

Caso de inventarios: un comprador y dos proveedores con demanda y tiempos de entrega estocásticos

*Case of inventories: one buyer and two suppliers
with stochastic demand and lead times*

Juan Manuel Izar Landeta^{1*}

 <https://orcid.org/0000-0002-3187-6481>

José Adrián Nájera Saldaña¹

 <https://orcid.org/0000-0002-1795-4471>

Lizbeth Angélica Zárate Camacho¹

 <https://orcid.org/0000-0002-6834-1667>

Recibido 10 de octubre de 2023, aceptado 5 de septiembre de 2024

Received: October 10, 2023

Accepted: September 5, 2024

RESUMEN

Se presenta un caso de inventarios con un comprador, con demanda del producto normal y dos proveedores cuyos tiempos de entrega son estocásticos, uno normal y el otro uniforme, con una restricción en cuanto al nivel de servicio. El objetivo del estudio es definir la cantidad de pedido y el punto de reorden, que son variables de decisión, que minimicen el costo anual del inventario, el cual incluye el costo de los faltantes. El problema se resuelve mediante simulación, con un número suficiente de corridas, para determinar la cantidad de pedido y el punto de reorden que optimicen el costo. Luego se han variado algunos de los parámetros del sistema, para ver cómo impactan en los resultados, entre ellos la proporción de pedido hecha a cada proveedor y las desviaciones estándar de la demanda y de los tiempos de entrega de los proveedores. Se concluye que es preferible utilizar a ambos proveedores, así como disminuir la variabilidad de la demanda y el tiempo de entrega de cada proveedor, lo cual resalta la importancia de un estudio como éste para las organizaciones, que les permitirá mejorar su rentabilidad al hacer un manejo eficiente de su política de inventarios.

Palabras clave: Tiempo de entrega, proveedores, costo del inventario.

ABSTRACT

An inventory case is presented with a buyer with standard product demand and two suppliers whose lead times are stochastic, one normal and the other uniform, with a restriction regarding the service level. The study's objective is to define the order quantity and the reorder point, which are decision variables that minimize annual inventory costs, including the cost of shortages. The problem is solved by simulation, with a sufficient number of runs, to determine the order quantity and reorder point that optimizes cost. Then, some of the system parameters were varied to see how they impacted the results, including the proportion of orders made to each supplier and the standard deviations of the demand and lead times of the suppliers. It is concluded that it is preferable to use both suppliers, as well as to reduce the variability of demand and the delivery time of each provider, which highlights the importance of a study like this for organizations, which will allow them to improve their profitability by making efficient management of their inventory policy.

Keywords: Lead time, suppliers, inventory cost.

¹ Instituto Tecnológico Superior de Rioverde. Ingeniería en Gestión Empresarial. Rioverde, México.
Email: juan.il@rioverde.tecnm.mx; jose.ns@rioverde.tecnm.mx; lizabeth.zc@rioverde.tecnm.mx

* Autor de correspondencia: juan.il@rioverde.tecnm.mx

INTRODUCCIÓN

La administración de las cadenas de suministro es una temática que ha cobrado creciente interés en el arranque de este tercer milenio. Estrategias como el justo a tiempo y la gestión de la calidad sugieren reducir el número de proveedores, ya que con esto es posible construir con ellos relaciones de largo plazo. Entre las ventajas que tiene el contar con un número menor de proveedores, una es que reduce los esfuerzos de coordinación para lograr buenos tiempos de entrega y facilita tener insumos de alta calidad, además, ayuda a disminuir los costos de manufactura al adquirir mayores volúmenes y genera menores costos de la curva de aprendizaje.

Si se utilizan proveedores extranjeros, surgen algunos problemas adicionales, como el incremento en los costos de envíos, así como los tiempos de entrega, puede haber volatilidad en el tipo de cambio de las monedas y mayores riesgos en los envíos [1].

A fin de cuentas, los criterios para elegir uno o varios proveedores se centran en los costos, la calidad y los servicios del proveedor. La mayoría de los trabajos de investigación respecto al manejo del inventario se enfocan en el costo de aprovisionamiento y los tiempos de entrega [1].

El objetivo fundamental de una cadena de suministros es satisfacer las necesidades de los clientes generando un beneficio económico. Eslabones típicos de una cadena son: los clientes, los minoristas, los mayoristas o distribuidores, los productores y los proveedores de materias primas [2]. Algunos factores estratégicos para un buen manejo de la cadena de suministro son los siguientes: las instalaciones, el inventario, el transporte, la información, el aprovisionamiento y la fijación de precios.

Las 3 fases en el establecimiento de la cadena de suministro son: (1) el diseño, que implica configurar la cadena definiendo los recursos, los procesos, los eslabones y el flujo de información a través de éstos, como el caso de Dell, que eliminó eslabones de la cadena para tratar directamente con los clientes; (2) la planeación, cuya meta es maximizar el superávit de la cadena a través del horizonte de planeación, iniciando por el pronóstico de actividades para el periodo siguiente, tomar las decisiones sobre qué mercados serán provistos por cual localización,

si se subcontrata o manufactura el producto, las políticas de inventario y las promociones y labores de mercadeo; y (3) la operación de la cadena, que tiene que ver con el manejo apropiado de los pedidos de la clientela, lo que implica definir los medios por los cuales se suministrarán los pedidos [2].

En lo que toca al manejo del inventario, debe definirse el stock de seguridad, el cual deberá ser mayor si hay más incertidumbre en la oferta y demanda de los productos, así como si se desea tener mayor disponibilidad de los mismos para la clientela. Si hay más variabilidad de la demanda, el stock de seguridad aumenta [2].

Algunos efectos contrapuestos en cuanto a mantener un mayor volumen de inventario son: por una parte, habría mayor disponibilidad de productos para el cliente, al hacer corridas de producción de mayor volumen, trae consigo economías de escala, habría ahorros en transporte al enviar mayores volúmenes de artículos y se aprovechan los descuentos por volumen que ofrezcan los proveedores. Como contraparte está el hecho de mayores costos de mantenimiento del inventario, dinero inmovilizado en el inventario, con mayores inventarios pueden ocultarse fallas de calidad de los productos y se tiene el riesgo de que parte del inventario se vuelva obsoleto [3].

