

SELECCIÓN DE PROYECTOS O ALTERNATIVAS

Nolberto Munier

María José Bastante-Ceca

Rosario Viñoles Cebolla

Bélgica Pacheco-Blanco

Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Proyectos de Ingeniería

Abstract

Projects selection is the responsibility of the decision entity, but for this compromise normally the decision maker doesn't receive too much assistance. Naturally, there are decision models effective in the sense that they help to reach a solution, although not efficient because they don't allow a comparison to be made with a reference. It is also true that not always there is interest in getting the optimal solution, but instead that which satisfies best; it would be useful to know which divergence exists between our results and the best.

This paper proposes using Linear Programming (LP). This guaranties to reach an optimal result, if it exists. This fact is widely known since long time with existing LP applications all over the world, but its drawback is that it works with one objective only, and frankly, this is not usually the case in most projects. It is suggested here a procedure which allows working with any amount of objectives, but obviously neither obtaining an optimal solution nor a knowledge of the magnitude of the divergence, but a ranking of alternatives based on optimal partial solutions, and consequently the result is more reliable than those from other methods using subjective appreciations.

Keywords: *project selection; decision models; decision maker; mathematical models; linear programming; simus*

Resumen

La selección de proyectos es responsabilidad de un ente decisor, pero para ello éste no recibe mucha asistencia. Existen modelos de decisión eficaces pues ayudan a obtener una solución, aunque no eficientes porque no permiten compararla con una referencia. Además, no siempre hay interés en obtener la solución óptima, sino aquella que más satisfaga, pero sería útil conocer qué divergencia existe con la mejor.

Se propone aquí el uso de la Programación Lineal (PL)¹, que garantiza un resultado óptimo trabajando con un único objetivo, y de la cual existen muchas aplicaciones. Se sugiere una operativa que permite trabajar con múltiples objetivos, no obteniendo una solución óptima, sino un ordenamiento basado en soluciones parciales óptimas, más fiable que otros métodos basados en apreciaciones subjetivas.

Palabras clave: *selección de proyectos; modelos de decisión; decisor; modelos matemáticos; programación lineal; simus;*

¹ Técnica matemática que trata problemas lineales, de mucha aplicación práctica en la industria, el comercio, la localización industrial, en el área de la petroquímica, y en otras muchas actividades cuando éstas pueden ser representadas mediante un modelo matemático con relaciones lineales de las variables. Tiende a lograr la optimización de un objetivo, también lineal, suministrando, si existe, la solución óptima del problema, es decir aquella que no puede mejorarse teniendo en cuenta los datos suministrados.

1. Introducción

La selección de proyectos no es un campo nuevo ya que existe desde hace muchas décadas, especialmente en proyectos cuyo objetivo era el económico. Es decir la disciplina se limitaba mayormente a elegir entre dos o más proyectos el que produciría el mayor Valor Actual Neto o la mayor Tasa Interna de Retorno y ahí terminaba el análisis. Hubo por supuesto muchos otros proyectos en los cuales se necesitaba una herramienta de decisión y ya no sólo desde el punto de vista económico.

Sin embargo, dos fenómenos a nivel mundial ocasionaron un gran auge del tema de la toma de decisiones; fenómenos que no estaban relacionados entre sí pero que no obstante produjeron impactos que eran prácticamente coincidentes.

El primero se corresponde con el notable incremento que experimentó hace ya varias décadas el transporte aéreo de pasajeros de media y larga distancia, que ocasionó una considerable merma de viajeros para los ferrocarriles (paradójicamente se está revirtiendo el fenómeno en España, con la construcción de los trenes de alta velocidad, que produjo una muy considerable reducción de pasajeros de los vuelos entre Madrid y Sevilla y entre Madrid y Barcelona y que sin duda producirá el mismo efecto con la próxima inauguración de la línea de alta velocidad entre Madrid y Valencia). Esta competencia primigenia desembocó en muchos países en la suspensión del servicio en miles de kilómetros de vías férreas; por falta de pasajeros las estaciones en las grandes ciudades entraron en decadencia y muchas de ellas se clausuraron. Generalmente estas grandes estaciones se construyeron hace más de 100 años y estaban en el centro de las ciudades, que crecieron alrededor de ellas; su deterioro se transmitió a la zona circundante que vio crecer su población de gente sin hogar, indigentes, con apertura de negocios de dudosa reputación, con grandes hoteles clausurados, etc., como se podía apreciar en Los Ángeles en los años 80. El impacto fue entonces de una degradación y pérdida de valor del centro de la ciudad.

