^G U_{sgt} \leq cap_{st}^{inv}, \quad \forall s \in S, \quad \forall t \in T' \quad (7)$$

Restricción (7) denota la capacidad de almacenamiento de bolsas con sangre que posee cada sitio de donación fijo s durante el periodo t .

$$A_{dh} \leq D_d, \quad \forall h \in H, \quad \forall d \in D \quad (8)$$

Sólo se pueden asignar un hospital a un centro de distribución d abierto, como se define en la restricción (8).

$$\sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T Z_{gdht} \leq \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T d_{ght} * A_{dh}, \quad \forall d \in D, \quad \forall h \in H \quad (9)$$

Si se asigna el hospital h al centro de distribución d , entonces se puede enviar unidades de glóbulos rojos durante el horizonte de planificación t , como se presenta en la restricción (9).

$$\sum_{g=1}^G P_{gt} \leq cap_t, \quad \forall t \in T \quad (10)$$

Restricción (10) determina la capacidad del centro productor de producir bolsas con glóbulos rojos de todos los grupos sanguíneos g durante el periodo t .



$$\sum_{g=1}^G I_{gt} \leq cap_t^{inv}, \quad \forall t \in T \quad (11)$$

Restricción (11) limita la capacidad de almacenamiento del centro productor en inventario de bolsas con glóbulos rojos de todos los grupos sanguíneos g durante el periodo t .

$$\sum_{g=1}^G I_{gdt} \leq q_d * D_d, \quad \forall t \in T, \quad \forall d \in D \quad (12)$$

Restricción (12) determinar la capacidad de almacenamiento de los centros distribuidores d de todos los grupos sanguíneos g durante el periodo t .

$$\sum_{g=1}^G I_{ght} \leq k_h, \quad \forall h \in H, \quad \forall t \in T \quad (13)$$

Restricción (13) limita la capacidad de almacenamiento de todos los grupos sanguíneos g en los hospitales h durante el periodo t .

$$D_{ght} - I_{ght-1} + I_{ght} - \sum_{d=1}^D Z_{gdht} \leq R_{ght}, \quad \forall h \in H, \quad \forall t \in T \quad (14)$$

Restricción (14) Balance de demanda insatisfecha de bolsas con glóbulos rojos de todos los grupos sanguíneos g en los hospitales h durante el periodo t .

$$Y_{gdt} \geq 0, \quad \forall g \in G, \quad \forall d \in D, \quad \forall t \in T \quad (15)$$

$$Z_{gdht} \geq 0, \quad \forall g \in G, \quad \forall d \in D, \quad \forall h \in H, \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$U_{sgt} \geq 0, \quad \forall s \in S, \quad \forall g \in G, \quad \forall t \in T \quad (17)$$

$$P_{gt} \geq 0, \quad \forall g \in G, \quad \forall t \in T \quad (18)$$

$$I_{gt} \geq 0, \quad \forall g \in G, \quad \forall t \in T \quad (19)$$

$$I_{gdt} \geq 0, \quad \forall g \in G, \quad \forall d \in D, \quad \forall t \in T \quad (20)$$

$$I_{ght} \geq 0, \quad \forall g \in G, \quad \forall h \in H, \quad \forall t \in T \quad (21)$$

$$R_{ght} \geq 0, \quad \forall g \in G, \quad \forall h \in H, \quad \forall t \in T \quad (22)$$

$$A_{dh} \in \{0, 1\}, \quad \forall d \in D, \quad \forall h \in H \quad (23)$$

$$D_d \in \{0, 1\}, \quad \forall d \in D \quad (24)$$

Restricción (15) a (24) definen el dominio de las variables de decisión.

Capítulo 5

Resultados Computacionales

En esta sección se evalúa la eficiencia del modelo matemático, el cual se ejecuta mediante un computador Intel Core (i7) ,8 GB de RAM, utilizando el sistema operativo Windows 10, a través del software CPLEX de OPL Studio versión 12.6.

Se desarrolla la programación del problema de planificación de la producción de componentes sanguíneos utilizando el **archivo.mod** en OPL, definiendo parámetros, datos, conjuntos, variables de decisión, función objetivo y restricciones del modelo de programación lineal presentado (Ver Anexo A).

Luego en el **archivo.Dat** de OPL, se definen los valores para los parámetros y conjuntos descritos en el capítulo 4.



5.1. Instancias de prueba

Se realiza una serie de ejemplos numéricos, implementando instancias de prueba como se especifica en tabla 5.1.

Tabla 5.1: Instancias de prueba

Instancia	[T]	[D]	[H]	[G]	[S]
1	2	2	3	1	2
2	2	3	3	2	2

El valor de los parámetros se estimó en base a los datos reales entregados por el Centro de Sangre Concepción en estudio y basándose en el artículo publicado por Zahiri et al. (2015) (ver Tabla 5.2).

Tabla 5.2: Parámetros para Modelo Matemático

Parámetros	Valor	Parámetros	Valor
d_{ght}	$U(1; 25)$	α	0.030
m	sumatoria d_{ght}	c_{gt}	$U(800; 900)$
c_{gt}^{inv}	$U(1; 3)$	c_{gdt}^{inv}	$U(5; 10)$
c_{ght}^{inv}	$U(5; 10)$	c_{gdt}	$U(1; 3)$
c_{gdht}	$U(27000; 363000)$	c_{sgt}	$U(1000; 308000)$
f_d	$U(30000000; 42000000)$	q_d	300
k_h	100	cap_t	$U(200; 1000)$
cap_t^{inv}	350	cap_s^{inv}	$U(200; 700)$

La primera instancia de prueba se realiza con datos aleatorios, tomando en consideración un horizonte de planificación de 2 semanas, 3 hospitales, 1 grupo sanguíneo y 2 sitios de donación, obteniéndose una solución óptima de 54.381 u.m en un tiempo computacional de 0.14 segundos. De la misma forma a través del software CPLEX de OPL Studio versión 12.6, se obtienen los resultados más relevantes de la programación (Ver tabla 5.3)

Se verifica que la realización de los parámetros calibrados consigue los objetivos del modelo propuesto, que es satisfacer la demanda dada, abrir centros de distribución y almacenar stock de componentes sanguíneos en los distintos lugares a considerar (Centro productor, centros distribuidores y hospitales.)

Tabla 5.3: Resultados MILP para Instancia de Prueba 1

Definiciones	Valor
Restricciones	62
Variables	60
• Binario	8
• Entero	51
• Coeficientes distintos de cero	147
MIP	
• S. Objetivo	54.381 u.m
• Iteraciones	18

La segunda instancia de prueba se realiza con datos aleatorios, tomando en consideración un horizonte de planificación de 2 semanas, 3 hospitales, 2 grupo sanguíneo y 2 sitios de donación y 3 centros distribuidores, obteniéndose una solución óptima de 108.706 u.m en un tiempo computacional de 0.12 segundos.

En la tabla 5.4 se detallan los principales resultados obtenidos de la instancia aleatoria, ejecutados mediante el software CPLEX de OPL Studio versión 12.6.

Tabla 5.4: Resultados MILP para Instancia de Prueba 2

Fuente: Elaboración propia.

