



Model for the logistics distribution of medicines in the Colombian public health program

Juan Pablo Castellón-Torres ^a, Jairo Humberto Torres-Acosta ^b & Wilson Adarme-Jaimes ^c

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. jpcastrellont@unal.edu.co

^b Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. jatorresa@udistrital.edu.co

^c Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. wadarme@unal.edu.co

Received: May 28th, 2014. Received in revised form: August 25th, 2014. Accepted: September 10th, 2014

Abstract

This paper presents the results of the general modelling process for the logistics of medicines distribution within the public health program in Colombia. The model is grounded in verifying the conditions on the current information for the logistics distribution system of the medicines in the six (6) public health programs in Colombia. Verification on the structure and robustness of the created model is developed through an emulation system based on the matrix of real information, and later verified by using a discrete simulation program developed in visual.Net with input and output to Excel. The proposal is tested and validated through GAMS® – General Algebraic Modelling System, with the formulation of three operational scenarios that achieve savings up to 57,44% of the total cost of the public health medicines logistics system.

Keywords: Modeling, logistics, procurement, distribution, public health, strategy, tactics, operations.

Modelo para la operación logística de distribución de medicamentos del programa de salud pública en Colombia

Resumen

El artículo presenta los resultados del proceso de modelado general para la logística de distribución de medicamentos dentro del programa de salud pública en Colombia. El modelo se fundamenta en la verificación de las condiciones sobre la información real para el sistema logístico de distribución de medicamentos en los seis (6) programas de salud pública en Colombia. La verificación sobre la estructura y robustez del modelo creado, se desarrolla a través de un sistema de emulación desarrollado con base en la matriz de información real, para posteriormente ser verificado a través de simulación discreta mediante un programa desarrollado en visual.Net con entrada y salida para Excel. La propuesta es probada y validada a través de GAMS® (General Algebraic Modelling System), con la formulación de tres escenarios de operación que de manera secuencial permiten ahorros de hasta el 57,44% en el costo total del sistema logístico de medicamentos de salud pública.

Palabras Clave: Modelado, logística, abasto, distribución, Salud pública, estrategia, táctica, operación.

1. Introducción

La logística, cuyo objetivo es proveer la cantidad exacta de productos en el lugar definido, en el momento en que se necesitan y con la calidad y precio requeridos [1-3], es el soporte operativo de las organizaciones del mundo de hoy [4], en donde el transporte, manipulación, almacenamiento y recolección de los productos que son necesarios en los sistemas productivos, son las actividades más destacadas.

En el sector de la salud, en donde se debe proveer atención integral al paciente [5], incluyendo el empleo de

tecnologías sanitarias [6], las operaciones logísticas son cruciales para asegurar la disponibilidad óptima de ellas con el fin de maximizar la efectividad y oportunidad del sistema para beneficio del usuario final [7-9].

Se ha estimado que el costo asociado a las actividades logísticas en la red de salud pública corresponde al 46% del presupuesto total asignado a la operación de la red [10]. Gran parte de esta situación se debe a la falta de un adecuado modelo de gestión que optimice la disyuntiva entre la calidad de servicios médicos, la accesibilidad a los servicios y los costos hospitalarios [11]. Ahorros de hasta un 19%, pueden

proceder de una mejor gestión de los suministros.

Con el objetivo de mejorar los indicadores de eficiencia y oportunidad en la entrega de los bienes y servicios, reduciendo los costos y el tiempo de operación, se propone la definición de la operación logística a nivel estratégico, táctico y operativo, de seis (6) programas de salud pública en Colombia: Enfermedades Transmisibles por Vectores (ETV) –Leishmaniasis, Dengue y Enfermedad de Chagas–; Malaria; Tuberculosis (TB), y una agrupación denominada biológicos (vacunas).

En este contexto, el desarrollo de la investigación, objeto central de este artículo, define y estructura en sus tres capas componentes, un modelo de optimización discreto para las decisiones logísticas estratégicas, tácticas y operativas, el cual se ha verificado mediante simulación, permitiendo validar los objetivos planteados.

El desarrollo de la investigación contempla la creación y estructura de los componentes conceptuales, estructurales y matemáticos como elementos principales del modelado matemático general, fundamentado éste en la verificación de las condiciones sobre la información real para el sistema de distribución logística de medicamentos en los seis (6) programas de salud pública en Colombia.

El artículo inicia con la presentación del estado del arte, seguido de la propuesta metodológica y posteriormente el desarrollo de la misma a través de la contextualización, la propuesta de operación, la estructuración del modelo y finalmente las conclusiones.

2. Estado del arte – Diseño de redes de distribución

En el marco de desarrollo de la propuesta, el componente de localización es determinante en la evaluación de los escenarios de operación logística (compras, almacenamiento y distribución) para los programas de salud pública del país. Las consideraciones de localización o relocalización establecen las mejores alternativas de distribución, de forma eficiente y oportuna que respondan a las necesidades reales de prevención y atención a la población colombiana.

De acuerdo con [12], la evaluación de alternativas de localización o relocalización hacen parte del componente estratégico organizacional, que busca definir mejores prácticas logísticas a partir de ubicaciones óptimas. La planeación estratégica está influenciada por un conjunto de elementos críticos, tales como el diseño de la cadena de suministro, los procesos de selección de proveedores, la definición de flujos físicos y de información al interior de la cadena, y la localización de instalaciones [13].

En [14] se asegura que las decisiones de localización, además de ser especialmente críticas, presentan un alto grado de dificultad en relación con las demás categorías de decisión relativas al desarrollo de procesos eficientes al interior de las cadenas de suministro.

Existen diversas situaciones coyunturales que constituyen problemas de localización de instalaciones, las cuales deben ser enfrentadas por las organizaciones [15].

El primer enfoque dado a este problema consiste en el estudio de instalaciones únicas, evolucionando hacia la investigación alrededor de múltiples instalaciones.

Con respecto a las decisiones de ubicación de instalaciones para los propósitos de distribución, se han incorporado modelos y formulaciones de problemas que resuelven situaciones con parámetros determinísticos / estocásticos, productos unitarios / múltiples y horizontes de planeación de únicos / múltiples periodos. El problema de la mediana P es una de las propuestas más desarrolladas de la comunidad académica [16] debido a su sencillez para seleccionar p instalaciones que minimice las distancias o costos totales para suplir las demandas del consumidor.

