

INVESTIGACIÓN OPERATIVA Y EL MEDIOAMBIENTE

Felipe Caro.

Ph.D. in Operations Management,
Massachusetts Institute of Technology (MIT).
Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad de Chile

¿INVESTIGACIÓN OPERATIVA?

El presente artículo pretende mostrar algunas de las posibles contribuciones que puede hacer la investigación operativa al cuidado y protección del medioambiente. Dado que se trata de una disciplina que muchas veces pasa desapercibida, corresponde dar una breve introducción para entender de qué se está hablando. Lamentablemente, no existe una definición de investigación operativa que sea completamente satisfactoria (tal vez ello explica porque pasa desapercibida). El slogan que el Instituto de Investigación Operativa de los Estados Unidos estrenó recientemente es: "the science of better". Una traducción aproximada sería "la ciencia de mejorar". Una definición más completa diría que es "una disciplina que usa métodos analíticos avanzados para ayudar a tomar mejores decisiones". El lector interesado puede revisar el sitio www.orchampions.org dedicado a promocionar la disciplina, pero para efectos de este artículo, la definición anterior es suficiente para entender los casos descritos más adelante.

Dentro de los "métodos analíticos avanzados" que son parte de la investigación operativa destacan los modelos matemáticos de optimización. Estos abstraen un sistema complejo del mundo real en términos de relaciones matemáticas y después buscan el valor óptimo para determinadas variables que representan decisiones. Se puede decir que los modelos matemáticos cumplen el rol que tienen los laboratorios en las ciencias biológicas porque finalmente sirven para realizar experimentos, validar hipótesis y sacar conclusiones que se traducen en mejores decisiones.

El uso de la investigación operativa para fines medioambientales ha generado un creciente interés en los últimos años. Varias de las revistas científicas del área han dedicado números enteros al tema ambiental. Entre ellos están *Interfaces* 2000 vol. 30(3) y 2003 vol. 33(4), *European Journal of Operational Research* 1997 vol. 102(2) y 2000 vol. 121(2), y *Production and Operations Management* 2001 vol. 10(2) y 2003 vol. 12(3). Dentro de todo aquello que ha sido publicado, hemos escogido dos artículos que serán descritos a continuación, y que dan una buena idea sobre cómo la investigación operativa puede contribuir al manejo sustentable del medioambiente.

EL CASO CERESTAR

El primer artículo corresponde al trabajo de los profesores Kumar Rajaram y Charles Corbett de la Universidad de California en Los Angeles (UCLA); fue publicado en la revista internacional más prestigiosa de investigación operativa¹, y corresponde a un proyecto llevado a cabo durante un período de cinco años en la empresa europea Cerestar.

Cerestar es el mayor productor europeo de almidón y derivados vegetales (como glucosa y fructosa) usados en la industria farmacéutica y de alimentos. La obtención del almidón a partir del trigo requiere miles de metros cúbicos de agua pura, que al final del proceso productivo contienen una considerable cantidad de desechos contaminantes. Una nueva legislación medioambiental promulgada por el gobierno holandés en 1993 estableció una drástica reducción en la fracción de residuos permitida en los desagües de las plantas industriales. Se esperaba que las industrias cumplieran con este nuevo estándar, antes de enero del 2000.

Con el propósito de cumplir con el nuevo marco legal, Cerestar realizó un estudio que concluyó que los nuevos estándares se podían alcanzar de dos maneras. La primera opción era expandir la planta de tratamiento de aguas servidas, un proyecto con un costo estimado de US\$ 100 millones, y la otra opción era disminuir en un 30% la descarga en la planta actual. En términos de costo, la última alternativa era mucho más atractiva sólo si la requerida disminución de flujo no significaba que el tratamiento de aguas pasaría a ser el cuello de botella del proceso productivo. Dado que Cerestar contaba con cinco años para implementar una solución (y si era necesario, la ampliación de la planta de tratamiento sólo tomaría un año), decidieron estudiar la factibilidad de reducir la descarga de aguas servidas.

El trabajo de los profesores de UCLA consistió en elaborar un modelo de optimización matemático que fue usado de manera iterativa para así simplificar el proceso productivo, principalmente removiendo (re)flujos innecesarios. En términos generales, la metodología consistió en los siguientes pasos: (1) Formular la configuración actual como un modelo no-lineal de flujos. La no-linealidad viene de las funciones de transformación y consumo de recursos que dependen del modo

de operación, y que deben ser estimadas empíricamente. (2) Determinar el flujo óptimo dado la configuración actual. (3) A partir de la solución óptima, introducir cambios en la configuración del proceso y volver al paso (1). La solución óptima del modelo matemático permite identificar flujos que son irrelevantes y los cuellos de botella. Luego el tercer paso involucra modificaciones físicas como remover tubería o reasignar capacidad.