Sculli y Wu [4] calculan la media y varianza de la distribución de la demanda del tiempo de entrega cuando se usan dos proveedores para rellenar el stock de un único ítem. Los tiempos de entrega de cada proveedor son normales y al hacer cada pedido, se hace colocando dos órdenes, una para cada proveedor al mismo tiempo. Los resultados señalan el punto de reorden requerido para que no haya faltantes es menor si se usan los dos proveedores simultáneamente. Por último, se han preparado tablas que definen los tamaños mínimos de pedido en estas circunstancias.

Lau y Zhao [5] han encontrado una política de pedidos óptima cuando se tiene dos proveedores con tiempos de entrega y demandas estocásticas. Esta política consiste en definir 3 cuestiones: la cantidad de pedido, el punto de reorden y la proporción del pedido que se hace a cada proveedor. Entre los hallazgos están: (1) la mayor ventaja de dividir los pedidos radica en la reducción del costo del ciclo del inventario, siendo la reducción del stock de

seguridad un asunto sin importancia; (2) aunque sería lógico usar al proveedor con menor tiempo de entrega, el costo menor se logra si el tiempo promedio de entrega del segundo proveedor es adecuadamente mayor que el del primero; (3) la proporción óptima del pedido para cada proveedor varía con la diferencia de los valores promedio de sus tiempos de entrega.

Diabat [6] presenta un problema de inventario manejado por el vendedor (VMI), considerando una cadena de suministro de 2 escalones con un único vendedor y varios compradores. Busca la cantidad de venta que optimice los beneficios, dada una función objetivo no lineal y no convexa. Para solucionar este problema recurre a un algoritmo genético/simulado híbrido, con el cual logra mejores soluciones para este tipo de casos.

Golpîra [7] encuentra para una cadena de suministros del sector de la construcción, bajo el esquema de inventario VMI, que una mayor frecuencia de suministro, lleva a la reducción del costo del inventario.

Otros académicos [8] han revisado la literatura de inventarios con fuente múltiples de suministro y presentan una tipología de clasificación. Los modelos de fuentes múltiples de aprovisionamiento tratan de balancear entre mayores costos por el respaldo de suministro múltiple en comparación con mayores costos de inventario y faltantes en el caso de un único proveedor. Esto los llevó a definir reglas heurísticas para el manejo del inventario. Señalan que, para trabajo posterior, hay 3 áreas de oportunidad, que son: (1) integrar modelos para más de 2 proveedores y escalones múltiples de la cadena de suministro; (2) enfocarse en la resiliencia de la cadena de suministro en caso de interrupciones o picos de la demanda; y (3) el uso de metodologías de manejo de datos y aprendizaje automático.

Por su parte, van den Bogaert y van Jaarsveld [9] encuentran con simulación para un sistema VMI, que el monitoreo de los límites de inventario, en función del tipo de proveedor, puede llevar a una reducción del costo del inventario entre 4 y 6% sin disminución del nivel de servicio, en comparación con otros modelos que no toman en cuenta el tipo de proveedor.

Glock [10] en un primer estudio considera el caso de un solo comprador y múltiples proveedores heterogéneos,

para resolver la selección de proveedores y la definición del tamaño del lote que lleve a minimizar los costos del sistema. En su estudio reduce las combinaciones del número de proveedores a considerar para llegar a una solución óptima y apoyar iniciativas para incrementar la eficiencia de la cadena de suministro aplicando herramientas heurísticas. Luego, este mismo autor [11] en otro artículo, hizo un comparativo de las estructuras de suministro en un ambiente dual de aprovisionamiento, encontrando que una mayor flexibilidad en dichas estructuras, llevó a un menor costo total del sistema. Además, identificó factores del contexto que ayudaron a obtener un mejor desempeño.

Otros investigadores [12] presentan un trabajo de una red de un comprador y varios vendedores con embarques que aumentan geométricamente con un factor fijo. Para ello aplican dos políticas diferentes, la primera en la cual se envían los lotes al comprador tan pronto y se completan y la segunda en la que dichos lotes se envían hasta que el inventario del comprador llegue a cero. El desempeño ante estas dos políticas se compara a la situación donde se embarcan lotes del mismo tamaño de parte de cada vendedor.

Glock y Kim [13] han efectuado un estudio de envíos de lotes con un comprador y múltiples vendedores, en el cual éstos deben consolidar sus envíos para reducir los costos de transportación, los envíos grandes deben embarcarse antes que los de menor volumen y los proveedores con alta capacidad de producción deben ocupar los últimos sitios en el ciclo de envíos.

Riezebos [14] afirma que las políticas de control que se utilizan en los sistemas de gestión de inventario asumen que los pedidos llegan en la misma secuencia en que se ordenaron. Debido a los cambios en las cadenas de suministro y los mercados, esta suposición ya no es válida. Este estudio tiene como objetivo proporcionar una mejor comprensión del fenómeno de los cruces de órdenes y las condiciones para que esto suceda. Los cruces de pedidos son causados por diferencias en los plazos de entrega y el tiempo entre pedidos. Estas diferencias tienen su origen en varias fuentes. Los tipos de industrias que tienen más probabilidad de enfrentar estos cruces de pedidos están ubicadas aguas arriba en la cadena de suministro, utilizan recursos naturales o solicitan materiales estratégicos de múltiples proveedores o

del extranjero. Un estudio de caso de una empresa tabacalera que encontró pedidos cruzados confirma estos hallazgos. La empresa estimó que los ahorros de costos al tener en cuenta los cruces de pedidos esperados fue del 30%.

Kumar por su parte [15], hizo una investigación genérica de los costos de inventario en el almacén de una fábrica que suministra componentes a una línea de ensamble. Específicamente, preocupaba el aumento en los inventarios de componentes debido a la incertidumbre en los plazos de entrega de los proveedores y el hecho de que varios componentes diferentes deben estar presentes antes de que pueda comenzar el ensamblaje. Se supone que los proveedores de los diversos componentes son independientes, que las operaciones de los proveedores están en equilibrio estadístico y que la línea de ensamble exige la misma cantidad de cada tipo de componente, cada vez que se programa el inicio de un nuevo ciclo de ensamblaje. Se usa como una medida del costo del inventario, el tiempo esperado durante el cual una orden de componentes debe mantenerse en el almacén desde el momento en que se entrega hasta el momento en que se consume en la línea de ensamblaje. Entre los hallazgos de este estudio están los efectos de la variabilidad del tiempo de entrega del proveedor, la cantidad de diferentes tipos de componentes y sus niveles de servicio deseados en el costo del inventario. Además, bajo los supuestos de que los costos de mantenimiento de inventario y el costo de demorar el ensamblaje son lineales en el tiempo, se estudian políticas de pedido óptimas y se presenta una caracterización interesante que es independiente de las distribuciones de los tiempos de entrega de los proveedores.

