

## CAPÍTULO 31

# APORTACIONES DEL PROFESOR SALAS-FUMÁS A LA DINÁMICA DE LA EFICIENCIA PRODUCTIVA

Carlos Sáenz-Royo

### 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la gestión es un elemento clave para el aprendizaje. Disponer de indicadores fiables en partes concretas de una empresa (una planta, un departamento, una división, ...) es difícil debido a los constantes *shocks* y ajustes externos a los que se ven sometidas. La industria del automóvil ha sido reconocida como la más innovadora en el siglo XX (Womack *et al.*, 2007), tanto en técnicas de gestión como en formas de medir su rendimiento, aportando un importante número de investigaciones sobre indicadores de gestión, que después se han trasladado a otras industrias. De hecho, a nivel de planta de producción la mayoría de los estudios de caso se concentran en este sector (Hayes y Clark, 1986; Gunasekaran *et al.*, 1994 presentan los primeros trabajos que estudian el rendimiento de las plantas de producción). En los trabajos del profesor Salas-Fumás el uso de la econometría para el cálculo de indicadores en el estudio de un caso no supuso una novedad. Algunos trabajos previos en este sentido fueron: Ichniowski, Shaw y Prennushi (1997) estudiando el efecto de la aplicación de determinadas prácticas de recursos humanos sobre la productividad de las plantas de acabado de acero; Lazear (2000) investigando el impacto en la productividad de la introducción de incentivos económicos relacionados con el rendimiento; Hamilton Nickerson y Owan (2003) estudiando el trabajo en equipo y la productividad, y Jones, Kalmi y Kauhanen (2010) realizando un estudio econométrico de series temporales sobre los efectos en la productividad de una amplia gama de cambios en las retribuciones. Sin embargo, el uso del Mecanismo de Corrección de Error (MCE) para estimar la función de producción y la productividad total de los factores (PTF) representó una de sus principales novedades.

Dentro de los indicadores, la productividad (la relación entre la producción y recursos), ha sido y sigue siendo una medida común del rendimiento en econo-

mía, administración y operaciones, ya que tiene implicaciones bien conocidas para la competitividad de empresas y países (véase Syverson, 2011 para una revisión de la investigación sobre productividad). Ghobadian y Husband (1990) fueron de los primeros en señalar la relevancia de las medidas de PTF en la gestión de operaciones ya que la eficiencia operativa de una unidad de producción mide la capacidad de transformar insumos en productos. Sin embargo, la productividad en un momento del tiempo, y de forma aislada, es simplemente una relación entre recursos y producción. Una mayor productividad laboral no será necesariamente un indicador de eficiencia operativa superior si, por ejemplo, la unidad con mayor productividad produce con una tecnología más intensiva en capital que la menos productiva. Para evitar esta falta de referencia en la comparación, se propuso modelizar el proceso de producción de una planta con la función de producción económica, aportando como medida de la eficiencia operativa la PTF de la función de producción; las variaciones en la productividad laboral son indicativas de variaciones en la PTF si la relación capital-trabajo se mantiene sin cambios y la tecnología muestra rendimientos constantes a escala. Por tanto, la función de producción resume la tecnología subyacente en la transformación de *inputs* productivos, capital y trabajo, en *output*, permitiendo cuantificar el crecimiento de la productividad a lo largo del tiempo. Ya había habido artículos previos sobre la productividad que incluían la estimación de la función de producción (Lieberman, Lau y Williams, 1990; Lieberman y Dhawan, 2005), y la medición de la productividad como el inverso de horas por vehículo (HPV) (Weyer, 2011). Sin embargo, no se habían hecho estudios a nivel de una planta productiva que produjera un único modelo de automóvil, lo que evitaba los problemas sobre los que alertaba Ichniowski y Shaw (2009) en su artículo metodológico sobre el sesgo de agregación que puede resultar cuando se usan datos a nivel de empresa para examinar el rendimiento de las operaciones a nivel de planta, así como las limitaciones de usar unidades monetarias de producción en la medición de la eficiencia, cuando los precios de producción reflejan el poder de mercado de las empresas. Además, el uso de datos mensuales también resultó novedoso. Por tanto, se aportó una medida de eficiencia operativa a través de la PTF de la función de producción económica, que difería de la medida de productividad laboral parcial (HPV), utilizada por analistas y gerentes de la industria.

La productividad, o la tasa a la que las cantidades de insumos se convierten en productos, recibe mucha atención a nivel macro comparando países (Van Ark, O'Mahony y Timmer, 2008), o comparando competitividad entre empresa (Syverson, 2011). Sin embargo, aun hoy, apenas hay aportaciones que estudien la evolución de la productividad en una planta productiva.

Las explicaciones existentes del crecimiento de la productividad a nivel micro se han planteado tradicionalmente de dos formas diferentes e independientes. Una

consideraba que el crecimiento de la productividad era consecuencia del progreso tecnológico lo que provocaba una expansión a tasas crecientes (Moore, 1975). Este planteamiento asume implícitamente la innovación “schumpeteriana”, incorporando constantemente nueva tecnología de producción, y mejorando los productos fabricados. Mientras la otra explicación, se centraba en la curva de aprendizaje donde la tasa de crecimiento de la productividad es positiva, pero disminuye con el tiempo (Zangwill y Kantor, 1998). En este caso, los productos y la tecnología se consideran constantes y las ganancias de productividad son el resultado de mejoras continuas y graduales en las formas en que se realizan las tareas del proceso de producción. La curva de aprendizaje, y en general el aprendizaje práctico, se ha aplicado a unidades de diversa complejidad, desde máquinas individuales (especialmente problemas de programación, Biskup (2008)) hasta plantas (Adler y Clark, 1991) y empresas (Balasubramanian y Lieberman, 2010).