Dada la complejidad del proceso productivo, cada iteración de la metodología anterior demoraba entre seis meses a un año. Sin embargo, al cabo del plazo de los cinco años los beneficios económicos y medioambientales fueron sustanciales. El consumo de energía y agua pura fue reducido en un 30% y 50% respectivamente, y en términos de costos, el ahorro anual fue de US\$ 3 millones. La gerencia de Cerestar también adquirió un mejor entendimiento de los factores que determinan el desempeño global de la producción. Y finalmente, lo más importante, la disminución en el consumo de agua pura permitió cumplir con las nuevas normas de aguas servidas sin tener que invertir US\$ 100 millones en la expansión de de la planta de tratamiento.

EL PROYECTO FONDEF 1020

El segundo artículo² corresponde a uno de los resultados del proyecto Fondef 1020 que reunió a académicos universitarios y empresas forestales en torno al tema medioambiental. El proyecto fue encabezado por el profesor Andrés Weintraub de la Universidad de Chile, y el artículo es un extracto de la tesis de Ingeniería Industrial de quien escribe.

El proyecto Fondef 1020 tuvo dos etapas. En la primera etapa se identificaron los principales impactos medioambientales asociados a la actividad forestal y posibles medidas para mitigarlos. En la segunda etapa el objetivo fue estimar el costo de implementar dichas medidas. La estimación se hizo mediante modelos matemáticos de optimización.

Actualmente, el uso de modelos de optimización es una práctica habitual en las empresas forestales chilenas. Diferentes modelos han sido desarrollados dependiendo del horizonte de evaluación y el nivel jerárquico de las decisiones. En particular, la evaluación descrita en el artículo fue hecha usando el modelo OPTIMED, que es utilizado por la empresa Forestal Millalemu en su planificación a nivel táctico (i.e. de 2 a 5 años). Dentro de las decisiones incluidas en el modelo están: los caminos de acceso a construir, los rodales a explotar cada período, el uso de la maquinaria de cosecha y las canchas de acopio, y el flujo a los centros de demanda.

El modelo OPTIMED busca maximizar el valor presente neto (VPN) de la producción forestal, pero fue modificado de manera de incorporar las siguientes medidas de mitigación medioambiental:

R1: Evitar cosechas en suelos que presentan una pendiente muy fuerte, un tipo de suelo frágil, o alto nivel de precipitaciones, junto con utilizar torres de madereo en terrenos medianamente frágiles.

R2: Dejar fajas de plantaciones (de 20-50 metros) a orilla de caminos públicos, para no causar alteraciones en la belleza escénica.

R3: Dejar fajas de plantaciones (de 15-30 metros) a lo largo de los cursos de agua con el fin de disminuir la contaminación y sedimentación de las aguas.

R4: Favorecer la cosecha en la época de menor precipitación con el fin de aminorar la degradación del suelo.

La evaluación se hizo en los meses de invierno de 1998 utilizando el total de la superficie en oferta de la Forestal Millalemu con un horizonte de 2,5 años (aproximadamente 4.316 hectáreas). El impacto de las medidas individuales, junto con algunas combinaciones, se presentan en la Tabla Nro 1. Si todas las medidas son implementadas (escenario R1234), entonces la disminución del VPN es de aproximadamente un 12%. Este sería el 'costo' para la empresa de tener un mayor compromiso medioambiental. Notar que el modelo entrega soluciones optimizadas, de otra forma el costo sería mayor. Otra observación importante es que las medidas que más contribuyen a la disminución del VPN son las fajas a lo largo de los cursos de agua y favorecer la cosecha en verano (ver escenario R34). En el respectivo artículo se puede encontrar un análisis de sensibilidad de las medidas anteriores junto con la evaluación de otros posibles escenarios.

Tabla N° 1: Comparación de los diferentes escenarios

	R1	R2	R3	R4	R13	R14	R34	R1234
Variación VPN (%)	-3	-0,4	-3	-6,8	-6,6	-7,3	-10	-11,8

CONCLUSIONES

Mediante dos ejemplos particulares hemos ilustrado el aporte que los modelos de la investigación operativa pueden hacer al exigente manejo medioambiental requerido en el mundo actual. El primer caso muestra cómo el rediseño de procesos mediante modelos matemáticos puede reemplazar costosas inversiones en infraestructura. El segundo caso es un ejemplo extraído de la realidad chilena que muestra el costo que tendría para el sector privado la implementación de ciertas medidas medioambientales. En este caso, el modelo matemático permite determinar cuándo y cuáles medidas tienen un mayor impacto, y podría servir como una herramienta cuantitativa a la hora de discutir una ley medioambiental para el sector forestal. Lamentablemente tal discusión aún está pendiente. ■

1 Rajaram, K. and C.J. Corbett. 2002. Achieving environmental and productivity improvements through model-based process design. *Operations Research*. 50(2) pp. 751-763.

2 Caro F., R. Andalaft, X. Silva, A. Weintraub, P. Sapunar, and M. Cabello. 2003. Evaluating the economic cost of environmental measures in plantation harvesting through the use of mathematical models. *Production & Operations Management*. 12(3) pp. 290-306.