



UNIVERSIDAD DE BURGOS

JOAQUÍN A. PACHECO BONROSTRO

Catedrático de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa

LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA:
EL PAPEL DE LAS MATEMÁTICAS
EN LA TOMA DE DECISIONES.
APLICACIONES SOCIALES,
HUMANITARIAS Y SANITARIAS.

LECCIÓN INAUGURAL DEL CURSO ACADÉMICO 2015-2016

BURGOS

2015

Edita: UNIVERSIDAD DE BURGOS. SECRETARÍA GENERAL

SERVICIO DE PUBLICACIONES E IMAGEN INSTITUCIONAL
Edificio de Administración y Servicios
C/ Don Juan de Austria, 1
09001 Burgos - España

Depósito legal: BU.- 202 - 2015
Imprime: RICO ADRADOS S.L.

Al señor Agustín, un maño tozudo que se empeñó en enseñarme matemáticas desde pequeño

A Daria y Alexandra, el mejor regalo de Reyes Magos

Agradecimientos

En primer lugar quería agradecer al decano de mi facultad, el doctor Carlos Larrinaga, y al resto del equipo decanal por haber tenido la deferencia y la gentileza de proponerme para dar esta lección inaugural.

También quería agradecer a las personas que me han ayudado en la confección de la misma en algunos de sus partes: Laureano Escudero, Julián Molina, Cristina Azcárate, Francisco Angel-Bello, Ada Álvarez, Manuel Laguna, Rafael Caballero y Rafa Martí entre otros.

Índice

Motivación	11
1 INTRODUCCIÓN. APROXIMACIÓN A LA IDEA DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA.....	12
2. ORIGEN HISTÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA.....	13
3. LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA EN ESPAÑA.....	16
4. OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA.....	18
5. ENFOQUE MULTIOBJETIVO	25
6. RELACIONES ENTRE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA Y LA MINERÍA DE DATOS.....	29
7. APLICACIONES EN TRANSPORTE PÚBLICO	34
7.1 Vinculaciones con los retos sociales del programa Horizonte 2020	34
7.2 Diferentes aplicaciones recientes	35
8. APLICACIONES EN LOGÍSTICA HUMANITARIA.....	40
9. APLICACIONES SANITARIAS Y MÉDICAS	46
9.1 Planificación, distribución y gestión de recursos sanitarios.....	46
9.2 Dimensionamiento y organización de los servicios médicos.....	47
9.3 Recursos humanos.....	49
9.4 Servicios sanitarios en países en vías de desarrollo	51
9.5 Problemas relacionados con la cadena de suministro de productos médicos a los centros sanitarios.....	52
9.6 Eficiencia sanitaria	52
9.7 Estudios para la prevención y tratamiento de enfermedades y otras aplicaciones clínicas	53
10. APLICACIONES EN BIOINFORMÁTICA	54
Referencias Bibliográficas.....	57

Lección

MOTIVACIÓN

He querido aprovechar esta lección para ayudar a conocer mejor la Investigación Operativa, la especialidad que elegí tanto en la licenciatura de Matemáticas como posteriormente en el doctorado. También ha sido el campo donde he desarrollado mi actividad investigadora posterior.

Las tres primeras secciones de esta lección son introductorias: definimos brevemente lo que es esta disciplina así como sus características más relevantes, sus orígenes históricos y su desarrollo en España.

Las tres siguientes secciones hablamos sobre algunos puntos dentro esta disciplina que entendemos muy relevantes y que pueden ayudar a entender las aplicaciones posteriores. Concretamente estos puntos son la optimización heurística, la optimización o enfoque multi-objetivo y las relaciones entre la Investigación Operativa y la Minería de Datos.

Finalmente en las cuatro últimas secciones describimos algunas de las aplicaciones prácticas y reales que ha tenido la investigación operativa. Concretamente tratamos aplicaciones en los siguientes campos: transporte público, logística humanitaria, sanidad y bioinformática.

En definitiva quiero llamar la atención sobre el carácter práctico de esta disciplina, su transversalidad y su potencial para ayudar a tomar decisiones que mejoren la vida de las personas, a través de diferentes enfoques, modelos y métodos.

Antes de empezar quisiera pedir disculpas por algunas imprecisiones que pudiera haber en algunos en algunas definiciones y descripciones de esta lección. Dado el carácter divulgativo de la misma he preferido sacrificar la precisión y la rigurosidad por un mejor y más rápido entendimiento de las ideas esenciales.

1. INTRODUCCIÓN. APROXIMACIÓN A LA IDEA DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA

La Investigación Operativa (IO, abreviadamente) es una disciplina cuya mayor razón de ser consiste en ayudar al empresario o al administrador público en la toma de buenas decisiones en su correspondiente entorno operativo, y ello se hace mediante la aplicación del método científico. De ahí el incuestionable valor social de la IO, más allá de su interés científico. Así, por ejemplo, la IO se ocupa de estudiar de forma científica la logística del transporte, la producción, la compra de materiales, la gestión de stocks, las políticas de recursos humanos y de inversiones, entre muchas otras actividades. Mediante la elaboración de modelos matemáticos adecuados, se muestran las posibles alternativas de que dispone el decisor, de forma que pueda elegir una entre ellas que produzca resultados óptimos, o por lo menos satisfactorios, y de acuerdo con uno o varios criterios de utilidad.

Como se analiza en Escudero (2009) la IO se ha desarrollado de forma distinta en cada país, adaptándose a sus peculiares circunstancias y a las características de sus respectivas industrias. Por ejemplo, en EEUU, Canadá y Europa, el sector de los transportes funcionaría de forma muy distinta sin el uso de los métodos de IO que se aplican hoy en día. Es así como las grandes compañías de aviación comercial utilizan las herramientas suministradas por la IO para planificar y coordinar sus recursos, tales como tripulaciones, mantenimiento de los aviones, las escalas a realizar, la planificación de los vuelos, etc. Es evidente, pues, que las aplicaciones de la IO que se han realizado en el área de los transportes han tenido espectaculares repercusiones.

Es indiscutible que la IO es una disciplina con objetivos propios, bien definidos, y que se recogen en cualquiera de las múltiples definiciones que de la IO se han dado a lo largo de su historia, pero todas estas definiciones tienen en común la afirmación de que la IO aplica el método científico a la resolución de problemas reales, previa modelización de los mismos, y no es menos obvio que la herramienta fundamental del método científico son las Matemáticas (Escudero and Lopez, 2012).

Los campos que abarca la investigación operativa son amplios y diversos, No obstante quizás los más destacados son los siguientes: programación lineal y no lineal, programación mixta 0-1, programación combinatoria, programación estocástica, programación con incertidumbre, optimización robusta, teoría de juegos, reconocimiento de patrones, teoría de colas, simulación, fiabilidad, optimización heurística y programación multiobjetivo.

En definitiva la investigación operativa se puede definir como la disciplina que trata de dotar de rigor científico el proceso de toma de decisiones. Además podemos apuntar dos características importantes:

- **Multidisciplinaridad:** desde sus orígenes los equipos de IO han estado formados por personas de diferente formación (matemáticos, informáticos, economistas, ingenieros, etc). Por supuesto también deben incluir las personas de los campos relacionados con los problemas que se tienen que tratar y con relación o responsabilidad en las entidades implicadas (expertos en logística, gestores de centros hospitalarios, gestores de transporte, etc.) Estos precisamente son los que nos van a ayudar a modelizar el problema, a indicarnos cuales son las variables de decisión, que restricciones son realmente significativas, como se formulan o cuantifican a través de funciones los diferentes objetivos que se quieren optimizar, etc.
- **Transversalidad:** la IO puede ser aplicada a cualquier campo donde se pueda plantear un problema de toma de decisiones, generalmente a través de la optimización de uno o varios objetivos. Entre los campos donde se ha aplicado destaca el transporte y rutas en todos sus variantes (público, privado, de personas, de mercancías, de residuos, trenes, aviones, vehículos terrestres, intermodal, etc.), logística, construcción de edificios, automoción, sanidad y medicina, ingeniería industrial, educación, gestión aeroportuaria, planificación laboral, distribución energética y telecomunicaciones entre otros.

2. ORIGEN HISTÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA

Aunque hay antecedentes previos remarcables, se puede considerar que la Investigación Operativa, como la conocemos hoy en día, nació durante la Segunda Guerra Mundial en el ámbito militar, con especial protagonismo estadounidense. Según se explica con detalle en Newman (1956) y Churchman (1957) después de 1939 la Alemania Nazi parecía imparable. Con una eficacia impecable los Alemanes controlaban la mayor parte de la Europa continental; la Wehrmach, y la Luftwaffe dominaban la tierra y el aire, y los aliados estaban en serios problemas. Las Operaciones Militares llevadas a cabo eran de una enorme dificultad logística, se movían gran cantidad de tropas, que tenían que ser colocadas estratégicamente considerando no solo criterios puramente militares sino también de abastecimiento. Grandes cantidades de soldados tenían que ser movilizados de forma óptima en la contienda, de forma que estuvieran lo más cerca posible de los recursos, como agua, alimento o combustible, pero también que ocuparan el mejor lugar en términos estratégicos.

La situación requería tomar decisiones críticas de forma óptima, y para los aliados requirieron la ayuda de científicos de todas las áreas del conocimiento para que ayudaran en las tareas de planeación de las Operaciones Militares: Biólogos, Químicos, Físicos, Sociólogos, Psicólogos y Matemáticos entre otros para aplicar la metodología científica o como se llamó: para hacer “Investigación de Operaciones Militares”, que a la postre fue el origen del término Investigación Operativa o de Operaciones. De esta forma, la mayor parte de las técnicas que hoy en día conocemos como parte de la Investigación de Operaciones fueron desarrolladas y usadas en Operaciones Militares reales de la Segunda Guerra Mundial, desde la batalla del atlántico a la campaña del pacífico, desde el desarrollo de estrategia y táctica de los soldados en tierra, hasta la ubicación de submarinos alemanes en las aguas del atlántico. De hecho, un ejemplo paradigmático fue el desarrollo del radar, que algunos historiadores consideran el punto inicial de la investigación de operaciones. Al inicio de la Segunda Guerra Mundial, un pequeño grupo de investigadores militares, la Bawdsey Research Station, encabezados por A. P. Rowe, se interesó en el uso militar de un nuevo sistema de detección y advertencia prematura, denominado radar (Radio Detection And Ranging – Detección y medición de distancias mediante radio). Este sistema había sido desarrollado a partir de 1940 por un grupo de 20 investigadores, bajo la dirección de P. M. S. Blackett, de la Universidad de Mánchester, para estudiar el uso de un nuevo sistema antiaéreo controlado por radar y generalmente se acepta que la investigación de este grupo constituye el inicio de la investigación de operaciones.

Blackett y parte de su grupo participaron en 1941 en problemas de detección de barcos y de submarinos mediante un radar autotransportado. Este estudio condujo a que Blackett fuera nombrado director de Investigación de Operación Naval del Almirantazgo Británico. Posteriormente, la parte restante de su equipo pasó a ser el grupo de Investigación de Operaciones de la Plana de Investigación y Desarrollo de la Defensa Aérea, y luego se dividió de nuevo para formar el Grupo de Investigación de Operaciones del Ejército. Después de la guerra, los tres servicios tenían grupos de investigación de operaciones trabajando intensamente y a gran nivel.