Un modelo extendido de la mediana p es el Problema de Localización de Instalaciones sin restricciones de capacidad (UFLP, por sus siglas en inglés) [17] que considera un costo fijo de montaje para establecer cada instalación, y el Problema de Localización de Instalaciones con Capacidad restringida (CFLP, por sus siglas en inglés) el cual asigna una demanda máxima a las instalaciones teniendo en cuenta las variables exógenas además de las endógenas tales como las distancias entre los clientes y las instalaciones [18].

En la última década, los investigadores que tratan el tema de localización de instalaciones se han enfocado en los problemas de diseño de redes dinámicas. Estos problemas han sido abordados por primera vez en [19]. En particular, se considera el objetivo de localizar una bodega con el fin de maximizar las ganancias durante un horizonte de tiempo determinado.

En [20] se hace especial énfasis en la formulación de diseños de red que soportan estrategias administrativas tales como los sistemas de trazabilidad, desde las perspectivas de producción y distribución, como modelos que son capaces de mitigar las perturbaciones y alteraciones en las cadenas de suministros de perecederos, especialmente en los intereses de la seguridad, calidad e integridad del producto [21]. En [22] se presenta un modelo con un alcance estratégico con el diseño de un sistema de trazabilidad. Existen otras decisiones estratégicas/tácticas que suceden en el proceso de diseño de la red, y han sido estudiadas y combinadas en modelos matemáticos por parte de investigadores en todo el mundo [23], como la localización de plantas / almacenes [24], planeación de la red de distribución [15], las adopciones de tecnología [25], entre otros.

De acuerdo con [26], la mayor parte del tiempo, el problema de asignación y localización conduce a modelos de programación lineal entera mixta, donde variables binarias de decisión sirven como vehículo para determinar si una planta de procesamiento o un almacén se abrirá o no. Para discusiones adicionales, en [26] se describe en detalle los problemas de asignación y localización y los métodos utilizados para su solución.

En [27] se aborda el problema de diseño de redes de suministro de productos perecederos, considerando un híbrido entre un modelo sensible y un modelo eficiente. En [28] se hace hincapié en un modelo, en el campo de las soluciones de programación lineal entera mixta para el problema de localización, que vincula la degradación de la calidad con la función objetivo para decidir si emplazar o no un almacén de refrigeración.

En [25] se afirma que las consideraciones de los modelos para el diseño de la red carecen de aspectos tales como múltiples productos perecederos, o diseños de red que

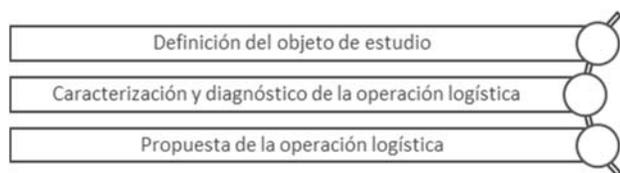


Figura 1. Etapas de la metodología

Fuente: Propia

combinen las decisiones de producción-distribución, niveles de ocupación de los medios de transporte o la selección de los modos de transporte para perecederos que no necesiten cadena de frío.

La estructura del sistema de logística desarrollada para el Ministerio de Salud y Protección Social permite desarrollar la gestión integral del sistema, ofreciendo soluciones logísticas adecuadas, que permiten la selección de modos de transporte, la asignación a medios de almacenamiento y transporte, la selección de proveedores y las frecuencias de envío.

Con estos atributos el modelo busca generar valor agregado en toda la cadena, prestando servicios logísticos competitivos y de calidad en sus actividades básicas, así como otras funciones especiales requeridas, lo que se convierte en el factor de diferenciación en la gestión de la cadena de suministro.

3. Metodología

Las etapas de la metodología necesarias para el desarrollo del proyecto se presentan en la Fig. 1. Estas se definieron tomando como marco de referencia el tipo de investigación y resultado requeridos.

3.1. Definición del objeto de estudio

El trabajo de campo realizado permitió identificar dos niveles de gestión y operación, los cuales son importantes por estar en concordancia con el modelo a estructurar y que posteriormente permitirán obtener el modelo general.

3.1.1. Primer nivel

El primer nivel corresponde a la actividad del Ministerio de Salud en cuanto al abastecimiento, almacenamiento y distribución.

El proceso de abastecimiento en el primer nivel se realiza principalmente entre el Ministerio de Salud y Protección Social y la Organización Panamericana de la Salud –OPS, mediante los Fondos rotatorios y Estratégicos, creados como mecanismo de facilitación en los países centro y latinoamericanos para la adquisición de los diferentes medicamentos e insumos.

El proceso de almacenamiento se lleva a cabo en el Almacén Central que el Ministerio tiene destinado para tal fin, con el objetivo de garantizar la integridad de los medicamentos y otros insumos manteniendo las

características técnicas con las que fueron fabricados, así como para garantizar la custodia de los bienes del Estado.

El sistema de distribución encabezado por el Ministerio de Salud y Protección Social se caracteriza por usar un sistema de pedido de “halar” en el cual se determinan los tipos y cantidades de medicamentos, vacunas e insumos que se distribuirán en los niveles inferiores del sistema de acuerdo con un plan de necesidades que cada departamento o distrito reporta.

3.1.2. Segundo nivel

El segundo nivel correspondiente a las secretarías de salud departamentales y distritales se caracterizó mediante visitas de campo a los puntos especificados por el Ministerio de Salud. Los hallazgos generales obtenidos de las visitas realizadas son los siguientes:

No existe unicidad en el desarrollo de las operaciones en relación con la entidad encargada de almacenar y distribuir los medicamentos en cada uno de los puntos requeridos lo cual no permite una operación normal.

En cuanto a la gestión de almacenes se evidencia que obedece a dinámicas heterogéneas en los diferentes puntos visitados. Se hallaron por ejemplo desde sistemas de información tan sofisticados como SAP®¹, hasta el uso de registros manuales en una gran cantidad de las secretarías visitadas. De igual manera, sobresale el uso de herramientas como Excel® y Access® para la gestión.

Se evidenció que la principal causa de pérdida de medicamentos es la expiración o caducidad de éstos, con frecuencia hay medicamentos que no pueden ser empleados, ya que son abastecidos con una vida útil corta, es decir con menos de tres meses de vencimiento, lo cual está asociado a la baja rotación de algunos medicamentos, pues su demanda es inferior a las cantidades mínimas que ofrece la Organización Panamericana de la Salud (OPS).

