

# Capítulo 40. La ingeniería de la decisión como herramienta para la sostenibilidad

PEDRO LINARES LLAMAS

ANDRÉS RAMOS GALÁN

PEDRO SÁNCHEZ MARTÍN

## Palabras clave

Optimización, programación matemática, teoría de la decisión, simulación.

En la Escuela de ICAI se tiene amplia experiencia en la concepción y desarrollo de modelos de decisión en el ámbito de la planificación, operación y economía de sectores como el sector eléctrico o el ferroviario. En este artículo se pretende ofrecer una visión necesariamente breve y resumida del potencial de las distintas técnicas de la Investigación Operativa para ayudar a resolver los problemas de desarrollo sostenible de nuestra sociedad. Se describe con mayor detalle el uso de la programación matemática, posiblemente la más utilizada de todas las técnicas, y también se describen otras técnicas que pueden ser consideradas complementarias.

## Introducción

Una de las posibles maneras de definir la sostenibilidad es cómo el satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las oportunidades de las futuras generaciones de satisfacer las suyas [WCED87]. También es bastante intuitiva la idea de Hicks (1946): es la máxima cantidad de recursos que se pueden consumir en un período de forma que al final del mismo el bienestar se mantiene al menos constante.

Por otra parte, también es generalmente aceptado que esta satisfacción de necesidades debe incluir aspectos económicos, medioambientales y sociales, que deben tratar de mantenerse en un equilibrio adecuado.

Existen muchas otras definiciones, aunque generalmente mantienen muchos elementos comunes con las citadas. Pero es interesante observar cómo todas ellas pueden terminar reduciéndose a un problema de asignación de recursos: la sostenibilidad consiste finalmente en asignar de manera adecuada los recursos económicos, medioambientales y sociales, ahora y en el futuro, es decir, en tomar la mejor decisión respecto a esta asignación.

Y esto es, al fin y al cabo, el objetivo y la definición de la ingeniería de la decisión, clásicamente denominada Investigación Operativa (IO), que es la disciplina que aplica métodos analíticos avanzados para ayudar a tomar mejores decisiones en entornos complejos. Estas decisiones son habitualmente de planificación o de operación de sistemas.

La búsqueda de la sostenibilidad, como se ha visto, es un problema muy complejo, ya que se deben combinar distintos tipos de recursos (no reducibles a una única magnitud) y se debe considerar de manera adecuada el elemento temporal, que a su vez introduce un elevado nivel de incertidumbre. Por consiguiente, parece que tanto por la definición del problema en sí, como por su complejidad, presenta todas las características para que las técnicas de IO sean parte esencial de la resolución del problema. Estas técnicas deben aportar una visión sistémica transversal a otras áreas de conocimiento más específicas.

Esto es reconocido cada vez más tanto en el campo del desarrollo sostenible como en el de la IO. Así, numerosas publicaciones plantean el logro del desarrollo sostenible como un problema de

IO. Y por otra parte, desde el campo de la IO cada vez se es más consciente del potencial de la disciplina para resolver problemas globales como el del desarrollo sostenible (como por ejemplo la iniciativa *Doing good with good O.R.* lanzada por INFORMS, o *Green Manufacturing*, *Green Supply Chain*, *Green Energy* con conferencias internacionales específicamente dedicadas a estos temas).

Entre los principales sistemas complejos donde el uso de las técnicas de IO pueden ayudar a mejorar la sostenibilidad se pueden mencionar: sistemas de producción, sistemas logísticos, sistemas de energía y sistemas de explotación agrícola y forestal.

Una producción limpia no sólo implica reducción de costes sino mejora en la eficiencia de los procesos, promoción del desarrollo de nuevos productos innovadores que no deterioran el medio ambiente y gestión adecuada de la fuerza de trabajo. La implicación de los trabajadores en este proceso, desde el proceso de diseño del producto hasta el reciclado de materiales en su puesto de trabajo, se ha detectado como fundamental para conseguir éxito en el mismo. La sostenibilidad implica la gestión del ciclo completo de vida de un producto, incluyendo su posible reutilización, más que su simple producción.