Para aunar ambas teorías se propuso un modelo general de aprendizaje en el que se incluía la posibilidad de progreso técnico ilimitado y la curva de aprendizaje como casos particulares del mismo, pero además cubría formas híbridas de crecimiento. En definitiva, se propuso un modelo general de aprendizaje determinista. Para ilustrarlo se utilizó el crecimiento de la PTF obtenido previamente. De esta forma, no se estudiaban acciones o decisiones concretas sino la mejora subyacente del proceso de gestión a lo largo de un periodo de tiempo, observada dicha mejora en términos de evolución de la PTF.

Para analizar la capacidad de ajuste del modelo se compararon sus resultados con los obtenidos aplicando el modelo de aprendizaje estocástico de Jovanovic y Nyarko (1995) a los mismos datos. El hallazgo más relevante fue que el modelo de aprendizaje mixto, es decir, aquel que combinaba una velocidad fija de aprendizaje junto con una capacidad creciente (lo que se denominó “aprender a aprender”) fue el que mejores resultados presentó. El modelo de aprendizaje mixto supone que el aprendizaje puede presentar una forma sigmoideal, es decir, que presenta un primer periodo de crecimiento acelerado y otro periodo de crecimiento cada vez más lento, hasta llegar a la máxima eficiencia operativa. Aunque otros autores como Jovanovic y Nyarko (1995) ya reconocieron esa forma en el aprendizaje, su modelización no era lo suficientemente flexible para ajustarse a la evolución del mismo. El trabajo presentó evidencias de que las explicaciones existentes del crecimiento, como progreso técnico generalizado o como curva de aprendizaje, son modelizaciones incompletas y otras formas de aprendizaje deterministas como “aprender a aprender” o el aprendizaje mixto deben ser consideradas.

## 2. LA ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN Y LA PTF

La función de producción de estado estacionario elegida para modelizar la tecnología de producción incorporada en la planta de ensamblaje fue una función de producción económica de tipo Cobb-Douglas, de la forma:

$$Q_t = A_0 e^{\theta t} K_t^\alpha L_t^\beta e^{\varepsilon_t} \quad [1]$$

Esta forma funcional era un enfoque neoclásico que facilita aislar la PTF y, por tanto, proyectar el crecimiento económico esperado. Representaba las relaciones entre la producción obtenida en cada periodo ( $Q_t$ ) y las cantidades utilizadas de los insumos capital ( $K_t$ ) y trabajo ( $L_t$ ). Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  eran positivos para satisfacer las propiedades estándar de la función de producción económica (es decir, productividad marginal positiva de los insumos).  $A_0$  era un parámetro de la función de producción que media la productividad total de los factores (PTF) de la tecnología subyacente en el mes  $t = 0$ , en el momento inicial. La ecuación [1] permitía una tasa de crecimiento constante de la PTF a lo largo del tiempo igual a  $\theta$  por mes. La variable  $\varepsilon_t$  tenía en cuenta las posibles variables omitidas que se suponía que eran independientes del resto de variables del lado derecho de la ecuación. Los parámetros que resumían la tecnología de producción eran la PTF inicial ( $A_0$ ), la tasa de crecimiento constante de la PTF ( $\theta$ ), y los parámetros de elasticidad capital y trabajo  $\alpha$  y  $\beta$ , respectivamente. A partir de los valores de estos parámetros, era posible saber si la función de producción tenía rendimientos a escala constantes ( $\alpha + \beta = 1$ ), decrecientes ( $\alpha + \beta < 1$ ) o crecientes ( $\alpha + \beta > 1$ ). La ecuación [1] se podía escribir en logaritmos (lo que se denotó en letras minúsculas) como sigue:

$$q_t = a + \theta t + \alpha k_t + \beta l_t + \varepsilon_t \quad [2]$$

Este modelo de función de producción ha sido ampliamente utilizado en economía.

El hecho de utilizar datos mensuales entrañaba dificultades por la alta volatilidad de los datos. Gabaix (2011) mostraba errores en la estimación de parámetros de relaciones funcionales que ocultan la heterogeneidad y variabilidad de las relaciones insumo-producto. Para solventar este problema se desarrolló una metodología que permitía la distinción de dos relaciones funcionales simultáneas, la relación de corto plazo y la relación de largo plazo, de esta forma se tenían en cuenta aquellas variaciones en la producción por periodo que obedecían a contingencias exógenas al proceso productivo propiamente dicho, y aquellas que podían atribuirse a factores de mayor relevancia económica englobados genéricamente en los términos de progreso técnico. Esta forma de estimación de la función de producción y la PTF fue

novedosa porque modelizó el proceso de producción en dos funciones interrelacionadas, una que capturaba la tecnología de producción incorporada en la planta y la otra que recogía las condiciones operativas del día a día y que provocaba desviaciones de la frontera tecnológica. Esto se realizó a través del Mecanismo de Corrección de Error (MCE), técnica econométrica que permitió la estimación de parámetros de la relación de largo plazo, controlando la dinámica en las relaciones de producción e insumo que resultan de los *shocks* y perturbaciones de corto plazo, todo ello en un solo paso (Stock, 1987), minimizando así los sesgos señalados por Gabaix. La formulación de la doble relación de corto plazo y largo plazo fue representada de la siguiente forma:

$$\Delta q_t = \varphi_0 + \varphi_1(q_{t-1} - a - \theta(t-1) - \alpha k_{t-1} - \beta l_{t-1}) + \sum_{i=1}^{12} \varphi_{i+1} \Delta q_{t-i} \\ + \sum_{i=0}^{12} \varphi_{i+14} \Delta k_{t-i} + \sum_{i=0}^{12} \varphi_{i+27} \Delta l_{t-i} + U_t$$

donde los parámetros  $\varphi$  representaban los controles de los *shocks* en las relaciones de corto plazo.

