

## LA APLICACIÓN DE LAS MATEMÁTICAS A LOS PROBLEMAS DE ADMINISTRACIÓN Y ORGANIZACIÓN: ANTECEDENTES HISTÓRICOS

ANA MILLÁN GASCA  
Università di Roma «La Sapienza»

### RESUMEN

*Un sector característico de la matemática aplicada del siglo XX es el que se ocupa de la modelización de los problemas organizativos y de gestión de operaciones. Las técnicas matemáticas disponibles son muy variadas, como lo son los contextos aplicativos concretos (en la industria, la defensa, la administración). Los orígenes de este sector suelen ser identificados con la creación de la investigación operativa en torno a la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, los primeros intentos de dar un tratamiento matemático a los problemas «operativos» se remontan al periodo entre finales del siglo XVIII e inicios del siglo XIX, y los esfuerzos prosiguieron en adelante, aunque no en modo sistemático. Este tipo de problemas se englobaba en las responsabilidades organizativas de los técnicos e ingenieros y de los gerentes y administradores que emergen en el proceso de modernización. Se trataba de problemas militares y, sobre todo, de problemas que emergieron con el desarrollo de los sistemas de producción y de transporte típicos*

### ABSTRACT

*Modelling and analysis of operations management and organization is a distinctive branch of 20<sup>th</sup> century applied mathematics. Several mathematical techniques are available, and the applications space from industry to the military, and administration. The origins of this branch is usually linked to the development of operations research around IIWW. Nevertheless, the first attempts at applying mathematics to operations problems date back to the XVIII-XIXth centuries, and efforts in this direction —often isolated and not systematic— went on since then. The problems considered were those raised by the organization responsibilities of technicians and engineers as well as managers and administrators, typical of the processes of modernization. Early attempts regarded military problems as well as those involved in the development of production and transportation systems in the industrialized word. Motivation and obstacles in the mathematical approach in this context are similar to*

*del proceso de industrialización. En estos sectores aparecieron motivaciones y obstáculos análogos a los ya observados en los intentos de aplicar las matemáticas a campos distintos de la física.*

*those present in other essays of applying mathematics to non-physical phenomena.*

Palabras clave: Ingeniería, Investigación operativa, Matemática aplicada, Modelización, Organización.

## 1. Introducción: las matemáticas de la organización industrial

La «matemática de los sistemas industriales» conoce hoy día un gran desarrollo. En los últimos veinticinco años del siglo XX, el progreso tecnológico en el campo de los sistemas informáticos, la robótica y los sistemas de control automático ha permitido cultivar el sueño de una fábrica automática, un objetivo que ha coagulado los esfuerzos dirigidos a extender la automatización a aquellas fases del proceso productivo industrial en los que todavía persistía la exigencia de la presencia humana y la intervención manual. Han sido desarrolladas e implementadas en este periodo innovaciones técnicas como los instrumentos CAD (*Computer Aided Design*) en el ámbito informático y los FMS (*Flexible Manufacturing Systems*) en el ámbito del control automático. Esta evolución tecnológica ha estimulado la investigación sobre los problemas de organización implicados en la gestión del proceso productivo: gran parte de estos estudios se sirven de técnicas matemáticas de optimización, englobadas en una disciplina, la investigación operativa<sup>1</sup>.

La interacción entre la innovación tecnológica y los problemas de organización en el mundo productivo se manifestó históricamente desde los inicios de la Revolución industrial. Los ejemplos concretos abundan en la rica realidad industrial del periodo de creación de las modernas fábricas en Gran Bretaña, primero en el sector de la manufactura del algodón y en general textil, y más adelante en la industria mecánica. En la fase inicial de esta gran transformación productiva, las exigencias organizativas ligadas al ritmo del trabajo en las fábricas desempeñaron un importante papel como estímulo de invenciones técnicas. El desarrollo de nuevas máquinas y las mejoras de las ya existentes, inspiradas por la necesidades concretas de la producción, fueron debidas a menudo a obreros especializados, antes de que se registrase la introducción efectiva de las consideraciones teóricas (mecánica, resistencia de materiales, química) en el

mundo de la técnica y la industria. Viceversa, la innovación técnica exigió afrontar los problemas organizativos que ésta llevaba consigo.

Como sucede a menudo en el ámbito práctico-operativo, en la esfera de la *acción* humana ligada a la actividad productiva, la técnica y la ingeniería, la evolución real precedió la formulación teórica, escrita, de los problemas. De hecho, la existencia de un problema organizativo y de gestión en el mundo de la manufactura industrial fue expuesto por vez primera por Charles Babbage (1792-1871) en una obra publicada al final del arco histórico tradicional de la Revolución Industrial (1750-1850), bajo el título *On the economy of machinery and manufactures* (1832). La reflexión presentada por Babbage incluía el proyecto de una formulación cuantitativa, en términos de minimización del costo de producción, del «problema de organización» de las manufacturas. Su obra fue traducida a los idiomas de casi todos los países embarcados con mayor o menor éxito en la aventura de la modernización industrial (en castellano fue traducida la 3ª edición en 1835<sup>2</sup>), pero la exploración de sus vías de difusión y de su influencia en la práctica industrial es un problema histórico abierto. No obstante, la afirmación del problema organizativo como problema susceptible de un estudio científico, y en particular de análisis matemático, se coloca en una fase muy posterior, en el periodo de la Segunda Revolución Industrial, con la afirmación del «sistema americano de producción» y de la producción de masa.

En lo que se refiere a la aplicación de las matemáticas, la organización industrial representa un contexto a mitad de camino entre, por una parte, la tecnología y la ingeniería, y, por otra, las ciencias humanas y sociales. El primero es un contexto clásico de aplicación de las matemáticas —invocadas como clave de conocimiento ya por los ingenieros del Renacimiento— y que, en el curso de la historia, ha sido el escenario de muchos fértiles encuentros. El segundo emergió con fuerza sólo en el siglo XX. Es bien sabido que ya desde mucho antes la realidad industrial había mostrado ser una eficaz fuente de ejemplos y de inspiración de las «ciencias morales y políticas», a partir de las reflexiones de economía política de Adam Smith (1723-1790). La expansión de la civilización industrial, por usar las palabras de Elton Mayo (1880-1949), ha convertido al mundo productivo en uno de los laboratorios preferidos en el desarrollo de los análisis de economía, psicología y sociología.

Más aún, durante el siglo XX la idea clásica de *fábrica* o la moderna idea de *empresa* se han convertido en el arquetipo de *sistema organizativo*, un concepto abstracto que puede encontrar realización en cualquier contexto

operativo (producción industrial, sistemas de defensa y logística militar, administración pública, redes de servicios) o que puede ser examinado en referencia a la estructura social: tales sistemas son concebidos como objeto de una específica «ciencia de la organización<sup>3</sup>». Las palabras clave de esta nueva disciplina, como «decisión» y «control», recibidas de la ingeniería de sistemas y de la teoría de sistemas, se proponen como nuevas claves de interpretación de los problemas de las ciencias sociales. La metodología específica incluye, por lo tanto, instrumentos matemáticos<sup>4</sup>. Las matemáticas no se presentan como vía exclusiva de análisis; pero la riqueza de las técnicas operativas desarrolladas en la segunda mitad del siglo XX y la tendencia a la abstracción y a la generalización vehiculada por el uso de los modelos matemáticos ha contribuido a consolidar, a finales de siglo, este nuevo ámbito disciplinario, que se inscribe entre las «ciencias de la complejidad»<sup>5</sup>.

## 2. Las «matemáticas de la organización»: el problema historiográfico

### 2.1. *La historia del programa ilustrado de extensión de la matematización más allá de las ciencias físicas*

El estudio histórico de los orígenes y la evolución de la moderna matemática aplicada, y específicamente los casos de la economía matemática y de la biomatemática, ha mostrado la existencia de un cuadro evolutivo bastante homogéneo. Dicho cuadro se articula en torno a un amplio programa de extensión de las aplicaciones de las matemáticas más allá del ámbito de los fenómenos físicos que ha gozado de mayor o menor aceptación en relación directa con la evolución del contexto cultural de los siglos XVIII-XX. La evolución científica en los diferentes sectores en los cuales se han realizado intentos de obtener un tratamiento matemático ha llevado aparejado un debate —más o menos intenso— sobre las implicaciones epistemológicas de la aplicación de instrumentos típicos de la mecánica y de la física matemática al estudio de los fenómenos de la vida y a la esfera humana y social. Resumimos aquí brevemente las tres fases principales que se perfilan<sup>6</sup>.

La *primera fase* corresponde al periodo de la Ilustración. Los éxitos de la mecánica celeste, representados por la teoría de la gravitación universal de Newton, que alimentaron las esperanzas de los *philosophes* franceses de una transformación social basada sobre principios de racionalidad científica, condujeron naturalmente a la formulación de un programa de «matemática social»

por parte del marqués de Condorcet (1743-1794). Los contornos de dicho programa no estaban claramente definidos y los instrumentos matemáticos poco afinados. Se registra en esta época un primer intento de clasificación del nuevo tipo de fenómenos susceptibles de tratamiento matemático por parte de Condorcet. Sus seguidores realizaron numerosos esfuerzos, aunque poco sistemáticos, dirigidos a dotar de contenidos y métodos a la *mathématique sociale*, como los estudios sobre la inoculación de la viruela y sobre el desarrollo demográfico. Estos aspectos de debilidad no deben engañar, sin embargo, en cuanto a la rotundidad de la propuesta cultural, cuya influencia alimentó toda la evolución científica sucesiva de la matemática aplicada. De hecho, las reacciones a la propuesta no se hicieron esperar, abriendo así el debate científico y epistemológico sobre la oportunidad y el interés efectivo de la matematización de saberes diferentes de la física.

