

## Estudio empírico sobre curvas de aprendizaje en sistemas de gestión logística

### *Empirical study on learning curves in logistics management systems*

Yalili Rodríguez Romero<sup>1\*</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2298-1255>

Roberto Cespón Castro<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7749-5254>

Nelson Javier Tovar Perilla<sup>2</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6330-4181>

Recibido 19 de septiembre de 2022, aceptado 12 de diciembre de 2022

*Received: September 19, 2022      Accepted: December 12, 2022*

### RESUMEN

Las curvas de aprendizaje (CA) han sido aplicadas con frecuencia en la administración de la producción/operaciones y en varios procesos logísticos de numerosas organizaciones manufactureras y de los servicios. Sin embargo, son recientes los estudios sobre su empleo a toda la cadena de suministro (CS). El presente artículo constituye una contribución para llenar ese vacío de conocimiento, al medir el impacto del aprendizaje sobre el plazo de entrega (LT) en los sistemas de gestión logística (SGL). Para demostrarlo, se utilizó el estudio empírico como herramienta metodológica. Fueron aplicados los modelos logarítmico-lineales con la adecuación de su terminología y ecuaciones de cálculo a tres estudios de caso representativos de los sistemas logísticos propuestos por el modelo *Supply Chain Operations Reference* (SCOR): fabricación por órdenes, por proyecto y para inventario. Como resultado, se obtuvo que los dos primeros se ajustaron al modelo de *Stanford* y el tercero al *De Jongs*. Fueron determinadas sus CA, ecuaciones matemáticas y un análisis de sensibilidad. Ello demostró la relevancia del enfoque utilizado y su diferencia respecto a lo tratado en publicaciones anteriores que en su mayoría analizan eslabones o partes de la CS.

Palabras claves: Modelo SCOR, cadena de suministro, curva de aprendizaje, sistema de gestión logística.

### ABSTRACT

*Learning curves have been frequently applied in production/operations management and various logistics processes in many manufacturing and service organizations. However, studies on their integral use in the supply chain are recent. This paper contributes to filling this knowledge gap by measuring the impact of learning on lead time in logistics management systems. The empirical study was used as a methodological tool to demonstrate this. The logarithmic-linear models, with their terminology and calculation equations, were applied to three case studies representatives of the logistics systems proposed by the Supply Chain Operations Reference (SCOR) model: make-to-order, make-to-stock, and engineer-to-order. As a result, the first two were adjusted to the Stanford model and the third to De Jong's model. Their learning curve, mathematical equations, and a sensitivity analysis were determined. This approach demonstrated its relevance and difference compared to previous publications, which mainly analyze links or parts of the CS.*

*Keywords: SCOR model, supply chain, learning curve, logistics management system.*

<sup>1</sup> Universidad Central Marta Abreu de las Villas. Departamento de Ingeniería Industrial. Villa Clara, Cuba.  
Email: yrromero@uclv.cu; rcespon@uclv.edu.cu

<sup>2</sup> Universidad de Ibagué. Departamento de Ingeniería Industrial. Ibagué, Colombia. Email: nelson.tovar@unibague.edu.co

\* Yalili Rodríguez Romero: yrromero@uclv.cu

## INTRODUCCIÓN

Realizar una actividad después de la primera vez implica aprendizaje producto de la experiencia [1]. Este comportamiento, denominado CA es una característica inherente a toda actividad organizada. El pionero en esta herramienta fue Wright [2], quien la aplicó en la construcción de aviones, al observar que en la medida que se repetían las operaciones, el tiempo de elaboración por unidad se reducía por efecto del aprendizaje. Este aporte, llamó la atención de empresarios y académicos que estudiaron su impacto sobre la productividad del trabajo, los costos y la calidad, así como su empleo en diferentes pronósticos [3].

Según Lolli, Messori, Gamberini, Rimini y Balugani [4], aunque los estudios en este campo se extienden a casi la totalidad de la actividad productiva y de servicios, son más frecuentes los vinculados a la Producción/Operaciones en la industria. De esta forma, existen aplicaciones vinculadas al problema de programación de máquinas [5], programación de productos [6], decisiones sobre el tamaño del lote de fabricación [7, 8], e incremento de capacidades de producción [9].

Con la aparición de nuevas aplicaciones, se desarrollaron los modelos que explican el aprendizaje para diferentes situaciones. Al respecto; en [10] realizaron un meta - análisis sobre los principales resultados empíricos desarrollados en la industria, mostrando una taxonomía de CA que se clasifican en modelos log-lineales, exponenciales e hiperbólicos. Estos autores, consideraron su efecto en el costo, la productividad y el tiempo de entrega (LT). Este último es el analizado en el presente estudio, el cual según los autores citados, presenta CA ajustadas a modelos log-lineales en la función de Producción/Operaciones. En el presente artículo, el LT, se define como el periodo que media entre la solicitud de un pedido por el cliente y el momento en que es satisfecho [11].