El otro fenómeno estuvo relacionado con el cambio del tráfico marítimo de carga que se volcó hacia el transporte por contenedores. El impacto fue la suspensión de las actividades portuarias en los antiguos muelles y la decadencia por falta de uso de los mismos, con sus enormes galpones de almacenamiento que estaban ahora vacíos y que constituían el refugio de personas sin hogar e indigentes.

Los ayuntamientos de ciudades como Paris, Londres, Los Ángeles, Buenos Aires, Toronto, Singapur, Vancouver, Ciudad del Cabo, etc., es decir alrededor del mundo, tuvieron que tomar la decisión de resolver qué hacer con esos terrenos del ferrocarril y del puerto, ahora vacantes. Había por supuesto muchas alternativas tales como construir barrios de edificios de altura para viviendas, o para oficinas, parques de industrias tecnológicas, universidades, parques, marinas, hoteles, etc. Es decir, existía una gran variedad de alternativas, cada una con sus costes, ventajas y desventajas, cada una con sus propios problemas y con sus características, y era entonces necesario tomar una decisión.

Este escenario tuvo lugar hace ya décadas, aunque aún prosigue en muchas ciudades, y muy probablemente, a raíz de la necesidad de contar con herramientas idóneas para ayudar a la toma de la decisión es que ya a mediados del siglo XX se crearon programas informáticos, comenzando con investigadores de los Estados Unidos que trataron de aplicar Programación Lineal, pero que no tuvo mucha aceptación debido a que sólo podía trabajar con un objetivo. Luego, Roy en Francia (Roy, 1968), desarrolló un exitoso método (Electre), considerando técnicas de superación de un proyecto sobre otro, y fue seguido por el americano Saaty (Saaty, 1980) que en la década de los 90 diseñó un sistema basado en preferencias entre pares de alternativas, que ha tenido una gran desarrollo y múltiples aplicaciones en distintos campos. Es de destacar asimismo el trabajo de Brans (Brans *et al*, 1985), que basado en las ideas de Roy, desarrolló el método Promethee, también de gran aplicación y aceptación en muy diversas áreas del quehacer humano.

¿Por qué es ahora más importante que nunca el tema de la toma de decisiones en los proyectos?

En 1992 tuvo lugar en Rio de Janeiro una conferencia llamada '*La Cumbre de la Tierra*', organizada por las Naciones Unidas, para intentar establecer normas a fin de detener la destrucción ecológica del planeta. En esa conferencia participaron como signatarios 172 países que se comprometieron a empezar a aplicar medidas de protección del medio ambiente. Dichas medidas fueron normalizadas formalmente con las directivas conocidas como Agencia 21 y años más tarde con los compromisos de Aalborg en Europa, y provocaron que en todos los países se exigiera que en los proyectos de cierta envergadura se tuvieran en cuenta los efectos de daño ambiental producido por un proyecto dado.

Esto complicó mucho la tarea de seleccionar proyectos porque ahora, además del aspecto económico, había que agregar el social, el medioambiental y el de sostenibilidad, y entonces los métodos comentados anteriormente ya no fueron adecuados para problemas que si bien posiblemente tuvieran pocas alternativas, podían tener en cambio cientos de condicionamientos o criterios, como por ejemplo establecer límites en la contaminación del aire, del agua y del suelo, o exigencias de tipo social tales como cantidad de espacio verde por metro cuadrado en una planta fabril, o la eliminación del ruido en los aeropuertos, también llevar a un mínimo la destrucción de bosques a ser inundados por un proyecto hidroeléctrico, o poner coto a la pesca comercial, etc. A esto habría que agregar que algunos condicionamientos exigen umbrales o límites mínimos y máximos, por ejemplo, en una descarga contaminante de aguas negras en un gran río, después de su tratamiento primario y secundario, puede admitirse un valor mínimo reducido de nitratos porque se sabe que es prácticamente imposible eliminarlos del todo, y al mismo tiempo un nivel máximo de los mismos; es decir se permitirá que el criterio adopte valores entre estos límites. Como se aprecia, el problema de selección devino en algo muy complejo.

2. Objetivos

Este trabajo tiene por objeto encarar el tema de la toma de decisiones en proyectos por medio de la Programación Lineal. Para ello emplea el mundialmente conocido '*Algoritmo del Simplex*' desarrollado en 1948 por el científico americano George Dantzig. Dado un cierto problema este algoritmo garantiza hallar – si existe – la mejor solución o resultado óptimo de un problema, y trabajando con un sólo objetivo. Como normalmente los problemas reales involucran varios objetivos, a menudo contradictorios u opuestos, la técnica no es de mucha aplicación práctica, aunque existen algunas variantes que pueden tratar problemas con pocos objetivos, tal como el Goal Programming (Charnes *et al*, 1961). Por este motivo se desarrolló la metodología Simus² que sí permite trabajar con múltiples objetivos, usando el Simplex (Munier, 2010).