Saputro *et al.* [16] señalan que, en el mercado global actual, administrar el suministro no es un proceso sencillo y se vuelve aún más complejo a medida que hay incertidumbre e interrupciones. Para mitigar su impacto, la selección de proveedores de artículos estratégicos debe tener una visión más holística de las operaciones en la cadena de suministro. Se asume que la demanda es estocástica y la calidad imperfecta de los proveedores, la cual genera costos adicionales. Las interrupciones del suministro también afectan el tiempo de entrega de los proveedores, lo que genera demoras. Mediante un algoritmo genético se determinaron las decisiones

de selección de proveedores, mientras que las decisiones de inventario se calcularon analíticamente. La simulación de eventos discretos se utiliza para evaluar el rendimiento general, así como para actualizar el tiempo de entrega de forma dinámica, de acuerdo con las interrupciones. Finalmente, el análisis de sensibilidad reveló que los criterios en la selección de proveedores deben tener una prioridad diferente según las características de los artículos, y la efectividad de las estrategias de mitigación de las interrupciones depende de las características de cada interrupción.

Teerasoponpong y Sopadang [17] proponen un sistema de apoyo a las decisiones (DSS) para el suministro y manejo del inventario, con el objetivo de ayudar a las pymes a compilar y aprovechar sus datos que sirvan como apoyo a sus decisiones ante las ambigüedades del negocio. Dicho sistema ayudó a la empresa objeto de estudio al buen manejo de sus políticas de inventario ante demandas inciertas de materias primas, tomando en cuenta los niveles de servicio deseados, las promociones de ventas, los tiempos de entrega y la disponibilidad de materiales de proveedores múltiples. Como resultado de implementar este sistema, el ahorro en costos de compra de materias primas fue de 51,62% y redujo los intervalos de órdenes y los costos de inventario a la mano disminuyeron 54,24%.

En otro estudio, Afsar *et al.* [18] comentan que las estrategias de selección/reemplazo de proveedores, la negociación del precio de compra y las políticas de reposición optimizadas juegan un papel clave en la gestión eficiente de la cadena de suministro en el dinámico mercado actual. Su importancia aumenta aún más en la Industria 4.0. En este artículo, se propone un modelo conjunto de planificación de reabastecimiento y negociación de precios de compra en el contexto del reemplazo de proveedores en un sistema de ensamblaje de un nivel que produce un producto terminado. Los plazos de entrega reales de los componentes son estocásticos. Por lo tanto, existe un riesgo no despreciable de que el proceso de montaje se detenga si todos los componentes no se entregan en la fecha de vencimiento para el montaje. Se incurre en costos relacionados con el inventario, la retención y el retraso, los cuales deben minimizarse. Los hallazgos de este estudio indican que puede ser beneficioso pagar a los proveedores un costo de compra adicional para reducir los costos

de retención y acumulación relacionados con la incertidumbre. En consecuencia, los tomadores de decisiones pueden utilizar el enfoque propuesto para negociar precios y demoras en las entregas o para seleccionar proveedores.

En el sector de tecnologías de la información (TI), Handley *et al.* [19] afirman que aun cuando el uso de un solo proveedor al subcontratar servicios de TI es común, dividir el paquete de servicios de TI entre múltiples proveedores es una estrategia cada vez más popular. Sin embargo, entender los factores que contribuyen a esta tendencia es limitada. Guiados por una revisión exhaustiva de la literatura existente y entrevistas con expertos de la industria, este estudio se enfoca en la influencia de las tecnologías emergentes (es decir, servicios basados en la nube y servicios de automatización), la ubicación del proveedor (en el extranjero o nacional) y el aprendizaje experiencial sobre la elección entre un solo proveedor y múltiples proveedores de servicios de TI. La tendencia hacia más fuentes múltiples ejemplifica un movimiento más amplio hacia una mayor desagregación y distribución del trabajo del conocimiento. Por lo tanto, utilizaron una perspectiva basada en el conocimiento para desarrollar las hipótesis sobre cómo los factores antes mencionados se relacionan con la probabilidad de contratación múltiple. Al analizar una gran base de datos de contratos de servicios de TI, encontraron que es menos probable que los servicios basados en la nube sean de múltiples fuentes, pero los servicios de automatización no están significativamente asociados con la probabilidad de múltiples fuentes. Otro hallazgo es que las firmas de clientes con más experiencia, son más propensas a adoptar la multicontratación. Por el contrario, los resultados indican que es menos probable que los proveedores más experimentados y los proveedores ubicados en el extranjero formen parte de acuerdos de contratación múltiple.

En el manejo de inventarios, otros autores [20] afirman que la integración de compradores y vendedores puede repercutir en disminuir los costos para ambos. El objetivo de este estudio es minimizar los costos definiendo la política óptima de producción y envíos.

Por su parte, Xiong *et al.* [21] desarrollaron un enfoque de acción basado en datos para un sistema

de gestión de inventario de abastecimiento dual de revisión periódica en presencia de incertidumbre en el precio de compra y la demanda. Las dos fuentes de suministro difieren en sus plazos de entrega y precios debido a diferentes modos de transporte. Con un conjunto de datos de 4 años, muestran que su estimación puede generar ahorros significativos comparado con otros modelos. Entre sus hallazgos están: (1) considerar un horizonte más largo de planeación puede ser contraproducente; y (2) algunas restricciones comerciales como la capacidad de inventario limitada, pueden generar beneficios inesperados.

Otros investigadores [22] estudiaron un sistema de inventarios de revisión periódica con múltiples proveedores capacitados. Estos proveedores tienen diferentes tiempos de entrega y costos unitarios, y los proveedores con tiempos de entrega más cortos cobran costos unitarios más altos. Es importante destacar que, si se cuenta con capacidad suficiente, al seleccionar cuidadosamente dos de los proveedores, a menudo el más rápido y el más lento, es posible lograr un equilibrio adecuado entre la rentabilidad y la capacidad de respuesta.