Como una consecuencia lógica, las aplicaciones de las CA, se extendieron a la gestión de la cadena de suministro (GCS) [12-14], por el impacto favorable que ejerce sobre las organizaciones en términos de costo, calidad, flexibilidad, servicio y LT [10, 15]. En el 2018 [10] realizaron una revisión de 457 artículos sobre aplicaciones de las CA en la planeación de la producción y la logística y destacaron, el potencial

existente en el desarrollo de aplicaciones a la CS de forma integral, es decir, desde el proveedor hasta el cliente final. Resaltaron que en la mayoría de las publicaciones se analizaron partes de la CS como la gestión de inventarios, producción y aprovisionamiento. Ello fue confirmado en otra publicación más reciente [16].

Entre los modelos más empleados para garantizar una gestión integral de la CS [17], se destaca el (Modelo SCOR). Fue desarrollado por el *Supply-Chain Council* [18-20], como una herramienta estándar enfocada a procesos, para la descripción y gestión de CS. Sus ventajas, flexibilidad y versatilidad hacen que sea el más empleado en la actualidad [21]. El SCOR estructura los procesos de la CS en niveles e incluye los ambientes de producción o SGL, es decir: fabricación por pedido (*make to order* - MTO), fabricación para inventario (*make to stock* - MTS) y fabricación por proyecto (*engineer to order* - ETO) [22].

El presente artículo tiene como objetivo, analizar el comportamiento de las CA en el funcionamiento integral de las CS, mediante los SGL considerados en el modelo SCOR. El trabajo analiza el impacto sobre el LT, mediante un estudio empírico de tres casos de estudio representativos de cada sistema y está estructurado en: introducción, estructura del estudio empírico, resultados, su discusión y finalmente las conclusiones.

## ESTRUCTURA DEL ESTUDIO EMPÍRICO

En los estudios encontrados en la literatura sobre CA, los autores analizan su comportamiento a partir de la unidad de producción o algún equivalente. Este criterio debe ser ajustado, cuando se trata de un SGL en tanto lo que fluye por los eslabones de la CS son grupos de productos en forma de órdenes, módulos o lotes de envío y proyectos en el caso del sistema ETO. Por esa razón, los autores del presente artículo consideraron recomendable la modificación de varios de los términos utilizados en los modelos logarítmicos - lineales estudiados y en consecuencia en sus ecuaciones de cálculo. Por otra parte, las adecuaciones realizadas consideran las particularidades de cada uno de los diferentes SGL y su impacto en el LT, siendo las fundamentales las siguientes:

- En el sistema MTO, generalmente se oferta una amplia diversidad de productos con entregas por órdenes o lotes y manifiesta una mayor

- flexibilidad en su equipamiento y fuerza laboral. La GCS se hace más compleja y puede llegar hasta la oferta de productos personalizados. Por estas razones el LT tiende a alargarse.
- En el MTS es reducida la variedad de artículos. El equipamiento y la fuerza laboral tienden a la especialización con operaciones repetitivas. Con frecuencia es menos compleja la GCS y el LT tiende a acortarse.
  - El ETO es sencillo de identificar. Se trata de CS vinculadas a proyectos duraderos, que se repiten cada mucho tiempo o puede que nunca se repitan. Generalmente necesita elevados presupuestos y todos sus recursos requieren flexibilidad respecto a la gama de proyectos que se ofertan. Este SGL posee los LT más largos.

### Información de entrada y consideraciones del estudio

Siendo consecuente con lo antes planteado, en la Tabla 1 se muestran las principales modificaciones realizadas a los parámetros utilizados en el estudio. Por ejemplo, el parámetro “K” que aparece en la cuarta fila, si bien está referido al tiempo de operación / unidad en los sistemas de producción, para el caso de los SGL sería el LT de la orden de envío.

#### Consideraciones del estudio empírico

1. En el caso del sistema ETO el valor de “X” sería el proyecto y su duración el LT.
2. Serán utilizadas las ecuaciones de Wright, Plateau, Stanford B, S-curve y De Jongs [10]
3. Se selecciona el modelo que más se ajusta a cada SGL, a partir de la medición de errores. Criterios como el coeficiente de regresión ( $R^2$ ), la desviación media (SSE) y la desviación media cuadrática (RMSE) son suficientes.
4. El trazado de las CA se realiza mediante el método logarítmico. Ello implica la representación de

órdenes, módulos, lotes y proyectos y el LT, con valores acumulados promedio.