Como curiosidad, cabe señalar que el radar pudo ser incluso clave en uno de los momentos más críticos de la Segunda Guerra Mundial, el ataque de Pearl Harbour. La mañana del 7 de diciembre de 1941, el teniente Tyler estaba a cargo del centro de información de radar de Fort Shafter, que en aquellas fechas era aún prácticamente experimental y dónde estaba siendo adiestrado en el uso del radar, un instrumento absolutamente novedoso. Esa mañana, justo en el momento de la parada para el desayuno y cambio de guardia, recibió un aviso de uno de sus operadores de radar, al norte de la isla, avisando de la presencia a 132 millas de lo que parecía un gran número de aviones acercándose a gran velocidad a la isla. “Don’t worry about it”,

le respondió el teniente, suponiendo que aquello no podía ser lo que era, un flota de más de 180 cazas y bombarderos japoneses. El teniente pensó que debían ser aviones propios y no dio por ello la alarma, con los resultados sobradamente conocidos.

Por otra parte, en 1942 la U-Bootswaffe alemana con su flota de submarinos U-Boot inició un bloqueo a Gran Bretaña atacando convoyes de barcos cargados de suministros procedentes de Estados Unidos e impidiendo que alcanzaran su destino. El Grupo de Investigación de Operaciones de Guerra Antisubmarina de Estados Unidos (ASWORG, Anti-Submarine Warfare Operations Research Group en inglés) realizó representaciones matemáticas de dichos convoyes, teniendo en cuenta una serie de restricciones y condiciones impuestas por la realidad, tales como la velocidad máxima a la que podían desplazarse los navíos, la cantidad de suministros que debían transportar, y el combustible necesario para alcanzar su destino. Aplicaron estos modelos también sobre los U-Boots: el tamaño de su flota, el alcance de los submarinos, sus torpedos, etc. Con base a esta información fueron capaces de modelar la guerra naval, y determinar si era mejor una estrategia basada en convoyes formados por un gran grupo de navíos de carga escoltados por muchos destructores, o por el contrario pequeños grupos más difíciles de localizar para el enemigo, e incluso la manera de causar un mayor daño a los submarinos U-Boot. Cuando la armada de los Estados Unidos de América puso en práctica esta estrategia, disminuyó de forma considerable la cantidad de barcos hundidos mientras se incrementaba la destrucción de submarinos alemanes (pasando del hundimiento de apenas una treintena al año a rondar los 250 anuales en 1943 y 1944).

Tras apreciar el alcance de ésta nueva disciplina, Inglaterra creó otros grupos de la misma índole para obtener resultados óptimos en la contienda. De la misma forma Estados Unidos, al unirse a la Guerra en 1942, tras el desastre de Pearl Harbour, comenzó a aplicar técnicas de Investigación de Operaciones militarmente, y unos años más tarde, en 1947, formó un grupo de trabajo dedicado a mejorar los procesos de planificación a gran escala: el proyecto SCOOP (Scientific Computation Of Optimum Programs). En dicho grupo se encontraba trabajando George Bernard Dantzig, quien desarrolló en 1947 el algoritmo del método Simplex, y que es quizá uno de los investigadores más importantes de IO. Cuando comenzó la Segunda Guerra Mundial, Dantzig interrumpió sus estudios en Berkeley para unirse a las Fuerza Aérea de los Estados Unidos como jefe de la Rama de Análisis de Combate de los Cuarteles Centrales Estadísticos, lo cual lo llevó a lidiar con operaciones logísticas de la cadena de abastecimiento y gestión de cientos de miles de ítems y personas. Este trabajo proporcionó los problemas del “mundo real” que la programación lineal vendría a resolver. George Dantzig se doctoró en Berkeley en 1946. Inicialmente iba a aceptar un puesto como profesor en Berkeley, pero fue persuadido por su esposa y

colegas del Pentágono para volver a las Fuerzas Aéreas como consejero matemático de la USAF. Fue ahí, en 1947 donde por primera vez presentó un problema de programación lineal, y propuso el Método Simplex para resolverlo.

En aquellos años las aplicaciones militares estadounidenses de la investigación operativa fueron numerosísimas y de gran importancia, no solo en términos puramente bélicos. En 1945, por ejemplo, George Joseph Stigler planteó el problema de la dieta, a raíz de la preocupación del ejército americano por asegurar unos requerimientos nutricionales básicos para sus tropas al menor coste posible. Se trataba de determinar la cantidad, entre 77 alimentos diferentes, que debería ingerir diariamente un hombre mediano de aproximadamente 70Kg de peso, de modo que las necesidades mínimas de nutrientes fuesen iguales a las recomendadas por el Consejo Nacional de Investigación norteamericano. El problema fue resuelto manualmente mediante un método heurístico con el cual se examinaron 510 diferentes posibilidades de combinación de alimentos, y cuya solución difería tan sólo unos céntimos de la solución aportada años más tarde por el método Simplex.

En definitiva, como reflexiona Taha (2004), lo que conocemos hoy como Investigación de Operaciones o Investigación Operativa tiene un origen fundamentalmente militar y se puede afirmar que nació durante la Segunda Guerra Mundial, en la que además jugó un papel clave.

3. LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA EN ESPAÑA

Hay muchas personas relevantes en el origen y desarrollo de la IO en España, pero todos los autores y entendidos sobre el tema coinciden en destacar como figura pionera y clave al Profesor Sixto Ríos García, quien asumió la presidencia de la Sociedad de Estadística e Investigación Operativa (SEIO) durante la V Reunión Nacional de Investigación Operativa celebrada en Madrid los días 28 al 30 de Abril de 1970. Las aportaciones del Prof. Ríos a la Estadística y a la IO fueron decisivas para su desarrollo en España, así como para la incorporación de esta disciplina a los planes de estudio de numerosas universidades españolas. Su figura y contribuciones científicas han sido glosadas por muchos autores tras su desaparición en Julio del 2008, como por ejemplo en Escribano Ródenas y Busto Caballero (2009).

En España, en relación con el impacto de la IO en la industria, las grandes empresas comenzaron a reconocer en aquellos años la importancia de la modelización y de la optimización de sus procesos de producción. Ello podía apreciarse a través de la presencia notoria de sus técnicos en los congresos de la SEIO, técnicos que pertenecían a gabinetes creados en el seno de la empresa para la aplicación de las téc-

nicas de IO. En los primeros años podemos citar, de forma no exhaustiva, a Campsa (ahora CLH), Repsol y Butano, Iberia, Altos Hornos de Vizcaya, Cepsa, Banco Popular, SEAT, IBM. También se crearon gabinetes de IO en la Administración Pública (donde pionera la Generalitat y después la siguieron diversos ministerios y CCAA), Renfe, Telefónica, y tantos otros pioneros que no podemos citar por las naturales limitaciones sobre la extensión de este artículo.

Entre los investigadores que dirigieron o asesoraron a estos grupos debemos citar a Paco Quintana, José Luís Gascó, Luis Yu Chuen-Tao, Josep Borrell, Sergio Barba-Romero, Daniel Villaba, Rafael Pro, Ramón Companys, Jaume Barceló, María Juana de Lucas, Antonio Vázquez Muñiz, Laureano Escudero, Josep M. Vegara, José María Giró y Juan Domínguez. Es sintomático que todas las personas mencionadas han tenido, antes o después, una gran actividad docente en los Dptos. de Estadística e IO (con este nombre o con nombres similares), y han ido creando equipos cuyos integrantes forman parte del nutrido colectivo de científicos españoles consagrados a la disciplina de la IO.

Es necesario destacar el trabajo de asesoramiento al sector eléctrico español en temas de IO, en particular a Red Eléctrica Española, Hidroeléctrica Española, Fecsa, Iberduero, Iberdrola, Endesa, Unión Eléctrica Fenosa (luego Gas Natural - Fenosa), Hidroeléctrica del Cantábrico, Unosa, OMEL, etc., de los departamentos de Estadística e IO e Ingeniería Eléctrica de las Escuelas y Universidades Politécnicas. Estos equipos han desarrollado algoritmos e implementado aplicaciones para una mejor utilización, tanto de los sistemas generadores de electricidad como de la redes de transmisión y distribución, primero en el sistema centralizado español y posteriormente en el mercado eléctrico. Estas aplicaciones de la IO se han transferido con éxito a varios países latinomaericanos y europeos.

A continuación se describen las principales líneas de investigación de los principales grupos de IO en España, algunas de carácter teórico, y otras más enfocadas al diseño de modelos y algoritmos para aplicaciones reales. En cualquier caso la mayor parte de las líneas de investigación que se describen se caracterizan por su importante potencial de transferencia tecnológica:

- Data envelopment analysis (DEA)
- Diseño de rutas óptimas de vehículos
- Fenómenos de espera. Teoría de colas y simulación
- Relaciones con la minería de datos
- Modelización y optimización de problemas de grandes dimensiones

-
- Optimización estocástica
 - Optimización estructurada. Interacciones con la geometría
 - Optimización global
 - Optimización lineal entera
 - Optimización no lineal y optimización no lineal entera-mixta
 - Optimización multiobjetivo y decisión multicriterio
 - Problemas combinatorios difíciles y optimización heurística
 - Problemas de localización
 - Programación semi-infinita. Estabilidad y mal-condicionamiento en optimización
 - Teoría de juegos.

4. OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA

En lenguaje coloquial optimizar significa poco más que mejorar. En el contexto científico, la optimización es el proceso de tratar de encontrar la mejor solución posible (solución óptima), para un determinado problema. En un problema de optimización, existen diferentes soluciones y un criterio para discriminar entre ellas. El objetivo consiste en encontrar la mejor solución. Estos problemas se pueden expresar como la búsqueda del valor, de unas variables de decisión, para las que una determinada función objetivo alcanza su valor máximo o mínimo. En ocasiones, el valor de las variables está sujeto a unas restricciones. Existe una infinidad de problemas teóricos y prácticos que involucran a la optimización. Algunas clases de problemas de optimización son relativamente fáciles de resolver. Este es el caso, por ejemplo, de los problemas lineales continuos, en los que tanto la función objetivo como las restricciones son expresiones lineales y las variables son continuas. Estos problemas pueden ser resueltos con el conocido método Simplex, publicado por Dantzig en 1947. Sin embargo, muchos otros tipos de problemas de optimización son muy difíciles de resolver. De hecho, la mayor parte de los que podemos encontrar en la práctica, entran dentro de esta categoría (Crespo et al, 2007).

En efecto, a lo largo de los años se ha demostrado que muchos problemas de optimización pertenecen a la clase de Problemas *NP-Hard* (Dificultad No Polinómica): no se conoce ningún algoritmo que obtenga la solución óptima en un número de pasos polinomial en el tamaño del problema. Es decir, la solución óptima sólo se

obtiene empleando un tiempo de computación que crece de forma (al menos) exponencial en el tamaño del problema. A estos problemas también se les conoce como problemas “duros” o “difíciles” o “complejos”.