Una vez verificada la situación problemática encontrada, se puede concluir que es necesario desarrollar una investigación que permita estructurar el modelo para la operación estratégica, táctica y operativa de la logística de distribución de medicamentos del programa de salud pública en Colombia.

3.2. Caracterización y diagnóstico de la operación logística

La caracterización se basó en instrumentos de recolección de información dirigidos a más de 40 agentes intervinientes identificados. La información primaria recolectada se consolidó, analizó y a partir de la misma se identificaron los parámetros del sistema.

3.3. Propuesta de operación logística

El desarrollo y estructuración del modelo matemático tiene como lineamientos básicos las filosofías de coordinación y cooperación de los diferentes nodos de la estructura de la red diseñada para tal propósito.

¹ Software que maneja una plataforma ERP para el desarrollo de planificación integrada de las organizaciones

Se diseñó una estructura de programación, que responde con exactitud a la información de salida deseada tomando como insumos fundamentales los que a continuación se relacionan.

- Maestro de medicamentos.
- Sistema de codificación e identificación de los medicamentos / insumos.
- Sistema integrado de almacenamiento.
- Políticas de inventarios.

Se toman en cuenta los parámetros de costos logísticos asociados a la compra, mantenimiento de medicamentos/ insumos, *picking*, *packing*, transporte, cargue, descargue y demás parámetros derivados de la operación del sistema logístico tales como distancias recorridas y capacidades disponibles, algunos de los cuales se agrupan de acuerdo con los criterios generales que se manejan en el estado del arte de este dominio de conocimiento.

Finalmente, los tiempos de entrega o *lead times* se han considerado determinísticos, como supuesto del modelo en cuanto a la regularidad y normalidad de los tiempos de transporte, por lo cual no varían durante el horizonte de planeación y se contemplan al final de las corridas. Las instancias a correr se han desarrollado en código GAMS®. Adicionalmente, se ha utilizado un modelo de emulación y simulación desarrollado en Visual Basic® con entrada y salida en Excel®.

Una vez verificadas las condiciones sobre la información real para el sistema de distribución logística del abastecimiento de medicamentos para los seis (6) programas de salud pública en Colombia, se establece que existe sólo una fuente de adquisición, la cual es la Organización Panamericana de la Salud (OPS), dada k como el número de fuentes de adquisición, se establece que $k = 1$;

Se pudo establecer que el único lugar de desembarco es Bogotá D.C, a través del Aeropuerto Internacional El Dorado, por tanto sólo existe una fuente para la distribución del sistema de abastecimiento. En este escenario, también se determinó que es probable que el abastecimiento de medicamentos pueda tener como centro de acopio temporal las bodegas del aeropuerto para algunos tipos de medicamentos predefinidos. Así, se tendrían entonces dos centros de acopio (bodega central y bodegas Aeropuerto El Dorado) y un único lugar de desembarco.

- $l = 1$, centro desembarco (Aeropuerto Eldorado)
- $o = 1$, centro de acopio del medicamento

3.3.1. Estructura del sistema de distribución de medicamentos

El comportamiento estructural del sistema abastecimiento-distribución se puede observar en la Fig. 2.

En relación con la Fig. 2, la estructura del sistema abastecimiento-distribución está compuesto por cinco (5) niveles, dos de los cuales sirven de frontera al sistema; los correspondientes a los orígenes y a las cabeceras municipales. Los orígenes o procedencia de los medicamentos correspondientes al primer nivel, aunque en el desarrollo para la investigación no se contemplan por haberse tomado como origen la OPS, para la estructura del modelo

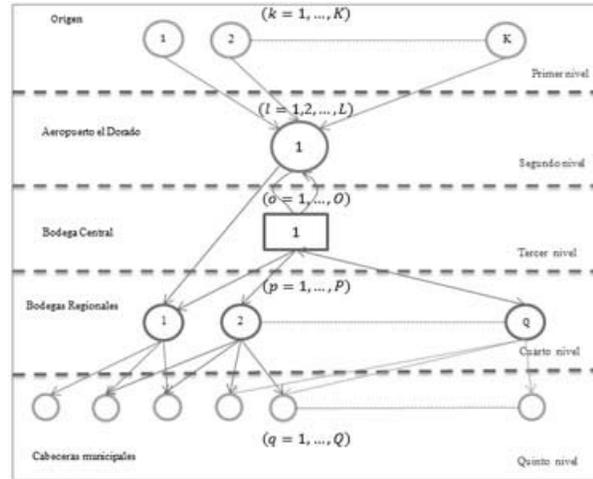


Figura 2. Estructura del sistema abasto-distribución
Fuente: Propia

matemático es de trascendental importancia debido a que es uno de los *lead time* que determinan el tiempo rector del sistema. En la geometría del sistema la identificación queda como:

$$k = \text{origen o procedencia del medicamento } (k = 1, \dots, K)$$

En el segundo nivel, correspondiente al puerto o aeropuerto de desembarco, se estableció que existe un sólo aeropuerto de desembarque y la identificación se establece como sigue:

$$l = \text{puerto o aeropuerto de desembarco } (l = 1)$$

En relación con la bodega central que corresponde al tercer nivel, ésta se encuentra ubicada en Bogotá. La identificación geométrica es la siguiente:

$$o = \text{puerto o aeropuerto de arribo del medicamento } (o = 1, \dots, O)$$

Una vez ubicados los medicamentos en la bodega central, estos se tienen que distribuir a las bodegas regionales que corresponden al cuarto nivel de la estructura. En este nivel es necesario tomar la decisión relacionada con el modo de transporte terrestre (*mtt*) o aéreo (*mta*) dependiendo del tiempo de desplazamiento requerido (*tr*):

$$\text{Si } tr \leq 8 \text{ horas} \Rightarrow mtt \\ \text{Sí no} \Rightarrow mta$$

La identificación de la bodega regional es la siguiente:

$$p = \text{bodegas regionales } (p = 1, \dots, P)$$

Finalmente, se tiene el quinto nivel en donde se encuentran ubicadas las bodegas de las cabeceras municipales que al igual que el primer nivel no se contemplan en el desarrollo de la investigación, pero que aun así son de vital importancia para la estructura integral del modelo. La geometría del sistema identifica este nivel así:

$q = \text{cabeceras municipales } (q = 1, \dots, Q)$

3.3.2. Consideraciones generales y estructura del modelo

Una vez establecidos todos los criterios de pertinencia en relación con el trabajo desarrollado para el Ministerio de Salud y Protección Social en el contexto del manejo del abasto-distribución que actualmente maneja dicha entidad para los seis programas (6), se estableció una estructura del sistema que permitió direccionar y proyectar el modelo de gestión logística pertinente, con el cual se optimiza la gestión en este contexto.