Asimismo, este trabajo tiene por objeto introducir Simus en la resolución de un problema real y relativamente complejo, con tres alternativas y 14 criterios o restricciones. En esencia, lo que agrega la metodología Simus es considerar cuantos objetivos se deseen y además el permitir usar valores subjetivos, tales como 'bueno', 'mejor', 'suficiente', 'peligroso', etc. No hay sin embargo ninguna garantía de que el resultado sea óptimo, como en la programación lineal, pero ofrece al decisor una solución que está basada fundamentalmente en aspectos objetivos y no subjetivos, y que además permite tratar problemas tanto simples como complejos o muy complejos.

² SIMUS. (Sequential Interactive Model for Urban Sustainability), utiliza el método Simplex desarrollado por George Dantzig, Permite emplear valores subjetivos en los criterios, creando los umbrales adecuados y, mediante la aplicación reiterada del Simplex, trabajar con objetivos múltiples.

Es muy importante mencionar que el Simplex puede trabajar con cualquier cantidad de alternativas y con cientos o aun miles de condicionamientos o criterios. Hay una gran cantidad de modelos informáticos para resolver este problema basados en este algoritmo, quizás el más conocido es el llamado 'Solver'³ que desde 1991 es un agregado del programa *Excel*[®] de hojas de cálculo, y éste es el software que se utiliza en este trabajo.

³ Solver es un producto de Frontline Systems - <http://www.solver.com/>

3. Metodología

El sistema consiste en tratar de replicar un caso real mediante un modelo matemático. Esto se lleva a cabo por medio de una matriz, de cualquier dimensión, en donde las columnas representan las diferentes alternativas, en tanto que las filas se dedican a plantear las restricciones, condicionamientos o criterios de los problemas. Estos criterios son entonces el marco al cual se deben ceñir las alternativas. Por ejemplo si hay tres proyectos o alternativas para construir una planta de generación eléctrica los criterios a cumplir pueden ser: a) producir como máximo una cierta cantidad de NOx, b) establecer un valor mínimo de potencia a generar, c) considerar la velocidad, frecuencia y dirección de los vientos predominantes para que los gases de la chimenea se dirijan hacia el mar, etc.

En la intersección de cada columna con cada criterio se indica la contribución al mismo que hace cada alternativa. Por ejemplo, en el tema de emisiones de NOx se conoce que la planta A aportaría 5400 TM de CO₂ equivalente⁴, la B, debido a que emplea otro sistema, originaría sólo 1200 TM, y la C, en función de que envía los gases a un depósito subterráneo participaría con 0 TM.

Es obvio que desde el punto de vista de este criterio, la mejor solución es la C, pero como también hay muchos más criterios para los cuales la C pierde terreno comparada con la A y la B, la decisión no es sencilla. También es necesario establecer cotas, límites o umbrales a los criterios. Por ejemplo ¿Qué contenido en mg/litro es admisible de NOx para no perjudicar la salud? Es obvio que éste debe ser un límite máximo y que las centrales deben emitir por debajo de él. Otro acotamiento podría ser por ejemplo que la potencia mínima a generar por cada central debe ser de 450 MW, porque por debajo de esa cantidad no hay economía de escala y la explotación puede ser no rentable.

Vayamos ahora a los objetivos del caso. Uno de ellos podría ser por ejemplo, maximizar la entrega de energía a las zonas rurales; un segundo objetivo consistiría en minimizar la energía que se toma de la red nacional; un tercer objetivo tendería a lograr la mínima inversión necesaria, etc.; hay que considerar todos ellos.

Decimos *‘Queremos maximizar el desarrollo económico de la zona’* pero no establecemos un valor, por ejemplo de que haya un efecto multiplicador de 2,8. También, en otro proyecto el objetivo se expresaría como *‘reducir la pobreza al mínimo’* pero no se da un valor sobre cuánto debe ser el ingreso mensual para que una familia no sea considerada pobre. Como se aprecia, hay una similitud entre objetivos y criterios y en realidad pueden usarse en forma indistinta, pero hay una sutil diferencia. En tanto que el criterio está limitado, el objetivo no lo está; es simplemente una expresión de deseos. Este concepto de sustitución entre objetivos y criterios es fundamental porque precisamente en él se basa Simus.

