

Modelo para la priorización dinámica de despachos de vehículos utilizando el proceso analítico jerárquico

Dynamic prioritization model of dispatching vehicles using analytic hierarchy process

*Juan José Bravo Bastidas**, *Juan Carlos Osorio Gómez*, *Juan Pablo Orejuela Cabrera*

Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística- Universidad del Valle. Edificio 357, Calle 13 N.º 100-00. Cali, Colombia.

(Recibido el 30 de Mayo de 2008. Aceptado el 12 de marzo de 2009)

Resumen

En este artículo se muestra una metodología de priorización de despachos que combina la información proporcionada por varios de estos factores agrupados en una serie de indicadores de naturaleza logística, para el caso de los despachos desde una bodega a N puntos de venta. Por medio de la utilización del AHP como herramienta multicriterio, se determina la importancia de un cliente respecto a otro para el caso de un producto con un sistema de reabastecimiento periódico de inventarios, y se propone una metodología operativa para la priorización de despachos en un entorno dinámico de envíos.

----- *Palabras clave:* AHP, priorización multicriterio, gestión de distribución, servicio al cliente, transporte

Abstract

A methodology for shipment priority is shown which combines the information provided for several of these factors contained in a series of indicators of logistical nature, in the case of shipments from one warehouse to N retailers. By means of the use of AHP, the importance of a client is determined regarding another for the situation of one product with a periodic review replenishment policy. Besides, an operational methodology is shown for priority of goods dispatch in a dynamic environment.

----- *Keywords:* AHP, multi-criterion prioritization, distribution management, customer service, transportation

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 2 + 321 21 67, fax: + 57 + 2 + 339 84 62, correo electrónico: bravojj@univalle.edu.co (J. Bravo).

Introducción

A nivel de la mediana y grande empresa, y más especialmente en la empresas productoras y comercializadoras de productos de consumo masivo, se observa una problemática logística de gran relevancia práctica. Esta se evidencia cuando un centro de distribución ó proveedor que debe distribuir productos a un número N de bodegas o puntos de venta, localizados estos geográficamente cerca de los sitios de generación de demanda. Es usual que cada bodega realice sus pedidos periódicamente al proveedor o centro de distribución, y éste último, ante escasez de recursos de distribución se vea en la necesidad de priorizar las bodegas para realizar los envíos. Esta temática fue abordada por Bravo y otros [1] enfocando su estudio al problema de la distribución de un único producto, y la visualización de la priorización de la bodega centrada en las características logísticas del producto en la bodega. Con base en esto se plantea en dicho estudio un grupo de indicadores o criterios de priorización de bodegas, todos complementarios, que hacen necesario el establecimiento de metodologías de análisis multicriterio para valorar finalmente la priorización global de una bodega. Estos criterios de priorización van estrechamente asociados a estrategias de mejora del servicio al cliente. La figura 1 ilustra la situación bajo estudio, la cual consiste en un sistema de distribución, donde existe un distribuidor que atiende un grupo de clientes localizados en zonas de mercado o zonas geográficas distintas. La palabra “cliente” se puede entender como “cliente interno” siendo en este caso una bodega de almacenamiento intermedio, ó como “cliente externo” siendo considerado el cliente en este último caso como una bodega perteneciente a otra corporación distinta a la del distribuidor.

El transporte a nivel mundial se cataloga regularmente como uno de los factores determinantes de la competitividad empresarial y de los países en su conjunto. Es razonable que a medida que van surgiendo nuevos productos, nuevas marcas, el nivel de exigencia de los clientes va incrementando, aumentándose igualmente la necesidad de contar con un servicio al cliente más efectivo. A

pesar de que el costo de transporte suele ser representativo respecto a los costos logísticos totales en muchas organizaciones [2], en diversas ocasiones se decide mantener costos altos de transporte apoyando las labores que propendan por un buen servicio. Es por esto que a nivel gerencial es de gran importancia la puesta en marcha de planes de mejoramiento de los sistemas de transporte y distribución y el seguimiento constante al servicio al cliente desde el punto de vista de indicadores logísticos y financieros. En la siguiente sección se mencionan algunos antecedentes en la planificación de despachos, se presentan los indicadores logísticos propuestos [1], así como una revisión teórica del tema. Posteriormente, se presentará la metodología general multicriterio, su aplicación a un caso práctico y la discusión de los resultados obtenidos.

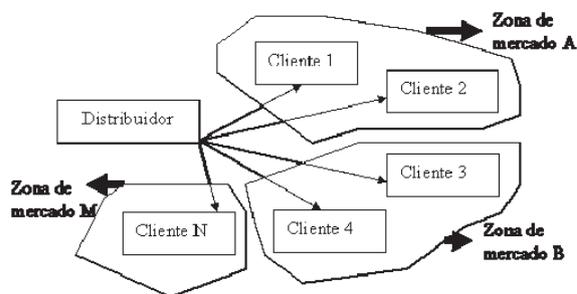


Figura 1 Red de distribución bajo análisis

Antecedentes

Ha existido en la literatura gran cantidad de investigaciones que abordan la necesidad de atender a los clientes ágilmente, con un transporte eficiente y oportuno, minimizando los agotados en las estanterías del cliente y promoviendo por tanto un buen servicio al consumidor final. Se habla entonces de la distribución física de mercancías como un elemento clave del servicio al cliente.

Se afirma que en lo que respecta al servicio al cliente, existen factores clave que atañen directamente a la función de distribución física de la empresa. Se trata por ejemplo de aspectos como la frecuencia de despachos, la información sobre disponibilidad de inventarios y las fechas de despachos programadas, entre otros aspectos señala-