Una clase de problemas donde abundan los problemas complejos son los problemas de optimización combinatoria que se caracterizan por que el conjunto de soluciones factibles es finito. Y es precisamente el carácter finito del conjunto de soluciones el que en muchos casos da la dificultad al problema. En efecto, las variables de decisión solamente pueden tomar valores discretos, por tanto no existe ni continuidad ni derivabilidad, en definitiva propiedades que podrían favorecer la búsqueda de la solución óptima de forma eficiente.

Curiosamente muchos problemas de optimización combinatoria difíciles son muy fáciles de plantear. Por ejemplo uno de los más estudiados sin dudas es el problema del viajante (Travelling Salesman Problem o TSP). En este problema un individuo debe visitar una serie de ciudades empezando en una ciudad inicial y volviendo a ella una vez que haya visitado el resto. Se debe determinar el orden de visita de forma que la distancia recorrida sea mínima. El problema del viajante ha dado lugar a diferentes generalizaciones y extensiones en los problemas de rutas de vehículos con muchísimas y muy variadas aplicaciones en el campo de la logística o el transporte en todas sus áreas.

Otro problema combinatorio sencillo de entender es el “problema de la mochila”. En este problema se dispone de una serie de objetos cada uno caracterizado por un peso y un valor. También se dispone de una mochila con una capacidad (peso máximo que puede soportar). El problema es seleccionar el conjunto de objetos que cupiendo en la mochila sumen el máximo valor. Este problema ha tenido muchas aplicaciones entre otros en determinados modelos de selección de carteras o selección de proyectos.

Un tercer problema combinatorio también muy estudiado es el conocido como “problema de partición de números”. Se dispone de un conjunto de números y se trata de dividir este conjunto en dos subconjuntos de forma que la suma de los números de ambos subconjuntos sea lo más equilibrada posible, o equivalentemente minimizar la suma del conjunto que suma más. El planteamiento anterior se puede extender a k sub-conjuntos (con $k \geq 2$). Este problema tiene como campo de aplicación entre otros los problemas de equilibrados de líneas en procesos de producción, la asignación de tareas tanto a máquinas como personas, etc.

Finalmente un cuarto ejemplo es el problema conocido como *Bin Paking*. Se tiene un conjunto de objetos, cada uno de ellos con un peso, y se dispone de una serie

de recipientes (“bins”) todos ellos con la misma capacidad. Se trata de introducir los objetos en los recipientes de forma que se minimice el número de recipientes que usamos. Este problema tiene muchas aplicaciones como por ejemplo en el uso óptimo de material en procesos de fabricación y construcción, (por ejemplo las barras de acero corrugado que se usan con el hormigón).

Pues bien, los problemas antes mencionados, así como otros, son fáciles de entender pero “difíciles” de resolver. Si uno piensa en el problema del viajante tenemos que si hay n ciudades que visitar, además de la ciudad inicial y final. El número de soluciones es el que se puede ver en la tabla 1

n	nº soluciones
5	120
10	3628800
15	1,30767E+12
20	2,4329E+18
30	2,65253E+32
50	3,04141E+64
70	1,1979E+100
100	9,3326E+157

Tabla 1. Número de soluciones para el TSP

En la tabla anterior, por ejemplo para $n = 15$ el número de soluciones 1,30767E+12 es la forma reducida de 1307670000000. Esto puede dar una idea de la complejidad de los problemas anteriores. Los algoritmos exactos, que garantizan la solución óptima, están basados en métodos como Branch & Bound, Branch & Cut, Branch and Prize, etc. No realizan una exploración del conjunto de soluciones una a una (que obviamente sería imposible llevar a cabo incluso con problemas de tamaño pequeño), sino que van dividiendo el conjunto de soluciones en subconjuntos y evitan realizar exploraciones en los subconjuntos donde por alguna propiedad (por ejemplo valor de cotas calculadas) se tenga la certeza de que no puede encontrarse el óptimo. No obstante, como se ha comentado antes, los métodos exactos solo garantiza la obtención del óptimo en un número de operaciones que crece (al menos) de forma exponencial en el número de elementos. Esto les hacen inviables (tiempo de computación excesivo, desbordamiento de memoria) para problemas de tamaño grande incluso mediano.

En definitiva se puede decir que un problema de optimización difícil es aquél para el que no se puede garantizar el encontrar la solución óptima, en un tiempo razonable. La existencia de una gran cantidad y variedad de problemas difíciles, que aparecen en la práctica y que necesitan ser resueltos de forma eficiente, impulsó el desarrollo de procedimientos eficientes, para encontrar buenas soluciones, aunque no fueran óptimas. Estos métodos “rápidos” para hallar buenas soluciones aunque no garantizan el óptimo, se denominan heurísticos o aproximados. Este término deriva de la palabra griega *heuriskein*, que significa encontrar o descubrir; y se usa en el ámbito de la optimización, para describir una clase de algoritmos de resolución de problemas (Crespo et al, 2007).

Aunque los heurísticos en un principio no fueron bien vistos, se han ido aceptando dada su utilidad al dar soluciones a problemas reales, más aún a partir de los setenta con la proliferación de resultados en el campo de la complejidad computacional. El crecimiento espectacular en el desarrollo de métodos heurísticos puede ser constatado examinando el gran número de artículos en las principales revistas de investigación operativa que tratan sobre estos. Además, han aparecido publicaciones específicas como el *Journal of Heuristics*.

Los métodos heurísticos tienen la ventaja añadida de que pueden ser más fácilmente adaptables para solucionar modelos más complejos. Es interesante su utilización cuando no existe un método exacto de resolución o éste requiere mucho tiempo de cálculo o memoria, cuando no se necesita la solución óptima, cuando los datos son poco fiables, cuando hay limitaciones de tiempo (es frecuente en la vida real la necesidad de una respuesta rápida) o espacio, como paso intermedio en la aplicación de otro algoritmo, etc.

Según Zanakis y Evans (1981) se pueden definir como:

“procedimientos simples, a menudo basados en el sentido común, que se supone ofrecerán una buena solución (aunque no necesariamente la óptima) a problemas difíciles, de un modo fácil y rápido”.

Existen diferentes tipos de heurísticos, según el modo en que buscan y construyen sus soluciones. Una posible clasificación de los heurísticos tradicionales propuesta en Silver et al (1980) es la siguiente:

- A. Métodos constructivos.
- B. Métodos de descomposición.
- C. Métodos de reducción.
- D. Métodos de manipulación del modelo.
- E. Búsqueda local.

A continuación se describen brevemente:

A) MÉTODOS CONSTRUCTIVOS

Consisten en ir añadiendo paulatinamente componentes individuales a la solución, hasta que se obtiene una solución factible. El más popular de estos métodos lo constituyen los algoritmos golosos o devoradores (*greedy*), los cuales construyen paso a paso la solución seleccionando en cada paso la mejor opción según algún criterio.

B) MÉTODOS DE DESCOMPOSICIÓN

Se trata de dividir el problema en subproblemas más pequeños, siendo el output de uno el input del siguiente, de forma que al resolverlos todos obtengamos una solución para el problema global.

C) MÉTODOS DE REDUCCIÓN

Tratan de identificar alguna característica que presumiblemente deba poseer la solución óptima y de ese modo simplificar el problema.

D) MÉTODOS DE MANIPULACIÓN DEL MODELO

Modifican la estructura del modelo con el fin de hacerlo más sencillo de resolver, deduciendo a partir de su solución la solución del problema original. Pueden consistir en reducir el espacio de soluciones o incluso aumentarlo.

E) BÚSQUEDA LOCAL

Los algoritmos de búsqueda local son métodos iterativos que actúan como sigue: parten de una solución inicial y en cada paso buscan y seleccionan una solución vecina de la actual que la mejore; se sustituye la solución actual por esta nueva solución y se repite el proceso hasta que no se pueda encontrar ninguna solución vecina mejor que la actual; en este caso se dice que hemos llegado a un óptimo vecinal o local.

Una solución vecina es aquella la que se llega por un pequeño movimiento, fácil de evaluar. Por ejemplo intercambiar dos objetos (uno que está dentro por otro que está fuera) en el problema de la mochila, o intercambiar la posición de dos ciudades en el problema del viajante. En la figura 1 se ven ejemplos de algunos movimientos para obtener soluciones vecinas en problemas de rutas. Obsérvese que en este caso consisten en cambiar o intercambiar la posición de diferentes cadenas de puntos.

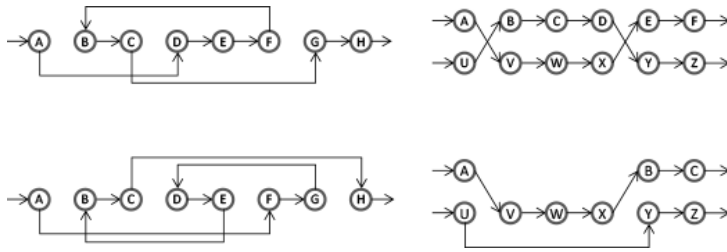


Figura 1. Ejemplos de movimientos vecinales en problemas de rutas

La búsqueda local ha sido la estrategia heurística tradicional más usada. No obstante su gran inconveniente es que la solución final obtenida es un óptimo local que, en unas ocasiones puede ser global y en otras, sin embargo, puede estar muy lejos del valor del óptimo global. Esto es debido a que la estrategia que usa, (siempre “descendente” es decir siempre a mejor) es “miope” es decir no mira más allá de las soluciones vecinas. La figura 2 ilustra esta idea. En esta figura se tiene un problema de minimización donde cada solución está representada por un punto, y las soluciones vecinas son justo los puntos a la izquierda y la derecha.

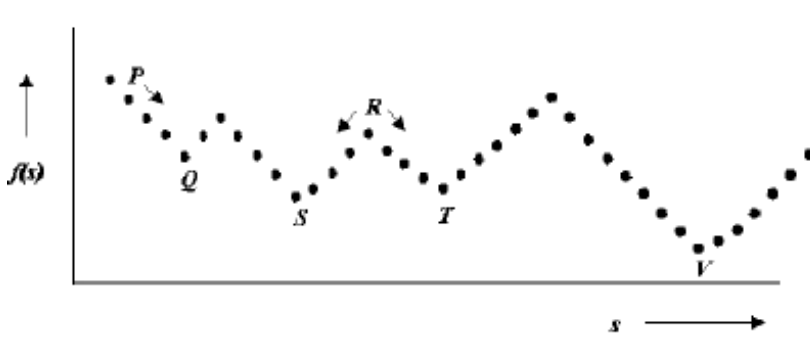


Figura 2. Ejemplo de estrategia descendente

La búsqueda local depende de la solución inicial: siempre nos lleva “al fondo del valle” donde se encuentra la solución inicial, como una pelota que rueda hacia abajo. En la figura 2 si empezamos en P, siempre terminamos en Q, y no hay posibilidad de movernos ya que supondría empeorar. Ahora bien, empeoramientos controlados, podrían permitirnos salir del valle donde esta Q y llegar al valle donde esta S, y en definitiva alcanzar un mejor óptimo local.