Para finalizar con esta breve exposición sobre la metodología se considera útil mencionar que el algoritmo del Simplex se apoya en el algebra matricial y desarrolla reglas sencillas para optimizar los sucesivos resultados provenientes de la inversión de matrices siguiendo el método de Gauss-Jordan.

⁴ Dado que hay varios gases contaminantes y que suelen expresarse en diferentes unidades de medida, se ha convenido que para poder analizarlos y comparar sus efectos se conviertan éstos en unidades (TM) de CO₂ equivalentes.

4. Caso de estudio

Una ciudad europea⁵ está atravesada de oeste a este por la autopista E98. Esta vía está colapsada en su parte central debido al intenso tráfico vehicular, y el ayuntamiento ha estudiado diversas alternativas para solucionar el problema. Las alternativas son:

- A. Construir sobre la actual autopista que se desarrolla a nivel del suelo, otra elevada
- B. Ampliar la actual autopista construyendo dos carriles adicionales por cada sentido
- C. Construir una autovía paralela a nivel del suelo
- D. Construir un bypass desde el sur y que empalme con la E98 a la salida de la ciudad por el oeste, y a la entrada por el este.

Para el análisis de las cuatro variantes se utilizan 14 criterios que se detallan en la Tabla 1, en donde en cada columna se han anotado las contribuciones de cada alternativa con respecto a cada criterio. Es de destacar que la PL no necesita trabajar con pesos para los criterios, ya que el propio modelo los genera cuando suministra los valores de su problema dual que se producen automáticamente al resolver el problema primal⁶. Sin embargo, en este ejemplo se asignan pesos a los criterios debido a una exigencia del decisor que evidentemente quería establecer una diferencia entre criterios de acuerdo a su leal saber y entender. Estos pesos se reflejan en la columna 2 como porcentajes.

Los valores asignados a cada alternativa en correspondencia con cada criterio, son el resultado de datos técnicos, mediciones, regresiones estadísticas y pronósticos, como así también de apreciaciones, encuestas, consultas, etc., entre los diversos actores interesados, es decir el decisor y su equipo, organismos municipales y provinciales involucrados, y el público que se verá afectado por la obra. Sobre la base de esta documentación se ha determinado la contribución de cada alternativa para cada criterio y usando para cada uno de ellos una escala tal como de 1 a 12 ó de 1 a 20, a más alto valor mejor. Así se tiene que las alternativas B y D por ejemplo, gozan del puntaje máximo desde el punto de vista del criterio '*Política regional y del ayuntamiento*'.

En otros caso, tal como en el criterio número 13, '*Generación de ruido*', es evidente que lo deseable es tener el menor ruido posible, y desde ese punto de vista la valoración es a la inversa de la anterior, o sea a menor valor mejor. Aquí, según ese concepto, la alternativa B es la preferida, ya que tiene el puntaje más bajo.

Tabla 1 Tabla de datos (Alternativas y criterios)

ALTERNATIVAS		A	B	C	D
Coste (Euros)		56.925.848	33.402.252	31.586.296	66.092.964
Criterios	Peso (%)				
1. Política regional y del ayuntamiento	10	9	12	8	12
2. Opinión ciudadana	10	11	2	12	12
3. Temas ambientales y de	8	12	10	11	11

⁵ El planteamiento del problema corresponde a un caso real en una ciudad de Europa Central, aunque los valores numéricos han sido cambiados por razones de confidencialidad.

⁶ Un problema como el planteado se denomina '*primal*'. Cuando éste se resuelve por el algoritmo del Simplex se generan a su vez los valores que corresponden a una matriz traspuesta, es decir aquella que tiene por columnas las filas del primal y por filas las columnas del primal, y que constituye el problema '*dual*' del anterior. La importancia radica en que los resultados del problema dual corresponden a las contribuciones marginales o '*precios sombra*' del problema primal e indican en consecuencia cuanto varía el objetivo para una variación unitaria de cada restricción. Obviamente, la restricción que provoca la mayor variación positiva o negativa del objetivo es la que tiene la mayor importancia, y lo mismo sucede con los otros valores para las mismas lo que permite aquilatar la importancia o peso de cada criterio o restricción.

