

# Aplicación del procedimiento FePIA en la medición de la robustez en cadenas de suministro\*

Rafael Tordecilla Madera\*\*, Leonardo González Rodríguez\*\*\*

## Resumen

**Introducción.** La incertidumbre en las cadenas de suministro es un factor importante que puede influenciar la efectividad de su configuración y coordinación. Una manera de abordarla en el proceso de diseño de una cadena de suministros es tomando en consideración el concepto de robustez, entendido como la preservación de ciertas características deseadas del sistema, a pesar de que se presenten fluctuaciones en el comportamiento de sus partes componentes o del ambiente. **Objetivo.** Evaluar el Procedimiento FePIA (*Features, Perturbation, Impact, Analysis*) en la determinación de la robustez en el problema de planeación de la capacidad y localización de almacenes en cadenas de suministro. **Materiales y métodos.** El procedimiento FePIA fue evaluado mediante un modelo de programación lineal entera-mixta multiperíodo y de único producto de una cadena de suministros compuesta por tres eslabones. **Resultados.** La aplicación de este procedimiento permitió definir requerimientos de robustez, características de desempeño y parámetros de perturbación; sin embargo, no se pudo encontrar una relación general entre los parámetros de perturbación y las características de desempeño para el 62 % de las instancias utilizadas. Por tanto, no fue posible obtener con la metodología original una región de robustez para el problema tratado. Un análisis posterior permitió observar que la estructura de la cadena está asociada a dicha problemática. **Conclusiones.** El procedimiento FePIA debe ser modificado para su completa aplicación al problema de planeación de la capacidad y localización de almacenes en cadenas de suministro.

**Palabras clave:** robustez, cadena de suministros, procedimiento FePIA, programación lineal, logística.

## Application of the FePIA procedure on the robustness measurement in supply chains

### Abstract

**Introduction.** Uncertainty on supply chains is an important factor that can influence the effectiveness of their configuration and coordination. A way to approach it in the design process of supply chains is taking into account the concept of robustness, understanding it as the preservation of certain desired characteristics in the system, in spite of the fluctuations in their components or in the environment. **Objective.** Evaluate the FePIA (*Features, Perturbation, Impact, Analysis*) procedure in the determination of the robustness in capacity planning and warehouse location problem in supply chains. **Materials and methods.** The FePIA procedure was evaluated by means of a multi-period mixed integer programming and of only one product model, applied on a supply chain composed of three links. **Results.** The application of such procedure allowed the definition of robustness requirements, performance features and perturbation parameters. It was not possible, however, to find a general relationship between the perturbation parameters and the performance features for 62% of the instances used. Therefore, it was not possible to obtain a robustness region with the original methodology. Further analysis could demonstrate that the structure of the chain is associated to that

\* Artículo original resultado del proyecto de investigación "Aplicación y evaluación de una metodología basada en el procedimiento FePIA para caracterizar la relación robustez-costo en el problema de planeación de la capacidad y localización de almacenes en cadenas de suministro"

\*\* Ingeniero Industrial, Magíster en Diseño y Gestión de Procesos. Grupo de Investigación en Sistemas Logísticos, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Sabana. Docente Fundación Universitaria Agraria de Colombia. Autor corresponsal. Calle 170 #54A-10, Programa de Ingeniería Industrial, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia. E-mail: tordecilla.rafael@uniagraria.edu.co, rafaeldtm@hotmail.com Tel: (1) 667 1515 - Ext. 139. Fax: (1) 672 3773

\*\*\* Ingeniero Industrial, Magíster en Ingeniería Industrial. Grupo de Investigación en Sistemas Logísticos. Facultad de Ingeniería. Universidad de La Sabana. Docente tiempo completo Universidad de La Sabana, leonardo.gonzalez1@unisabana.edu.co

problem. **Conclusions.** The FePIA procedure must suffer modifications for being fully applied to the capacity planning and warehouse location problem in supply chains.

**Palabras clave:** robustness, supply chain, FePIA procedure, linear programming, logistics.

### Aplicação do procedimento FePIA na medição da robustez em cadeias de suprimentos

#### Resumo

**Introdução.** A incerteza nas cadeias de suprimentos é um fator importante que pode influenciar a efetividade de sua configuração e coordenação. Uma maneira de abordar isso no processo de desenho de uma cadeia de suprimentos é tomando em consideração o conceito de robustez, entendido como a preservação de certas características desejadas do sistema, apesar de que se apresentem flutuações no comportamento de suas partes componentes ou do ambiente. **Objetivo.** Avaliar o Procedimento FePIA (Features, Perturbation, Impact,

Analysis) na determinação da robustez no problema de planejamento da capacidade e localização de armazéns em cadeias de suprimentos. **Materiais e métodos.** O procedimento FePIA foi avaliado mediante um modelo de programação lineal inteira-mista multi-período e de único produto numa cadeia de suprimentos composta por três elos. **Resultados.** A aplicação deste procedimento permitiu definir requerimentos da robustez, características de desempenho e parâmetros de perturbação; porém, não se pôde encontrar uma relação geral entre os parâmetros de perturbação e as características de desempenho para 62 % das instâncias utilizadas. Por tanto, não foi possível obter com a metodologia original uma região da robustez para o problema tratado. Uma análise posterior permitiu observar que a estrutura da cadeia está associada com a referida problemática. **Conclusões.** O procedimento FePIA deve ser modificado para sua completa aplicação no problema de planejamento da capacidade e localização de armazéns em cadeias de suprimentos.