La *segunda fase* corresponde al declinar de este proyecto durante el siglo XIX. No faltan en esta época autores que sostienen un tal programa aun a costa de la incomprensión y las enemistades suscitadas en el ambiente científico, con repercusiones académicas muy negativas. Baste citar, a principios de siglo, el caso de Emmanuel-Étienne Duvillard de Durand (1755-1832) —poco recordado salvo por su contribución a la elaboración de las tablas de mortalidad— y a finales, el caso de Léon Walras (1834-1910), incomprendido fundador de la teoría del equilibrio económico general<sup>7</sup>. Las razones de la oposición decimonónica al programa ilustrado están enraizadas en la reacción romántica a los ideales de la Ilustración. El proceso de evolución de la historia natural, la economía política y las ciencias morales iniciado en el siglo XVIII avanza decididamente en esta época, y culminará en torno al cambio de siglo con el nacimiento de la biología moderna y de las modernas ciencias sociales. Pero en todos estos campos, que estaban adquiriendo un reconocimiento como disciplinas científicas, se prefirió explorar metodologías de investigación *ad hoc*: observación y experimentación en las ciencias de la vida, método histórico en el campo social. La idea de transferir las técnicas matemáticas utilizadas en mecánica y en física matemática era en general rechazada, en cuanto suponía en realidad la extensión del paradigma mecanicista a las esferas de la vida y de la libertad humana.

La hostilidad hacia la formulación de los problemas en forma de ecuaciones (diferenciales, o simplemente algebraicas) se extendió también a los esfuerzos por proponer instrumentos de un nuevo tipo, basados en el cálculo de probabilidades, que algunos consideran más apropiados en este tipo de aplicaciones. Aun así, la irrupción de los «números» en estas disciplinas era

un proceso imparabile. Desde un punto de vista teórico, este avance conoció un fuerte impulso a finales del siglo, bajo la influencia del positivismo, que trajo consigo la exigencia renovada de basar cualquier campo del saber sobre datos fidedignos obtenidos a partir de la observación de la realidad. Pero, sobre todo, los datos empíricos numéricos, a menudo en forma de tablas, mostraban un gran valor desde el punto de vista de las aplicaciones efectivas en el contexto social o biológico. En el ámbito demográfico, social, sanitario, el valor reconocido a la información numérica se manifestó en el desarrollo de la estadística descriptiva del siglo XIX (la misma palabra «estadística» deriva del problema de administración estatal). En el ámbito biológico, los aspectos cuantitativos irrumpieron con fuerza a finales del siglo como una de las consecuencias de la teoría de la evolución y en relación con un nuevo interés por la biología de las poblaciones. También en este caso, la información numérica representaba la base de una acción de valor económico en el campo de la ecología aplicada a la agricultura y a la pesca.

De esta manera, aunque el programa fuerte de *matematización* de los fenómenos biológicos y sociales padeció en el siglo XIX el desinterés de la mayor parte de los estudiosos, una cierta influencia se mantiene a través de lo que puede ser descrito como una genérica «confianza en los números», esto es, la apertura a la idea, mucho más débil, de *cuantificación*. Esta confianza es una de las bases del desarrollo de la biometría entre los seguidores británicos de Darwin: los trabajos de Francis Galton (1822-1911) y Karl Pearson (1857-1936) —a partir de la idea de correlación, una versión débil de la idea de causa— ponen las bases de la estadística, entendida como método de análisis de datos cuantitativos aplicable a cualquier tipo de fenómeno [PORTER, 1986, 1994,1995].

La *tercera fase* del cuadro que estamos delineando se abre a principios del siglo XX, periodo en el cual se coloca el nacimiento de la economía matemática y la biomatemática modernas. Llegan a esta fase los ecos de la discusión sobre la transferencia de los métodos de la física matemática y la alternativa representada por los métodos de la estadística, fundados en el cálculo de probabilidades. La novedad principal en esta fase es la idea de *modelo matemático*, que da cuenta de un aspecto del fenómeno a través de un esquema matemático, sin pretender ofrecer claves explicativas en términos de causa y de ley científica, y que permitirá superar, esquivándola, la discusión epistemológica clásica. La analogía mecánica que había guiado a muchos de los precursores del siglo XIX es sustituida por la *analogía matemática*: un modelo desarrollado en vista de un problema científico puede ser utilizado, si funciona, para estudiar otro

problema aun de un sector muy diferente de la ciencia. Se transfiere sólo el esquema matemático, «vaciado» de cualquier interpretación, mecánica o de otro tipo. Viceversa, modelos matemáticos desarrollados en contextos diferentes pueden mostrar entre sí una *equivalencia matemática* que inspira nuevos modos de tratar los fenómenos. Se trata de un método, la modelización matemática, que se muestra enormemente fértil, pues actúa como catalizador estimulando la búsqueda de nuevas técnicas matemáticas. Así, en el campo de la biomatemática son desarrollados métodos diferenciales (que incluyen el análisis de ecuaciones diferenciales no lineales) y nuevos instrumentos de teoría de la probabilidad; en el campo de la economía y de las ciencias sociales es introducido un poderoso instrumento teórico, la teoría de juegos.

El creador de la teoría de juegos, John von Neumann (1903-1957) adhirió con convicción al punto de vista de la modelización: «las ciencias no intentan explicar», escribía en 1955, «apenas si intentan interpretar, principalmente construyen modelos. Por modelo se entiende un constructo matemático que, con el añadido de ciertas interpretaciones verbales, describe fenómenos observados. La justificación de tal constructo matemático es sola y precisamente que se espera que funcione, esto es, que describa correctamente fenómenos en un área razonablemente amplia. Además, debe satisfacer ciertos criterios estéticos, esto es, en relación a cuánto describe, debe de ser bastante simple<sup>8</sup>». Y en un trabajo de la misma época enunciaba explícitamente la idea de que la equivalencia entre estructuras matemáticas permitía superar problemas fundamentales de la filosofía de la ciencia del siglo XIX como la discusión causalismo-finalismo. Sin embargo, aunque su visión de la matemática aplicada era radicalmente moderna, su interés en ampliar el ámbito de aplicación de las matemáticas se coloca idealmente en continuidad con el proyecto de la *mathématique sociale*: desde el punto de vista de von Neumann, en su época estaba iniciando para las ciencias sociales un largo camino análogo al recorrido por la física desde la Revolución científica. Esta misma continuidad, más acentuada si cabe por su perfil más conservador, fiel al paradigma de la física matemática clásica, es evidente en la obra de Vito Volterra (1860-1940) en dinámica de las poblaciones y en su propia descripción del proyecto científico que lo animaba en relación con la aplicación de las matemáticas a problemas biológicos y sociales<sup>9</sup>.

## 2.2. *La investigación operativa: historia del problema e historia de las técnicas matemáticas*

Ha sido sin duda el espectacular desarrollo de la matemática aplicada en el siglo XX, o —dicho en relación al cuadro evolutivo que se ha descrito— ha sido la tercera de las fases que se han indicado la motivación de partida de los estudios históricos: la historiografía se ha empeñado, así, en una búsqueda de los orígenes, tanto de los nuevos sectores (por ejemplo, economía matemática o biología matemática), como de las nuevas técnicas (por ejemplo, teoría de juegos o teoría de sistemas dinámicos). No se trata de construir una historia de los predecesores a la manera tradicional, que lee los desarrollos del pasado desde el presente (ni desde el punto de vista cultural, ni tanto menos desde el punto de vista del lenguaje matemático) y por tanto desfigura la historia. Pero existe sin duda un enigma histórico en un desarrollo impetuoso en el que la ruptura con el pasado, es decir, con la tradición de la física matemática clásica, se suma a la reiteración, más decidida si cabe que en el periodo precedente, de la propuesta de las matemáticas como clave de explicación de la realidad y como clave de acción en la realidad. De esta manera, volver la vista hacia atrás desde la perspectiva de la matemática aplicada del siglo XX enriquece nuestra comprensión de la historia de las matemáticas como instrumento de conocimiento y afina nuestra visión crítica de la ciencia como guía de la acción humana.

¿Cómo se inscriben los estudios matemáticos sobre los problemas de administración y organización en el cuadro evolutivo general que hemos delineado? El punto de partida historiográfico corresponde cronológicamente al de los casos de la economía matemática y de la biomatemática, en el sentido de que la creación de este nuevo sector de la matemática aplicada se sitúa en la misma época. Conceptual y metodológicamente, además, como en aquellos dos casos, su espectacular desarrollo estuvo profundamente unido a la modelización matemática de varios fenómenos específicos (aquí problemas de transporte, de asignación de recursos, de programación de tareas y horarios, de control de calidad y de proceso) y a la potencia de la analogía y la equivalencia matemáticas. En fin, también en este caso se asistió a la creación de técnicas matemáticas nuevas: la programación lineal (el método del simplex), la optimización combinatoria (basada en la teoría de grafos), y más adelante técnicas probabilistas, como la teoría de colas o los métodos del tipo CPM (*Critical Path Method*) y PERT (*Project Evaluation and Review Technique*).

Sin embargo, existen algunas diferencias notables con los casos de la economía matemática y la biomatemática. Se trata, en efecto, de un sector de la matemática aplicada de contornos mucho menos definidos. Esto se debe al hecho de que no surgió en torno a grandes problemas teóricos, como lo son el equilibrio económico o la competición entre especies, sino como un conjunto de prácticas operativas ligadas a contextos de acción muy diferentes entre sí: la producción industrial, las redes de transporte, las operaciones bélicas, los grandes sistemas tecnológicos. Como consecuencia, se trata de un sector que no se desarrolló como un *corpus* teórico de enfoque amplio, sino por acumulación de modelos formulados independientemente, cuyas conexiones matemáticas recíprocas fueron establecidas muchas veces en una fase sucesiva. Investigadores que trabajaban en contextos nacionales y culturales diferentes, en varios tipos de ámbito profesional (universidad, unidades de investigación científica ligadas a instituciones militares o a empresas, públicas o privadas), fueron examinando problemas concretos distintos y desarrollando específicos instrumentos matemáticos, en una etapa de explosión creativa que se coloca históricamente en las tres décadas 1930-1960.

Sólo en los años finales de este periodo, y sucesivamente en los años 1960-1980, se fue afianzando entre los investigadores la conciencia de un trabajo colectivo que estaba configurando una nueva disciplina. Fue la fase de la creación de sociedades científicas y revistas, de introducción de cursos y departamentos en universidades de todo el mundo, de elaboración de manuales. Esta segunda fase se asemeja a tantos otros ejemplos, bien estudiados en años recientes, de institucionalización de disciplinas científicas, pero sigue presentando características específicas, que se podrían resumir en una tendencia a la dispersión que convivió con la conciencia de un trabajo común.