dos [3]. Se tienen algunas conclusiones sobre la inherente complejidad del proceso de atención a clientes y se afirma que la variabilidad de la demanda de los clientes, la flexibilidad limitada en las plantas de manufactura, los largos tiempos de respuesta a las órdenes de clientes y la poca coordinación general entre los eslabones de la cadena de suministros, hace casi inevitable la existencia de altos inventarios tanto en los centros de distribución como en las instalaciones del cliente. Se anota además que los centros de distribución desean llegar a realizar despachos “justo a tiempo” pero que esto viene a imposibilitarse por falta de coordinación en los sistemas de información y planificación [4]. Por otra parte se concluye que los factores que afectan el servicio al cliente son principalmente seis: habilidad para cumplir una fecha de despacho prometida, aviso oportuno de la dilatación de los envíos, exactitud en la orden despachada, ágil respuesta a las quejas de clientes, fácil intercambio de información entre cliente y proveedor, y la duración de los tiempos de respuesta a pedidos (lead times) [5]. Estos trabajos coinciden en afirmar que los componentes de un buen servicio al cliente tienen una estrecha asociación con aspectos relativos a la planificación de despachos o distribución física de productos. También se reconoce la complejidad actual de construir una buena estrategia de servicio, basada en un transporte eficiente, y la necesidad de ahorrar recursos en distribución alertando sobre la inconveniencia de centrarse sólo en el cliente y descuidar el impacto financiero de la estrategia de distribución finalmente escogida [6]. Aquí se puede justificar la razón por la cual en muchas empresas existen recursos de distribución limitados, “cuidando” celosamente sus finanzas, con unos cuantos camiones, sin contar quizás con la flota apropiada de vehículos que permitirían clientes “totalmente satisfechos”. La mayoría de la literatura que aborda la problemática del despacho de camiones, se centra en los problemas de ruteo de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés) y no considera de ninguna manera la priorización de despachos que aborda la imposibilidad práctica de tener una flota de camiones ilimitada. Bell et al [7] muestran la implementación real de un

software de ruteo y programación de envío de camiones en una empresa de distribución de gas industrial, empleando un algoritmo de optimización entera mixta. En dicho estudio se habla de la dificultad de tener cientos de clientes y solo unas decenas de camiones disponibles, y afirman que la localización geográfica de los clientes es el supuesto más lógico que tuvieron en cuenta para decidir a qué clientes visitar. En Bonfill et al [8] se dice que generalmente los modelos de distribución asumen un envío instantáneo de productos hacia los clientes ó bien consideran un número ilimitado de vehículos disponibles para envío de productos, advirtiéndose que en la mayoría de las situaciones reales ó prácticas existe en lugar de esto una cantidad limitada de vehículos. En este trabajo se estudia, a través de un modelo matemático de optimización, la planificación de envíos considerando la problemática del ruteo de vehículos con consideraciones de tiempo, asociando el transporte a restricciones de planificación de producción considerando el caso general de una planta de manufactura que abastece a una serie de clientes. Con respecto a la planeación de los envíos, considera únicamente criterios de tiempos de flujo de los vehículos, costos de inventarios, costos de transporte y número de rutas posibles de abarcar por cada vehículo. No establece de ninguna manera la priorización de despachos ante un número de pedidos mayor que el número de camiones disponibles. Hay muchos antecedentes de metodologías y software para programación de la distribución física de mercancías, entre ellas la herramienta presentada por Goetschalkx [9] que propone un sistema híbrido de planificación, teniendo en cuenta la existencia de “reglas” o restricciones, tales como la consideración de aspectos geográficos, capacidad de camiones, y otros. Shen y Honda [10], tampoco consideran el impacto de los inventarios ni hablan de la pertinencia de la priorización de despachos a detallistas ante limitaciones de recursos de transporte. Brandão & Mercer [11] presentan la solución de un modelo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo considerando aspectos tales como que un vehículo puede hacer más de un viaje al día, los clientes imponen ventanas de tiempo para los en-

víos, los vehículos tienen diferentes capacidades en cuanto a volumen y peso, algunos vehículos pueden atender a algunos clientes únicamente. No consideran la priorización de los despachos de vehículos dado que se considera cantidad ilimitada de camiones. Ballou habló del empleo de la simulación para abordar problemas de planificación de despachos y la implementación de reglas de despachos [12]. También mostró técnicas de optimización pero no se puntualiza en criterios de priorización de despachos en escenarios con recursos limitados para la planificación del transporte [13]. A la luz de esta revisión, se encontró que no habían sido definidos de manera clara, indicadores que permitan planificar los despachos de la organización, apuntando a aquellas variables claves para el servicio al cliente y la gestión efectiva de los recursos de los que dispone una empresa. En este sentido, Bravo et al proponen una serie de indicadores que contribuyen a la priorización de los despachos, enfocados en un buen servicio al cliente y partiendo de información logística tradicional en cadenas regionales de abastecimiento tales como: demanda de clientes, variabilidad estimada de la demanda, inventario de los clientes (inventario de seguridad, inventario máximo permisible e inventario efectivo en el momento de realizar un pedido), tiempo de tránsito desde el distribuidor hasta el cliente y prioridad de zonas de mercado [1]. Los indicadores de prioridad de bodegas o criterios propuestos por Bravo et al son los siguientes: Criterio de cobertura en unidades (c.u.), Criterio de tamaño del faltante (t.f.), Criterio de cobertura en días (c.d.), Criterio priorización de zona de mercado, Criterio de demanda, Criterio de variabilidad de la demanda, Criterio de tamaño del pedido (t.p.) ; La figura 2 esquematiza los siete criterios estudiados, los cuales se explican seguidamente a través de un ejemplo práctico.

Para favorecer la explicación de los criterios, considérese el siguiente caso, adaptado de Bra-

vo et. al. [1]. Se presenta el caso de dos clientes que deben ser atendidos por el centro de distribución, y que se abastecen semanalmente de cierto producto según una política de reabastecimiento de inventarios R,S, es decir, cada R unidades de tiempo (1 semana), se les envía un pedido igual a la diferencia entre el Inventario Máximo Permissible (S) y el inventario efectivo en el momento de la realización del pedido. Suponga que los datos con que se cuenta de cada cliente para dicho producto específico, previo a la realización de un despacho, son los presentados en la tabla 1 para determinada semana. Con estos datos, se pueden calcular los indicadores presentados en la tabla 2, los cuales tienen como características las siguientes:

- Valores positivos del indicador indican “prioritario”
- Entre dos bodegas consideradas como prioritarias por un indicador, se considera más prioritaria aquella con el valor más positivo.
- Valores negativos del indicador indican “no prioritario”. Se excluye aquí el criterio t.p. (tamaño del pedido) y el de demanda, así como también el de variabilidad de la demanda y priorización de zonas de mercado, que siempre son mayores o iguales a cero.