5. Siempre que un valor de los modelos se refiera a la duración del primer producto, en este caso sería el LT del primer pedido, lote, módulo o proyecto.

### Formulación de los modelos logarítmico-lineales empleados

Los modelos que se presentan tienen incorporadas las modificaciones declaradas anteriormente.

#### Modelo de Wright

Como ya fue planteado fue el pionero en el análisis de las CA. El resto de los modelos logarítmico – lineales, constituyen modificaciones y mejoras que el fueron incorporadas.

$$y = K * x^{-b} \quad (1)$$

$$b = \frac{\log r}{\log 2} \quad (2)$$

Donde:

- x: número consecutivo de órdenes de envío consideradas.
- y: TL de la orden x.
- k: TL para el envío de la primera orden.
- log 2: es el criterio establecido. Cuando se duplica el número de pedidos se establece la tasa de aprendizaje.
- r: tasa de la CA.

#### Modelo de Plateau

Es similar al anterior. Solo se añade la constante C a la ecuación (1).

$$y = C + K * x^{-b} \quad (3)$$

Tabla 1. Modificaciones consideradas para la determinación de las CA en los SGL.

| Variable | Sistema de producción                                                                                 | Sistema de gestión logística                         |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| X        | Número consecutivo del producto                                                                       | Número consecutivo de la orden                       |
| $Y_n$    | Tiempo medio (en unidades de tiempo) para la elaboración del producto X.                              | LT promedio (en unidades de tiempo) para la orden X. |
| K        | Tiempo de trabajo para terminar el primer producto.                                                   | LT promedio en la primera orden.                     |
| log 2    | Criterio establecido cuando se duplica el número de pedidos, para establecer el ritmo de aprendizaje. |                                                      |
| B        | Coeficiente de la ecuación que representa la CA.                                                      |                                                      |
| r        | Tasa de aprendizaje.                                                                                  |                                                      |

Donde:

C: constante que considera el TL mínimo para completar una orden independiente del efecto del aprendizaje [23].

#### *Modelo de Stanford B*

La modificación al primer modelo es el valor de B.

$$y = K * (x + B)^{-b} \quad (4)$$

Donde:

B: valor que considera la experiencia previa en la CS.

#### *Modelo De Jong*

Este autor [24] asumió que existe un componente incompresible en cada proceso en el que no se produce ningún aprendizaje y, por tanto, ninguna mejora de la productividad. Bajo este concepto modificó la CA de [2], mediante la adición del grado de automatización (M). Así, cuando  $M = 0$ , la operación es manual, y cuando  $M = 1$ , está automatizada sin intervención humana y, por tanto, sin aprendizaje. En las CS aún es difícil un flujo totalmente automatizado, por lo que generalmente el valor de M estaría entre “0” y “1”.

$$y = K * (M + (1 - M))x^{-b} \quad (5)$$

M: Constante que toma valores entre “0” y “1” en dependencia del grado de automatización. El extremo superior se corresponde con CS totalmente automatizadas.

#### *Modelo S-curve*

El modelo de la curva en S combina las características del modelo de Stanford B y del modelo De Jong. Su nombre se debe a que la CA tiene forma de “S” cuando se representa en una escala logarítmica. Se puede expresar de la siguiente manera [25]:

$$y = K * (M + (1 - M)(x + B)^{-b}) \quad (6)$$

## **RESULTADOS**

Se tomaron tres casos de estudio, cada uno de ellos representativos de un SGL diferente. Estos son:

### **Sistema MTO**

Se trata de una CS dedicada a la elaboración y montaje de productos de carpintería de aluminio,

destinados esencialmente a instalaciones turísticas. Los artículos incluyen ventanas, puertas, barandas, vitrinas entre otros. El proveedor principal es un centro de distribución que compra los perfiles de aluminio a compañías nacionales y extranjeras. La carpintería, es una empresa de tamaño mediano con 111 trabajadores, equipos y distribución en planta flexible para la realización de las operaciones de corte, conformado y ensamblaje. Labora dos turnos de trabajo de ocho horas, posee buena reputación y mantiene utilidades. Los componentes fabricados se transportan a los clientes y allí se realiza el montaje.