Ya el mismo nombre de la disciplina no está bien afirmado. Podemos definirla usando el nombre «investigación operativa» (*operations research*), que, sin embargo, no es unánimemente aceptado como un sector de la matemática aplicada, pues a menudo hace referencia a un contexto operativo perteneciente al ámbito de la ingeniería y del management, relacionado principalmente con los sistemas de producción y, más en general, con los sistemas tecnológicos complejos característicos de la segunda mitad del siglo XX. Se trata sin duda de una herencia de los orígenes del término, esto es, la idea de *operational research* desarrollada en Gran Bretaña en torno a la Segunda Guerra Mundial. Esta idea no hacía referencia a un sector de la matemática aplicada, sino a un programa de acción de la comunidad científica relativo a la implementación, en sus aspectos

organizativos y de evaluación del rendimiento «en el teatro de guerra», de la nueva tecnología militar (radar, armas para la guerra submarina etc.). Los instrumentos propuestos eran matemáticos, científicos y de cálculo, así como los recursos del punto de vista científico, esto es, de la «racionalidad científica». Una vez terminado el conflicto, resultó natural extender la experiencia de la investigación operativa al contexto civil, pues la guerra y la industria del siglo XX compartían la base tecnológica.

Otras expresiones han pretendido etiquetar estrictamente un sector de las matemáticas. «Teoría de la optimización» subraya el contenido matemático y facilita una colocación en el contexto de la historia de las matemáticas, dejando a un lado las aplicaciones concretas. «Programación matemática» (la expresión usada en el nombre de una sociedad y una revista sobre estos temas, fundadas a principios de los años setenta) deriva del nombre de una técnica matemática, la programación lineal, pero conserva más el eco del problema aplicado, esto es, la «programación» en el sentido de «planificación». Por otra parte, expresiones como «matemáticas de la organización» o «matemáticas de las ciencias de la decisión» —el título de un libro editado por George Dantzig (n. 1914) en 1968— reflejan la evolución conceptual hacia un nuevo sector científico con su propia caja de herramientas matemáticas. Este tipo de expresiones, que son un interesante indicio de un gran dinamismo intelectual, no se han asentado, sin embargo, como títulos de cursos, departamentos universitarios y grandes organizaciones científicas, a diferencia de cuanto ha ocurrido con «investigación operativa».

Cuando se usa la etiqueta «investigación operativa» es importante recordar que indica a la vez un conjunto de técnicas matemáticas de optimización y un conjunto de problemas «operativos» de gestión y organización en ámbito militar, administrativo e industrial<sup>10</sup>. Desde la introducción de esta expresión hasta la actualidad, el papel de ambos aspectos, y los mismos contenidos de la disciplina, han evolucionado fuertemente, en ocasiones con cambios radicales. La dificultad de aferrar su significado ha sido subrayada por muchos autores<sup>11</sup>, y ha representado un obstáculo importante al desarrollo de los estudios sobre su historia, tanto desde el punto de vista institucional, mejor conocido, como desde el punto de vista de sus contenidos<sup>12</sup>. Como consecuencia, no encuentran una explicación satisfactoria muchos aspectos de esta historia, algunos de ellos sorprendentes. Basta citar algunos de estos aspectos: en primer lugar, sus orígenes aparentemente repentinos (pues la motivación ligada a la guerra no constituye una explicación suficiente); en segundo lugar, la explosión de técnicas

matemáticas que se produjo en la posguerra y a la relación entre estas técnicas y los precedentes históricos; y, en tercer lugar, el problema historiográfico quizá más llamativo, esto es, la introducción independiente de la programación lineal por parte de Leonid Kantorovich (1912-1986) y Dantzig (que produjo, tras la publicación en inglés de los trabajos de Kantorovich, una animada discusión de prioridad de corte clásico).

Se hace necesario, por lo tanto, plantear el análisis histórico no tanto como «historia de la investigación operativa» cuanto en términos más amplios, como «historia de la matemática aplicada a los problemas de organización», examinándolo a la luz del cuadro evolutivo general que se ha delineado en los estudios históricos sobre la matemática aplicada. Desde tal perspectiva, el nacimiento y desarrollo de la investigación operativa se inscribe en la tercera fase del cuadro descrito en 2.1., junto a otros aspectos de los que no conviene separarlo: se trata principalmente de las discusiones desarrolladas en el siglo XX sobre la idea de «sistema» (en torno a conceptos claves como control, decisión, organización) y el proyecto de una «ciencia de los sistemas organizados».

Siguiendo este planteamiento, para explorar y analizar los antecedentes en los siglos XVIII y XIX (correspondientes a la primera y segunda fase descritas en 2.1. es necesario adoptar un doble punto de vista de lectura histórica. Por una parte, es necesario considerar los precedentes en la identificación explícita, en los ámbitos militar, industrial y de la ingeniería, de la existencia de un problema *operativo*, diferente del problema *tecnológico*, que incluye aspectos sociales, económicos, de gestión: un problema de «sistema», por usar el lenguaje actual. Por otra, se deben rastrear los precedentes en el uso de técnicas matemáticas de optimización referidas, aun sin una formulación explícita, a problemas de sistema. También en las dos primeras fases existe una significativa diferencia en el caso de las matemáticas de la organización, respecto a los casos de la biología y de la economía: se trata de la escasez de fuentes primarias, debida a la naturaleza esencialmente práctica de este tipo de aplicación de las matemáticas, que está ligada a las formas de acción y de intervención de la ingeniería. Es necesario confrontar atentamente las fechas de publicación de los trabajos escritos con la datación de las experiencias «de campo»; mucho más difícil se presenta el problema de reconstruir las vías de influencia que unen contribuciones de épocas y contextos culturales muy diferentes.

### 3. Las matemáticas de la organización: los orígenes

#### 3.1. *Funcionarios, contables, ingenieros*

La aplicación de las matemáticas a los problemas de organización se coloca, lo hemos recordado, en el ámbito de las aplicaciones prácticas, operativas, de las matemáticas. Este tipo de aplicación es muy anterior a la aplicación de las matemáticas a la ciencia moderna que se inicia con la Revolución científica; es más, tales aplicaciones son el contexto en el que emergieron históricamente, en la Antigüedad, las ideas matemáticas. La contabilidad y la medición son dos ejemplos de este tipo de actividades prácticas en las que hacen su aparición histórica los números y la geometría. La investigación histórica reciente sobre el origen de la civilización en el Oriente próximo ha interpretado este proceso, el «inicio de la historia», en términos de emergencia de un primer grado de complejidad en las sociedades humanas, a través de la constitución de los primeros ejemplos de organización. La organización posee un valor religioso, pero es en realidad fundamentalmente organización de la producción, como ha escrito Mario Liverani (2002, p. 202), siguiendo el enfoque de Oppenheim (1964): «En el plano más estrictamente operativo, la centralidad del templo y del palacio (las «grandes organizaciones», según la expresión del asiriólogo Leo Oppenheim) es sobre todo una centralidad de la gestión económica: el almacenamiento y la redistribución de los bienes generan la administración, y como consecuencia el cálculo matemático y todo el ámbito de la escritura y de la escuela de los escribas».

Estamos hablando de técnicas matemáticas elementales, que a lo largo de la historia han seguido desempeñando un papel administrativo a través de la contabilidad. Por otra parte, no se puede desdeñar la influencia que esta aplicación práctica tendrá en la evolución sucesiva de las matemáticas, incluso desde el punto de vista estrictamente teórico: baste pensar en los desarrollos del álgebra en las escuelas del ábaco nacidas en las ciudades de Italia de finales del Medioevo para educar a los futuros comerciantes (Franci y Toti Rigatelli, 1981). En la Europa moderna, la aritmética de la contabilidad y la información numérica de la compilación estadística registraron el progresivo aumento de la complejidad de la administración estatal y de las unidades organizativas económicas: bancos, compañías de seguros, industrias. La evolución de la contabilidad comercial a la contabilidad de las fábricas de la Revolución industrial, por ejemplo, está íntimamente ligada a la consideración de la actividad en la fábrica como *proceso* productivo, como una realidad que es a la vez tecnológica, económica,

organizativa. Uno de los primeros ejemplos de esta evolución es el libro *Essai sur la tenue des Livres d'une manufacture* (1817) de Anselme Payen [GARNER, 1954; PORTER, 1995].

La actividad de contables y actuarios como matemáticos prácticos (así eran vistos socialmente) evolucionó en los siglos XVIII y XIX en relación con el contexto económico y organizativo. De este tipo de aplicaciones prácticas emergieron importantes novedades matemáticas en el ámbito del cálculo de probabilidades [DASTON, 1988]. La actividad de los ingenieros modernos, por su parte, evolucionó principalmente en relación con el contexto tecnológico, pero también aquí los aspectos económicos y organizativos irrumpieron con gran fuerza a partir de siglo XVIII. En Francia esta evolución se registra ya en un contexto preindustrial, en la actividad de los ingenieros militares y los ingenieros de caminos, debido a la función clave que estos fueron llamados a desempeñar en el corazón de la organización del Estado, esto es, en el diseño y gestión tanto de la defensa como de las infraestructuras civiles (aguas, vías de comunicación). Se trata de ámbitos de competencia de la ingeniería clásica, pero en esta época se transforman profundamente. Las nuevas responsabilidades del ingeniero en el siglo XIX, en la industria, en la minería, en el ferrocarril, pondrán problemas de gestión y organización cada vez más complejos. ¿Cuáles son los instrumentos que el ingeniero tiene a su disposición para afrontarlos? La formación rigurosa, la experiencia técnica, la madurez profesional serán unánimemente reconocidas como base fundamental. Pero la idea de aplicar las matemáticas en este contexto fue explorada por muchos audaces pioneros.

### *3.2. Organización y optimización en la ingeniería preindustrial*

Dos contextos, militar e industrial, han sido en la historia moderna los escenarios principales del desarrollo de una ciencia de la organización y de unas matemáticas de la organización. Las interacciones recíprocas evidentes conducirán a una transmisión continua de ideas entre ambos sectores, pero la evolución histórica registra algunos hitos fundamentales que se pueden relacionar con uno u otro de ellos. La complejidad organizativa emerge en estos contextos con mayor fuerza que en la actividad comercial y en la administración estatal, y por tanto son los técnicos y los ingenieros los primeros llamados a la reflexión o cuanto menos a la acción para enfrentarse con ella. ¿Cuál es el origen de tal complejidad organizativa? Su origen se relaciona con una transformación profunda en el mundo artificial del que se rodea el ser humano. Tal cambio suele ser descrito modernamente con el paso del «ingenio», es decir, de la máquina o

dispositivo, considerado como un objeto aislado diseñado con una finalidad específica, al «sistema», formado por componentes interdependientes (y que incluyen tanto objetos artificiales como a los propios seres humanos), según una red de interacciones que contribuyen a la consecución de un objetivo común. La palabra «sistema» inunda hoy en día el lenguaje que usamos para describir la realidad material que nos rodea en los países industrializados, desde los sistemas de la defensa a los sistemas operativos de los ordenadores hasta los sistemas para la higiene usados por las empresas de limpieza. Pero esta transformación se inició, aunque lentamente, en los albores de la era industrial.