En los sistemas logísticos cobran importancia las emisiones asociadas al transporte de productos, los sistemas de empaquetado mediante el uso de materiales reciclados y la denominada logística inversa o la cadena de suministro de bucle cerrado que gestiona también el retorno de los productos a dicha cadena. Desde un punto de vista de política pública pueden tenerse en cuenta otros impactos medioambientales como el ruido, el uso del suelo, la combinación de los diferentes modos de transporte o la seguridad en el transporte.

En los sistemas de energía, la sostenibilidad se ha traducido en la promoción de energías renovables, la eficiencia energética, la reducción de emisiones; y en procesos de extensión del suministro energético a los estratos más desfavorecidos, como prácticas habituales para conseguir un desarrollo sostenible. En la práctica, estas políticas han derivado en la planificación integrada de los recursos incluyendo la consideración de las externalidades y la seguridad de suministro, en la operación del sistema de manera eficiente y con máxima integración de energías renovables, o en el diseño de programas de electrificación rural.

La explotación agrícola y forestal orientada a la conservación de la diversidad y respeto medioambiental y al mantenimiento de tejido social en el entorno rural constituye otro ámbito de actuación fundamental.

## La sostenibilidad como un problema de programación matemática

La manera más fácil de ver un problema de asignación de recursos como éste es plantearlo como un problema de Programación Matemática (PM), y así se puede ver cómo la sostenibilidad puede tener distintas maneras de formularse.

La formulación general de un problema de PM incluye la función objetivo, las variables y las restricciones. La función objetivo es la medida que define el funcionamiento del sistema; las variables son las decisiones que afectan este comportamiento; y las restricciones son las relaciones necesarias para reflejar de manera realista su funcionamiento.

La complejidad de las decisiones que se deben abordar exige no sólo de la programación matemática sino del uso de técnicas complementarias como la teoría de la decisión y la simulación, que se explican a continuación de ésta.

### La sostenibilidad como objetivo

Tal como se ha mencionado previamente, la función objetivo debe reflejar un equilibrio entre aspectos económicos, medioambientales y sociales. Para introducir la visión de sostenibilidad en el problema se habla de gestión de capital económico (los costes o beneficios), de capital de los recursos naturales (las emisiones contaminantes o el deterioro de la capa de ozono, por ejemplo) o de capital social (la justicia social, el bienestar de los accionistas o de los grupos de interés). Estos tres atributos pueden constituir, de forma simplificada, la base de la medida de la sostenibilidad bajo el

paradigma de la sostenibilidad “débil”, es decir, aquélla que supone que los distintos atributos son intercambiables desde el punto de vista de la maximización del bienestar de la sociedad o de su sostenibilidad.

Por ejemplo, dentro de procesos de producción, las funciones objetivo que se manejan habitualmente para incorporar criterios de sostenibilidad son:

- Minimización del consumo de recursos: los recursos habituales en sistemas de producción suelen ser energía, agua, materia prima virgen.
- Minimización de los residuos: la minimización de los residuos industriales, desperdicios y viruta aparece muy frecuentemente en los problemas de corte de material. Las emisiones o materiales contaminantes del proceso productivo se pueden considerar también como residuos.

En el caso de sistemas logísticos la introducción de costes externos de emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al transporte de productos es un mecanismo habitual para considerar criterios de sostenibilidad.

Un aspecto adicional fundamental de la sostenibilidad es la perdurabilidad o incluso su mejora a lo largo del tiempo. Luego la reducción de los recursos consumidos o de emisiones es un objetivo a corto, medio y largo plazo para una empresa sostenible. Algunas empresas incluso se fijan como objetivo desarrollar sus actividades con criterios de emisiones cero.

## La sostenibilidad como variable

Las decisiones asociadas al problema de optimización son los recursos económicos, medioambientales y sociales. Luego los costes del capital, las emisiones de diferentes tipos, el bienestar social, etc. son las variables del problema.

Más concretamente, dentro de los sistemas de producción habrá variables específicas para la sustitución de productos por otros nuevos más “sostenibles” con iguales o mayores prestaciones que los anteriores, pero con menor diversidad de componentes, y mayor reutilización de materiales o componentes utilizando incluso la propia cadena de suministro.