Yazlali y Erhun [23] estudiaron el problema de un único ítem con dos proveedores bajo revisión periódica en un horizonte finito de planeación. De los proveedores, uno es local y el otro global con tiempos de entrega consecutivos y ambos proveedores colocan límites mínimo y máximo para las órdenes de pedido del comprador. Se muestra que una política de stock base modificado de dos niveles es óptima sin ninguna restricción en cuanto a los costos de pedido. Para productos basados en el costo del inventario, el comprador se apoya en el proveedor local para mantener una buena respuesta en la cadena de suministro, sin embargo, este importante rol del proveedor local disminuye si su tiempo de entrega se incrementa, asimismo, si se incrementan los límites mínimos de capacidad de los proveedores, esto favorece al proveedor local.

Otros [24] han considerado un sistema de inventario de abastecimiento dual, donde la adquisición con un proveedor implica un costo variable alto pero un costo fijo insignificante, mientras que la adquisición con el otro proveedor implica un costo variable bajo, pero un costo fijo alto, así como una restricción del tamaño del pedido. El costo de ordenamiento

no es cóncavo ni convexo. Se muestra que es óptimo abastecerse simultáneamente de ambos proveedores cuando el nivel de inventario inicial es lo suficientemente bajo. También que la decisión de abastecerse del proveedor de bajo costo variable no es monótona con el nivel de inventario. Los resultados requieren que los costos variables satisfagan una cierta condición que garantice la cuasi-convexidad, sin embargo, numerosos resultados sugieren que la política encontrada es casi siempre óptima aun cuando la condición no se cumpla.

Hua *et al.* [25] han tratado un problema de revisión periódica de inventarios con dos proveedores, uno regular y otro de respuesta rápida, teniendo el proveedor regular un tiempo de entrega mayor que el de respuesta rápida, pero un costo unitario menor. Las propiedades estructurales de órdenes óptimas se caracterizan usando la noción de convexidad L. La orden óptima del proveedor regular es más sensible a los pedidos pendientes tardíos y la orden óptima del proveedor de respuesta rápida es más sensible a los pedidos que llegan pronto. Con base en esto han diseñado una política que permite ahorrar en el costo promedio 1,02% respecto a la mejor política heurística encontrada en la literatura.

Fox *et al.* [26] analizaron un modelo de revisión periódica donde el comprador tiene a dos proveedores, con el primero de ellos, el comprador incurre en altos costos variables y mínimos costos fijos (proveedor local) y con el segundo (proveedor global) es lo opuesto, de modo que los costos de ordenamiento son en parte lineales y en parte cóncavos. El modelo que utilizan puede usarse para distribuciones normal, normal truncada, gama y beta. Se centran en la situación donde hay pérdida de ventas, pero explica cómo la política, las suposiciones en cuanto al costo y las pruebas pueden alterarse para los casos en que un exceso de demanda quede pendiente de ordenarse. Para el caso de ventas perdidas, puede haber una de 3 opciones: (1) una política de stock base para comprarle exclusivamente al proveedor de alto costo variable; (2) una política (s, S) para comprarle al proveedor de bajo costo variable; y (3) una política híbrida para comprarle a ambos proveedores.

Zhang y Hua [27] estudiaron un sistema de revisión periódica de inventario con dos proveedores, los cuales se diferencian en el costo fijo y variable, el primero de ellos tiene un alto costo unitario de

compra, pero bajo costo de envío (proveedor local) y restricción en cuanto al tamaño del pedido y el segundo es un proveedor global con bajo costo unitario de compra, pero alto costo fijo del pedido. Basados en mantener la cuasi convexidad y la preservación propuesta de convexidad CK fuerte, caracterizaron la estructura de la política óptima.

En este trabajo se presenta un caso de un comprador que se abastece con dos proveedores con tiempos de entrega iguales en su valor promedio, ambos ofertan el mismo precio del artículo, pero sus costos del pedido son diferentes y sobre todo, el patrón de comportamiento del tiempo de entrega, ya que el primer proveedor tiene una distribución normal y el segundo una uniforme. La única restricción en cuanto al pedido, es que se pida la mitad a cada proveedor y lo que trata este estudio es de encontrar las condiciones de manejo del inventario que lleven al costo mínimo, en este caso definir la cantidad de pedido y el punto de reorden.

DESARROLLO

La metodología consiste en obtener mediante simulación, la cantidad de pedido, Q, y el punto de reorden, PR, que en este caso son variables de decisión, para minimizar los costos del inventario.

Estos costos incluyen el de mantenimiento del inventario, C_{man} , el de colocar nuevos pedidos, C_{ped} , y el de faltantes cuando éstos aparezcan, C_{fal} .

Para el caso del costo de mantenimiento, éste viene dado por la ecuación (1):

$$C_{man} = C_m(\text{Inventario Promedio}) \quad (1)$$

Siendo:

C_{man} = Costo del mantenimiento del inventario, \$/periodo

C_m = Costo de mantenimiento de cada artículo, \$/unidad

Y el inventario promedio se obtiene para cada periodo de tiempo, dependiendo como se haga la simulación, que en este estudio es diariamente, por lo cual sería el promedio de cada día.

Luego, para el costo de colocar pedidos es mediante ecuación (2):

$$C_{ped} = C_p \quad (2)$$

Donde:

C_{ped} = Costo de colocar pedidos del inventario, \$/periodo

C_p = Costo de cada pedido, \$/pedido

En este caso, como el problema se plantea con periodo diario, sería en el día que se coloque un nuevo pedido.

Por su parte, para el costo de faltantes, éste se obtiene con la ecuación (3):

$$C_{fal} = C_f N_f \quad (3)$$

Donde:

C_{fal} = Costo de faltantes, \$/periodo

C_f = Costo de cada faltante, \$/unidad

N_f = Número de faltantes, unidades/periodo

El costo de cada faltante se asume que es la diferencia entre el precio del artículo y su costo, ya que es lo que se deja de ganar por no tener suficiente existencia.

Y el costo total es la suma de todos los anteriores, de modo que en la simulación se variarán la cantidad de pedido, Q , y el punto de reorden PR , que lleven al costo mínimo

Además, se debe tener en cuenta la restricción de lograr un nivel de servicio mínimo del 95%. El nivel de servicio, ns , se define mediante la ecuación (4):

$$ns = 1 - \frac{\text{Veces que aparecen faltantes}}{\text{Número de pedidos}} \quad (4)$$

Con esto, se procede a llevar a cabo la simulación, para encontrar bajo las condiciones del caso ilustrativo, los valores de Q y PR que minimicen el costo del inventario.