Definiciones	Valor
Restricciones	99
Variables	145
• Binario	12
• Entero	132
• Coeficientes distintos de cero	356
MIP	
• S. Objetivo	108.706 u.m
• Iteraciones	59

En la figura 5.1 se puede verificar que la cantidad de bolsas de sangre recolectada en el sitio 1 por el grupo sanguíneo (O^+) equivale a un 3% más de lo producido por el centro productor para el grupo sanguíneo (O^+), esto debido al parámetro α fijado por estándares ministeriales en el factor de pérdida al momento de realizar los análisis respectivos a la sangre. Luego se distribuye la cantidad de bolsas con glóbulos rojos, cumpliendo el balance de las restricciones 2, 3 y 4 del modelo matemático, para finalmente entregar la cantidad de componentes requeridos para satisfacer la demanda de los 3 hospitales representados en esta instancia de prueba.

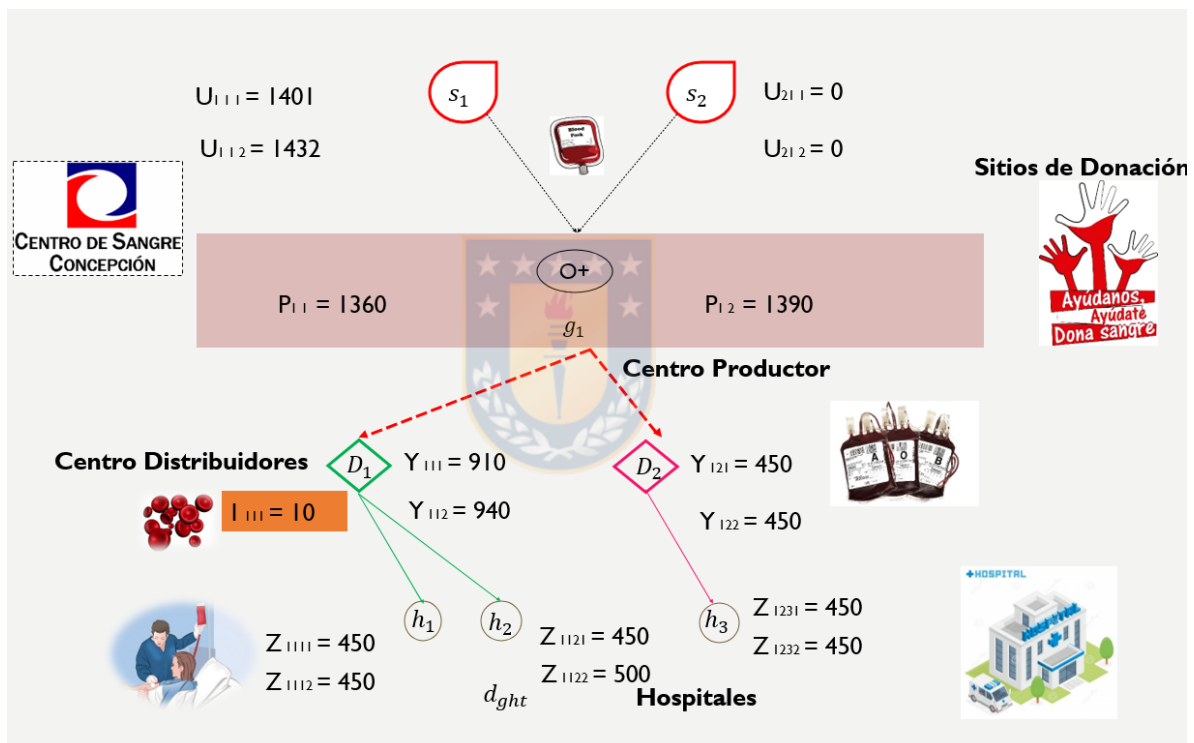


Figura 5.1: Instancia de prueba 1

Fuente: Elaboración Propia

5.2. Instancias con Datos reales

Para determinar la planificación y programación de la producción en el Centro de Sangre Concepción, que permita minimizar el costo total de abastecer a la macroregión-Sur, se tomó como parámetros referenciales, los datos presentados en la tabla 5.5.

La demanda de bolsas con Glóbulos Rojos (GRs) que mantiene un stock óptimo en cada una de las unidades de medicina transfusional en los hospitales en estudio fue realizada en base a los datos entregados de los meses de febrero, mayo y noviembre de 2017 en el Centro de Sangre Concepción, de los 8 grupos sanguíneos más frecuentes en la población chilena.

Los costos de envío de unidades de bolsas con sangre entera desde los sitios de donación al centro productor, el transporte de bolsas con GRs desde el Centro Productor al Centro Distribuidor y desde este a los hospitales, se calculó utilizando las distancias en km de cada uno de ellos y agregándole posterior a ello el costo del combustible por kilómetro recorrido, además de un porcentaje asociado a otros gastos involucrados.

Los costos de inventario del centro productor, distribuidor y hospitales fueron calculados en base a la "Guía para estimación de costos de Regionalización de los Bancos de Sangre"(OMS,2005).

Los costos de demanda insatisfecha fueron calculados en base al transporte de componentes sanguíneos suministrados por los otros tres Centros de Sangre que existen en el país (Valparaíso, Metropolitano y Austral). Estos valores se obtuvieron en base al costo de combustible por kilómetro recorrido, además de otros gastos involucrados.

Finalmente, el costo de abrir un centro distribuidor, es calculado en base a la tasa de donación anual del país, que fluctúa entre 16,9 donantes por cada 1000 habitantes. El valor considera costos de terreno, infraestructura, equipamiento y Recursos Humanos en un año de inversión (OMS,2005).

Tabla 5.5: Parámetros para Modelo Matemático Instancia Real

Parámetros	Valor	Parámetros	Valor
d_{ght}	$U(1; 25)$	α	0.030
m	sumatoria d_{ght}	c_{gt}	$U(800; 900)$
c_{gt}^{inv}	$U(50; 60)$	c_{gdt}^{inv}	$U(30; 50)$
c_{ght}^{inv}	$U(50; 70)$	c_{gdt}	$U(100; 3000)$
c_{gdht}	$U(1000; 7000)$	c_{sgt}	$U(10; 4000)$
f_d	1.790.000	q_d	2700
k_h	$U(400; 500)$	cap_t	$U(2000; 3000)$
cap_t^{inv}	$U(1000; 2500)$	cap_s^{inv}	$U(2000; 3000)$

Se realiza la planificación de la producción para un periodo de tiempo[T] de 52 semanas, considerando 8 sitios de donación de bolsas con sangre (H. Las Higueras, H. Curicó, H. Linares, H. Chillán, H. Victoria, Casa del Donante Concepción y casa del Donante de Maule).

Luego se transportan desde las instalaciones (sitios fijos) hasta el centro productor (CSC). En este se testean y analizan las donaciones de sangre de los 8 grupos sanguíneos más comunes (O^+ , O^- , A^+ , A^- , B^+ , B^- , AB^+ y AB^-), se procesan y se convierten en varios productos sanguíneos, el más significativo en este análisis son los Glóbulos Rojos (GRs). Estos se almacenan en condiciones específicas, para finalmente ser distribuidos a los hospitales en función de la demanda de los pacientes transfundidos (se consideran para la investigación 13 hospitales de la macroregión-Sur).

Se desea abrir centros de distribución, de tal manera de minimizar los costos de distribución de las bolsas con Glóbulos Rojos (GRs) a los recintos hospitalarios (se calibra el modelo con la opción de poder abrir 5 centros de distribución) (Ver Figura 5.2).

Otro punto importante para considerar en los parámetros iniciales del modelo es el porcentaje de pérdida al procesar las unidades de sangre entera (ruptura de bolsa de sangre, pruebas alteradas, entre otras), que en esta oportunidad fue calculado con un 3 %, en base a lo exigido

por los estándares ministeriales de salud del país el año 2016.