La CS se activa con la solicitud del cliente; se compran los perfiles de aluminio y el resto de las materias primas; seguidamente se producen los artículos. El transporte externo desde el proveedor y hasta el cliente, es contratado, mientras que el interno es propiedad de la carpintería de aluminio. Todo finaliza con el montaje de los productos en la edificación y su facturación. La producción se realiza mediante módulos, cada uno con 100 unidades de artículos que incluye toda la variedad de productos de la carpintería. Se oferta una amplia gama de diseños de ventanas, puertas, vitrinas; y en ocasiones, el cliente aporta el deseado.

A partir de la información contenida en los contratos, se diseñó un experimento que permitió definir un tamaño de muestra representativa del universo estudiado de 827 módulos con sus LT en días y un nivel de confianza del 95%. Este conjunto de datos fue validado, mediante la eliminación de aquellos que mostraron comportamientos irracionales, derivados generalmente de situaciones extraordinarias como eventos climatológicos. La muestra resultante, constituye la base para la determinación posterior de la ecuación que representa la CA. A partir de estas observaciones, se realizó un análisis exploratorio que dio como resultado que el LT sigue una distribución normal, con parámetro  $8,66 \pm 1,68$  días/módulo, un intervalo de confianza del 95% de 8,09 a 9,22 y un error máximo permisible de 0,56 días/módulo. Con este estudio, también es posible el empleo de la simulación estadística para generar valores de LT que permitan la obtención de la ecuación que representa su CA, aunque en la investigación se trabajó con los datos validados y un software informático. Esto se aplica para los casos MTS y ETO.

### Sistema MTS

En esta CS se produce y comercializa productos químicos destinados a la higiene y limpieza. En particular el detergente clorado, envasado con una presentación de un litro. El principal proveedor es un centro de distribución que compra los insumos a empresas nacionales (hipoclorito de sodio, agua destilada, envases y otros). La fábrica de detergentes, es una empresa de tamaño mediano con 160 trabajadores, equipos especializados y distribución en planta en línea. Labora un turno de trabajo de ocho horas, posee buena reputación y mantiene utilidades. El detergente es vendido a centros de distribución con una frecuencia semanal, los que a su vez lo envían al mercado mayorista.

La CS se inicia con la firma de contratos con clientes, seguidamente se compran los insumos necesarios, se realiza la producción y se envía a los centros de distribución. El transporte externo desde el proveedor corre a cargo de este último, mientras que el de distribución e interno de la fábrica de detergentes. Los envíos se realizan en lotes de 1000 litros. Todo finaliza con la facturación o cobro de la mercancía enviada.

En este caso el experimento diseñado para un nivel de confianza del 95%, resultó en una muestra de 1543 lotes de detergente con sus LT en horas, que también tuvo en cuenta la información contenida en los contratos. El análisis exploratorio mostró que el LT sigue una distribución normal, con parámetro  $86,93 \pm 9,18 \text{ h} \cdot 1000\text{L}$ , un intervalo de confianza del 95% de 84,07 a 101,80  $\text{h} \cdot 1000 \text{ L}$  y un error máximo permisible de 2,86  $\text{h} \cdot 1000 \text{ L}$ . En el estudio, se utilizaron los datos de entrada luego de validados.

### Sistema ETO

Es una CS que elabora y ejecuta proyectos de movimiento de tierra. Existen varios proveedores de insumos como material de oficina, equipos informáticos y repuestos del equipamiento fundamental (buldócer, niveladora, entre otros). La empresa posee buena reputación y mantiene utilidades. Es de tamaño mediano con 12 ingenieros proyectistas, cuatro auxiliares y 80 operarios de movimiento de tierra con el equipamiento necesario. Se labora dos turnos de trabajo de ocho horas. La empresa elabora y ejecuta los proyectos. Culminada una obra, se realizan las verificaciones habituales y se entrega al cliente.

La CS comienza con la elaboración del proyecto y su selección en un proceso de licitación con los competidores, se firma el contrato y luego se procede a la nivelación, compactación, perfilado y preparación del terreno. El proveedor es responsable de la transportación externa de los insumos y la empresa de proyectos lo hace hasta la obra. En todo momento el cliente inspecciona el avance del trabajo y el cumplimiento del cronograma acordado en el contrato. Cuando culmina la obra, el cliente entrega un acta de conformidad. El pago se realiza en paralelo a la ejecución del proyecto.