paisajismo					
4. Temas económicos	2	9	6	14	6
5. Volumen de tránsito	9	6	9	15	7
6. Flujo de tránsito	10	17	20	13	12
7. Seguridad en el tránsito	5	9	10	10	10
8. Tránsito urbano	2	15	12	11	12
9. Tránsito regional	2	9	10	10	8
10. Beneficios económicos directos	6	7	11	11	9
11. Beneficios económicos indirectos	11	5	20	10	6
12. Calidad del aire	5	8	7	5	9
13. Generación de ruido	15	11	3	9	11
14. Ecología	5	10	20	5	4

A fin de trabajar con valores homogéneos, ya que no todas las filas tienen las mismas unidades de medida, es siempre conveniente normalizar los valores de la Tabla 1, para lo cual los valores de cada fila se dividen por el máximo valor de esa fila, y así se obtiene la Tabla 2.⁷

Tabla 2 Valores normalizados de la Tabla 1

Criterios	ALTERNATIVAS			
	A	B	C	D
1. Política regional y del ayuntamiento	0,75	1,00	0,67	1,00
2. Opinión ciudadana	0,92	0,17	1,00	1,00
3. Temas ambientales y de paisajismo	1,00	0,83	0,92	0,92
4. Temas económicos	0,64	0,43	1,00	0,43
5. Volumen de tránsito	0,40	0,60	1,00	0,47
6. Flujo de tránsito	0,85	1,00	0,65	0,60
7. Seguridad en el tránsito	0,90	1,00	1,00	1,00
8. Tránsito urbano	1,00	0,80	0,73	0,80
9. Tránsito regional	0,90	1,00	1,00	0,80
10. Beneficios económicos directos	0,64	1,00	1,00	0,82
11. Beneficios económicos indirectos	0,25	1,00	0,50	0,30
12. Calidad del aire	0,89	0,78	0,56	1,00
13. Generación de ruido	1,00	0,27	0,82	1,00
14. Ecología	0,50	1,00	0,25	0,20

⁷ Se puede usar este método o cualquier otro para normalizar, como por ejemplo, dividir cada valor por la suma de todos los valores de la fila correspondiente

La Tabla 3, construida a partir de la Tabla 2, y de acuerdo al peso asignado a cada criterio, muestra el planteamiento matemático del problema. Cada fila representa una inecuación formada con los valores de cada alternativa, que a su vez equivalen a las incógnitas del problema. El signo de la derecha indica matemáticamente lo que se desea que se cumpla con cada criterio en relación a un cierto umbral o límite, que puede ser superior o inferior. Así, en el primer criterio, ya que se trata de una política del ayuntamiento, lo que interesa es que ésta se cumpla en el mayor grado posible, pero como existe un límite superior, esta aspiración está restringida por ese límite, y entonces el signo '<' indica que el máximo valor que puede alcanzar este criterio es de 10. Es decir, puede tomar menores valores, pero no mayores de 10.

En otro criterio tal como el 13, '*Generación de ruido*', como el ruido es algo indeseable, lo que se pretende es que éste sea lo menor posible - lo ideal sería cero - pero esa aspiración no es realista porque ruido habrá siempre; por lo tanto, esta pretensión está limitada por un límite inferior y en consecuencia debe estar por arriba del mismo, pero no por debajo, y ello se indica con el signo '>' que indica que hay que partir de un límite mínimo.

Otro criterio, tal como el número 15, es solo un artificio de cálculo para indicarle al modelo que todas las alternativas deben ser consideradas, pero sólo una elegida.

Este último criterio provocara resultados fraccionarios para cada alternativa, siendo la mejor solución aquella correspondiente al valor más alto. Asimismo, puede necesitarse un resultado en números enteros, o también en binarios, es decir '1' o sea el equivalente a realizar, o '0', el equivalente a no realizar, y ello se logra muy fácilmente indicando al modelo tal circunstancia según corresponda. Además, en algunos problemas la realización de una alternativa determinada, por ejemplo la ejecución de obras de alcantarillado de aguas pluviales en una avenida y el posterior pavimentado de la misma avenida, implica no sólo que ambos proyectos están relacionados, es decir, de realizarse uno debe llevarse a cabo el otro, sino que además deber haber una secuencia evidente, ya que lógicamente no se pavimenta primero la avenida, y luego se destruye para excavar y ejecutar el alcantarillado. Estas dos restricciones se agregan muy fácilmente al modelo de Solver.

Los valores de la columna 'Resultados del cálculo' los genera el modelo al resolver el problema. Es de hacer notar que todos los datos se colocan en la hoja de cálculo Excel. De ahí Solver toma los datos que necesita, los procesa, y devuelve el resultado en la fila de Excel que el usuario especifique.