Los metaheurísticos son heurísticos más modernos que tratan de solventar los inconvenientes de los heurísticos tradicionales, sobretodo su “miopía” como en el caso que acabamos de comentar. De hecho algunas estrategias metaheurísticas se basan en movimientos vecinales pero con la idea de permitir empeoramientos, de forma controlada, para escapar de los óptimos locales y poder llegar a otros “valles” y regiones dentro del espacio de soluciones.

En definitiva los metaheurísticos realizan una exploración eficaz del conjunto de soluciones por una parte intentando identificar regiones con buenas soluciones para intensificar la búsqueda en ella, y por otra identificando regiones menos exploradas para realizar la búsqueda en ellas una vez que en la región actual se lleva una serie de operaciones sin mejora.

Se pueden dar múltiples definiciones de metaheurísticos. No obstante nosotros hemos seleccionado la siguiente:

“...metaheurística se refiere a una estrategia maestra que guía y modifica otras heurísticas para producir soluciones más allá de aquellas que normalmente se generan en una búsqueda de óptimos locales.” (Glover y Laguna ,1997).

Estas estrategias toman ideas de la inteligencia artificial, de las matemáticas, de la biología, de la estadística, de la física, de la propia evolución de las especies, etc.

Las metaheurísticas son por tanto estrategias que nos indican como diseñar algoritmos eficientes para problemas difíciles a través de patrones o ideas. Sin embargo por si solas no sirven para diseñar un método de solución eficaz. Para ello se necesita de un conocimiento más o menos profundo del problema a tratar para realizar un desarrollo “ad-hoc” para el mismo. Si estamos pensando por ejemplo en metaheurísticas basadas en movimientos vecinales, no iguales los movimientos que se pueden definir en un problema de rutas (por ejemplo intercambios de cadenas) o los que se pueden definir en el problema de tipo mochila. Y esta reflexión se puede hacer extensible a otro tipo de procesos u operaciones.

Entre las técnicas metaheurísticas que más éxito han tenido en la resolución de problemas difíciles se pueden destacar las siguientes (indicando para cada una los trabajos pioneros):

- Algoritmos Genéticos: Holland (1975).
- Recocido o temple simulado (Simulated Annealing, SA): Kirkpatrick y otros (1983).
- Búsqueda Tabú (Tabu Search): Glover (1986), (1989) y (1990).

-
- Algoritmos Meméticos: Moscato (1989).
 - Reencadenamiento de trayectorias (Path Relinking): Glover (1989), (1994a) y Glover y Laguna (1993).
 - GRASP: Feo y Resende (1989) y (1995).
 - Búsqueda reactiva: Battiti (1996).
 - Colonia de hormigas (Ant Colony Optimization, ACO): Dorigo y otros (1996).
 - Búsqueda dispersa (Scatter Search): Glover (1998), Laguna (1999).
 - Búsqueda en entornos variables (Variable Neighbourhood Search, VNS): Mladenovic (1995).
 - Optimización por enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization, PSO): Kennedy and Eberhart (1995) y Shi and Eberhart (1998).

Cabe destacar que aunque las diferentes técnicas están perfectamente diferenciadas en cuanto a sus orígenes y reglas de funcionamiento es cada vez más frecuente encontrar algoritmos que combinan aspectos de diversos metaheurísticos.

Hoy en día el uso de metaheurísticos está muy extendido en el ámbito científico precisamente por la eficacia que en general han demostrado en la resolución de problemas reales difíciles, algunos de ellos de concepción muy complicada. Es muy frecuente encontrarnos ya no sólo artículos dedicados a ellos (tanto para realizar análisis de estrategias de propósito general, o como para tratar problemas concretos) sino volúmenes especiales o incluso revistas dedicados a ellos como *International Journal of Metaheuristics*, *Memetic Computing*, *Swarm Intelligence*, *Evolutionary Optimization*, etc.

5. ENFOQUE MULTIOBJETIVO

Si nos fijamos en las situaciones a las que nos enfrentamos en la vida real, resulta sencillo observar que en muchas ocasiones tenemos que decidir teniendo en cuenta varios criterios u objetivos. Hoy en día, en muchos problemas no podemos limitarnos a optimizar únicamente sus objetivos económicos, ya que en el sistema económico actual existe cada vez una mayor y más especializada oferta de productos y servicios. Por ello, es necesario equilibrar el objetivo económico con otros indicadores de calidad como el nivel del servicio y la confianza. Estos factores pueden resultar decisivos para los clientes. Es decir, debemos tratarlos con una perspectiva multiobjetivo.

En investigación operativa, se denomina Programación Multiobjetivo (*MOP*, *Multi Objective Programming*) a la parte de la programación matemática que se ocupa de los problemas en los que queremos optimizar dos o más funciones simultáneamente en lugar de sólo una. Como consecuencia, los problemas de optimización multiobjetivo no tienen en general una única solución sino todo un conjunto de soluciones.

Debemos tener en cuenta que las funciones objetivo que tratamos de optimizar pueden estar enfrentadas entre sí, con lo que la primera decisión que debemos tomar, es cuál de los criterios es más importante, puesto que ahora existe un vector de funciones objetivo. Este conflicto existente entre las funciones objetivo, provoca que el enfoque común de la definición de optimalidad de los problemas mono-objetivo no sea aplicable para los problemas multiobjetivo. La noción de optimalidad comúnmente aceptada para los problemas multiobjetivo es la conocida como optimalidad de Pareto. Este concepto fue definido por Wilfredo Pareto en 1896 y considera que el óptimo es aquella solución que no puede ser mejorada para alguno de los objetivos sin empeorar alguno de los restantes.

Sin entrar en excesivos formalismos se dice que una solución A domina a otra solución B si es mejor o igual en todos los objetivos y estrictamente mejor en al menos uno de ellos. Para ayudar a entender esta idea, en el caso de dos objetivos, esto equivale a decir que A domina a B si es mejor en los dos objetivos, o al menos es igual en uno y mejora el otro.

Molina (2012) presenta a través de un ejemplo práctica el concepto de dominancia y como se plantea la comparación de distintas soluciones. En efecto se plantea un problema con dos funciones f_1 y f_2 a maximizar y con 3 posibles soluciones factibles (Figura 3). Considerando únicamente su valor con respecto a f_1 , se lleva a la conclusión de que la solución representada por un círculo azul es la pero y por tanto debería ser rechazada sin embargo ¿Es válida esta comparación?

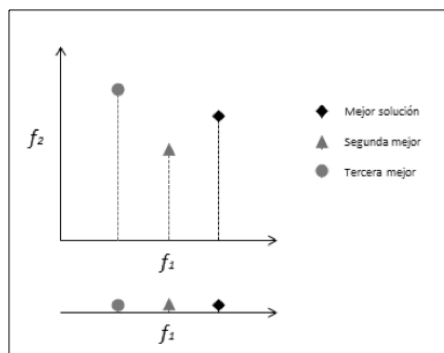


Figura 3. Soluciones para un problema multiobjetivo.

Sin muchas complicaciones, podemos comprender la falsedad de dicho juicio. Puesto que deseamos conocer el desempeño en relación a todos los objetivos del problema, no solamente un análisis parcial. Podemos observar en la figura 4 un análisis de estos resultados a la luz de las dos funciones.

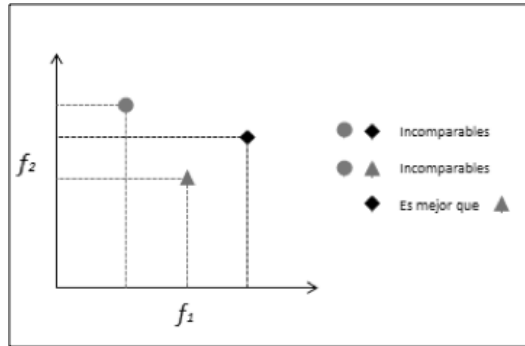


Figura 4. Concepto de dominancia.

Se observa claramente como la solución representada por el triángulo rojo es dominada por la representada por el rombo negro ya que la segunda mejora a la primera en ambas funciones. En el caso de la solución representada por el círculo azul, no podemos hacer comparaciones. Puesto que su valor en f_2 supera a ambas, aunque con relación a f_1 cuenta con una evaluación pobre. Por lo tanto, no podemos definir si esta solución representa o no una mejor opción, sin realizar otro tipo de análisis. Luego en este caso concreto, las soluciones correspondientes al círculo azul y al rombo negro pueden ser buenas opciones, pero no así la correspondiente al triángulo rojo: no tiene sentido considerarla ya que es peor en todos los objetivos que otra solución existente. En este caso las dos primeras son soluciones no dominadas, y la tercera es dominada

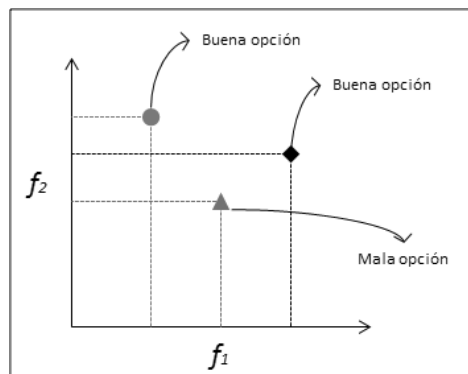


Figura 5. Concepto de dominancia.

Teniendo en cuenta lo anteriormente observado, podemos concluir que una solución no dominada, es aquella para la que no se conoce otra solución que mejore su valor en alguno de los objetivos, sin empeorar en otro. Una solución con estas características también se denomina eficiente.

Por tanto, la solución de los problemas multiobjetivo, se enfoca en encontrar el conjunto de soluciones no-dominadas o eficientes (al menos una aproximación buena al mismo), al cual se le denomina ‘Conjunto o Frontera de Pareto’. Por tanto, el objetivo es determinar de entre todos los elementos factibles, aquellos que constituyen soluciones no-dominadas.

El enfoque multi-objetivo tiene muchas ventajas si se tiene en cuenta los aspectos siguientes:

- La posibilidad de agregar funciones objetivos de diferente naturaleza no siempre es posible y en su caso está sujeto muchas veces a análisis complicados y no siempre acertados. Por ejemplo, si intentamos agregar coste de operaciones y nivel de servicio dado a clientes, ¿en cuanto se puede valorar el coste por cliente insatisfecho? ¿esta valoración está hecha a largo plazo, medio plazo, corto plazo?
- Incluso cuando pueda ser posible esta ponderación, muchas veces ocurre que el peso que se da a cada componente depende de las circunstancias en las que nos encontremos. Por ejemplo en época de bonanza económica las empresas o entidades pueden dar más peso al objetivo de nivel de servicio que les permite captar más clientes. Mientras que en época de recesión económica las empresas están interesadas, siempre respetando una calidad mínima, en reducir gastos ante la falta de liquidez. No obstante aunque el peso de cada objetivo este claro y sea posible la agregación, está siempre se puede realizar a posteriori.
- Dar el papel de objetivo a lo que inicialmente es una restricción puede dar más amplitud a las posibilidades que tenemos en la toma de decisiones. Supongamos que una entidad pública quiere optimizar el nivel de servicio en la planificación del transporte público de autobuses, medido por ejemplo en tiempos de viaje por pasajero, y para ello cuenta con un presupuesto de X euros. El considerar el presupuesto/coste como un segundo objetivo y hallar curva de eficiencia correspondiente nos permite realizar análisis y observaciones sobre la misma. Se podría analizar cuanto mejora el nivel de servicio con un presupuesto algo mayor (por ejemplo 1% más). Podría ocurrir que el nivel de servicio mejorara en un 10% por ejemplo. O en el sentido opuesto podría ocurrir

que una cierta reducción en el presupuesto apenas tiene repercusión en el nivel de servicio. Estos análisis no se pueden hacer con un enfoque mono-objetivo ya que no nos permite ir más allá de lo que ocurre con un presupuesto X , es decir, considerado como restricción.