En la tabla 5.6 se observan los resultados obtenidos en la programación efectuada a través del software CPLEX de OPL Studio versión 12.6:

Tabla 5.6: Resultados MILP para T= 52 semanas

Definiciones	Valor
Restricciones	15.631
Variables	47.135
• Binario	70
• Entero	47.065
• Coeficientes distintos de cero	163.824
MIP	
• S. Objetivo	486.323.933 u.m
• Nodos	1.721
• Nodos restantes	25
• Iteraciones	111.253

Para la planificación de la producción del Centro Sangre Concepción en un periodo de 52 semanas, se obtiene una solución óptima de 486.323.933 u.m en un tiempo computacional de 6.196 segundos. De los cinco centros distribuidores posibles a localizarse, se abre uno de ellos que satisface el envío a las trece Unidades de Medicina Transfusional (UMTs) de bolsas con GRs y satisface la demanda de los pacientes que requieran de componentes sanguíneos. Se representa en la figura 5.3, los sitios de donación (6 sitios intrahospitalarios y 2 extrahospitalarios), un centro productor (CSC) y se localiza el centro distribuidor de Chillán y las respectivas UMTs de la Macro región sur.

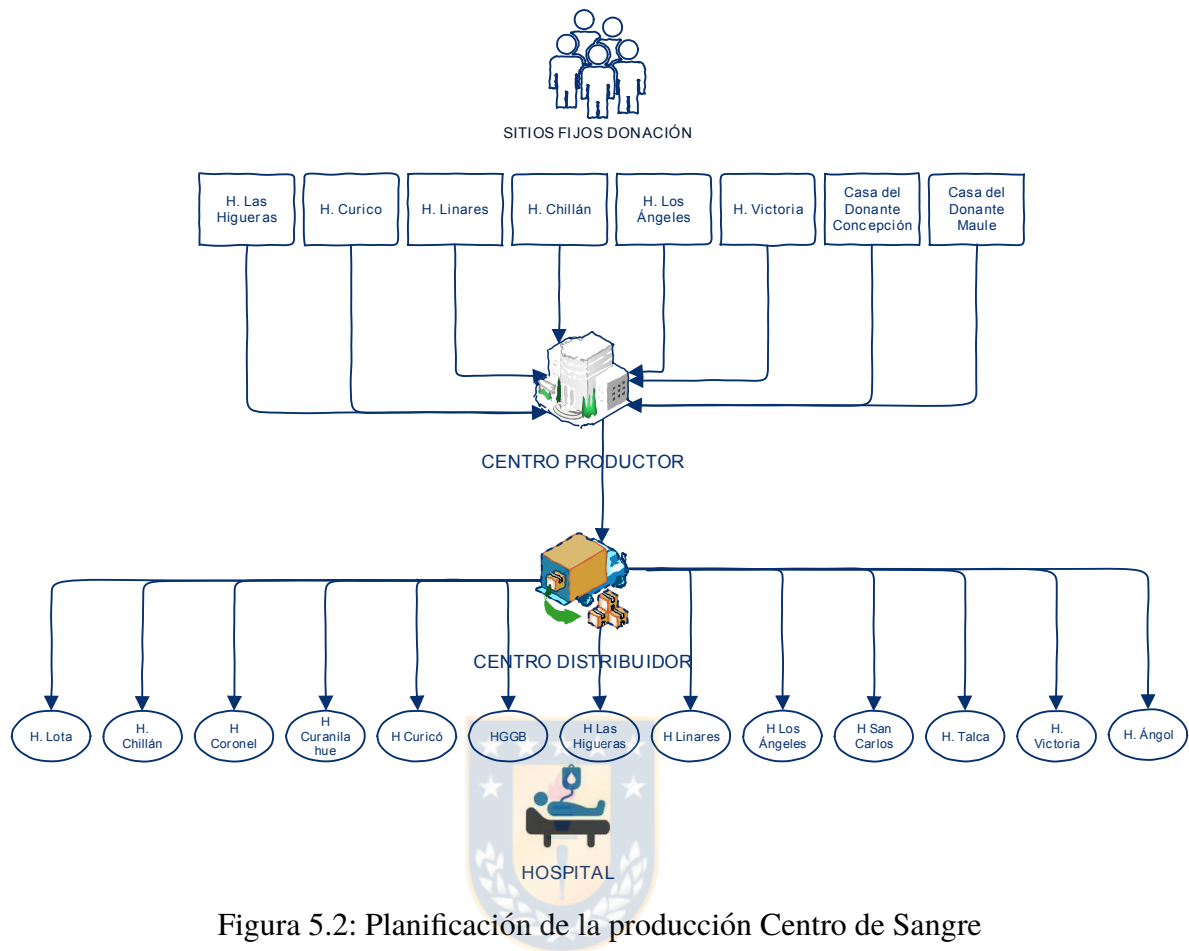


Figura 5.2: Planificación de la producción Centro de Sangre

Fuente: Elaboración Propia



Figura 5.3: Solución obtenida para T= 52 semanas

Fuente: Elaboración Propia

En las figuras 5.4, 5.5 y 5.6, se ilustran las primeras 7 semanas para comprobar que se obtienen soluciones en las variables de decisión con resultados coherentes a la situación real del Centro de Sangre Concepción. Dado que las bolsas con sangre de los diferentes grupos sanguíneos recolectadas en los sitios de donación están condicionadas a los costos de transporte desde estos durante el periodo T, el modelo buscará minimizar los costos, buscando los más económicos, por lo tanto, decide recolectar en 3 sitios de donación (H. Chillán, HGGB e H.Higueras).

		Usgt							
		S4 (H. CHILLÁN)							
		O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1		593	635	177	0	0	0	65	0
T2		377	433	203	222	102	65	0	68
T3		784	542	0	0	0	144	0	0
T4		585	549	240	0	96	0	0	0
T5		0	847	160	100	137	68	91	67
T6		740	68	396	118	80	0	68	0
T7		1368	102	0	0	0	0	0	0

Figura 5.4: Bolsas de sangre de los 8 grupos sanguíneos recolectadas en el sitio de donación 4 durante el periodo T=7 semanas (U_{sgt}).

Fuente: Elaboración Propia

		Usgt							
		S5 (HGGB)							
		O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1		395	0	0	0	0	0	0	0
T2		0	0	0	0	0	0	0	0
T3		0	0	0	0	77	38	59	34
T4		0	0	0	0	0	0	0	0
T5		0	0	11	0	0	0	0	0
T6		0	0	61	0	0	0	0	0
T7		267	0	0	102	0	0	0	0

Figura 5.5: Bolsas de sangre de los 8 grupos sanguíneos recolectadas en el sitio de donación 5 durante el periodo T=7 semanas (U_{sgt}).

Fuente: Elaboración Propia

		Usgt							
		S6 (H. LAS HIGUERAS)							
		O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1		0	0	0	106	132	78	0	37
T2		0	16	0	0	0	0	34	0
T3		0	0	276	0	0	0	0	0
T4		708	0	0	103	0	0	18	34
T5		0	0	0	0	0	0	0	0
T6		0	0	0	0	0	134	0	0
T7		0	373	0	0	137	0	0	50

Figura 5.6: Bolsas de sangre de los 8 grupos sanguíneos recolectadas en el sitio de donación 6 durante el periodo T=7 semanas (U_{sgt}).