Tabla 3 Planteamiento matemático del problema

ALTERNATIVAS	A	B	C	D	Resultados del cálculo	Sentido	Requerimientos
1. Política regional y del ayuntamiento	7,5	10,0	6,7	10,0	9,3	<	10,0
2. Opinión ciudadana	9,2	1,7	10,0	10,0	1,8	<	10,0
3. Temas ambientales y de paisajismo	8,0	6,7	7,3	7,3	6,3	<	8,0
4. Temas económicos	1,3	0,9	2,0	0,9	0,8	<	2,0
5. Volumen de tránsito	3,6	5,4	9,0	4,2	5,2	<	9,0
6. Flujo de tránsito	8,5	10,0	6,5	6,0	9,3	<	10,0

7. Seguridad en el tránsito	4,5	5,0	5,0	5,0	4,7	<	5,0
8. Tránsito urbano	2,0	1,6	1,5	1,6	1,5	>	1,5
9. Tránsito regional	1,8	2,0	2,0	1,6	1,9	>	1,6
10. Beneficios económicos directos	3,8	6,0	6,0	4,9	5,6	<	6,0
11. Beneficios económicos indirectos	2,8	11,0	5,5	3,3	10,2	<	11,0
12. Calidad del aire	4,4	3,9	2,8	5,0	3,6	<	5,0
13. Generación de ruido	15,0	4,1	12,3	15,0	4,1	>	4,1
14. Ecología	2,5	5,0	1,3	1,0	4,6	<	5,0
Suma de valores ambientales ponderados	74,9	73,2	77,8	75,8			
15. Selección de sólo una alternativa	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	=	1,0

Se ha elegido en este caso trabajar con 11 objetivos, y se comienza por ejemplo eligiendo como primer objetivo el coste total del proyecto que, lógicamente, se quiere minimizar. Se ejecuta Solver y éste devuelve el resultado, indicando que para ese objetivo la preferida es la alternativa B (0,91), seguida de lejos por la C (0,03) como se muestra en la Tabla 4. A pesar de que el objetivo es de minimizar costes, el modelo no ha elegido la alternativa más económica que es la C, sino la B que es más cara. ¿Por qué? Porque ha tenido también en cuenta los otros 14 criterios y ha elegido entonces la alternativa que mejor se adapta a todos ellos. Este resultado es óptimo, es decir no puede ser mejorado, y ésta es una de las principales ventajas de la PL lineal, claro que es sólo válida cuando se analiza con un solo objetivo como en este caso.

A continuación se extrae el criterio número 1 '*Política regional y del ayuntamiento*' y se ejecuta nuevamente Solver, que arroja como resultado los valores que se consignan en la fila 2 de la Tabla 4. En este caso, la alternativa B (0,69) es la favorita seguida por la D (0,31). Se reemplaza este objetivo en el conjunto de criterios y se elige por ejemplo el número 2 '*Opinión ciudadana*' a maximizar, que se carga en el Solver y se ejecuta éste, proporcionando el resultado de la fila 3 de la Tabla 4. De acuerdo a este objetivo la mejor es la alternativa A (0,36), seguida por la D (0,35), la C (0,31) y como último la B (0,01).

Se reemplaza este objetivo en el conjunto de restricciones, se elige otra y se vuelve a repetir el procedimiento, hasta completar todos los objetivos que se deseen.

Tabla 4 Valores óptimos encontrados para las alternativas mediante el empleo de diferentes objetivos en forma secuencial

ALTERNATIVAS	A	B	C	D
Funciones objetivo aplicadas en orden secuencial				
Mínimos costes		0,91	0,03	
Política regional y del ayuntamiento		0,69		0,31
Opinión ciudadana	0,36	0,01	0,31	0,35
Temas ambientales y de paisajismo	0,48	0,01	0,78	-0,22

Temas económicos	0,05	0,001	0,95	
Tránsito urbano			0,75	0,25
Tránsito regional				1,00
Calidad de aire				1,00
Beneficios económicos directos		0,99	0,001	
Generación de ruido		0,99	0,001	
Ecología	0,001	0,99		

Hay que normalizar ahora cada fila de estos valores para tener valores homogéneos y ello conduce a obtener la Tabla 5. Una vez efectuada la normalización, se suman los valores de cada columna y esta suma representa la importancia de cada alternativa (Ver fila (X)). El análisis de esta fila informa que la mejor alternativa es la B (4,68), seguida por la C (3,63). Sin embargo, falta un paso más, porque puede suceder que una alternativa tenga un valor muy alto en uno o dos criterios y cero en los demás, es decir participa en pocos criterios pero con valores muy altos, y en consecuencia no es muy representativa del problema. Por esa causa se determina un factor de participación que es el cociente entre la cantidad de criterios en los que participa cada alternativa por el total de criterios. Así, para la alternativa C, por ejemplo que participa en 7 criterios, el factor es $7/11 = 0,64$ (Fila Y).