Por tratarse de proyectos similares, en esta CS el experimento diseñado tomó como base el proyecto. El resultado fue una muestra de 338 proyectos con sus LT en días para un 95% de nivel de confianza. Estos datos fueron validados y tomados como fuente para la determinación de la ecuación que representa la CA. Los resultados del estudio exploratorio mostraron que el LT sigue una distribución normal, con parámetro (241,6; 87), un intervalo de confianza

Tabla 2. Resultados de los criterios para la selección del mejor modelo de CA.

| Criterio   | SGL   |                |        |      |                |       |      |                |       |
|------------|-------|----------------|--------|------|----------------|-------|------|----------------|-------|
|            | MTO   |                |        | MTS  |                |       | ETO  |                |       |
|            | SSE   | R <sup>2</sup> | RMSE   | SSE  | R <sup>2</sup> | RMSE  | SSE  | R <sup>2</sup> | RMSE  |
| Wright     | 13,08 | 0,7716         | 0,7093 | 1186 | 0,657          | 5,444 | 3682 | 0,9463         | 21,45 |
| Plateau    | 13,11 | 0,7711         | 0,7100 | 1138 | 0,671          | 5,268 | 3950 | 0,9424         | 22,22 |
| Stanford B | 10,91 | 0,8094         | 0,6479 | 1255 | 0,637          | 5,532 | 3394 | 0,9505         | 20,60 |
| De Jongs   | 15,26 | 0,7336         | 0,7517 | 1097 | 0,683          | 5,173 | 6188 | 0,9098         | 26,22 |
| S-curve    | 11,97 | 0,7909         | 0,6659 | 1194 | 0,655          | 5,463 | 8573 | 0,8750         | 30,86 |

del 95% de 180 a 300 días/proyecto y un error máximo permisible de 4 día/proyecto.

En las CS analizadas participan varias organizaciones con diferentes roles (aprovisionamiento, producción, distribución), pero su encargo social la define la entidad productora. En todos los casos, el LT se mide desde el momento de la solicitud del cliente hasta que el pedido es entregado y facturado. Por otra parte, los retornos son aprovechados en las entidades productoras con diferentes fines y cuando ello no es posible se venden a una empresa de reciclaje.

### Representación de las CA

A partir de la información de entrada, las consideraciones realizadas para los SGL y las ecuaciones (1), (2), (3), (4), (5) y (6) de los modelos logarítmicos lineales utilizados, se realizó la selección del que más se ajusta a cada SGL. Para ello fue empleado un software de informática para tabular los datos y probar cada una de las ecuaciones, con valores aleatorios en aquellas en las que están presentes valores de C, B y M. Se calcularon los parámetros  $R^2$ , SSE y RMSE y se seleccionó el de mejor comportamiento dentro de cada modelo. Los resultados se muestran en la Tabla 2, a partir de la cual, se ofrece una información detallada de cada SGL.

### Sistema MTO

El mejor modelo es el Stanford B. Aunque muchos procesos de la CS están mecanizados, ninguno es automatizado. La incidencia de la experiencia previa de la mano de obra es crucial esencialmente en el montaje de los artículos en las instalaciones que se construyen. La ecuación que representa el comportamiento de su CA se muestra en la ecuación (7) y en la Figura 1 su curva con los errores. Con

este modelo, se obtiene un error de 0,06479 días/módulo y un nivel de aprendizaje del 73,95%.

$$y = 11,79 * (x - 0,28)^{-0,182} \quad (7)$$

### Sistema MTS

Para la CS de detergentes el mejor modelo resultó ser el De Jongs. Posee cierto nivel de automatización en la producción y envasado del detergente al moverse por bandas transportadoras. No obstante, otros procesos de su CS requieren de cierto trabajo manual. La ecuación de cálculo que representa su CA se muestra en la ecuación (8) y en la Figura 1 su comportamiento con los errores. El error obtenido es de 0,0517 h\*1000L, con un nivel de aprendizaje del 93,73%.

$$y = 104,8 * (0,39 + (1 - 0,39) * x^{-0,115}) \quad (8)$$

### Sistema ETO

Su mejor modelo el Stanford B. El aprendizaje previo es crucial esencialmente en la parte de elaboración de proyectos. Otros procesos de su CS se encuentran mecanizados pero el resultado depende mucho de la mano de obra. La ecuación (9) describe su comportamiento y en la Figura 1 se puede observar su CA. Se obtuvo un error de 0,0206 días/proyecto y un nivel de aprendizaje del 75%.

$$y = 466,4 * (x + 2,304) * x^{-0,177} \quad (9)$$

La obtención de la CA en cada SGL se realizó, generando valores de órdenes, lotes y proyectos según sea el caso, es decir valores de "X" y variando los indicadores que deben permanecer constantes. La mayor potencialidad de estos resultados, es la posibilidad que brinda de realizar pronósticos del comportamiento del LT.