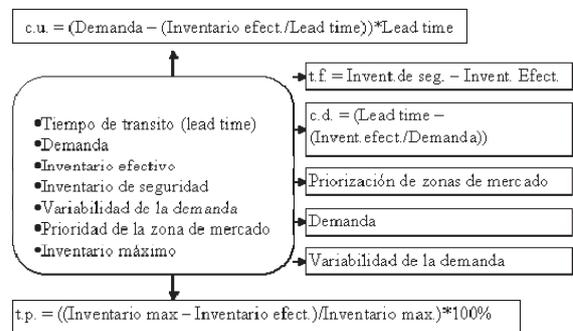


Figura 2 Indicadores para la priorización de despachos [1]

Tabla 1 Información de un producto asociado a dos clientes (bodegas) de cierto distribuidor

<i>Cliente</i>	<i>Lead time en días (LT)</i>	<i>Demanda semanal</i>	<i>Demanda diaria (D)</i>	<i>Inventario (INV)</i>	<i>Inventario de seguridad (IS)</i>	<i>Inventario máximo (S)</i>
C1	1	2.500	357	460	352	3.209
C2	2	1.400	200	172	186	1.986

Tabla 2 Criterios de priorización de despachos para el caso de un producto a distribuir

<i>Criterios de priorización</i>					
<i>Cliente</i>	<i>c.u</i>	<i>c.d</i>	<i>t.f</i>	<i>t.p.</i>	<i>Demanda</i>
C1	-103	-0,29	-108	86%	357
C2	228	1,14	14	91%	200

Según lo anterior, los criterios mostrados en la tabla 2, excepto el de demanda, coinciden en señalar al cliente C2 como el más prioritario. Cada criterio implica en este caso lo siguiente:

Criterio de cobertura en unidades (c.u.): para C1 el inventario actual le permite cubrir la demanda diaria en el lead time, teniendo incluso un colchón de 103 unidades de producto en caso de que el transporte se demore más del lead time. El cliente C2, por su parte, tiene otra situación para el mismo producto. Con una demanda de 200 unidades diarias, el inventario actual sólo le alcanza para cubrir 86 unidades/día durante los dos días de tránsito de la mercancía, teniendo un faltante promedio de 114 unidades/día, y un acumulado de 228 unidades por los dos días que comprende el tiempo de reaprovisionamiento.

Criterio de cobertura en días (c.d.): según este criterio, la situación del producto para el cliente C1 es que el inventario actual alcanza para cubrir 1,29 días de demanda (INV/D) y dado que el tiempo promedio de tránsito es 1 día, se tiene por tanto una holgura en inventario equivalente a 0,29 días en caso de que haya demora en el transporte. Este criterio dice por tanto que la situación del producto para C1 no es tan crítica. Por su parte, el cliente C2 tiene una situación diferente. El inventario actual le alcanza para cubrir 0,86 días

de demanda, dato muy pequeño comparado con los dos días que se demorará el camión en llegar. Es por esto que este cliente, según este criterio, tiene un faltante promedio en días equivalente a 1,14 días de demanda.

Criterio de tamaño del faltante (t.f.): El criterio para el caso del cliente C1 afirma que dado que el inventario actual almacenado es mayor que el inventario de seguridad, se cuenta con una holgura de 108 unidades, por encima de lo sugerido por el inventario de seguridad. Esto permite decir que la situación del producto para C1 no es tan crítica. El caso de C2 es diferente. El inventario de seguridad sugiere tener como inventario un mínimo de 186 unidades del producto para cubrir la variabilidad de la demanda. Sin embargo, el inventario real actual es de 172 unidades, lo cual alerta sobre la existencia de un faltante de 14 unidades por debajo de lo sugerido, permitiendo priorizar este cliente respecto a C1 para el producto estudiado.

Criterio de tamaño del pedido % (t.p.): Un valor t.p. del 100% significaría que el nivel de inventario actual es nulo y que por tanto se debe hacer un pedido por todo el valor correspondiente al inventario máximo "S" (o pedido máximo). Así mismo un t.p. del 0% indicaría que hay suficiente inventario para cubrir los requerimientos semanales y que por tanto no es necesario enviar ningún

pedido de ese producto a tal bodega. Este criterio no considera quién es la bodega que más pide, sino que cuantifica la relación de ese pedido con los requerimientos reales de la bodega. En este caso, es más prioritario también el cliente C2.

Criterio de demanda: A diferencia de los demás criterios, para este ejemplo se tiene que el cliente C1 tiene la mayor demanda diaria del producto y por tanto es la más prioritaria para este criterio. Este es por tanto el único criterio que se contrapone a la decisión de los demás criterios, siendo esta situación de gran interés como se ejemplifica

a continuación. Suponga que el inventario en la bodega del cliente C1 sea de 200 en vez de 460 como se mostró en la tabla 1. Con este cambio, se recalculan los indicadores arrojando la información presentada en la tabla 3, donde se observa que los criterios c.u. y c.d. siguen afirmando que el cliente C2 es más prioritario, a diferencia de la opinión aportada por el resto de los criterios que catalogan a C1 como el más prioritario. Así como ésta, existen diversas situaciones en donde se ven enfrentadas las decisiones establecidas por los distintos criterios, haciendo de la decisión final de priorización un problema multicriterio.

Tabla 3 Criterios de priorización recalculados ante un inventario disminuido

<i>Criterios de priorización</i>					
<i>Cliente</i>	<i>c.u</i>	<i>c.d</i>	<i>t.f</i>	<i>t.p.</i>	<i>Demanda</i>
C1	157	0,4	152	94%	357
C2	228	1,1	14	91%	200

Respecto al criterio de variabilidad de demanda se puede decir que entre dos clientes (bodegas) que tengan la misma demanda promedio, se escogería primero aquel cuya demanda cuente con la mayor desviación estándar. La variabilidad puede medirse o bien con la Desviación Estándar ó con el Coeficiente de Variación de la demanda. Pero la demanda y la variabilidad deben asociarse con la “importancia” de los clientes que la bodega atiende. Esta importancia se ve reflejada en la definición de zonas de mercado. Asumiendo que cada zona cuenta con cierta prioridad para la compañía [14], se tiene que para dos bodegas que pertenezcan a zonas distintas, se escogerá aquella que corresponda a la zona más prioritaria. Queda claro que la gestión de despachos es una tarea que exige un sistema de información estructurado y la utilización de un solo criterio viene a ser insuficiente ante la habitual complejidad de estos procesos y dicha práctica es una de las mayores falencias que se tienen en la planificación de despachos hoy en día. Por ejemplo, es común que se despache primero a la bodega que hizo el mayor pedido, o aquella que tenga el cliente externo más importan-

te, o aquella que esté más cerca o más lejos del centro de distribución (valoración de lead times). Pero como se ha demostrado, cada criterio trata la priorización desde perspectivas diferentes, y existe una necesidad de asociar todas esas percepciones y sacar una única y robusta conclusión con miras a una priorización y planeación más eficiente. La esencia de la planificación del transporte es multicriterio y por ello debe tratarse con técnicas cuantitativas multi-criterio. En esa dirección, se presenta a continuación la metodología propuesta, sustentada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés).

