

## **Modelo de Localización dinámica de nodos logísticos intermedios dentro de zonas seguras en el contexto de logística focalizada**

### **Dynamic Location Model of Intermediate nodes within safety zones in focused logistics context**

*Dusko Kalenatic<sup>1\*</sup>, Cesar Amílcar López Bello<sup>1</sup>, Leonardo José González<sup>1</sup>, Feizar Javier Rueda Velasco<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Producción –GIP- Universidad Católica de Colombia, Diagonal 47 N.º 15-50 Bogotá, D.C., Colombia.

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en Sistemas Logísticos. Universidad de la Sabana, Campus Universitario del Puente del Común, Autopista Norte de Bogotá, D.C. Chía, Colombia.

(Recibido el 23 de junio de 2010. Aceptado el 31 de enero de 2011)

#### **Resumen**

En este artículo se desarrolla un modelo matemático de programación entera mixta que apoya la decisión de localización de múltiples nodos logísticos intermedios en un horizonte temporal en función del desplazamiento de las unidades de combate (nodos de destino). El modelo permite realizar una propuesta de configuración dinámica de la red de suministro dentro del contexto de los sistemas logísticos militares, empleando para ello los conceptos de logística focalizada como última tendencia para su diseño y administración en los escenarios actuales de conflicto. Adicionalmente se presenta como novedad la inclusión de zonas seguras en la localización de los nodos, estas zonas se representan a través de restricciones espaciales que buscan ofrecer garantías de supervivencia, operatividad, continuidad del suministro y flexibilidad en ambientes hostiles.

----- *Palabras clave:* Logística focalizada, localización, logística operacional, zonas seguras

#### **Abstract**

This paper presents a mixed integer programming model for multiple logistics node location in order to support decision making processes as a function of

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: +57 + 7 + 861 55 55 ext. 2540, fax: +57 + 7 + 861 55 55 ext. 2515, correo electrónico: duskokalenatic@yahoo.com. (D. Kalenatic)

combat units movement. The model let us to obtain a dynamic configuration for a supply network in operational logistics. With this purpose focused logistics concepts are employed as a last tendency for sustaining military operations. The model offers the possibility of use safety zones modeled as a spatial constrains which pretend to give warranties about survivability, operability, supplies continuity and flexibility in a hostile environment.

----- *Keywords:* focused logistics, location, operational logistics, safety zones

## Introducción

El nuevo orden internacional es ahora más complejo, combinando riesgos y amenazas muy dispares como la actuación de estados fallidos, el terrorismo, insurgencia, proliferación en armamento de destrucción masiva, crisis humanitarias, catástrofes ambientales, entre otros. En este contexto el cambio en asuntos militares ha sido representativo [1,2]. La logística focalizada se presenta como consecuencia de este cambio y es el concepto integrador dentro de los seis conceptos operacionales de transformación militar planteados en [3].

El plan de campaña de logística focalizada [4], la define como la habilidad de proveer a las fuerzas armadas con el adecuado personal, equipamiento y provisiones en el lugar adecuado, en el momento adecuado, en la cantidad adecuada en todo el espectro de las operaciones militares a través de un sistema de información en tiempo real y basado en redes, que provee una visibilidad total de los recursos vinculando efectivamente al personal operativo y logístico en todos los servicios y agencias de apoyo, a través de innovaciones transformativas a las organizaciones y los procesos. Siendo innovador el uso intensivo y extensivo de los sistemas de información en tiempo real como herramienta tecnológica que soporta la toma de decisiones en todos los niveles [5].

La logística focalizada requiere, entre otros, una conciencia situacional del teatro de operaciones, cuyo concepto involucra el uso de las tecnologías de la información y telecomunicaciones disponibles para lograr una percepción total del

entorno, y así entender los eventos, la información, el impacto de las acciones propias sobre las metas y objetivos tanto en el corto plazo como en el futuro cercano. En su nivel más alto este concepto pretende lograr la habilidad de proyectar futuras acciones sobre los elementos del entorno basado en el conocimiento en el estatus dinámico de los mismos, y la comprensión de las situaciones, y extrapolando esta información en tiempo futuro de tal manera que se pueda determinar futuros estados en un ambiente operacional [6].

Las implicaciones logísticas de este concepto radican, por mencionar algunos aspectos, en tener una conciencia total en la localización de existencias, estado de los nodos y eslabones de la red de suministro, niveles de uso, desempeño, confiabilidad, disponibilidad y costo [4].

La conciencia situacional del teatro de operaciones, interactúa con conceptos como el de logística de detección y respuesta [6,7], en donde se genera un marco de gestión para aquellas organizaciones que enfrentan continuos cambios y en cuyo contexto se hace difícil la previsión de los mismos. La logística de detección y respuesta sustenta su desarrollo en los sistemas y redes de información para poder predecir, anticipar y coordinar acciones que puedan proveer una ventaja competitiva en todos los niveles, de tal manera que cualquier entidad militar, gubernamental o comercial este en capacidad de ser un potencial proveedor de servicios logísticos. La importancia del uso intensivo de los sistemas de información y telecomunicaciones radica en detectar las necesidades el combatiente en tiempo real, y responder a ellas en intervalos cortos de tiempo y en paquetes personalizados acorde con dichas necesidades.