Uno de los primeros ejemplos de la irrupción del «sistema» en el ámbito militar es el concepto de plaza fuerte desarrollado por el *ingénieur du roi* mariscal Sebastien Le Prestre de Vauban (1633-1707) con el apoyo de Colbert y Louvois, ministros de Hacienda y de Guerra de Luis XIV. Las ideas de Vauban desempeñaron un importante papel en el fortalecimiento del ejército, en la época de consolidación de Francia como un estado moderno. Vauban se ocupó del ataque, la defensa y el diseño de las fortificaciones (concebidas singularmente según un esquema o *système*, término usado por el propio Vauban). Su actividad se concentró en la creación de una red de plazas fuertes según una visión que anticipa la actual visión de «sistema» defensivo, ligado al control y la gestión política y del territorio. Los aspectos de organización de redes pasaron a un primer plano sólo en el siglo XIX, con la creación de la infraestructura industrial de los países modernos. Pero ya las tareas relacionadas con la construcción o mejora de las plazas fuertes, responsabilidad principal de los ingenieros militares en los siglos XVII y XVIII, implicaban aspectos operativos y de planificación, de gestión de materiales y trabajo humano y de control de costos económicos, que aumentaban en mucho la complejidad de las tareas técnicas en épocas precedentes. El mismo interés demostrado por Vauban hacia el problema de la hacienda pública (su *Projet d'une dixme royale* publicado en 1707 fue censurado por el rey por su crítica a las desigualdades fiscales) demuestra una apertura de los ingenieros franceses hacia las cuestiones económicas, especialmente aquellas relacionadas con la administración del Estado.

Precisamente esta actividad de los ingenieros militares motivó, a finales del siglo XVIII, dos de los primeros estudios en los que se aplicaban técnicas matemáticas a problemas no estrictamente de tipo mecánico o físico, como los de estática o resistencia de materiales. Se trata de dos trabajos aislados, pero no por ello menos significativos, pues se debieron a dos científicos ilustres, que fueron además artífices de la nueva «racionalidad técnica» [PICON, 1992] que

emergió en aquella época en la ingeniería francesa: Charles Augustin Coulomb (1736-1806), uno de los grandes ingenieros formado en la *École royale du Génie de Mézières*, y el más famoso profesor de esta escuela, Gaspard Monge (1746-1818). Ambos se empeñaron en dar cuerpo real a la clásica convicción de la utilidad de las matemáticas en la actividad técnica, firmemente asentada entre los ingenieros, pero que correspondía en la práctica a poco más que la aplicación de nociones elementales de geometría y de algunas recetas numéricas. Fruto de este esfuerzo fueron la creación de la geometría descriptiva de Monge y la principal contribución de Coulomb a la ingeniería, su *Essai sur l'application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture* (1773). Los sistemas de representación del espacio y el análisis matemático ofrecían, a los ojos de estos autores, la base teórica necesaria para fundamentar rigurosamente el «saber del ingeniero». Esta fundamentación era necesaria para superar la visión tradicional de la figura del técnico cercana a la del artista, formado esencialmente a través del aprendizaje y la experiencia, y crear una figura moderna de ingeniero, un profesional de sólida formación científica obtenida en escuelas creadas *ad hoc*.

Al inicio de su carrera en el cuerpo de ingenieros, Coulomb fue destinado a la isla de La Martinica, donde permaneció en los años 1764-1772 dirigiendo la construcción de una imponente plaza fuerte, Fort Bourbon. El mismo enfoque matemático que guió sus estudios de estática fue aplicado por él al estudio del trabajo humano, y fruto de esta experiencia fue una memoria presentada en 1798 al Institut national des sciences et arts y publicada un año después con el título *Résultats de plusieurs expériences destinées à déterminer la quantité d'action que les hommes peuvent fournir par leur travail journalier, suivant les différents manières dont ils emploient leurs forces* [COULOMB, 1799]. La exigencia típica de la actividad técnica, que busca respuestas a problemas formulados en términos de obtención de un objetivo —y no en términos de aumento del conocimiento como en la investigación científica— podía ser traducida eficazmente por medio del lenguaje analítico de la *théorie de maximis et minimis*, de la optimización clásica, como hoy la llamaríamos, uno de los desarrollos del cálculo infinitesimal. El estudio del rendimiento y de la eficiencia del esfuerzo humano de Coulomb se coloca en un contexto preindustrial, precedente a la sustitución de la energía humana por máquinas eficientes movidas por fuentes de energía como el agua, el vapor y la electricidad. Su trabajo es considerado un antecedente de la ergonomía moderna y de la idea taylorista de «job design» [EDHOLM, 1967; DORAY, 1979]. Desde nuestro

punto de vista, el interés de este trabajo es doble: 1) la idea de tratar matemáticamente un problema que no se refiere al funcionamiento de una máquina o a la estática de un edificio, de una bóveda o un puente, sino a la organización de una actividad técnica —la construcción de una plaza fuerte— optimizando el uso de los recursos materiales, humanos y económicos; y 2) el uso del lenguaje analítico de la optimización.

Esta misma idea subyace en un trabajo de Monge sobre el transporte de masas de tierra y otros materiales, también en este caso en relación con la fortificación. Se trata de su *Mémoire sur la théorie des déblais et des remblais*, elaborado en torno a 1776, aunque fue publicado varios años después [MONGE, 1784]<sup>13</sup>. En el trabajo, como ha señalado R. Taton, se reconoce el estilo matemático característico de Monge, que plantea el problema en términos geométricos abstractos, considerando sucesivamente los casos bi y tridimensional (el segundo caso se aleja de las consideraciones prácticas convirtiéndose en un tratado de teoría abstracta de superficies). El lenguaje del cálculo infinitesimal es aplicado por Monge para formular el problema de minimizar los costes del traslado de materiales en función de posibles itinerarios, considerando por ejemplo la exigencia de cruzar uno o más puentes preexistentes o la conveniencia, en su caso, de construir un nuevo puente.

### 3.3. *La fábrica de alfileres: división del trabajo y cuantificación*

Las nuevas técnicas infinitesimales que habían abierto el camino al desarrollo de la física matemática permitieron iniciar una matematización de la actividad técnica que era en realidad una aspiración clásica del ingeniero. La idea de matematización, o cuanto menos una idea más débil de cuantificación, no se limitó sin embargo a las cuestiones de mecánica aplicada, porque la actividad del ingeniero a finales del siglo XVIII se desarrollaba, como ha subrayado A. Picon (1989, p. 158), en un «espacio de referencia proto-económico»: «se abren paso preocupaciones de control dinámico de los costos que van más allá del pensamiento simplemente contable de los técnicos de la edad clásica, bajo la égida de esta noción de utilidad que abrazan todos los ingenieros sin excepción». Más en general, la evolución técnica, económica y también sociopolítica condujeron naturalmente a los ingenieros franceses a una visión dinámica del mundo natural y artificial que sustituyó la clásica visión estática, representada por ejemplo por la tradición arquitectónica: se abrió paso en aquella época una idea de *sistema* formado por fuerzas interactivas, con componentes técnicos, económicos, de trabajo humano [PICON, 1987-88, 1989, 1992].

Los dos trabajos de Coulomb y Monge que hemos citado son de extraordinaria importancia por el uso de un lenguaje matemático de optimización. Sin embargo, los problemas de fortificación e ingeniería civil preindustrial al servicio del estado limitaban necesariamente el problema económico a un problema de tiempo, calidad, costes, pero sin consideración de problemas como precio, productividad y competencia en el mercado. A la vez, este tipo de actividades técnicas no ofrecía una complejidad organizativa tal que hiciera apremiante un tratamiento sistemático. Las contribuciones de Coulomb y Monge, aunque inspiradas por la actividad práctica, representan esencialmente intentos puramente teóricos de realizar el paradigma de la «matematización». Incomparablemente más estimulante desde el punto de vista organizativo era la realidad que se había desplegado en la segunda mitad del siglo XVIII en el sector de la producción manufacturera en el Reino Unido. Adam Smith había puesto en evidencia, en su *Inquiry into the nature and causes of the wealth of nations* (1776), la aparición en la actividad económica y productiva de una «complejidad organizativa» (usando la terminología moderna) que era consecuencia de la división del trabajo. Smith consideraba la división del trabajo en el contexto de la evolución económica global y como base de la emancipación progresiva del ser humano. Sin embargo, significativamente, para ilustrar su significado usaba un ejemplo de la realidad productiva, una fábrica de alfileres. En el primer capítulo de su obra describía la división del trabajo en el seno de la manufactura, analizando de tal manera las fases del *proceso* productivo, y desarrollaba algunas sencillas reflexiones cuantitativas en términos de aumento de la *productividad*. Se trata, todavía, de un ejemplo de técnica preindustrial, del que estaba ausente cualquier nivel de automatización. De hecho, el ejemplo del *proceso* de la fabricación de los alfileres había sido estudiado varios decenios antes por Jean Rodolphe Perronet (1708-1794), el ingeniero por excelencia de la Francia de los últimos años del *ancien régime*, director de la École de Ponts et Chaussées desde la fundación (1747) hasta su muerte<sup>14</sup>.

El sucesor de Perronet en la dirección de la Ecole de Ponts et Chaussées, Gaspard Riche de Prony (1755-1839), realizó a algunos años de distancia una interesante lectura de las reflexiones de Smith, a raíz de una tarea organizativa que le fue encomendada sin relación directa con sus habituales actividades como ingeniero [GRATTAN-GUINNESS 1990]. En 1792 el gobierno francés le encomendó, en efecto, la compilación de un conjunto de tablas matemáticas (logarítmicas y trigonométricas) para la división centesimal del círculo. Según su propio testimonio, la lectura de las reflexiones de Smith sobre la división del

trabajo le sugirió la idea de organizar la imponente labor de cálculo manual del logaritmo de los números de 1 a 200.000 como si se tratara de una manufactura de alfileres. Se trataba de dividir las responsabilidades de tres tipos de colaboradores, desde los matemáticos (pocos) que establecían los procedimientos de cálculo hasta los «calculadores» (en un buen número) que efectuaban mecánicamente operaciones básicas con números, y de establecer un proceso de producción a través de estos equipos de trabajo. El punto de vista de un ingeniero como de Prony sobre la división del trabajo introducía una modificación sustancial: mientras Smith la consideraba un resultado del progreso gradual de la historia, y no un fruto consciente de la reflexión humana, de Prony la interpreta como un principio organizativo. Su punto de vista, típica del ingeniero y del *savant* al servicio de la Revolución francesa, era emblemática de un tipo de saber que progresa no sólo con la reflexión teórica sino también, a menudo principalmente, a través de la acción.