- En definitiva el enfoque multiobjetivo permite llegar a soluciones de los problemas mono-objetivos correspondientes (las agregaciones siempre se pueden realizar a posteriori) pero permiten mayor posibilidades de análisis de los decisores correspondientes.

Existen distintas clasificaciones sobre los algoritmos para la resolución de problemas multiobjetivo. Algunos autores como Marler and Arora (2004) y Josefowicz (2008) engloban todos los métodos, ya sean exactos o metaheurísticos. Otros autores como Jones (2002) y Molina (2012) se centran en el análisis de metaheurísticas, ya que consideran que la búsqueda del conjunto de Pareto es más eficiente en el ámbito práctico.

6. RELACIONES ENTRE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA Y LA MINE- RÍA DE DATOS

La minería de datos es un área a medio camino entre la informática, la inteligencia artificial y la estadística e IO, que diseña algoritmos con los que extraer, a partir de los datos, patrones comprensibles que generen conocimiento útil. Tiene importantes aplicaciones en genómica, medicina, telecomunicaciones, informática, finanzas, etc.

Sin entrar en excesivos detalles se puede considerar que quizás el campo más importante dentro de la minería de datos la constituye la clasificación, tanto supervisada como no supervisada. En la clasificación supervisada se dispone de un conjunto de individuos (conocido como conjunto de entrenamiento) caracterizados por una serie de variables (explicativas) y se conoce además la clase a la que pertenece cada uno de ellos. Con esta información se trata de crear una regla que sea capaz de predecir a que clase pertenecen nuevos individuos que puedan aparecer según los valores de sus variables explicativas. El clasificador debe ser óptimo en el sentido de acertar la mayor parte de las veces. Por ejemplo, supongamos una serie de empresas de las que se conoce los valores de sus ratios financieros para un año concreto, y además también se conoce si cada una de ellas resulto ser solvente o no solvente en ese período. Una entidad financiera que de préstamos a empresas estaría interesado en construir un clasificador que le indicara, a partir de esos datos, si las empresas que les solicitan préstamos van ser solventes o no.

Las posibilidades de aplicación de la clasificación supervisada se adivinan amplísimas, ya no solo en el campo económico-empresarial sino también el médico-sanitario (ayuda a diagnosis y prevención), en ingeniería (análisis de fiabilidad), en estudios sociales, informática, telecomunicaciones, etc.

Métodos y modelos de clasificación dentro de la minería de datos son entre otros: las redes neuronales artificiales, los árboles de clasificación, el “clasificador bayesiano ingenuo” (Naive-Bayes), los algoritmos de “los vecinos más próximos” (*k-nearest neighbour*, K-NN), las máquinas de vector soporte (*Support Vector Machine*, SVM) entre otros. También se pueden incluir el análisis discriminante o la regresión logística aunque de origen más relacionado con el análisis de datos más clásico.

Hay varios puntos o maneras en los que la IO puede ayudar en las tareas de clasificación en diferentes áreas. Entre ellos destacamos las siguientes:

- **Formulación del problema:** Propuestas de formulación matemáticas del problema de clasificación a través de modelos de optimización. En estos modelos la función objetivo es minimizar el número de errores de un clasificador normalmente lineal o cuadrático. En este sentido destacan los trabajos iniciales de Mangasarian (1965), a los que siguieron posteriormente Freed and Glover (1981), Mangasarian (1994), Carrizosa and Martin-Barragan (2006), Jones et al (2007), Xu and Papageorgiou (2009) y Bal and Orkcü (2011). Normalmente son modelos basados en programación lineal entera-mixta, programación por metas o programación bi-objetivo. Hay que destacar que Olvi N. Mangasarian además de ser pionero en este campo realizó varios trabajos donde se proponían modelos de clasificación específicos para el diagnóstico de cáncer de mama entre los que destaca Mangasarian et al (1995).
- **Entrenamiento de redes neuronales:** Sin entrar en excesivos detalles las redes neuronales artificiales (Artificial Neural Networks ANN) son modelos que intentan imitar el comportamiento del cerebro, organizado en neuronas que trabajan de forma paralela. Han demostrado funcionar bastante bien en problemas de predicción y clasificación aunque en general uno de sus defectos sea la poca interpretabilidad de los modelos resultantes (se les llama modelos de “caja negra”). Quizás el modelo ANN más usado sea el perceptrón multicapa, donde las neuronas están organizadas en capas ordenadas (capa inicial, una o más capas intermedias y capa de salida). La capa de entrada se corresponde con las variables explicativas y la capa de salida con las variables a predecir. La información es leída por la capa de entrada y pasa por las diferentes capas intermedias hasta la capa de salida. Las neuronas de cada capa están conec-

tadas con todas las neuronas de la capa siguiente a través de pesos sinápticos (por el que se multiplica el valor de la información saliente). La figura 6 ilustra este proceso. El aprendizaje o entrenamiento de la red consiste en ajustar los pesos sinápticos para que la red clasifique o prediga bien, es decir, para que los valores de salida obtenidos en el conjunto de entrenamiento se ajusten a los valores esperados. Formalmente este es un problema de optimización: determinar los pesos que minimicen los errores de ajuste. Se han usado varios métodos normalmente basados en gradiente (Rumelhart and McClelland en 1986), optimización global (Hui et al, 1997) o metaheurísticos (Alba and Martí, 2006).

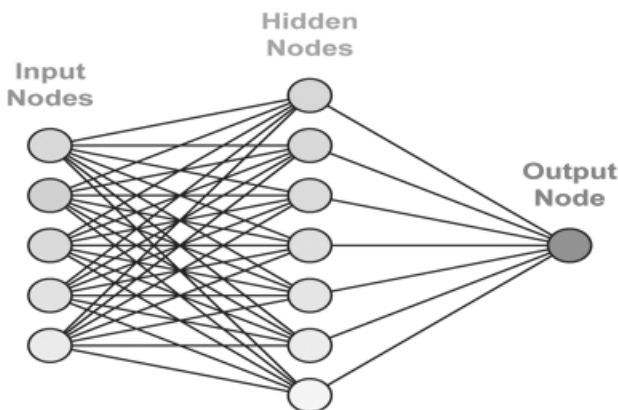


Figura 6. Ejemplo de red neuronal

- La construcción de modelos SVM. La idea básica de estos modelos es buscar un hiperplano que separe de forma óptima a los puntos de una clase de la de otra. Estos puntos han podido ser previamente proyectados a un espacio de dimensión superior para facilitar esta separación. En ese concepto de “separación óptima” es donde reside la característica fundamental de las SVM: este tipo de algoritmos buscan el hiperplano que tenga la máxima distancia (margen) con los puntos de cada clase que estén más cerca de él mismo. La figura 7 ilustra esta situación. Por tanto en la construcción de estos modelos hay dos pasos que en si son dos problemas de optimización: en primer lugar encontrar el espacio de mayor dimensión (con transformaciones o funciones Kernel) donde proyectar los puntos para que los elementos de cada clase puedan quedar separados por hiperplanos, y posteriormente encontrar el hiperplano de separación óptima. Estos y otros aspectos han sido tratados con profundidad en el libro de Schölkopf and Smola (2001).

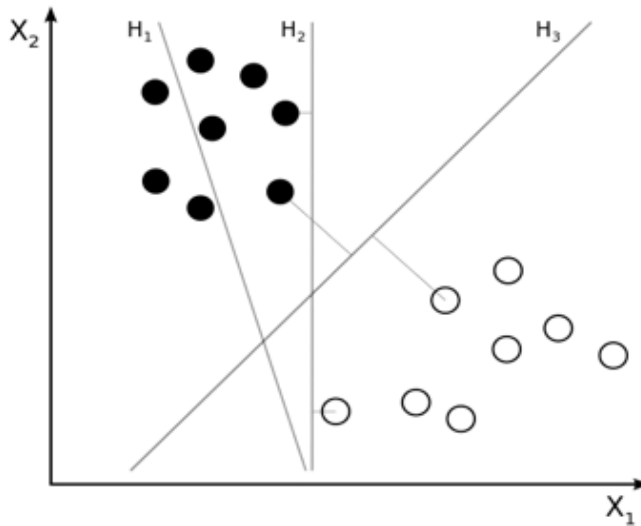


Figura 7. Ejemplo de hiperplanos separadores

- Selección de variables: Cuando se tienen muchas variables antes del diseño de cualquier método de clasificación es necesario seleccionar de las variables originales aquellas que son realmente necesarias. Es decir eliminar del análisis aquellas menos significativas y aquellas que pueden incluso distorsionar la clasificación.

Así, el problema consiste en encontrar un subconjunto de variables con las que se pueda llevar a cabo la tarea de clasificar de forma óptima. Este problema es conocido como problema de selección de variables. La investigación en este campo empezó a principios de la década de los sesenta, Lewis (1962) y Sebestyen (1962). Según Liu and Motoda (1998) la selección de variables conlleva diversas ventajas como la reducción del coste en la adquisición de datos, mejora en la comprensión del modelo final del clasificador, incremento en la eficiencia del clasificador y mejora en la eficacia del clasificador. Durante las cuatro últimas décadas se ha investigado mucho en este problema. Muchos trabajos sobre selección de variables están relacionados con la medicina y la biología, tales como Sierra et al (2001), Ganster et al (2001), Inza et al (2000), Lee et al (2003), Shy and Suganthan (2003) y Tamoto et al (2004).

Desde un punto de vista computacional la búsqueda del subconjunto de variables es un problema difícil, (Kohavi 1995; Cotta et al 2004). Esto significa que, en la práctica, encontrar la solución óptima cuando el tamaño del problema es grande es inviable. Para este tipo de problemas se desarrollan dos tipos de algoritmos o

métodos: los métodos exactos u óptimos, que encuentran la solución óptima pero que solo son aplicables cuando el tamaño del problema es pequeño; y los métodos aproximados o heurísticos que, aunque no garantizan el óptimo, encuentran buenas soluciones en un tiempo razonable. Entre los métodos exactos el más conocido es el de Narendra y Fukunaga (1977), pero como señala Jain y Zongker (1997) el algoritmo es inviable para problemas con un número elevado de variables. Por otra parte la calidad de las soluciones “heurísticas” difiere mucho según los métodos empleados. Como en otros problemas de optimización las estrategias metaheurísticas están demostrando ser metodologías superiores al resto. Así destacan los trabajos de Bala y otros (1996), Jourdan y otros (2001), Inza y otros (2001a, 2001b) y Wong y Nandi (2004) que desarrollan algoritmos genéticos, García et al (2006) que presenta un método basado en Búsqueda Dispersa y Pacheco et al (2006, 2009, 2013) que presentan métodos basados en búsqueda tabú y algoritmos evolutivos.