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 5.7 se ilustra la cantidad de bolsas con glóbulos rojos producidas para los 8 grupos sanguíneos producidos en el centro productor, el cual corresponde a un 3 % menos de las donaciones, de acuerdo al parámetro α calibrado al inicio de la programación matemática. Satisfaciendo la solución entregada.

		CENTRO PRODUCTOR							
		Pgt							
		O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1		959	616	171	128	102	75	63	35
T2		366	435	197	215	99	63	33	66
T3		761	526	0	267	74	176	57	33
T4		1255	533	233	100	93	0	17	33
T5		0	822	166	97	133	66	88	65
T6		718	66	443	114	77	130	66	0
T7		1587	461	0	99	133	0	0	48

Figura 5.7: Número de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos producidos en el centro productor durante el periodo T=7 semanas (P_{gt}).

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 5.8 se representa la cantidad de bolsas de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro productor al centro de distribución de Chillán durante el periodo T=7 semanas. Se observa que este último almacena cantidad de bolsas con GRs para ciertos grupos sanguíneos (I_{gdt}), con el objetivo de utilizarlos en los periodos siguientes, enviando a los hospitales que demanden de estos componentes para transfundir a sus pacientes. El centro distribuidor que se abre en la solución es el que permite minimizar los costos globales del modelo de programación, por lo tanto, busca el más cercano al centro productor y los hospitales.

DISTRIBUIDOR 3: CHILLÁN

		Ygdt							
		O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1		959	616	171	128	102	75	63	35
lgd1		334				16		7	
T2		366	435	197	215	99	63	33	66
lgd2				2	109	18			17
T3		761	526	267	0	74	176	57	33
lgd3				4	4		86		5
T4		1255	533	233	100	93	0	17	33
lgd4		585					9		
T5		0	822	166	97	133	66	88	65
lgd5		1	296			20		24	25
T6		718	66	443	114	77	130	66	0
lgd6				212	3	2	73	30	
T7		1587	461	0	99	133	0	0	48
lgd7		774	6		3			2	7

Figura 5.8: Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro productor al centro de distribución de Chillán durante el periodo T=7 semanas (Y_{gdt}).

Fuente: Elaboración Propia

Se ilustra en las figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15 las cantidades de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales de la Macro región Sur durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht}), satisfaciendo la demanda para las transfusiones sanguíneas de los pacientes.

		H1 (H. TALCA)									H2 (H. CURICÓ)								
		O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-			O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1		35	13	7	7	3	1	1	3	T1		20	95	22	7	2	3	1	3
T2		51	20	7	7	2	1	1	2	T2		14	60	10	7	13	4	1	5
T3		54	8	7	7	3	1	1	5	T3		0	0	0	0	0	0	0	0
T4		7	20	7	7	2	1	1	5	T4		98	8	32	7	12	6	1	3
T5		34	16	7	7	7	1	1	4	T5		20	75	13	7	4	2	1	4
T6		35	13	7	7	7	1	1	2	T6		110	52	29	7	14	6	1	3
T7		15	16	7	7	5	1	1	5	T7		50	90	35	7	14	4	1	5

Figura 5.9: Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 1 y 2 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})

Fuente: Elaboración Propia

		H3 (H. LINARES)									H4 (H. CHILLÁN)								
		O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-			O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1		20	7	7	7	1	3	1	4	T1		41	15	9	7	6	1	1	3
T2		13	10	7	7	8	5	1	2	T2		36	7	13	7	6	1	1	3
T3		11	18	7	7	6	6	1	4	T3		17	16	11	7	4	1	1	5
T4		35	12	7	7	2	7	1	1	T4		30	17	13	7	1	1	1	4
T5		14	25	7	7	10	4	1	3	T5		27	14	7	7	9	1	1	1
T6		20	10	7	7	2	5	1	1	T6		21	26	7	7	2	1	1	2
T7		25	26	7	7	6	5	1	4	T7		9	28	13	7	13	1	1	3

Figura 5.10: Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 3 y 4 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})

Fuente: Elaboración Propia

		H5 (H. SAN CARLOS)									H6 (HGGB)								
		O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-			O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1		82	46	13	7	4	1	1	2	T1		72	147	20	10	42	33	25	1
T2		22	62	12	7	3	1	1	5	T2		249	46	31	10	2	20	10	4
T3		76	45	10	7	3	1	1	5	T3		124	113	63	12	16	35	19	2
T4		17	30	12	7	2	1	1	2	T4		67	105	28	7	2	28	4	5
T5		64	31	10	7	2	1	1	3	T5		84	145	13	12	19	6	33	3
T6		36	57	8	7	6	1	1	2	T6		212	75	32	11	14	12	34	2
T7		29	7	14	7	6	1	1	1	T7		198	138	33	12	24	27	15	1

Figura 5.11: Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 5 y 6 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})

Fuente: Elaboración Propia

H7 (H. CORONEL)								H8 (H. LOTA)									
	O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-		O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1	158	3	23	7	12	1	2	3	T1	18	49	7	15	12	1	8	1
T2	59	44	23	13	11	3	6	5	T2	117	17	8	13	11	4	10	5
T3	51	83	40	12	15	13	5	2	T3	118	45	13	11	18	6	14	4
T4	84	103	41	10	21	5	1	1	T4	110	29	12	17	11	4	1	4
T5	96	95	38	7	13	12	6	3	T5	28	25	14	8	14	6	5	1
T6	120	68	39	12	3	4	4	4	T6	85	28	8	18	3	4	12	1
T7	187	14	24	8	12	6	1	1	T7	57	16	12	9	12	5	2	5

Figura 5.12: Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 7 y 8 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})

Fuente: Elaboración Propia

H9 (H. HIGUERAS)								H10 (H. LOS ÁNGELES)									
	O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-		O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1	101	70	21	7	1	5	12	5	T1	7	9	7	7	13	5	1	5
T2	66	48	18	7	14	6	5	2	T2	24	23	7	7	3	3	1	3
T3	117	17	8	7	3	8	10	5	T3	21	6	7	7	4	1	1	1
T4	48	77	10	7	16	3	2	5	T4	21	7	7	7	9	4	1	2
T5	37	26	8	7	7	10	11	5	T5	21	8	7	7	4	8	1	4
T6	17	1	14	7	10	14	1	1	T6	12	21	7	7	14	6	1	2
T7	94	45	24	7	3	5	1	3	T7	15	25	7	7	11	2	1	5

Figura 5.13: Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 9 y 10 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})

Fuente: Elaboración Propia

H11 (H. CURANILAHUE)								H12 (H. ANGOL)									
	O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-		O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1	7	7	7	7	1	1	1	1	T1	38	126	20	7	7	7	1	1
T2	7	11	16	7	1	1	1	5	T2	9	76	29	7	18	10	1	3
T3	17	19	15	7	1	1	1	1	T3	93	48	44	7	3	4	1	4
T4	14	21	19	7	1	1	1	3	T4	91	77	28	7	12	7	1	2
T5	17	18	9	7	1	1	1	1	T5	122	37	21	7	17	9	1	5
T6	12	2	20	7	1	1	1	1	T6	14	4	36	7	8	1	1	1
T7	14	11	7	7	1	1	1	2	T7	81	31	18	7	27	8	1	5

Figura 5.14: Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán a los hospitales 11 y 12 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})

Fuente: Elaboración Propia

H13 (H. VICTORIA)								
	O+	O-	A+	A-	AB+	AB-	B+	B-
T1	26	29	8	7	8	13	1	3
T2	33	11	14	7	5	4	1	5
T3	21	18	8	7	12	12	1	5
T4	48	27	21	7	2	9	1	1
T5	20	11	12	7	6	14	1	3
T6	25	5	17	7	11	1	1	3
T7	39	8	11	7	1	7	1	1

Figura 5.15: Cantidad de bolsas con glóbulos rojos de los 8 grupos sanguíneos enviados desde el centro de distribución Chillán al hospital 13 durante el periodo T= 7 semanas (Z_{gdht})

Fuente: Elaboración Propia

5.3. Análisis de Sensibilidad

En esta sección se realiza un análisis de sensibilidad, dado que existe cierta incertidumbre con el valor real de cada uno de los parámetros que se utilizan en el modelo matemático propuesto. Este análisis tiene como objetivo ir variando en cierto porcentaje (20 %,40 % y 60 % respectivamente) el valor de cada parámetro para ver el impacto en el modelo y en la solución de la función objetivo.