**Palavras chave:** robustez, cadeia de suprimentos, procedimento FePIA, programação lineal, logística.

---

## Introducción

En los procesos de planeación de las cadenas de suministro, la incertidumbre es un factor importante que puede influenciar la efectividad de su configuración y coordinación, afectando su desempeño (Peidro, Mula, & Poler, 2009). Blackhurst, Wu, & O'Grady (2004) consideran, como una de las causas de su inherente complejidad, su naturaleza dinámica y su incertidumbre en la demanda, tiempos de transporte, tiempos de manufactura, entre otros. Varios autores consideran que no tener en cuenta tal incertidumbre puede tener efectos negativos en la cadena de suministros, tales como generar constante insatisfacción de la demanda que lleva a pérdidas de participación de mercado o costos de inventario excesivamente altos (Gupta, & Maranas, 2003), incrementando la probabilidad de disminución de las utilidades (Jung, Blau, Pekny, Reklaitis, & Eversdyk, 2004).

Una manera de abordar la incertidumbre es a través del concepto de robustez. Bertsimas &

Sim (2004) comentan que una solución robusta es aquella que es inmune a la incertidumbre en los datos. Klibi, Martel, y Guitouni (2010) afirman que robustez es la cualidad de una cadena de suministros para permanecer efectiva para todos los futuros posibles. Ali, Maciejewski, Siegel y Kim (2004) la definen como la preservación de ciertas características deseadas del sistema, a pesar de que se presenten fluctuaciones en el comportamiento de sus partes componentes o del ambiente.

Una de las formas más comunes de abordar la robustez en cadenas de suministro es mediante la optimización robusta. Autores como Aghezzaf (2005), Sungur, Ordóñez, y Dessouky (2008), Bertsimas, y Thiele (2004), Pan, & Nagi (2010), y Mulvey, Vanderbei, y Zenios (1995) hacen uso de esta herramienta. Este último autor introdujo el concepto, planteando que debe establecerse un conjunto de escenarios  $\Omega = \{1, 2, 3, \dots, S\}$ , con una probabilidad de ocurrencia  $p_s$  tal que  $\sum_{s \in \Omega} p_s = 1$ .

Sin embargo, bajo condiciones de profunda incertidumbre la información disponible no es suficiente para estimar una probabilidad para estos escenarios (Klibi et al., 2010). Además, dado que este problema debe ser resuelto para cada escenario  $s$ , mientras más escenarios sean considerados, mayor será el tiempo de resolución del modelo por ser este generalmente NP-Completo, incrementándose dramáticamente el tiempo computacional (Aghezzaf, 2005). Es por este motivo que se hace útil buscar una forma alternativa de abordar la robustez en cadenas de suministro.

Ali et al. (2004) proponen el procedimiento FePIA para sistemas computacionales paralelos y distribuidos, el cual es usado a manera de métrica de robustez para determinar de manera cuantitativa qué tan robusto es un sistema. El presente trabajo hace uso de esta metodología en el problema de planeación de la capacidad y localización de almacenes para un horizonte de planeación de varios períodos y considerando mercados con demandas inciertas. Así, pues, efectivamente el logro de este objetivo es el que permite hacer un aporte al conocimiento pues no se ha encontrado evidencia de aplicación del procedimiento FePIA en este contexto.

## Materiales y métodos

En esta sección se dará una breve explicación del procedimiento FePIA, el cual ha sido expuesto por Ali et al. (2004) para determinar cuantitativamente qué tan robusto es un sistema. En el caso particular del presente artículo este sistema corresponde a una cadena de suministro, la cual se ha representado a través de un modelo de programación entera-mixta que se mostrará al final de la sección. Las instancias usadas para la alimentación de dicho modelo son las expuestas por Aghezzaf (2005).

### Procedimiento FePIA

El Procedimiento FePIA propuesto por Ali et al. (2004) consta de los pasos listados a continuación, y son resumidos en la figura 1.