Geometría del sistema

$i = \text{tipo de medicamento } i = 1, \dots, m$

$j = \text{período del horizonte de planificación } j = 1, \dots, n$

$k = \text{origen o procedencia del medicamento } k = 1, \dots, K$

$l = \text{puerto o aeropuerto de desembarco } l = 1, \dots, L$

$o = \text{bodegas de acopio central del medicamento } o = 1, \dots, O$

$p = \text{bodegas de acopio regional del medicamento } p = 1, \dots, P$

$q = \text{cabeceras municipales } q = 1, \dots, Q$

$t = \text{tipo de transporte } t = 1, \dots, T$

$c = \text{con cadena 1 o sin cadena de frío } c = 1, 2$

Al realizar el análisis de los diferentes tipos de medicamento, se concluye que algunos de los identificadores o subíndices de la geometría del sistema, pueden ser sustituidos por una denominación especial como resultado de las conclusiones establecidas.

Variables de decisión del sistema

Las variables de decisión para la facilitación de la estructura se dividieron en los siguientes grupos, tomando como criterio la generación de costos.

Variables de abastecimiento (x): Son aquellas que denotan las cantidades de medicamento que debe ser abastecido en las diferentes bodegas pertenecientes a los niveles definidos en la estructura del sistema.

$x_{ijkl} = \text{Cantidad de medicamento tipo } i \text{ que llega del origen } k \text{ al puerto o aeropuerto } l, \text{ en el período } j \text{ del horizonte de planeación}$

$x_{ijlo} = \text{Cantidad de medicamento tipo } i \text{ que llega del puerto o aeropuerto } l \text{ a la bodega central de acopio } o, \text{ en el período } j$

$x_{ijopt} = \text{Cantidad de medicamento tipo } i \text{ que llega de la bodega de acopio central } o, \text{ a la bodega regional } p, \text{ en el período } j, \text{ a través del medio de transporte } t$

Variables de inventario (I): Permiten establecer los niveles de inventario de los medicamentos tipo i que se manejan y controlan periódicamente tanto en bodega central como en las bodegas regionales y de las cabeceras municipales.

$I_{ijo} = \text{nivel de inventario de medicamento tipo } i \text{ que se maneja y controla en la bodega}$

central o, en el período } j

$I_{ijq} = \text{nivel de inventario de medicamento tipo } i \text{ que se maneja y controla en la bodega regional } q, \text{ en el período } j.$

Variables de viajes (NV): Establecen el control de la cantidad de viajes probables que se deben efectuar entre las bodegas de acopio o y los puertos y aeropuertos l cuando esto sea necesario, o de las bodegas de acopio a los aeropuertos regionales o bodegas regionales cuando esto tenga que cumplirse. Se debe aclarar que este control de viajes corresponde únicamente a las porciones terrestres.

$NV_{loc} = \text{número de viajes desde el puerto o aeropuerto } l, \text{ hasta la bodega central } o, \text{ utilizando o sin utilizar cadena de frío}$

$NV_{olc} = \text{número de viajes desde la bodega central } o \text{ hasta el puerto o aeropuerto } l, \text{ utilizando o sin utilizar cadena de frío}$

$NV_{oqc} = \text{número de viajes desde la bodega central } o, \text{ hasta las bodegas regionales } q, \text{ utilizando o sin utilizar cadena de frío}$

$NV_{qlc} = \text{número de viajes desde la bodega regional } q, \text{ hasta los aeropuertos regionales } q, \text{ utilizando o sin utilizar cadena de frío}$

Parámetros del modelo

Una vez definida la geometría del sistema y las variables correspondientes, se establecen los parámetros que permiten evaluar la función objetivo del modelo.

- Parámetros asociados a las variables de abastecimiento.

$C_{ijkl} = \text{Costo del medicamento tipo } i \text{ en el período } j \text{ del horizonte de planeación, que llega del origen } k \text{ al puerto o aeropuerto } l$

Este comportamiento de costo corresponde al costo agregado por la compra, embarque y entrega de los medicamentos en el puerto o aeropuerto l y que proceden desde el origen k . De este modo, los parámetros asociados a los dos conjuntos de variables de decisión restantes corresponden a los costos de transporte aéreo o terrestre desde las bodegas centrales o , hasta las bodegas regionales q .

$C_{ijlo} = \text{Costo por el transporte del medicamento tipo } i \text{ que llega del puerto o aeropuerto } l \text{ a la bodega central de acopio } o, \text{ en el período } j$

$C_{ijot} = \text{Costo por el transporte del medicamento tipo } i \text{ que llega de la bodega de acopio central } o, \text{ a la bodega regional } p, \text{ en el período } j, \text{ a través del medio de transporte } t$

- Parámetros asociados a las variables de inventario

$Cl_{ijo} = \text{Costo de inventario de medicamento tipo } i \text{ que se maneja y controla en la bodega central } o, \text{ en el período } j$

$Cl_{ijq} = \text{Costo de inventario de medicamento tipo } i$

que se maneja y controla en la bodega regional q , en el período j .

- Parámetros asociados a las variables de viajes

CNV_{loc} = Costo del número de viajes desde el puerto o aeropuerto l , hasta la bodega central o , utilizando o sin utilizar cadena de frío

CNV_{olc} = Costo del número de viajes desde la bodega central o hasta el puerto o aeropuerto l , utilizando o sin utilizar cadena de frío

CNV_{oqc} = Costo del número de viajes desde la bodega central o , hasta las bodegas regionales q , utilizando o sin utilizar cadena de frío

CNV_{qlc} = Costo del número de viajes desde la bodega regional q , hasta los aeropuertos regionales l , utilizando o sin utilizar cadena de frío

- Parámetros sobre número de viajes

CMT_c = capacidad estandarizada del medio de transporte tipo c

FC_i = factor de conversión de demanda en unidades de medicamento tipo i a unidades estandarizadas de carga

En relación con las matrices de restricciones se determinan los siguientes parámetros:

- Parámetros asociados con el abastecimiento de los medicamentos: Los parámetros asociados al abastecimiento de los diferentes tipos de medicamentos tienen que ver con las demandas del quinto nivel de la estructura del sistema logístico, correspondientes a las cabeceras municipales, las que mediante la consolidación por bodegas regionales tal como se muestra en las ecuaciones (1) y (2), permiten establecer los niveles de requerimiento para cada bodega regional.