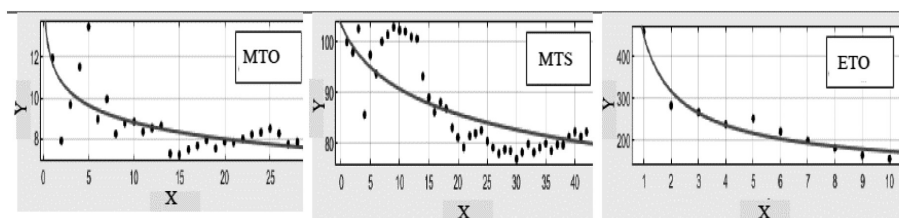


Figura 1. Representación gráfica de la CA y el análisis de los errores del mejor modelo por cada SGL.

En los tres casos de estudio, las CA tienen una tendencia decreciente del LT a medida que se incrementa la cantidad de pedidos, órdenes o proyectos, lo cual indica que está presente el aprendizaje. Los valores promedio de los errores en cada SGL y de los criterios empleados en la selección fueron adecuados, por lo que se pueden considerar como válidos los resultados alcanzados. Por esa razón, para la realización de pronósticos en los casos de estudio analizados, basta con sustituir la variable  $x$  por valores futuros de órdenes, módulos, lotes y proyectos.

### Análisis de sensibilidad de las curvas de aprendizaje

Para analizar el impacto de las variaciones de las CS analizadas en el LT, se parte de realizar adecuaciones en su tasa de aprendizaje ( $r$ ). Este parámetro es sensible a los cambios que, con el transcurso del tiempo, pudieran ocurrir en personal, equipamiento y otros. Una opción sería elaborar nuevas CA; la otra adecuar dicha curva a las nuevas condiciones, es decir, realizar un análisis de sensibilidad.

Los resultados aparecen en la Figura 2. En cada curva, la línea irregular se corresponde con el trazado de puntos reales. Las restantes son las ajustadas. Aparecen tres posiciones que se corresponden

con variaciones del aprendizaje respecto a la línea central. Por ejemplo, en el sistema MTO, el 73%, corresponde a un menor nivel de aprendizaje y 70% un comportamiento superior. Este es uno de los pocos casos en que un valor superior se interpreta como menos deseado, en tanto lo que determina es la reducción del LT.

En el análisis de sensibilidad, se utilizan valores en la tasa de aprendizaje, por encima y por debajo del obtenido en cada uno de los modelos de las ecuaciones (7), (8) y (9), pues ello permite monitorear y predecir la tendencia de su comportamiento futuro. Aunque se aclara que para un mismo índice de aprendizaje la curva tiende a permanecer casi constante al pasar el tiempo.

Es importante considerar, que, por tratarse de una CS, las variaciones ocurridas en algunas organizaciones que en ella participan, pueden resultar determinantes para toda la cadena. En dependencia de la magnitud de estas variaciones, se estiman los cambios en el nivel de aprendizaje y luego se realizan los pronósticos o se procede a determinar nuevas CA.

### DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El estudio empírico desarrollado permitió la determinación de las CA para toda la CS de forma

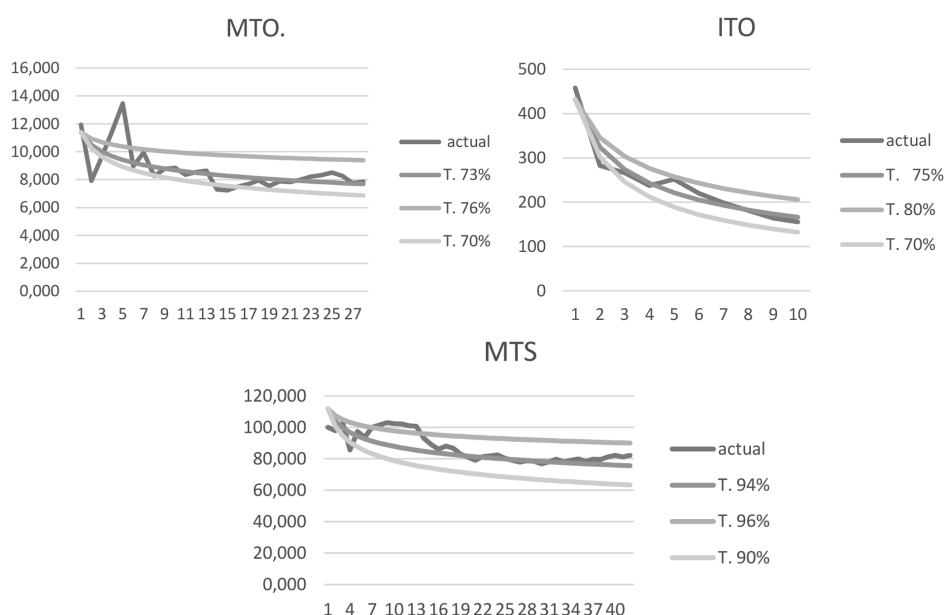


Figura 2. Análisis de sensibilidad de la CA para cada SGL.

