



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA EN SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

MODELO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA PARA
LA GESTIÓN DE INVENTARIO DE UN BANCO DE SANGRE

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JUAN JOSÉ ARELLANO ELIZALDE

TUTOR PRINCIPAL
DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. ENERO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. I. Soler Anguiano Francisca Irene

Secretario: Dra. Balderas Cañas Patricia

Vocal: Dra. Flores De La Mota Idalia

1^{er}Suplente: Dra. Segura Pérez Esther

2^{do}Suplente: Dra. Huerta Barrientos Aida

Lugar donde se realizó la tesis: México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme permitido estudiar en el Programa de Posgrado en Ingeniería de Sistemas.

Al CONACYT por el apoyo económico brindado para la realización mis estudios.

A la Dra. Idalia, mi tutora, por sus enseñanzas y, su apreciable apoyo y orientación que guiaron la realización de este proyecto.

A mis sinodales, M. I. Francis Soler, Dra. Patricia Balderas, Dra. Esther Segura y Dra. Aida Huerta por sus comentarios y, crítica objetiva y constructiva.

A mis profesores, por compartir su conocimiento y ser facilitadores del aprendizaje.

A mis compañeros del posgrado, por su amistad y sus consejos. Les deseo éxito.

DEDICATORIA

*A mis deseos de seguir aprendiendo y crecer profesionalmente,
por que sin ellos quizás no hubiera conocido a esa persona que
amo tanto, mi esposa.*

*A mi esposa, gracias por tu apoyo y tus palabras alentadoras
en cada momento... Y por formar parte de mi vida.
¡Te amo Karla!*

*A mis padres, por ser la pieza fundamental de lo que soy,
gracias a los valores que me inculcaron y su apoyo
incondicional.*



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
PROBLEMÁTICA.....	2
HIPÓTESIS.....	3
OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
METODOLOGÍA.....	4
CAPÍTULO I MARCO DE REFERENCIA	5
MARCO TEÓRICO.....	6
TRANSFUSIÓN SANGUÍNEA.....	6
Transfusión de concentrado eritrocitario.....	7
PROGRAMACIÓN DINÁMICA.....	8
ESTADO DEL ARTE.....	12
CAPÍTULO II MÉTODO	15
CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA.....	16
DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	17
NOTACIÓN Y VARIABLES.....	17
Índices.....	17
Variables.....	17
Parámetros.....	18
MODELO DE PROGRAMACIÓN ENTERA.....	18
Función objetivo.....	19
Restricciones.....	19
MODELO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA.....	20
Ecuación recursiva.....	20
Ecuaciones complementarias.....	21



ALGORITMO DE SOLUCIÓN	21
ANÁLISIS DE DATOS	23
DETERMINACIÓN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS	35
VALIDACIÓN DEL MODELO	40
DISEÑO DEL EXPERIMENTO	48
<u>CAPÍTULO III RESULTADOS</u>	50
ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
<u>CAPÍTULO IV CONCLUSIONES</u>	54
CONCLUSIONES	55
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
<u>ANEXOS</u>	61
ANEXO A. CÓDIGO FUENTE DEL MODELO PROGRAMADO EN EL SOFTWARE LINGO	62
ANEXO B. CÓDIGO FUENTE DEL MODELO PARA DETERMINAR C_A	69



INTRODUCCIÓN

“Si tú no haces lo mejor con lo que llegues a tener, nunca harás lo mejor que tú podrías haber hecho con lo que deberías de haber tenido.” Aris (1964).

Las transfusiones de glóbulos rojos, plaquetas, plasma constituyen una práctica indispensable para la atención de pacientes cuyas condiciones clínicas no pueden ser tratadas con otras tecnologías sanitarias (Organización Panamericana de la Salud, 2010). Es por esto que resulta de suma importancia que los servicios de salud cuenten siempre con existencias suficientes de componentes sanguíneos que sean compatibles con los tipos sanguíneos de los receptores y eficaces para tratar las deficiencias fisiológicas de los pacientes.

Para ofrecer transfusiones eficaces, seguras y oportunas, los servicios de salud deben considerar los períodos de tiempo y las condiciones de almacenamiento apropiados para cada tipo de componente desde el momento de su preparación, así como las circunstancias en las que deben y pueden transfundirse de acuerdo al sexo, la edad y la historia clínica del paciente.

Ante la necesidad de hacer frente a la oferta y demanda aleatorias los bancos de sangre mantienen reservas considerables de sangre. Pero al ser la sangre un producto perecedero, es necesario tener una buena gestión de inventarios. En la administración de inventario de sangre debe existir un equilibrio entre escasez y desperdicio. Siendo el reto mantener en existencia la sangre suficiente que garantice la satisfacción del 100% de la demanda, manteniendo al mínimo las pérdidas por caducidad.

Además de enfrentarse los bancos de sangre ante un problema que contempla la administración de inventario de un producto perecedero. También se tiene que es un problema de un sistema multiproducto, esto debido a que existen 4 grupos diferentes de sangre (AB, A, B y O) con 2 distintos factores Rh (Rh+ y Rh-) cada uno.

Por lo anteriormente descrito, la administración del inventario de sangre ha llamado la atención en la Investigación de Operaciones en los últimos años con lo cual se han hecho aportaciones en las áreas de Teoría de Inventarios y Optimización Combinatoria, los cuales pueden ser de utilidad para otros productos o sistemas.



PROBLEMÁTICA

En el banco de sangre, de una institución de salud del sector público, existe una planificación deficiente en la asignación de contenido eritrocitario (unidades sanguíneas) a las distintas solicitudes de sangre, con lo que se llega al problema de acumular unidades de un determinado grupo sanguíneo y se pierden algunas de ellas por caducidad. Lo que representa en la actualidad el 3.7% de las donaciones totales.

En otros casos no se cuentan con las unidades necesarias para satisfacer la demanda de contenido eritrocitario. Por lo que al momento de realizar las pruebas cruzadas para determinar la compatibilidad entre receptor y donador se enfrenta ante el problema de realizar las pruebas cruzadas de una misma unidad donante para varios pacientes. Actualmente el déficit de contenido eritrocitario representa el 12.5% de la demanda total.

Al presentarse la problemática anteriormente descrita se generan costos asociados a las pérdidas por caducidad y al incumplimiento de la demanda. Se refiere al incumplimiento de demanda, el tener un déficit de inventario para poder satisfacer las solicitudes de contenido eritrocitario. En tal caso se solicita apoyo a algún otro banco de sangre para poder dar cumplimiento a las solicitudes de unidades sanguíneas.

Lo que se desea es, contar con una política de asignación de unidades sanguíneas para la gestión de inventario del banco de sangre, la cual permita disminuir las pérdidas por vencimiento y el incumplimiento de la demanda. Lo que se verá reflejado en la disminución de los costos asociados a estas.

Ante el problema de la planificación deficiente en la asignación de unidades de contenido eritrocitario, en el banco de sangre de una institución de salud del sector público, se ve en la necesidad de realizar un estudio que permita determinar la política de asignación de las unidades donantes a las diversas demandas, buscando minimizar la cantidad de demanda no satisfecha y disminuir las pérdidas por caducidad, con el objetivo de disminuir los costos asociados a ello.



HIPÓTESIS

Al realizar una adecuada gestión de la distribución de unidades de contenido eritrocitario, con una política de asignación de unidades sanguíneas basada en el cuidado de las unidades de tipo de sangre poco común en la población, y en la probabilidad de demanda, se lograra disminuir los costos generados por perdidas por caducidad y el incumplimiento de la demanda.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar una política adecuada de asignación que permita minimizar la escasez de unidades de contenido eritrocitario y disminuya las pérdidas por caducidad, con la finalidad de disminuir los costos asociados a ellas, mediante un modelo de asignación para la gestión de inventario, diseñado con programación dinámica y programación entera.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comprender las características del sistema de asignación de contenido eritrocitario en el banco sanguíneo.
- Formular un modelo de asignación para la gestión de inventario, empleando programación dinámica y programación entera, que proporcione información para la toma de decisiones de asignación de unidades de contenido eritrocitario.
- Evaluar los resultados obtenidos con el modelo de asignación para la gestión de inventario de contenido eritrocitario propuesto, para definir una política de asignación.
- Establecer una política de asignación de unidades eritrocitarias para cada grupo sanguíneo.

METODOLOGÍA

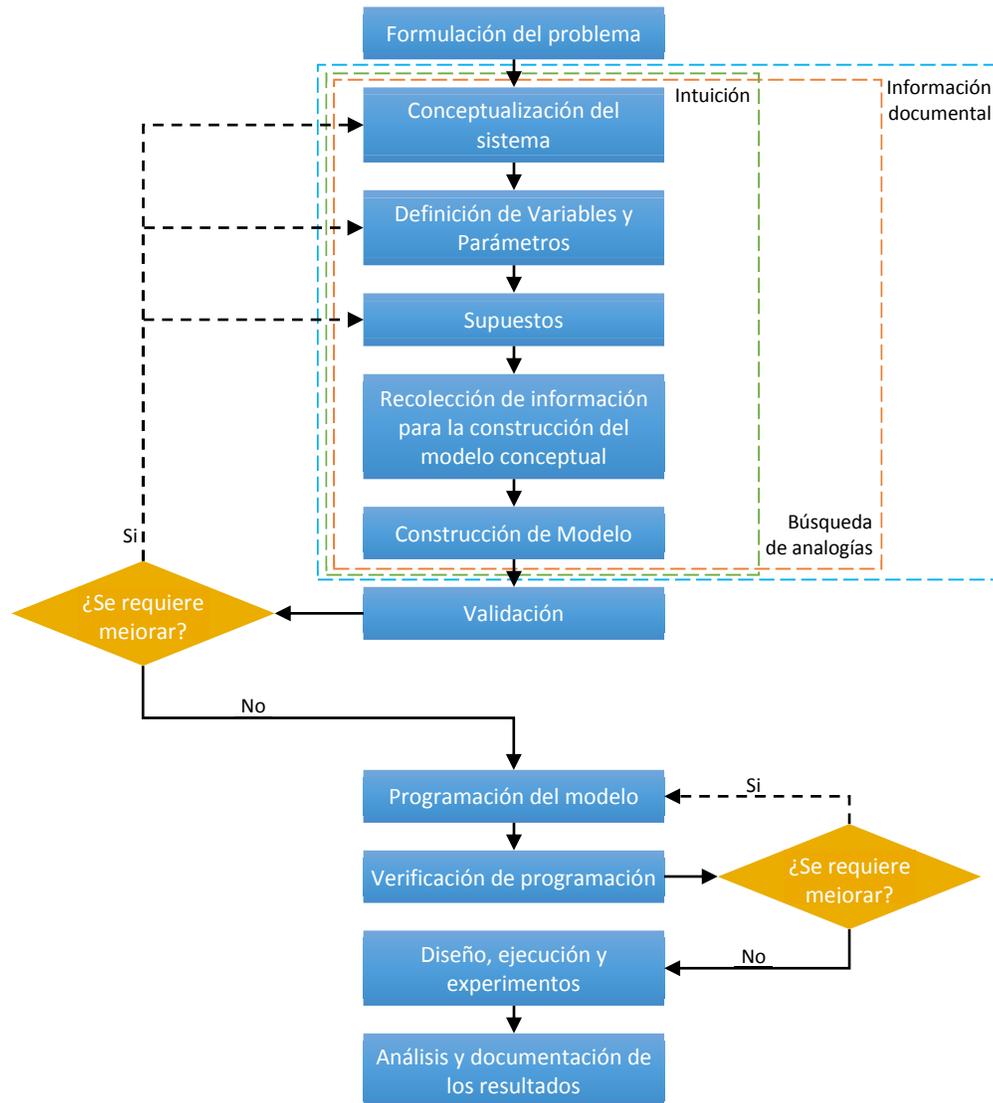


Ilustración 1. Metodología de trabajo. Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO I

MARCO DE

REFERENCIA



MARCO TEÓRICO

TRANSFUSIÓN SANGUÍNEA

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define la transfusión sanguínea como la transferencia de sangre o componentes sanguíneos de un sujeto (donante) a otro (receptor). Es decir, la transfusión es una forma simple de trasplante de órgano ya que se transfiere de un donante a un paciente. Tanto el órgano como el paciente deben ser examinados rigurosamente para asegurar la compatibilidad entre los elementos a infundir y el trasplante sólo está indicado cuando hay anomalías específicas en espera de que el paciente o receptor sea beneficiado con dicho procedimiento.

La mayoría de los pacientes no requieren transfusiones de sangre completa. Por lo tanto se realiza el fraccionamiento de la sangre para poder administrar a cada paciente solo el componente que necesita y en la concentración adecuada y aplicar a cada componente las condiciones óptimas de conservación, las cuales difieren para cada uno de ellos. Los hemoderivados más frecuentes son:

- Concentrado eritrocitario.
- Plaquetas.
- Plasma fresco congelado.

El proceso transfusional puede transmitir enfermedades infecciosas y pueden presentarse diversas complicaciones. Debido a esto es que los aspectos específicos de la selección de los donadores y las pruebas de compatibilidad que se realizan a cada uno de los componentes derivados de la sangre, son campo de acción en los bancos de sangre y en México se encuentra normado por la Norma Oficial Mexicana¹.

¹(NOM-003-SSA2-1993, 1994).



TRANSFUSIÓN DE CONCENTRADO ERITROCITARIO

Cuando se indica una transfusión de contenido eritrocitario el banco de sangre trabaja con pruebas de compatibilidad, que son cada uno de los estudios practicados in vitro empleando muestras de sangre del donante y del receptor, para comprobar la existencia de afinidad recíproca entre las células de uno y el suero del otro, para efectos transfusionales.

Estas pruebas se inician con la determinación del grupo, Rh y anticuerpos irregulares (anticuerpos aloinmunes contra antígenos eritrocitarios diferentes a los del sistema ABO), así como de pruebas cruzadas, las cuales se realizan entre el suero del receptor y células del donante (eritrocitos o plaquetas), lo que ayuda a determinar la presencia de anticuerpos en el suero. Las pruebas cruzadas determinan los anticuerpos presentes en el suero del receptor frente a antígenos tanto ABO como el resto de antígenos eritrocitarios (Pliego Reyesa & Flores Alcántar, 2012).

Tabla 1. Compatibilidad entre grupos sanguíneos. Fuente: Aranda Caballero (2015).

DONADOR	DEMANDA							
	AB+	AB-	A+	A-	B+	B-	O+	O-
AB+	✓	-	-	-	-	-	-	-
AB-	✓	✓	-	-	-	-	-	-
A+	✓	-	✓	-	-	-	-	-
A-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-
B+	✓	-	-	-	✓	-	-	-
B-	✓	✓	-	-	✓	✓	-	-
O+	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
O-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Como se puede ver en la tabla anterior, existen varias combinaciones posibles de transfusión entre los distintos grupos sanguíneos. Pero la cantidad de combinaciones aumenta, debido a que el contenido eritrocitario es un producto perecedero, por lo tanto las unidades de un grupo sanguíneo determinado pueden tener edad de vida distinta.

Lo mencionado anteriormente hace que el problema de la gestión de inventario de bancos de sangre sea de tipo combinatorio. Y para encontrar una solución en un tiempo razonable, varios autores han



propuesto diferentes formas de resolverlo con distintas técnicas. Entre los distintos métodos empleados para hacer frente al problema se encuentran: simulación, heurísticos y programación dinámica. Y aunque el problema de la gestión de inventarios de bancos sanguíneos es considerado un problema de asignación, clasificado como NP en complejidad computacional, se han obtenido buenos resultados al buscar soluciones empleando programación dinámica. En el estado del arte se menciona como se ha abordado el problema por diversos autores.

PROGRAMACIÓN DINÁMICA

La programación dinámica fue desarrollada por Richard Bellman en los años 50's, este enfoque se inspiró en la teoría de control, donde se plantea que se puede obtener una política óptima para un problema de control con n etapas basándose en una política óptima para un problema similar, pero de $n-1$ etapas.

La programación dinámica se puede definir como una técnica matemática utilizada para resolver cierto tipo de problemas de optimización donde se busca encontrar la solución de algún valor óptimo, ya sea de maximización o minimización, de manera secuencial.

La solución de problemas mediante la programación dinámica se basa en el principio de optimalidad establecido por Bellman en 1957, el cual dice:

“Una política óptima tiene la propiedad de que cualquiera que sea el estado inicial y las decisiones iniciales, las decisiones restantes deben constituir una política óptima con respecto al estado que resulta de la decisión inicial (Bellman, 1957).”

En otras palabras, lo que plantea el principio de optimalidad, es que en una secuencia de decisiones óptima toda subsecuencia ha de ser también óptima. Pero debemos de tener cuidado de no confundir este concepto y entenderlo de tal manera que si tenemos soluciones óptimas de subproblemas, entonces las podemos combinar y tener la solución óptima del problema original.