Ecuación que consolida las demandas por bodegas regionales

$$D_{ijp} = \sum_{q \in p} \sum_{j=1}^n \sum_{p=1}^P D_{ijq} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (1)$$

$$D_{ijo} = \sum_{p \in o} \sum_{j=1}^n \sum_{p=1}^P D_{ijp} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2)$$

Donde:

D_{ijp} = demanda de producto i en periodo j que tiene la bodega regional p en el período j

D_{ijo} = demanda de producto i en periodo j que tiene la bodega central o

Estructura general del modelo

- Función objetivo:

La meta es generar el mínimo costo de la gestión logística MinSalud en el abasto-distribución de los medicamentos de los seis (6) programas de salud pública en Colombia, teniendo en cuenta el abastecimiento, el manejo y control de inventarios y el número de viajes o desplazamientos para el abastecimiento de las bodegas centrales y las bodegas regionales.

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L C_{ijkl} x_{ijkl} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O C_{ijlo} x_{ijlo} \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T C_{ijot} x_{ijot} \right] \\ & + \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{o=1}^O C_{Iijo} I_{ijo} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^Q C_{Iijq} I_{ijq} \right] \\ & + \left[\sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O \sum_{c=1}^C CNV_{loc} NV_{loc} \sum_{o=1}^O \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C CNV_{olc} NV_{olc} \right. \\ & + \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{c=1}^C CNV_{oqc} NV_{oqc} \\ & \left. + \sum_{q=1}^Q \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C CNV_{qlc} NV_{qlc} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

- Matrices de restricciones: El objetivo de minimización debe estar sujeto a las siguientes matrices de restricciones:

- (1) Matrices de satisfacción del abastecimiento a través de las demandas.

(1.1) En la bodega central o

$$I_{i(j-1)o} + \sum_{k=1}^K x_{ijk o} - I_{ijo} = D_{ijo} \quad \forall i, j, o \quad (4)$$

(1.2) En la bodega regional p

$$I_{i(j-1)p} + \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T x_{ijop} - I_{ijp} = D_{ijp} \quad \forall i, j, p \quad (5)$$

- (2) Matriz de restricciones de mantenimiento del flujo (ley de Kirchhoff)

$$\sum_{k=1}^K x_{ijk o} = \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T x_{ijop} \quad \forall i, j, p \quad (6)$$

- (3) Matriz de restricciones que permiten cumplir con la demanda D_{ijop} que tiene que satisfacerse con medicamento/insumo del conjunto i , y que debe enviarse desde las bodegas o hasta p , en cada uno de los períodos j .

$$\sum_{o=1}^O x_{ijop} = D_{ijop} \quad (7)$$

- (4) Matrices de restricciones sobre número de viajes.

Es necesario aclarar que esta información podría utilizarse para definir la cantidad de medios de transporte a utilizar.

(4.1) Para recogida desde aeropuerto l hasta bodega central

$$NV_{loc} = \frac{CMT_c \times D_{ijo}}{FC_i} \quad \forall l, c, o \quad (8)$$

(4.2) Para recogida desde bodega central o hasta el aeropuerto l .

$$NV_{olc} = \frac{CMT_c \times D_{ijo}}{FC_i} \quad \forall o, l, c \quad (9)$$

(4.3) Para desplazamiento desde bodega central o hasta la bodega regional p .

$$NV_{oqc} = \frac{CMT_c \times D_{ijp}}{FC_i} \quad \forall o, q, c \quad (10)$$

(4.4) Para desplazamiento desde bodega regional p hasta aeropuerto regional

$$NV_{qlc} = \frac{CMT_c \times D_{ijq}}{FC_i} \quad \forall q, l, c \quad (11)$$

Finalmente, se deben considerar las restricciones de no negatividad, pues deben ser mayores o iguales que cero (0).

3.3.3. Estructura de un sub-modelo para viajes

En relación con un posible sub-modelo para determinar el número de viajes, se debe cumplir con el objetivo que se expresa mediante una función objetivo que contenga los siguientes parámetros asociados a las variables de viajes definidos anteriormente.

Es necesario aclarar que esta información podría utilizarse para definir también la cantidad de medios de transporte a utilizar, pues al tener en cuenta la cantidad de medicamento a transportar, así como la capacidad del medio se podría establecer el cálculo.

La función objetivo de la ecuación (12) establece el costo óptimo por concepto de transporte, teniendo en cuenta si es de tipo aéreo o terrestre, y en caso de ser terrestre si debe o no manejar cadena de frío.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \left[\sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O CNV_{lo} NV_{lo} + \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{c=1}^C CNV_{oqc} NV_{oqc} \right. \\ & + \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{c=1}^C CNV_{oqc} NV_{oqc} \\ & \left. + \sum_{q=1}^Q \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C CNV_{qlc} NV_{qlc} \right] \quad (12) \end{aligned}$$

Para la determinación de las variables sobre número de

viajes (NV_{loc} ; NV_{olc} ; NV_{oqc} ; NV_{qlc}), es necesario aplicar la siguiente heurística.

Paso 1.

$$NV_{kl} = \text{flujo físico } ij_k / FC \quad \text{para } \forall i, j, k$$

En donde:

CMT_c = capacidad estandarizada del medio de transporte tipo c

FC_i = factor de conversión de demanda en unidades de medicamento tipo i a unidades estandarizadas de carga

Paso 2.