Por su parte los problemas de clasificación no supervisada tratan de determinar en una población de individuos caracterizados por una serie de variables grupos de individuos con un comportamiento homogéneo. Más concretamente se trata de dividir o “particionar” la población en grupos de forma que los individuos de un mismo grupo sean lo más parecido posible entre si, y lo más diferentes con los individuos de los otros grupos. Este problema, conceptualmente sencillo de entender, tiene muchísimas aplicaciones en diferentes y variados campos: economía, medicina, sociología, socio-economía, biología, etc. La IO aporta diferentes modelizaciones y formulaciones del problema. Se pueden encontrar funciones muy diversas para medir la homogeneidad intra-grupos y/o la heterogeneidad entre-grupos. Pero en cualquier versión este problema es difícil. Tradicionalmente se han usado algoritmos heurísticos sencillos para este problema, concretamente los métodos H-medias (Howard, 1966) y K-medias (Jancey, 1966) que se pueden encontrar en paquetes estadísticos. Sin embargo estos métodos son procedimientos sencillos de búsqueda local cuyas soluciones pueden ser superadas con relativa facilidad. Desde hace unos años, algunos algoritmos metaheurísticos han sido adaptados a este problema con soluciones significativamente mejores (Babu and Murty, 1993; Al-Sultan, 1995; Hansen and Mladenovic, 2001; Pacheco 2005).

Sería prolijo enumerar los campos de colaboración entre la IO con la minería de datos, donde existen muchos problemas que pueden ser planteados como problemas de optimización, y en muchos casos con varios objetivos (por ejemplo errores de tipo I y II en clasificación). El interesante trabajo de Corne et al (2012) hace una recopilación exhaustiva de estas sinergias y puede ilustrar al lector interesado.

7. APLICACIONES EN TRANSPORTE PÚBLICO

La creciente necesidad de las administraciones de racionalizar sus recursos y de mejorar el nivel de servicio dado a los usuarios, especialmente en los tiempos actuales de crisis, ha intensificado la necesidad de desarrollar sistemas de decisión y de gestión de recursos más eficientes que los tradicionalmente empleados. Además, las decisiones en problemas tales como transporte público de personas, recogidas de residuos o materias peligrosas para ser realmente eficaces, deben recoger diferentes restricciones y considerar varios objetivos (muchas veces en conflicto unos con otros). Estos objetivos abarcan aspectos económicos (reducción de costes), sociales (mejora en el nivel de servicio), laborales (mejoras en las condiciones de trabajo), ecológicos (reducción de consumo de carburantes), etc. Esto hace que surgen nuevos modelos cada vez más complejos para la optimización y toma de decisiones. La elección y/o diseño de un método de resolución de estos modelos es una tarea clave, ya que obviamente no todos los métodos son igual de eficaces y, a mayor complejidad del problema a resolver, más diferencias entre unos y otros. Algunas técnicas, como las estrategias metaheurísticas han demostrado ser, en general, mejores que los tradicionales métodos. Los beneficios de abordar estos problemas con técnicas adecuadas pueden ser importantes tanto para las administraciones como para los usuarios.

7.1 VINCULACIONES CON LOS RETOS SOCIALES DEL PROGRAMA HORIZONTE 2020

Los diferentes objetivos de los problemas de transporte público que se acaban de exponer se vinculan directamente con al menos cuatro de los retos sociales expuestos en la *Comunicación de la Comisión Europea de 30 de noviembre de 2011 sobre el Programa Marco de Investigación e Innovación 2014-2020 (Horizonte 2020)*:

- El primero de estos retos es “*Transporte inteligente, ecológico e integrado*”. En efecto, por una parte se desarrollan métodos que soluciones para racionalizar el transporte (*transporte inteligente*). Por otra parte se consideran diferentes objetivos entre los que se incluye la reducción del consumo combustible y la correspondiente reducción de emisiones (*transporte ecológico*). Finalmente el problema de la recogida de residuos se relaciona muy directamente con el medio-ambiente.
- El segundo es “*Acción por el clima, eficiencia de recursos y materias primas*”. Como se ha comentado entre otros objetivos que se consideran esta racionalizar los costes del conjunto de las operaciones (*eficiencia de recursos*) y el uso de combustible (*materias primas*) con la consiguiente mejora en el impacto medio-ambiental (*Acción por el clima*).

-
- El tercer reto es “*Sociedades inclusivas innovadoras y seguras*”. El análisis del transporte de personas discapacitadas tiene como uno de sus objetivos la mejora en el nivel de servicio de estos usuarios (*Sociedades inclusivas*). Además en los objetivos sociales de problemas de transporte escolar se incluye la reducción de los tiempos de estancia de los alumnos en los vehículos, es decir, evitar rutas excesivamente largas (*sociedades seguras*).
 - El cuarto reto con el que se relaciona este campo es “*Energía segura, limpia y eficiente*”. Como se ha comentado en los puntos anteriores entre los objetivos de estos problemas se busca racionalizar el uso de los combustibles (*energía eficiente*) mejorando el medioambiente y favoreciendo la sostenibilidad (*energía limpia*).
 - Finalmente, aunque de forma más indirecta, los objetivos antes mencionados se relacionan con un quinto reto: “*Salud, demografía y bienestar*”. Los objetivos ecológicos que se han comentado en los retos anteriores implican la mejora en el medioambiente y por tanto en la calidad de vida (*salud y bienestar*). Por otra parte en los objetivos relativos al nivel de servicio se mencionan la reducción de los tiempos de espera y viaje (*bienestar*) en el transporte urbano.

7.2 DIFERENTES APLICACIONES RECIENTES

Centrándonos en el transporte escolar Park and Kim (2010) presentan una amplia recolección de problemas de esta clase. Posteriormente destacan los trabajos de Dragan, Kramberger and Lipicnik (2011), donde se trata un problema simultáneo de rutas y localización de paradas. En Kim and Soh (2012) se plantea un interesante problema de diseño de una red escolar para una universidad de Corea. Finalmente en Mandujano, Giesen and Ferrer (2012) se aborda un modelo con aplicaciones en áreas rurales.

Una serie de trabajos han tratado el problema de transporte escolar en áreas rurales dispersas con datos de la provincia de Burgos. Los dos primeros de estos trabajos (Delgado, 2001; Delgado y Pacheco, 2001) abordan el problema de diseño de ruta escolares considerando dos objetivos, aunque no de forma simultánea: la reducción del coste de las operaciones (objetivo económico) y la reducción la duración de la ruta más larga (objetivo social). Teniendo en cuenta que las rutas son abiertas este segundo objetivo se puede definir también como minimizar el tiempo máximo de estancia de los alumnos en los vehículos. El planteamiento de este objetivo fue motivado por la inquietud que en su momento mostraron las diferentes asociaciones de padres de alumnos por el excesivo tiempo en algunos casos los alumnos permane-

cían en el vehículo escolar. De hecho esta inquietud se tradujo en forma de protestas como recogieron los periódicos de esos años.

Martes, 14 de Marzo de 2000

ARLANZA Las Apas convocan paros de diez minutos entre los días 20 y 24 de marzo

Cerca de cien alumnos se verán afectados por las movilizaciones del transporte escolar

Domingo, 26 de Marzo de 2000

Un total de 4.367 estudiantes se desplazan cada día en autobús hasta su centro educativo

Los trayectos del transporte escolar alcanzan una media superior a los cuarenta minutos

Figura 8. Páginas del Diario de Burgos del año 2000 haciéndose eco de la problemática y las protestas

Este problema con esta función objetivo no había sido considerada hasta este momento y llamó la atención de diferentes investigadores que analizaron este problema con los mismos datos y con esta segunda función objetivo (Corberán et al, 2002; Pacheco and Martí, 2006; Alabas-Uslu 2008). Finalmente en Pacheco et al (2013) se trata este problema considerando los dos objetivos (social y económico) simultáneamente. En estos trabajos se proponen para su resolución diferentes técnicas metaheurísticas como Búsqueda tabú, Búsqueda Dispersa, Path Relinking o Algoritmos Genéticos. En la figura 9 se muestra un ejemplo de ruta que forma parte de las soluciones obtenidas por estos algoritmos.

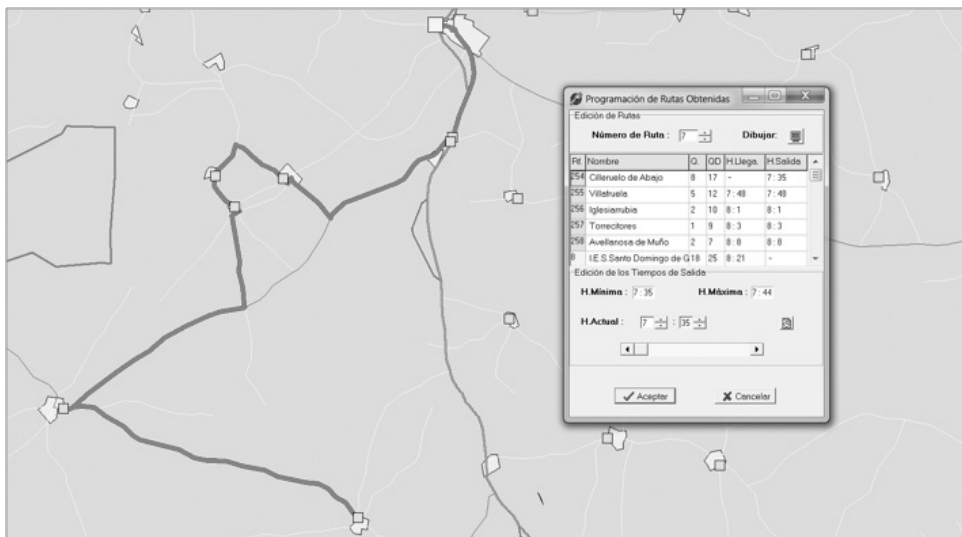


Figura 9. Ejemplo de una de las rutas (con llegada el Instituto de Lerma) obtenida por un sistema que incluye algoritmos de los trabajos citados

Respecto al transporte urbano existen algunas referencias recientes muy interesantes. Algunas de ellas contemplan de forma simultánea o integrada el diseño urbano (o al menos algunos aspectos) con el transporte urbano. En este sentido destacan los trabajos de Liu et al (2010), Bigotte et al (2010), Moura et al (2010). En Sharma and Mathew (2011) se plantea un problema multiobjetivo de diseño de transporte urbano en que se contempla la sostenibilidad como uno de los objetivos. Objetivos similares se proponen en Li et al (2011). Finalmente en Ruisanchez et al (2012) se usa un método de búsqueda tabú para la determinación de frecuencias óptimas de las autobuses.