Debido a que la memoria disponible en el software OPL es limitada, se debió acotar el tiempo de ejecución CPU a 36.000 segundos, obteniéndose los resultados que a continuación se describen.

Costo de Producción de las bolsas con Glóbulos Rojos (C_{gt}).

Se realiza el análisis utilizando el tiempo real de planificación de la producción para el Centro de Sangre Concepción de 52 semanas, obteniéndose una solución de 488.799.515 u.m, en un tiempo de resolución de 223 segundos. En esta oportunidad se abren dos centros de distribución. Se presenta la figura 5.16 con los resultados obtenidos al ir aumento el parámetro del costo de producción de las bolsas con GRs en un 20 %, 40 % y 60 %.

Se puede observar que al aumentar los costos de producción en un 40 % y 60 %, la solución objetivo incrementa su valor entre un 50 % y 72 % respectivamente. Mientras que la cantidad de centros de distribución aumentan en uno.

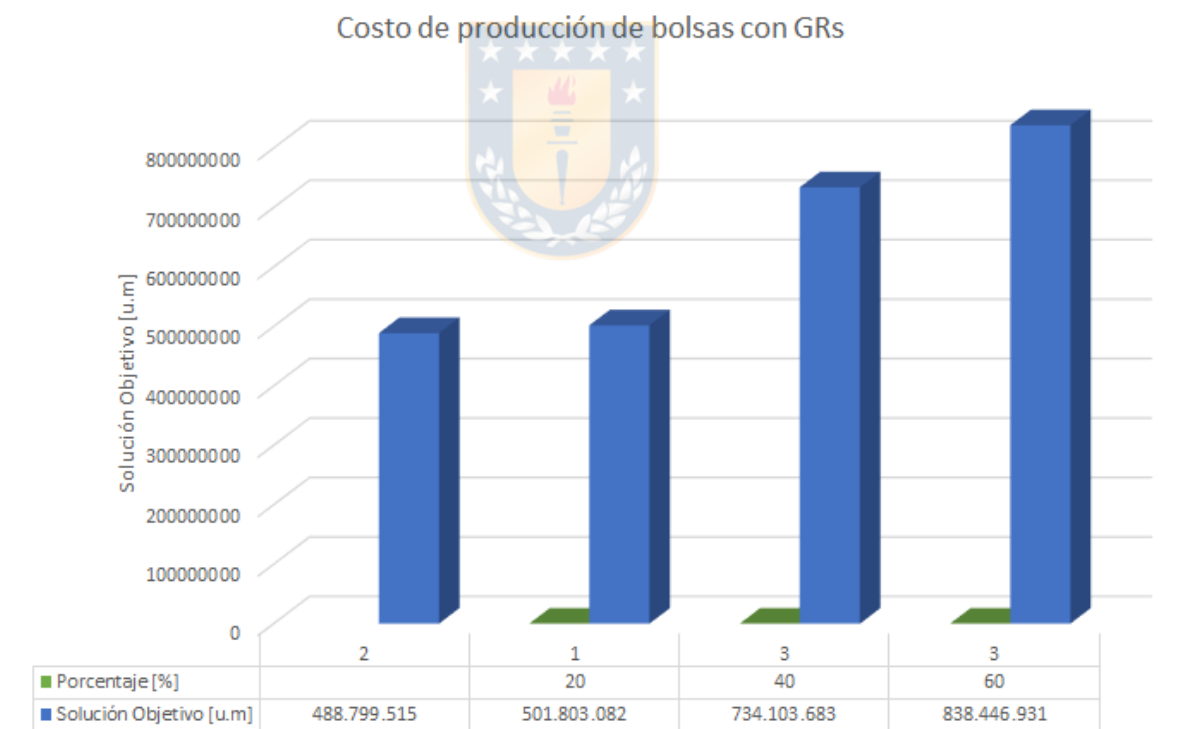


Figura 5.16: Costo de producción de bolsas con GRs (C_{gt})

Fuente: Elaboración Propia

Costo de transporte al enviar bolsas con glóbulos rojos (C_{gdt}) y (C_{gdht}).

Se presenta en la figura 5.17 los resultados obtenidos al ir aumento los parámetros asociados a los costos de envío de las bolsas con GRs desde el centro productor al centro distribuidor y desde este último a los hospitales en un 20 %, 40 % y 60 %. Se observa que al incrementar los costos en un 40 % y 60 % de envío para las bolsas con GRs, la solución objetivo incrementa su valor entre un 102 % y 129 % respectivamente. Mientras que la cantidad de centros de distribución aumentan en uno.

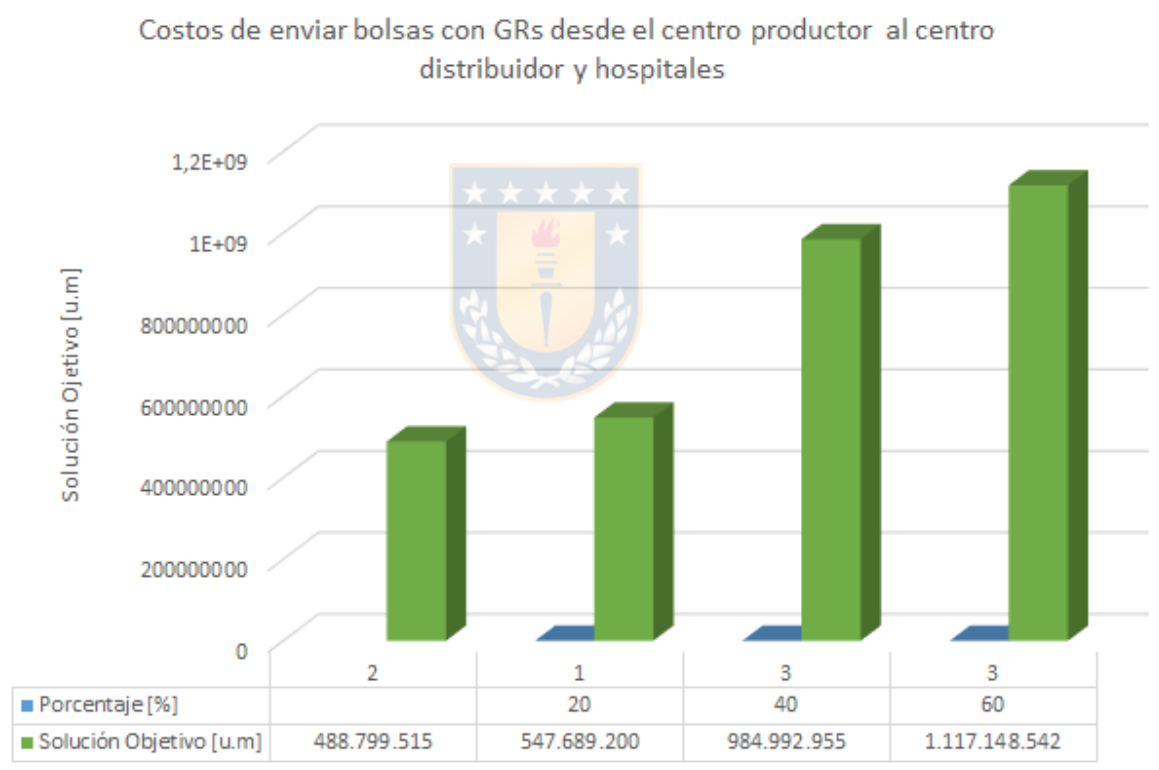


Figura 5.17: Costo de enviar de bolsas con GRs desde el centro productor al centro distribuidor (C_{gdt}) y hacia los hospitales (C_{gdht}).