Si TT y recepción $_{pj} > 0$

$$\Rightarrow \text{recepción}_{pj} / FC = NV_{ol(c=2)}$$

$$\text{Si no } \text{recepción}_{pj} / FC = NV_{ol(c=1)}$$

para $\forall p, j, o,$

Paso 3.

si $c = 1 \Rightarrow \text{flujo físico } ij_k / FC = NV_{oqc}$

si no $c = 0$

3.3.4. Escenarios del Modelo de Gestión Logística

Una vez estructurado el modelo que permite la gestión logística del Ministerio de Salud y Protección Social en relación con los seis (6) programas de salud pública, se verificó que los arcos de comunicación del grafo de la cadena de suministro del sistema logístico son del tipo (i, j) , que representan la secuencialidad en el contexto de los cinco niveles definidos, pero es probable que la secuencialidad de comunicación pueda pasar del tipo $(i, j) \rightarrow (i, k)$, es decir que pueda pasar del nivel 1 al nivel 3 sin pasar necesariamente por el nivel 2, es decir que se estaría trabajando con un costo directo entre 1 y 3 que podría finalmente resultar mejor para el desempeño general del sistema. En este orden de ideas se consideran los escenarios expuestos en los siguientes epígrafes.

El modelo matemático general que se ha descrito permite ser utilizado como medio central en los procesos de planeación y gestión del sistema logístico del Ministerio de Salud y Protección Social y de esta forma el mismo posibilita al grupo decisor definir distintos escenarios que guíen la acción y logren que de primera mano se puedan realizar las simulaciones requeridas que midan las incidencias e impactos en términos de cobertura, costos, tiempos, servicios, modos y medios requeridos, infraestructura logística, sistemas de información y comunicación, perfil de potencialidades entre otros aspectos asociados al sistema logístico.

Se definieron diferentes escenarios teniendo en cuenta pedidos masivos en el comienzo del horizonte de gestión y el total de los medicamentos de los seis programas, a través de la generación de conjuntos de medicamentos/insumos y otros relacionados con gestiones parciales, entre los cuales se han seleccionado tres que a juicio de los investigadores representan el mayor impacto en términos de cobertura, facilidad de adopción, manejo de información y fiabilidad de

la misma.

Escenario Cero: Dos bloques (ETV-TB) y PAI (Biológicos)

Del trabajo de campo, características, rasgos y evaluación llevada a cabo *in situ* para los diferentes puntos que el Ministerio de Salud y Protección Social consideró necesario incluir en la investigación, se logró establecer que por los hallazgos, medios, modos disponibles y sus *modus operandi* se puede coordinar en principio dos grandes bloques: **ETV-TB y Biológicos**. Esta agrupación permite iniciar un proceso de mejora sostenida en términos de la operación logística la cual puede representar beneficios visibles en términos de costos, tiempos, cobertura e impacto, con mínimos traumatismos para el sistema en su conjunto. De manera esquemática se presenta este escenario en la Tabla 1.

Escenario 1: comunicación directa nivel 1, nivel 3

Para este escenario el planteamiento consiste en la descentralización del abastecimiento de forma tal que pueda pasar de un origen o procedencia k hasta una bodega regional p sin que tenga que pasar por la bodega central o , es decir que pueda pasar a un nivel diferente (i, k) . La estructura se puede observar en la Figura 4 (excluyendo las flechas transversales entre nodos q).

En este escenario las flechas que conectan los nodos origen $(1, 2, \dots, k)$ del nivel 1 con los nodos correspondientes a las bodegas regionales $(1, 2, \dots, p)$ del nivel 3 representan la conectividad tipo (i, k) lo que significa que pasa directamente de 1 a 3. En el contexto real (sistema empírico) como ya se había definido, puede existir una probabilidad que desde los orígenes k pertenecientes al primer nivel 1 se pueda llegar directamente a una bodega regional p del nivel 3, probabilidad que está asociada al comportamiento del costo de transporte C , en donde debe cumplirse:

$$C_{klo} > C_{kp}$$

Escenario 2: Comunicación Directa Intra-nivel

Este escenario plantea la posibilidad de comunicación intra-nivel, la cual podría presentarse concretamente en el cuarto nivel de la estructura del sistema de logística. El contexto se daría al evaluar el subconjunto de nodos $(j, j1, j2, \dots, jn)$ para $j \in p$. Quedando la estructura tal como se presenta en la figura 4.

Las flechas que interconectan los nodos $(1, 2, \dots, P)$ pertenecientes a las bodegas regionales representan la conectividad dentro de este nivel (intra-nivel) que para el análisis de contexto en un sistema empírico, puede existir una probabilidad que entre las diferentes bodegas regionales p pertenecientes al cuarto nivel se pueda llegar establecer un flujo físico de medicamentos por ejemplo entre $p1$ y $p2$, etcétera, probabilidad que está asociada al comportamiento del costo de transporte C , en donde debe cumplirse que por ejemplo:

$$C_{op} > C_{op1} \text{ y } C_{op1} > C_{p,p1}$$

3. Resultados y discusión

En todos los escenarios analizados, los resultados evidenciaron mejoras sustanciales para los resultados del

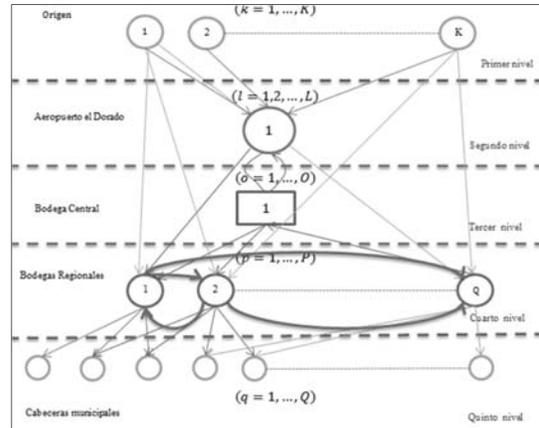


Figura 4. Estructura del sistema abasto-distribución con intra-conectividad $(j, j1, j2, \dots, jn)$ para $j \in p$. Fuente: Propia

Sistema logístico al comparar los resultados con los costos reales que se manejan en MinSalud, pero que son de carácter confidencial, razón por la cual no se desarrolla ninguna tabla de comparación, en términos de costos y servicios, que responden a las dinámicas de una cadena de suministro en donde el eslabón más débil condiciona el desempeño del sistema.

Escenario 1: Soportados en el modelo general, mediante variantes relacionadas con la posibilidad de poder abastecer sus bodegas regionales o departamentales en forma directa desde los orígenes de los medicamentos, posibilita la eliminación de un intermediario en relación con los flujos físicos del sistema generando la probabilidad de reducir los costos de una manera más agresiva que el escenario 0 de hasta el 40,04%.