Las características que presentan los problemas resueltos mediante programación dinámica son las siguientes:

- a) El problema se puede dividir en etapas, en las que se debe establecer una política de decisión para cada una de ellas. Debe entenderse como etapa a la parte del problema que posee un conjunto de alternativas mutuamente excluyentes, de las cuales se seleccionará la mejor alternativa.
- b) Cada etapa tiene un cierto número de estados asociados a ella. Por estado se entiende a la información que se necesita en cualquier etapa para tomar una decisión óptima.
- c) El efecto de la política de decisión en cada etapa es transformar el estado actual en un estado asociado con la siguiente etapa. Es decir, el estado representa la “liga” entre las etapas de tal manera que cuando se optimiza cada etapa por separado la decisión final es factible para el problema completo.
- d) El procedimiento de solución debe estar diseñado para encontrar una política óptima para el problema completo. A esta política se le llama: ecuación recursiva.
- e) Dado un estado actual, una política óptima para las demás etapas es independiente de la política adoptada en etapas anteriores, a esto es lo que se refiere el principio de optimalidad.
- f) El procedimiento de solución se inicia al encontrar la política óptima para la última etapa. La cual establece la política óptima de decisión para cada estado posible en esa etapa.
- g) Se dispone de una relación recursiva que indica la política óptima para la etapa, dada la política óptima para la etapa $(n+1)$.

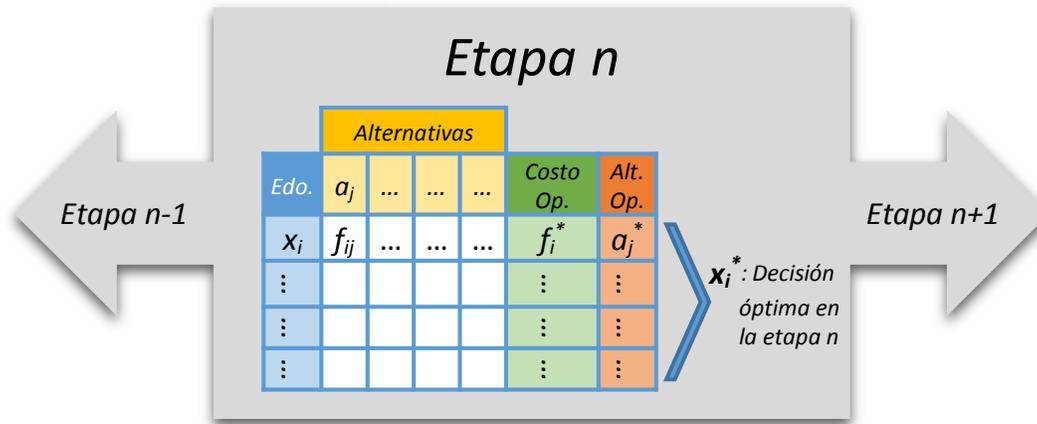


Ilustración 2. Representación de tabla característica en programación dinámica. Fuente: Elaboración propia.

Además de las características anteriormente mencionadas, los problemas que pueden ser resueltos mediante programación dinámica tienen las siguientes propiedades:

- a) Sólo un número reducido de variables se debe conocer en cualquier etapa con el fin de describir al problema.
- b) El resultado de una decisión en cualquier etapa altera los valores numéricos de un número reducido de variables relevantes al problema. Es decir, la cantidad de variables consideradas en una etapa, es igual a la cantidad de variables en las etapas restantes.

La ecuación de recursividad se puede formular de dos maneras distintas:

- ↳ Recursividad de Retroceso: el problema se resuelve partiendo de la última etapa hacia la primera.
- ↳ Recursividad de Avance: el problema se resuelve partiendo de la primera etapa hacia la última.

En cuestión de cálculos la formulación de la ecuación recursiva es equivalente, ya sea de manera recursiva o de avance. Pero en algunos casos existe diferencia en cuanto a la eficiencia del cálculo. Esto se presenta particularmente en problemas donde es necesaria la toma de decisiones conforme



transcurre el tiempo. En estos casos las etapas deben plantearse de manera cronológica a los periodos que representan.

De manera general la formulación de un algoritmo de programación dinámica consta de los siguientes pasos:

1. Planteamiento de la solución como una sucesión de decisiones y verificación de que ésta cumple el principio de optimalidad.
2. Definición de la ecuación recursiva de la solución.
3. Cálculo del valor de la solución óptima mediante una tabla en donde se almacenan soluciones a problemas parciales para reutilizar los cálculos.
4. Construcción de la solución óptima haciendo uso de la información contenida en la tabla anterior.



ESTADO DEL ARTE

Desde hace algunos años, se ha puesto énfasis a la problemática de gestión de inventarios que se presenta en los bancos de sangre, se ha estudiado principalmente a lo referente a las unidades de plaquetas, que es uno de los hemoderivados de la sangre. En los estudios que se pueden encontrar, se pueden apreciar cómo se han utilizado diversas herramientas para hacer frente al problema que de gestión de hemoderivados que se presenta en los bancos de sangre en general.

En 1973, Rabinowitz evaluó políticas de gestión de inventarios mediante la simulación de tres escenarios para definir el nivel óptimo de inventario. En este estudio, Rabinowitz se enfocó en encontrar un nivel óptimo inventario, pero no en la asignación de las unidades de las unidades sanguíneas, lo que se ha visto en otros estudios que es fundamental en la gestión.

De igual manera Cohen & Pierskalla, en 1979, utilizaron simulación y optimización, pero ellos le dan un enfoque para minimizar la escasez y disminuir las pérdidas por caducidad. Este enfoque es interesante, ya que se busca determinar que tanto tiempo podrían estar las unidades sanguíneas en anaquel, por así decirlo, para disminuir la escasez y las pérdidas por caducidad.

También se ha buscado mejorar la situación desde el punto de vista de la producción, como lo hicieron Ryttilä & Spens en 2006, quienes utilizaron simulación para estudiar la producción de componentes sanguíneos. En este estudio, los autores únicamente se ponen énfasis en cómo influye la producción de los componentes sanguíneos en la asignación de los mismos a las diversas demandas.

De igual manera en el 2006, Mustafee utilizó simulación para reducir costos y aumentar la disponibilidad de sangre. En este estudio se puede apreciar una propuesta interesante, ya que se analiza cómo se debe distribuir las unidades sanguíneas de un banco de sangre local a distintos hospitales, con la finalidad de aumentar la disponibilidad de unidades sanguínea en los centros médicos.

Por otro lado, en 2007; Haijema, Van der Wal & Van Dijk modelaron un banco de sangre, empleando programación dinámica y simulación para definir políticas de manejo de inventarios que permitieron



disminuir las pérdidas por caducidad. Este estudio resulta interesante analizar ya que busca determinar que regla de administración de inventario generara mejores resultados en la asignación de las unidades sanguíneas.

En el 2009, Fontaine, Chung & Rogers implementaron herramientas de cadena de suministro, logrando disminuir en 50% las pérdidas de componentes sanguíneos, en este caso se estudia la distribución de contenido plaquetario. En este estudio se puede observar una propuesta innovadora, ya que se propone una cadena de suministro entre un banco de sangre local y pequeños hospitales, en la cual existe una rotación de las unidades plaquetarias, para poder ofrecerlas en otros hospitales antes de su fecha de caducidad.

También en el 2009, Van Dijk & Haijema utilizaron programación dinámica estocástica y simulación para establecer puntos de reorden. Al igual que en su estudio realizado en el 2007, los autores buscan disminuir las perdidas por caducidad, pero en este estudio se enfocan en la determinación de puntos de reorden. El estudio resulta interesante, debido a que definen diferentes niveles de inventario posibles, para los distintos grupos sanguíneos, empleando diversas probabilidades para vectores que representan el inventario de cada grupo.

En el 2014, Abdulwahab & Wahab desarrollaron un modelo de programación dinámica aproximado en banco de contenidos plaquetarios, buscando minimizar el nivel de inventario promedio con diferentes políticas de valuación de inventario. Este estudio tiene una propuesta en la que se busca analizar el sistema de gestión de inventario en un banco sanguíneo, utilizando un algoritmo heurístico junto con un modelo de programación dinámica basado en el establecimiento de políticas de administración de inventario FIFO y LIFO.

Para el desarrollo este proyecto se apoyó principalmente en los estudios realizados en el 2007 y 2009, por Haijema y Van Dijk. Pero a diferencia de ellos que se enfocaron en la gestión de inventarios de plaquetas, en este proyecto se aborda la gestión de inventarios de contenido eritrocitario, por ser el área donde se presenta la problemática.

En cuanto a los modelos utilizados, Haijema y Van Dijk, simulan un modelo de programación dinámica de Markov para evaluar reglas de inventario LIFO y FIFO. En cambio es este proyecto se busca definir una política de gestión de inventario mediante el desarrollo de un modelo de



programación dinámica en conjunto con un modelo de programación entera, y simulando la oferta y la demanda de las unidades sanguíneas.

Tabla 2. Estado del Arte. Fuente: Elaboración propia.

AUTOR	AÑO	TITULO	DESCRIPCIÓN
Rabinowitz M.	1973	Blood Bank Inventory Policies: A Computer Simulation	Evalúa políticas de inventarios para definir el nivel óptimo de inventario
Cohen M, Pierskalla W.	1979	Simulation of Blood Bank System	Utiliza simulación y optimización para minimizar la escasez y disminuir las pérdidas por caducidad
Rytilä J, Spens K.	2006	Using simulation to increase efficiency in blood supply chains	Utiliza simulación para estudiar la producción de componentes sanguíneos
Mustafee N.	2006	Distributed Simulation with COTS Simulation Packages: A case study in health care supply chain simulation	Utiliza simulación para reducir costos y aumentar la disponibilidad de sangre
Haijema R, Van der Wal J, Van Dijk N.	2007	Blood platelet production: Optimization by dynamic programming and simulation	Modela un banco de sangre para definir políticas de manejo de inventarios, disminuyendo las pérdidas por caducidad
Fontaine M, Chung Y, Rogers W.	2009	Improving platelet supply chains through collaborations between blood centers and transfusion services	Implementa herramientas de cadena de suministro
Van Dijk, N., Haijema, R., Van Der Wal, J., Sibinga, C. S.	2009	Blood platelet production: a novel approach for practical optimization	Utilizan un modelo de programación dinámica estocástica y simulación
Abdulwahab, U., Wahab, M.	2014	Approximate dynamic programming modeling for a typical blood platelet bank	Disminuye el nivel de inventario promedio



CAPÍTULO II

MÉTODO

CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA

El objetivo de la gestión en el uso de unidades sanguíneas es garantizar la utilización eficiente de los recursos. El exceso y la escasez de productos sanguíneos dirigen al empleo ineficiente de los mismos.

Torres (2010) menciona que existen varios factores implicados en la gestión de inventario de unidades sanguíneas como lo son la oferta, la demanda, el nivel del inventario en los Centros de Transfusión, clínicas y hospitales, la logística para la distribución de unidades y la indicación transfusional.

Para lograr un uso máximo y óptimo de las unidades sanguíneas, es importante comprender las complejas interrelaciones entre la oferta y la demanda, así como los factores que impactan sobre cada uno de ellos.

En la siguiente imagen se pueden observar los factores que mayormente influyen en el nivel de inventario de las unidades de contenido eritrocitario, como lo son: El procesamiento, refiriéndose a esto como la oferta de sangre y la separación de los hemocomponentes, la cantidad de unidades caducadas, la demanda de unidades sanguíneas, la compatibilidad entre los grupos sanguíneos y la política de asignación que se implemente.

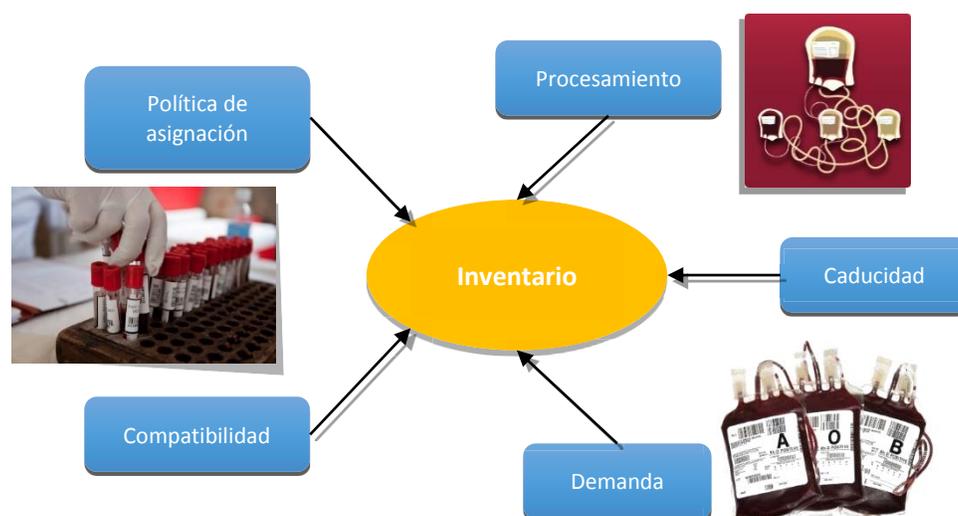


Ilustración 3. Diagrama de influencia. Fuente: Elaboración propia.



DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Para la formulación del modelo de asignación, se utiliza programación dinámica y programación entera. Se utiliza programación entera para encontrar la matriz que representa el inventario final en cada estado, con el menor costo asociado, esto con la finalidad de disminuir la cantidad de estados generados. Además se determina un tiempo de vida de las unidades de contenido eritrocitario de 6 semanas. Así mismo se asume una demanda y producción semanal, y aleatoria para cada uno de los diferentes grupos sanguíneos.

NOTACIÓN Y VARIABLES

La notación utilizada en los modelos de programación lineal y programación dinámica son los presentados a continuación:

ÍNDICES

- i Tipo de sangre para satisfacer la demanda del grupo sanguíneo k , $i=1, \dots, 8$ para AB+, AB-, A+, A-, B+, B-, O+ y O-.
- j Edad de la unidad de contenido eritrocitario, $j=1, \dots, 6$.
- k Grupo sanguíneo de la demanda, $k=1, \dots, 8$ para AB+, AB-, A+, A-, B+, B-, O+ y O-.
- t Tiempo (Semana para la cual se evalúan las variables y parámetros), $t=1, \dots, T$.

VARIABLES

- I_{ijt} Inventario disponible del tipo de sangre i con edad j al inicio de la semana t .
- y_{kt} Demanda de contenido eritrocitario del grupo sanguíneo k en la semana t .
- Z_{ijt} Inventario de unidades del tipo de sangre i con edad j al final de la semana t .
- x_{ijkt} Unidades del tipo i con edad j utilizadas del inventario I_{ijt} en la semana t para satisfacer la demanda y_{kt} .
- D_{kt} Demanda del grupo sanguíneo k no satisfecha en la semana t .
- V_{it} Unidades caducadas del grupo sanguíneo i al final de la semana t .



P_{it} Donaciones del tipo de sangre i al inicio de la semana t .

PARÁMETROS

C_{Aijk} Costo de asignar una unidad del grupo sanguíneo i de edad j a la demanda del grupo sanguíneo k .

C_{Dk} Costo por unidad del grupo sanguíneo k no satisfecha.

C_{Vi} Costo por unidad del grupo sanguíneo i caducada.

N_i Nivel máximo de inventario para el tipo de sangre i .

MODELO DE PROGRAMACIÓN ENTERA

El modelo de programación entera que se presenta en seguida se construyó basado en las suposiciones anteriormente descritas y asumiendo que la producción de unidades eritrocitarias se hace al inicio de la semana.

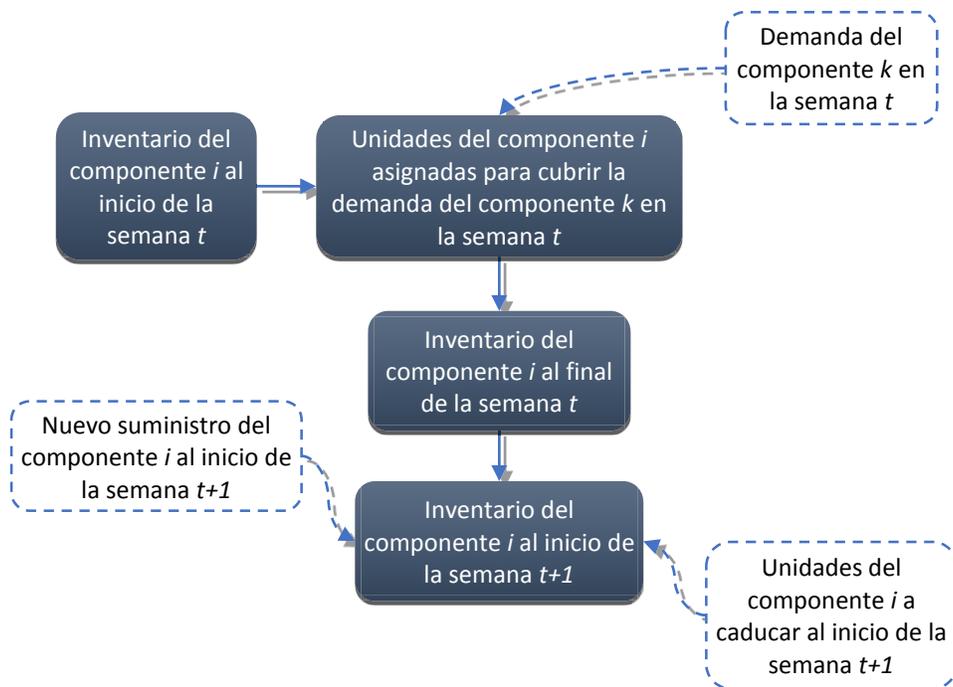


Ilustración 4. Red del proceso. Fuente: Elaboración propia.



FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo construida es una función de minimización, la cual busca disminuir los costos por déficit, es decir los costos de no poder satisfacer la demanda de un grupo dado con alguna unidad de contenido eritrocitario con existencia en inventario. También se contemplan los costos por vencimiento, estos representan el costo generado por cada unidad eritrocitaria que supere su tiempo de vida, es decir que caduque.

Además se expresa un costo de transfusión, el cual se refiere al costo que implica asignar alguna unidad de contenido eritrocitario del grupo i para satisfacer la demanda del grupo sanguíneo k . Esto con la finalidad de cuidar aquellas unidades cuyo grupo sanguíneo tiene menos probabilidad de ser donado, como es el caso de las unidades del grupo "O-".

La función objetivo del modelo de programación entera se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Min } F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 C_{Aijk} x_{ijkt} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^8 C_{Dk} D_{kt} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^8 C_{Vi} V_{it} \quad (1)$$

RESTRICCIONES

Restricción para la demanda no satisfecha:

$$y_{kt} - \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^6 x_{ijkt} = D_{kt}, \quad \forall k, t \quad (2)$$

Restricción para determinar el nivel de inventario al final de la semana t :

$$I_{ijt} - \sum_{k=1}^8 x_{ijkt} = z_{ijt}, \quad \forall i, j, t \quad (3)$$

Restricción de caducidad:

$$z_{ijt} = V_{it}, \quad \forall i, t, j = 6 \quad (4)$$

Restricciones para determinar el inventario inicial de la semana t :

$$z_{i(j-1)(t-1)} = I_{ijt}, \quad \forall i, t > 1, j \geq 2 \quad (5)$$

$$P_{it} = I_{ijt}, \quad \forall i, t > 1, j = 1 \quad (6)$$



Restricción de no desperdicio:

$$\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^6 x_{ijkt} \leq y_{kt}, \quad \forall k, t \quad (7)$$

Restricción de capacidad:

$$\sum_{j=1}^6 I_{ijt} \leq N_i, \quad \forall i, t \quad (8)$$

Restricciones de no negatividad:

$$x_{ijkt} \geq 0, \quad \forall i, j, k, t \quad (9)$$

$$I_{ijt} \geq 0, \quad \forall i, j, t \quad (10)$$

$$z_{ijt} \geq 0, \quad \forall i, j, t \quad (11)$$

$$y_{kt} \geq 0, \quad \forall k, t \quad (12)$$

$$P_{it} \geq 0, \quad \forall i, t \quad (13)$$

$$D_{kt} \geq 0, \quad \forall k, t \quad (14)$$

$$V_{it} \geq 0, \quad \forall i, t \quad (15)$$

MODELO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA

Con base en el modelo de programación entera, anteriormente mostrado, se desarrolla en siguiente modelo de programación dinámica.

ECUACIÓN RECURSIVA

Para calcular el costo mínimo en cada uno de los estados se determinó la siguiente ecuación recursiva de avance. De igual manera respeta los mismos principios de disminuir los costos por déficit y caducidad de unidades eritrocitarias.

$$f_t(z_t) = \min\{C_{Dt}(z_t) + C_{Vt}(z_t) + C_{At}(z_t)\}, \quad t = 1 \quad (16)$$

$$f_t(z_t) = \min\{C_{Dt}(z_t) + C_{Vt}(z_t) + C_{At}(z_t) + f_{t-1}(I_t - P_t + V_t)\}, \quad \forall t > 1 \quad (17)$$



ECUACIONES COMPLEMENTARIAS

$C_{At}(z_t)$ Se refiere al costo generado al asignar unidades eritrocitarias del grupo sanguíneo i de edad j a la demanda de unidades del grupo sanguíneo k , teniendo un inventario final z en el tiempo t . Queda definido por la siguiente ecuación.

$$C_{At}(z_t) = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 C_{Aijk} x_{ijkt} \quad (18)$$

$C_{Dt}(z_t)$ Representa el costo asumido al haber un déficit de unidades eritrocitarias para cubrir la demanda, teniendo un inventario final z en el tiempo t . Queda definido por la siguiente ecuación.

$$C_{Dt}(z_t) = \sum_{k=1}^8 C_{Dk} D_{kt} \quad (19)$$

$C_{Vt}(z_t)$ Representa el costo incurrido por las unidades caducadas que conlleva tener un inventario final z en el tiempo t . Queda definido por la siguiente ecuación.

$$C_{Vt}(z_t) = \sum_{i=1}^8 C_{Vi} V_{it} \quad (20)$$

ALGORITMO DE SOLUCIÓN

Debido a la gran combinatoriedad del problema, se desarrolla el siguiente algoritmo de solución con la finalidad de disminuir en gran medida la cantidad de cálculos necesarios para determinar la solución de los modelos.

1. Determinar las decisiones l_t para la etapa t .
2. Determinar los diferentes estados z_t para la etapa t .
3. Resolver el modelo de programación entera para cada decisión l_t del estado z_t en la etapa t .
4. Determinar la "decisión óptima" $f_t^*(z_t)$ para cada estado z_t en la etapa t .
5. Pasar a la siguiente etapa t .

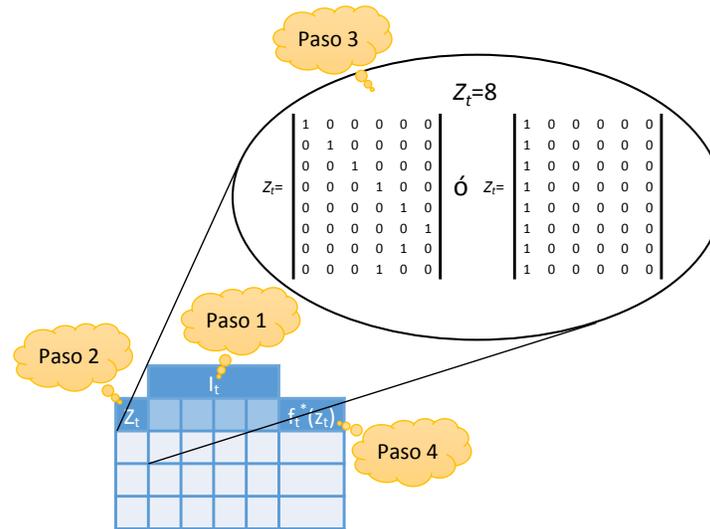


Ilustración 5. Representación de tabla obtenida con el algoritmo. Fuente: Elaboración propia.

Los pasos 1 y 2 del algoritmo, son empleados para formar las tablas características de programación dinámica. Se hace uso de la programación dinámica para reducir el problema de la gestión de inventario de unidades eritrocitarias en varios problemas que tengan la misma estructura al problema original, pero de menor complejidad, al ser estos más pequeños.

En el paso 3, se hace uso del modelo de programación entera para determinar la matriz “óptima” que representa el inventario final z en la etapa t , y las posibles soluciones a las asignaciones de unidades eritrocitarias a cada una de las demandas, dichas asignaciones son representadas en el modelo de programación entera como: x_{ijkt} . Esta búsqueda de la configuración “óptima” para cada matriz Z_t ayuda a disminuir considerablemente la cantidad de estados en cada una de las etapas del problema de programación dinámica.



ANÁLISIS DE DATOS

Para validar que los datos obtenidos que se emplearon en la determinación de las características de las donaciones de contenido eritrocitario fueran representativos del sistema, se realizaron pruebas de hipótesis respecto a las proporciones poblacionales de los diferentes grupos sanguíneos.

Las proporciones para cada grupo sanguíneo y para el Rhd, se encuentran distribuidas en la Ciudad de México de la siguiente manera: el 67.7% de la población tiene sangre tipo “O”, el 23.4% es “A”, el 7.2% “B” y tan sólo el 1.7% le corresponde el grupo “AB”. En cuanto al Rhd es del 4.1% (Lorenzo, Ma Guadalupe, Mirna, Alejandro, & Adolfo, 2002).

Para el caso de la prueba de hipótesis respecto a la proporción poblacional de las donaciones del tipo de sangre “O”, se expresan la hipótesis nula y alternativa de la siguiente manera:

$$H_0: p=0.677$$

$$H_a: p \neq 0.677$$

Para estas pruebas se estableció un nivel de significancia de $\alpha=0.01$.

Las pruebas de hipótesis se realizaron en el software de análisis estadístico STATDISK versión: v11.1.0, el cual permite realizar pruebas estadísticas, además cuenta con varias funciones para realizar gráficos y analizar datos.

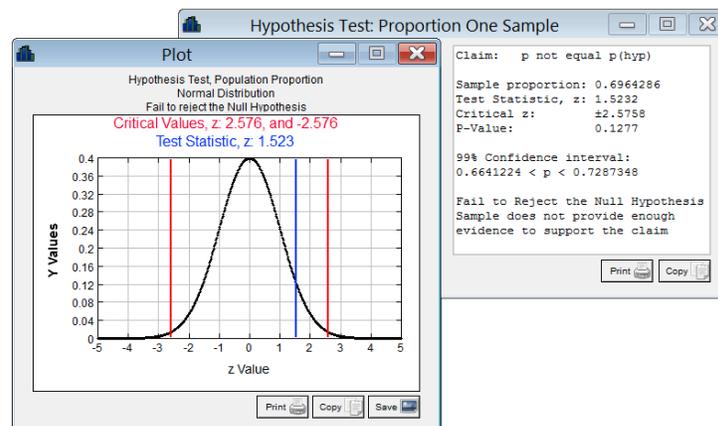


Ilustración 6. Prueba de hipótesis respecto a la proporción del grupo sanguíneo "O". Fuente: STATDISK (v11.1.0).



Con base en los resultados obtenidos de los cálculos realizados, en el software STATDISK, se puede concluir que no existe suficiente evidencia que justifique el rechazo de que la proporción de las donaciones del grupo sanguíneo "O" es de 67.7%.

Cada prueba de hipótesis respecto a las proporciones de los demás grupos sanguíneos y del Rhd se expresaron de manera similar a la anterior, las capturas de pantalla de los resultados se muestran a continuación.

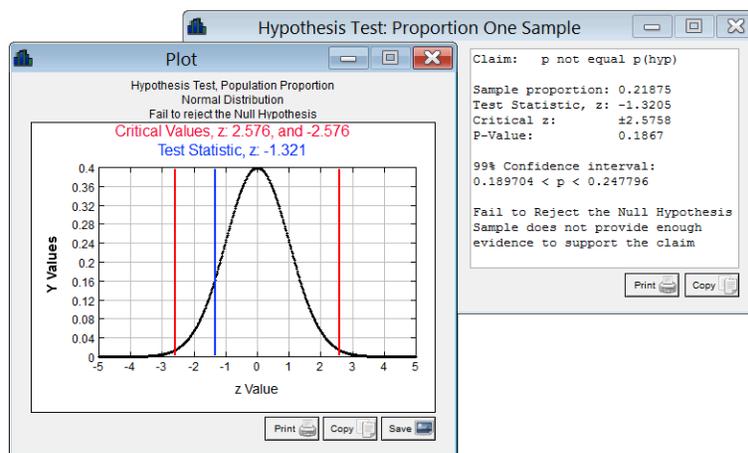


Ilustración 7. Prueba de hipótesis respecto a la proporción del grupo sanguíneo "A". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

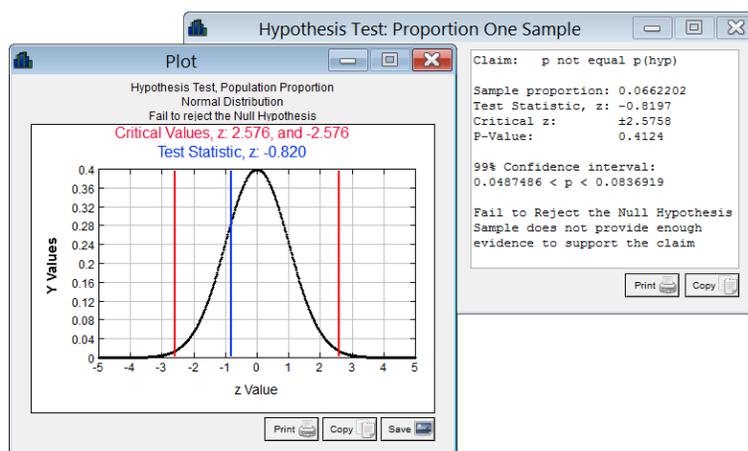


Ilustración 8. Prueba de hipótesis respecto a la proporción del grupo sanguíneo "B". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

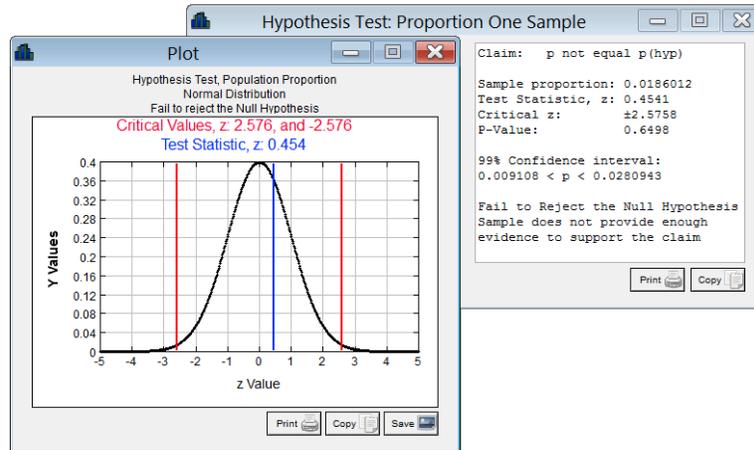


Ilustración 9. Prueba de hipótesis respecto a la proporción del grupo sanguíneo "AB". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

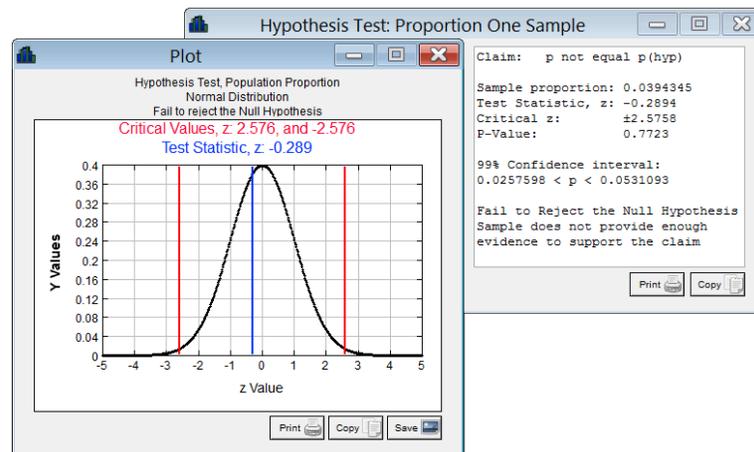


Ilustración 10. Prueba de hipótesis respecto a la proporción del Rhd. Fuente: STATDISK (v11.1.0).

Con base en los resultados mostrados anteriormente podemos deducir que no existe suficiente evidencia que justifique el rechazo de que la proporción de las donaciones de los grupos sanguíneos: "A" es de 23.4%, el "B" es de 7.2%, el "AB" es de 1.7% y el Rhd es de 4.1%.

Durante el estudio del sistema del banco de sangre y la recolección de los datos, se expresó por parte de los responsables de la distribución de los contenidos eritrocitarios que la demanda

disminuye en periodos vacacionales. Debido a esto se tomó la decisión de realizar pruebas de hipótesis para la diferencia entre dos medias.

Las pruebas de hipótesis se expresaron de la siguiente forma.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$$

Dónde: μ_1 es la demanda promedio en temporada no vacacional.

μ_2 es la demanda promedio en temporada vacacional.