integral, a partir de los SGL propuestos por el modelo SCOR, es decir, el MTO, MTS y ETO. Se logró medir el efecto del aprendizaje sobre el LT y realizar un análisis de sensibilidad de los resultados, a partir de modificaciones en la tasa de aprendizaje. Estos resultados, constituyen una contribución para llenar el vacío de conocimiento dejado por las metodologías y aplicaciones precedentes, declaradas en la introducción.

El LT fue medido tomando como referencia los módulos, órdenes, lotes o proyectos, en dependencia del tipo de SGL analizado. Las CA obtenidas, mostraron los mejores ajustes en los modelos logarítmico-lineales: modelo Stanford B en los sistemas MTO y ETO y el Jong para el MTS. La medición de errores, como criterio de selección de estos modelos, dotaron de robustez los resultados. Los pasos de trabajo seguidos en la realización del estudio empírico, son flexibles de aplicar en otras CS con las modificaciones correspondientes.

Este trabajo, al igual que otros consultados en el marco teórico, tiene como limitante que no son abundantes los trabajos dirigidos a determinar CA para toda la CS, lo que dificulta realizar comparaciones. Sin embargo, todo apunta a que constituye un campo interesante y necesario de investigación en la GCS.

## CONCLUSIONES

La literatura internacional sobre CA, reconoce su empleo en la producción y los servicios para predecir su impacto en aspectos como el LT, calidad, productividad, costos y otros. Al respecto, se han desarrollado aportes importantes que constituyen precedentes de la presente investigación. El estudio empírico desarrollado, contribuye a llenar el vacío de conocimiento dejado por los autores consultados, pues permite de forma estructurada y práctica elaborar CA para toda la CS de forma integral. Su novedad radica en la aplicación de la perspectiva de los SGL que considera el modelo SCOR, para medir el impacto en el LT.

Aunque los casos de estudio analizados, se ajustaron mejor a los modelos log-lineales, sería interesante la aplicación de la metodología en otras CS, para verificar si en alguna los exponenciales e hiperbólicos, aportan en ellas mejores resultados.

Otro aspecto de interés, es el estudio de la repercusión del aprendizaje sobre la calidad, costos y otros impactos en el trazado de estas curvas.

## REFERENCIAS

- [1] R. Lipsey. "Hammar skjöld: a life". University of Michigan Press, pp. 373-380. 2013.
- [2] T.P. Wright. "Factors affecting the cost of airplanes". Journal of aeronautical sciences. Vol. 3 N° 4, pp. 122-128. 1936. DOI: 10.2514/8.155.
- [3] A. Jarkas and M. Horner. "Revisiting the applicability of learning curve theory to formwork labour productivity". Construction Management and Economics. Vol. 29 Issue 5, pp. 483-493. 2011. DOI: 10.1080/01446193.2011.562911.
- [4] F. Lolli, M. Messori, R. Gamberini, B. Rimini and E. Balugani. "Modelling production cost with the effects of learning and forgetting". IFAC-PapersOnLine. Vol. 49 Issue 12, pp. 503-508. 2016. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.672.
- [5] H. Abedinnia, C.H. Glock, E.H. Grosse and M. Schneider. "Machine scheduling problems in production: A tertiary study". Computers Industrial Engineering. Vol. 111, pp. 403-416. 2017. DOI: 10.1016/j.cie.2017.06.026.
- [6] A. Azzouz, M. Ennigrou and L. Ben Said. "Scheduling problems under learning effects: classification and cartography". International Journal of Production Research. Vol. 56 Issue 4, pp. 1642-1661. 2018. DOI: 10.1080/00207543.2017.1355576.
- [7] C.H. Glock, E.H. Grosse and J.M. Ries. "The lot sizing problem: A tertiary study". International Journal of Production Economics. Vol. 155, pp. 39-51. 2014. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.12.009.
- [8] M. Jaber and M. Khan. "Managing yield by lot splitting in a serial production line with learning, rework and scrap". International Journal of Production Economics. Vol. 124 Issue 1, pp. 32-39. 2010. DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.09.004.
- [9] P.-C. Pedersen and D. Slepnirov. "Management of the learning curve: a case of overseas production capacity expansion". International Journal of Operations & Production Management. Vol. 36 N° 1, pp. 42-60.