Este mecanismo de estimación corrige las correlaciones espurias que pueden aparecer cuando las variables económicas en niveles siguen una tendencia temporal común (como suele ocurrir con los *inputs* y *outputs* de un proceso de producción). También corrige los sesgos de variables omitidas que pueden ocurrir cuando la estimación de la relación de largo plazo (función de producción económica) ignora la correlación entre insumos y productos causada por perturbaciones de corto plazo en el proceso de producción. La estimación indicaba si el proceso de producción convergía a la relación de largo plazo o no. Si no se rechazaba la convergencia, la estimación proporcionaba estimaciones consistentes y eficientes de los parámetros de la función de producción (elasticidad producto-insumo y tasa de crecimiento de la PTF). Al mismo tiempo, a partir de la estimación a corto plazo, se obtenían las desviaciones de la tasa de crecimiento del producto a largo plazo provocadas por las perturbaciones del proceso productivo.

La única restricción subyacente que unía los dos modelos era que la relación de corto plazo pertenecía al dominio de las posibilidades tecnológicas de largo plazo determinadas por la función de producción. Esto significaba que, si se eliminaban todas las perturbaciones a corto plazo en la nueva situación, la planta siempre funcionaría en un punto de la relación a largo plazo.

La relación a largo plazo proporcionaba un punto de referencia teórico para el nivel máximo de producción en un momento concreto, dado un nivel de conocimiento y para determinadas cantidades de recursos utilizados en la producción. Sin

embargo, en la práctica, la producción regular no tenía lugar en las condiciones suaves propuestas por la función de producción, sino que se producían fluctuaciones en los recursos disponibles y la producción resultante era fruto de los *shocks* y de las restricciones en las decisiones, impuestas por las regulaciones laborales y acuerdos con los empleados, sobre elementos organizativos como el número de turnos de producción, períodos de vacaciones, prácticas de contratación, etcétera.

Las variables de insumos y productos que entraban en la función de producción podían mostrar una tendencia temporal que debía tenerse en cuenta en la estimación de los parámetros de la tecnología, para asegurar que el modelo econométrico estimado proporcionaba los parámetros verdaderos de una tecnología subyacente y no solo una asociación espuria entre variables que se movían en la misma dirección a lo largo del tiempo. Más específicamente, para que la formulación econométrica de la función de producción tuviera sentido económico, las variables asociadas debían integrarse en el primer orden. Además de mostrar una tendencia temporal común, las variables de *inputs* y *outputs* de la función de producción podían compartir *shocks* y movimientos simultáneos por cambios temporales en el proceso de producción causados por ciertas intervenciones de gestión, por ejemplo, la decisión de cambiar de dos a tres turnos de producción. Si estos *shocks* y perturbaciones no se modelaban explícitamente como parte de la formulación econométrica de la función de producción, entonces los coeficientes estimados de la tecnología de largo plazo podían estar sesgados debido a los efectos de las variables omitidas. Como parte de esta relación de corto plazo, se incluyeron intervenciones en diferentes momentos en el tiempo, como un cambio en el número de turnos de producción, el calendario de vacaciones y una huelga laboral que, aunque no eran propiamente innovaciones gerenciales sí supusieron cambios organizativos.

La relación a corto plazo entre los cambios en la producción y los cambios en los insumos, junto con cualquier perturbación estocástica o relacionada con la gestión, era “funcionalmente libre”. Teniendo en cuenta esta hipótesis, la función a estimar se formulaba como una relación empírica pura, sin una teoría económica explícita que respaldase la representación econométrica. La “verdadera” relación económica subyacente entre las variables dependientes y explicativas se seleccionaba mediante criterios estadísticos puros, de significación estadística y bondad de ajuste. Aunque los parámetros estimados del proceso de producción a corto plazo no pudieran relacionarse con los parámetros de la función de producción a largo plazo (dado que las dos relaciones funcionales modelan dos procesos diferentes), algunos de los parámetros estimados del modelo sin función podían ser informativos para la administración de la empresa, por ejemplo, la pérdida de producción durante una huelga y, por lo tanto, obtener una estimación coherente también era un objetivo del modelo a corto plazo.

Dado que las formulaciones de largo y corto plazo de la tecnología de producción subyacente de la planta modelaban dos procesos diferentes, se podrían estimar por separado, asegurando que las variables y los términos de error satisficieran las propiedades estadísticas requeridas para obtener una estimación eficiente y consistente de los parámetros. Si existía alguna restricción en la relación funcional de corto plazo entre insumos y producción impuesta por la función de producción de largo plazo, podría agregarse como parte del modelo de corto plazo una vez que se hubiera estimado el de largo plazo. El MCE original para la econometría de series temporales propuesto por Engle y Granger (1987) operaba como un proceso de estimación de dos etapas donde los residuos de la relación a largo plazo se incluían como variables explicativas adicionales de la relación a corto plazo, para asegurar que, incluso aunque los dos procesos eran diferentes, el último no se sale del camino temporal establecido por el primero.