Tabla 5 Valores normalizados de cada fila y resultado final

ALTERNATIVAS	A	B	C	D
Funciones objetivo aplicadas en orden secuencial				
Mínimos costes		0,97	0,03	
Política regional y del ayuntamiento		0,68		0,31
Opinión ciudadana	0,53	0,01	0,46	0,56
Temas ambientales y de paisajismo	0,87	0,02	1,38	-0,39
Temas económicos	0,05	0,001	0,99	
Tránsito urbano			0,75	0,25
Tránsito regional				1,00
Calidad de aire		0,99	0,001	
Beneficios económicos directos				1,00
Generación de ruido	0,001	1,00		
Ecología		0,999	0,001	
<i>(X) Suma de los valores de cada columna</i>	1,43	4,68	3,63	2,69
<i>(Y) Factor de participación de cada alternativa sobre el total de criterios</i>	0,36	0,82	0,64	0,54
<i>(Z) Valor normalizado del factor de participación por la suma de los valores de cada columna</i>	0,22	1,62	0,98	0,62

Como último paso se normalizan los valores de esta fila (Y) dividiendo cada valor de la misma por 2,36 que es la suma de los valores de (Y) y finalmente se obtiene las filas (Z) que es este valor normalizado multiplicado por cada valor correspondiente de la fila (X).

El resultado de la última fila muestra que la mejor alternativa es la (B), seguida por la (C), luego por la (D) y finalmente por la (A). O sea, el ordenamiento es:

B - C - D - A

5. Resultados

El resultado alcanzado demuestra una clara preferencia por la alternativa B, seguida, aunque no muy cerca, por la alternativa C. Es interesante destacar que operando el modelo como PL monoobjetivo - usando en este caso como función objetivo los costes de cada alternativa - el resultado hubiera sido nuevamente desarrollar la alternativa B, tal como se demuestra en la primera fila de la Tabla 5. En ambos casos se emplea el mismo algoritmo, aunque el procedimiento sea distinto; pero ello no significa que necesariamente estos resultados deban coincidir - como en este caso - que puede ser debido a una coincidencia. Ello se debe a que hay que considerar un aspecto fundamental y que es que la PL monoobjetivo garantiza que, para un objetivo determinado, la solución es la óptima, es decir no puede mejorarse, y eso no ocurre con Simus que ofrece sólo una solución de compromiso, pero que provee en cambio una herramienta de análisis, como se verá a continuación.

Observando la Tabla 5 se verifica que:

1. La alternativa B es la que mejor cumple con las acciones (es decir Maximizar y Minimizar) para 5 de los 11 objetivos, en tanto que la alternativa C solo cumple con 3 de los 11 objetivos. Por ejemplo, si se trata de minimizar los costes, la alternativa que más influencia tiene para ello es la B, ya que ofrece el mayor valor. En forma similar, si se trata de maximizar los temas económicos, la alternativa que mayor influencia tiene es la B, con su valor más alto.
2. La alternativa B es la que mayor significación alcanza cuando se suman los valores de su columna - aun normalizados -aunque disminuye su diferencia con respecto a la alternativa C.
3. La alternativa B participa con valores en 8 de los 11 objetivos, lo que está indicando que es la alternativa que tiene presencia en el 73% de los objetivos, cuando la alternativa que le sigue, la C participa en 7 de los 11 objetivos, o sea en un 64%.

Cuando se consideran estos tres factores, no es de extrañar por lo tanto que el modelo escoja la alternativa B seguida por la C. Se comprende entonces que lo más importante de la Tabla 5 es que muestra en forma clara los diversos componentes de los guarismos finales para cada alternativa, lo cual puede ser de gran ayuda al decisor.

6. Conclusiones

Se analizó brevemente la necesidad de contar con una herramienta que sea capaz de ayudar al decisor en la elección de la alternativa adecuada, y mencionado que existen técnicas para el análisis de decisión pero que no son aptas para problemas complejos. Se ha bosquejado el modelo Simus que, aprovechando las grandes ventajas de optimización mono objetivo de la programación lineal, permite analizar proyectos con cualquier cantidad de objetivos. El funcionamiento de Simus se ha aplicado en un ejemplo un poco complejo, con 4 alternativas, 14 criterios y 11 objetivos diferentes algunos que pedían una maximización y otros una minimización. La aplicación del software Solver permitió llegar a una solución, que quizás no sea la óptima (aunque eso no se puede saber), pero que tiene la gran cualidad de trabajar con valores objetivos, que constituye una gran ventaja respecto a otros modelos basados en apreciaciones subjetivas, y por ende discutible y a veces irrepetibles.