1. Describir cuantitativamente el requerimiento ( $\Gamma$ ) que hace que el sistema estudiado

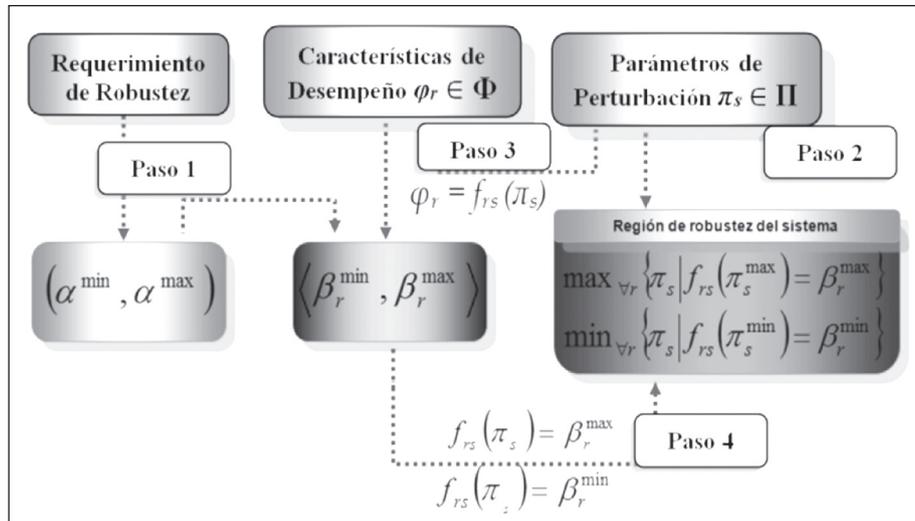
sea considerado robusto. Basado en este, determinar las características (*Features*) de desempeño del sistema  $\Phi$  que deben estar limitadas para satisfacer tal requerimiento. Así, para cada  $\varphi_r \in \Phi$  se describe una variación tolerable en  $\varphi_r$ , definida por  $(\beta_r^{min}, \beta_r^{max})$ , tal que no se viole el requerimiento de robustez.

2. Determinar los parámetros de perturbación (Perturbation)  $\Pi$  que afectan las características de operación del sistema y su robustez. Así, se tiene que  $\pi_s \in \Pi$ .
3. Identificar el impacto (Impact) que tienen los parámetros de perturbación sobre las características de desempeño, determinando una función  $f_{rs}$  tal que  $\varphi_r = f_{rs}(\pi_s)$ .
4. Determinar la robustez mediante un análisis (Analysis) en el que se establezca la más pequeña variación colectiva en los valores de los parámetros de perturbación que causarán que alguna de las características de desempeño viole el requerimiento de robustez. Para cada  $\varphi_r \in \Phi$  se determinan los valores límite de  $\pi_s$  tal que satisfagan las relaciones  $f_{rs}(\pi_s) = \beta_r^{min}$  y  $f_{rs}(\pi_s) = \beta_r^{max}$ .

### Modelo matemático

Con base en Aghezzaf (2005) se construyó un modelo de programación lineal entera-mixta (tabla 1) para el problema de la planeación estratégica de la capacidad y localización de almacenes multiperíodo y de único producto de una cadena compuesta por tres eslabones.

La ecuación (1) indica la función objetivo, que minimiza el costo total de diseño de la cadena. La ecuación (2) restringe que la cantidad total a enviar desde cada planta de producción en cada período sea como máximo igual al tamaño de su expansión de capacidad. La ecuación (3) limita el nivel de expansión de capacidad a la decisión de expandir o no la misma. La ecuación (4) indica que la cantidad a enviar desde cada centro de distribución en cada período no debe superar su capacidad. La ecuación (5) indica que los envíos a cada centro de consumo en cada período no deben superar la demanda. La ecuación (6) es una restricción de equilibrio de flujo de producto para cada centro de distribución en cada período. La ecuación (7) es la restricción de no negatividad y la ecuación (8) indica las variables binarias.



**Figura 1. Procedimiento FePIA.**

Fuente: elaborado por los autores

**Tabla 1. Modelo de programación lineal utilizado**

Subíndices	
$i = 1,2$ : Plantas de producción (PP)	$k = 1,2,3,4,5$ : centros de consumo (CC)
$j = 1,2,3$ : Centros de distribución (CD)	$t = 1,2,3,4,5$ : Periodos de tiempo
Parámetros	
$CP_{ij}^t$ = Costo unitario de transporte entre la PP $i$ y el CD $j$ en el periodo $t$	$f_j^t$ = Costo fijo de operación del CD $j$ en el periodo $t$
$CC_{jk}^t$ = Costo unitario de transporte entre el CD $j$ y el CC $k$ en el periodo $t$	$CAP_{i0}^t$ = Capacidad de la PP $i$ al inicio del período 1
$CT_{jj'}^t$ = Costo unitario de transferencia entre el CD $j$ y el CD $j'$ en el período $t$ para $j \neq j'$ . Costo unitario de mantenimiento de inventario en el CD $j$ en el periodo $t$ para $j = j'$	$CAPMAX_i^t$ = Máxima expansión de capacidad de la PP $i$ en el período $t$
$g_i^t$ = Costo fijo de expansión de capacidad de la PP $i$ en el periodo $t$	$CAPCD_j^t$ = Capacidad del CD $j$ en el periodo $t$
$h_i^t$ = Costo unitario de expansión de capacidad de la PP $i$ en el periodo $t$	$d_k^t$ = Demanda del CC $k$ en el periodo $t$
	$CPen$ = Costo unitario de penalización por demanda insatisfecha
Variables	
$x_{ij}^t$ = Cantidad a enviar desde la PP $i$ hasta el CD $j$ en el periodo $t$	$u_i^t$ = Binaria que indica si se expande o no la capacidad de la PP $i$ en el periodo $t$
$y_{jk}^t$ = Cantidad a enviar desde el CD $j$ hasta el CC $k$ en el periodo $t$	$w_i^t$ = Tamaño de expansión de capacidad de la PP $i$ en el periodo $t$
$z_{jj'}^t$ = Cantidad a transferir desde el CD $j$ hasta el CD $j'$ en el periodo $t$ para $j \neq j'$ . Cantidad a mantener en inventario en el CD $j$ en el periodo $t$ para $j = j'$	$v_j^t$ = Binaria que indica si el CD $j$ es utilizado o no en el periodo $t$
	$CTOTAL$ = Costo total de diseño de la cadena