Fuente: Elaboración Propia

Costo de abrir un centro distribuidor (f_d)

En la figura 5.18 se presentan los resultados obtenidos al ir variando los costos de abrir un centro distribuidor en un 20 %, 40 % y 60 %.

Se puede observar que al aumentar los costos de abrir un centro distribuidor en un 20 % y 40 % este incrementa el valor de la solución objetivo en menos de un 1 %, abriendo en ambos casos 2 centros distribuidores. Al aumentar los costos de abrir un centro de distribución (60 %), el valor de la solución objetivo disminuye alrededor de un 1 % y sólo abriendo un centro distribuidor.

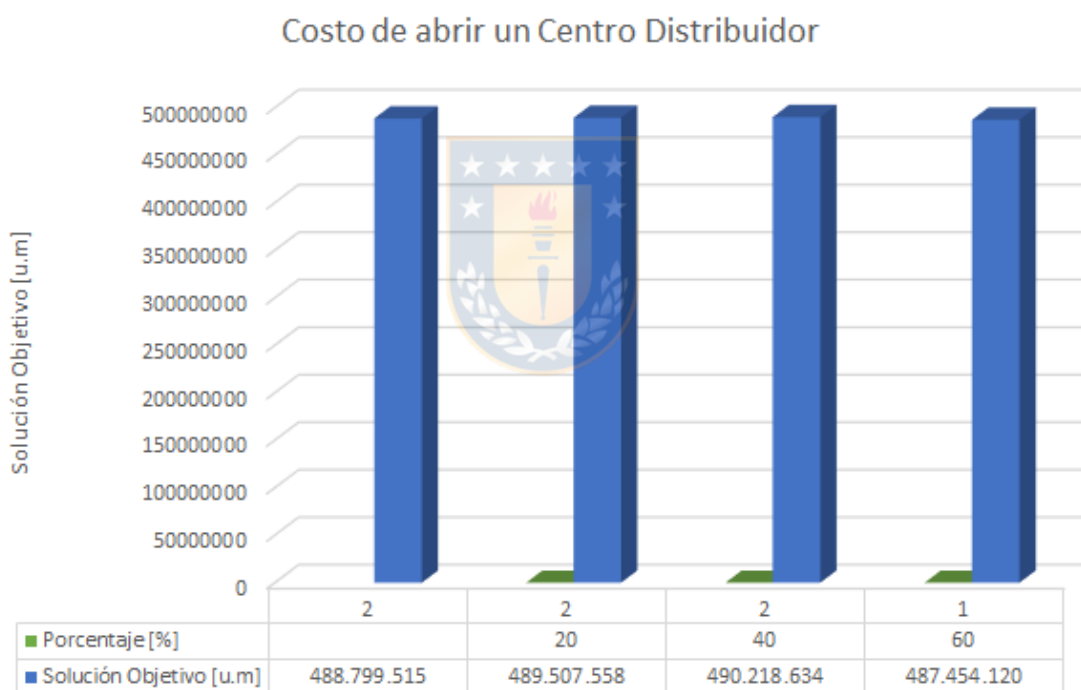


Figura 5.18: Costo de abrir un centro distribuidor (f_d)

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo 6

Conclusiones y comentarios

Se propuso un método de solución exacto, a través de Programación Lineal Entera Mixta (MILP), con un enfoque integrado hacia un horizonte de planificación estratégico para la cadena de suministro de sangre, siendo el objetivo de la investigación localizar centros de distribución de sangre y minimizar los tiempos de entrega de los componentes sanguíneos a los recintos hospitalarios.

Se concentro el alcance de la investigación en la producción de Glóbulos Rojos, en varios periodos de tiempo, permitiendo reducir la caducidad y asegurando un stock permanente para satisfacer la demanda de los hospitales que abastece el Centro de Sangre Concepción.

A través del modelo planteado se puede proyectar la cantidad de donantes necesarios para incentivar el marketing y la captación de donantes a partir de las demandas requeridas en los distintos recintos hospitalarios. Además, de la localización de centros de distribución para satisfacer de manera más eficiente la demanda dentro de la Macro-región Sur de unidades de glóbulos rojos, reduciendo la caducidad y asegurando inventario necesario.

Se logra asegurar niveles de inventarios adecuados en centro productor, centros de distribución y Unidades de Medicina Transfusional (UMTs), cubriendo las transfusiones de Glóbulos Rojos solicitadas.

Con esta investigación, se disminuyen los costos totales de la cadena de suministro de sangre, entre los que se pueden mencionar costos de transporte, costos de almacenamiento y costos de abrir centros de distribución para satisfacer a los pacientes que requieran de productos sanguíneos.

La investigación futura sobre este tema de cadena de suministro de sangre podría llevarse a cabo en las siguientes direcciones:

- Maximizar la vida útil de la sangre y de sus componentes sanguíneos.
- Aplicar el modelo matemático propuesto a nivel nacional, utilizando los cuatro centros productores del país.
- Incorporar al modelo matemático la realización de colecta móviles.
- Incorporar restricciones para la caducidad de componentes sanguíneos.
- Aplicación de algoritmos metaheurísticos, en caso de que el problema no se pueda resolver en un tiempo razonable.



Referencias

- Şahin, G., Süral, H., and Meral, S. (2007). Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services. *Computers & Operations Research*, 34(3):692–704.
- Baş, S., Carello, G., Lanzarone, E., and Yalçındağ, S. (2018). An appointment scheduling framework to balance the production of blood units from donation. *European Journal of Operational Research*, 265(3):1124–1143.
- Baesler, F., Martínez, C., Yaksic, E., and Herrera, C. (2011). Proceso logístico productivo de un centro de sangre regional: modelamiento y análisis. *Revista médica de Chile*, 139(9):1150–1156.
- Baesler, F., Nemeth, M., Martínez, C., and Bastías, A. (2014). Analysis of inventory strategies for blood components in a regional blood center using process simulation. *Transfusion*, 54(2):323–330.
- Beliën, J. and Forcé, H. (2012). Supply chain management of blood products: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 217(1):1–16.
- Cetin, E. and Sarul, L. S. (2009). A blood bank location model: A multiobjective approach. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*.
- Cheraghi, S., Hosseini-Motlagh, S.-M., and Ghatreh Samani, M. (2017). Integrated planning for blood platelet production: a robust optimization approach. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10(0):55–80.
- Contreras, M. C. M. V. (2015). MEDICINA TRANSFUSIONAL EN EL SIGLO XXI. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 26(6):726–743.
- Daskin, M. S. and Dean, L. K. (2005). Location of Health Care Facilities. In *Operations*

Research and Health Care, International Series in Operations Research & Management Science, pages 43–76. Springer, Boston, MA.