Aplicación al caso ilustrativo

Se tiene un ítem con demanda normal, con media de 300 unidades diarias y desviación estándar de 90. Este producto se lo suministran dos proveedores, el primero de ellos con tiempo de entrega normal con media de 5 días y desviación estándar de 2 días y costo de colocar pedido de \$2,800 y un segundo proveedor con tiempo de entrega con distribución

uniforme entre 3 y 7 días y costo de colocar pedidos de \$2,500. Ambos proveedores ofertan el mismo precio por artículo, que es de \$325, siendo el precio de venta de \$515, de modo que el costo de cada faltante es la diferencia entre estos 2 montos, \$190.

Se asume que cada vez que se hace un nuevo pedido, se coloca la mitad del mismo para cada proveedor. El costo de mantener cada ítem en inventario es de 2,45 \$/día.

Hay una restricción en cuanto al nivel de servicio, el cual debe ser mayor o igual a 95%.

RESULTADOS

Para plantear la simulación, se asume un periodo diario de tiempo, el cual arranca el primer día con la cantidad de pedido Q y el inventario disminuye diariamente conforme a la demanda normal del artículo, según la ecuación (5):

$$\text{Demanda} = \mu + \sigma X \quad (5)$$

Siendo μ la media y σ la desviación estándar de la distribución normal, mientras que X es un número aleatorio obtenido en Excel para estimar la demanda en forma probabilística.

Para el tiempo de entrega del primer proveedor, que también es probabilístico, L_1 , se aplica la ecuación (6):

$$L_1 = \mu_L + \sigma_L X \quad (6)$$

Siendo μ_L la media y σ_L la desviación estándar de la distribución normal del tiempo de entrega del primer proveedor y X otro número aleatorio.

Para el caso del tiempo de entrega del segundo proveedor, L_2 , éste se obtiene con la ecuación (7):

$$L_2 = b + (a - b)X \quad (7)$$

Siendo a y b los límites superior e inferior de la distribución uniforme y X otro número aleatorio.

Para cada día, se estima el costo de mantenimiento del inventario promedio y los demás costos se contabilizan cada que sucede un evento, ya sea colocar un nuevo pedido, o bien si surgen los faltantes.

De esta forma, se lleva a cabo la simulación con un número suficiente de corridas y se calcula el costo anual, el que se prueba para diferentes combinaciones de valores de Q y PR.

Si el punto de reorden se calculase de la forma tradicional con los tiempos de entrega de los dos proveedores, resultaría en 1,648 unidades.

Para este caso inicial, denominado caso base, con los datos antes mencionados, el costo mínimo se logra con una Q de 2,150 artículos por pedido y un punto de reorden PR de 2,000 unidades, con un nivel de servicio de 95,9% y un costo total de 1,361,400 \$/año, de los cuales 114,800 son por hacer nuevos pedidos, 1,171,800 por mantenimiento del inventario y 74,800 pesos por faltantes.

A partir del caso base, se procede a hacer análisis de sensibilidad, variando la fracción proveída por cada proveedor; luego lo que se ha variado es la desviación estándar de la demanda; después se ha modificado la desviación estándar del tiempo de entrega del proveedor 1; finalmente se han cambiado los límites superior e inferior del tiempo de entrega del proveedor 2, para con ello modificar su desviación estándar. Todo esto con la finalidad de ver cómo impactan estos cambios en el costo del inventario.

Para el primer caso, que es modificar la fracción proveída por cada proveedor, al modificar el valor del caso base, en el cual cada proveedor surte la mitad de la cantidad de pedido Q, hasta los casos extremos en que todo lo provea el primer proveedor en un caso, o que todo lo suministre el segundo proveedor en el extremo opuesto. Al hacer estos cálculos, se han obtenido los resultados que se muestran en la Tabla 1, en la cual se han incluido

los valores de Q y PR para cada opción que llevan al costo mínimo.

El gráfico del cambio del costo del inventario con la fracción provista por el proveedor 1 es el de la Figura 1.

Se observa que el cambio no es lineal y de hecho el costo hace un mínimo para una fracción provista del proveedor 1 entre 0,6 y 0,8. El incremento en costo es más pronunciado para fracciones menores a 0,2, alcanzando un máximo si el proveedor 2 surte todo el pedido, llegando el costo hasta un monto de 1.569 millones de pesos. Los valores máximos del costo han ocurrido en los extremos del gráfico, cuando todo el pedido es surtido por uno de los proveedores.

El punto de reorden casi no ha variado, ya que se ha mantenido entre 2,000 y 2,200 unidades, ocurriendo los valores máximos cuando todo el pedido lo suministra un solo proveedor, ya sea el 1 o el 2. Por su parte Q tampoco ha variado, ya que se ha mantenido entre 2,100 y 2,200 unidades por pedido.

Esto hace ver que es preferible utilizar a los dos proveedores y no a uno solo.

Si lo que cambia a partir del caso base es la desviación estándar de la demanda, la Tabla 2 presenta los resultados de dicho análisis incluyendo los valores de Q y PR que llevan al costo óptimo y la Figura 2 muestra el cambio del costo del inventario, el cual es prácticamente lineal, puesto que el coeficiente de determinación del ajuste lineal es 0,9766 y hace ver que por cada unidad que se incremente la desviación estándar de la demanda, el costo aumenta 2,788 \$/año.

Tabla 1. Valores del costo del inventario al variar la fracción provista de cada proveedor.

Fracción Prov. 1	Fracción Prov. 2	Q, u/pedido	PR, u	Costo, M\$/año
0	1	2,200	2,100	1,569.1
0,2	0,8	2,100	2,000	1,400.0
0,4	0,6	2,100	2,000	1,363.5
0,5	0,5	2,150	2,000	1,361.4
0,6	0,4	2,100	2,000	1,321.4
0,8	0,2	2,200	2,000	1,304.9
1	0	2,200	2,200	1,426.0

Fuente: Los autores.

Fuente: Los autores.