En general, para responder a estas necesidades en condiciones cambiantes, la logística focalizada puede interactuar con herramientas matemáticas para la toma de decisiones que propendan por la eficacia necesaria a nivel operacional y táctico [8] a través de la información obtenida por lo sistemas de detección y respuesta.

Dentro de este contexto, se presenta un modelo matemático que soporta la decisión de localización de múltiples nodos intermedios utilizando restricciones de zonas seguras, para ello en primer lugar se aclara la metodología seguida para la realización del modelo, posteriormente se realiza la formulación acorde con el marco contextual presentado en esta introducción. Finalmente el modelo se prueba a través de un caso simulado, se presentan los resultados y se interpretan acorde a las condiciones que propiciaron el modelo.

La formulación del modelo pretende dar una visión integradora de dos frentes que hasta hoy se han abordado de manera independiente en el contexto de logística focalizada, El primer frente trata los aspectos doctrinales y contextuales. Para ello se realizó una revisión de los documentos oficiales y fuentes electrónicas en los cuales se plantean los conceptos así como los desafíos de la logística focalizada. El segundo frente es la literatura académica, que incluye modelos matemáticos que soportan el diseño de cadenas de suministro en ambientes militares. Para ello se acudió a bases de datos bibliográficas, libros relacionados pertinentes al contexto y bases de datos de tesis doctorales.

Con base en lo anterior se diseñó y formuló el modelo utilizando los aspectos pertinentes encontrados en la literatura, adaptándolos y ampliándolos a una realidad práctica que a criterio de los autores robustece los modelos hasta ahora reportados en la literatura científica.

Por último se probó el modelo a través de un caso simulado. La experimentación se realizó en el software GAMS 2.0.36.7 con el solucionador C-PLEX en un ordenador con procesador Inter Pentium DCPU 2.8 GHz y 2Gb en memoria RAM.

## **Antecedentes**

La literatura asociada a las herramientas matemáticas es limitada. Algunos ejemplos son trabajos como [9] en el que se modela el pre-posicionamiento de centros de abastecimiento para las fuerzas armadas. Por su parte en [10] se estudia la estructura de la red de suministro examinando el diseño de múltiples flotas navales, usando el concepto de base marítima.

En otros escritos como [11-13] definen la estructura de la red de suministro usando el concepto de Hub and Spoke, el cual es una categoría especial del problema de flujo en redes que se aplica a nivel civil en servicios de aerolíneas, mensajera y redes de cómputo. Este enfoque consiste en la determinación de nodos (Hubs) que colectan elementos de diferentes orígenes y los redireccionan hacia cada uno de sus destinos finales.

También se encuentran modelos como el de Mezcla óptima de fuerza de combate y soporte [14], el de localización de recursos en función del clima [15], los modelos estratégicos de movilidad [16-18], los modelos de localización de inventario y programación del transporte para redes logísticas [19] y los modelos de combate en tierra [20]. Todos estos modelos soportan la toma de decisiones en relación con medios de transporte, instalaciones y sus capacidades, así como de inventarios, personal y su disponibilidad, además la inclusión de periodos de aprovisionamiento y variables medioambientales originadas en el clima, la competencia u oponentes así como las condiciones económicas.

Con base en lo anterior, y aunque restringida, la literatura alrededor de modelos de soporte a las decisiones para la logística de defensa desarrolla un gran interés en la composición y estructura de la red de suministro, sin embargo no es común que se contemple una estructura dinámica y en general, la consideración simultánea de los aspectos temporales y espaciales en los que se desenvuelve la red de suministro bajo los preceptos de logística focalizada no es ampliamente abordada.

Al tener en cuenta el carácter dinámico, considerado como crítico por [8], el objetivo de este escrito es mostrar un modelo de programación entera mixta que permita contribuir con la configuración de la red de suministro, contemplando zonas seguras a nivel global para pre-posicionar municiones, combustibles, vehículos, soporte aéreo e inventario consumible teniendo en cuenta cambios temporales en los parámetros y, por lo tanto, considerando coordenadas móviles de las plataformas logísticas. Para ello se tuvo en cuenta una estructura del sistema logístico en donde la localización de las unidades de avanzada o plataformas logísticas de pre posicionamiento están limitadas a zonas donde las condiciones de seguridad sean adecuadas, o donde los acuerdos internacionales permitan la movilidad de las mismas. La inclusión de este factor restrictivo, además de ser novedoso, ofrece una mejor aproximación al sistema real con respecto a los modelos descritos anteriormente.