Para estas pruebas se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$

En el caso del grupo sanguíneo "O+", los resultados indican que existe evidencia suficiente para sustentar la aseveración de que la demanda promedio de contenido eritrocitario de grupo "O+" es diferente en temporada vacacional a la demanda en temporada no vacacional.

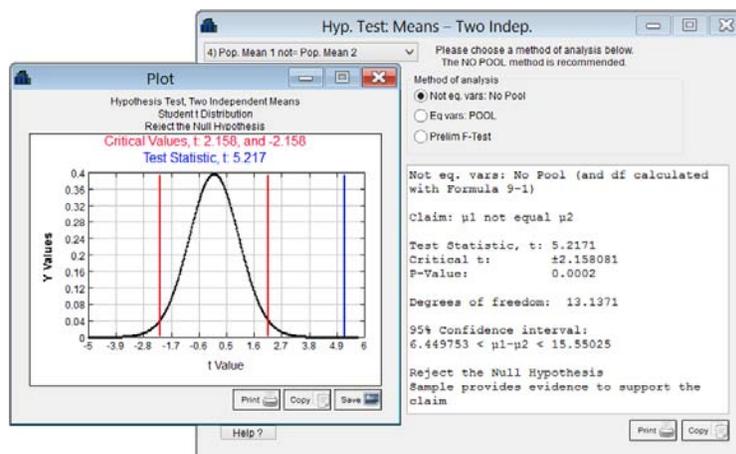


Ilustración 11. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de la demanda del grupo sanguíneo "O+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

Para el caso del grupo sanguíneo "O-", los resultados indican que existe evidencia suficiente para sustentar la aseveración de que la demanda promedio de contenido eritrocitario de grupo "O-" es diferente en temporada vacacional a la demanda en temporada no vacacional.

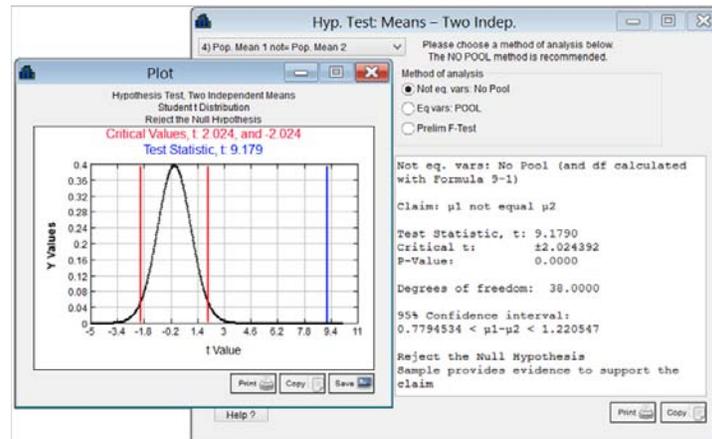


Ilustración 12. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de la demanda del grupo sanguíneo "O-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

En cuanto al grupo sanguíneo "A+", los resultados indican que no existe evidencia suficiente para sustentar la aseveración de que la demanda promedio de contenido eritrocitario de grupo "A+" es diferente en temporada vacacional a la demanda en temporada no vacacional.

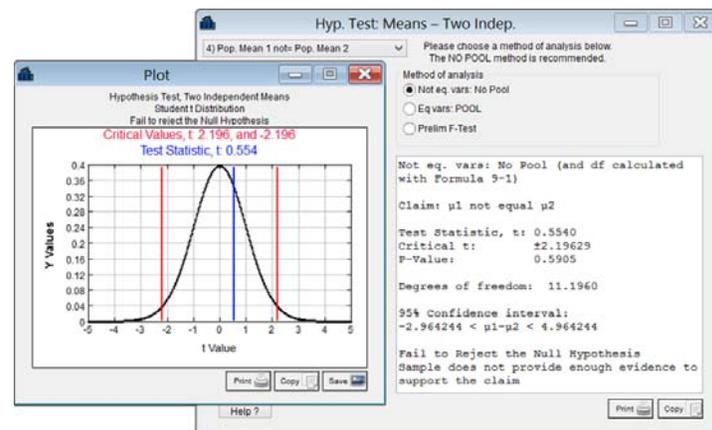


Ilustración 13. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de la demanda del grupo sanguíneo "A+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

De igual manera para el grupo sanguíneo "A-", los resultados indican que no existe evidencia suficiente para sustentar la aseveración de que la demanda promedio de contenido eritrocitario de grupo "A-" es diferente en temporada vacacional a la demanda en temporada no vacacional.

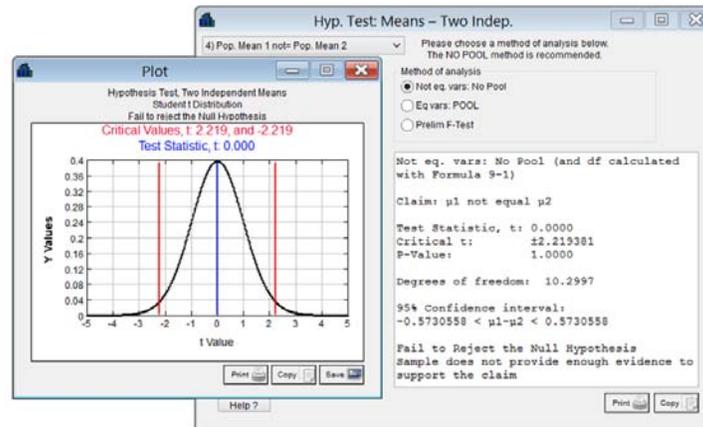


Ilustración 14. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de la demanda del grupo sanguíneo "A-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

Correspondiente al grupo sanguíneo "B+", los resultados indican que no existe evidencia suficiente para sustentar la aseveración de que la demanda promedio de contenido eritrocitario de grupo "B+" es diferente en temporada vacacional a la demanda en temporada no vacacional.

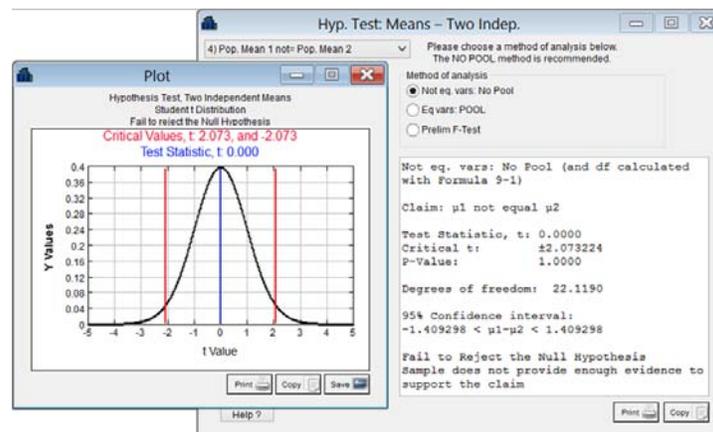


Ilustración 15. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de la demanda del grupo sanguíneo "B+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

Para el grupo sanguíneo "B-", los resultados indican que no existe evidencia suficiente para sustentar la aseveración de que la demanda promedio de contenido eritrocitario de grupo "B-" es diferente en temporada vacacional a la demanda en temporada no vacacional.

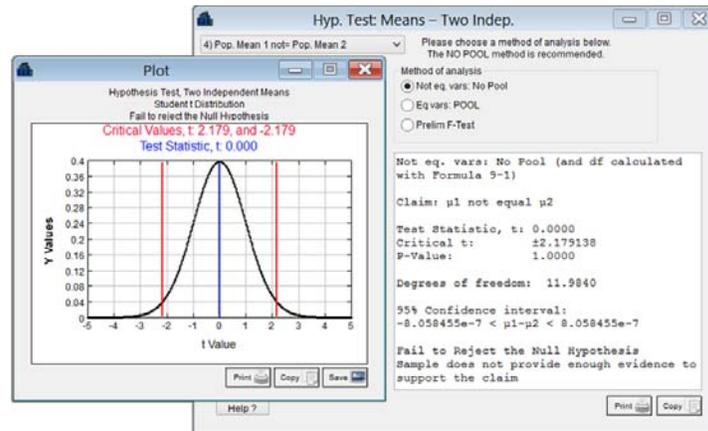
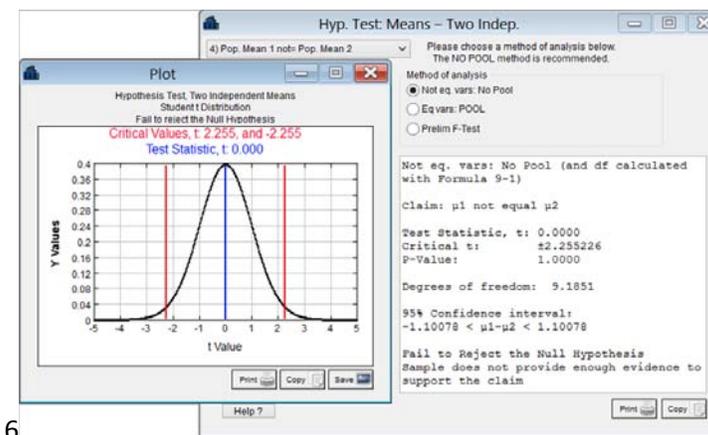


Ilustración 16. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de la demanda del grupo sanguíneo "B-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

En el caso del grupo sanguíneo "AB+", los resultados indican que no existe evidencia suficiente para sustentar la aseveración de que la demanda promedio de contenido eritrocitario de grupo "AB+" es diferente en temporada vacacional a la demanda en temporada no vacacional.



6

Ilustración 17. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de la demanda del grupo sanguíneo "AB+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

Para el grupo sanguíneo "AB-", los resultados indican que no existe evidencia suficiente para sustentar la aseveración de que la demanda promedio de contenido eritrocitario de grupo "AB-" es diferente en temporada vacacional a la demanda en temporada no vacacional.

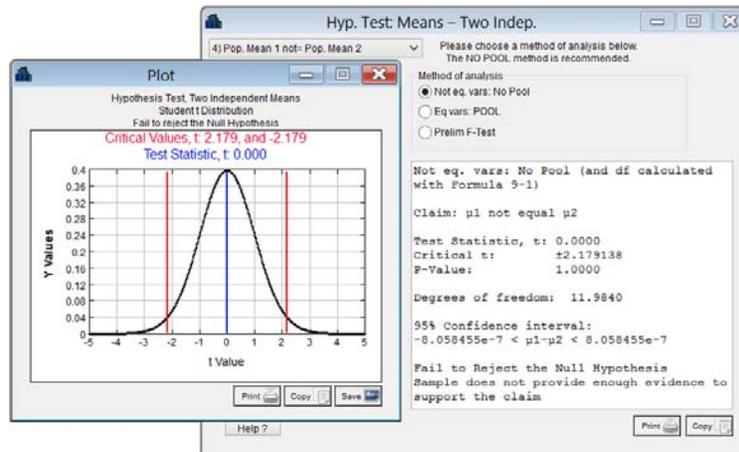


Ilustración 18. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de la demanda del grupo sanguíneo "AB-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

De igual manera al caso anterior de la demanda de contenido eritrocitario para cada uno de los grupos sanguíneos. También se realizó prueba de hipótesis para la diferencia entre dos medias, con la finalidad de determinar si se puede asumir que existe una diferencia en la cantidad de donación de contenido eritrocitario de cada uno de los grupos en temporada vacacional, con respecto a la temporada no vacacional.

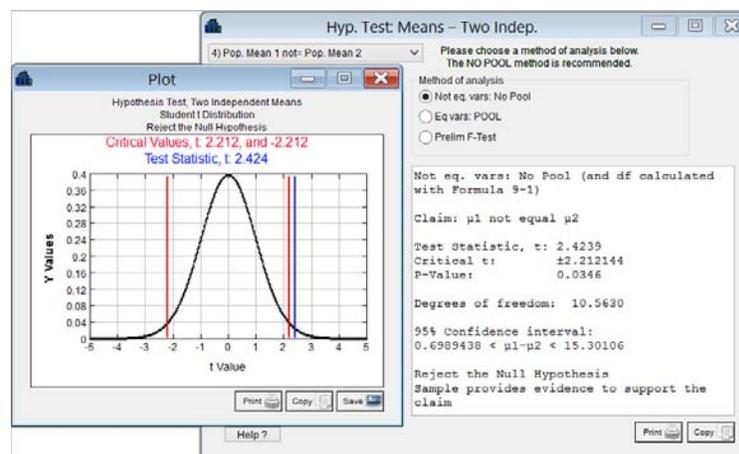


Ilustración 19. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de donación del grupo sanguíneo "O+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

Los resultados mostrados en la imagen anterior indican que existe evidencia suficiente para sustentar la aseveración de que la donación promedio de contenido eritrocitario de grupo “O+” es diferente en temporada vacacional a la donación en temporada no vacacional.

En cambio para los demás grupos sanguíneos; “O-”, “A+”, “A-”, “B+”, “B-”, “AB+” y “AB-” respectivamente, los resultados indican que no existe evidencia suficiente para sustentar la aseveración de que la donación promedio de contenido eritrocitario es diferente en temporada vacacional a la donación en temporada no vacacional.

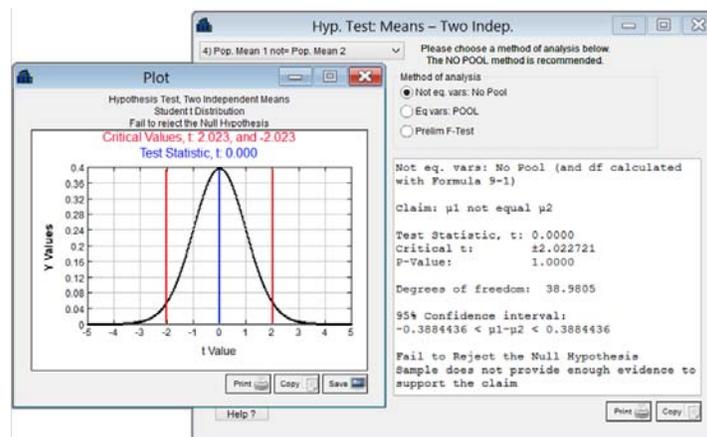


Ilustración 20. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de donación del grupo sanguíneo “O-”. Fuente: STATDISK (v11.1.0).

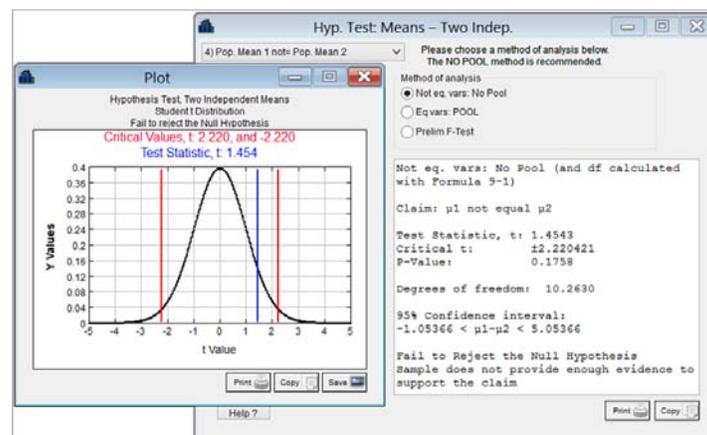


Ilustración 21. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de donación del grupo sanguíneo “A+”. Fuente: STATDISK (v11.1.0).