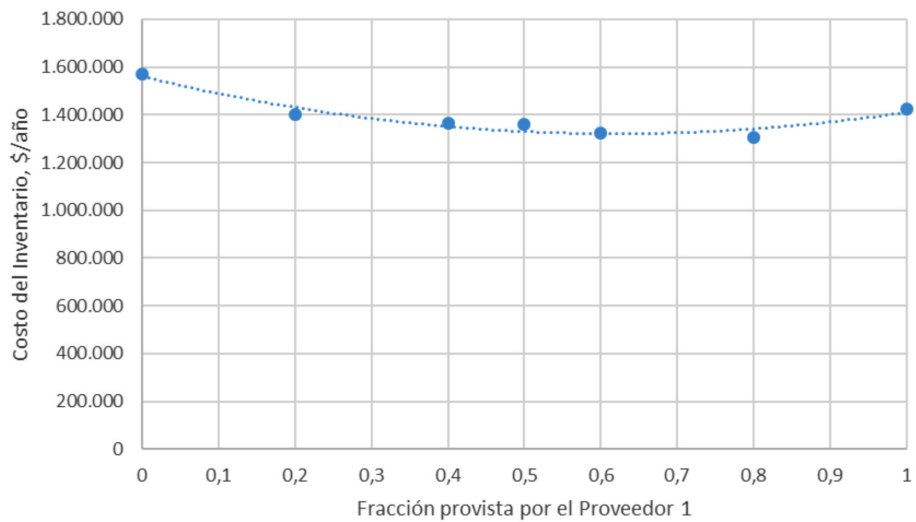


Figura 1. Cambio del costo del inventario con la fracción que surte el proveedor 1.

Tabla 2. Costo del inventario al cambiar la desviación estándar de la demanda.

Desv. Est. Demanda, u/día	Q, u/pedido	PR, u	Costo, M\$/año
0	2,000	1,800	1,172.2
45	2,050	1,900	1,235.3
90	2,150	2,000	1,361.4
135	2,300	2,100	1,498.0
180	2,500	2,200	1,668.1

Fuente: Los autores.

Fuente: Los autores.

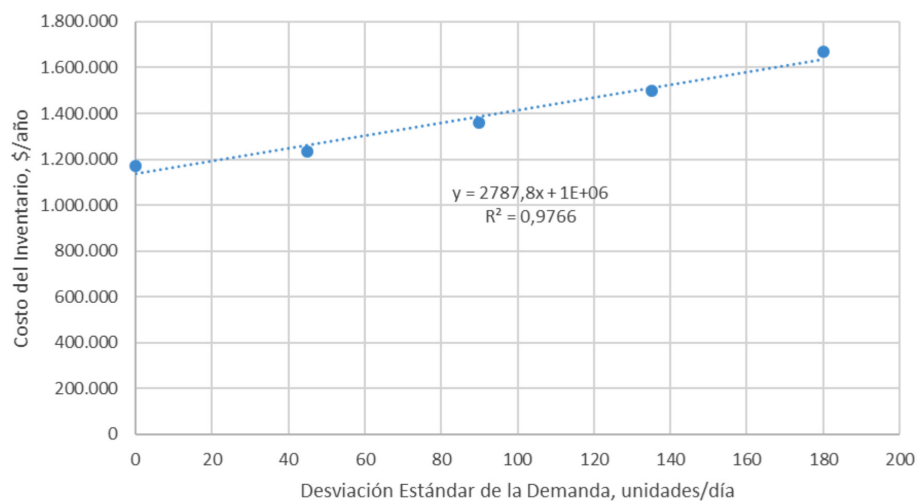


Figura 2. Impacto de la desviación estándar de la demanda en el costo del inventario.

De la Tabla puede verse que tanto Q como PR suben ligeramente al aumentar la desviación estándar de la demanda, Q desde 2,000 hasta 2,500 unidades por pedido y PR de 1,800 a 2,200.

Si lo que cambia respecto al caso base es la desviación estándar del tiempo de entrega del proveedor 1, cuyo patrón es normal, se producen los resultados de la Tabla 3, en la cual puede observarse que tanto Q como PR se incrementan de manera directa con la desviación estándar del tiempo de entrega del proveedor 1.

La variación del costo con la desviación estándar del tiempo de entrega se presenta en la Figura 3, en la cual se ve que el costo aumenta linealmente y de manera directa con la desviación estándar del tiempo de entrega, ya que el coeficiente de determinación

es 0,9867, que es un valor muy próximo a la unidad, mostrando un ajuste casi perfecto. El incremento en el costo es de 56,087 pesos por cada día que se eleve la desviación estándar del tiempo de entrega del proveedor 1.

En cuanto a la variación de Q, ésta aumenta casi al doble en el rango estudiado para la desviación estándar del tiempo de entrega, pasando de 1,900 hasta 3,650 unidades por pedido; por su parte, PR ha cambiado en menor proporción, de 1,750 hasta 2,200 unidades.

Finalmente se analizó el cambio del costo del inventario con la desviación estándar del tiempo de entrega del proveedor 2, manteniendo constante su media en 5 días. Los resultados se sintetizan en la Tabla 4.

Tabla 3. Costo del inventario al cambiar la desviación estándar del tiempo de entrega del Proveedor 1.

Desv. Est. Tiempo Entrega, días	Q, u/pedido	PR, u	Costo, M\$/año
0	1,900	1,750	1,207.7
2	2,150	2,000	1,361.4
4	2,500	2,100	1,422.5
8	3,650	2,200	1,671.3

Fuente: Los autores.

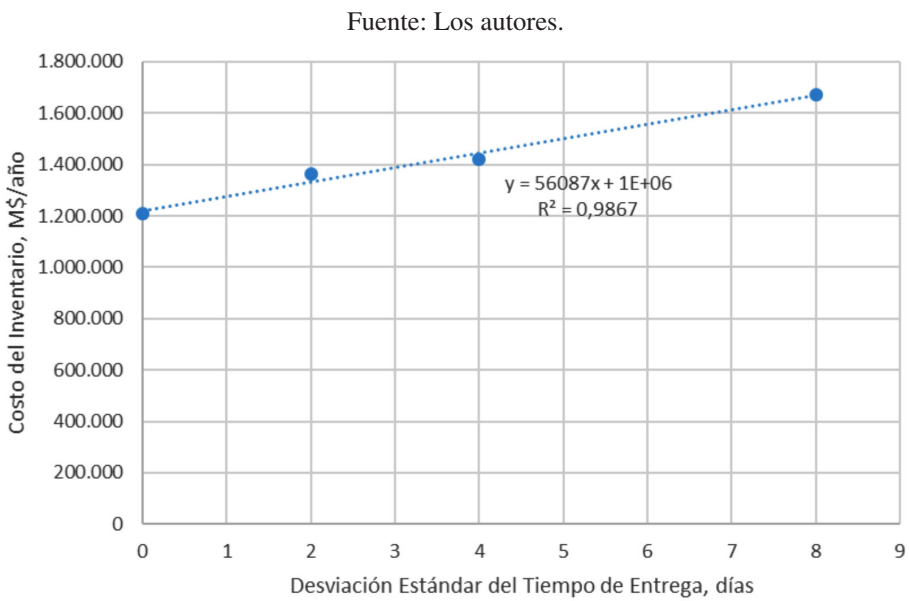


Figura 3. Cambio del costo del inventario con la desviación estándar del proveedor 1.