**Continuación tabla 1**

<b>Modelo</b>	
$  \begin{aligned}  \text{Min } CTOTAL = & \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \sum_{t=1}^5 CP_{ij}^t x_{ij}^t + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 CC_{jk}^t y_{jk}^t + \sum_{j=1}^3 \sum_{j'=1}^3 \sum_{t=1}^5 CT_{jj'}^t z_{jj'}^t \\  & + \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^5 (g_i^t u_i^t + h_i^t w_i^t) + \sum_{j=1}^3 \sum_{t=1}^5 f_j^t v_j^t + CPen * \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 \left( d_k^t - \sum_{j=1}^3 y_{jk}^t \right)  \end{aligned}  $	(1)
s.a.	
$  \sum_{j=1}^3 x_{ij}^t \leq CAPI_i + \sum_{\tau=1}^t w_i^\tau \quad \forall i, t  $	(2)
$  w_i^t \leq CAPMAX_i^t u_i^t \quad \forall i, t  $	(3)
$  \sum_{k=1}^5 y_{jk}^t + \sum_{j'=1}^3 z_{jj'}^t \leq CAPCD_j^t v_j^t \quad \forall j, t  $	(4)
$  \sum_{j=1}^3 y_{jk}^t \leq d_k^t \quad \forall k, t  $	(5)
$  \sum_{i=1}^2 x_{ij}^t + \sum_{j'=1}^3 z_{j'j}^{t-1} = \sum_{k=1}^5 y_{jk}^t + \sum_{j'=1}^3 z_{jj'}^t \quad \forall j, t  $	(6)
$  \forall x_{ij}^t, y_{jk}^t, z_{jj'}^t, w_i^t \geq 0  $	(7)
$  \forall u_i^t, v_j^t \in \{0,1\}  $	(8)

Fuente: elaborado por los autores

## Resultados y discusión

Para facilitar el proceso de experimentación, el paso 1 del procedimiento FePIA se dividió en dos sub-etapas. Estas sub-etapas no se llevaron a cabo de manera contigua, sino que la primera sub-etapa se hizo antes de los pasos 2 y 3 del procedimiento FePIA, y la segunda, luego de la realización de los mismos (figura 1).

### Paso 1 del Procedimiento FePIA (Primera sub-etapa)

Esta sub-etapa consiste en la descripción cualitativa y cuantitativa del requerimiento de robustez  $\Gamma$  y de las características de desempeño  $\Phi$ , donde  $\Gamma$  es un intervalo asociado a uno o varios indicadores, que señala si la cadena de suministros está funcionando o no correctamente. En la literatura se pueden

encontrar muchas medidas de desempeño para una cadena de suministros (Chan, 2003). En particular, Gupta, Maranas, y McDonald (2000) proponen el nivel de satisfacción de la demanda como una medida adecuada para la robustez. Tal indicador fue el escogido para la presente investigación, cuantificándolo como *Porcentaje de demanda total satisfecha*  $\Gamma$ , definido como la relación existente entre las unidades de producto efectivamente entregadas y la demanda total del mismo (ecuación 9).

$$\Gamma = \left[ \left( \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 y_{jk}^t \right) / \left( \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 d_k^t \right) \right] * 100\% \quad (9)$$

En cuanto a  $\Phi$ , se tomaron como características de desempeño las siguientes, basadas en (Aghezzaf, 2005):

- **Nivel total de expansión de la capacidad** ( $\varphi_1$ ). Se refiere al aumento de capacidad de las plantas (expresada en unidades de producto) en cada período. Está definida como la suma de todas las expansiones de capacidad individuales (ecuación 10).

$$\varphi_1 = \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^5 w_i^t \quad (10)$$

- **Número de centros de distribución que se deben utilizar en cada período t.** ( $\varphi_2$ ) Indica la cantidad total de centros de distribución que serán utilizados en cada uno de los periodos del horizonte de planeación en consideración.
- **Cantidad de producto promedio que se envía entre instalaciones.** Cantidad promedio de envío desde las plantas de producción hasta los centros de distribución en cada período t ( $\varphi_3$ ) y Cantidad promedio de envío desde los centros de distribución hasta los centros de consumo en cada período t ( $\varphi_4$ ) (ecuaciones 11 y 12).

$$\varphi_3 = \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 x_{ij}^t \right) / \left( \begin{array}{l} \text{Arcos totales utilizados entre} \\ \text{las plantas de producción} \\ \text{y los centros de distribución} \end{array} \right) \quad \forall t \quad (11)$$

$$\varphi_4 = \left( \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 y_{jk}^t \right) / \left( \begin{array}{l} \text{Arcos totales utilizados entre} \\ \text{los centros de distribución} \\ \text{y los centros de consumo} \end{array} \right) \quad \forall t \quad (12)$$

- **Estructura de la cadena de suministros.** ( $\varphi_5$ ) Característica de desempeño cualitativa que se refiere a las configuraciones que adquiere la cadena, es decir, determina de manera gráfica e integral qué arcos y centros de distribución utilizar.