Charles Babbage, gran admirador del ingeniero francés y en general de la cultura científico-técnica francesa, acogió este viraje conceptual y lo enriqueció con un aparato de tipo cuantitativo. El problema organizativo que había afrontado de Prony se colocaba fuera de los ámbitos militar o productivo, lo que favoreció quizá la conexión conceptual con la reflexión de Smith, subrayada por Babbage. El problema de este último, sin embargo, era la producción industrial. Matemático y hombre de cultura, trabajaba en aquellos años en el ambicioso proyecto de automatización del cálculo, inspirado en parte por la aparición de las máquinas que habían estimulado el desarrollo de la industria británica. Su profundo conocimiento de multitud de ejemplos independientes introducidos en las fábricas de todo el país fue la base de un artículo publicado en la *Encyclopedia metropolitana* en 1829, titulado «On the general principles which regulate the application of machinery to manufactures and the mechanical arts». El desarrollo técnico e industrial en Gran Bretaña, es bien sabido, aunque motivado por los descubrimientos científicos, fue un desarrollo poco sistemático, fruto sobre todo de la inventiva y la iniciativa individual. A los ojos de un atento observador, se presentaba seguramente como un desarrollo caótico, en el que la falta de sistematización podía hacer perder informaciones preciosas y fuerza propulsiva. El artículo de Babbage se colocaba en la tradición enciclopédica de origen ilustrado, que asignaba un lugar principal a la descripción de artes y oficios. Pero con este trabajo Babbage iniciaba una reflexión de gran originalidad en la que se fundía su conocimiento de la rica realidad industrial británica con la

influencia de la cultura francesa, y en particular con la exigencia de la creación de una cultura técnica sistemática basada sobre la ciencia.

Tres años después, Babbage incluyó su texto como primera parte de un libro, *On the economy of machines and manufactures* (1832), cuya idea central era la conveniencia de considerar, junto los aspectos mecánicos de la producción industrial en las fábricas, las cuestiones que hoy podríamos definir de economía y organización industrial: el fabricante debía organizar o disponer el sistema de la fábrica («arrange the whole system of his factory») de manera que el artículo fabricado pudiera ser producido al menor costo posible («in such a manner, that the article he sells to the public may be produced at as small a cost as possible»)<sup>15</sup>. Se trataba de problemas de un nuevo tipo —ausentes en la producción de tipo artesanal hasta el surgimiento de la economía de mercado— que Babbage había identificado siguiendo las enseñanzas de Smith. En la segunda parte de la obra, titulada «On the domestic and political economy of manufactures», se ocupaba así de factores de tipo económico y de competitividad, como los precios, las materias primas, la superproducción e incluso el control o verificación de calidad. En íntima relación con ellos existía un problema organizativo, que según Babbage podía ser examinado gracias a la idea de división del trabajo.

Babbage recordaba las tres causas del aumento de productividad debido a la división del trabajo indicadas por Smith (aumento de destreza del obrero especializado, reducción de los tiempos muertos entre actividades diversas e invención de nuevas máquinas o mejora de ellas), pero afinaba el examen del problema en relación al caso específico de la producción industrial. En primer lugar, introducía un análisis detallado del proceso productivo como secuencia de operaciones y de las características de tales operaciones específicas en términos de trabajo humano. Smith se refería sólo al dato numérico de la cantidad de alfileres fabricados diariamente por un grupo de diez obreros, mientras que Babbage introducía otros datos cuantitativos (número de operaciones, velocidad, cantidad producida considerada justa para una jornada de trabajo). Este análisis aparecía ya claramente en el último capítulo de la primera parte de la obra, titulado «On the method of observing manufactories», al final del cual hacía referencia al trabajo de Coulomb sobre la cuantificación del trabajo humano. En segundo lugar, una vez identificadas las variables numéricas, siguiendo el enfoque adoptado por de Prony, era posible cuantificar el objetivo de la intervención organizativa en términos de optimización.

Babbage citaba la siguiente afirmación del ingeniero francés<sup>16</sup>: «Me consagré [a la tarea] con todo el ardor del que era capaz, y para empezar me ocupé del plan general de ejecución. El conjunto de condiciones que yo tenía que respetar requerían el empleo de un gran número de calculadores; y pronto se me ocurrió aplicar a la confección de estas Tablas la división del trabajo, de la que las Artes del Comercio obtienen tantas ventajas para unir a la perfección de la mano de obra la economía de gasto y de tiempo». Babbage daba un paso adelante, usando el ejemplo de la fábrica de alfileres, y manejando datos numéricos relativos a un ejemplo inglés junto a los datos de Perronet. Para facilitar su tratamiento, los disponía en una tabla en la que las filas eran las distintas fases u operaciones del proceso productivo, mientras las columnas correspondían a variables numéricas sobre las que se puede actuar: tiempo, número de operaciones, costo (de la mano de obra y de las materias primas). De tal manera el fabricante podía establecer «la cantidad precisa de fuerza o de destreza» necesaria en cada fase del proceso productivo.

Es fácil ver, desde un punto de vista moderno, que el paso era breve para llegar a una formulación general del problema sustituyendo los datos numéricos específicos con variables y la disposición en tablas con las ecuaciones algebraicas (la disposición en *tableau*, por otra parte, ha sido un instrumento ampliamente usado en los inicios de la programación matemática). La impresión del historiador es la de encontrarse en el borde mismo de un importante nuevo desarrollo, truncado sin embargo abruptamente, pues se abre a continuación un hiato de cien años que se cierra sólo con el trabajo pionero de Kantorovich a finales de los años treinta del siglo XX, motivado por problemas de asignación de recursos en ámbito industrial en la Unión Soviética. Quizá no debiera sorprender, pues una situación análoga se presenta en relación con otra gran contribución de Babbage, la máquina analítica, precursora de los ordenadores desarrollados a partir de los años treinta y cuarenta del siglo XX.

### 3.4. *Obstáculos a la matematización*

La evolución histórica del concepto matemático de optimalidad y en particular de la optimización lineal a partir del siglo XVIII funde una serie de contribuciones motivadas por aplicaciones muy dispares, inicialmente por ejemplo a la geodesia y la cartografía, a la astronomía y a la mecánica [BRENTJES, 1985, 1994]. Como es bien sabido, la idea para resolver un problema así formulado, esto es, en términos modernos, un problema de programación lineal, está ya presente en las reflexiones de Joseph Fourier (1768-1830) en los años veinte del

siglo XIX. Muchas otras contribuciones matemáticas que implican la resolución de inecuaciones lineales pueden ser vistas como parte de la prehistoria de la programación lineal, y por este motivo tales contribuciones han sido objeto de una gran atención por parte de Dantzig y de otros autores en el siglo XX. Ahora bien, como hemos recordado, la historia de esta y otras técnicas matemáticas (como por ejemplo las técnicas combinatorias) nos interesa aquí en función de la idea de unas «matemáticas de la organización». A este propósito, es indudable que existió un largo intervalo entre los trabajos de los pioneros que hemos descrito (culminados con el libro de Babbage) y los orígenes de la moderna matemática de la organización. La obra de Babbage tuvo un notable éxito de público a nivel nacional e internacional y coagulaba en su interior, incluyendo explícitas referencias, las contribuciones de pocos autores pero de gran valor. ¿Por qué no condujo a ulteriores desarrollos matemáticos o cuantitativos?

En primer lugar, desde el punto de vista de la historia de la *programación matemática*, cabe recordar que la formulación de un problema real en términos lógico-algebraico-combinatorios, con el auxilio de instrumentos de probabilidad y estadística, que caracteriza el desarrollo de las matemáticas de la organización en el siglo XX, corresponde al perfil de la matemática que se estaba consolidando en los años treinta del siglo XX. Se ha visto como Coulomb y Monge usan un enfoque diferencial, típico del acercamiento al estudio matemático de la realidad del periodo a caballo entre los siglos XIX-XX. En uno de los primeros trabajos sobre el significado de la investigación operativa, escrito por Patrick Blackett (1897-1974) en 1941 y publicado en 1948, el autor hace referencia a dos métodos de tipo analítico para obtener el máximo efecto bélico del material y del personal disponible: un método a priori o directo, que prevé la construcción de ecuaciones diferenciales que describen la situación operativa, y un método de tipo variacional. La matematización de este tipo de problemas (el «numerical thinging on operational matters», usando la expresión de Blackett) incluía además el uso de instrumentos de probabilidad y estadística [BLACKETT, 1948].

Hoy en día los instrumentos de tipo diferencial han sido reintroducidos, pero probablemente el enfoque lógico-algebraico combinatorio era la vía obligada para iniciar el tratamiento matemático sistemático de los problemas «operativos» o de organización. Se trata de una cuestión análoga, desde el punto de vista matemático, a lo sucedido con la introducción de la teoría de juegos para el estudio matemático de los problemas de economía por parte de von Neumann, que permitió superar una situación de bloqueo, debido a los inconvenientes de las

herramientas matemáticas disponibles, que se remontaba a muy atrás. En cuanto a la posibilidad de aplicar los instrumentos del cálculo de probabilidades, había sido ya discutida por Condorcet y los sostenedores de la *mathématique sociale*, pero había encontrado entonces un importante obstáculo en el insuficiente desarrollo de estos instrumentos matemáticos, cuya legitimidad y rigor matemático no obtuvieron general aceptación hasta las primeras décadas del siglo XX.