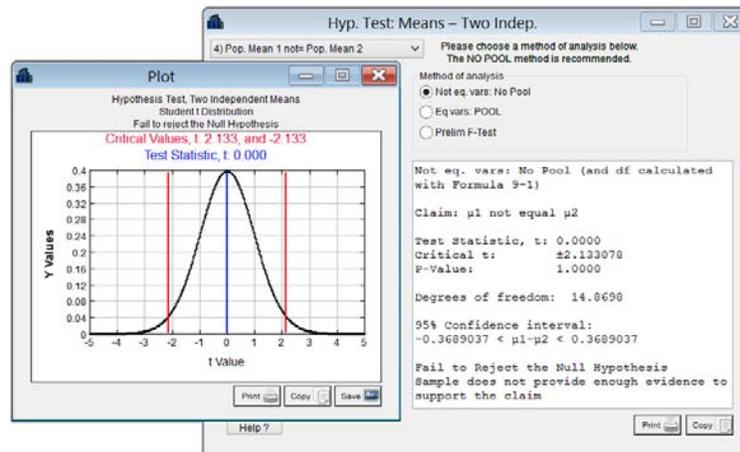


Ilustración 22. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de donación del grupo sanguíneo "A-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

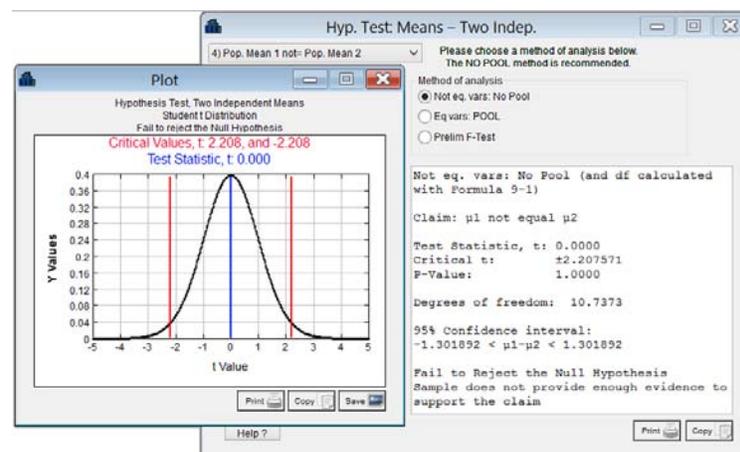


Ilustración 23. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de donación del grupo sanguíneo "B+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

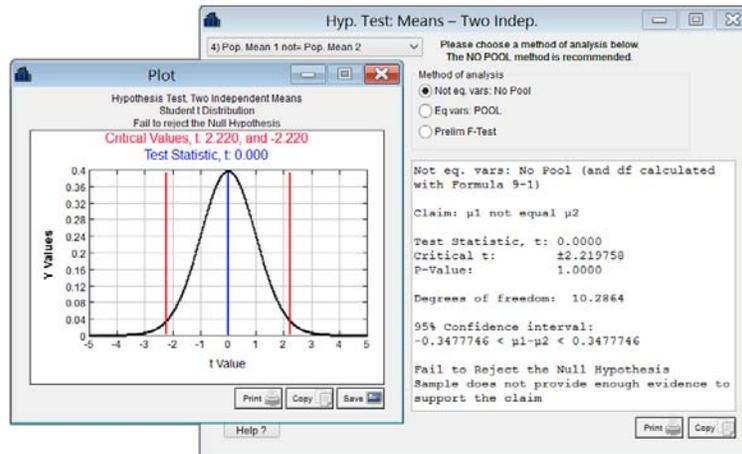


Ilustración 24. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de donación del grupo sanguíneo "B-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

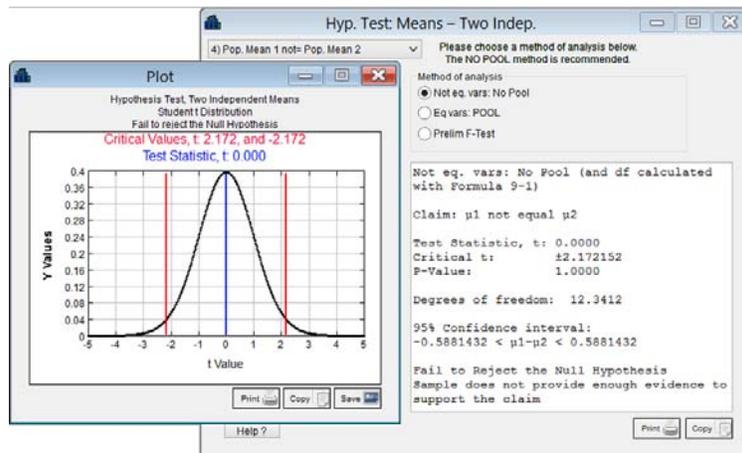


Ilustración 25. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de donación del grupo sanguíneo "AB+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

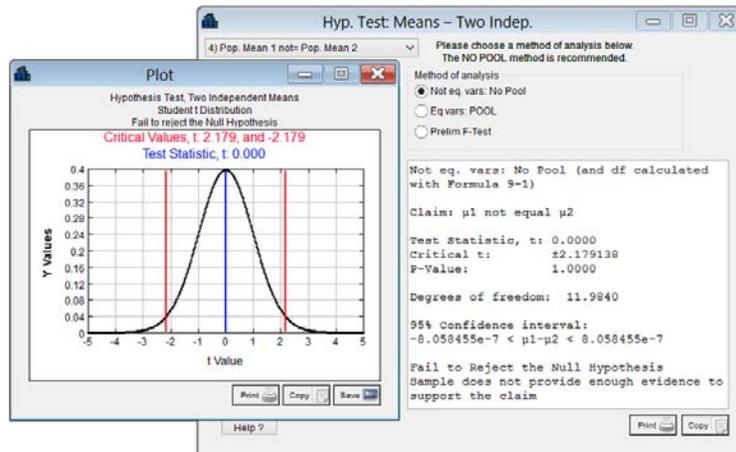


Ilustración 26. Prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de donación del grupo sanguíneo "AB-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

Tomando en cuenta los resultados mostrados anteriormente se determinó con que distribución de probabilidad se reciben donaciones y solicitudes de contenido eritrocitario para satisfacer la demanda, para cada uno de los distintos grupos sanguíneos. El análisis se realizó con ayuda de los software: EasyFit versión: 5.6 Professional y BestFit versión: 4.5.2, los cuales son software especializados para análisis y ajuste de datos a distribuciones de probabilidad.

En la siguiente tabla se muestra la distribución de probabilidad con la que se reciben donaciones semanalmente. La probabilidad de recibir una donación de contenido eritrocitario del grupo sanguíneo "AB-" es considerada de cero, esto debido a que es un grupo sanguíneo muy poco común, y en los datos recolectados no se observó caso alguno.

Tabla 3. Distribución de probabilidad para las donaciones p_i de contenido eritrocitario. Fuente: Elaboración propia.

Grupo	No vacacional	Vacacional
AB+	Poisson(0.52083)	
AB-	-----	
A+	Poisson(5.8333)	
A-	Poisson(0.29167)	
B+	Poisson(1.7083)	
B-	Poisson(0.14583)	
O+	Poisson(20.205)	Poisson(12.889)
O-	Poisson(0.66667)	



Para el caso de la demanda de los diferentes grupos sanguíneos, la distribución de probabilidad con la que se reciben solicitudes de contenidos eritrocitario semanalmente se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4. Distribución de probabilidad para la demanda y_k de contenido eritrocitario. Fuente: Elaboración propia.

Grupo	No vacacional	Vacacional
AB+	Poisson(0.52083)	
AB-	-----	
A+	Poisson(8.4375)	
A-	Poisson(0.3125)	
B+	Poisson(1.8333)	
B-	Poisson(0.020833)	
O+	Poisson(21.769)	Poisson(10.778)
O-	Poisson(0.4359)	Poisson(0.11111)

Al igual que el caso de las donaciones, la probabilidad de recibir una solicitud de contenido eritrocitario correspondiente al grupo “AB-” es considerada nula.

DETERMINACIÓN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS

Los datos obtenidos anteriormente que representan algunas de las características del sistema, fueron utilizados para determinar los valores adecuados para los distintos parámetros del modelo. Para el caso del nivel máximo de inventario se determinó que los valores presentados en la siguiente tabla son adecuados para el estudio.

Tabla 5. Nivel máximo de inventario para el tipo de sangre i . Fuente: Elaboración propia.

Grupo	Valor N_i
AB+	100
AB-	100
A+	100
A-	100
B+	100
B-	100
O+	100
O-	100



En la determinación del costo de asignación se contemplaron la probabilidad de donación de un determinado grupo y la probabilidad de que se solicite una transfusión para un grupo determinado, también se tomaron en cuenta la edad que puede tener una unidad sanguínea y las distintas opciones de transfusión. Para determinar los costos de asignación adecuados se formuló un modelo de programación entera, el cual contempla las características del sistema anteriormente mencionadas (Ver anexo B).

En las tablas siguientes se pueden observar los costos de asignación para las distintas combinaciones posibles de transfusión con unidades de edad j . Los costos presentados representan una penalización por cada asignación realizada, y no un costo monetario o de recursos. Se realizó de esta manera con la finalidad de dar cierta prioridad de elección de unidades sanguíneas al momento de determinar las asignaciones.

Costo de asignación para transfusión con unidades de edad de 1 semana:

Tabla 6. Costo de asignación para las unidades de edad $j=1$. Fuente: Elaboración propia.

Donador	Demanda							
	AB+	AB-	A+	A-	B+	B-	O+	O-
AB+	6							
AB-	30	6						
A+	12		6					
A-	36	12	19	6				
B+	18				6			
B-	42	18			19	6		
O+	24		13		12		6	
O-	48	24	27	13	26	12	25	6



Costo de asignación para transfusión con unidades de edad de 2 semanas:

Tabla 7. Costo de asignación para las unidades de edad $j=2$. Fuente: Elaboración propia.

Donador	Demanda							
	AB+	AB-	A+	A-	B+	B-	O+	O-
AB+	5							
AB-	29	5						
A+	11		5					
A-	35	11	18	5				
B+	17				5			
B-	41	17			18	5		
O+	23		12		11		5	
O-	47	23	26	12	25	11	24	5

Costo de asignación para transfusión con unidades de edad de 3 semanas:

Tabla 8. Costo de asignación para las unidades de edad $j=3$. Fuente: Elaboración propia.

Donador	Demanda							
	AB+	AB-	A+	A-	B+	B-	O+	O-
AB+	4							
AB-	28	4						
A+	10		4					
A-	34	10	17	4				
B+	16				4			
B-	40	16			17	4		
O+	22		11		10		4	
O-	46	22	25	11	24	10	23	4



Costo de asignación para transfusión con unidades de edad de 4 semanas:

Tabla 9. Costo de asignacion para las unidades de edad $j=4$. Fuente: Elaboración propia.

Donador	Demanda							
	AB+	AB-	A+	A-	B+	B-	O+	O-
AB+	3							
AB-	27	3						
A+	9		3					
A-	33	9	16	3				
B+	15				3			
B-	39	15			16	3		
O+	21		10		9		3	
O-	45	21	24	10	23	9	22	3

Costo de asignación para transfusión con unidades de edad de 5 semanas:

Tabla 10. Costo de asignacion para las unidades de edad $j=5$. Fuente: Elaboración propia.

Donador	Demanda							
	AB+	AB-	A+	A-	B+	B-	O+	O-
AB+	2							
AB-	26	2						
A+	8		2					
A-	32	8	15	2				
B+	14				2			
B-	38	14			15	2		
O+	20		9		8		2	
O-	44	20	23	9	22	8	21	2



Costo de asignación para transfusión con unidades de edad de 6 semanas:

Tabla 11. Costo de asignación para las unidades de edad $j=6$. Fuente: Elaboración propia.

Donador	Demanda							
	AB+	AB-	A+	A-	B+	B-	O+	O-
AB+	1							
AB-	25	1						
A+	7		1					
A-	31	7	14	1				
B+	13				1			
B-	37	13			14	1		
O+	19		8		7		1	
O-	43	19	22	8	21	7	20	1

Para los costos asociados al déficit de unidades sanguíneas y al costo por caducidad se establecieron los valores que se muestran en las tablas siguientes.

Costo por no satisfacer la demanda de contenido eritrocitario del grupo sanguíneo k .

Tabla 12. Costo por déficit. Fuente: Elaboración propia.

Grupo	Valor C_{Dk}
AB+	1000
AB-	1000
A+	1000
A-	1000
B+	1000
B-	1000
O+	1000
O-	1000



Costo por unidad del grupo sanguíneo i caducada.

Tabla 13. Costo por vencimiento. Fuente: Elaboración propia.

Grupo	Valor C_{vi}
AB+	100
AB-	100
A+	100
A-	100
B+	100
B-	100
O+	100
O-	100

VALIDACIÓN DEL MODELO

El modelo realizado se consideró válido por parte de los implicados del sistema del banco de sangre, ya que mediante las restricciones se representan los puntos de interés para los cuales se desea mejorar la situación actual, como lo son: el déficit de unidades eritrocitarias para satisfacer la demanda y la caducidad de estas. Esto se ve afectado principalmente en la forma de asignar los contenidos eritrocitarias a las solicitudes de transfusión.

Para validar que las asignaciones se realicen de manera “coherente”, se realizaron algunas corridas de prueba. Estas corridas arrojaron resultados que se consideraron aceptables, como lo son:

- Dar prioridad al asignar unidades del mismo grupo sanguíneo que los solicitados.
- “Cuidar” aquellas unidades cuyo grupo sanguíneo es escaso y que tienen mayor compatibilidad de transfusión, como es el caso de las unidades “O-”.
- Asignar primeramente unidades con mayor edad.

En cuanto a la validación del generador de donaciones y demanda, se realizaron pruebas de hipótesis respecto a la media de un grupo de datos recolectados y un grupo de datos generados con el modelo.

Las pruebas de hipótesis referentes a la donación se expresaron de la siguiente forma.

$$H_0: \mu_{1i} = \mu_{2i}$$

$$H_a: \mu_{1i} \neq \mu_{2i}$$

Dónde: μ_{1i} es la donación promedio del grupo i generada con el modelo.

μ_{2i} es la donación promedio del grupo i de los datos recolectados.

Para estas pruebas se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

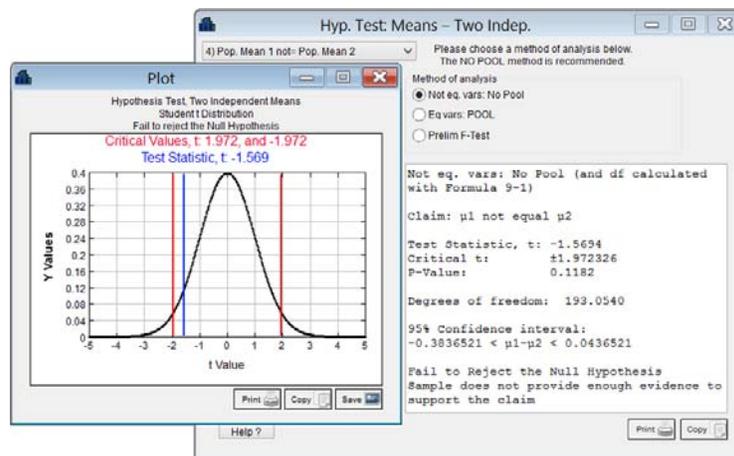


Ilustración 27. Prueba de hipótesis para la validación del generador de donaciones del grupo "AB+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

Para la donación del grupo sanguíneo "AB+", los resultados indican que no existe evidencia suficiente para sustentar la aseveración de que la donación promedio de contenido eritrocitario del grupo "AB+" generada con el modelo es diferente a la donación de los datos observados.

Referente a los demás grupos sanguíneos, también se obtuvo el mismo resultado; de que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. En las siguientes imágenes se muestran los resultados de la pruebas de hipótesis realizadas correspondientes a la validación del generador de donaciones. Hay que recordar que la donación del grupo sanguíneo "AB-" se consideró nula.