### Paso 2 del Procedimiento FePIA

Según Peidro et al. (2009), son tres las fuentes de incertidumbre para una cadena de suministros: abastecimiento, proceso-manufactura y demanda. En el presente trabajo solo se tuvo en cuenta la demanda ( $\pi =$  Demanda promedio) (Ecuación 13).

$$\pi = \left( \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 d_k^t \right) / 25 \quad (13)$$

### Paso 3 del Procedimiento FePIA

Aghezzaf (2005) propone cinco escenarios (ESC) teóricos de demanda, en los cuales esta variable toma valores diversos para cada centro de consumo ( $k$ ) y cada período ( $t$ ). Así, esta variable se identificará como  $d_{k,ESC}^t$ . Con base en esta, se han definido dos nuevos parámetros (Ecuaciones 14 y 15).

$$dmin_k^t = \min_{ESC} \{d_{k,ESC}^t\} \quad \forall k, t \quad (14)$$

$$dmax_k^t = \max_{ESC} \{d_{k,ESC}^t\} \quad \forall k, t \quad (15)$$

Así, se determinó que la demanda ( $d_k^t$ ) con la cual se calcula el parámetro de perturbación  $\pi$  (ecuación 13) oscilaría entre  $dmin_k^t$  y  $dmax_k^t$  (ecuación 16), en donde  $\delta$  es un parámetro que varía entre cero (0) y veinte (20), de tal manera que en total el modelo se alimenta con 21 valores de  $d_k^t$  ( $\forall k, t$ ), los cuales varían lineal y proporcionalmente entre  $dmin_k^t$  y  $dmax_k^t$ . Debe aclararse que, en general, no es necesario que  $\delta$  varíe entre 0 y 20; sin embargo, mientras más valores sean considerados para este parámetro, más estructuras podrán ser evaluadas.

$$d_k^t = dmin_k^t + \frac{\delta * (dmax_k^t - dmin_k^t)}{20} \quad \forall k, t \quad (16)$$

Esta forma de variar el parámetro de perturbación es similar a aquella de la optimización robusta en cuanto a que no tiene en cuenta variables aleatorias, pero en el modelo se mantiene el control sobre su variabilidad incierta. Sin embargo, la ventaja del método propuesto aquí es que permite considerar tantos escenarios de demanda como se deseen entre un mínimo y un máximo posible, sin tener el inconveniente del gran tiempo computacional consumido por la optimización robusta. La tabla 2 muestra los resultados de las primeras corridas del modelo.

Al intentar establecer la relación  $\varphi_r = f_r(\pi)$ , cada una de las filas ( $\varphi_r$ ) de la tabla 2 se graficó contra  $\pi$ . Algunas de tales gráficas se muestran en la figura 2. Allí se observa que difícilmente puede establecerse una relación general entre las variables de interés, ya sea porque estadísticamente no hay correlación o porque las gráficas no se ajustan a ningún

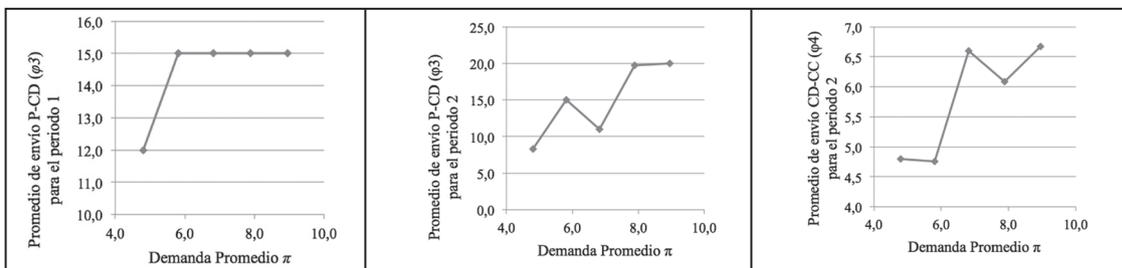
comportamiento matemático típico. Esto indica que el tercer paso del procedimiento FePIA no puede llevarse a cabo de la manera planeada inicialmente. Sin embargo, los cambios bruscos observados gráficamente en las características de desempeño  $\varphi_3$  y  $\varphi_4$  sugieren que la cadena modelada está presentando distintas estructuras

dependiendo de la demanda, debido a que estos parámetros se definen a través de los arcos (ecuaciones 11 y 12) asociados al tipo de estructura que tome la cadena. Estos resultados condujeron a la definición de una nueva característica de desempeño:  $\varphi_5 = \text{Estructura de la cadena de suministros en cada período } t$ .