Esto nos lleva a un segundo punto vista, más amplio, para examinar el problema, esto es, el punto de vista de la evolución histórica general de la *matemática aplicada* descrita en la parte 2. Los esfuerzos dirigidos a aplicar las matemáticas a problemas externos a las ciencias físicas sufrieron un brusco frenazo en el siglo XIX (la segunda fase descrita en 2.1) como consecuencia del rechazo a la aplicación de las matemáticas a problemas que implicaban un factor humano o un fuerte impacto social. Estos problemas eran tanto los económicos o demográfico como los referentes a la producción, el trabajo, los sistemas técnicos. En el caso de los problemas organizativos además, existía un rechazo a la idea de matematizar la «toma de decisiones». En el siglo XIX se configuraron algunas figuras profesionales, como las de los ingenieros, los altos funcionarios o los directores de empresa, cuya principal característica era la fiabilidad y la ponderación en las decisiones, en los sectores público y privado. Pero la base de esta capacidad era la experiencia práctica y la aptitud al comando, a la que se unía —sobre todo en la Europa continental— la formación académica. Dicha formación se basaba sobre disciplinas consideradas fundamentales independientemente de cualquier utilidad práctica, como las lenguas clásicas, en el caso de los ingenieros (según modelo de la *École Polytechnique*), por las matemáticas [LUNDGREEN, 1990]. En este sentido, las matemáticas eran concebidas como disciplina de base más que como instrumento de aplicación general: las discusiones estratégicas en el interior del cuerpo de *Ponts et Chaussées* en el siglo XIX muestran eficazmente la persistencia de la desconfianza hacia los criterios decisionales basados sobre estudios matemáticos [PORTER, 1995].

La importancia de la tradición en la que se coloca Babbage es demostrada por el hecho de que, no obstante este rechazo tan difundido, durante el siglo XIX muchos ingenieros conservaron un característico interés por los problemas de economía práctica y teórica. Perduran así, en sordina, algunos elementos de continuidad. En Francia se desarrolló una verdadera escuela de ingenieros economistas, con ramificaciones en muchos otros países de Europa. Las contribuciones teóricas de estos autores son bien conocidas, aunque a menudo no ha sido subrayado suficientemente que los problemas tratados y resueltos se

relacionaban directamente con aspectos organizativo-económicos de la actividad de los ingenieros en la época industrial: por ejemplo, la utilidad de las obras públicas; la estructura de los itinerarios y el sistema de tarifas de los servicios de transporte; o las retribuciones, el sistema de precios y los problemas de localización y redes de distribución en la industria. Este tipo de problemas indujo a varios autores a aplicar métodos isoperimétricos y de optimización [TEOCHARIS, 1994].

Por otra parte, como se ha recordado en 2.1.), una versión débil de la idea de matematización de la toma de decisiones persistió en la cultura del siglo XIX bajo la forma genérica de la idea de fiabilidad de la información en forma numérica para tratar problemas complicados como los de la gestión social y la planificación económica. Se puede hablar pues en este caso de un esfuerzo de cuantificación, ligado estrechamente a la idea de observación, experimentación y recogida de datos en contacto directo con la realidad social, económica, industrial. La representación gráfica de tipo geométrico, mediante curvas, o, más a menudo, en forma de tablas o matrices era a menudo la expresión concreta de este enfoque. El modelo de *input-output* introducido por Wassily Leontief (n. 1906) en los años treinta del siglo XX, base de la moderna econometría, constituye uno de los resultados principales de esta línea de desarrollo: este modelo tuvo una influencia directa en el trabajo de Dantzig, según su propio testimonio.

En tercer lugar, el problema histórico de la herencia de la obra de Babbage debe ser considerado desde un tercer punto de vista, el de la *historia de la ingeniería de la organización* industrial y en general de la idea de una ciencia de la organización y de sus instrumentos cuantitativos y matemáticos. N. Rosenberg ha subrayado que, así como Babbage ha sido redescubierto en época reciente como pionero del desarrollo de los ordenadores, debe ser descubierto una segunda vez por sus profundas y originales ideas sobre la relación entre evolución tecnológica y desarrollo industrial y por su introducción de la fábrica y la empresa en el análisis económico [ROSENBERG, 1994; DE LISO, 1998]. Las citas de John Stuart Mill, de Karl Marx y de Alfred Marshall confirman esta deuda intelectual. A la luz de esta influencia, cabe suponer un influjo paralelo —más difícil de reconstruir— de Babbage en los orígenes de la moderna ingeniería de la gestión y de la organización, y en particular en la obra de Henri Fayol, que estableció la exigencia de una verdadera ciencia de la administración, y de Frederick Taylor, que defendió la necesidad de partir de datos objetivos y cuantificables para organizar el trabajo y la producción en la fábrica<sup>17</sup>.

Estos primeros estudios sobre la organización científica son el punto de partida de las modernas ciencias empresariales (*management sciences*) y de la ingeniería de la gestión (*industrial engineering*), disciplinas entendidas como una guía de la acción. Los problemas de la organización del trabajo y de la producción motivaron en la Unión Soviética las ideas de Aleksandr Bodganov sobre la creación de una nueva ciencia teórica general de la organización, bautizada por él con el nombre de *tektologiya*. La organización era entendida por este autor en clave holística, como elemento transversal al mundo de la vida, a la interacción social, a la producción y hasta la creatividad humana. En 1925 Bodganov escribía: «las relaciones estructurales pueden ser generalizadas hasta un grado de formalidad esquemática parejo al de las relaciones entre magnitudes en matemáticas, y sobre esta base las tareas organizativas pueden ser resueltas por métodos análogos a los de las matemáticas. Mas aún, considero la relación cuantitativa un tipo especial de relación estructural, y las matemáticas mismas una rama de la ciencia general de la organización que, por motivos específicos, se ha desarrollado más tempranamente. Esto explica la potencia práctica gigantesca de las matemáticas como instrumento en la organización de la vida<sup>18</sup>».

#### 4. Conclusión

El amplio eco internacional que tuvo el movimiento del *scientific management* en las primeras décadas del siglo XX abrieron de nuevo el paso a la idea de cuantificación de los problemas organizativos. Se trataba, como hemos visto de un «nuevo inicio», tras un largo periodo de dudas sobre la oportunidad de matematizar cuestiones como la toma de decisiones, la administración pública, la gestión empresarial. En este contexto se colocan, en los años veinte y treinta del siglo XX, los trabajos de A.N. Tolstoy sobre la planificación del tráfico ferroviario y de Kantorovich sobre la planificación industrial, en la Unión Soviética, y de los fundadores del control de calidad estadístico, en Estados Unidos, Gran Bretaña y Alemania. En la década siguiente, las contribuciones más importantes se desplazaron de nuevo del campo de las aplicaciones industriales (sobre el que continuó a trabajar Kantorovich con varios discípulos, aunque en medio de una fuerte hostilidad ideológica) al ámbito militar. Fueron así las operaciones militares el contexto en el que se desarrollaron las primeras técnicas matemáticas de la investigación operativa (con los trabajos de autores ya citados como Blackett y Dantzig, y otros como Frank L. Hitchcock (1875-1957)), que sientan las bases del impetuoso desarrollo de unas «matemáticas de la organización» en la segunda mitad del siglo XX. En los primeros trabajos, se

trata del contexto bélico de la Segunda guerra mundial; en lo sucesivo, será la componente organizativa de los grandes sistemas de la defensa de la Guerra Fría el origen de muchas de los desarrollos matemáticos, e iniciará una transmisión de las técnicas de las aplicaciones militares a las aplicaciones civiles, en particular en la industria.

En la convicción con la que los fundadores de la investigación operativa afrontaron su tarea se percibe el eco de la confianza ilustrada en la utilidad de las matemáticas como instrumento de conocimiento y como guía de la acción, aun en problemas en los que entra en juego la libertad humana: la misma confianza que había animado a los precursores de los que hemos hablado en la parte 3. De hecho, la investigación operativa fue, en sus orígenes, un programa de acción y de conocimiento matemático-científico, antes de empezar a dotarse de contenidos, teorías, teoremas. Los estudios históricos recientes han mostrado las oscilaciones y cambios de enfoque que se produjeron entre los fundadores ingleses y sus seguidores en Estados Unidos [DAHAN y PESTRE, 2003]. Otra confirmación procede de la rápida evolución de los primeros manuales, que se observa comparando por ejemplo la obra de Philip Morse (1903-1985) y George E. Kimball (n. 1906), *Methods of operations research* (1951, pero la primera versión, todavía secreto militar, apareció inmediatamente después del final de la guerra), que se basa sobre la experiencia de los años de la guerra usando un lenguaje de tipo físico-matemático ligado a problemas militares, y la obra de C. West Churchman (n. 1913), Russell L. Ackoff (n. 1919) y E. Leonard Arnoff *Introduction to operations research* (1957), un manual para la enseñanza universitaria, donde aparecen ya técnicas matemáticas como la programación lineal, la teoría de juegos, junto al lenguaje hoy común (*inventory models, allocation problems, queuing and sequencing*) y la metodología de construcción de modelos [RIDER, 1994].

Prueba ulterior de la impronta heredada del programa de una matemática social es el hecho de que, en los mismos años, esta programa recobraba nueva vida con el trabajo de los fundadores de la moderna economía matemática, en torno a la teoría del equilibrio económico. De hecho, existieron numerosos contactos entre economía matemática e investigación operativa. La conexión entre los problemas tratados y entre los instrumentos matemáticos desde un interesante punto de vista interdisciplinar fue analizada ya en el famoso congreso sobre la programación lineal celebrado en 1949 en Chicago y organizado por Tjalling Koopmans (1910-1985), cuyas actas fueron publicadas en 1951 bajo el título *Activity analysis of production and allocation*. En las páginas

escritas por Dantzig en colaboración con Marshall Wood se establece el parangón explícito entre «una economía» y una «organización». En ambos contextos, la idea de modelización matemática y la transformación del perfil de las matemáticas en torno al cambio del siglo —el nuevo interés por la lógica, por el álgebra abstracta, por la combinatoria— hicieron posible superar el bloqueo debido a la pobreza de instrumentos matemáticos disponibles hasta entonces. La teoría de juegos de von Neumann representó en los años de la posguerra la nueva matemática para unas nuevas ciencias sociales, ciencias del saber y ciencias de la acción.