Tabla 4. Cambio del costo del inventario con la desviación estándar del tiempo de entrega del proveedor 2.

Desv. Est. Tiempo Entrega, días	Q, u/pedido	PR, u	Costo, M\$/año
0.5774	2,050	1,950	1,277.7
1.1547	2,150	2,000	1,361.4
1.7321	2,150	2,150	1,448.0
2.3094	2,250	2,200	1,519.5
2.8868	2,550	2,300	1,642.5

Fuente: Los autores.

De la Tabla se aprecia que el costo aumenta de manera lineal y directa con la desviación estándar. La cantidad de pedido Q ha oscilado entre 2,050 y 2,550 unidades, y el punto de reorden en menor medida, desde 1,950 hasta 2,300 unidades. Ambas variaciones son también directas con la desviación estándar.

El gráfico del cambio del costo del inventario se muestra en la Figura 4, en la cual se observa lo antes comentado, un cambio directo y lineal, ya que el coeficiente de determinación del ajuste de regresión ha sido de 0,9921, que es casi perfecto y el incremento en el costo es 153,755 pesos por cada día en que aumenta la desviación estándar del tiempo de entrega del segundo proveedor, que es un valor casi del triple comparado con el del proveedor 1.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados pueden establecerse algunas conclusiones, la mayoría de las cuales concuerdan con hallazgos de otros investigadores reportados en la literatura citada.

Una de ellas es la recomendación de usar a los 2 proveedores, ya que, al utilizarlos a los 2, el costo del inventario disminuye. Esto concuerda con los hallazgos de varios investigadores [7], [20], [22], [25], por lo cual se sugiere establecer una buena política de definición de los proveedores, la cual permita hacer los pedidos de manera óptima para minimizar el costo del inventario.

También ha quedado claro que la variabilidad de los tiempos de entrega de los proveedores impacta

Fuente: Los autores.

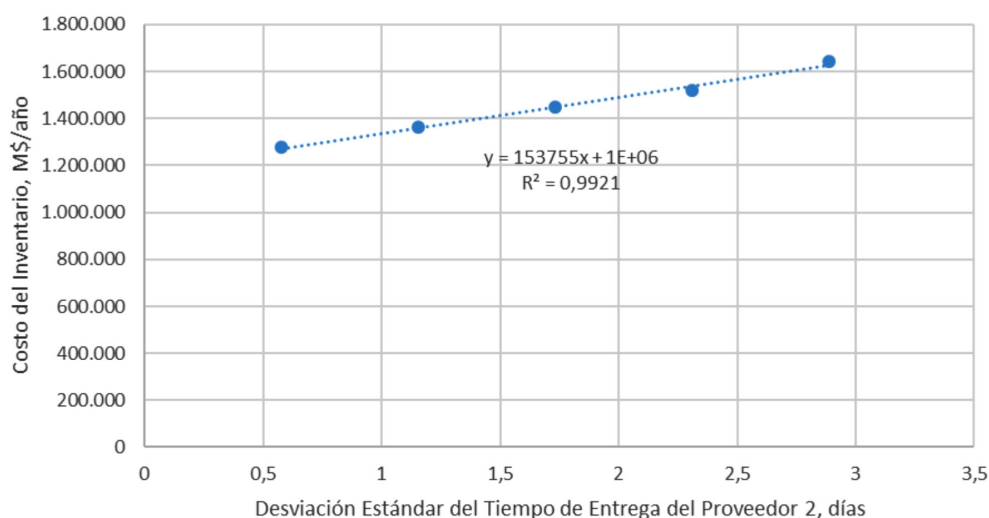


Figura 4. Cambio del costo del inventario con la desviación estándar del proveedor 2.

negativamente al costo del inventario, en particular el del proveedor 2, que tiene un tiempo de entrega uniforme, lo que concuerda con lo que señalan algunos académicos como Kumar [15] y Afsar *et al.* [18], quienes sugieren incluso un pago extra a los proveedores si disminuyen la incertidumbre en sus entregas.

Otro hallazgo de este trabajo es algo que concuerda con muchos académicos de la temática de inventarios, en el sentido que, si se disminuye la variabilidad de la demanda de los productos, el costo del inventario disminuye.

Asimismo, y de acuerdo con Golpîra [7], si se hace un suministro más frecuente del producto, es decir, un valor menor de la cantidad de pedido, esto reduce el costo del inventario.

También y en consonancia con Glock [11], si hay más flexibilidad en la forma de estructurar el aprovisionamiento, esto impacta favorablemente al costo del inventario.

Tal y como señalan Sculli y Wu [4], al utilizar a dos proveedores, esto hace que el punto de reorden baje, lo que también lleva a una disminución del costo del inventario, sin que baje el nivel de servicio.

Con esto queda claro que definir una política de inventario apropiada con 2 proveedores, impacta en su costo y brinda beneficios económicos a las organizaciones.

En este estudio no se ha considerado el caso de cruce de órdenes, que suele aparecer en estos casos de manejar pedidos con varios proveedores y que sería tema de interés para trabajos futuros.