Stock (1987) transformó el MCE original de dos etapas en una estimación simultánea en la que los parámetros de la relación funcional económicamente significativa a largo plazo entre las variables, y los parámetros de la formulación econométrica a corto plazo libre de forma funcional, se estimaban simultáneamente. El método tenía la ventaja de que la estimación de la función de producción de largo plazo controlaba las variables que son parte del modelo de corto plazo, que serían omitidas en la estimación de la primera fase del método de dos etapas. Si estas variables omitidas (por ejemplo, aquellas que capturan decisiones de gestión) estuvieran correlacionadas con las cantidades de *inputs*, entonces la estimación de los parámetros de tecnología estaría sesgada. Todo lo expuesto, mostraba como el MCE era una herramienta econométrica útil para estudios que se ocupan de las innovaciones gerenciales.

La mayoría de los artículos publicados sobre casos de estudio examinan las causas por las que una empresa implementa una nueva práctica y sus consecuencias. Sin embargo, la aportación realizada no solo buscaba una metodología que permitiera cuantificar el diferencial en el rendimiento debido a un cambio reconocible, sino que se buscaba una forma general de comparar la gestión cotidiana de unidades productivas heterogéneas mediante la tasa de crecimiento de la eficiencia operativa, PTF. En definitiva, se buscó una forma de evaluar la evolución de la experiencia y del perfeccionamiento de las operaciones de la planta, lo que permitiría a la gerencia conocer la dinámica de mejora y afinar en mayor medida su planificación de la demanda de insumos y capacidad.

A través de artículos previos publicados como el de Lieberman Lau y Williams (1990) y Lieberman y Dhawan (2005) se realizó un ejercicio de análisis de la función de producción y las estimaciones de productividad para la industria. Aportando

información sobre los principales parámetros de la tecnología de producción para los fabricantes de EE. UU. y Japón. Proporcionando orientaciones sobre los costes laborales, sobre el valor agregado, y la elasticidad estimada de la mano de obra sobre la producción. Así como los ritmos de mejora en crecimiento anual promedio de la PTF de los diferentes fabricantes.

Otros resultados llamativos fueron: que el tiempo de convergencia a la función de producción de largo plazo de las desviaciones debidas a *shocks* y perturbaciones de corto plazo era de aproximadamente 6 meses; que se detectó un impacto negativo del factor trabajo en el corto plazo con 9 meses de retardo debido a la rotación de personal eventual que la legislación no permitía contratar periodos más largos de 9 meses; y que el cambio de dos a tres turnos provocó una pérdida de producción del 6,4 por 100 concentrada en el mes en que se implementó el cambio, después de un mes, el nivel de producción de los insumos dados era el mismo que cuando la planta operaba con dos turnos.

La pregunta clave que se planteó era si existía una frontera de producción y cuál era el proceso que convergería hacia ella en un mundo ideal libre de conmociones. Todo esto ayudaría a la gerencia a identificar las ganancias potenciales de eficiencia a corto plazo al controlar lo anticipado (como vacaciones, cambios de turno, ...) y lo no anticipado (rotación de eventuales, cambios legislativos, ...).

### **3. MODELO DE APRENDIZAJE MIXTO O GENERAL**

Una vez determinado el progreso técnico, se llevó a cabo un detenido análisis de su evolución, modelizando una generación y transmisión de conocimientos que no seguía un ritmo de crecimiento constante ni tampoco se acomodaba exactamente al progreso técnico implícito en las curvas de aprendizaje por experiencia más frecuentes. Todo ello con la intención de desarrollar una metodología útil como herramienta de apoyo a la toma de decisiones, al control y al seguimiento de unidades productivas.

La literatura sobre el aprendizaje identificaba tres mecanismos de mejora de rendimiento principales (Argote, 1999). El primero se centraba en la mejora de las habilidades individuales que se desarrollan con la repetición de tareas, en definitiva, se trataba de una mejora motora de movimientos y capacidad corporal. Un segundo mecanismo cuyo origen era la experimentación y que permitía mejorar los procedimientos establecidos, es decir, representaba una reflexión sobre como ordenar y ejecutar las tareas sencillas, y como aumentar la eficiencia del sistema en su conjunto (Argote y Epple, 1990; Arrow, 1962), identificando las capacidades de absorción. El tercer mecanismo era la capacidad de los individuos de aprender

de la observación del comportamiento y desempeño de los demás, o lo que se llamó aprendizaje social (Foster y Rosenzweig, 1995).

La mejora en el rendimiento podía ser modelizada como un mecanismo de aprendizaje por experiencia que seguía un proceso determinista, o como un proceso estocástico de repetición de intentos por encontrar la forma óptima de proceder. En el aprendizaje determinista el rendimiento máximo alcanzable era conocido por todos los agentes (y quedaba marcado por la tecnología y el conocimiento existente), aunque existían errores y *shocks* que se generaban en el proceso que condicionaban la velocidad a la que los individuos y grupos convergían hacia dicha solución. Cuando el aprendizaje tenía lugar en un entorno estocástico, los individuos no conocían exactamente la mejor manera de realizar una actividad, ya que la forma óptima de realizar la actividad debía inferirse progresivamente de los resultados obtenidos, entendidos como una señal ruidosa.

El aprendizaje organizacional se traducían en un mayor rendimiento de las empresas, es decir, menores costes, mayor productividad, mejor calidad, y se había estudiado ampliamente en la literatura de operaciones, administración y economía. Las estrategias de investigación variaban desde una perspectiva de conjunto, donde se estudiaba el aprendizaje organizacional como un elemento endógeno que dependía de factores como la capacidad de absorción de la organización (Cohen y Levinthal, 1990) o la cultura de la organización (Skerlavaj, 2007), a una perspectiva con un nivel de detalle mayor, donde el aprendizaje analizaba la irrupción de nuevas formas de organizar el trabajo y de gestionar a los implicados, en definitiva, de realizar tareas y organizarlas. En todos los casos se trataba de explicar la evolución del rendimiento a lo largo del tiempo a través de algún modelo.