En los sistemas logísticos las variables principales determinarán la estructuración de la cadena de distribución, definida ésta como número y localización de centros de agrupamiento y almacenes, flujos y portes a través de la red o niveles y rotación de inventarios en almacenes intermedios.

Es importante tener en cuenta que la planificación estará sometida a la incertidumbre de las decisiones a lo largo del tiempo y debe analizarse cómo ésta puede afectar a la consecución de los objetivos.

## La sostenibilidad como restricción

Las restricciones asociadas a la sostenibilidad deben incorporar los criterios de perdurabilidad en el tiempo de los recursos económicos, medioambientales y sociales, además de las restricciones habituales en los respectivos sistemas. De alguna forma, la sostenibilidad como restricción viene a representar la idea de “sostenibilidad fuerte”.

Algunas de estas restricciones pueden ser difíciles de establecer con criterios de sostenibilidad. Por ejemplo, determinar cuáles son los niveles aceptables y tipos de emisiones contaminantes que van a tener impacto no sostenible en el medio ambiente.

## Otras técnicas de IO para lograr la sostenibilidad

En ocasiones, el problema de cómo lograr la sostenibilidad incorpora aspectos difícilmente tratables mediante la programación matemática. Así, la presencia de incertidumbre o riesgo, la existencia de criterios múltiples, o la necesidad de representar adecuadamente la complejidad del problema y su evolución dinámica pueden hacer necesario recurrir a técnicas alternativas o complementarias a la programación matemática, como son la teoría de la decisión o la simulación.

## Teoría de la decisión

Un problema de decisión se puede definir como aquél en que es necesario elegir, de entre varias alternativas, aquélla que mejor satisface los fines buscados. Esto evidentemente parece una definición

muy amplia, aunque en realidad no lo es tanto: para que realmente exista una decisión debe haber ambigüedad, es decir, no debe resultar evidente conocer la mejor elección, y esta ambigüedad generalmente se asocia a la existencia de criterios múltiples de decisión, o a la presencia de riesgo o incertidumbre. Cuando no existe ninguno de estos elementos, el problema no se considera de decisión, sino de búsqueda. Así, las técnicas anteriormente comentadas de optimización son generalmente técnicas de búsqueda, no de decisión.

El objetivo principal de la teoría de la decisión es ayudar a tomar mejores decisiones. Sin embargo, no es el único. La teoría de la decisión pretende, mediante la aplicación del método científico, analizar, sistematizar y comprender mejor los procesos de decisión para, además, formalizar las decisiones, hacerlas reproducibles, y permitir su explicación y su simulación.

Como es fácil observar, los problemas relacionados con la sostenibilidad son generalmente problemas de decisión: la propia definición de sostenibilidad incluye distintos criterios (medioambientales, sociales o económicos), y además, el largo plazo considerado hace que sea inevitable la consideración de la incertidumbre o el riesgo. Por tanto, resulta especialmente pertinente el considerar estos métodos en la toma de decisiones sostenibles.

En cualquier caso, el primer paso en cualquier método de decisión es la identificación de las preferencias del decisor o del grupo de decisores. Como ya se ha mencionado antes, estos problemas se caracterizan por una cierta ambigüedad, y son las preferencias las que permiten deshacerla. Y no es factible pretender tomar una decisión de manera “objetiva”, ya que incluso aquellos métodos en los que se propone no considerar las preferencias de los decisores están haciendo uso de una estructura de preferencias implícita pero real.

Ahora bien, existen muchos tipos posibles de estructuras de preferencias. En primer lugar, atendiendo a su racionalidad, se podrá distinguir entre preferencias normativas (las que deberían ser, de acuerdo a una serie de supuestos o axiomas) o positivas (las que se dan en la práctica, y que pueden ser hasta cierto punto ilógicas o irracionales, pero sin que esto las haga menos válidas).