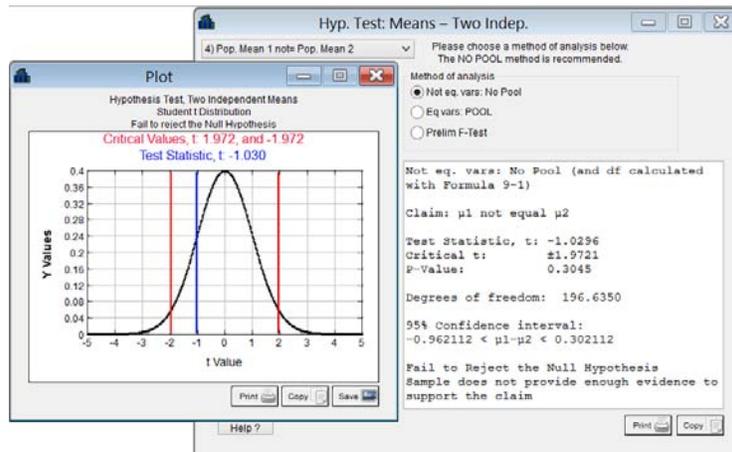


Ilustración 28. Prueba de hipótesis para la validación del generador de donaciones del grupo "A+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

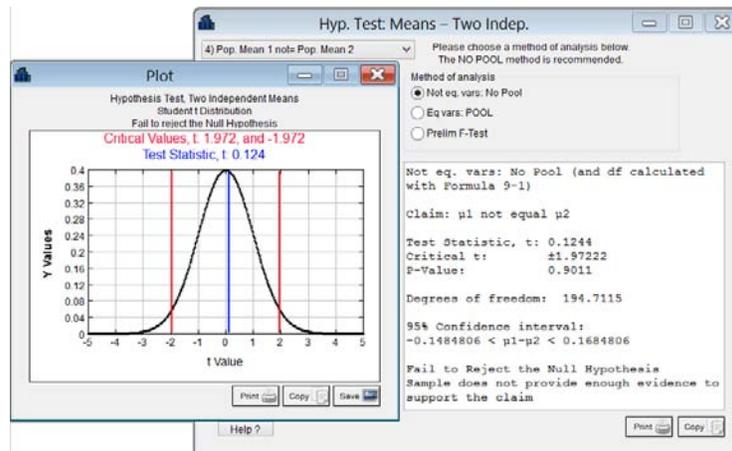


Ilustración 29. Prueba de hipótesis para la validación del generador de donaciones del grupo "A-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

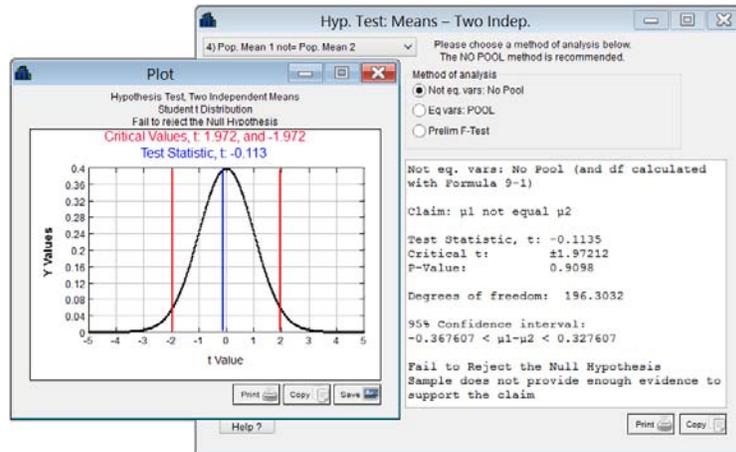


Ilustración 30. Prueba de hipótesis para la validación del generador de donaciones del grupo "B+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

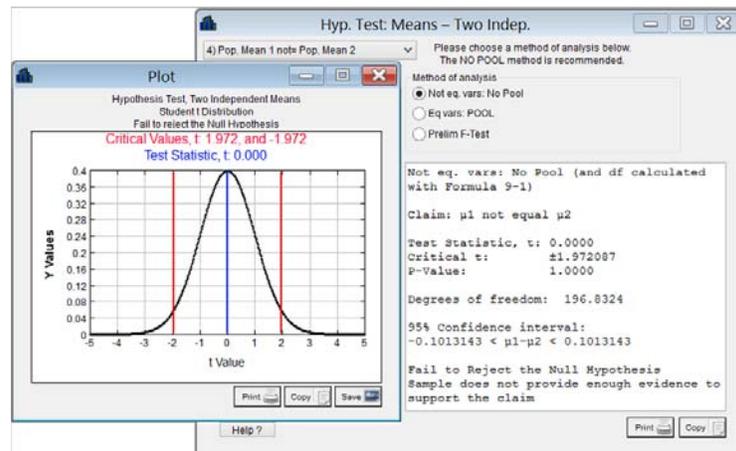


Ilustración 31. Prueba de hipótesis para la validación del generador de donaciones del grupo "B-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

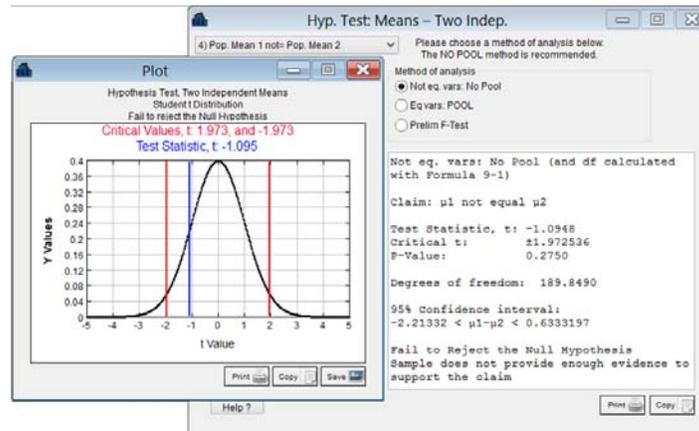


Ilustración 32. Prueba de hipótesis para la validación del generador de donaciones del grupo "O+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

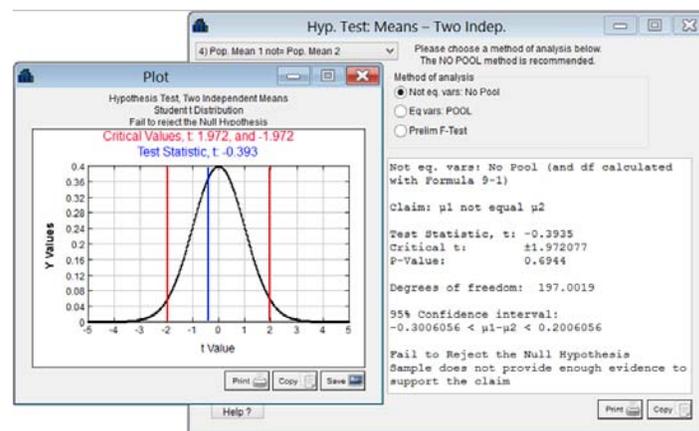


Ilustración 33. Prueba de hipótesis para la validación del generador de donaciones del grupo "O-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

Para la validación del generador de la demanda las pruebas de hipótesis se expresaron de la siguiente forma.

$$H_0: \mu_{1k} = \mu_{2k}$$

$$H_a: \mu_{1k} \neq \mu_{2k}$$

Dónde: μ_{1k} es la demanda promedio del grupo k generada con el modelo.

μ_{2k} es la demanda promedio del grupo k de los datos recolectados.

Para estas pruebas se estableció un nivel de significancia de $\alpha=0.05$

En las siguientes imágenes se muestran los resultados de la pruebas de hipótesis realizadas correspondientes a la validación del generador de demanda. Los resultados obtenidos muestran que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en cada una de las pruebas realizadas.

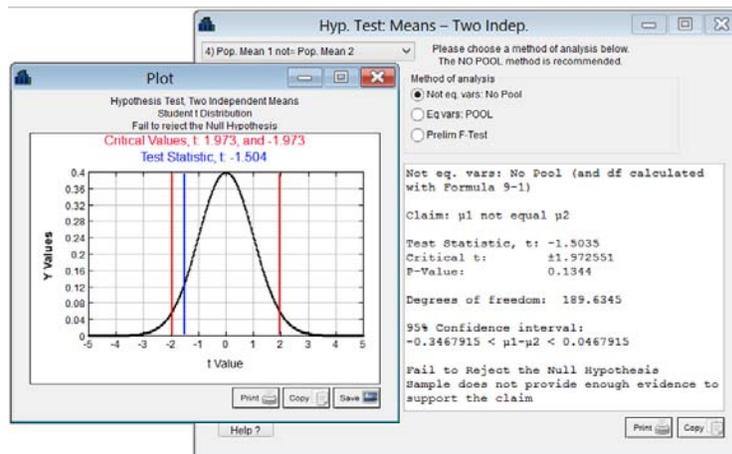


Ilustración 34. Prueba de hipótesis para la validación del generador de demanda del grupo "AB+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

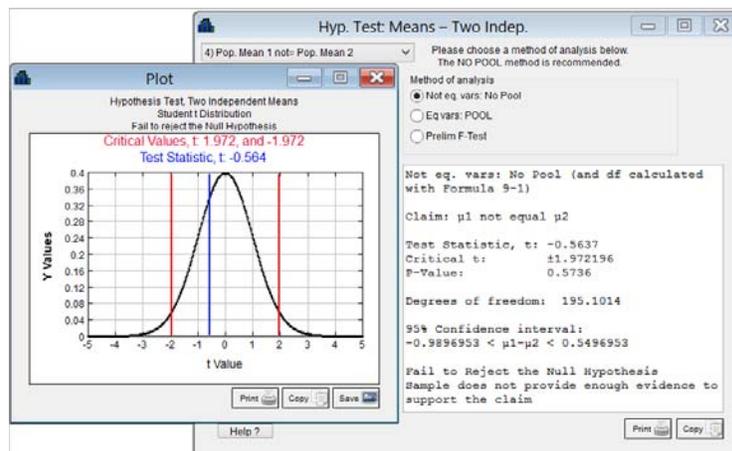


Ilustración 35. Prueba de hipótesis para la validación del generador de demanda del grupo "A+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

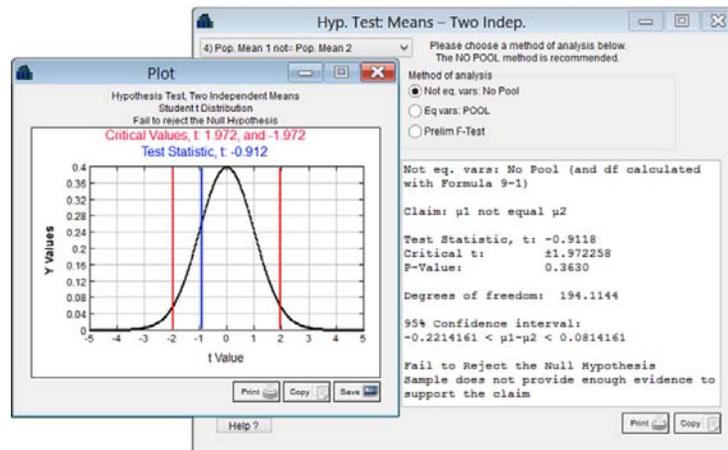


Ilustración 36. Prueba de hipótesis para la validación del generador de demanda del grupo "A-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

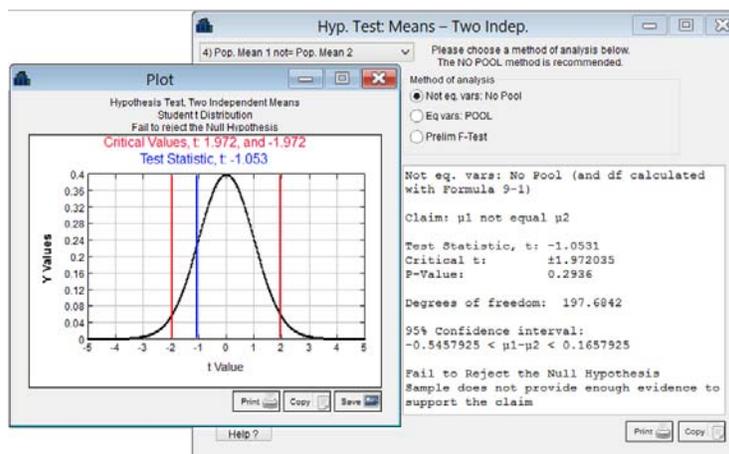


Ilustración 37. Prueba de hipótesis para la validación del generador de demanda del grupo "B+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

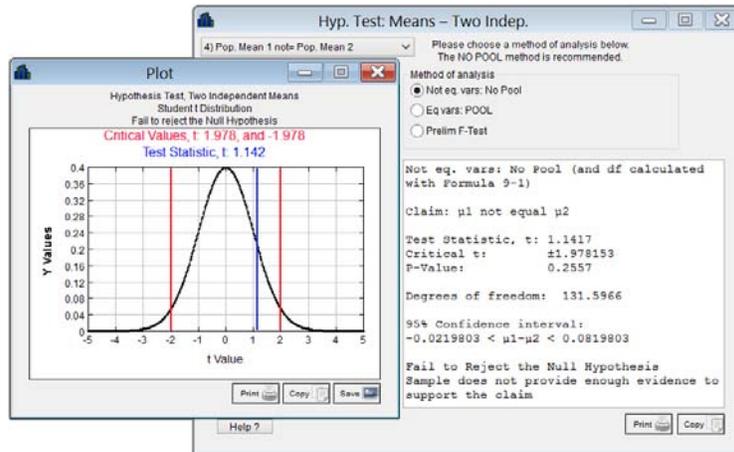


Ilustración 38. Prueba de hipótesis para la validación del generador de demanda del grupo "B-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

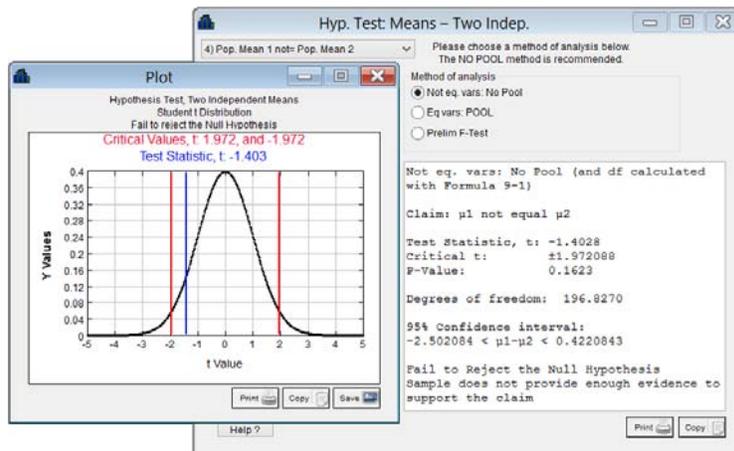


Ilustración 39. Prueba de hipótesis para la validación del generador de demanda del grupo "O+". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

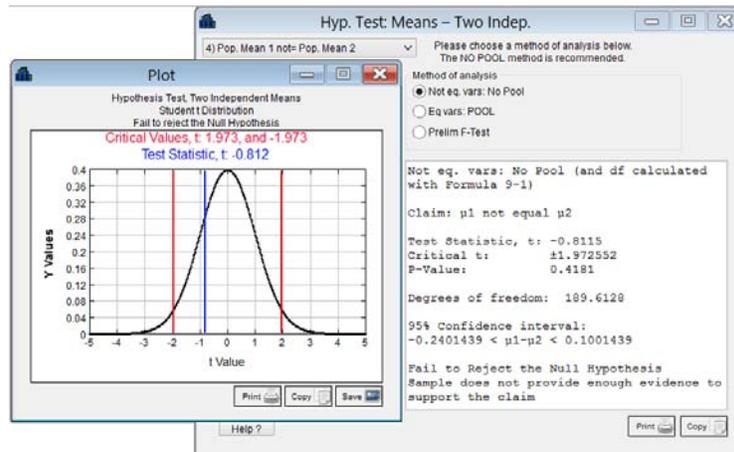


Ilustración 40. Prueba de hipótesis para la validación del generador de demanda del grupo "O-". Fuente: STATDISK (v11.1.0).

DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Para la realización del experimento, el modelo se programó en el software LINGO v.14 Extended, el cual es una herramienta que permite formular modelos matemáticos, resolverlos y analizar su solución de una manera más rápida, fácil y eficiente.

Esta parte del modelo se programó en dicho software para resolver lo correspondiente al modelo de programación entera en cada una de las decisiones de los diferentes estados que conforman las etapas del modelo de programación dinámica. Y para llevar a cabo el análisis de cada una de las etapas que conforman la sección de programación dinámica, se construyó una macro en el software Microsoft Excel. También en el software de Excel se creó una macro que realiza la generación de las donaciones y la demanda de las unidades sanguíneas.

Una vez construido el modelo, se procedió a realizar algunas corridas piloto para determinar la cantidad de corridas a realizar. Para este cálculo se empleó la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\sigma^2 Z^2}{E^2} \quad (21)$$



Donde:

n Tamaño de la muestra.

σ Desviación estándar.

Z Nivel de confianza deseado.

E Error máximo permitido.

Como medida de desempeño se utilizaron el déficit de unidades sanguíneas y la cantidad de unidades caducadas, en un intervalo de tiempo de 52 semanas. En el caso del déficit de unidades sanguíneas se estableció un error máximo permitido de 5 unidades, y para la cantidad de unidades caducadas un error máximo de 1 unidad. El nivel de confianza establecido fue del 95%.

Al realizar los cálculos correspondientes se obtuvo que el tamaño mínimo de corridas debe de ser de 397 para que el error cometido al estimar la media de déficit de unidades sanguíneas sea inferior a 5 unidades con un nivel de confianza del 95%. Por otra parte para que el error cometido al estimar la media de unidades caducadas sea menor a una unidad con el mismo nivel de confianza, el número de corridas mínimas debe ser de 237.

Con base en los resultados obtenidos anteriormente se decidió realizar 400 corridas, con una longitud de tiempo de 52 semanas cada una. Generándose en cada etapa donaciones y demanda aleatorias de contenidos eritrocitarios para cada grupo sanguíneo.