Se tomó la función de producción [1] y se reescribió la representación de la PTF, quedando:

$$Q(t) / F(K, L; t) = A(t) \quad [3]$$

de esta forma  $A(t)$  representaba el nivel de eficiencia operativa en el período  $t$ . Desarrollando una modelación de aprendizaje que explicaba la evolución temporal del término  $A(t)$  de la PTF para los casos en los que el resto de parámetros permanecían constantes en el tiempo (la variable de tiempo  $t$  se aplicaba solo a las cantidades producidas y a los insumos), suponiendo que los parámetros para los insumos en  $F(K, L; t)$  eran los obtenidos de la relación de largo plazo en [2]. De esta forma la PTF era obtenida como la proporción de producción no explicada por la estructura productiva.

La dinámica para  $A(t)$  variaba dependiendo del enfoque. Por ejemplo, la hipótesis de crecimiento permanente y constante implicaba que  $A(t) = A(0) e^{\theta t}$ , donde

$\theta$  era la tasa de crecimiento constante; mientras la hipótesis de la curva de aprendizaje determinista más utilizada en las ciencias sociales (Parente, 1994) implicaba que  $dA(t)/dt = \gamma[A^* - A(t)]$  donde  $\gamma$  y  $A^*$  eran constantes conocidas. Esta última función capturaba el alcance del aprendizaje  $A^*/A(0)$  (relación entre la PTF máxima y mínima) y la velocidad de aprendizaje  $\gamma$ .

La principal aportación fue proponer una forma funcional general que recogía tanto un crecimiento constante que dependía de lo que quedaba por aprender, como un crecimiento que aumentaba de forma exponencial, además de permitir simultaneizar ambos crecimientos. La mayor flexibilidad de la forma funcional propuesta permitió mejores ajustes de procesos de aprendizaje complejos. Su forma funcional fue:

$$dA(t)/dt = (\gamma + \lambda A(t)/A^*) (A^* - A(t)) \quad [4]$$

El lado izquierdo de la ecuación representaba el cambio absoluto en la medida del rendimiento para el período  $t$ .

El lado derecho tenía dos términos:  $(A^* - A(t))$ , era la diferencia entre el nivel máximo de eficiencia operativa del proceso o meta del proceso de aprendizaje,  $A^*$ , y el nivel momentáneo de eficiencia operativa que resultaba del aprendizaje pasado,  $A(t)$ . Así, la diferencia  $(A^* - A(t))$  era el acervo de conocimiento que aún estaba pendiente de incorporación al proceso productivo en el período  $t$ ;  $(\gamma + \lambda A(t)/A^*)$  era la velocidad de aprendizaje, definida como la proporción del conocimiento pendiente que se aprendía en el período  $t$ . Los parámetros  $\gamma$  y  $\lambda$ , eran no negativos y, dependiendo de sus valores, el proceso de aprendizaje tomaba una forma u otra de la siguiente manera:

*Aprendizaje constante:* correspondía a los valores de los parámetros:  $\gamma > 0$  y  $\lambda = 0$ . En este caso la velocidad de aprendizaje era constante e igual a  $\gamma$ . La capacidad de aprendizaje organizacional (la proporción del conocimiento aún pendiente de adquirir en el período  $t$ ) se daba de manera exógena y se mantenía constante durante todo el proceso de aprendizaje. Así, el modelo general incluía los modelos previos de curva de aprendizaje comentados anteriormente como un caso particular. Las ecuaciones que lo caracterizaban eran:

$$\frac{dA(t)}{dt} = \gamma (A^* - A(t)) \quad A(t) = A^* - (A^* - A(0))e^{-\gamma t}$$

*Aprender a aprender:* correspondía a los valores de los parámetros:  $\gamma = 0$  y  $\lambda > 0$ . En este caso la velocidad de aprendizaje era igual a  $\lambda A(t)/A^*$  y variaba con el tiempo en función de la relación entre el conocimiento acumulado hasta  $t$ ,  $A(t)$ , y el conocimiento

potencial total,  $A^*$ . La velocidad del aprendizaje en un momento dado era una función creciente del aprendizaje acumulado hasta  $t$ , en relación con el aprendizaje acumulado potencial total. Dado que la velocidad a la que la organización aprende en un momento del tiempo era una función del aprendizaje acumulado pasado, se interpretaba este resultado como evidencia de que la capacidad de aprendizaje de la organización aumenta con el tiempo con el conocimiento relativo acumulado. Esta era la razón por la que se definió este modelo de aprendizaje como aprender a aprender. Nótese que lo que determinaba la velocidad del aprendizaje no era el valor absoluto del conocimiento adquirido por el aprendizaje pasado, sino este valor relativo al máximo conocimiento posible que se podía adquirir. Las ecuaciones que lo caracterizaban eran:

$$\frac{dA(t)}{dt} = \gamma (A^* - A(t)) \quad A(t) = \frac{A^*}{1 + be^{-\lambda t}} \quad \text{donde } b = (A^* - A(0))/A(0)$$