Por ejemplo, cuando se habla de sostenibilidad, se pueden considerar que la preferencia temporal de las personas debe ser una determinada, dada por una tasa social de descuento. Sin embargo, las preferencias reales de los consumidores pueden estar muy concentradas en el momento presente.

Existen distintas clasificaciones de las estructuras de preferencias según cumplan unas características u otras (simetría, transitividad, etc.). También se pueden distinguir entre estructuras cardinales u ordinales (sólo importa el orden, no la cuantía). La identificación de la estructura real de las preferencias es de gran importancia, ya que, por ejemplo, hay estructuras que hacen imposible elegir una “mejor” alternativa.

Una vez conocidas las preferencias, se procederá a describir brevemente los distintos métodos de decisión disponibles para enfrentarse al problema de la sostenibilidad.

## Decisión bajo incertidumbre

En primer lugar, se encuentran los métodos de decisión bajo incertidumbre. Estos métodos son los que se deben utilizar cuando no se conoce la probabilidad de ocurrencia de los sucesos (algo bastante habitual en temas de sostenibilidad). En este caso existen dos opciones: una, estimar las probabilidades, tal como propone la escuela bayesiana; en ese caso, el problema se convierte en uno de decisión en presencia de riesgo. Otra opción es no estimar probabilidades.

En ese caso, hay varios criterios disponibles para tomar una decisión en ausencia de probabilidades, de los cuales los más conocidos son el de Wald, el de Savage y el de Hurwicz, cada uno con distintas implicaciones.

El primero de ellos consiste en seleccionar la alternativa que proporciona el mejor resultado, suponiendo que el escenario será el peor previsto para cada una de ellas. Éste es un criterio altamente conservador, donde la precaución se lleva a un caso extremo. De alguna manera, podría corresponderse con el principio de precaución habitualmente utilizado en política ambiental, y con el principio de sostenibilidad fuerte. Sin embargo, también es cierto que en ocasiones puede llevar a la inacción. Por lo tanto, habitualmente se considera también el criterio de Savage. Este criterio trata



de minimizar el arrepentimiento asociado a una decisión, entendiéndose como arrepentimiento la diferencia entre haber adoptado una decisión y el haber adoptado la mejor decisión para cada escenario. Este criterio es el que más cercano se encuentra a una fórmula de compromiso, lo que es habitualmente más apropiado en el caso de problemas de sostenibilidad débil. Finalmente, el criterio de Hurwicz ayuda a evaluar la robustez de las decisiones frente al grado de optimismo del decisor, lo cual también es muy útil en este tipo de problemas en que el desconocimiento no sólo sobre los sucesos sino sobre nuestra estimación de los mismos es elevado.

## Decisión bajo riesgo

Si se conocen las probabilidades de ocurrencia de los sucesos, o se pueden estimar con una cierta seguridad, el problema pasa a ser uno de decisión bajo riesgo. En este caso se suele usar como criterio de decisión la maximización del valor esperado de la decisión, aunque también hay otros.

Como se ha mencionado, en el caso de los problemas de sostenibilidad es complicado conocer las probabilidades o incluso estimarlas, pero aun así este tipo de técnicas tienen gran interés, especialmente en lo que se refiere a la valoración de la ganancia de información. Efectivamente, los métodos de decisión bajo riesgo incluyen la evaluación del valor de la ganancia de información, algo fundamental en el caso de la sostenibilidad, para la cual muchos aspectos aún están en fase de investigación. Así, se puede comparar el valor de una decisión en ausencia de información con el valor de dicha decisión si se mejora la calidad de la información. Y por tanto, se puede evaluar si vale la pena realizar investigaciones que permitan ampliar nuestros conocimientos en determinados aspectos del problema.

Finalmente, y en este contexto, también resulta conveniente el mencionar la importancia de las preferencias de los decisores frente al riesgo (que también se tratan habitualmente bajo el nombre de teoría de la utilidad).

Efectivamente, el valor de una decisión determinada no tiene por qué corresponderse con el valor monetario o físico de la misma. Es habitual más bien, especialmente en el contexto de la sostenibilidad, encontrarse con preferencias aversas al riesgo: es decir, que se valoran más decisiones menos arriesgadas, aunque su valor esperado sea menor. En este sentido, determinados elementos relacionados con la sostenibilidad, como la posible ocurrencia de eventos catastróficos con un riesgo muy bajo, cobran gran importancia en el análisis.