### **Estructura de la red de suministro**

La red logística en escenarios militares puede definirse como un conjunto de nodos y líneas de comunicación. Entendiendo por nodo, cualquier locación donde pueda realizarse una actividad logística, tales como puntos de reaprovisionamiento de combustible o armas, suministros de munición, puertos, aeropuertos, almacenes en el teatro de operaciones, entre otros. Así mismo las líneas de comunicación representan las diferentes rutas que conectan las fuerzas militares con los nodos logísticos en la retaguardia [8], siempre y cuando los nodos se encuentren operativos en el teatro de operaciones. En concordancia con lo anterior se puede afirmar que la red logística se compone de tres elementos primordiales: los nodos de origen, los nodos intermedios y los nodos de destino.

*Nodos de origen o nodos fuente:* Son bases en el territorio nacional, puertos de embarque y almacenes estratégicos alrededor del mundo.

*Nodos intermedios:* Según [21], los nodos intermedios pueden ser fijos o móviles. Los primeros comprenden instalaciones, como aeropuertos, puertos, nodos ferroviarios, instalaciones de pre-posicionamiento, centros de distribución o instalaciones de refacciones y mantenimiento fijas. Los segundos representan el caso de unidades de soporte logístico de avanzada como carrotaques, hospitales móviles, unidades de mantenimiento, entre otros.

*Nodos de destino:* Están constituidos por unidades de servicio de soporte al combate, o propiamente las unidades de combate.

## **Metodología**

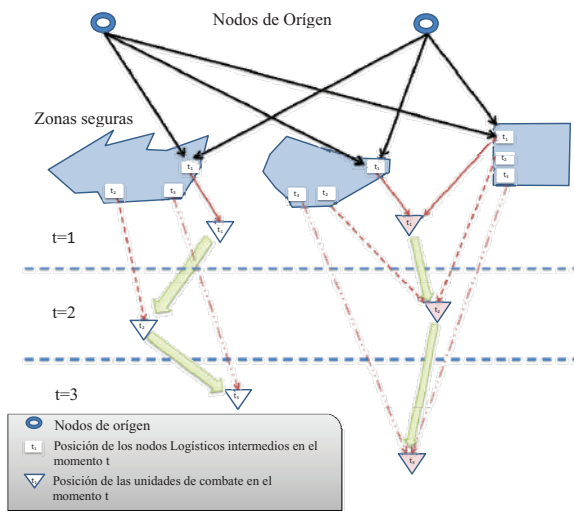
### **Modelo de localización de nodos intermedios en el teatro de operaciones**

De acuerdo con el marco contextual, se formula un modelo que soporta la decisión de localización dinámica de los nodos logísticos intermedios, que bien pueden ser centros de suministro previamente pre-posicionados o unidades logísticas móviles de avanzada.

Sobre un horizonte temporal, la ubicación de los nodos intermedios depende de la ubicación de las unidades tácticas o de combate que tiene una movilidad en el tiempo y de la localización de los centros de suministro.

Para representar esta estructura, la figura 1 muestra un conjunto de centros de suministro que abastecen a los nodos logísticos intermedios en diferentes instantes de tiempo, quienes a su vez en el mismo horizonte temporal, distribuyen los suministros a las unidades de combate. Los nodos logísticos intermedios se desplazan dentro de las zonas seguras, en función de la posición de las unidades de combate (nodos de destino).

Cabe anotar que en la figura 1 se resaltan las zonas donde los nodos logísticos intermedios pueden ser localizados.



**Figura 1** Estructura de la red de suministro en función del tiempo

La necesidad de estas zonas radica en la imposibilidad práctica de localizar centros logísticos en cualquier coordenada del teatro de operaciones. Farahani y Asgari [22], describen algunos factores o atributos que pueden afectar la localización de instalaciones logísticas en el contexto de la defensa. Entre ellos destacan factores militares como la disponibilidad de medios de defensa activa (Ej. Artillería antiaérea, unidades de protección) o defensa pasiva (Ej. Construcción de búnkeres, o utilización de grutas naturales) y la cercanía a las fronteras. También incluyen factores como la infraestructura (Ej. Acceso a carreteras, ferrocarriles, aeropuertos, puertos, recursos hídricos, energía, combustible.), disponibilidad de mano de obra calificada y la actividad económica de la región, clima y geología. Al aporte de estos autores, se pueden agregar factores como la densidad de la población y su grado de hostilidad, también es posible considerar una mayor dificultad para la localización por la composición étnica o multiétnica y sus relaciones.

Una vez contemplados parcial o totalmente los factores mencionados, se debe determinar las coordenadas posibles para la localización de

los nodos logísticos intermedios, de tal manera que dichas coordenadas se transformen en restricciones de localización. Adicionalmente la localización de los nodos sobre las zonas permitidas en un horizonte temporal, está influenciada por la ubicación de las unidades tácticas o de combate (quienes también tienen una movilidad en el tiempo) y de la localización de los centros de suministro.