En conclusión, partiendo de la base de que la elección de criterios, común a todas las metodologías es en gran parte subjetiva, la PL no presenta ningún otro tipo de subjetividades, es decir, no hay pesos que asignar a los criterios (a no ser que sean específicamente demandados por el decisor como en este ejemplo), no hay comparaciones subjetivas que llevar a cabo como en AHP, no existen funciones de transferencia como en Promethee, ni valores subjetivos de umbrales de indiferencia o de preferencia. Por tal motivo, se considera que la PL es más fiable que otros modelos para la toma de decisiones.

A esta ventaja se le agrega la posibilidad de poder modelizar problemas extremadamente complejos como son por ejemplo los análisis para el aprovechamiento de las aguas de un río y sus afluentes, lo que resulta imposible con otros métodos.

Referencias

- AALBORG+10. Inspiring Futures (n.d.). Obtenido el Marzo 29, 2010, de <http://www.aalborgplus10.dk/media/finaldraftaalborgcommitments.pdf>
- Aragónés, P. (2008). *Análisis Multicriterio de Decisiones. Métodos Promethee*. Apuntes de clase. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Brans, J., & Vincke, Ph. (1985). A preference ranking organization method: The PROMETHEE method. *Management Science*, 31, 647-656.
- Charnes, A., & Cooper, W. (1961). *Management models and industrial applications of linear programming*. New York, NY: John Wiley and Sons.
- Dantzig, G. (1948). *Linear Programming and Extensions*. New Jersey, NJ: Princeton University Press.
- Dorfman, R., Samuelson, P., & Solow, R. (1958). *Linear Programming and Economic Analysis*. New York, NY: McGraw Hill Book Company.
- Faulin, J. J. *Aplicaciones de la Programación Lineal*. Barcelona, España: Universitat Oberta de Catalunya.
- Jaramillo, P., Smith, R., & Andreu, J. (2002). Ecuador: un método integral para la decisión con múltiples objetivos. *Ingeniería del agua*, 9, 143-156.
- Lootsma, F.A. (1992). The French and the American school in multi-criteria decision analysis. En A. Goicoechea, L. Duckstein, & S. Zionts (Ed.) *Multiple Criteria Decision Making: Proceedings of the Ninth International Conference: Theory and Applications in Business, Industry, and Government* (págs. 253-267). Fairfax, Virginia: Springer-Verlag.
- Matsushashi, K. (1997). *Application of Multi-Criteria Analysis to Urban Land-Use Planning*. Interim Report. IR-97-091/December. International Institute for Applied Systems Analysis • A-2361. Laxenburg, Austria.
- Morais, D., & Almeida, A. (2006). *Water supply system decision making using multicriteria analysis*. Brazil: Federal University of Pernambuco.
- Munda, G. (2004). Métodos y Procesos Multicriterio para la Evaluación Social de las Políticas Públicas. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 1, 31-45.
- Munier, N. (2010). *A Strategy for using Multicriteria Analysis in Decision-Making*. In Press.
- Nijkamp P. & Spronk, J. (1978). *Interactive Multiple Goal Programming, Research Memorandum 3*. Department of economics Free University. Amsterdam.
- Pitz, G., & McKillip, J. (1984). *Decision analysis for program evaluators*. Newbury Park, CA: Sage.

- Ríos, S. (1988). *Investigación operativa. Optimización*. Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces. S.A.
- Romero, C, & Rehman, T. (1986). La programación multiobjetivo y la planificación agraria: Algunas consideraciones teóricas. *Agricultura y sociedad*, 40, 9-35.
- Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples: Le méthode ELECTRE. *Revue Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle*, 8, 57–75.
- Steuer, R. (1986). *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*. New York, NY: John Wiley.
- Sturla, R. (2000). *Programacion Lineal Entera*. Argentina : Apuntes de la UTN.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York, NY: McGraw-Hill.

Correspondencia (Para más información contacte con):

María José Bastante-Ceca
Phone: +34 96 387 70 00 Ext. 75685
Fax: +34 96 387 98 69
E-mail : mabasce1@dpi.upv.es
URL : www.dpi.upv.es/id&ea