En Pacheco et al (2009) y Alvarez et al (2010) se analiza el problema del transporte urbano en la ciudad de Burgos: Concretamente se proponían pequeñas modificaciones en las líneas y la reasignación de autobuses a estas líneas para reducir los tiempos medios de trayecto por pasajero (incluyendo tiempos de espera y de viaje). Para ello se realizaban previamente estimaciones de las demandas de viajeros entre los diferentes paradas. En el modelo sólo se modificaban las paradas intermedias de cada línea, dejándose fijas la parada inicial y final de cada línea. Se conseguía una reducción de más de 5' en los tiempos medios de trayecto. El método se basaba en la metaheurística búsqueda tabú. En la figura 10 se muestra un ejemplo de línea modificada

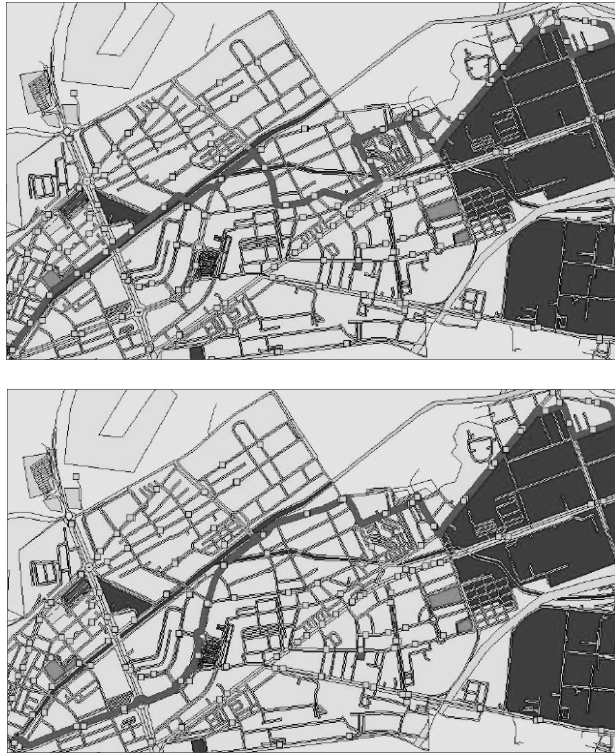


Figura 10. Línea con recorrido original (parte superior) y con recorrido suavizado (parte inferior)

Un método de transporte urbano muy interesante es el sistema de autobuses de tránsito rápido (BRT o Bus Rapid Transit). Este consiste en habilitar los carriles centrales de grandes avenidas (1 o 2 por sentido), exclusivamente a autobuses de características especiales (piso bajo para facilitar accesos, bajas emisiones). Este sistema ha adquirido mucha popularidad en ciudades como Sanghai, Brasilia, Sao Paulo, Bogotá o Ciudad de México entre otras. Las características de este sistema lo han hecho objeto de análisis en los últimos años. Así entre las más recientes referencias destacamos Schmid (2014) donde se analiza el re-diseño de la red de BRT en la ciudad de Bogotá, mientras que en Garcia de la Parra (2015) se analiza la de Ciudad de México. En ambos casos se intenta mejorar el nivel de servicio (reducir los tiempos medios de espera y viaje por usuario, así como los trasbordos) y se usan diferentes metaheurísticas para su resolución (VNS, búsqueda tabú). En la figura 11 se muestra la curva de eficiencia obtenida en el caso de Ciudad de México considerando el tiempo de viaje por pasajero (eje X) y el ratio de trasbordos (eje Y).

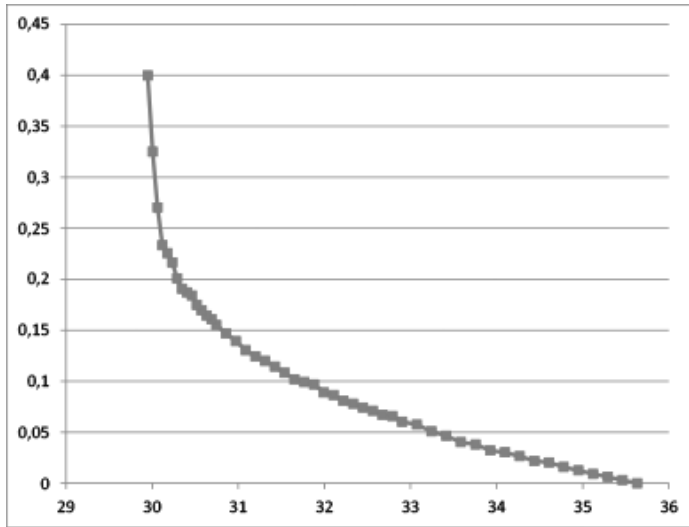


Figura 11. Curva de eficiencia (considerando el tiempo de viaje y el número de trasbordos) para el BRT en Ciudad de México

Respecto al transporte interurbano no existen excesivas referencias actuales. La más destacable es el trabajo de Chen and Jang (2007) que usa una metodología basada en redes neuronales para abordar un modelo de este tipo de problemas.

En cuanto al transporte de personas discapacitadas la bibliografía es más bien escasa. De hecho hay que remontarse al trabajo de Ioachim et al (1995) para encontrar referencias de trabajos en revistas destacadas que citen este problema de forma explícita. Sin embargo, muchos de los problemas de personas discapacitadas se ajustan al *Dial-A-Ride-Problem* (DARP) y variantes suyas. Sobre este modelo si existen algunas referencias recientes interesantes. Así variantes multiobjetivos son tratadas en el trabajo de Parragh et al (2009), Chevrier et al (2012), Zidi et al (2012); variantes con funciones estocásticas son analizadas en Ho and Haugland (2011) y en Schilde, Doerner and Hartl (2011). Variantes que intentan incorporar aspectos de problemas reales son los de Paquette et al (2012), Parragh et al (2012) y Parragh and Schmid (2013).

Finalmente en cuanto la recogida de basuras en Derigs and Friederichs (2009) se trata un interesante problema real. En Eisted, Larsen and Christensen (2009) se trata el problema considerando aspectos ecológicos con profundidad. Este trabajo ha tenido notable impacto en otros posteriores, como el de Steubing, Zah and Ludwig

(2012). Trabajos que traten la recogida de residuos peligrosos son los de Zhu et al (2010) y Das, Mazumder and Gupta (2012) este último considerando varios objetivos. Finalmente en Gómez et al (2015) se trata un modelo de la recogida de basuras en áreas rurales basándose en datos de nuestra provincia, concretamente en la problemática del Alfoz de Lara. Este problema es especialmente crítico en verano por el aumento de población en estos pueblos (se multiplica por 3) y la mayor degradación e incomodidad de las basuras acumuladas debido al calor. Se consideran los objetivos de minimizar los costes de las operaciones y maximizar el nivel de servicio. En este caso el nivel de servicio se relaciona directamente con la población de cada pueblo, la frecuencia de visita o recogida en los mismos y la regularidad de los intervalos de visita. Los métodos de solución propuestos están basados en algoritmos genéticos y en búsqueda tabú adaptadas a problemas multiobjetivos.

8. APLICACIONES A LOGÍSTICA HUMANITARIA

Terremotos, huracanes, inundaciones, epidemias.... cada año numerosos de estos desastres naturales afectan a diferentes países y territorios, por no mencionar los causados por el mismo hombre (guerras, malas decisiones gubernamentales, etc.) En tales eventos se despliega una gran labor humanitaria, que frecuentemente no cumple al 100% con todos sus objetivos.

Por desastre se entiende “una interrupción que afecta físicamente a un sistema como un todo y pone en peligro sus prioridades y metas” (Van Wassenhove; 2006). La logística es un factor crucial en las operaciones de ayuda humanitaria en situaciones de desastre, abarcando el 80% de ellas, lo que junto al hecho de que también suele ser la parte más cara, indica la importancia de una atención especial (Kovacs and Spens, 2007). Una inversión adecuada en la logística de las operaciones de socorro proporciona la principal oportunidad para desarrollar e implementar el uso eficaz y eficiente de los recursos en las operaciones humanitarias (Cozzolino et al, 2012). Además, un uso más estratégico de los recursos permitiría a las organizaciones humanitarias ganar la confianza de los donantes y el compromiso a largo plazo por parte de benefactores, cada vez más escépticos (Scholten et al 2010).

La definición de logística puede tener diferentes interpretaciones en dependencia del contexto donde se desarrolle (militar, comercial, humanitario), pero cualquiera sea el caso, siempre incluye las siguientes etapas o acciones: planificación, preparación, diseño, obtención, transporte, inventario, almacenamiento, distribución y satisfacción del beneficiario (Van Wassenhove; 2006). Esto es, todas las operaciones logísticas tienen que ser diseñadas en tal forma que traigan las mercancías

adecuadas al lugar adecuado y las distribuya a las personas adecuadas en el momento adecuado. Sin embargo, la optimización del desempeño logístico requiere que todas las relaciones entre los actores involucrados sean gestionadas de manera eficaz y eficiente a través de un enfoque integrado. La logística se centra más bien en mover algo o alguien desde un punto de origen a un destino, mientras que la gestión de la cadena de suministro se centra principalmente en las relaciones entre los actores que hacen posible dicho movimiento.

Logística y gestión de la cadena de suministro son cruciales para configurar correctamente la respuesta a un desastre. Aunque la logística humanitaria (LH) puede aplicar y aprender mucho de la logística comercial, tiene características especiales que la distinguen: la enorme complejidad de las condiciones de operación para proveer ayuda a los afectados, la presión del tiempo (que en este contexto puede representar la diferencia entre la vida y la muerte), la alta rotación del personal, la presencia de muchos actores no siempre coordinados (donantes, prensa, gobierno, ejército y por supuesto los damnificados), entre otros.

Mientras que las cadenas de suministro comerciales (CSC) usualmente tienen un conjunto predeterminado de proveedores, sitios de manufactura y una demanda estable o al menos pronosticable, en la LH esto es completamente distinto: frecuentemente participan varias agencias de socorro caracterizadas por su falta de coordinación, se desconoce qué recursos estarán disponibles y la participación y contribución concreta de los proveedores. Esto crea redundancia y duplicación de esfuerzos y materiales por un lado y carencias por otro. Más aún, dado que la mayoría de los desastres requiere respuesta inmediata, las cadenas de suministro humanitarias (CSH) deben diseñarse y operarse simultáneamente con conocimiento muy limitado de la situación en el área de desastre.

Por otra parte, la LH abarca un amplio campo de operaciones que incluyen distribución de suministros médicos para prevenir enfermedades, suministros alimenticios para combatir el hambre y suministros críticos a raíz de un desastre. Si bien todas comparten objetivos humanitarios, son profundamente diferentes según el nivel de urgencia de las operaciones, el estado de las redes sociales que orquestan el esfuerzo, el estado de los sistemas de soporte y la naturaleza dinámica de las necesidades, entre otras (Holguín-Veras et al; 2012). Considerar la LH como un bloque homogéneo pasa por alto lo complejo y distintivo de los variados ambientes operacionales, dificultando a los “externos” el entendimiento de los aspectos únicos de los diferentes tipos de LH y desarrollar formulaciones adecuadas.

Se pueden identificar tres grandes etapas en las operaciones de las CSH: preparación, respuesta inmediata y reconstrucción. Cada una de ellas tiene actividades

y ambientes sustancialmente diferentes, por lo que requieren diferentes recursos y herramientas. Es obvio que esto tiene profundas implicaciones en los modelos y formulaciones que se desarrollen en cuanto a reflejar el balance entre las necesidades (enfocado en el sufrimiento humano) y la eficiencia (enfocado en el uso óptimo de los recursos).