Un caso especial de interés era cuando  $A^*$  tendía a infinito, es decir, no tenía un valor limitado preestablecido. Bajo este supuesto adicional, el modelo se escribía como  $dA(t)/dt = \lambda A(t)$ , esta representación incluía las formas funcionales de crecimiento permanente y constante. Las ecuaciones que lo caracterizaban eran:

$$\frac{dA(t)}{dt} = \lambda A(t) \quad A(t) = A(0)e^{\lambda t}$$

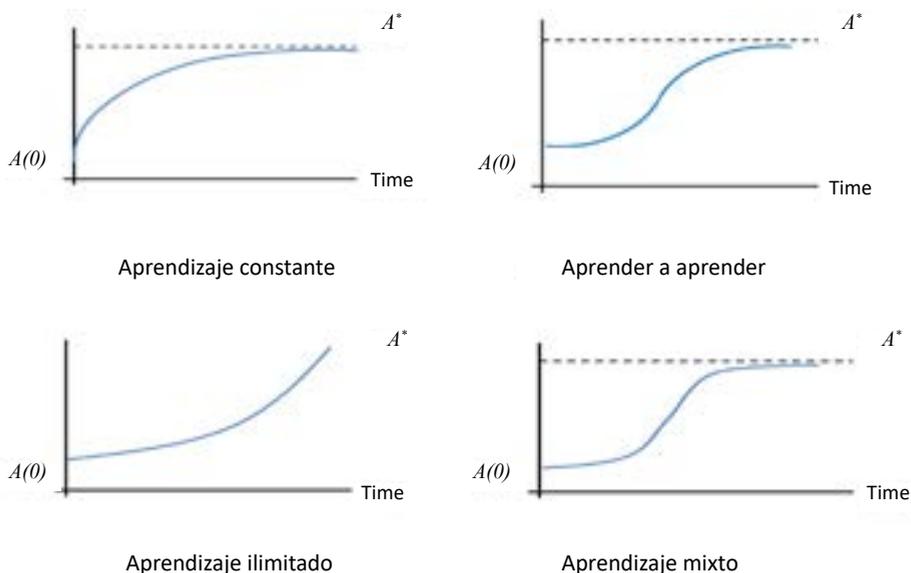
*Modelo de aprendizaje mixto:* correspondía a cuando  $\gamma > 0$  y  $\lambda > 0$ . Combinaba la capacidad de aprendizaje organizacional constante, dada exógenamente, junto con las capacidades de aprendizaje adquiridas a partir del conocimiento ya acumulado. La importancia relativa de cada componente del proceso en un entorno de producción particular pasaba a ser una cuestión empírica. Las ecuaciones que lo caracterizaban eran:

$$\frac{dA(t)}{dt} = (\gamma + \lambda \frac{A(t)}{A^*})(A^* - A(t)) \quad A(t) = A^* \frac{1 - \frac{\gamma}{\lambda} \Theta e^{-(\gamma + \lambda)t}}{1 + \Theta e^{-(\gamma + \lambda)t}} \quad \text{donde } \Theta = \frac{A^* - A(0)}{\frac{\gamma}{\lambda} A^* + A(0)}$$

Técnicamente, el ajuste de sus parámetros de aprendizaje de la ecuación [4] dependía de la evolución temporal de  $A(t)$ . En la figura 1 se muestra un resumen de las formas funcionales de  $A(t)$  obtenidas para cada tipo de aprendizaje.

El proceso de aprendizaje constante implicaba un perfil temporal creciente del nivel de PTF, pero a una tasa decreciente ( $A(t)$  era una función creciente y cóncava del tiempo  $t$ ). El caso de aprender a aprender implicaba un perfil temporal creciente de la PTF, pero primero con una tasa de crecimiento en aumento y luego en disminución ( $A(t)$  presentaba una forma sigmoïdal). En el caso particular de aprender a aprender sin límite superior ( $A^* = \infty$ ), la función era creciente y convexa respecto

FIGURA 1  
FORMAS FUNCIONALES DE  $A(t)$



Fuente: Sáenz-Royo y Salas-Fumás (2013).

al tiempo (la pendiente aumentaba con el tiempo). Esto implicaba también que el logaritmo de  $A(t)$  era una función lineal respecto al tiempo. Finalmente, el modelo de aprendizaje mixto daba un perfil de crecimiento respecto al tiempo que primero era convexo y, después, se volvía cóncavo. El perfil era similar al resultante de aprender a aprender, pero la forma funcional resultante del modelo de aprendizaje mixto era más flexible porque tenía dos parámetros,  $\gamma$  y  $\lambda$ .

Se introdujeron en el MCE tres posibles modelos de la dinámica de aprendizaje, el modelo de crecimiento ilimitado, el modelo de Jovanovic-Nyarko y el de aprendizaje mixto. La velocidad de aprendizaje venía dada por la función donde el valor de  $A(t)$  estaba en el rango de  $A(0) = 1.046$  y  $A^* = 1.530$ . Dado que en la estimación los dos parámetros,  $\gamma$  y  $\lambda$ , eran diferentes de cero, los datos no rechazan la hipótesis de que el aprendizaje en la planta de ensamblaje fuera impulsado por un proceso de aprendizaje mixto determinista. Así, las estimaciones proporcionaban al aprendizaje mixto el mayor  $R^2$  corregido y las mayores significatividades en sus parámetros. En este modelo la velocidad de aprendizaje pasaba de un valor bajo de 0.0275 en el primer período a un valor alto de 0.0371 en el último mes, cuando el sistema alcanza la máxima eficiencia productiva. El segundo término de la velocidad de aprendizaje (el componente de aprender a aprender) contribuía sustancialmente

más (tres veces más) que el parámetro de aprendizaje constante a la velocidad de aprendizaje. Lo que mostraba mediante un caso de entidad la validez del modelo.