Metodología

El AHP es una poderosa herramienta para el análisis de problemas decisorios complejos, y es considerada hoy por hoy como la técnica más utilizada y confiable en el área de la toma de decisiones multicriterio [15]. El AHP organiza el problema de decisión con una estructura jerárquica incluyendo algunos niveles. El primer nivel define el objetivo principal del problema de

decisión y el último nivel usualmente describe las alternativas de decisión o escenarios. Los niveles intermedios pueden contener objetivos secundarios, criterios ó subcriterios relacionados con el problema decisorio. El tomador de la decisión expresa su preferencia comparando la importancia de los elementos de un nivel dado con respecto a los elementos del nivel precedente (comparación por pares). Así mismo, la importancia de cada criterio es comparado con los otros criterios en una matriz de comparación por pares. Todos los juicios de los tomadores de decisiones, son sintetizados en prioridades locales, y estas prioridades pueden expresar la importancia relativa de los criterios entre sí (peso de los criterios) ó los índices de preferencia de las alternativas bajo un determinado criterio (peso de la alternativa *i* considerando el criterio *j*). Los juicios sobre los elementos de la jerarquía son entonces organizados en matrices de comparación por pares y estiman la preferencia entre dos elementos. Pueden encontrarse explicaciones adicionales acerca del AHP en [15-18].

Respecto a la aplicación del AHP en problemas de priorización de despachos se puede afirmar que según las más recientes revisiones bibliográficas [17-20] no aparece ninguna aplicación similar a la propuesta en este artículo. Si bien es importante comentar que en el campo de la logística aparecen una gran cantidad de trabajos que cubren aspectos relacionados con priorización de proveedores, selección o priorización de sitios para localización de instalaciones, y en una importante cantidad de artículos adicionales, aparece la selección o priorización de rutas de transporte, es claro que en ninguno de ellos se considera la problemática logística de priorizar despachos ante limitaciones de recursos de distribución, y la orientación tradicional de las investigaciones está más enfocada en la disminución de los costos de transporte y no se observa un enfoque concreto en el servicio logístico al cliente [19]. La estructura jerárquica del problema de decisión multicriterio analizado es la que se muestra a continuación:

Nivel 1. Objetivo: Se pretende definir hacia dónde realizar los despachos periódicos de camiones

en términos de hacerlo primero al cliente (bodega) más prioritario buscando un nivel de servicio al cliente lo mas óptimo y equitativo posible por parte del distribuidor, partiendo de la información que arrojen los criterios de priorización ya mencionados.

Nivel 2. Criterios: Son los siete indicadores previamente definidos, donde cada uno de ellos representa una prioridad en términos logísticos, complementándose entre ellos.

Nivel 3. Alternativas: Corresponde a los clientes (bodegas), que requieren ser abastecidos de productos y de las cuales se conoce la información logística necesaria para realizar el cálculo de los distintos indicadores o criterios. En este caso se asume que los pedidos corresponden a un único producto.

Resultados

Cálculo de la priorización de los despachos

Se consideró necesario partir del mismo caso de estudio planteado en [1] con fines de experimentación. Para facilidad del lector, los datos del caso se reproducen en la tabla 4, donde se muestra la información de un producto que está siendo solicitado a determinado distribuidor por 15 bodegas distintas, y para la realización de los envíos existe el interés de establecer la priorización de despachos para cierta semana en consideración. Las bodegas están agrupadas en cuatro zonas geográficas: A, B, C y D. Para cada bodega se muestra el tiempo promedio de respuesta del distribuidor a la solicitud de pedido ó lead time (incluyendo el tiempo de transporte), la demanda semanal y la desviación estándar de la demanda del producto, así como el nivel de inventarios al momento de la solicitud del pedido por parte de la bodega, y la información de inventarios máximos y de seguridad para el producto. Las bodegas se abastecen según un sistema de reabastecimiento de inventarios R,S. Los inventarios máximos y de seguridad se calcularon considerando para cada bodega un porcentaje de faltante permitido, así como también una distribución de probabilidad normal de la demanda. Por ejemplo para la Bode-

ga 1, se utilizó un porcentaje de faltante del 3%, indicando un nivel de servicio del 97%. Las fórmulas utilizadas para el cálculos de estos niveles

de inventarios pueden consultarse en [21] en lo que corresponde a sistemas de inventarios R,S con demanda probabilística.

Tabla 4 Información base del caso de estudio

<i>Bodega</i>	<i>Lead time de despacho</i>	<i>Demanda promedio semanal</i>	<i>Desviación estándar demanda</i>	<i>Zona geográfica</i>	<i>Inventario</i>	<i>Inventario máximo</i>	<i>Inventario de seguridad</i>
1	1	2.500	200	A	460	3.209	352
2	2	1.400	100	A	172	1.986	186
3	3	2.000	150	A	324	3.194	337
4	1	1.800	180	B	380	2.419	362
5	2	1.800	180	B	154	2.698	384
6	1	2.400	240	A	331	3.165	422
7	1	1.700	170	C	99	2.242	299
8	1	1.600	160	C	296	2.110	281
9	2	1.460	146	C	156	2.149	272
10	2	2.200	220	B	495	3.239	410
11	3	1.650	165	B	412	2.702	345
12	1	2.700	270	B	263	3.591	505
13	3	1.670	167	D	344	2.735	349
14	1	3.100	310	D	746	4.123	580
15	1	1.300	130	D	300	1.729	243

Se resumen en la tabla 5 los criterios de priorización para cada una de las bodegas asociados al pedido de cierto producto específico. Para el criterio cualitativo de zonas geográficas se establecieron a priori porcentajes subjetivos de importancia de las zonas. Así, a la zona A se le asignó un 17% de importancia, a la B el 44%, a la zona C el 26% y a la D el 8% de importancia. Estos porcentajes pueden resultar de un análisis multicriterio adicional, tal como se sugiere en [14]. Se realizó un proceso de normalización de los valores de los criterios, considerando todas las bodegas. Sabiendo que, en general, los valores negativos de un criterio indican “no prioridad”, y a pesar de que entre dos valores negativos podría decirse que la bodega “mas prioritaria” de las dos es la que tiene asignado el valor “menos negativo”, se optó por cambiar para los criterios c.u., c.d. y t.f. previo a la normalización y para facilidad

de la experimentación computacional los valores negativos por cero. Y el “cero” en reemplazo de los valores negativos tiene una justificación práctica. Dado que se trata de una problemática de tipo operativa, inmersa en el día a día de un proceso logístico de distribución, lo que se busca es saber, para un día específico, si se despacha a cierta bodega o no. Esto traduce la “no prioridad” directamente en “no despachos”, y se establece un enfoque centrado en las bodegas prioritarias, y entre ellas, quiénes son mas prioritarias que cuales. Dado que los niveles positivos de los criterios indican “prioridad”, se establece que el valor de “cero” es un indicativo práctico de “no prioridad” y por tanto de “no despacho”, que facilita además la interpretación de los resultados finales. Se propone para trabajos posteriores el incluir el análisis detallado de los valores negativos de los indicadores.