**Tabla 2. Resultados de las primeras corridas del modelo**

VARIABLE DE SALIDA	DEMANDA				
	Mínima ( $\pi = 4,8$ )	Entre Mínima y Promedio ( $\pi = 5,8$ )	Promedio ( $\pi = 6,8$ )	Entre Promedio y Máxima ( $\pi = 7,9$ )	Máxima ( $\pi = 9,0$ )
$\Gamma$	100,00 %	99,38 %	98,94 %	96,76 %	91,52 %
$\varphi_1$	5	10	23	30	35
$\varphi_2$ para el t 1	1	1	1	1	1
$\varphi_2$ para el t 2	2	2	2	2	2
$\varphi_2$ para el t 3	1	2	2	2	2
$\varphi_2$ para el t 4	1	1	1	1	1
$\varphi_2$ para el t 5	1	1	1	1	1
$\varphi_3$ para el t 1	12,0	15,0	15,0	15,0	15,0
$\varphi_3$ para el t 2	8,3	15,0	11,0	19,8	20,0
$\varphi_3$ para el t 3	12,5	10,0	14,3	16,7	18,3
$\varphi_3$ para el t 4	11,0	13,3	15,5	18,0	20,5
$\varphi_3$ para el t 5	12,0	13,9	15,8	17,7	19,5
$\varphi_4$ para el t 1	4,6	5,5	6,0	6,0	6,0
$\varphi_4$ para el t 2	4,8	4,8	6,6	6,1	6,7
$\varphi_4$ para el t 3	5,4	6,8	7,2	8,8	9,2
$\varphi_4$ para el t 4	4,4	5,3	6,2	7,2	8,2
$\varphi_4$ para el t 5	4,8	5,6	6,3	7,1	7,8

Fuente: elaborada por los autores



**Figura 2.  $\pi$  contra varios  $\varphi_r$  en varios periodos**

Fuente: Elaborado por los autores

### Nuevas corridas teniendo en cuenta la diferenciación entre estructuras

Una vez definido  $\varphi_5$  se repitió la experimentación, pero esta vez registrando las configuraciones que resultaban en cada

corrida. Luego se fijaron las estructuras encontradas con la demanda mínima ( $\pi = 4,8$ ) a través de restricciones adicionales del modelo matemático, y se registraron los valores de  $\Gamma$  y  $\varphi$ , al variar  $\pi$  (tabla 3).

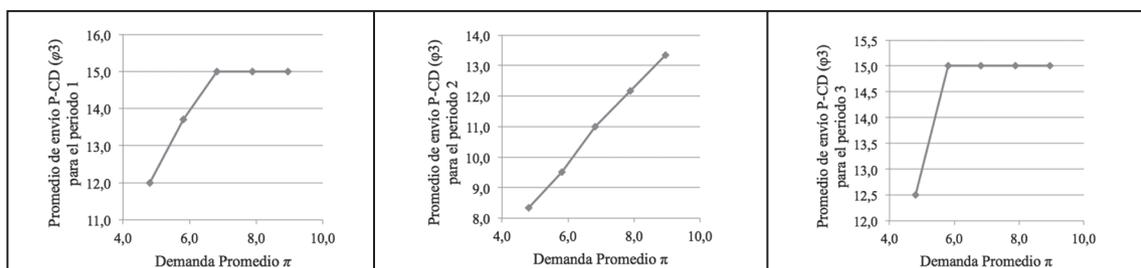
**Tabla 3. Resultados de las corridas del modelo para cuando se fijan ciertas estructuras**

VARIABLE DE SALIDA	DEMANDA				
	Mínima ( $\pi = 4,8$ )	Entre Mínima y Promedio ( $\pi = 5,8$ )	Promedio ( $\pi = 6,8$ )	Entre Promedio y Máxima ( $\pi = 7,9$ )	Máxima ( $\pi = 9,0$ )
$\Gamma$	100,00 %	96,56 %	91,32 %	85,09 %	79,91 %
$\varphi_7$	5,0	10,0	13,0	16,5	20,0
$\varphi_3$ para el t 1	12,0	13,7	15,0	15,0	15,0
$\varphi_3$ para el t 2	8,3	9,5	11,0	12,2	13,3
$\varphi_3$ para el t 3	12,5	15,0	15,0	15,0	15,0
$\varphi_3$ para el t 4	11,0	13,3	15,5	18,0	20,0
$\varphi_3$ para el t 5	12,0	13,9	15,8	17,7	19,5
$\varphi_4$ para el t 1	4,6	5,5	6,0	6,0	6,0
$\varphi_4$ para el t 2	4,8	5,7	6,6	7,3	8,0
$\varphi_4$ para el t 3	5,4	6,0	6,0	6,0	6,0
$\varphi_4$ para el t 4	4,4	5,3	6,2	7,2	8,0
$\varphi_4$ para el t 5	4,8	5,6	6,3	7,1	7,8

Fuente: elaborado por los autores

Al fijar una estructura en cada período, los resultados de  $\Gamma$  se deterioran más a medida que  $\pi$  aumenta, comparado con la situación en la que no se fijan estructuras (Tabla 2 vs. Tabla 3). Los nuevos resultados se muestran en la figura 3, en donde ya no se observan cambios bruscos de comportamiento, lo que confirma

que tales saltos se deben a cambios en las estructuras. No obstante, note que aún resultan variables en las que la correlación es baja y no es posible establecer una relación  $\varphi_r = f_r(\pi)$ . De hecho, tal relación no pudo establecerse para el 62 % de las instancias utilizadas.