Por otra parte la decisión de la localización se toma con base en las distancias desde los centros de suministro hacia los nodos intermedios y desde dichos nodos hasta las unidades de combate. No obstante se hace uso de las distancias rectilíneas ya que, en el contexto de logística focalizada, son menos probables los desplazamientos a través de rutas rectas bien sea por que los caminos o rutas pueden no estar disponibles, o por motivos de seguridad no se opta por transportar por caminos en una ruta fácilmente interceptable o predecible lo que obliga predominantemente a los medios de transporte a realizar recorridos no lineales. Una aproximación al uso de distancias rectilíneas para la localización en contextos de logística focalizada puede verse en [22] y [23].

De acuerdo con lo anterior se definen la notación para el modelo incluyendo las distancias rectilíneas desde los orígenes de suministro hasta hacia los nodos intermedios y desde estas hasta las unidades tácticas.

### Índices

$I = \{ \dots i \dots m \}$  Conjunto de índices que corresponden a los nodos de origen.

$J = \{ \dots j \dots n \}$  Conjunto de índices que corresponden a las unidades de combate.

$K = \{ 1, \dots, k, \dots, l \}$  Conjunto de índices que corresponden a los nodos intermedios.

$T =$  Número de periodos de tiempo en el horizonte de planeación ( $1 \leq t \leq T$ ).

$P = \{ 1, \dots, p, \dots, q \}$  Conjunto de índices que corresponden al tipo de producto.

### Variables de decisión

$dp_{ikt}$ : Diferencia entre abscisas de los centros de suministro (locaciones del área de retaguardia) “i” y los nodos intermedios “k” en el instante “t”.

$dpy_{ikt}$ : Diferencia entre ordenadas de los centros de suministro “i” y las plataformas de distribución “k” en el instante “t”.

$ddx_{jkt}$ : Diferencia entre abscisas de las unidades de combate “j” y los nodos intermedios “k”, en el instante “t”.

$ddy_{jkt}$ : Diferencia entre las ordenadas de las unidades de combate “j” y nodos “k”, en cada “t”.

Estas distancias se pueden representar mediante la representación típica de las variables no restringidas así (1-4):

$$dp_{ikt} = dp_{ikt}^{(+)} - dp_{ikt}^{(-)} \quad \forall i, k, t \quad (1)$$

$$|dp_{ikt}| = dp_{ikt}^{(+)} + dp_{ikt}^{(-)} \quad \forall i, k, t \quad (2)$$

$$dpy_{ikt} = dpy_{ikt}^{(+)} - dpy_{ikt}^{(-)} \quad \forall i, k, t \quad (3)$$

$$|dpy_{ikt}| = dpy_{ikt}^{(+)} + dpy_{ikt}^{(-)} \quad \forall i, k, t \quad (4)$$

Luego, bajo esta notación se tiene que:

$dp_{ikt}^{(+)}$ : Distancia si la abscisa del centro de suministro “i” se encuentra a la derecha de la abscisa de los nodos intermedios “k”.

$dp_{ikt}^{(-)}$ : Distancia si la abscisa del centro de suministro “i” se encuentra a la izquierda de la abscisa de los nodos intermedios “k”.

$dpy_{ikt}^{(+)}$ : Distancia si la ordenada del centro de suministro “i” se encuentra por encima de la ordenada de los nodos intermedios “k”.

$dpy_{ikt}^{(-)}$ : Distancia si la ordenada del centro de suministro “i” se encuentra por debajo de la ordenada de los nodos intermedios “k”.

$ddx_{jkt}^{(+)}$ : Distancia si la abscisa de la unidad de combate “j” se encuentra a la derecha de la abscisa de los nodos intermedios “k”.

$ddx_{jkt}^{(-)}$ : Distancia si la abscisa de la unidad de combate “j” se encuentra a la izquierda de la abscisa de los nodos intermedios “k”.

$ddy_{jkt}^{(+)}$ : Distancia si la ordenada de la unidad de combate “j” se encuentra por encima de la ordenada de los nodos intermedios “k”.

$ddy_{jkt}^{(-)}$ : Distancia si la ordenada de la unidad de combate “j” se encuentra por debajo de la ordenada de los nodos intermedios “k”.

$X_{kt}$ : Ubicación sobre el eje de las abscisas de los nodos intermedios “k”.

$Y_{kt}$ : Ubicación sobre el eje de las ordenadas de los nodos intermedios “k”.

### Parámetros

$WUN_p$ : Peso del producto tipo “p” expresado en kilogramos/unidad.

$d_{jpt}$ : Demanda del suministro tipo “p” en la unidad de combate “j” en el instante “t”.