Tabla 5 Resumen de los criterios de priorización por bodega

<i>Bodega</i>	<i>Demanda promedio semanal</i>	<i>Desviación estándar demanda</i>	<i>Zona geográfica</i>	<i>c.u</i>	<i>c.d</i>	<i>t.f</i>	<i>t.p.</i>
1	2.500	200	A (17%)	-103	-0,3	-108	86%
2	1.400	100	A (17%)	228	1,1	14	91%
3	2.000	150	A (17%)	533	1,9	13	90%
4	1.800	180	B (44%)	-123	-0,5	-18	84%
5	1.800	180	B (44%)	360	1,4	230	94%
6	2.400	240	A (17%)	12	0,0	91	90%
7	1.700	170	C (26%)	144	0,6	200	96%
8	1.600	160	C (26%)	-67	-0,3	-15	86%
9	1.460	146	C (26%)	261	1,3	116	93%
10	2.200	220	B (44%)	134	0,4	-85	85%
11	1.650	165	B (44%)	295	1,3	-67	85%
12	2.700	270	B (44%)	123	0,3	242	93%
13	1.670	167	D (8%)	372	1,6	5	87%
14	3.100	310	D (8%)	-303	-0,7	-166	82%
15	1.300	130	D (8%)	-114	-0,6	-57	83%

Con las consideraciones previas, se calculó el vector de priorización normalizado para cada uno de los criterios, todo lo cual se muestra en la tabla 6, considerando la desviación estándar como medida de variabilidad. Note que la sumatoria de los componentes del vector de prioridad para cada criterio es igual a 1.

Posteriormente, se construyó una matriz de comparaciones pareadas subjetivas entre los mismos criterios, arrojando el eigenvector normalizado de acuerdo a la metodología AHP, vector que indica la prioridad de unos criterios sobre otros (Tabla 7).

Al multiplicar la matriz correspondiente a los datos de la tabla 6 con el vector de la tabla 7 se obtiene el vector de prioridad de las bodegas (tabla 8),

información que se utilizará para la elaboración de los despachos. Se encuentra aquí por ejemplo, que la bodega 3 es la más prioritaria seguida por la bodega 5; por lo tanto, el primer camión debe ser despachado a la bodega 3.

Priorización dinámica de los despachos

Dado que el caso de estudio se concentra en el reabastecimiento semanal de las bodegas y que el pedido planeado a enviar cada semana es igual a la diferencia entre el Inventario Máximo Permissible (S) y el Inventario Efectivo (INV) en el momento de la revisión para el caso de cada bodega específica, se planteará a continuación la dinámica de los despachos diarios considerando el movimiento diario del inventario en las bodegas.

Tabla 6 Normalización de los criterios de priorización

Bodega	Demanda promedio semanal	Desviación estándar demanda	Zona geográfica	c.u	c.d	t.f	t.p.
1	8,5%	7,2%	4,4%	0,0%	0,0%	0,0%	6,5%
2	4,8%	3,6%	4,4%	9,3%	11,6%	1,5%	6,9%
3	6,8%	5,4%	4,4%	21,7%	19,0%	1,4%	6,8%
4	6,1%	6,5%	11,3%	0,0%	0,0%	0,0%	6,4%
5	6,1%	6,5%	11,3%	14,6%	14,2%	25,2%	7,1%
6	8,2%	8,6%	4,4%	0,5%	0,4%	10,0%	6,8%
7	5,8%	6,1%	6,6%	5,8%	6,0%	21,9%	7,2%
8	5,5%	5,7%	6,6%	0,0%	0,0%	0,0%	6,5%
9	5,0%	5,2%	6,6%	10,6%	12,7%	12,8%	7,0%
10	7,5%	7,9%	11,3%	5,4%	4,3%	0,0%	6,4%
11	5,6%	5,9%	11,3%	12,0%	12,7%	0,0%	6,4%
12	9,2%	9,7%	11,3%	5,0%	3,2%	26,6%	7,0%
13	5,7%	6,0%	2,0%	15,1%	15,8%	0,6%	6,6%
14	10,6%	11,1%	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,2%
15	4,4%	4,7%	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,2%

Tabla 7 Vector de prioridad entre criterios

Demanda	3,3%
Desviación estándar	4,6%
Zona Geográfica	9,6%
c.u	24,6%
c.d	43,2%
t.f	4,8%
t.p	9,9%

Dado que existen restricciones en el número de camiones disponibles, es decir, que se tienen menos camiones de los necesarios para atender todas las solicitudes en el mismo momento, cada día de la semana se valora la prioridad de las bodegas y se deciden realizar los viajes teniendo en cuenta que cada camión tiene una capacidad en volumen y peso limitada. Considérese a CAP_d la capaci-

dad del camión “d”, Q_{it} la cantidad de producto requerida por la bodega i en el día t , S_i el inventario máximo permisible en la bodega i para el producto estudiado, e INV_{it} el inventario efectivo del producto en la bodega i a comienzos del día t . Se tiene entonces que:

$$Q_{it} = S_i - INV_{it} \quad (1)$$

Si el Q_{it} resultante en (1) es mayor que CAP_d , implica que en el camión d disponible se enviaría un pedido parcial igual a la capacidad del camión, enviándose en este caso un camión completo pero con un pedido parcial, quedando entonces una necesidad remanente por suplir para la bodega i . Si en cambio Q_{it} es igual a CAP_d se despacharía un camión completo con un pedido completo, y si Q_{it} es menor que CAP_d , existe capacidad remanente en el camión para atender otra u otras bodegas, en caso de que existan pedidos pendien-

tes por suplir. En general, el evento de despachar o no un camión afecta el inventario efectivo de las bodegas que están siendo atendidas. Al despachar un vehículo con determinada cantidad de producto hacia la bodega i en el día t , dicha cantidad, que viene a ser en el momento del despacho “inventario en tránsito”, debe ser sumada de inmediato al inventario efectivo reportado de dicha bodega hasta ese momento. De igual manera, al no despachar ningún camión hacia determinada bodega i en el día t , se hace necesario recalcular el inventario efectivo de dicha bodega al inicio del día $t+1$ considerando en esta ocasión la demanda acontecida durante el día t . En el caso de estudio se considera una demanda semanal, con una demanda promedio diaria bajo el supuesto de que la semana cuenta con 7 días. Considerando a D_{it} como la demanda diaria del producto para la bodega i en el día t , se tiene que el inventario al inicio del día $(t+1)$ en una bodega i es, en general se tiene el resultado que se presenta en (2).