## Decisión multicriterio

Por último, el tercer tipo de problemas considerados por la teoría de la decisión, y de una gran importancia en la búsqueda de la sostenibilidad, es el que incluye los problemas con criterios múltiples de decisión. Como se comentó anteriormente, la existencia de varios criterios es consustancial a todos los problemas de sostenibilidad.

Cuando un problema presenta criterios múltiples, el primer paso habitualmente es descartar aquellas soluciones que no son óptimas de Pareto, o soluciones dominadas. Una solución está dominada cuando existe otra que permite mejorar en un aspecto, sin empeorar en el resto. Cuando ya no es posible mejorar en uno sin empeorar en otros, entonces existe un óptimo de Pareto o solución eficiente. Sin embargo, todavía resta un problema: cómo seleccionar la decisión más apropiada de entre todos los óptimos de Pareto.

En estos casos es muy útil el utilizar técnicas de decisión multicriterio establecidas, ya que como se ha comentado anteriormente, permiten formalizar, estructurar y replicar los problemas. La técnica a utilizar dependerá fundamentalmente de las posibilidades de elección. Si el conjunto de alternativas es continuo, se pueden utilizar técnicas basadas en la optimización, como la programación compromiso, o en la satisfacción de metas, como la programación por metas. Si el conjunto de alternativas es discreto, además de las anteriores también se pueden utilizar otros métodos de ordenación y clasificación de alternativas, como AHP, Electre, o la teoría de la utilidad multiatributo.

Todas estas técnicas permite seleccionar, en función de las preferencias del decisor, aquella decisión que se considere más adecuada de acuerdo con los distintos criterios considerados entre los cuales la sostenibilidad formaría parte, y lo que es a veces más importante, permite explicar dicha decisión, dando razones que la justifiquen y hasta poder replicar los análisis realizados.

## Decisión en grupo

Todas las consideraciones que se han efectuado anteriormente se refieren generalmente a un único decisor, en especial en lo que tiene que ver con las preferencias. Sin embargo, es muy habitual que la decisión no deba tomarla una única persona, sino un grupo de ellas, que podrá ser homogéneo o heterogéneo. De hecho, la gran mayoría de las decisiones relacionadas con la sostenibilidad deben tomarse en grupo, precisamente para garantizar el apoyo a largo plazo de las mismas, en ocasiones debiendo participar toda la sociedad.

Una posibilidad para tomar decisiones en grupo es la votación. Como es bien sabido, los sistemas de votación tienen sus problemas (relacionados con el teorema de la imposibilidad de Arrow), por lo que en ocasiones también resulta de interés el utilizar métodos de agregación o de comparación de preferencias, que permitan esquivar los problemas asociados a las votaciones o, más importante aún, que permitan alcanzar posturas de consenso (al lograr que los decisores se pongan de acuerdo en sus valores o en las alternativas a elegir).

Como se ve, de nuevo las técnicas de decisión pueden proporcionar una ayuda inestimable en la búsqueda de la sostenibilidad.

## Simulación

La simulación es otra técnica de IO que mejora la evaluación del impacto de las decisiones sobre la sostenibilidad. Esta técnica emula el comportamiento de los sistemas internalizando de forma explícita las relaciones lógicas y matemáticas entre los subsistemas condicionados por la aleatoriedad de entradas y respuestas del modelo.

La simulación está especialmente indicada en aquellas situaciones en que las interacciones dentro del sistema son complejas a lo largo del tiempo, al tener múltiples agentes con entradas y respuestas con un alto componente aleatorio. La utilización de esta técnica permite cuantificar el impacto de las posibles decisiones haciendo más creíble los resultados obtenidos al aplicar técnicas de visualización y animación gráfica a lo largo del proceso de simulación.