$WP_i$ : Disponibilidad de carga expresada en kilogramos de oferta potencial desde el centro de suministro (locaciones del área de retaguardia) “i” donde (5):

$$WP_i = \sum_{p=1}^q WUN_p (X_{ip}^{(R)} + X_{ip}^{(R)}) \quad \text{para cada } i = 1, \dots, m \quad (5)$$

$WD_j$ : Demanda agregada requerida en la unidad de combate “j” donde (6)  $j = 1, 2, \dots, n$ :

$$WD_{jt} = \sum_{p=1}^t WUN_p d_{jpt} \quad \text{para cada } j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$AP_i$ : Ubicación sobre el eje de las abscisas del centro de suministro “i”

$OP_i$ : Ubicación sobre el eje de las ordenadas del centro de suministro “i”

$AD_{jt}$ : Ubicación sobre las abscisas de la unidad de combate “j”

$OD_{jt}$ : Ubicación sobre las ordenadas de la unidad de combate “j”

$AL_{kt}$ : Límite inferior en las abscisas para ubicar el nodo intermedio “k” en el periodo “t”

$AU_{kt}$ : Límite superior en las abscisas para ubicar el nodo “k” en el periodo “t”

$OL_{kt}$ : Límite inferior en las ordenadas para ubicar el nodo “k” en el periodo “t”

$OU_{kt}$ : Límite superior en las ordenadas para ubicar el nodo “k” en el periodo “t”

$a_{jk}$ : Matriz de asignación que indica si el nodo “k” atiende a la unidad de combate “j”.

Con base en esta notación la formulación del modelo de localización tiene como objetivo priorizar la carga total movilizada buscando la localización óptima de los nodos intermedios por medio de minimización de la distancia ponderada mínima, como puede verse en la ecuación (7). Adicionalmente se incluye una matriz de asignación binaria que permite que una unidad de combate o nodo destino sea atendido por

solo uno o varios nodos logísticos intermedios, favoreciendo de esta manera el diseño de la red de suministro propuesto por Farahani y Asgari [21].

Por otra parte la función objetivo ofrece una utilidad en sistemas logísticos militares al favorecer la eficacia (atención de las necesidades de suministro) sobre la eficiencia, a diferencia de modelos de localización dinámicos recientemente presentados en ambientes empresariales por [24-25] y [26] en donde prevalecen las decisiones basadas en objetivos de minimización de costo.

Las restricciones (8-11) describen las distancias rectilíneas por la cual se modelan las líneas de conexión en la red de suministro. En (12) y (13) se representa el uso de zonas seguras por medio de la restricción tanto en las abscisas como en las ordenadas de la localización de los nodos logísticos intermedios. Finalmente en (14-15) se muestran las restricciones lógicas. A continuación se presenta la formulación del modelo.

### Formulación del modelo

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \text{Min } F = & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^m WP_{it} \left( dp_{ikt}^{(+)} + dp_{ikt}^{(-)} \right) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^m WP_{it} \left( dpy_{ikt}^{(+)} + \right. \\ & \left. dpy_{ikt}^{(-)} \right) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^n WD_{jt} (a_{jk}) \left( ddx_{jkt}^{(+)} + dx_{jkt}^{(-)} \right) + \\ & a_{jk} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^n WD_{jt} (a_{jk}) \left( ddy_{jkt}^{(+)} + ddy_{jkt}^{(-)} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$dp_{ikt}^{(+)} - dp_{ikt}^{(-)} = AP_{it} - X_{kt} \quad \forall i, k, t \quad (8) \quad ddy_{jkt}^{(+)} - ddy_{jkt}^{(-)} = OD_{it} - Y_{kt} \quad \forall j, k, t \quad (11)$$

$$dpy_{ikt}^{(+)} - dpy_{ikt}^{(-)} = OP_{it} - Y_{kt} \quad \forall i, k, t \quad (9) \quad AL_{kt} \leq X_{kt} \leq AU_{kt} \quad \forall k, t \quad (12)$$

$$ddx_{jkt}^{(+)} - ddx_{jkt}^{(-)} = AD_{jt} - X_{kt} \quad \forall j, k, t \quad (10) \quad OL_{kt} \leq Y_{kt} \leq OU_{kt} \quad \forall k, t \quad (13)$$

$$dp_{ikt}^{(+)}; dp_{ikt}^{(-)}; dpy_{ikt}^{(+)}; dpy_{ikt}^{(-)}; ddx_{jkt}^{(+)}; ddx_{jkt}^{(-)}; ddy_{jkt}^{(+)}; ddy_{jkt}^{(-)} \geq 0 \quad \forall i, k, t \quad (14)$$

$$X_{kt}, Y_{kt} \in \mathbb{R} \quad \forall k, t \quad (15)$$

ejemplificar el funcionamiento del modelo en términos prácticos.

De acuerdo con la formulación del modelo, se desarrolla un caso simulado con el fin de

## Resultados y discusión

### Caso simulado

Para mostrar el comportamiento del proceso de planeación en el teatro de operaciones se simula un conflicto con cinco centros de suministro pre-posicionados estratégicamente, 3 zonas seguras en que se pueden localizar los nodos intermedios y 16 unidades de combate cuya posición se conoce en tres instantes de tiempo.