Por último, vale la pena subrayar que existe un segundo aspecto de continuidad entre el desarrollo de la investigación operativa y de las matemáticas de la organización en la segunda mitad del siglo XX y los precedentes que hemos examinado. Se trata de la interacción con el contexto tecnológico y con el enfoque de los ingenieros, que como se ha visto, desempeñó un papel fundamental en los desarrollos de los siglos XVII-XIX. En el siglo XX, la clave conceptual de tal interacción ha residido en el concepto de «sistema» y la idea de «análisis y control» de sistemas. El enfoque de la teoría de sistemas y los instrumentos matemáticos de la teoría del control, típicos de los grandes sistemas de la tecnología de la época (defensa, tecnología aeroespacial, telecomunicaciones, sistemas automáticos), han sido transferidos de las componentes mecánicas, eléctricas y electrónicas a los aspectos organizativos de los sistemas [HUGHES, 1998; HUGHES y HUGHES, 2000; HOUNSHELL, 1997; KLEIN 1999, 2001]. Más aún, el programa de la cibernética y el desarrollo del análisis de sistemas han introducido conceptos y metáforas de origen tecnológico (control, *feedback*, flexibilidad, integración, complejidad) en el estudio de sistemas de muchos tipos (sistemas de producción, sistemas operativos, sistemas tecnológicos), conducido según un enfoque transversal propugnado por muchos autores, a partir de Ludwig von Bertalanffy. De esta manera, el problema de la organización y del control de los sistemas ha representado una importante vía de ingreso de un saber tecnológico con una fuerte componente matemática en el moderno discurso cultural.

## NOTAS

1. Véase, por ejemplo, Agnetis, Arbib y Lucertini (1995).
2. Babbage, C. (1835) *Tratado de Mecánica práctica y Economía política que con el título de Economía de máquinas y manufacturas escribió en inglés C. Babbage*. Madrid

(Imprenta de I. Sancha). El autor de la traducción anotada es José Diez Imbrechts (1787-1849).

3. Una breve observación sobre la terminología. Babbage no utiliza la expresión «problema de organización», sino que habla del «problema de economía privada» de las manufacturas (*domestic economy of manufactures*), contrapuesto y complementario de los aspectos tecnológicos o de «mecánica práctica». En lengua inglesa se utilizará más adelante la palabra *management* (que podemos traducir con «gestión»), referida sobre todo al contexto de la producción (de bienes y servicios), a partir del *scientific management* de Frederick W. Taylor (1856-1915). Un ámbito más amplio es cubierto por la palabra «administración», por ejemplo en la obra del ingeniero francés Henry Fayol (1841-1925) (que habla de *administration industrielle et générale*) o de Herbert Simon (1916-2000) (que describe un *administrative behaviour*). En castellano, la expresión «ciencias de la administración» o bien «ciencias de la gestión» es usada como equivalente de *management sciences* (véase por ejemplo la traducción Garfunkel (1999)). Las palabras «administración» o «gestión», sin embargo, mantienen una referencia a un contexto operativo, en ingeniería industrial o en ciencias empresariales. La palabra «organización» y las expresiones «ciencia de la organización» (*organization science*) o «sistema organizativo» (*organization(al) system*), cuyo uso se ha difundido en las últimas décadas del siglo XX, indican el objeto de estudio, de naturaleza abstracta, de una ciencia social nueva. Así, por ejemplo, «Organization Science» es el título de una revista de INFORMS (Institute for Operations Research and the Management Sciences).
4. Emblemáticos en esta dirección son los trabajos de Herbert Simon, a partir de *Administrative behaviour: A study of decision-making processes in administrative organization* (1947). Pero el campo disciplinario general fue delineado ya a principios del siglo XX por el estudioso ruso Aleksandr A. Bogdanov (Malinovskij, 1873-1928), que propuso un neologismo para definir esta nueva disciplina, «tectología» (véase parte 3).
5. Sobre esta evolución, véase Millán Gasca (2003a). En este artículo nos centramos en el problema de historia de la matemática aplicada, sin entrar en estos aspectos generales, a los que nos referimos brevemente en la conclusión.
6. Una descripción general con la correspondiente bibliografía se presenta en Millán Gasca (1996).
7. Véase en castellano el artículo publicado en *Llull* sobre el caso de Duvillard, Israel (1994); sobre Walras, véase Ingrao e Israel (1990).
8. Israel y Millán Gasca (2001), p. 79. Sobre el pensamiento científico de von Neumann, véase el capítulo 3 del libro.
9. Israel y Millán Gasca (2003). En la revista *Llull* se puede ver el estudio sobre dos protagonistas de los orígenes de la biomatemática, Vladimir Kostitzin y el mismo Volerra, particularmente lúcidos en relación con el debate filosófico de fondo, en Israel y Millán Gasca (1993).

10. Es interesante comparar libros de corte matemático, como por ejemplo Chvátal (1983) sobre la programación lineal, con los manuales de investigación operativa, como por ejemplo Taha (1987), y los manuales que se concentran en el problema industrial como Askin y Standridge (1993) o Waters (1996).
11. Véase Rider (1994), Mirowski (1999), Rau (2000).
12. El nacimiento de la investigación operativa en Gran Bretaña y en los Estados Unidos y su difusión sucesiva han sido objeto de muchos trabajos recientes, a partir de Fortun y Schweber (1993). Existe además una literatura de trabajos retrospectivos de varios de los protagonistas (véase por ejemplo Dawson *et al.* (2000) y los artículos de McCloskey citados en la bibliografía). Otros trabajos, más recientes, se han concentrado en los desarrollos sucesivos en Estados Unidos durante la Guerra fría, con el análisis de sistemas (véase Hounshell 1997). Estos últimos trabajos se inscriben en un filón, más amplio, de estudios sobre la evolución de la idea de sistema, el *systems thinking*, en el siglo XX. En este filón se colocan los análisis de la obra pionera de Bogdanov en la Unión Soviética (véase Biggart, Dudle y King (1998)). Siempre en este ámbito, sobre la interacción entre los aspectos tecnológicos y organizativos en los sistemas de la tecnología (militar, industrial, etc.) en el siglo XX véase Hughes (1998), Klein (1999, 2001), Hughes y Hughes (2000), Levin (1999), Lucertini, Millán Gasca y Nicolò (2003).  
Los aspectos de modelización matemática que subyacen al desarrollo de la investigación operativa, el *systems analysis* y la teoría de sistemas han sido menos estudiados. Los orígenes de las matemáticas de la investigación operativa, y especialmente la programación lineal y no lineal, han sido considerados en Brentjes (1985), Grattan Guinness (1994). También aquí existe una literatura producida por los protagonistas, como Lenstra *et al.* 1991.
13. *Déblai* indica el volumen de tierra que debe ser transportado y *remblai* el espacio ocupado por el material después del transporte. Escribe Taton (Taton 1951: 203) que este trabajo, poco conocido, representa «bajo su triple aspecto, técnico, analítico y geométrico uno de los trabajos más originales y característicos de Monge».
14. Véase Réamur 1761
15. Las citas de la obra de Babbage se refieren a la edición de 1989 en las Obras completas: Babbage 1989, p. 86.
16. Babbage 1989, p. 136. Babbage cita extensamente una descripción del proyecto dirigido por de Prony contenida en una publicación del 1820: *Note sur la publication, proposée par le gouvernement Anglais, des grandes tables logarithmiques et trigonometriques de M. de Prony* (1820), París (De l'imprimerie de F. Didot).
17. Véase por ejemplo Anderson y Schwenning (1936, 40-63). Sobre estos aspectos, véase Millán Gasca (2003b).

18. Véase Biggart et al 1998a, b. La cita, de la tercera edición de *Tecktologiya: Vseobshchaya Organizatsionnaya Nauka* (1925) de Bodganov, está tomada de la versión inglesa de Urmantsev 1998, p. 238.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGNETIS, A.; ARBIB, C. y LUCERTINI, M. (1995) «The combinatorial approach to flow management in FMS». En: P. Brandimarte y A. Villa (eds.), *Optimization models and concepts in production management*. Basel, Gordon and Breach Science Publishers, 107-152.
- ANDERSON, E.H. y SCHWENNING, G.T. (1936) *The science of production organization*. New York, John Wiley & Sons.
- ASKIN, R.G. y STANDRIGE, C.R. (1993) *Modelling and analysis of manufacturing systems*. New York.
- BABBAGE, C. (1989) *The works of Charles Babbage* (M. Campbell-Kelly, ed.), vol. 8. New York, New York University Press.
- BAYART, D. y CRÉPEL, P. (1994) «Statistical control of manufacture». En: Grattan Guinness 1994, vol. II, 1386-1391.
- BÉLIDOR, B. (1729) *La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile*. París, C. Jombert (2 ed., 1813).
- BIGGART, J., DUDLEY, P. y KING, F. (eds.) (1998), *Alexander Bogdanov and the origins of systems thinking in Russia*. Ashgate, Aldershot.
- BLACKETT, P. (1948) «Operational research». *Advancement of science*, 5(17), 26-38.
- BRENTJES, S. (1985) «Zur Herausbildung der lineare Optimierung». En: W. Lassmann y H. Schilar (eds.), *Ökonomie und Optimierung*. Berlin, Akademie Verlag, 298-330.
- CHURCHMAN, C.W.; ACKOFF, R.L. y ARNOFF, E.L. (1957) *Introduction to operations research*. New York, Wiley.
- CHVÁTAL, V. (1987) *Linear programming*. New York, W. H. Freeman and company.
- COULOMB, A. (1799) «Résultats de plusieurs expériences destinées à déterminer la quantité d'action que les hommes peuvent fournir par leur travail journalier, suivant les différents manières dont ils employent leurs forces». *Mémoires de l'Institut National des sciences et arts-Sciences mathématiques et physiques*, 1e s., 2, 380-428.
- DAHAN, A. y PESTRE, D. (2003) «Transferring formal and mathematical tools from war management to political, technological, and social intervention. En: Lucertini, Millán Gasca y Nicolò (eds.) 2003, 79-100.
- DANTZIG, G.B. (1963) *Linear programming and extensions*. Princeton University Press, Princeton.
- DANTZIG, G.B. y VEINOTT, A.F. (eds.) (1968) *Mathematics of the decision sciences*. Providence, American Mathematical Society.