- Dillon, M., Oliveira, F., and Abbasi, B. (2017). A two-stage stochastic programming model for inventory management in the blood supply chain. *International Journal of Production Economics*, 187:27–41.
- Duan, Q. and Liao, T. W. (2014). Optimization of blood supply chain with shortened shelf lives and ABO compatibility. *International Journal of Production Economics*, 153:113–129.
- Elahi, B. and Franchetti, M. (2015). A Multi-Objective Proposed Mathematical Model for a Health Care Supply Chain with Perishable Product - ProQuest.
- Elalouf, A., Tsadikovich, D., and Hovav, S. (2018). Optimization of blood sample collection with timing and quality constraints. *International Transactions in Operational Research*, 25(1):191–214.
- Eskandari-Khanghahi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Taleizadeh, A. A., and Amin, S. H. (2018). Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 71:236 – 250.
- Ghandforoush, P. and Sen, T. K. (2010). A DSS to manage platelet production supply chain for regional blood centers. *Decision Support Systems*, 50(1):32–42.
- Habibi-Kouchaksaraei, M., Paydar, M. M., and Asadi-Gangraj, E. (2018). Designing a bi-objective multi-echelon robust blood supply chain in a disaster. *Applied Mathematical Modelling*, 55:583–599.
- Haijema, R., Dijk, N. v., Wal, J. v. d., and Sibinga, C. S. (2009). Blood platelet production with breaks: optimization by SDP and simulation. *International Journal of Production Economics*, 121(2):464 – 473.

- Heidari-Fathian, H. and Pasandideh, S. H. R. (2018). Green-blood supply chain network design: Robust optimization, bounded objective function & Lagrangian relaxation. *Computers & Industrial Engineering*, 122:95 – 105.
- Hosseinifard, Z. and Abbasi, B. (2018). The inventory centralization impacts on sustainability of the blood supply chain. *Computers & Operations Research*, 89:206–212.
- Katsaliaki, K. (2008). Cost-effective practices in the blood service sector. *Health Policy (Amsterdam, Netherlands)*, 86(2-3):276–287.
- Katsaliaki, K. and Brailsford, S. C. (2007). Using simulation to improve the blood supply chain. *Journal of the Operational Research Society*, 58(2):219–227.
- Kopach, R., Balcioğlu, B., and Carter, M. (2008). Tutorial on constructing a red blood cell inventory management system with two demand rates. *European Journal of Operational Research*, 185(3):1051–1059.
- McClelland, D. B. L. (2007). *Handbook of transfusion medicine*. Stationery Office, London. OCLC: 1026436213.
- MINSAL (2018). Donar sangre para dar vida.
- Nagurney, A., Masoumi, A. H., and Yu, M. (2012). Supply chain network operations management of a blood banking system with cost and risk minimization. *Computational Management Science*, 9(2):205–231.
- Organization, W. H. (2017). *The 2016 global status report on blood safety and availability*. World Health Organization.
- Osorio, A. F., Brailsford, S. C., and Smith, H. K. (2015). A structured review of quantitative models in the blood supply chain: a taxonomic framework for decision-making. *International Journal of Production Research*, 53(24):7191–7212.

- Simonetti, A., Forshee, R. A., Anderson, S. A., and Walderhaug, M. (2014). A stock-and-flow simulation model of the US blood supply. *Transfusion*, 54(3pt2):828–838.
- Sprague, Jr., R. H. y. C. E. D. (1982). *Construyendo Sistemas de Soporte de Decisiones Efectivas*. Prentice Hall Professional Technical Reference.
- van Dijk, N., Haijema, R., van der Wal, J., and Sibinga, C. S. (2009). Blood platelet production: a novel approach for practical optimization. *Transfusion*, 49(3):411–420.
- Wijeyeratne, Y. D. (2009). ABC of Transfusion, Fourth edition. Contreras. *Platelets*, 20(8):613–613.
- Yousefi Nejad Attari, M., Pasandide, S. H. R., Agaie, A., Niaki, A., and Taghi, S. (2017). Presenting a stochastic multi choice goal programming model for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10(0):81–96.
- Zahiri, B. and Pishvae, M. S. (2017). Blood supply chain network design considering blood group compatibility under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 55(7):2013–2033.
- Zahiri, B., Torabi, S. A., Mousazadeh, M., and Mansouri, S. A. (2015). Blood collection management: Methodology and application. *Applied Mathematical Modelling*, 39(23):7680–7696.
- Zahraee, S. M., Rohani, J. M., Firouzi, A., and Shahpanah, A. (2015). Efficiency Improvement of Blood Supply Chain System Using Taguchi Method and Dynamic Simulation. *Procedia Manufacturing*, 2:1–5.