Las coordenadas de los centros de suministro se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1** Coordenadas de los centros de suministro

<b>Centro de suministro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Abscisa</b>	-110	-20	50	120	170
<b>Ordenada</b>	120	130	120	130	110

Las coordenadas planeadas de las unidades de combate se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2** Posición planeada de las unidades de combate 1 a 8 en cada instante t

<b>Unidad de combate</b>	<b>Posición 1</b>		<b>Posición 2</b>		<b>Posición 3</b>	
	<b>abscisa</b>	<b>orden</b>	<b>abscisa</b>	<b>orden</b>	<b>abscisa</b>	<b>orden</b>
UC1	-170	-80	-180	-120	-180	-120
UC2	-150	-120	-130	-140	-140	-160
UC3	-130	-80	-130	-110	-110	-160
UC4	-90	-100	-110	-90	-100	-120
UC5	-80	-140	-70	-110	-110	-140
UC6	-40	-80	-50	-130	-90	-160
UC7	-30	-60	-10	-110	0	-160
UC8	30	-80	20	-120	30	-160

Complementariamente la ubicación de las zonas seguras donde se pueden localizar las

instalaciones logísticas intermedias se observan en la tabla 3.

**Tabla 3** Zonas habilitadas para la ubicación de instalaciones de avanzada

	<b>Abscisas Min.</b>	<b>Abscisas Max.</b>	<b>Ordenadas Min.</b>	<b>Abscisas Max.</b>
Zona 1	100	180	-10	40
Zona 2	-30	20	-10	60
Zona 3	-170	-80	-20	30



En el sistema ejemplificado los nodos de origen proveen a los nodos intermedios suministros como combustible, municiones, alimentos y dotaciones, quienes a su vez distribuyen a las unidades de combate actuando como unidades de apoyo de las mismas.

Las cantidades demandadas de cada unidad de combate en al inicio del proceso de planeación

y en cada instante del tiempo se presentan en la tabla 4.

La capacidad de oferta de cada centro de suministro para cada una de las provisiones se muestra en la tabla 5.

La capacidad de oferta de cada centro de suministro para cada una de las provisiones se muestra en la tabla 5.

**Tabla 4** Necesidades de suministro para las unidades de combate 1 a 8 en función del tiempo

UC\ t	<i>Provisiones Requeridas</i>															
	<i>Combustible</i>				<i>Municiones Cajas/</i>				<i>Raciones Raciones/</i>				<i>Dotaciones</i>			
	<i>Galones/semana</i>				<i>semana</i>				<i>semana</i>				<i>Dotaciones/semana</i>			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
UC1	2000	2000	2200	2400	2900	2900	3200	3400	3300	3300	3300	3300	1500	1500	1500	1500
UC2	2000	2000	2200	2400	2500	2500	2800	3100	3400	3400	3400	3400	1600	1600	1600	1600
UC3	2000	2000	2200	2400	2800	2800	3100	3300	3900	3900	3900	3900	1500	1500	1500	1500
UC4	2000	2000	2200	2400	2600	2600	2800	3100	3500	3500	3500	3500	1800	1800	1800	1800
UC5	2000	2000	2200	2400	2600	2600	2800	3000	3800	3800	3800	3800	1600	1600	1600	1600
UC6	2000	2000	2300	2500	2800	2800	3000	3000	3600	3600	3600	3600	1400	1400	1400	1400
UC7	2500	2500	2800	3000	2600	2600	2800	3000	3600	3600	3600	3600	1700	1700	1700	1700
UC8	2500	2500	2800	3100	2600	2600	2800	3000	3600	3600	3600	3600	1500	1500	1500	1500

**Tabla 5** Oferta potencial de los centros de suministro

<i>Oferta Potencial</i>	<i>Centros de suministro</i>					
<b>Suministro</b>	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5	Unidades
Combustible	6.768	7.581	5.415	12.183	10.830	galones/semana
Municiones	10.830	13.537	10.830	14.891	10.830	cajas
Alimento (raciones)	6.768	9.476	9.476	6.768	6.768	Raciones
Dotaciones	9.476	6.768	6.768	6.768	4.061	unidades

Así mismo los pesos unitarios por tipo de suministro se muestran en la tabla 6.

En el instante inicial se realiza la pre asignación de las unidades de combate, basada en cercanía del centro de la zona segura con la posición inicial de la misma, por estrategia hay algunas unidades de combate con múltiple asignación. La pre asignación se representa en el modelo por medio de una matriz binaria, tal como define en la tabla 7.

**Tabla 6** Peso unitario por tipo de suministro

<b>Tipo de suministro</b>	Combustible	Municiones	Alimento (raciones)	Dotaciones
<b>Kg/U</b>	2,2	1,5	1,8	1,5

El propósito del proceso de planeación aquí simulado es determinar la ubicación de los nodos

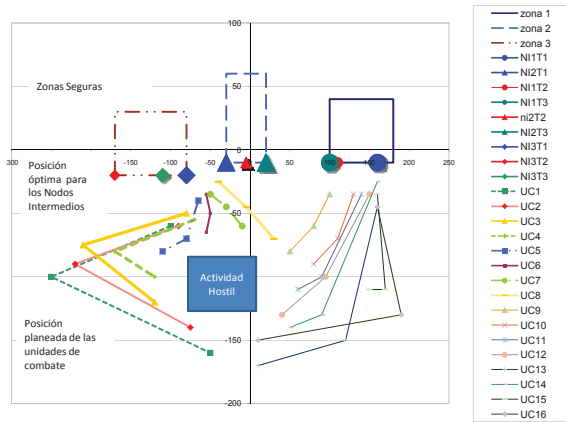
intermedios en cada uno de los 3 instantes de tiempo.