Este escenario permite adoptar las economías de escala por concepto de un mejor uso de los medios de transporte disminuyendo los costos que se generan en las operaciones de distribución que atienden los diferentes puntos de demanda. Esta reducción de costos en los medios de transporte representa cerca de una tercera parte de los costos logísticos del sistema, mejorando también los tiempos de respuestas, condición necesaria para este tipo de CS.

Escenario 2: Este escenario busca descentralizar la ubicación física de las bodegas regionales y centralizar en algunas de ellas el flujo físico de los medicamentos, teniendo como marco de referencia la conectividad entre bodegas regionales, lo que permitiría una probable reducción de los costos por conceptos de transporte y almacenamiento, además de brindar una capacidad de respuesta apropiada al usuario final, mejorando de manera determinante la percepción sobre el servicio al usuario final.

Este escenario requiere el mayor nivel de esfuerzo en su implementación debido al hecho que la calidad de la información requerida así como su nivel de detalle son de un alto nivel de precisión, confiabilidad y oportunidad. Este contexto requiere un mayor nivel de inversión para el desarrollo de la operación logística, sin embargo, evidencia el mayor nivel de ahorros frente a los escenarios anteriormente propuestos, de hasta el 57,44%, como resultado de la inversión efectuada en su mejoramiento.

Tabla 1.
Estructura esquemática que incluye notación y simulación de resultados del escenario 0.

Variables F. Objetivo	Origen 1 (O1)								Origen 2 (O2)							
	Medicamento 1 (M1)				Medicamento 2 (M2)				Medicamento 1 (M1)				Medicamento 2 (M1)			
Coef. Función Objetivo	α	β	γ	δ	ϵ	ζ	η	θ	ι	κ	λ	μ	ν	ξ	\omicron	π
Coef. Función Objetivo	500	500	500	500	456	456	456	456	642	642	642	642	670	670	670	670
Valor óptimo de variables	-	12.085	29.950	20.965	-	-	3.907	3.894	41.930	11.875	-	-	5.331	4.433	1.964	-
Dem. M1 P1	1								1							
Dem. M1 P2		1								1						
Dem. M1 P3			1								1					
Dem. M1 P4				1								1				
Dem. M2 P1					1								1			
Dem. M2 P2						1								1		
Dem. M2 P3							1								1	
Dem. M2 P4								1								1
Cap. M1 O1	1	1	1	1												
Cap. M1 O1									1	1	1	1				
Cap. M1 O1					1	1	1	1								
Cap. M1 O1													1	1	1	1

Variables F. Objetivo	Min Z		
Coef. Función Objetivo	80909502,8		
Valor óptimo de variables	LHS	Signo	RHS
Dem. M1 P1	41930	\geq	41930
Dem. M1 P2	23960	\geq	23960
Dem. M1 P3	29950	\geq	29950
Dem. M1 P4	20965	\geq	20965
Dem. M2 P1	5331,1	\geq	5331,1
Dem. M2 P2	4432,6	\geq	4432,6
Dem. M2 P3	5870,2	\geq	5870,2
Dem. M2 P4	3893,5	\geq	3893,5
Cap. M1 O1	63000	\leq	63000
Cap. M1 O1	53805	\leq	74000
Cap. M1 O1	7800	\leq	7800
Cap. M1 O1	11727,4	\leq	15000

Fuente: Propia

4. Conclusiones

El modelo general propuesto tiene la capacidad de adaptarse para el procesamiento de diferentes parámetros tales como capacidad, tiempo, costos, accesibilidad, variedad del portafolio y otras fuentes de variación del sistema logístico, que a juicio del decisor deban incluirse en el proceso de planeación, sin que esto tenga repercusiones en la calidad de los resultados, permitiendo un adecuado procesamiento de la información para el desarrollo del proceso de toma de decisiones.

De manera general se determina que es imperativo para el Ministerio de Salud y Protección Social como ente rector en la definición de políticas de salud pública, establecer como prioridad la definición y adopción del sistema logístico integral de la red de salud pública para el país, que propenda por coordinar y armonizar las acciones a nivel intra e inter agentes dentro del territorio nacional, independiente de las responsabilidades administrativas, financieras, técnicas y científicas que competen a los diferentes actores a nivel nacional, departamental o municipal.

Estas acciones permiten mejorar la necesidad de coordinación de las actividades de la operación logística en

forma general, relacionadas con los macro procesos de abastecimiento, almacenamiento y distribución, de acuerdo con la regulación existente, la infraestructura disponible, atendiendo en forma bidireccional los flujos de información, dinero, energía, conocimiento e inventarios de vacunas, medicamentos, insumos, manejo de empaques y embalajes, excedentes, en relación con las que se ejecutan actualmente.

Referencias

- [1]. Jünemann, R., *Logistik in Europa: Innovationsstrategien für Wirtschaft und Dienstleistungen*. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1989.
- [2]. Jünemann, R., *Umwelt, Logistik und Verkehr: wohin geht die Reise?* Verlag Praxiswissen, Dortmund, 1992.
- [3]. Jünemann, R., *Logistikstrukturen im Wandel - Herausforderungen für das 21. Jahrhundert: Logistik im Dialog zwischen Praxis und Wissenschaft*. Tagungsband zu den 13. Dortmunder Gesprächen Verlag Praxiswissen, Dortmund, 1995.
- [4]. The World Bank., *Connecting to Compete 2012 - Trade Logistics in the Global Economy*. Washington D.C., Communications Development Incorporated, 2012.
- [5]. Ministerio de la Protección Social., *Protocolo de vigilancia y control de Dengue*. Bogotá, Subdirección de Vigilancia y Control en Salud Pública, 2010.
- [6]. Comunidad Europea., *Propuesta de sistema de trazabilidad para medicamentos de consumo humano*. 2010. [Online], [Dato de