**Figura 3.  $\pi$  contra varios  $\varphi_r$  en varios periodos, fijando estructuras.**

Fuente: Elaborado por los autores

**Paso 1 del Procedimiento FePIA (Segunda sub-etapa)**

En esta segunda sub-etapa se busca determinar una variación tolerable en  $\varphi_r$ , definida por  $(\beta_r^{min}, \beta_r^{max})$ , tal que no se viole el requerimiento de robustez. Los valores de  $\beta_r^{min}$  y  $\beta_r^{max}$  se determinan a través de la inclusión de una restricción adicional (ecuación 17), en la que  $\Gamma$  ya no fuera una variable de salida sino de entrada.

$$\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 y_{jk}^t = \Gamma * \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 d_k^t \quad (17)$$

Para determinar los valores que debía tomar  $\Gamma$ , se decidió inicialmente tomar como base los valores de tal variable que se muestran en la tabla 3, e ir reduciendo cada uno gradualmente en intervalos de cinco puntos porcentuales (tabla 4).

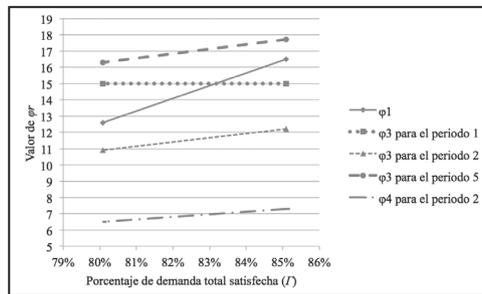
**Tabla 4. Resultados de las corridas del modelo con estructuras fijas y  $\Gamma$  como variable de entrada**

VARIABLE DE SALIDA	DEMANDA Y REQUERIMIENTO DE ROBUSTEZ				
	Mínima ( $\pi = 4,8$ ) ( $\Gamma = 95,00 \%$ )	Entre Mínima y Promedio ( $\pi = 5,8$ ) ( $\Gamma = 91,56 \%$ )	Promedio ( $\pi = 6,8$ ) ( $\Gamma = 86,32 \%$ )	Entre Promedio y Máxima ( $\pi = 7,9$ ) ( $\Gamma = 80,09 \%$ )	Máxima ( $\pi = 9,0$ ) ( $\Gamma = 74,91 \%$ )
CTOTAL	771,0	1061,8	1431,4	1986,5	2521,3
$\varphi_1$	3,0	6,6	9,4	12,6	18,9
$\varphi_3$ para el t 1	11,5	13,3	14,7	15,0	15,0
$\varphi_3$ para el t 2	7,7	8,9	9,8	10,9	10,0
$\varphi_3$ para el t 3	11,5	13,3	14,7	15,0	15,0
$\varphi_3$ para el t 4	11,0	13,3	14,7	16,3	19,5
$\varphi_3$ para el t 5	11,5	13,3	14,7	16,3	19,5
$\varphi_4$ para el t 1	4,6	5,3	5,9	6,0	6,0
$\varphi_4$ para el t 2	4,6	5,3	5,9	6,5	6,0
$\varphi_4$ para el t 3	4,6	5,3	5,9	6,0	6,0
$\varphi_4$ para el t 4	4,4	5,3	5,9	6,5	7,8
$\varphi_4$ para el t 5	4,6	5,3	5,9	6,5	7,8

Fuente: elaborado por los autores

En la figura 4 se observa un ejemplo (para  $\pi = 7,9$ ) de la comparación entre los resultados de  $\varphi_r$  de la tabla 3 ( $\Gamma$  como variable de salida) contra los de la tabla 4 ( $\Gamma$  como variable de

entrada). Allí se observa que cuando  $\Gamma$  aumenta,  $\varphi_r$  aumenta o se mantiene igual, es decir, hay una relación directamente proporcional o no hay correlación.



**Figura 4.  $\Gamma$  contra cada  $\varphi_r$  para cuando  $\pi = 7,9$ .**

Fuente: Elaborado por los autores

Sin embargo, al analizar las tablas 3 y 4 por separado se observa un comportamiento contrario al descrito, mostrando una relación inversa entre  $\Gamma$  y  $\varphi_r$  (o no hay correlación). La explicación dada por los autores es que en el caso de la figura 4, en el cual se realiza el análisis para cada valor de  $\pi$  fijo, es claro que si la demanda se fija y se fuerza al modelo a cumplir con un valor específico del porcentaje de demanda satisfecha ( $\Gamma$ ) menor que los de la tabla 3 (por ejemplo, pasar de 100 % a 95 %), entonces el sistema necesitará aumentar en menor cantidad la capacidad de las plantas de producción ( $\varphi_1$ ) y también enviar menor cantidad de producto ( $\varphi_3$  y  $\varphi_4$ ).

Pero si se considera el caso de las tablas 3 y 4 por separado, en el cual se deja que varíe la demanda, si esta aumenta el sistema estará en menor capacidad de cubrirla sin incurrir en mayores costos y  $\Gamma$  disminuirá, mientras al mismo tiempo intentará cubrirla lo más posible aumentando la capacidad de las plantas de producción ( $\varphi_1$ ) y enviando más cantidad de producto ( $\varphi_3$  y  $\varphi_4$ ). La relación inversa que se muestra entonces en tales tablas se da como consecuencia del cambio en la demanda y no porque haya una relación directa entre  $\Gamma$  y  $\varphi_r$ , pues de existir esta relación esta sería directamente proporcional, como se muestra en la figura 4.