El caso simulado muestra una estrategia de pinzas para cercar la actividad hostil del enemigo. Las unidades de combate se desplazan desde el frente de combate en direcciones simétricas hasta rodear al enemigo

La solución óptima generada por el modelo propone una localización variable en cada instante de tiempo para los nodos intermedios, de forma tal que las distancias ponderadas, por el volumen de carga a movilizar, se minimicen. Esto disminuye tanto los tiempos como los costos de aprovisionamiento, mejorando el desempeño operativo del sistema en acciones de combate. Así mismo prioriza la eficacia del sistema, propendiendo por una atención oportuna a las necesidades del combatiente. Los resultados de la aplicación del modelo, se observan en la figura 2.

**Tabla 7** Matriz de asignación de unidades de combate a los nodos intermedios

<b>Unidades de combate</b>	<b>Nodos intermedios</b>			<b>Unidades de combate</b>	<b>Nodos intermedios</b>		
	<b>NI1</b>	<b>NI2</b>	<b>NI3</b>		<b>NI1</b>	<b>NI2</b>	<b>NI3</b>
UC1	0	0	1	UC9	0	1	0
UC2	0	0	1	UC10	1	1	0
UC3	0	0	1	UC11	1	0	0
UC4	0	0	1	UC12	1	0	0
UC5	0	0	1	UC13	1	0	0
UC6	0	1	1	UC14	1	0	0
UC7	0	1	0	UC15	1	0	0
UC8	0	1	0	UC16	1	0	0



**Figura 2** Estructura de la red logística en función del tiempo para el caso simulado

## Conclusiones

La novedad del modelo planteado radica en el diseño del mismo el cual se basa en un contexto de logística focalizada, en donde se busca atender escenarios de alta volatilidad e incertidumbre flexibilizando la logística de tal manera que se obtengan respuestas dinámicas ante cualquier cambio en el sistema. Para ellos son preponderantes los conceptos de fusión de información y de logística de detección y respuesta, el primer concepto busca tener información disponible en tiempo real a todos los niveles, y el segundo busca tener la habilidad de detectar necesidades, cambios y reaccionar oportunamente a los mismos.

Bajo esos parámetros el modelo propuesto es un modelo de optimización basado en programación entera mixta, que busca una decisión dinámica de localización de múltiples plataformas logísticas intermedias y por lo tanto se encuentra temporalizado. Adicionalmente es novedosa la inclusión de restricciones de localización de dichas plataformas, lo cual es pertinente para el problema, dado que en ambientes de combate, no todas las coordenadas de localización presentan las mismas condiciones de seguridad, es mas dichas condiciones de seguridad se encuentran en permanente cambio. Adicionalmente las coordenadas también pueden restringirse por

condiciones diplomáticas de las naciones en operaciones internacionales.

No obstante la novedad no solo radica en el marco contextual y en la vinculación de restricciones de localización sino también en la función objetivo, la cual no reside en una función que busque minimizar el costo total del sistema sino en una función que busca minimizar el peso ponderado de las cargas transportadas

Por otra parte, es importante destacar que la modelación presentada puede ser aplicada a contextos y a decisiones distintas que las presentadas en ambientes de defensa como por ejemplo a la atención de desastres, misiones humanitarias o en macroproyectos, en donde las condiciones de cambio e incertidumbre sean un factor clave en el contexto de aplicación.

Finalmente la utilidad del modelo puede ser complementada con el uso de modelos de simulación en tiempo continuo, de tal manera que el modelo de optimización se utilice como parámetro del modelo de simulación. Aplicaciones de esta metodología integral y dinámica en otros contextos como en el de los sistemas de producción pueden verse por ejemplo en las referencias [27] y [28].

## Referencias

1. M. Mazarr. "The revolution in military affairs: A framework for defense planning". [strategicstudiesinstitute.army.mil/pdffiles/PUB242.pdf](http://strategicstudiesinstitute.army.mil/pdffiles/PUB242.pdf). Consultada el 3 de mayo de 2009.
2. S. Metz, J. Kievit. "Strategy and the evolution in military affairs: from theory to practice". [strategicstudiesinstitute.army.mil/pdffiles/PUB236.pdf](http://strategicstudiesinstitute.army.mil/pdffiles/PUB236.pdf). Consultada el 3 de mayo de 2009.
3. DoD. Joint Vision 2020. <http://www.dtic.mil/jointvision/jvpub2.htm>. Consultada el 10 de septiembre de 2007.
4. Department of Defense. Focused Logistics campaign plan. <https://acc.dau.mil/CommunityBrowser.aspx?id=32577>. Consultada el 15 de septiembre de 2007.
5. M. R. Endsley. "Toward a theory of situational awareness in dynamic systems". *Human Factors*. Vol. 37. 1995. pp. 32-64.