$$INV_{i(t+1)} = INV_{it} + Q_{it} - D_{it} \quad (2)$$

Tabla 8 Vector ordenado de prioridad de las bodegas

Bodega	Vector de prioridad
3	15,2%
5	13,2%
13	11,9%
11	10,6%
9	10,4%
2	8,8%
7	6,9%
12	6,4%
10	5,5%
6	2,5%
4	2,2%
8	1,7%
1	1,7%
14	1,7%
15	1,2%

Ahora bien, dado que el despacho de un camión afecta con certeza el nivel de inventario considerado en una bodega, en caso de que a la bodega más prioritaria se le realice un envío parcial, dicha bodega queda de inmediato requiriendo mas producto. Esta bodega por tanto sigue compitiendo frente a las demás bodegas en términos de prioridad, considerando la decisión de a dónde despachar el siguiente camión. Surgen las preguntas: ¿Qué tanto disminuyó la prioridad de la bodega “más prioritaria” frente a las demás considerando el despacho que ya se realizó?, ¿La necesidad remanente que sigue teniendo esta bodega la sigue convirtiendo en la más prioritaria para el envío del siguiente camión? Dado que el nivel inventario de la bodega atendida se afectó por el inventario en tránsito, es viable en este punto recalcular para esta bodega los criterios relacionados con el inventario tales como c.u., c.d., t.f., y t.p. (por eso estos criterios se denominan criterios dinámicos). Al recalcularlos y desarrollar el procedimiento completo AHP se logra un nuevo vector de prioridad para todas las bodegas, necesario de tener en cuenta para el despacho del siguiente camión. Es en este nuevo vector donde se establece la nueva prioridad de la bodega atendida con un pedido parcial, en comparación con las necesidades que siguen teniendo las demás bodegas. Partiendo de la reflexión anterior, existen criterios dinámicos de priorización, que se afectan con el envío de cada camión y criterios estáticos, siendo estos últimos los siguientes: importancia de las zonas de mercado, demanda promedio y variabilidad de la demanda. Las figuras 3 y 4 representan en conjunto el diagrama de operación general de la programación dinámica semanal de despachos, para el caso prototipo estudiado. Considere a A y B como los conectores de ambos diagramas. Para la lectura de estos diagramas se hace conveniente mostrar la siguiente notación adicional a la ya manejada previamente:

Q_{nd} = cantidad de producto a despachar en el camión “d”, atendiendo en dicho envío a “n” bodegas. (Unidades de producto)

Q_{it} = Cantidad de producto requerida por la bodega “j” en el día “t”, siendo esta bodega una

distinta a aquella “más prioritaria” según lo establecido en el vector de prioridad. (Unidades de producto).

CAP_d = Capacidad del camión “d” (unidades de producto).

La figura 3 representa el inicio de la dinámica de despachos estableciendo la priorización de las bodegas con AHP. Se parte de la disponibilidad de por lo menos 1 camión ($d=1$) en el primer día de la semana ($t=1$). Se hace aquí explícito el supuesto de que el conductor del vehículo está dispuesto a visitar cualquier destino que se le asigne según sea la prioridad de los distintos destinos. Partiendo de los datos logísticos asociados al producto (necesarios para calcular los criterios) que se tengan por parte de las distintas bodegas, se calculan los criterios estáticos y dinámicos para todas ellas. Con esta información, según lo explicado en secciones anteriores, se construye el vector de prioridad de las bodegas con base en la metodología AHP. Los criterios dinámicos, afectados por el inventario efectivo, se recalcularán siempre que un camión esté dispuesto a salir.

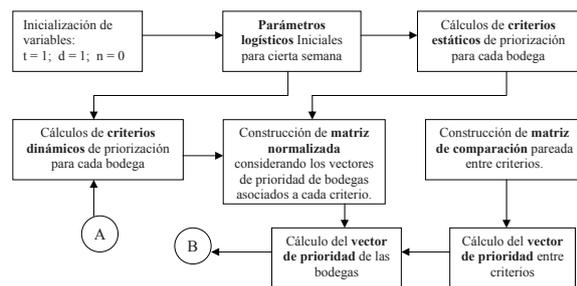


Figura 3 Diagrama de flujo para el cálculo del vector de prioridad de bodegas

En la figura 4 se muestra que partiendo del vector de prioridad, se selecciona de él la bodega más prioritaria “i” y se calcula la necesidad de dicha bodega según la política de revisión de inventarios R,S así: Si Q_{it} resulta ser igual ó “cercanamente igual” a CAP_d , se determinó que en ese caso se despacha el camión completo con un envío completo (no parcial) para la bodega “i” seleccionada. Es decir, si la función valor absoluto:

$Abs(Q_{it} - CAP_d) \leq \epsilon$, resulta verdadera para cierto valor pre-definido ϵ , se opta por considerar a $Q_{it} = CAP_d$. En este caso la cantidad despachada en el camión “d” es $Q^{nd} = CAP_d$, con $n=1$, dado que con el despacho se atenderá a una sola bodega. El valor ϵ lo debe establecer cada empresa, se mide en unidades de producto y tiene como fin acotar la definición de “cercanía” entre el tamaño del pedido y la capacidad del camión. De otro lado, si $Abs(Q_{it} - CAP_d) \leq \epsilon$ resulta falsa, implica que existen diferencias significativas entre Q_{it} y CAP_d y en este caso $Q^{nd} = \min(Q_{it}, CAP_d)$. Si en la función anterior $Q^{nd} = CAP_d$, implica que la necesidad de la bodega “i” supera la capacidad del camión y que el vehículo debe despacharse con carga completa hacia dicha bodega que se atenderá con un envío parcial. En cambio, si $Q^{nd} = Q_{it}$ significa que existe capacidad remanente en el vehículo para llevar más producto dirigido a otra u otras bodegas, siendo dicha capacidad igual a $(CAP_d - Q^{nd})$. Se explora aquí entonces el mismo vector de prioridad y se determina si existe en él otra bodega “j” que se encuentre en la misma zona geográfica y que tenga la siguiente mayor prioridad. Si no existe otra bodega “j” dentro de la misma zona que deba abastecerse, entonces se despacha el camión parcialmente lleno con un pedido completo dirigido a la bodega “i”. Si, por el contrario, existe una bodega “j” con necesidades de abastecimiento de producto en la misma zona que la bodega “i”, se calcula la necesidad Q_{jt} de dicha bodega: $Q_{jt} = (S_j - INV_{jt})$. Este valor Q_{jt} se compara ahora con la capacidad remanente del vehículo evaluando la desigualdad: $Abs(Q_{it} - (CAP_d - Q^{nd})) \leq \epsilon$. A partir de aquí se genera un ciclo que permite evaluar la atención de “n” bodegas a partir de un camión. Dado que las “n” bodegas prioritarias que se seleccionen para ser atendidas por un mismo camión están localizadas geográficamente cerca, podría ser viable en este punto desarrollar un subproblema de ruteo, que indique a cuál de estas bodegas debería visitarse primero y a cuales después considerando el lead time entre bodegas así como los costos de transporte entre ellas. Estas consideraciones de ruteo están fuera del alcance de este artículo. Siguiendo el diagrama de la figura 4 una vez se despacha el vehículo, se actualiza el inventario de las “n” bode-

gas atendidas considerando el inventario en tránsito correspondiente a cada una de ellas. En ese momento, se verifica si existen camiones disponibles para un próximo despacho en el mismo día “t”. De haber otro camión listo para ser cargado, se incrementa el valor de “d” y se recalculan los criterios dinámicos de priorización para todas las bodegas que siguen aún requiriendo producto, operando de nuevo con el

diagrama mostrado en la figura 4 donde se calculará un vector de prioridad de bodegas actualizado. Este nuevo vector servirá de base para llenar el nuevo camión. Si por el contrario, se determina que en un día “t” no habrán camiones disponibles para realizar más envíos, se actualiza, al final de este día, el inventario en todas las bodegas, restándoles la demanda acontecida durante “t”.

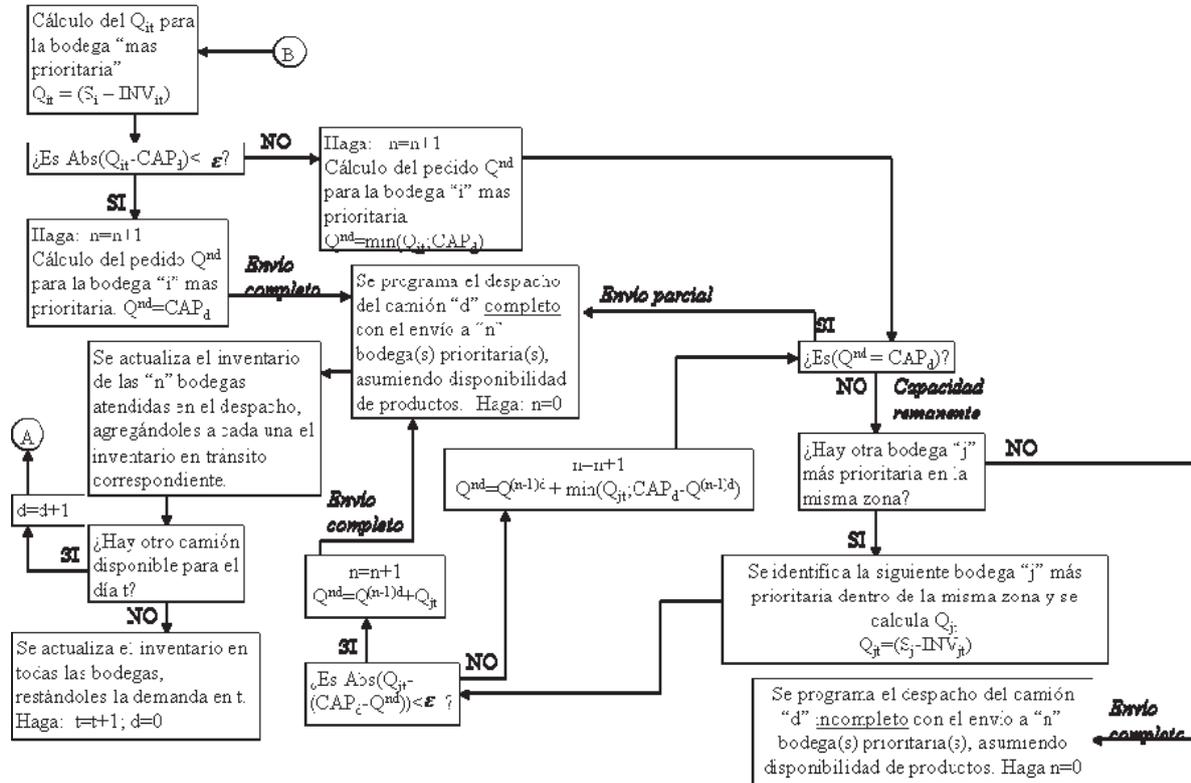


Figura 4 Diagrama de flujo para el envío de camiones

La dinámica de despachos semanales para el caso de estudio se programó en hoja electrónica bajo las siguientes consideraciones:

- Se asumió una cantidad aleatoria de camiones disponibles al inicio de un día, y específicamente un número entero entre 4 y 8.
- Se asumió un valor de ϵ igual al 5% de la necesidad calculada para la bodega.
- Los camiones disponibles se asumieron de idéntica capacidad e igual a 3.000 unidades de producto por viaje.

Considerando la información de la tabla 4, se obtuvo una simulación de los despachos diarios a lo largo de una semana, mostrando en la tabla 9 y a manera de ejemplo el resultado obtenido para uno de los días simulados. El tipo de envío se refiere a despachos con camión completo (C) ó con camión incompleto (I). Los despachos a realizar son, por ejemplo, para el camión 2 los siguientes:

5-2544-C = despacho a la bodega 5 de 2544 unidades, representando un pedido completo.