REFERENCIAS

- [1] S. Minner, "Multiple-supplier inventory models in supply chain management: a review," *International Journal of Production Economics*, vol. 81, pp. 265-279, 2003, doi: 10.1016/S0925-5273(02)00288-8.
- [2] S. Chopra y P. Meindl, *Administración de la Cadena de Suministro: Estrategia, Planeación y Operación*, 3era ed. México: Pearson Educación, 2008, pp. 3-10.
- [3] A.J. Carreño-Solís, *Cadena de Suministro y Logística*, 1era ed. Lima, Perú: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 2018, pp. 19-20.
- [4] D. Sculli and S.Y. Wu, "Stock control with two suppliers and normal lead times," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 32, no. 11, pp. 1003-1009, 1981, doi: 10.2307/2581854.
- [5] H.S. Lau and L.G. Zhao, "Optimal ordering policies with two suppliers when lead times and demands are all stochastic," *European Journal of Operational Research*, vol. 68, no. 1, pp. 120-133, 1993, doi: 10.1016/0377-2217(93)90080-7.
- [6] A. Diabat, "Hybrid algorithm for a vendor managed inventory system in a two-echelon supply chain," *European Journal of Operational Research*, vol. 238, no. 1, pp. 114-121, 2014, doi: 10.1016/j.ejor.2014.02.061.
- [7] H. Golpîra, "Optimal integration of the facility location problem into the multi-project multi-supplier multi-resource Construction Supply Chain network design under the vendor managed inventory strategy," *Expert Systems with Applications*, vol. 139, no. C, pp. 112841, 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2019.112841.
- [8] J. Svoboda, S. Minner, and M. Yao, "Typology and literature review on multiple supplier inventory control models," *European Journal of Operational Research*, vol. 293, no. 1, pp. 1-23, 2021, doi: 10.1016/j.ejor.2020.11.023.
- [9] J. van den Bogaert and W. van Jaarsveld, "Vendor-managed inventory in practice: understanding and mitigating the impact of supplier heterogeneity," *International Journal of Production Research*, vol. 60, no. 20, pp. 6087-6103, 2022, doi: 10.1080/00207543.2021.1983222.
- [10] C.H. Glock, "A Multiple-vendor single-buyer integrated inventory model with a variable number of vendors," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 60, no. 1, pp. 173-182, 2011, doi: 10.1016/j.cie.2010.11.001.
- [11] C.H. Glock, "A comparison of alternative delivery structures in a dual sourcing environment," *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 11, pp. 3095-3114, 2012, doi: 10.1080/00207543.2011.592160.
- [12] F.G. Beck, C.H. Glock, and T. Kim, "Coordination of a production network with

- a single buyer and multiple vendors with geometrically increasing batch shipments,” *International Journal of Production Economics*, vol. 193, pp. 633-646, 2017, doi: 10.1016/j.ijpe.2017.07.015.
- [13] C.H. Glock and T. Kim, “Shipment consolidation in a multiple-vendor-single-buyer integrated inventory model,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 70, pp. 31-42, 2014, doi: 10.1016/j.cie.2014.01.006.
- [14] J. Riezebos, “Inventory order crossovers,” *International Journal of Production Economics*, vol. 104, no. 2, pp. 666-675, 2006, doi: 10.1016/j.ijpe.2004.11.011.
- [15] A. Kumar, “Component inventory costs in an assembly problem with uncertain supplier lead-times,” *IIE transactions*, vol. 21, no. 2, pp. 112-121, 1989, doi: 10.1080/07408178908966214.
- [16] T.E. Saputro, G. Figueira, and B. Almada-Lobo, “Integrating supplier selection with inventory management under supply disruptions,” *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 11, pp. 3304-3322, 2021, doi: 10.1080/00207543.2020.1866223.
- [17] S. Teerasoponpong and A. Sopadang, “Decision support system for adaptive sourcing and inventory management in small-and medium-sized enterprises,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 73, pp. 102226, 2022, doi: 10.1016/j.rcim.2021.102226.
- [18] H.M. Afsar, O. Ben-Ammar, A. Dolgui, and F. Hnaïen, “Supplier replacement model in a one-level assembly system under lead-time uncertainty,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 10, pp. 3366, 2020, doi: 10.3390/app10103366.
- [19] S. Handley, K. Skowronski, and D. Thakar, “The single-sourcing versus multisourcing decision in information technology outsourcing,” *Journal of Operations Management*, vol. 68, no. 6-7, pp. 702-727, 2022, doi: 10.1002/joom.1174.
- [20] Z.A.M.S. Juman, R. M’Hallah, R. Lokuhetti, and O. Battaïa, “A multi-vendor multi-buyer integrated production-inventory model with synchronised unequal-sized batch delivery,” *International Journal of Production Research*, vol. 61, no. 2, pp. 462-484, 2023, doi: 10.1080/00207543.2021.2009586.
- [21] X. Xiong, Y. Li, W. Yang, and H. Shen, “Data-driven robust dual-sourcing inventory management under purchase price and demand uncertainties,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 160, Art. no. 102671, 2022, doi: 10.1016/j.tre.2022.102671.
- [22] C. Yang, D. Huang, and C. Xu, “Multi-index base-stock policy for inventory systems with multiple capacitated suppliers,” *OR Spectrum*, vol. 44, no. 1, pp. 155-177, 2022, doi: 10.1007/s00291-021-00658-5.
- [23] Ö. Yazlali and F. Erhun, “Dual-supply inventory problem with capacity limits on order sizes and unrestricted ordering costs,” *IIE Transactions*, vol. 41, no. 8, pp. 716-729, 2009, doi: 10.1080/07408170802705768.
- [24] W. Zhang, Z. Hua, and S. Benjaafar, “Optimal inventory control with dual-sourcing, heterogeneous ordering costs and order size constraints,” *Production and Operations Management*, vol. 21, no. 3, pp. 564-575, 2012, doi: 10.1111/j.1937-5956.2011.01294.x.
- [25] Z. Hua, Y. Yu, W. Zhang, and X. Xu, “Structural properties of the optimal policy for dual-sourcing systems with general lead times,” *IIE Transactions*, vol. 47, no. 8, pp. 841-850, 2015, doi: 10.1080/0740817X.2014.982839.
- [26] E.J. Fox, R. Metters, and J. Semple, “Optimal inventory policy with two suppliers,” *Operations Research*, vol. 54, no. 2, pp. 389-393, 2006, doi: 10.1287/opre.1050.0229.
- [27] W. Zhang and Z. Hua, “Optimal inventory policy for capacitated systems with two supply sources,” *Operations Research Letters*, vol. 43, no. 1, pp. 12-18, 2013, doi: 10.1016/j.orl.2012.11.003.