Además, para aquellas características de desempeño en las que esta relación sí pueda establecerse, esta solo existe en unos intervalos específicos y por tanto no son relaciones válidas para valores por fuera de tales intervalos. Por ejemplo, note en la tabla 3 que  $\varphi_r$  está definida entre 5 y 20, pero en la tabla 4  $\varphi_r$  toma un valor de 3. Tal valor no puede ser evaluado en una función definida entre 5 y 20.

Tales resultados permiten concluir que en el contexto del problema de planeación de la capacidad y localización de almacenes en cadenas de suministro no es posible generalizar la relación entre  $\Gamma$  y  $\varphi_r$  como lo exige el procedimiento FePIA, debido a la interferencia de otras variables en dicha relación, por lo que el procedimiento debe ser modificado para su aplicación en este tipo de situaciones.

## Conclusiones

La aplicación del procedimiento FePIA (Ali et al., 2004) permitió definir de manera estructurada, tanto cualitativa como cuantitativamente, requerimientos de robustez, características de desempeño y parámetros de perturbación para una cadena de suministros, identificándolos como elementos clave en la determinación de la robustez. Sin embargo, la metodología original propuesta por Ali et al. (2004) no permitió encontrar una relación general entre los parámetros de perturbación y las características de desempeño para el 62 % de las instancias utilizadas. Por tanto, no fue posible obtener una región de robustez para el problema tratado. Esto permite concluir que el procedimiento FePIA debe ser modificado para su completa aplicación en el contexto analizado a causa de las siguientes razones:

1. La inclusión de la estructura de la cadena como característica de desempeño implica pasar de un procedimiento FePIA netamente cuantitativo (tal como propone Ali et al., 2004) a uno híbrido (cuantitativo y cualitativo).
2. La imposibilidad de establecer con el procedimiento original una función  $f_r$  tal que  $\varphi_r = f_r(\pi)$ .
3. Debido a las características del problema abordado, la relación entre el requerimiento de robustez ( $\Gamma$ ) y las características de desempeño ( $\varphi_r$ ) no pudo ser generalizada.

Con el fin de subsanar estas dificultades, se sugiere para futuras investigaciones establecer la función  $\varphi_r = f_r(\pi)$  a partir de relaciones empíricas y no analíticas como se plantea originalmente, y asociar tales relaciones a cada una de las diversas estructuras de la cadena identificadas. Esto, además, permitiría establecer relaciones robustez-costo, teniendo también en cuenta este parámetro en la investigación. También pueden incluirse otras fuentes de incertidumbre, tales como las asociadas a la manufactura, al abastecimiento o a fallas en la estructura misma.

## Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad de La Sabana y a su Facultad de Ingeniería, pues sin su gran apoyo no hubiera podido desarrollarse este proyecto.

## Referencias bibliográficas

- Aghezzaf, E. (2005). Capacity planning and warehouse location in supply chains with uncertain demands. *Journal of the Operational Research Society*, 56, 453-462
- Ali, S., Maciejewski, A. A., Siegel, H. J. & Kim, J. K. (2004). Measuring the robustness of a resource allocation. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 15, 630-641
- Bertsimas, D., y Sim, M. (2004). The price of robustness. *Operations Research*, 52, 35-53
- Bertsimas, D., y Thiele, A. (2004). A Robust Optimization Approach to Supply Chain Management. *Lecture Notes in Computer Science*, 3064, 86-100
- Blackhurst, J., Wu, T., y O'Grady, P. (2004). Network-based approach to modelling uncertainty in a supply chain. *International Journal of Production Research*, 42, 1639-1658
- Chan, F. T. S. (2003). Performance measurement in a supply chain. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21, 534-548
- Gupta, A., Maranas, C. D., & McDonald, C. M. (2000). Mid-term supply chain planning under demand uncertainty: customer demand satisfaction and inventory management. *Computers & Chemical Engineering*, 24, 2613-2621
- Gupta, A., y Maranas, C. D. (2003). Managing demand uncertainty in supply chain planning. *Computers & Chemical Engineering*, 27, 1219-1227
- Jung, J. Y., Blau, G., Pekny, J. F., Reklaitis, G. V., y Eversdyk, D. (2004). A simulation based optimization approach to supply chain management under demand uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 2087-2106
- Klibi, W., Martel, A., y Guitouni, A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review. *European Journal of Operational Research*, 203, 283-293
- Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., y Zenios, S. A. (1995). Robust Optimization of Large-Scale Systems. *Operations Research*, 43, 264-281
- Pan, F. y Nagi, R. (2010). Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing. *Computers & Operations Research*, 37, 668-683
- Peidro, D., Mula, J., y Poler, R. (2009). Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 400-420
- Sungur, I., Ordóñez, F., y Dessouky, M. (2008). A robust optimization approach for the capacitated vehicle routing problem with demand uncertainty. *IIE Transactions*, 40, 509-523
- Yu, C. S., y Li, H. L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International Journal of Production Economics*, 64, 385-397