- consulta Diciembre de 2010]. Disponible en : http://ec.europa.eu/health/files/counterf_par_trade/doc_publ_consult_00803/61_societa_generale_per_l_industria_della_magnesia_s_p_a_en.pdf
- [7]. Subdirección de Vigilancia y Control en Salud Pública., Protocolo de vigilancia y control de Leishmaniasis. Bogotá: Ministerio de la Protección Social. 2011.
- [8]. Vélez, L.G., Biológicos y biotecnológicos: Una oportunidad para Colombia, Medellín, 2012.
- [9]. Ministerio de la Protección Social., Guía de Atención Clínica de Malaria. Organización Panamericana de la Salud., Bogotá, Colombia, 2010.
- [10]. Garland-Chow, T.D., and Heaver-Henriks, L.E., Logistics performance: Definition and measurement. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24 (1), pp. 17-28. 1994.
- [11]. Naylor, D., Health care in Canada: Incrementalism under fiscal duress. *Health Affairs*, 18 (3), pp. 9-26. 1999.
- [12]. Adarme-Jaimes, W. and Arango-Serna, M.D., Decisiones estratégicas de localización de centros de distribución, bodegas y puntos de crossdock. En Botero-Botero, S. and Rojas-López, M.D., *Innovación & Sostenibilidad - Avances en Ingeniería de la Organización*. Medellín: Apotema S.A.S., Colombia, 2010.
- [13]. Thanh, P.N., Bostelb, N. and Olivier, P., A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. *International Journal of Production Economics*, 113 (2), pp. 678-693, 2008.
- [14]. Daskin, M.S., Coullard, C. and Shen, Z.M., An inventory-location model: Formulation, solution algorithm and computational results. *Annals of Operations Research*, 110 (1), pp. 83-106, 2002.
- [15]. Melo, M.T., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F., Facility location and supply chain management – A review. *European Journal of Operational Research*, 196 (2), pp. 401-412, 2009.
- [16]. Mirchandani, P.B. and Francis, R.L., *Discrete location theory*. New York, Wiley. 1990.
- [17]. Sridharan, R., The capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research*, 87 (2), pp. 203-213, 1995.
- [18]. Ballou, R.H., *Business logistics/supply chain management*. Prentice Hall. 2004.
- [19]. Grunow, M. and Rong, A., A methodology for controlling dispersion in food production and distribution. *OR Spectrum*, [Online]. 32 (4), pp. 957-978, 2010. [Date of reference November 24th of 2012]. Available at: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00291-010-0210-7>
- [20]. Pfohl, H.-C., Köhler, H. and Thomas, D., State of the art in supply chain risk management research: Empirical and conceptual findings and a roadmap for the implementation in practice. *Logistics Research*, 2 (1), pp. 33-44, 2010.
- [21]. Grunow, M. and Rong, A., A methodology for controlling dispersion in food production and distribution. *OR Spectrum*, [Online]. 32 (4), pp. 957-978, 2010. [Date of reference November 22th of 2012]. Available at: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00291-010-0210-7>
- [22]. Mula, J., Peidro, D., Díaz-Madroñero, M. and Vicens, E., Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, [Online]. 204 (3), pp. 377-390, 2010. [Date of reference October 12th of 2013]. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221709005694>.
- [23]. Lucas, M.T., and Chhajat, D., Applications of Location Analysis in Agriculture: A Survey. *The Journal of the Operational Research Society*, 55 (6), pp. 561-578, 2004.
- [24]. Salin, V., Information Technology in agri-food Supply Chains. *International Food and Agribusiness Management Review*, 1 (3), pp. 329-334, 1998.
- [25]. Akkerman, R., Farahani, P. and Grunow, M., Quality, safety and sustainability in food distribution: a review of quantitative operations management approaches and challenges. *OR Spectrum*, [Online]. 32 (4), pp. 863-904, 2010. [Date of reference November 23th of 2012]. Available at: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00291-010-0223-2>
- [26]. Klöse, A. and Drexl, A., Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, [Online]. 162 (1), pp. 4-29, 2005. [Date of reference October 12th of 2013]. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221703008191>.
- [27]. Blackburn, J. and Scudder, G., Supply chain strategies for perishable products: The case of fresh produce. *Production and Operations Management*, 18 (2), pp. 129-137, 2009.
- [28]. Rong, A., Akkerman, R. and Grunow, M., An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain. *International Journal of Production Economics*, [Online]. 131 (1), pp. 421-429, 2011. [Date of reference October 05th of 2013]. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527309004290>.

J. P. Castrellón Torres, recibió el grado de Ingeniero Industrial en 2012 y actualmente se encuentra culminando su MSc. en Ingeniería Industrial, ambos estudios en la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Se encuentra vinculado a la investigación en logística a través del Grupo Sociedad Economía y Productividad SEPRO – Línea Logística donde ha participado en proyectos de investigación y extensión con el sector público y privado en temas relacionados con la logística y la administración de la cadena de suministro. Sus áreas de interés abarcan los temas de logística de productos perecederos, los servicios logísticos 3PL, políticas públicas en logística.

J. H. Torres Acosta, recibió el grado de Ingeniero Industrial de la Universidad Francisco José de Caldas, Colombia, es Esp. en Ingeniería de Producción, MSc. en Investigación de Operaciones, ambos de la Universidad Nacional Autónoma de México, México. Dr. en Ciencias Técnicas de la Universidad Central ‘Martha Abreu’ de las Villas y PhD. de la Universidad de la Florida, USA. Ha tenido experiencia en el sector productivo y actualmente se desempeña como profesor titular de la Universidad Francisco José de Caldas, Colombia. Su actividad de investigación en logística la desarrolla en el grupo Sociedad Economía y Productividad SEPRO – Línea Logística, donde ha participado en proyectos de investigación y extensión con el sector público y privado en temas relacionados con la logística y la administración de la cadena de suministro. Sus áreas de interés comprenden la gestión del conocimiento, modelado matemático de sistemas logísticos, sistemas soporte de decisiones en logística y Business Intelligent.

W. Adarme Jaimes, recibió el grado de Ingeniero Industrial en 1993 de la Universidad Industrial de Santander, Colombia; es Esp. en Ingeniería de la Producción y Mejoramiento Continuo en 1997 de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia, es MSc. en Ingeniería con énfasis Logística en 2007 de la Universidad del Valle, Colombia, Dr. en Ingeniería, Industria y Organizaciones en 2011 de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Ha tenido experiencia en el sector metalúrgico y textil. Actualmente se desempeña como profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Es el director del grupo Sociedad Economía y Productividad SEPRO – Línea Logística, donde ha dirigido proyectos de investigación y extensión en contextos regionales, nacionales e internacionales, todos en temas de logística y administración de la cadena de suministro. Sus áreas de interés comprenden la coordinación de actores, políticas públicas en logística.