- DASTON, L. (1988) *Classical probability in the Enlightenment*. Princeton, Princeton University Press.
- DAWSON, C.S.; MCCALLUM, C.J.; MURPHY, R.B. y WOLMAN, E. (2000), «Operations research at Bell Laboratories through the 1970s: Part I». *Operations Research*, 48, 205.
- DE LISO, N. (1998) «Babbage, Charles». En: H.D. Kurz y N. Salvadori (eds.) *The Elgar Companion to Classical Economics*. Cheltenham-Northampton (Mass.), E. Elgar Publishers, vol. I, 24-28.
- DORAY, B. (1979) *Le taylorisme, une folie rationnelle?* París, Dunod.
- EDHOLM, O.G. (1967) *The biology of work*. New York, McGraw-Hill.
- ELMAGHRABY, S.E. (1977) *Activity networks: Project planning and control by network models*. New York, John Wiley & Sons.
- FAYOL, H. (1918) *Administration industrielle et générale*. París, Dunod.
- FORD, L.R. y FULKERSON, D.R. (1962), *Flows in networks*. Princeton, Princeton University Press.
- FORTUN, M. y SCHWEBER, S.S. (1993) «Scientists and the legacy of World War II: The case of operations research (OR)». *Social studies of science*, 23, 595-642.
- FRANCI, R. y TOTI RIGATELLI, L. (1981) *Introduzione all'aritmetica mercantile del Medioevo e del Rinascimento*. Urbino, Quattroventi.
- GARFUNKEL, S. (dir.) (1999) *Las matemáticas en la vida cotidiana*. Madrid, Addison-Wesley/UAM.
- GARNER, S.P. (1954), *Evolution of cost accounting to 1925*, University of Alabama Press (New York, Garland Pub., 1988).
- GILLMOR, C.S. (1971) *Coulomb and the evolution of physics and engineering in eighteenth-century France*. Princeton, Princeton University Press.
- GRATTAN GUINNESS, I. (1970) «Joseph Fourier's anticipation of linear programming». *Operational Research Quarterly*, 21, 361-364.
- GRATTAN GUINNESS, I. (1990) «Work for the Hairdressers: The Production of de Prony's logarithmic and trigonometric tables». *Annals of the History of Computing*, 12(3), 177-185.
- GRATTAN GUINNESS, I. (1994) «'A new type of question': On the prehistory of linear and non-linear programming, 1770-1940». En: E. Knobloch y D. Rowe (eds.) *History of modern mathematics*, vol. 3. New York, Academic Press, 43-89.
- GRATTAN GUINNESS, I. (ed.) (1994) *Companion Encyclopaedia of the History and Philosophy of the Mathematical Sciences*, 2 vols. London, Routledge.
- HOUNSHELL, D. (1997) «The Cold War, RAND, and the generation of knowledge, 1946-1962». *Historical Studies on the Physical and Biological Sciences*, 27, 237-267.
- HUGHES, T.P. (1998) *Rescuing Prometheus*. New York, Pantheon Books.
- HUGHES, A. y HUGHES, T.P. (eds.) (2000) *Systems, experts, and computers: The systems approach in management and engineering, World War I and after*. Cambridge (Mass.), MIT Press.

- INGRAO, B. e ISRAEL, G. (1990) *The invisible hand. Economic equilibrium in history of science*. Cambridge, Mass./London, The MIT Press.
- INGRAO, B. y RANCHETTI, F. (1996) *Il mercato nel pensiero economico. Storia e analisi di un'idea dall'Illuminismo alla teoria dei giochi*. Milano, Hoepli.
- ISRAEL, G. (1991) «El declive de la mathématique sociale y los inicios de la economía matemática en el contexto de los avatares del Institut de France». *Llull*, 14(26), 59-116.
- ISRAEL, G., (1996) *La mathématisation du réel. Essai sur la modélisation mathématique*. París, Éditions du Seuil.
- ISRAEL G. (1996) «Administrieren c'est calculer: due «matematici sociali» nel declino dell'Età dei Lumi». *Bollettino di Storia delle Scienze Matematiche*, 16(2), 241-314.
- ISRAEL G., MILLÁN GASCA, A. (1993) «La correspondencia entre Vladimir A. Kostitzin y Vito Volterra (1933-1962) y los inicios de la biomatemática». *Llull*, 16, 159-224.
- JOHNSON, S. (1997) «Three approaches to big technology: Operations research, systems engineering, and project management». *Technology and Culture*, 38, 891-919.
- KLEIN, J. (1999) *Controlling gunfires, inventories, and expectations with the exponentially weighted moving average*. Mary Baldwin College, preprint.
- KLEIN, J. (2001) *Post-war economics ad shotgun weddings in control engineering*. Mary Baldwin College, preprint.
- KNOBLOCH, E., NIEHANS, J., HOFMANN, A. y TEOCHARIS, R. D. (1994) *Wilhelm Launhardts «Mathematische Begründung der Volkswirtschaftslehre». Vademecum zu einem Klassiker der Theorie der Raumwirtschaft*. Düsseldorf, Verlag Wirtschaft und Finanzen GmbH.
- KOOPMANS, T.C. (ed.) (1951) *Activity analysis of production and allocation*. New York, Yale University Press/Wiley.
- KUHN, H.W. y TUCKER, A.W. (eds.) (1956) *Linear inequalities and related systems*. Princeton, Princeton University Press.
- LENSTRA J.K., RINNOOY KAN A.H.G. y SCHRIJVER, A. (eds.) (1991) *History of mathematical programming. A collection of personal reminiscences*. Amsterdam, CWI/North Holland.
- LEVIN, M.R. (ed.) (1999) *Cultures of control*. Amsterdam, Harwood.
- LIVERANI, M. (2000) «Il Vicino Oriente Antico. Introduzione». En: *Storia della Scienza*, vol. I., La scienza antica. Roma, Istituto della Enciclopedia Italiana, 195-211.
- LUCERTINI, M., MILLÁN GASCA, A. y NICOLÒ, F. (2003) *Controlling, managing, organizing: Technological concepts and mathematical models in the evolution of engineering systems*. Basel, Birkhäuser Verlag.
- LUNDGREEN, P. (1990) «Engineering Education in Europe and the U.S.A. (1750-1930): The Rise to Dominance of School Culture and the Engineering Professions». *Annals of Science*, 47, 33-75.

- McCLOSKEY, J.F. (1987a) «The beginning of operations research: 1934-1941». *Operations Research*, 35, 143-152.
- McCLOSKEY, J.F. (1987b) «British operational research in World war II». *Operations Research*, 35, 453-470.
- McCLOSKEY, J.F. (1987c) «U. S. operations research in World war II». *Operations Research*, 35, 910-925.
- MAYO, E. (1945) *The social problems of an industrial civilization*. Cambridge (Mass.), Harvard University Press.
- MILLÁN GASCA, A. (1996) «El ideal de la matematización. La introducción de la matemática en las ciencias biológicas, humanas y sociales». *Arbor, ciencia, pensamiento y cultura*, 606, 1996, 79-102.
- MILLÁN GASCA, A. (2003a) «Early approaches to the management of complexity in engineering systems». En: V. Benci *et al.* (eds.) *Determinism, Holism, and Complexity*, New York/Boston/Dordrecht/London/Moscow, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 349-357.
- MILLÁN GASCA, A. (2003b) «Organization and mathematics: a look into the prehistory of industrial engineering». En: Lucertini, Millán Gasca y Nicolò (eds.) (2003), 21-51.
- MILLER, D.M. y SCHMIDT, J.W. (1984), *Industrial engineering and operations research*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- MIROWSKI, Ph. (1999) «Cyborg Agonistes: Economics meets operations research in mid-century». *Social Studies of Science*, 29, 685-718.
- MONGE, G. (1784) «Mémoire sur la théorie des déblais et des remblais». En: *Histoire de l'Académie des Sciences, Année MDCCLXXXI. Avec les Mémoires de mathématiques et de Physique pour la même année*. Paris.
- OPPENHEIM, A.L. (1964) *Ancient Mesopotamia. Portrait of a dead civilization*. Chicago, University of Chicago Press.
- PICON, A. (1987-88) «Les ingénieurs et l'ideal analytique à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle». *Sciences et techniques en perspective*, 13, 70-108.
- PICON, A. (1989) «Les ingénieurs et la mathématisation. L'exemple du génie civil et de la construction». *Revue d'Histoire des Sciences*, 42(1-2), 155-172.
- PICON, A. (1992) *L'invention de l'ingénieur moderne. L'Ecole des Ponts et Chaussées 1747-1851*. Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- PORTER, T.M. (1986) *The rise of statistical thinking, 1820-1900*. Princeton, Princeton University Press.
- PORTER, T.M. (1994) «The English biometric tradition». En: Grattan Guinness 1994, vol. II, 1335-1340.
- PORTER, T.M. (1995) *Trust in numbers*. Princeton (N.J.), Princeton University Press.
- RAU, E. P. (2000) «The adoption of operations research in the United States during World War II». En: Hughes y Hughes 2000, 57-92.

- RÉAMUR, R.-A. F. de (1761) *Art de l'épinglier, par M. de Réamur, avec des additions de M. Dubamel du Monceau, et des remarques extraites des Mémoires de M. Perronet*. Paris, Saillant et Nyon.
- RIDER, R. (1994), «Operational research». En: Grattan Guinness, 1994, vol. I, 837-842.
- RIDER, R. (1992) «Operations research and game theory: early connections». En: E. R., Weintraub (ed.) *Toward a history of game theory*. Durham (NC), Duke University Press, 225-239.
- ROSENBERG, N. (1994) *Exploring the Black Box. Technology, Economics, and History*. Cambridge, Cambridge University Press.
- TAHA, H.A. (1987) *Operations research. An introduction*. New York, Macmillan/London, Collier Macmillan, 4 ed.
- TATON, R. (1951) *L'oeuvre scientifique de Monge*. Paris, Presses Universitaires de France.
- TEOCHARIS, R.D. (1994) *Die Ökonomen aus dem Ingenieurwesen und die Entwicklung von Launhardts mathematisch-ökonomischen Denken*. En: Knobloch, Niehans, Hofmann, and Teocharis 1994, 55-83.
- URMANTSEV, Y. (1998) «Tektology and GST: A comparative analysis». En: Biggart et al., 1998, 237-253.
- WARING, S.P. (1995) «Cold War calculus: the Cold War and operations research». *Radical History Review*, 63, 28-52.
- WATERS, D. (1996) *Operations management. Producing goods & services*. Reading (Mass.), Addison-Wesley
- WEISS, J.H. (1982) *The making of the technological man. The social origin of French engineering education*. Cambridge (Mass.), The MIT Press.
- WOOD, M.K. y DANTZIG, G. (1951) «The programming of interdependent activities: General discusión». En: Koopmans 1951, 15-18.
- ZYLBERBERG, A. (1990) *L'économie mathématique en France 1870-1914*. Paris, Economica.