2016. ISSN: 0144-3577. DOI: 10.1108/IJOPM-08-2013-0365.
- [10] C.H. Glock, E.H. Grosse, M.Y. Jaber and T.L. Smunt. "Applications of learning curves in production and operations management: A systematic literature review". *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 131, pp. 422-441. 2019. DOI: 10.1016/j.cie.2018.10.030.
- [11] K.E. Samuel, M.-L. Goury, A. Gunasekaran and A. Spalanzani. "Knowledge management in supply chain: An empirical study from France". *The Journal of Strategic Information Systems*. Vol. 20 Issue 3, pp. 283-306. 2011. DOI: 10.1016/j.jsis.2010.11.001.
- [12] B.B. Flynn, B. Huo and X. Zhao. "The impact of supply chain integration on performance: A contingency and configuration approach". *Journal of operations management*. Vol. 28 Issue 1, pp. 58-71. 2010. ISSN: 0272-6963. DOI: 10.1016/j.jom.2009.06.001
- [13] G. Li, H. Yang, L. Sun and A.S. Sohal. "The impact of IT implementation on supply chain integration and performance". *International Journal of Production Economics*. Vol. 120 Issue 1, pp. 125-138. 2009. DOI: 10.1016/j.ijpe.2008.07.017.
- [14] E.D. Rosenzweig, A.V. Roth and J.W. Dean Jr. "The influence of an integration strategy on competitive capabilities and business performance: an exploratory study of consumer products manufacturers". *Journal of operations management*. Vol. 21 Issue 4, pp. 437-456. 2003. DOI: 10.1016/S0272-6963(03)00037-8.
- [15] M. Khan, M. Jaber and A. Guiffrida. "The effect of human factors on the performance of a two level supply chain". *International Journal of Production Research*. Vol. 50 Issue 2, pp. 517-533. 2012. DOI: 10.1080/00207543.2010.539282.
- [16] C.H. Glock, E.H. Grosse, M.Y. Jaber and T.L. Smunt. "Novel applications of learning curves in production planning and logistics". *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 131, pp. 419-421. 2019. DOI: 10.1016/j.cie.2019.03.030.
- [17] H. Raffiei and M. Rabbani. "Order partitioning in hybrid MTS/MTO contexts using fuzzy ANP". *Engineering and Technology*. Vol. 3, pp. 467-472. 2009. ISSN: 1307-6892.
- [18] B. Ganji Jamehshooran, M. Shaharoun and H. Norehan Haron. "Assessing supply chain performance through applying the SCOR model". *International Journal of Supply Chain Management*. Vol. 4 N° 1. 2015. ISSN: 1935-5734.
- [19] M.A. Sellitto, G.M. Pereira, M. Borchardt, R.I. da Silva and C.V. Viegas. "A SCOR-based model for supply chain performance measurement: application in the footwear industry". *International Journal of Production Research*. Vol. 53 Issue 16, pp. 4917-4926. 2015. DOI: 10.1080/00207543.2015.1005251.
- [20] A. Moharamkhani, A. Bozorgi-Amiri and H. Mina. "Supply chain performance measurement using SCOR model based on interval-valued fuzzy TOPSIS". *International Journal of Logistics Systems Management*. Vol. 27 Issue 1, pp. 115-132. 2017. ISSN: 1742-7967.
- [21] B. Sundarakani, H. Abdul Razzak and S. Manikandan. "Creating a competitive advantage in the global flight catering supply chain: a case study using SCOR model". *International Journal of Logistics Research Applications*. Vol. 21 Issue 5, pp. 481-501. 2018. DOI: 10.1080/13675567.2018.1448767.
- [22] C.K. Dissanayake and J.A. Cross. "Systematic mechanism for identifying the relative impact of supply chain performance areas on the overall supply chain performance using SCOR model and SEM". *International Journal of Production Economics*. Vol. 201, pp. 102-115. 2018. DOI: 10.1016/j.ijpe.2018.04.027.
- [23] N. Baloff. "Extension of the learning curve-some empirical results". *Journal of the Operational Research Society*. Vol. 22 Issue 4, pp. 329-340. 1971. DOI: 10.1057/jors.1971.77.
- [24] J. De Jong. "The effects of increasing skill on cycle time and its consequences for time standards". *Ergonomics*. Vol. 1 Issue 1, pp. 51-60. 1957. DOI: 10.1080/00140135708964571.
- [25] D.A. Nembhard and M.V. Uzumeri. "Experiential learning and forgetting for manual and cognitive tasks". *International journal of industrial ergonomics*. Vol. 25 Issue 4, pp. 315-326. 2000. DOI: 10.1016/S0169-8141(99)00021-9.