Las respuestas de sistemas sociales y naturales son generalmente complejas, tal es así que su modelización con técnicas de optimización resulta a veces limitante, y por ello se acude a la simulación. El modelado correcto de la aleatoriedad inherente a los sistemas y la inclusión de la lógica adecuada del comportamiento del sistema resultan piezas claves para una correcta validación y posterior credibilidad de los resultados.

El uso de esta técnica requiere habitualmente de una implantación informática específica y diseño concreto de experimentos lo cual suele alargar el proceso de toma de decisiones. En la actualidad se puede partir de software de simulación generalista aplicando técnicas avanzadas de simulación, tales como técnicas de reducción de varianza, con el fin de reducir el tiempo de obtención de resultados. De hecho, un número creciente de modelos que se utilizan en la actualidad para evaluar la sostenibilidad de distintos sistemas están basados en técnicas de simulación.

## Conclusiones

La conclusión fundamental del capítulo es que las técnicas de la ingeniería de la decisión pueden, y deben, jugar un papel esencial en la resolución de los graves problemas de sostenibilidad a los que se enfrenta distintos sectores económicos y sociales, ya que permiten tomar mejores decisiones, y además dar razones justificativas y en su caso replicar los análisis realizados de una manera sistémica y transversal a otras disciplinas.

La programación matemática, como técnica relevante de Investigación Operativa, se utiliza incorporando en función objetivo, variables y restricciones el modelado de la sostenibilidad. Otra técnica distinta como la teoría de la decisión resulta adecuada para el análisis comparativo de decisiones según las prioridades y preferencias en la toma de decisión. Y por último la técnica de la simulación resulta más conveniente para analizar con mayor detalle el impacto de las decisiones a lo largo del tiempo y su interacción con distintos parámetros de entrada al modelo.

En función de las características del problema a resolver, y de mayor o menor la importancia de unos u otros aspectos (incertidumbre, riesgo, dinámica temporal, etc.) en el mismo, será necesario escoger la técnica más apropiada para tratar de alcanzar con ella el óptimo o la medida más razonable de sostenibilidad en un sistema dado.

En la Escuela de ICAI se tiene amplia experiencia en la concepción y desarrollo de modelos de decisión en el ámbito de la planificación, operación y economía de sectores como el sector eléctrico o el ferroviario, por lo que la incorporación de parámetros de sostenibilidad a los mismos aparece como una senda natural de expansión, al igual que se hace evidente y recomendable el interés de incorporar este tipo de preocupaciones en los ejemplos prácticos que se resuelven en las clases de las asignaturas del área, como contribución por parte de esta disciplina a la incorporación de la sostenibilidad en los planes de estudios. ■

## Referencias

- [AGUA07] Aguado Franco, J.C. (2007). *Teoría de la decisión y los juegos*. Delta Publicaciones.
- [AME\_07] Association of Manufacturing Excellence (AME). *Green Manufacturing: Case Studies In Lean and Sustainability* (Enterprise Excellence), 2007.
- [HILL02] Hillier, F.S., Lieberman, G.J. *Introducción a la Investigación de Operaciones*, 8ª ed, McGraw-Hill, 2006.
- [LAW00] Law, A.M., Kelton, W.D. *Simulation Modeling And Analysis*, 3ª ed. McGraw-Hill, 2000.
- [LUCE57] Luce, R.D., Raiffa H. *Games And Decisions. Introduction And A Critical Survey*. J. Wiley and Sons, 1957.
- [PERA06] Peralta, M.J., Giménez, M.J., Redondo, R. *Curso de decisión: conceptos y métodos*. Ed. Universitas, 2006.
- [RAIF68] Raiffa, H. *Decision Analysis. Introductory Lectures On Choices Under Uncertainty*. Addison Wesley, 1968.
- [ROME93] Romero, C. *Teoría de la decisión multicriterio*. Alianza Editorial, 1993.
- [SARK06] Sarkis J. (ed.). *Greening the Supply Chain*. Springer, 2006.
- [HICK46] Hicks, J. *Value And Capital* (2<sup>nd</sup> ed.), Oxford University Press, Oxford, 340 pp., 1946.
- [WCED87] World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*. Oxford, Oxford University Press, 1987.