#### 4. CONCLUSIONES

La eficiencia operativa de los procesos productivos debe ser una prioridad para cualquier empresa en un mercado competitivo. La productividad era una medida habitual de la eficiencia operativa y los fabricantes de automóviles expresaban una preocupación permanente por las ganancias de productividad a lo largo del tiempo debido a la alta competitividad de su sector. La HPV, era una de las medidas de rendimiento más utilizadas por estos fabricantes para evaluar su competitividad (Weyer, 2011). La HPV se calculaba a nivel de planta y modelo de automóvil teniendo la ventaja de que su cálculo era simple. Sin embargo, existían limitaciones significativas para sacar conclusiones sobre la eficiencia comparativa si las plantas comparadas diferían en sus condiciones tecnológicas y operativas, especialmente si existían diferencias en la intensidad de capital y en el grado de economías de escala de sus respectivas tecnologías de producción. Las medidas de eficiencia, como la PTF, involucraba la relación entre la producción por período y una medida agregada de capital y trabajo, superando así las distorsiones en la productividad laboral como indicador de eficiencia operativa cuando la intensidad del capital difiere entre las unidades de producción. Además, la estimación de las tendencias temporales en la eficiencia operativa, como parte de la función de producción económica de una planta de producción, podría combinarse con la estimación conjunta de las relaciones insumo-producto a corto plazo que capturarían la dinámica diaria de producción. Esto ayudaría a separar los *shocks* y perturbaciones operativas, más o menos bajo el control de la dirección, de las verdaderas ganancias de eficiencia, por ejemplo, del aprendizaje práctico o de las nuevas técnicas de gestión. El MCE sería la metodología econométrica propuesta para obtener relaciones tanto a largo como a corto plazo que capturarían el rendimiento de una determinada unidad de producción.

El crecimiento de la productividad se considera el principal impulsor de la prosperidad económica, por lo que hay mucho interés en encontrar las fuentes de ese crecimiento. El caso estudiado era el resultado del aprendizaje de los empleados y gerentes sobre la mejor forma de hacer las cosas dentro de las limitaciones impuestas por una tecnología fija. Se estudió el patrón temporal de eficiencia operativa en términos de PTF observada, y se analizaron varios modelos de aprendizaje para determinar cuál de ellos presentaba mejores resultados de acuerdo a la evidencia empírica. Los resultados indicaron que el modelo de aprendizaje determinista extendido propuesto, donde la velocidad de aprendizaje combinaba un término

constante exógeno y un término que aumentaba con el tiempo como una función del aprendizaje pasado acumulativo relativo, era el modelo que mejor representaba los datos empíricos.

Una explicación de por qué el aprendizaje determinista se ajustaba mejor a la evidencia empírica que el estocástico era que la planta perteneciera a un fabricante mundial de automóviles grande y experimentado y los ingenieros y gerentes que diseñaron la planta probablemente anticiparon bien los altos estándares de desempeño que resultarían del aprendizaje operativo. El proceso de aprendizaje determinista no significaba que no hubiera ruido en torno a la tendencia de la PTF, sino que tal ruido no sería parte del proceso de aprendizaje en sí, como es el caso de los modelos de aprendizaje estocásticos. Por tanto, los resultados del estudio tuvieron las siguientes implicaciones: la adquisición de conocimiento era un proceso gradual, de modo que incluso cuando se conocía el estándar de máxima eficiencia, ese estándar requería tiempo para alcanzarse. La planta de montaje necesitó entre seis y siete años para alcanzar el valor de  $A^*$ , que fue alrededor de un 50 por 100 más alto que el nivel de eficiencia operativa al inicio del período. El aumento se produjo con tasas de crecimiento que variaban sustancialmente, primero acelerándose y luego desacelerándose, y la tasa máxima de crecimiento mensual ocurrió en el mes 40. Los resultados confirmaron que el aprendizaje mixto debía considerarse una alternativa plausible a la curva de aprendizaje.

La metodología y la modelización propuestas aportaron dos informaciones relevantes “la velocidad de aprendizaje” y “la velocidad de ajuste” en el funcionamiento de la planta de montaje. La primera era una medida de la velocidad a la que se adquieren los conocimientos, mientras que la velocidad de ajuste era una medida de la rapidez con que lo aprendido se transforma en una mayor eficiencia productiva. Los resultados empíricos indicaron que la planta necesitó entre cinco y seis meses para ajustar los resultados de producción a los objetivos.

## 5. RESUMEN

El profesor Sálas-Fumás a través de la dirección de la tesis “Dinámica de la Eficiencia Productiva” analizó en profundidad los instrumentos que permiten la obtención de información no parcial de la gestión. Su estudio se centró en la evolución de los indicadores de una planta de fabricación de automóviles durante los primeros años de funcionamiento, con tres aspectos fundamentales, la estimación de la función neoclásica de producción que sintetiza la tecnología productiva, el estudio de la productividad total de los factores, y el estudio de los elementos que pueden explicar su evolución a lo largo del tiempo, todo ello desde una amplia perspectiva de gestión de las operaciones en la empresa. Sus hallazgos se

formalizaron en dos artículos: “Long- and short-term efficiency in an automobile factory: An econometric case study” publicado en *International Journal of Production Economics* y “Learning to learn and productivity growth: Evidence from a new car-assembly plant” publicado en *Omega*. En el primero se aborda el Mecanismo de Corrección de Error (MCE) como técnica econométrica más adecuadas para detectar los *shocks* de corto plazo y la tendencia de largo plazo de la función de producción neoclásica a nivel de planta, para posteriormente analizar la productividad total de los factores (PTF) como variable de gestión. En el segundo se presenta una generalización de la curva de experiencia, incluyendo la posibilidad de “aprender a aprender” (la velocidad del aprendizaje aumenta con el tiempo al aprovechar lo que ya se ha aprendido), para posteriormente comparar la capacidad de ajuste del nuevo modelo de aprendizaje determinista extendido con la del aprendizaje estocástico de Jovanovic y Nyarkos (1995).