CAPÍTULO III

RESULTADOS



ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez que se realizaron la cantidad de corridas establecidas se obtuvieron los siguientes resultados:

- El déficit de unidades sanguíneas disminuye en un 24.7% en comparación con los datos obtenidos al analizar el sistema. Actualmente se tiene un déficit del 12.5%.
- La caducidad de contenido eritrocitario es menor en un 59.1% en comparación con los datos obtenidos al analizar el sistema. En la actualidad la cantidad de unidades caducadas representan el 3.7% de las donaciones.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
1	Tiempo (h):	16	115	117																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
2	N° declinaciones:	33																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
3	N° estados:	37																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
5	Demanda (Y):	36			y(h)=	1	0	7	2	4	0	22	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
6	Donaciones (P):	37			p(h)=	0	0	7	0	5	0	24	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
9	INV. INICIAL (I) →																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
10	INV. FINAL (Z)	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	I*(Z)	I*																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
11		44	6324	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	6324	80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
12		45	7918	7902	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	7902	81																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
13		46	8312	8296	8300	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	8296	82																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
14		47	9308	9290	9274	9258	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	9258	83																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
15		48	10300	10284	10268	10252	10236	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	10236	84																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
16		49	11294	11278	11262	11246	11230	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	11230	85																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
17		50	12288	12272	12256	12240	12224	12208	12192	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	12192	86																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
18		51	13282	13266	13250	13234	13218	13202	13186	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	13186	87																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
19		52	14277	14260	14244	14228	14212	14196	14180	14164	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	14164	88																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
20		53	15272	15255	15238	15222	15206	15190	15174	15158	15142	15126	15110	15094	15078	15062	15046	15030	15014	14998	14982	14966	14950	14934	14918	14902	14886	14870	14854	14838	14822	14806	14790	14774	14758	14742	14726	14710	14694	15126	89																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
21		54	16267	16250	16233	16216	16199	16182	16165	16148	16131	16114	16097	16080	16063	16046	16029	16012	15995	15978	15961	15944	15927	15910	15893	15876	15859	15842	15825	15808	15791	15774	15757	15740	15723	15706	15689	15672	15655	16097	90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
22		55	17262	17245	17228	17211	17194	17177	17160	17143	17126	17109	17092	17075	17058	17041	17024	17007	16990	16973	16956	16939	16922	16905	16888	16871	16854	16837	16820	16803	16786	16769	16752	16735	16718	16701	16684	16667	16650	16633	17075	91																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
23		56	18257	18240	18223	18206	18189	18172	18155	18138	18121	18104	18087	18070	18053	18036	18019	18002	17985	17968	17951	17934	17917	17900	17883	17866	17849	17832	17815	17798	17781	17764	17747	17730	17713	17696	17679	17662	17645	17628	17611	18053	92																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
24		57	19252	19235	19218	19201	19184	19167	19150	19133	19116	19099	19082	19065	19048	19031	19014	18997	18980	18963	18946	18929	18912	18895	18878	18861	18844	18827	18810	18793	18776	18759	18742	18725	18708	18691	18674	18657	18640	18623	18606	19031	93																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
25		58	20247	20230	20213	20196	20179	20162	20145	20128	20111	20094	20077	20060	20043	20026	20009	19992	19975	19958	19941	19924	19907	19890	19873	19856	19839	19822	19805	19788	19771	19754	19737	19720	19703	19686	19669	19652	19635	19618	19601	19584	19992	94																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
26		59	21242	21225	21208	21191	21174	21157	21140	21123	21106	21089	21072	21055	21038	21021	21004	20987	20970	20953	20936	20919	20902	20885	20868	20851	20834	20817	20800	20783	20766	20749	20732	20715	20698	20681	20664	20647	20630	20613	20596	20579	20562	20545	20528	20511	20494	20477	20460	20443	20426	20409	20392	20375	20358	20341	20324	20307	20290	20273	20256	20239	20222	20205	20188	20171	20154	20137	20120	20103	20086	20069	20052	20035	20018	20001	19984	19967	19950	19933	19916	19899	19882	19865	19848	19831	19814	19797	19780	19763	19746	19729	19712	19695	19678	19661	19644	19627	19610	19593	19576	19559	19542	19525	19508	19491	19474	19457	19440	19423	19406	19389	19372	19355	19338	19321	19304	19287	19270	19253	19236	19219	19202	19185	19168	19151	19134	19117	19100	19083	19066	19049	19032	19015	19998	19981	19964	19947	19930	19913	19896	19879	19862	19845	19828	19811	19794	19777	19760	19743	19726	19709	19692	19675	19658	19641	19624	19607	19590	19573	19556	19539	19522	19505	19488	19471	19454	19437	19420	19403	19386	19369	19352	19335	19318	19301	19284	19267	19250	19233	19216	19199	19182	19165	19148	19131	19114	19097	19080	19063	19046	19029	19012	19995	19978	19961	19944	19927	19910	19893	19876	19859	19842	19825	19808	19791	19774	19757	19740	19723	19706	19689	19672	19655	19638	19621	19604	19587	19570	19553	19536	19519	19502	19485	19468	19451	19434	19417	19400	19383	19366	19349	19332	19315	19298	19281	19264	19247	19230	19213	19196	19179	19162	19145	19128	19111	19094	19077	19060	19043	19026	19009	19992	19975	19958	19941	19924	19907	19890	19873	19856	19839	19822	19805	19788	19771	19754	19737	19720	19703	19686	19669	19652	19635	19618	19601	19584	19567	19550	19533	19516	19499	19482	19465	19448	19431	19414	19397	19380	19363	19346	19329	19312	19295	19278	19261	19244	19227	19210	19193	19176	19159	19142	19125	19108	19091	19074	19057	19040	19023	19006	19989	19972	19955	19938	19921	19904	19887	19870	19853	19836	19819	19802	19785	19768	19751	19734	19717	19700	19683	19666	19649	19632	19615	19598	19581	19564	19547	19530	19513	19496	19479	19462	19445	19428	19411	19394	19377	19360	19343	19326	19309



En la política de asignación se contemplan tres puntos principales.

- Se debe dar preferencia para asignar unidades de un grupo determinado a una solicitud del mismo grupo. Es decir, si se tiene una solicitud del grupo “A-”, se da prioridad de asignar una unidad del grupo “A-” antes que asignar una unidad del grupo “O-”
- Se deben asignar primeramente aquellas unidades en su última semana de vida.
- Se da preferencia de asignación a aquellas unidades de menor escases que una que sea considerada escasa, sin importar la edad de ambas (a excepción que alguna se encuentre en su última semana de vida).

Como herramienta de la política de asignación se diseñaron las siguientes tablas que facilitarán la toma de decisiones al momento de realizar las asignaciones de unidades eritrocitarias.

Tabla para determinar que unidad asignar a una demanda dada.

Tabla 14. Tabla para determinar que unidad asignar a una demanda dada. Fuente: Elaboración propia.

Donador	Demanda							
	AB+	AB-	A+	A-	B+	B-	O+	O-
AB+	1							
AB-	5	1						
A+	2		1					
A-	6	2	3	1				
B+	3				1			
B-	7	3			3	1		
O+	4		2		2		1	
O-	8	4	4	2	4	2	2	1

En la tabla anterior se muestran con que prioridad le deben ser asignadas las unidades sanguíneas a una solicitud del grupo sanguíneo determinado. Por ejemplo, a una demanda del grupo sanguíneo “B+” los posibles candidatos a ser donadores serían en el siguiente orden: “B+”, “O+”, “B-” y “O-”.



Tabla para determinar a qué demanda asignar una unidad determinada.

Tabla 15. Tabla para determinar a qué demanda asignar una unidad determinada. Fuente: Elaboración propia.

Donador	Demanda							
	AB+	AB-	A+	A-	B+	B-	O+	O-
AB+	1							
AB-	2	1						
A+	2		1					
A-	4	2	3	1				
B+	2				1			
B-	4	2			3	1		
O+	4		3		2		1	
O-	8	4	7	3	6	2	5	1

La tabla anterior muestra las prioridades que se deben tomar en cuenta al asignar una unidad donadora de un grupo determinado a las distintas demandas posibles. Es decir, si se tiene una unidad sanguínea del grupo “A-”, se dará prioridad de asignación para una demanda “A-”, posteriormente a una “AB-”, luego a una “A+” y por último a una “AB+”.



CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES



CONCLUSIONES

Muchas de las veces en la búsqueda de la técnica adecuada para abordar algún problema determinado nos enfrentamos al temor de ser creativos y preferimos atacarlo de la manera tradicional. Si nos atrevemos a ser creativos puede pasar que tengamos éxito y logremos mejorar la situación problemática, o puede que no; pero lo que sí es seguro es que, pase lo que pase, jamás fracasaremos. Esto es algo que la modelación matemática nos brinda, esa grata sensación de haber podido encontrar una solución que visualizábamos como un lugar tan lejano que era casi imposible llegar.

Si nos enfrentamos ante un problema en el que sea necesario tomar decisiones cada cierto tiempo, y estemos en busca de una solución a largo plazo; la programación dinámica puede ser una opción, ya que de cierta manera podremos tener una idea de cuáles serán las opciones que tendremos en un futuro inmediato, por así decirlo.

Visto desde otro modo, la programación dinámica nos permite concebir desde otra “posición” el abordaje en la búsqueda de la solución a un problema. A manera de metáfora, podemos decir que nos brinda una perspectiva diferente, como si viéramos el problema desde un balcón y no solo desde el pasillo.

En la vida real no hay limitaciones de que técnica o método utilizar, ¡No se cuenta con esa restricción!, solo debemos tener cuidado en lo que proponemos. Ya que puede resultar que creemos un “Frankenstein”, que en lugar de ser eficiente, sea todo lo contrario, y entorpezca nuestra búsqueda del estado ideal.

Al analizar los resultados obtenidos se puede concluir que se cumplió el objetivo planteado en este proyecto. Ya que si se decide implementar la política de asignación para la gestión de inventario de contenidos eritrocitario propuesta mediante las tablas diseñadas como herramienta en la toma de decisiones, se podría mejorar la situación actual que se presenta en el banco de sangre de la institución de salud del sector público. Es decir la cantidad de unidades vencidas y el déficit de



unidades sanguíneas se podrían disminuir, lo que llevaría a la reducción de los costos asociados a ello.

Pero esta propuesta es solo un paso inicial en la implementación de la política de asignación, y la decisión final queda en manos de los responsables del banco de sangre. Y el funcionamiento eficiente en el seguimiento de su cumplimiento por parte de los responsables de la asignación de unidades sanguíneas.

Para trabajos futuros se podrían diseñar una herramienta automatizada que sirva como referencia en la toma de decisiones, pero para esto es necesario que se cuente con un sistema de información digital que lleve el control del inventario de unidades eritrocitarias en el banco de sangre.

La realización de este trabajo, en lo personal me deja varias enseñanzas, las cuales me han permitido tener una visión diferente de cómo se comportan los sistemas en los cuales nos encontramos inmersos. Lo que me es de gran ayuda para mi crecimiento profesional, y también personal.



BIBLIOGRAFÍA



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdulwahab, U., & Wahab, M. (2014). Approximate dynamic programming modeling for a typical blood platelet bank. *Computers & Industrial Engineering*.
2. Aranda Caballero, P. (2015). La importancia de donar sangre. *Gaceta informativa Normalista Digital*(3), 13-16.
3. Bellman, R. E. (1957). *Dynamic Programming*. New York: Dover Publications.
4. Cohen, M., & Pierskalla, W. (1979). Simulation of Blood Bank System. *Department of Decision Sciences*.
5. Dreyfus, S., & Law, A. (1977). *The Art and Theory of Dynamic Programming*. Academic Press.
6. Flores de la Mota, I. (En edición). *Apuntes de Programación Dinámica*. Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Fontaine, M., Chung, Y., Rogers, W., Sussmann, H., Quach, P., Galel, S., . . . Erhun, F. (2009). Improving platelet supply chains through collaborations between blood centers and transfusion services. *Transfusion*, 49, 2040-2047.
8. Haijema, R., Van der Wal, J., & Van Dijk, N. M. (2007). Blood platelet production: Optimization by dynamic programming and simulation. *Computers & Operations Research*, 34, 760–779.
9. Haijema, R., Van Dijk, N., Van der Wal, J., & Sibinga, C. S. (2007). Blood platelet production with breaks: optimization by SDP and simulation. *Journal of Production Economics*.
10. Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (Novena edición ed.). Mc Graw-Hill.
11. Lew, A., & Mauch, H. (2007). *Dynamic Programming A Computational Tool*. Springer.



12. LINDO Systems Inc. (2013). *LINGO The modeling language and optimizer*. Chicago: LINDO Systems Inc.
13. Lorenzo, d. P., Ma Guadalupe, P. C., Mirna, Z. R., Alejandro, M. L., & Adolfo, G. G. (2002). Frecuencias de grupos sanguíneos e incompatibilidades ABO y RhD, en La Paz, Baja California Sur, México. *Salud Publica de México*, 44, 406-412.
14. Mujica Mota, M., Flores De La Mota, I., & Guimarans Serrano, D. (2015). *Applied Simulation and Optimization*. Springer.
15. Mustafee, N., Taylor, S., Katsaliaki, K., & Brailsford, S. (2006). Distributed Simulation with COTS Simulation Packages: A case study in health care supply chain simulation. *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation* (págs. 1136-1142). Winter Simulation Conference.
16. NOM-003-SSA2-1993. (18 de Julio de 1994). *Norma Oficial Mexicana NOM-003-SSA2-1993, para la disposición de sangre humana y sus componentes con fines terapéuticos*. México: Secretaría de Salud.
17. Organización Panamericana de la Salud. (2010). *Recomendaciones para la Estimación de las Necesidades de Sangre y sus Componentes*. Washington, D.C.
18. Pegels, C., & Jelmert, A. (1969). An Evaluation of Blood-Inventory Policies: A Markov Chain Application. *Inform*, 1087-1098.
19. Pereira, A. (2005). Blood inventory management in the type and screen era. *Vox Sanguinis*(89), 245-250.
20. Pliego Reyesa, C. L., & Flores Alcántar, G. (2012). Evolución de la transfusión sanguínea. *Revista de la Facultad de Medicina de la UNAM*, 55(1), 35-42.
21. Qinglin Duan, T. (2013). A new age based replenishment policy for supply chain inventory optimization of highly perishable products. *International Journal of Production Economics*, 145(2), 658-671.



-
22. Rabinowitz, M. (1973). Blood Bank Inventory Policies: A Computer Simulation. *Health Services Research*, 271-282.
 23. Ryttilä, J., & Spens, K. (2006). Using simulation to increase efficiency in blood supply chains. *Management Research News*, 801-819.
 24. Taha, H. (2012). *Investigación de Operaciones* (Novena edición ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.
 25. Torres, Ó. (2010). Inventario de sangre: gestión para el uso eficiente de la sangre. *Revista Mexicana de Medicina Transfusional*, 3(Supl. 1), S35-S41.
 26. Van Dijk, N., Haijema, R., Van der Wal, J., & Sibinga, C. (2009). Blood platelet production: a novel approach for practical optimization. *TRANSFUSION*, 49, 411-420.