11-456-P = despacho a la bodega 11 de 455 unidades, representando un pedido parcial, habiéndose seleccionado la bodega 11 dado que es la siguiente bodega mas prioritaria dentro de la misma zona donde se ubica la bodega 5.

Tabla 9 Programación dinámica de despachos simulada para el primer día de la semana considerando la disponibilidad de ocho camiones

Camión No.	Tipo de envío	Despachos a realizar	
1	C	3-3000-C	
2	C	5-2544-C	11-455-P
3	C	13-2391-C	14-608-P
4	C	9-1993-C	7-1006-P
5	C	2-1841-C	6-1158-P
6	C	10-2744-C	12-256-P
7	C	12-3000-C	
8	C	4-2039-C	11-960-P

Discusión

En la tabla 6 para cada uno de los criterios se puede observar la mejor alternativa obtenida, correspondiente al porcentaje mas alto en cada caso, lo cual indica frente cada criterio cual sería la bodega más apropiada para el despacho; por ejemplo, para el indicador de *tf* el mayor valor es el de la bodega 7, por tanto el primer despacho frente a ese criterio debería realizarse para tal bodega, lo cual es apropiado en un enfoque de único criterio, pero tal como se plantea en [1], es necesario un enfoque sistémico para tal priorización, y en la tabla 8 aparece el vector de prioridad resultante que incluye múltiples criterios, el cual plantea que el primer despacho debe realizarse a la bodega 3. Nótese además que en la tabla 9, con los ocho camiones disponibles, se propone realizar dos envíos tanto a la bodega 11 como a la 12, contrastándose esto con la no atención a las bodegas 1, 8 y 15 en vista fundamentalmente a su baja prioridad. Debe notarse también que a pesar de que la bodega 11, según la tabla 8, tenía la cuarta prioridad para la realización de envíos, el pedido parcial que se le despachó en el segundo camión

hizo que su prioridad disminuyera y se volviera ahora más urgente atender otras bodegas que aparecían al principio como menos prioritarias.

Conclusiones

Se ha mostrado en el presente artículo una metodología de priorización de despachos de vehículos con AHP partiendo de indicadores logísticos de prioridad. En [1] se mostró la conveniencia de decidir acerca del despacho de vehículos con base en un grupo de indicadores de índole logístico en vez de con un solo indicador, y en este artículo se aprovecha con el AHP toda la información que el conjunto de indicadores arroja en beneficio del servicio al cliente final. El campo de investigación se agranda al tener en cuenta la posible inclusión de otros indicadores, por ejemplo aquellos de índole meramente financiero, y la adición de la problemática de ruteo al problema de priorización. Los autores coinciden en que este trabajo sienta las bases de una metodología robusta de planeación de recursos de distribución, que se puede extender al caso multi-producto.

Referencias

1. J. J. Bravo, J. C. Osorio, J. P. Orejuela. "Administración de recursos de distribución: Indicadores para la priorización en transporte". *Estudios Gerenciales*. Vol. 23. 2007. pp.101-118
2. D. J. Bowersox, D. J. Closs, M. B. Cooper. *Supply Chain Logistics Management*. Ed. McGraw-Hill. New York. 2002.
3. D. Innis, B. La Londe. "Customer Service: The Key to Customer Satisfaction, Customer Loyalty, and Market Share". *Journal of Business Logistics*. Vol. 15. 1994. pp. 1-27.
4. M. Holweg. "An investigation into supplier responsiveness: Empirical evidence from the automotive Industry". *The International Journal of Logistics Management*. Vol. 16. 2005. pp. 96-119.
5. D Lambert, T. Harrington. "Establishing Customer Service Strategies within the Marketing Mix: More Empirical Evidence". *Journal of Business Logistics*. Vol. 10. 1989. pp. 44-60.
6. K. Dobie. "The Core Shipper Concept: A proactive strategy for Motor Freight Carriers". *Transportation Journal*. Vol. 44. 2005. pp. 37-53.

7. W. Bell, L. Dalberto, M. Fisher, A.Greenfield, R. Jaikumar, P. Kedia, R. Mack, P. Prutzman. "Improving the Distribution of Industrial Gases with an On-line Computerized Routing and Scheduling Optimizer". *Interfaces*. Vol. 13. 1983. pp. 4-23.
8. A. Bonfill. A. Espuña, L. Puigjaner. "Decision support framework for coordinated production and transport scheduling in SCM". *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 32. 2007. pp. 1206-1224.
9. M. Goetschalckx. "A decision support system for dynamic truck dispatching". *International Journal of Physical Distribution & Material Management*. Vol. 18. 1988. pp. 3442.
10. Shen, S.Y. & Honda. "Incorporating lateral transfers of vehicles and inventory into an integrated replenishment and routing plan for a three-echelon supply chain". *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 56. 2009. pp. 754-775.
11. J. Brandão, A. Mercer. "A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem". *European Journal of Operational Research*. Vol. 100. 1997. pp.180-191.
12. R. Ballou. "Computer Methods in Transportation – Distribution". *Transportation Journal*. Vol. 16. 1976. pp. 72-85.
13. R. Ballou. *Business Logistics Management*. 5ª. ed. Ed. Prentice Hall. College Division. New Jersey. 2004. pp. 789.
14. J.C.Osorio, J.P.Orejuela, J.J.Bravo. *Caracterización y priorización de zonas geográficas de mercado*. Documento de trabajo. Cali: Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística. Universidad del Valle. 2005.
15. R. Whitaker. "Criticisms of the Analytic Hierarchy Process: Why they often make no sense". *Mathematical and Computer Modelling*. Vol. 46. 2007. pp. 948-961.
16. T. L.Saaty, L. G. Vargas. *Decision making with the analytic network process*. Ed. Springer. New York. 2006. pp. 282.
17. O. Vaidya, S. Kumar. "Analytic hierarchy process: An overview of applications". *European Journal of operational research*. Vol. 169. 2006. pp. 1-29.
18. E. Forman, S. Gass. "The Analytic Hierarchy Process – An Exposition". *Operations research*. Vol 49. 2001. pp. 469-486
19. H. William. "Integrated analytic hierarchy process and its applications - A literature review". *European Journal of operational research*. Vol. 186. 2008. pp. 211-228.
20. R. Steuer, P. Na. "Multiple criteria decision making combined with finance: A categorized bibliographic study". *European Journal of operational research*. Vol. 150. 2003. pp. 496 -515.
21. E. Silver, D. Pyke, R. Peterson. *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. 3ª ed. Ed. John Wiley & Sons. New York. 1998. pp. 784.