Anexos

A1. Archivo.mod OPL

```
/******  
 * OPL 12.6.0.0 Model  
 * Author: Usuario  
 * Creation Date: 27-01-2019 at 23:04:51  
*****  
//DEFINICIÓN DE CONJUNTOS:  
int T=...; // Número de periodos.  
int distribuidores=...; // Número de potenciales centros  
distribuidores.  
int hospitales=...; // Número de hospitales.  
int m=...; // Constante con un valor alto  
int grupos=...; // Grupo Sanguíneos  
int sitios=...;  
  
range Periodo=1..T; // Define set de periodos.  
range Periodo2=0..T; // Define segundo set de periodos  
range Distribuidor=1..distribuidores; // Define set de centros  
distribuidores.  
range Hospital=1..hospitales; // Define set de hospitales.  
range Grupos=1..grupos; // Define set de grupos sanguíneos.  
range Sitios=1..sitios;  
  
tuple Arc1 {int g; int t;}  
{Arc1} A={<g,t> | g in Grupos, t in Periodo2};  
// Estructura de datos asociada a los grupos sanguíneos  
tuple Arc2 {int g; int d; int t;}  
{Arc2} B={<g,d,t> | g in Grupos, d in Distribuidor, t in Periodo2};  
// Estructura de datos asociada a los GR enviados desde el centro  
productor p a los centros de distribución d en el periodo t y al  
inventario de los centros de distribución d en el periodo t.  
tuple Arc3 {int g; int d; int h; int t;}  
{Arc3} C={<g,d,h,t> | g in Grupos, d in Distribuidor, h in Hospital, t in  
Periodo2}; // Estructura de datos asociada a los GR enviados desde los  
centros de distribución d a los hospitales h en el periodo t.  
tuple Arc4 {int g; int h; int t;}  
{Arc4} D={<g,h,t> | g in Grupos, h in Hospital, t in Periodo2};  
// Estructura de datos asociada al inventario y la demanda de GR en los  
hospitales h en el periodo t.  
tuple Arc5 {int d; int h;}  
{Arc5} E={<d,h> | d in Distribuidor, h in Hospital};  
// Estructura de datos asociada a la asignación de los centros  
distribuidores d con los hospitales h.  
tuple Arc {int s; int g; int t;}  
{Arc} F={<s,g,t> | s in Sitios, g in Grupos, t in Periodo2};  
  
//DEFINICIÓN DE PARÁMETROS:  
float Cgdt[B]=...; // Costos de enviar GR desde el centro  
productor hasta el centro distribuidor d en el periodo t.  
float Cgdht[C]=...; // Costos de enviar GR desde el centro  
distribuidor d al hospital h en el periodo t.  
float Cgt[A]=...; // Costos de producción de GR en el periodo t.  
float Cgtinv[A]=...; // Costos de inventario en el centro productor  
en el periodo t.  
float Cgdtinv[B]=...; // Costos de inventario en el centro  
distribuidor d en el periodo t.
```

```

float Cghtinv[D]=...; // Costos de inventario en el hospital h en el
periodo t.
float Cghtins[D]=...; // Costo de demanda insatisfecha
int Dght[D]=...; // Demanda de GR en el hospital h en el periodo
t.
int f[Distribuidor]=...; // Costos de localizar un centro distribuidor
d.
int q[Distribuidor]=...; // Capacidad de almacenamiento de GR en el
centro distribuidor d.
int k[Hospital]=...; // Capacidad de almacenamiento de GR en el
hospital h.
int cap[Periodo2]=...; // Capacidad de producción de GR en el centro
productor.
int cap2[Periodo2]=...; // Capacidad de almacenamiento de GR en el
centro productor.
int cap3[Sitios]=...; // Capacidad de almacenamiento de GR en el
sitio s
float Csgt[F]=...; // Costo de enviar GR desde el sitio s al
centro productor en el periodo t.

//DEFINICIÓN DE VARIABLES:
dvar boolean Adh[E]; // 1 si el hospital h es asignado al centro
de distribución d, 0 en caso contrario.
dvar int+ Pgt[A]; // Cantidad de GR producidos en el periodo
t.
dvar int+ Igt[A]; // Inventario de GR en el centro productor
en el periodo t.
dvar int+ Igd[B]; // Inventario de GR en el centro
distribuidor d en el periodo t.
dvar int+ Ight[D]; // Inventario de GR en el hospital h en el
periodo t.
dvar int+ Ygd[B]; // Cantidad de GR enviados desde el centro
productor hasta el centro distribuidor d en el periodo t.
dvar int+ Zgdht[C]; // Cantidad de GR enviados desde el centro
distribuidor d hasta el hospital h en el periodo t.
dvar boolean Dd[Distribuidor]; // 1 si se localiza un centro distribuidor
d, 0 en caso contrario.
dvar int+ Usgt[F]; // Cantidad de GR enviada desde el sitio s
al centro productor durante el periodo t.
dvar int+ Rght[D]; // Demanda insatisfecha

//MODELO:
minimize sum(<g,t>in A) Cgt[<g,t>]*Pgt[<g,t>] + sum(<g,t>in A)
Cgtinv[<g,t>]*Igt[<g,t>] + sum(<g,d,t> in B)
Cgdtinv[<g,d,t>]*Igd[<g,d,t>] + sum (<g,h,t> in
D)Cghtins[<g,h,t>]*Rght[<g,h,t>]+ sum(<g,h,t> in D)
Cghtinv[<g,h,t>]*Ight[<g,h,t>] + sum(<g,d,t> in B)
Cgdht[<g,d,t>]*Ygd[<g,d,t>] + sum(<g,d,h,t> in C)
Cgdht[<g,d,h,t>]*Zgdht[<g,d,h,t>]+ sum(d in
Distribuidor)f[d]*Dd[d]+sum(<s,g,t> in F) Csgt[<s,g,t>]*Usgt[<s,g,t>]; //
(1) Función Objetivo.

//RESTRICCIONES:
subject to
{

```



```

// Condiciones iniciales del Modelo
forall(g in Grupos) Pgt[<g,0>] == 0; // Producción
de GR en el centro productor en t=0.
forall(g in Grupos) Igt[<g,0>] == 0; // Inventario
del centro productor en t=0.
forall(g in Grupos, d in Distribuidor) Igdt[<g,d,0>] == 0; // Inventario
del centro distribuidor d en t=0.
forall(g in Grupos, h in Hospital) Ight[<g,h,0>] == 0; // Inventario
del hospital h en t=0.
forall(s in Sitios, g in Grupos) Usgt[<s,g,0>] == 0; // Cantidad de
GR donada en el sitio s en t=0.
forall(g in Grupos, h in Hospital) Rght[<g,h,0>] == 0; // Demanda
insatisfecha de GR en el hospital h en t=0.

// Restricciones del Modelo
forall(g in Grupos,t in Periodo) Pgt[<g,t>] + Igt[<g,t-1>] == Igt[<g,t>]
+ sum(d in Distribuidor) Ygdt[<g,d,t>]; // (1)
Cantidad de GR g enviada desde el centro productor a los centros de
distribución d durante el periodo t.
forall(g in Grupos,d in Distribuidor, t in Periodo) Igdt[<g,d,t>] ==
Igdt[<g,d,t-1>] + Ygdt[<g,d,t>] - sum(h in Hospital) Zgdht[<g,d,h,t>];
// (2) Inventario del centro de distribución d en el periodo t.
forall(g in Grupos,h in Hospital, t in Periodo) Ight[<g,h,t>] ==
Ight[<g,h,t-1>] + sum(d in Distribuidor) Zgdht[<g,d,h,t>] -
Dght[<g,h,t>]; // (3) Inventario del hospital h en el periodo t.
forall(h in Hospital) sum(d in Distribuidor) Adh[<d,h>] == 1;
// (4) Se puede asignar un hospital h a un centro de distribución d.
forall(d in Distribuidor) sum(g in Grupos, t in Periodo2) Ygdt[<g,d,t>]
<= m*Dd[d]; // (6) Sólo se pueden enviar GR
g desde el centro productor a un centro de distribución d abierto
(Formulación alternativa).
forall(d in Distribuidor, h in Hospital) sum(g in Grupos,t in Periodo2)
Zgdht[<g,d,h,t>] <= sum(g in Grupos, t in Periodo2)
Dght[<g,h,t>]*Adh[<d,h>]; // (7) Si se asigna el hospital h al centro de
distribución d, entonces se puede enviar GR durante el horizonte de
planificación T.
forall(t in Periodo2) sum(g in Grupos) Pgt[<g,t>] <= cap[t];
// (9) Capacidad de producción de GR g del centro productor.
forall(t in Periodo2) sum(g in Grupos) Igt[<g,t>] <= cap2[t];
// (10) Capacidad de almacenamiento de GR g en el centro productor.
forall(d in Distribuidor, t in Periodo2) sum(g in Grupos) Igdt[<g,d,t>]
<= q[d]*Dd[d]; // (11) Capacidad de
almacenamiento de GR g en el centro distribuidor d.
forall(h in Hospital, t in Periodo2) sum(g in Grupos) Ight[<g,h,t>] <=
k[h]; // (12) Capacidad de
almacenamiento de GR g en el hospital h.
forall(g in Grupos, t in Periodo2) sum(s in Sitios) Usgt[<s,g,t>] >=
Pgt[<g,t>]*1,03; // (13) Pérdidas de insumos
en el procesamiento de la sangre donada.
forall(s in Sitios, t in Periodo2) sum(g in Grupos) Usgt[<s,g,t>] <=
cap3[s]; // (14) Capacidad de
almacenamiento de GR g en el sitio s.
forall(g in Grupos,h in Hospital, t in Periodo) Dght[<g,h,t>]-
Ight[<g,h,t-1>]+Ight[<g,h,t>]-sum(d in Distribuidor) Zgdht[<g,d,h,t>] <=
Rght[<g,h,t>];
}

```