ANEXOS



ANEXO A. CÓDIGO FUENTE DEL MODELO PROGRAMADO EN EL SOFTWARE LINGO

```
!Hacer eco de entrada en la pantalla;
SET ECHOIN 1

!Suprimir el informe de solución estándar;
SET TERSEO 3

!Comienza la entrada de un nuevo modelo;
MODEL:
DATA:
Etps=@OLE('\BancoSangre.xlsm','N_Etps');!Numero de etapas;
Tpo=@OLE('\BancoSangre.xlsm','t1_Tpo');
NDec=@OLE('\BancoSangre.xlsm','t1_NDec');
ENDDATA

SETS:
TpoAnPo;
Dec/1..NDec/; !Rango Decisiones I(t);
Gpo/1..8/; !Grupos: AB+, AB-, A+, A-, B+, B-, O+ y O-;
Ed/1..6/; !Edad del Contenido Eritrocitario;
Dda(Gpo):y; !Demanda Y(kt);
InIn(Dec,Gpo,Ed):II; !Inventario inicial I(ijt);
InIn1(Gpo,Ed):II1;
InFiAn(Dec,Gpo,Ed):zAn; !Inventario final z(i,j,t-1);
Dones(Gpo):p; !Donaciones p(it);
Cap(Gpo):N; !Capacidad N(i);

!PD;
InInT(Dec):IIT; !Decisiones I(t);
CtoFOpAn(Dec):FOpAn; !CostoOp F(t-1);
ENDSETS

DATA:
TpoAnPo=@OLE('\BancoSangre.xlsm','t1_TpoAnPo');
II1=@OLE('\BancoSangre.xlsm','II_1');
y=@OLE('\BancoSangre.xlsm','t1_yk');
p=@OLE('\BancoSangre.xlsm','t1_pi');
N=@OLE('\BancoSangre.xlsm','Cap_Inv');
ENDDATA

CALC:
zAn=@OLE('\BancoSangre.xlsm','t1_zAn');

!Generar demanda total Y(t);
YT=@sum(Gpo(k):y(k));

!Inventario inicial;
@ifc(Tpo #EQ# 1:
    @for(InIn(r,i,j):
        II(r,i,j)=II1(i,j); !Inventario inicial en el tiempo t=1;
    );
    PT=0;
@else
    @for(Dec(r):
        @for(Gpo(i):
            @for(Ed(j)|j #GT# 1:
```



```
II(r,i,j)=zAn(r,i,j-1); !Estado(s) en tiempo(t-1) =
Decision(r) en tiempo(t);
);
@for(Ed(j)|j #EQ# 1:
II(r,i,j)=p(i);
);
);
);
!Calcular donacion total P(t);
PT=@sum(Gpo(i):p(i));
);
!Calcular Inventario inicial total;
@for(Dec(r):
IIT(r)=@sum(InIn(r,i,j):II(r,i,j));
);
!Calcular numero de estados;
@ifc(@min(Dec(r):IIT(r))-YT #GE# 0:
zmin=@min(Dec(r):IIT(r))-YT;
@else
zmin=0;
);
zmax=@max(Dec(r):IIT(r));
NEdos=zmax-zmin+1;
!Exportar numero de estados;
@OLE('\BancoSangre.xlsm','t1_NEdos')= NEdos;
ENDCALC
SETS:
!PE;
PE_Deficit_Cdas(Gpo):PE_D,PE_V;
PE_InIn_InFi(Gpo,Ed):PE_II,PE_z;
PE_Unids(Gpo,Ed,Gpo)|@if(&1 #EQ# 1,
&3 #EQ# 1,
@if(&1 #EQ# 2,
&3 #EQ# 1 #OR# &3 #EQ# 2,
@if(&1 #EQ# 3,
&3 #EQ# 1 #OR# &3 #EQ# 3,
@if(&1 #EQ# 4,
&3 #GE# 1 #AND# &3 #LE#
4,
@if(&1 #EQ# 5,
&3 #EQ# 1 #OR# &3
#EQ# 5,
@if(&1 #EQ# 6,
&3 #EQ# 1
#OR# &3 #EQ# 2 #OR# &3 #EQ# 5 #OR# &3 #EQ# 6,
@if(&1 #EQ# 7,
&3
#EQ# 1 #OR# &3 #EQ# 3 #OR# &3 #EQ# 5 #OR# &3 #EQ# 7,
&3 #GE# 1
#AND# &3 #LE# 8
)
)
)
);PE_x;
PE_CA(Gpo,Ed,Gpo)|@if(&1 #EQ# 1,
&3 #EQ# 1,
@if(&1 #EQ# 2,
&3 #EQ# 1 #OR# &3 #EQ# 2,
@if(&1 #EQ# 3,
&3 #EQ# 1 #OR# &3 #EQ# 3,
```



```

                                @if(&1 #EQ# 4,
                                &3 #GE# 1 #AND# &3 #LE# 4,
                                @if(&1 #EQ# 5,
                                &3 #EQ# 1 #OR# &3 #EQ# 5,
                                @if(&1 #EQ# 6,
                                &3 #EQ# 1 #OR# &3
                                @if(&1 #EQ# 7,
                                &3 #EQ# 1
                                &3 #GE# 1 #AND# &3
                                )
                                )
                                )
                                )
                                )
                                )
                                ):CA; !Costo por Asignacion CA(i,k);
PE_CD(Gpo):CD;!Costo por deficit CD(k);
PE_CV(Gpo):CV;!Costo por caducidad CV(i);

!PD;
Edo/1..NEdos/; !Rango Estados Z(t);
InFi(Edo,Dec,Gpo,Ed):z; !Inventario final z(ijt);
Unids(Edo,Dec,Gpo,Ed,Gpo)|@if(&3 #EQ# 1,
                                &5 #EQ# 1,
                                @if(&3 #EQ# 2,
                                &5 #EQ# 1 #OR# &5 #EQ# 2,
                                @if(&3 #EQ# 3,
                                &5 #EQ# 1 #OR# &5 #EQ# 3,
                                @if(&3 #EQ# 4,
                                &5 #GE# 1 #AND# &5 #LE#
                                @if(&3 #EQ# 5,
                                &5 #EQ# 1 #OR# &5
                                @if(&3 #EQ# 6,
                                &5 #EQ# 1
                                @if(&3 #EQ# 7,
                                &5
                                &5 #GE# 1
                                )
                                )
                                )
                                )
                                )
                                ):x; !Unidades x(ijkt);
Deficit(Edo,Dec,Gpo):D; !Insatisfecha D(kt);
Cdas(Edo,Dec,Gpo):V; !Caducadas V(it);

!PD;
InFiT(Edo):ZT; !Estados Z(t);
CtoF(Edo,Dec):F; !Costo;
CtoFOp(Edo):FOp; !CostoOp;

!Op;
InInOpT(Edo):IIOT;
InInOp(Edo,Gpo,Ed):IIO;
InFiOp(Edo,Gpo,Ed):zOp;
UnidsOp(Edo,Gpo,Ed,Gpo)|@if(&2 #EQ# 1,
                                &4 #EQ# 1,
                                @if(&2 #EQ# 2,

```




```

        @sum(PE_Unids(i,j,k):PE_x(i,j,k))<=y(k);
    );

    !Capacidad;
    @for(Gpo(i):
        @sum(PE_InIn_InFi(i,j):PE_II(i,j))<=N(i);
    );

    !Inventario final=ZT;
    @sum(PE_InIn_InFi(i,j):PE_z(i,j))=PE_ZT;

    !No negatividad y enteras;
    @for(PE_Unids(i,j,k):
        @gin(PE_x(i,j,k));
    );
    @for(Gpo(k):
        @gin(PE_D(k));
    );
    @for(Gpo(i):
        @gin(PE_V(i));
    );
    @for(PE_InIn_InFi(i,j):
        @gin(PE_z(i,j));
    );
ENDSUBMODEL

SUBMODEL Prog_Din:
    min = @sum(CtoFop(s):Fop(s))+@sum(CtoF(s,r):F(s,r));
    @for(CtoFop(s):
        @gin(Fop(s));
    );
    @for(CtoF(s,r):
        @gin(F(s,r));
    );
ENDSUBMODEL

CALC:
    !Cargar valores FOp(t-1);
    FOpAn=@OLE('\BancoSangre.xlsm','t1_FOpAn');

    @solve(Prog_Din);

    !PD;
    @for(Edo(s):
        !Calcular ZT(s);
        ZT(s)=zmin+(s)-1;
        PE_ZT=ZT(s);

        !PE;
        @for(Dec(r):
            @ifc((IIT(r)-ZT(s) #LE# YT) #AND# (IIT(r)-ZT(s) #GE#
@int(0.85*YT*@POW((Tpo-1)/(Etps-1),1/Etps))):

                !Asignar valores para el modelo de PE;
                @for(Gpo(i):
                    @for(Ed(j):
                        PE_II(i,j)=II(r,i,j);
                    );
                );
                @ifc(Tpo #EQ# 1:
                    !Resolver modelo de PE para t=1;
                    @solve(Prog_Ent);

                    !Determinar costo F(s,r);
                    @ifc(@STATUS() #EQ# 0:
                        F(s,r)= FObj;
                        @for(PE_Unids(i,j,k):
```



```

        x(s,r,i,j,k)=PE_x(i,j,k);
    );
    @for(PE_InIn_InFi(i,j):
        z(s,r,i,j)=PE_z(i,j);
    );
    @for(Gpo(k):
        D(s,r,k)=PE_D(k);
    );
    @for(Gpo(i):
        V(s,r,i)=PE_V(i);
    );
);

!Resolver modelo de PE para t>1;
@else
    !Resolver modelo de PE;
    @solve(Prog_Ent);

    !Determinar costo F(s,r);
    @ifc(@STATUS() #EQ# 0:
        F(s,r)= FObj + FOpAn(r);
        @for(PE_Unids(i,j,k):
            x(s,r,i,j,k)=PE_x(i,j,k);
        );
        @for(PE_InIn_InFi(i,j):
            z(s,r,i,j)=PE_z(i,j);
        );
        @for(Gpo(k):
            D(s,r,k)=PE_D(k);
        );
        (Gpo(i):
            V(s,r,i)=PE_V(i);
        );
    );
);

);

!Determinar costo FOp(s);
@ifc(@max(CtoF(s,r):F(s,r)) #GT#0:
    FOp(s)=@min(CtoF(s,r) | F(s,r) #GT# 0:F(s,r));
);

!Generar tabla de valores optimos;
@for(Dec(r) | F(s,r) #EQ# FOp(s):
    IIOT(s)=IIT(r);
    @for(InIn(r,i,j):
        IIO(s,i,j)=II(r,i,j);
    );
    @for(InFi(s,r,i,j):
        zOp(s,i,j)=z(s,r,i,j);
    );
    @for(Unids(s,r,i,j,k):
        xOp(s,i,j,k)=x(s,r,i,j,k);
    );
    @for(Deficit(s,r,k):
        DOp(s,k)=D(s,r,k);
    );
    @for(Cdas(s,r,i):
        VOp(s,i)=V(s,r,i);
    );
);

);

!Determinar informacion para Etapa(t+1);
@ifc(Tpo #LT# Etps:
```



```
!Calcular numero de decisiones para (t+1);
NDecPo=0;
@for (CtoFOp(s) | FOp(s) #GT#0:
      NDecPo=NDecPo + 1;
);

!Exportar informacion para Etapa(t+1);
@for (TpoAnPo(t) | t#EQ#2:
      @OLE('\BancoSangre.xlsm', TpoAnPo(t) + '_NDec')= NDecPo;
      @OLE('\BancoSangre.xlsm', TpoAnPo(t) + '_FOpAn')=
@WRITEFOR (CtoFOp(s) | FOp(s) #GT#0:FOp(s));
      @OLE('\BancoSangre.xlsm', TpoAnPo(t) + '_zAn')=
@WRITEFOR (InFiOp(s,i,j) | FOp(s) #GT#0:zOp(s,i,j));
);

!Exportar decisiones y estados;
@OLE('\BancoSangre.xlsm', 't1_YT', 't1_PT', 't1_IIT')= YT, PT, IIT;
@OLE('\BancoSangre.xlsm', 't1_ZT')= @WRITEFOR (InFiT(s) | FOp(s) #GT#0:ZT(s));
@OLE('\BancoSangre.xlsm', 't1_F')= @WRITEFOR (CtoF(s,r) | FOp(s) #GT#0:F(s,r));
@OLE('\BancoSangre.xlsm', 't1_FOp')= @WRITEFOR (CtoFOp(s) | FOp(s) #GT#0:FOp(s));
@OLE('\BancoSangre.xlsm', 't1_IIoT')= @WRITEFOR (InInOpT(s) | FOp(s) #GT#0:IIOT(s));
@OLE('\BancoSangre.xlsm', 't1_IIO')= @WRITEFOR (InInOp(s,i,j) | FOp(s) #GT#0:IIO(s,i,j));
@OLE('\BancoSangre.xlsm', 't1_zOp')= @WRITEFOR (InFiOp(s,i,j) | FOp(s) #GT#0:zOp(s,i,j));
@OLE('\BancoSangre.xlsm', 't1_xOp')=
@WRITEFOR (UnidsOp(s,i,j,k) | FOp(s) #GT#0:xOp(s,i,j,k));
@OLE('\BancoSangre.xlsm', 't1_DOp')= @WRITEFOR (DeficitOp(s,k) | FOp(s) #GT#0:DOp(s,k));
@OLE('\BancoSangre.xlsm', 't1_VOp')= @WRITEFOR (CdasOp(s,i) | FOp(s) #GT#0:VOp(s,i));

@ifc (Tpo #EQ# Etps:
      @OLE('\BancoSangre.xlsm', 'Finalizado')= @WRITE ('Fin');
);

ENDCALC
END

!Resolver modelo para t=1;
GO
!Modificar modelo para t=2;
ALTER ALL 't1't2';
!Resolver modelo para t=2;
GO
.
.
.
!Modificar modelo para t=52;
ALTER ALL 't51't52';
!Resolver modelo para t=52;
GO

!Restaurar parametros;
SET TERSEO 0
SET ECHOIN 0
```



ANEXO B. CÓDIGO FUENTE DEL MODELO PARA DETERMINAR C_A

```
MODEL:
SETS:
Gpo/1..8/;
Ed/1..6/;
CA(Gpo,Ed,Gpo) | @if(&1 #EQ# 1,
                    &3 #EQ# 1,
                    @if(&1 #EQ# 2,
                        &3 #EQ# 1 #OR# &3 #EQ# 2,
                        @if(&1 #EQ# 3,
                            &3 #EQ# 1 #OR# &3 #EQ# 3,
                            @if(&1 #EQ# 4,
                                &3 #GE# 1 #AND# &3 #LE# 4,
                                @if(&1 #EQ# 5,
                                    &3 #EQ# 1 #OR# &3 #EQ# 5,
                                    @if(&1 #EQ# 6,
                                        &3 #EQ# 1 #OR# &3 #EQ# 2
                                        @if(&1 #EQ# 7,
                                            &3 #EQ# 1 #OR# &3
                                            &3 #GE# 1 #AND# &3 #LE# 8
                                        )
                                    )
                                )
                            )
                        )
                    )
                    ):x;

ENDSETS

!Funcion objetivo;
MIN=@sum(CA(i,j,k):x(i,j,k));

!Sujeto a;
@for(CA(i,j,k) | i #EQ# k: x(i,j,k)=7-j);

@for(Ed(j):
    x(1,j,1)+1=<x(3,j,1);
    x(3,j,1)+1=<x(5,j,1);
    x(5,j,1)+1=<x(7,j,1);
    x(7,j,1)+1=<x(2,j,1);
    x(2,j,1)+1=<x(4,j,1);
    x(4,j,1)+1=<x(6,j,1);
    x(6,j,1)+1=<x(8,j,1);

    x(2,j,2)+1=<x(4,j,2);
    x(4,j,2)+1=<x(6,j,2);
    x(6,j,2)+1=<x(8,j,2);

    x(3,j,3)+1=<x(7,j,3);
    x(7,j,3)+1=<x(4,j,3);
    x(4,j,3)+1=<x(8,j,3);

    x(4,j,4)+1=<x(8,j,4);

    x(5,j,5)+1=<x(7,j,5);
```



```
x(7,j,5)+1=<x(6,j,5);
x(6,j,5)+1=<x(8,j,5);

x(6,j,6)+1=<x(8,j,6);

x(7,j,7)+1=<x(8,j,7);

x(8,j,8)+1=<x(8,j,6);
x(8,j,6)+1=<x(8,j,4);
x(8,j,4)+1=<x(8,j,2);
x(8,j,2)+1=<x(8,j,7);
x(8,j,7)+1=<x(8,j,5);
x(8,j,5)+1=<x(8,j,3);
x(8,j,3)+1=<x(8,j,1);

x(7,j,7)+1=<x(7,j,5);
x(7,j,5)+1=<x(7,j,3);
x(7,j,3)+1=<x(7,j,1);

x(6,j,6)+1=<x(6,j,2);
x(6,j,2)+1=<x(6,j,5);
x(6,j,5)+1=<x(6,j,1);

x(5,j,5)+1=<x(5,j,1);

x(4,j,4)+1=<x(4,j,2);
x(4,j,2)+1=<x(4,j,3);
x(4,j,3)+1=<x(4,j,1);

x(3,j,3)+1=<x(3,j,1);

x(2,j,2)+1=<x(2,j,1);
);

@for(CA(i,j,k)|k #EQ# 1:
  x(8,j,k)>=x(6,1,k)+1;
  x(6,j,k)>=x(4,1,k)+1;
  x(4,j,k)>=x(2,1,k)+1;
  x(2,j,k)>=x(7,1,k)+1;
  x(7,j,k)>=x(5,1,k)+1;
  x(5,j,k)>=x(3,1,k)+1;
  x(3,j,k)>=x(1,1,k)+1;
);

@for(CA(i,j,k)|k #EQ# 2:
  x(8,j,k)>=x(6,1,k)+1;
  x(6,j,k)>=x(4,1,k)+1;
  x(4,j,k)>=x(2,1,k)+1;
);

@for(CA(i,j,k)|k #EQ# 3:
  x(8,j,k)>=x(4,1,k)+1;
  x(4,j,k)>=x(7,1,k)+1;
  x(7,j,k)>=x(3,1,k)+1;
);

@for(CA(i,j,k)|k #EQ# 4:
  x(8,j,k)>=x(4,1,k)+1;
);

@for(CA(i,j,k)|k #EQ# 5:
  x(8,j,k)>=x(6,1,k)+1;
  x(6,j,k)>=x(7,1,k)+1;
  x(7,j,k)>=x(5,1,k)+1;
);

@for(CA(i,j,k)|k #EQ# 6:
```



```
        x(8,j,k) >= x(6,1,k) + 1;
    );
@for(CA(i,j,k) | k #EQ# 7:
    x(8,j,k) >= x(7,1,k) + 1;
);
@for(CA(i,j,k) | j #GT# 1:
    x(i,j-1,k) >= x(i,j,k) + 1;
);
@for(CA(i,j,k) : @GIN(x(i,j,k)));
END
```