## BIBLIOGRAFÍA

- ADLER, P. S. y CLARK K. B. (1991). Behind the learning curve: A sketch of the learning process. *Management Science*, 37, pp. 267–281
- ARGOTE, L. (1999). *Organizational learning: Creating, retaining, and transferring knowledge*. Norwell, MA: Kluwer.
- ARGOTE, L. y EPPLE. D. (1990). Learning curves in manufacturing. *Science*, 247, pp. 920-924.
- ARROW, K. J. (1962). The economics implications of learning by doing. *Review of Economic Studies*, 29, pp. 155-173.
- BALASUBRAMANIAN, N. y LIEBERMAN, M. B. (2010). Industry learning environments and the heterogeneity of firm performance. *Strategic Management Journal*, 31, pp. 390–412.
- BISKUP, D. (2008). A state-of-the-art review on scheduling with learning effects. *European Journal of Operational Research*, 188, pp. 315–329.
- COHEN, W. M. y LEVINTHAL, D. A. (1990). Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35, pp. 128-152.
- ENGLER, R. y GRANGER, C. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation and testing. *Econometrica*, 55, pp. 251-276.
- FOSTER, A. y ROSENZWEIG, M. (1995). Learning by doing and learning from others: Human capital and technical change in agriculture. *Journal of Political Economy*, 103, pp. 1176-1209.
- GABAIX, X. (2011). The granular origins of aggregate fluctuations. *Econometrica*, 79(3), pp. 733-772.

GHOBIAN, A. y HUSBAND, T. (1990). Measuring total factor productivity using production functions. *International Journal of Production Research*, 28(8), pp. 1435-1446.

GUNASEKARAN, A., KORUKONDA, A. R., VIRTANEN, I. y YLI-OLLI, P. (1994). Improving productivity and quality in manufacturing organization. *International Journal of Production Economics*, 36(2), pp. 169–183.

HAMILTON, B., NICKERSON, J. y OWAN, H. (2003). Team incentives and worker heterogeneity: An empirical analysis of the impact of teams on productivity and participation. *Journal of Political Economy*, 111(3), pp. 465-497.

HAYES, R. H. y CLARK, K. B. (1986). Why some factories are more productive than others. *Harvard Business Review*, 64, pp. 66–73, September–October.

ICHNIOWSKI, C. y SHAW, K. L. (2009). Insider econometrics: empirical studies of how management matters (*wp*, 15618). National Bureau of Economic Research.

ICHNIOWSKI, C., SHAW, K. y PRENNUSHI, G. (1997). The effects of human resource management practices on productivity: A study of steel finishing lines. *American Economic Review*, 87, pp. 291-313.

JONES, D. C., KALMI, P. y KAUKANEN, A. (2010). Teams, incentive pay, and productive efficiency: Evidence from a food-processing plant. *Industrial and Labor Relations Review*, 63(4), pp. 606-626.

JOVANOVIĆ, B. y NYARKO, G. (1995). A Bayesian learning model fitted to a variety of empirical learning curves. *Brookings Papers: Microeconomics*, Vol. 26, pp. 247-305.

LAZEAR, E. (2000). Performance pay and productivity. *American Economic Review*, 90 (5), pp. 1346-1361.

LIEBERMAN, M. B. y DHAWAN, R. (2005). Assessing the resource base of Japanese and US auto producers: A stochastic frontier production function approach. *Management Science*, 51(7), pp. 1060-1075.

LIEBERMAN, M. B., LAU, L. J. y WILLIAMS, M. D. (1990) Firm-level productivity and management influence: A comparison of U. S. and Japanese automobile producers. *Management Science*, 36, pp. 1193-1215.

MOORE, G. E. (1975). Progress in digital integrated electronics. En: *Electron devices meeting*, Vol. 21, pp. 11-13.

PARENTE, S. (1994). Technology adoption, learning by doing, and economic growth. *Journal of Economic Theory*, 63, pp. 346-369.

SÁENZ-ROYO, C. y SALAS-FUMÁS, V. (2013). Learning to learn and productivity growth: Evidence from a new car-assembly plant. *Omega*, 41(2), pp. 336-344.

SÁENZ-ROYO, C. y SALAS-FUMÁS, V. (2014). Long-and short-term efficiency in an automobile factory: An econometric case study. *International Journal of Production Economics*, 156, pp. 98-107.

SKERLAVAJ, M., STEMBERGER, M., SKRIJAR, R. y DIMOVSKI, V. (2007). Organizational learning culture—the missing link between business process change and organizational performance. *International Journal of Production Economics*, 106, pp. 346–367.

STOCK J. H. (1987). Asymptotic properties of least square estimators of cointegrating vectors. *Econometrica*, 55, pp. 1035-1056.

SYVERSON, CH. (2011). What determines productivity? *Journal of Economic Literature*, 49, pp. 326-365.

VAN ARK, B., O'MAHONY, M. y TIMMER, M. (2008). The productivity gap between Europe and the United States: Trends and causes. *Journal of Economic Perspectives*, 22, pp. 25-44.

WEYER, M. (2011) Hours-per-vehicle controlling – the renaissance of staff productivity. *International Journal of Production Research*, 49, pp. 3271-3284.

WOMACK, J. P., JONES, D. T. y ROOS, D. (1990). *The Machine that Changed the World*. Maxwell, Macmillan, Oxford.

ZANGWILL, W. y KANDOR, P. (1998). Towards a theory of continuous improvement and the learning curve. *Management Science*, 44, pp. 910-919.