6. S. H. Haeckel. *Adaptive Enterprise-Creating and Leading Sense-and-Respond Organizations*. Ed. Harvard Business School Press. Boston (MA). 1999. pp. 51-74.
7. D. Kalenatic, C. López, L. González, F. Rueda. "Tercera faceta de la logística". *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*. Vol. 71. 2008. pp. 19-25.
8. M. Kress. *Operational Logistics*. Ed. Kluwer Academic Publishers Group. Boston (MA). 2002. pp. 37-165.
9. D. P. Johnstone. *Modeling the pre-positioning of air force precision guided munitions*. Department of the Air Force. Air University. Ed. Air Force Institute of Technology. USA. 2002. pp.6-35.
10. R. A. Wolf. *Multiobjective Collaborative Optimization of Systems of Systems*. B. S. Systems Engineering. United States Naval Academy- MIT. Boston (MA). 2005. pp. 45-61.
11. C. Ragsdale. *Spreadsheet Modeling and Decision Analysis. A Practical Introduction to Management Science*. 5ª. ed. Ed. South-Western Thompson Publishers. Mason (OH). 2007. pp.177-232.
12. A. J. Cullen. *A multi-objective linear program model to test hub-and-spoke networks as a potential air force deployment alternative*. Department of the Air Force. Air University. Air Force Institute of Technology USA. 2008. pp. 25-26.
13. A. J. Cullen. *A multi-objective linear program model to test hub-and-spoke networks as a potencial air force deployment alternative*. Department of the Air Force. Air University. Air Force Institute of Technology. USA. 2008. pp. 44-60.
14. C. A. Panches. *A large scale integer linear program as a decision support tool for force mix selection*. Department of the Air Force. Air Education and Training Command USA. 2006. pp.15-54.
15. A. J. Geyer. *Operations-focused optimized theater weather sensing strategies using preemptive binary integer programming*. Department of the Air Force. Air University. Air Force Institute of Technology. USA. 2006. pp. 100-125.
16. M. Mattock, J. F. Schank, J. P. Stucker, J. Rothenberg. *New Capabilities for Strategic Mobility Analysis using Mathematical Programming*. Ed. Rand Corporation. Santa Mónica (CA). 1995. pp. 5-18.
17. D. Kassing, K. Girardini, B. Leverich, R. E. Stanton, R. Eden. *New Tools for Balancing Theater Combat and Support*. Ed. Rand. Santa Mónica (CA). 1996. pp.7-33.
18. M. Kress. "Efficient strategies for transporting mobile forces". *Journal of the Operational Research Society*. Vol. 52. 2001. pp. 310-317.
19. F. Barahona, P. Chowdhary, M. Ettl, P. Huang. "Inventory allocation and transportation scheduling for logistics of network-centric military operations". *IBM Journal of Research and Development*. Vol. 51. 2007. pp. 391-407.
20. N. E. Ozdemirel, L. Kandiller. "Semi-dynamic modelling of heterogeneous land combat". *Journal of the Operational Research Society*. Vol. 57. 2006. pp. 38-51.
21. R. Z. Farahani, N. Asgari. "Combination of MCDM and covering techniques in a hierarchical model for facility location: A case study". *European Journal of Operational Research*. Vol. 176. 2007. pp. 1839-1858.
22. D. Kalenatic, C. Lopez, L. Gonzalez, F. Rueda. "Modelo para la localización de una plataforma de cross docking en el contexto de logística focalizada". *Revista Ingeniería*. Vol. 13. 2008. pp.17-34.
23. D. Kalenatic, C. López, L. González, F. Rueda. *Modelos Matemáticos aplicados a Logística Focalizada*. Ed. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. (Colombia). 2010. pp. 35-51.
24. J. Dias, M. E. Captivo, J. Clímaco. "A dynamic location problem with maximum decreasing capacities". *Central European Journal of Operations Research*. Vol. 16. 2008. pp.251-280.
25. J. Dias, M. E. Captivo, J. Clímaco. "A memetic algorithm for multi-objective dynamic location problems". *Journal of Global Optimization*. Vol. 42. 2007. pp.221-253.
26. O. Berman, Z. Drezner, A. Tamir, G. O. Wesolowsky. "Optimal Location with equitable Loads". *Annals of Operations Research*. Vol. 167. 2009. pp. 307-325.
27. D. Kalenatic, C. López, L. González, F. Rueda. *Una visión Integral y Dinámica de la organización manufacturera*. Ed. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. 2008. pp. 40-51.
28. J. Orjuela, D. Kalenatic, I. Huertas. *Modelo integral para la gestión de empresas de servicios*. Ed. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. 2010. pp.119-117.