A pesar de las enormes implicaciones económicas y sociales que tendría el avance científico en el área de CSH, las investigaciones realizadas hasta el momento no son comparables con su importantísimo rol. No obstante, desde hace relativamente poco tiempo, empiezan a surgir interesantes trabajos en este campo así como grupos de investigación sobre el tema.

Algunos trabajos se han enfocado al estudio de los problemas logísticos operativos de la etapa de respuesta inmediata a un desastre para la obtención de modelos y métodos que permitan atender de una manera eficaz y eficiente a los damnificados. Estos problemas se enmarcan en el área de cambio climático, fenómenos naturales y prevención de riesgos.

Si bien en la literatura científica se han realizado intentos para adaptar a las CSH las formulaciones desarrolladas originalmente para las comerciales, las mismas tienen grandes limitaciones y la mayoría fallan en capturar completamente la complejidad de la logística humanitaria.

El campo de investigación es enorme, con muchos problemas involucrados simultáneamente (cada uno suficientemente complejo por sí solo), por lo que su estudio debe hacerse de forma escalonada para primeramente identificar las características esenciales de cada uno de ellos y luego poder integrar los modelos y métodos de solución desarrollados.

A diferencia de la logística comercial donde se busca minimizar los costos logísticos totales, en estos modelos se consideran funciones objetivos que tengan en cuenta en primer lugar el rápido alivio del sufrimiento humano (minimizar los costos de privación). Encontrar la forma adecuada para expresar matemáticamente esta función es de por sí un problema muy complejo y está siendo objeto de estudio por investigadores líderes del área de logística de desastres. Naturalmente, costos de inventario, manipulación y transportación (costos logísticos) también deben ser considerados, pero no son los prioritarios.

Entre los principales objetivos a considerar están los de suministrar la ayuda necesaria en el menor tiempo posible. El objetivo de minimizar el tiempo de espera de los damnificados para recibir la ayuda está asociado a los problemas de latencia mínima. Algunos trabajos han tenido por objeto proponer formulaciones, que en al-

gunos casos han dado lugar a modelos de diseño de rutas con un vehículo no capacitado, como en Angel-Bello et al (2012), y otras con un vehículo capacitado con múltiples viajes en el contexto de latencia mínima, como en Angel-Bello et al (2013).

En el trabajo de Holguin-Veras et al. (2012) se incluyen algunas líneas de trabajo en este campo que necesitan ser exploradas con más profundidad. Entre estas líneas destacan el análisis de métodos y modelos para enfrentar los siguientes problemas:

1) Diseño de la red de distribución

Selección de las mejores formas de llegar a los damnificados según las condiciones de las vías de comunicación y los medios de transporte disponibles.

Selección de localizaciones potenciales para almacenes temporales en áreas estratégicas que permitan la comunicación eficiente entre los lugares de acopio y los damnificados.

2) Localización de almacenes y planificación de las rutas de vehículos. Más concretamente determinación de las mejores localizaciones para los almacenes temporales y el orden y la forma en que se atenderán los diferentes lugares donde se encuentran los damnificados.

A continuación se van dar algunas mencionar algunos trabajos basados en problemáticas reales donde se proponen modelos y formulaciones de problemas reales de logística humanitaria además de proponerse de métodos de solución. Como se ha comentado anteriormente este es un campo de trabajo realmente emergente dentro de la Investigación Operativa de ahí que la mayor parte de las referencias sean muy recientes.

Un primer grupo de trabajos son de tipo preventivo o pre-desastre. La mayor parte de ellos se centran en problemáticas de regiones donde se sabe que, por desgracia, es relativamente probable que ocurran desastres a tenor de acontecimientos similares en el pasados y la frecuencia de los mismos (por ejemplo hambrunas en África, terremotos en determinadas zonas como California o Turquía, ciclones en el Caribe, inundaciones en India, Bangladesh o Pakistán, etc.). En la mayoría de los casos estos trabajos tratan de diseñar redes (camino, localizaciones de almacenes) a algunos de sus partes para el abastecimiento de ayuda. Una de las características que se busca en estas redes es que sean “robustas” en el sentido en que si tras el desastre falla algún elemento de la red (tramos de carretera cortados, o algún almacén derruido) el resto de la red puede reponer y satisfacer de la mejor forma posible las necesidades de los afectados que iban a ser atendidos con los elementos afectados (otras localizaciones cercanas, caminos alternativos, etc).

Así por ejemplo en el trabajo de Albareda-Sambola et al (2015) se presenta un modelo de localización de almacenes de abastecimiento en una región que contempla la posibilidad de que uno o varios centros fallen. Concretamente el modelo de busca las localizaciones de forma que se minimice la distancia de cada población al segundo centro más cercano (el centro alternativo). También en Renkli and Durand (2015) se trata la localización de almacenes de ayuda pre-desastres con uso de modelos de programación estocástica y entera-mixta.

En Hong et al (2015) se presenta el problema del diseño íntegro de redes de abastecimiento, teniendo en cuenta la incertidumbre en las demandas y en las capacidades en los transportes. También se hace uso de programación estocástica.

La frecuencia de terremotos en el pasado en determinadas regiones, como Turquía o California ha dado lugar a modelos preventivos específicos para optimizar la asistencia antes estos desastres. Así en Verma and Gaukler (2015) se tratan diferentes modelos de localización de almacenes ante sacudidas y terremotos. Para su resolución se proponen diferentes métodos basados en búsqueda tabú. El análisis de estos modelos con datos de los terremotos de California demuestra la eficiencia de los mismos.

De igual forma en Tuzkaya et al (2015) se propone modelos y métodos de Optimización Robusta con el fin de ubicar centros logísticos de emergencia para atender a potenciales afectados por desastres como sacudidas y terremotos. Se analiza casos reales con datos de terremotos en Turquía.

Como se ha comentado anteriormente por desgracia las hambrunas en África siguen produciéndose cada cierto tiempo, ya sea por efecto de las guerras, las condiciones climáticas, la falta de determinadas infraestructuras, etc. Esto ha hecho que se desarrollen modelos de logística humanitaria preventiva enfocados en esta problemática. Por ejemplo en Rancourt et al (2015), se presenta un estudio basado en un problema de distribución de ayuda alimentaria en las épocas de sequía en Kenia. El objetivo es diseñar una red eficaz de distribución de ayuda alimentaria próxima. Se presentan modelos de localización para un conjunto de centros de distribución, desde donde la comida se distribuye directamente a los beneficiarios. Se proponen métodos programación entera para su resolución. El modelo se basa en la problemática específica de la región de Garissa en Kenia, con cuyos datos se contrasta. No obstante puede ser aplicable también a otras regiones y países en vías de desarrollo.

Los modelos anteriores hacen referencia a modelos preventivos de ayuda humanitaria, es decir modelos pre-desastre. No obstante quizás sean más numerosos los modelos para evaluar el impacto y planificar actuaciones en los momentos posteriores al desastre.

Así en el trabajo de Vitoriano et al (2015), se introducen dos modelos, uno para evaluar las consecuencias en la etapa justo después de un desastre, y otro para la distribución de la ayuda humanitaria. Ambos se basan en programación multicriterio. De igual forma en Ozdama et al (2015) se repasan diferentes modelos de flujo de redes para analizar las fases de respuesta y planificación de la recuperación del ciclo de vida tras los desastres.

Como en otros campos de actuación la gestión de los recursos humanos es una parte importante y ha sido objeto también de algunos trabajos interesantes. Así en Lessiter et al (2015) se planean modelos y métodos basados en flujos de redes para optimizar la gestión de voluntarios ante desastres. Por su parte en Sheu and Pan (2015) se propone un nuevo modelo de colaboración en las acciones de socorro para hacer frente a los problemas de desequilibrio entre disponibilidad de suministros y demanda en la logística de emergencia ante desastres de gran escala. Para ello se hace uso de métodos y modelos de optimización estocástica.

El diseño de rutas para transporte de ayuda se ha basado en la experiencia existente en modelos y métodos para problema de rutas de la logística comercial. No obstante existen diferencias notables, especialmente en la valoración y cuantificación de los objetivos. El concepto de espera y latencia son los predominantes en estos modelos. Por ejemplo en el trabajo de Rivera et al (2015) se analiza el problema de diseño de rutas para transportar ayuda, teniendo en cuenta funciones objetivos relacionadas con “el sufrimiento de los afectados”, en este caso tiempos de espera acumulados. Se proponen métodos de solución basados en metaheurísticas multi-arranque. De forma similar en Huang et al (2015) se desarrolla un modelo de optimización multi-objetivo integrado que combina la localización de recursos con la distribución en situaciones de emergencia. Se consideran tres funciones objetivo: la utilidad de salvamento, el costo de retardo y la equidad.

Al igual que en los trabajos de logística preventiva los terremotos también han llamado la atención de varios autores para la realización diferentes modelos de ayuda tras producirse. También los casos de terremotos en Turquía y California han sido objeto de un especial análisis. En el trabajo de Salman and Yucel (2015) se usan modelos de programación entera para problemas de localización de facilidades ante los daños producidos en la red de transportes tras las sacudidas. Analizan este modelo con datos de terremotos en la región de Estambul. De forma similar en Kilci et al (2015) se propone una metodología basada en modelos de programación estocástica y entera mixta para selección de la ubicación de los sitios de alojamiento temporal. Se valida el modelo matemático mediante el análisis de un caso utilizando datos reales de la región de Estambul y del terremoto del 2011. Por su parte, respecto a California, en Ahmadi et

al (2015) se plantea un modelo que determina la ubicación de los depósitos y las rutas de distribución de ayuda después de un terremoto. Se proponen métodos basados en Programación Estocástica para su resolución. Resultados computacionales muestran que en el caso de San Francisco las demandas insatisfechas pueden reducirse significativamente con un mayor número de depósitos y vehículos.

Las inundaciones también han sido objeto de análisis recientemente. Concretamente en Garrido et al (2015) se presenta un modelo que trata de optimizar los niveles de inventario de suministros de emergencia, así como la disponibilidad de vehículos, con el fin de entregar suministros suficientes para satisfacer las demandas con una probabilidad dada. Esta modelo sirve para asignar recursos, tanto antes como después de la inundación, con el objetivo de minimizar los efectos indeseables de este tipo de eventos. Como en muchos de los casos anteriores se hace uso de la Programación Estocástica.

Finalmente en Camila et al (2015) se hace una revisión de la literatura de diferentes modelos de predicción, estimación de las demandas e impacto, etc. tanto pre-desastre como post desastre. Los modelos de predicción y/o estimación hacen uso de mayoritariamente de modelos de inteligencia artificial, sobre todos basados en redes neuronales, regresión logística. También se analizan los métodos de localización y transporte existentes.

9. APLICACIONES SANITARIAS Y MÉDICAS

En este apartado se presentan aplicaciones de la investigación operativa en las Ciencias de la Salud, tanto en el campo de la organización y gestión de recursos sanitarios como en el campo de la prevención, detección y tratamiento de enfermedades.

9.1 PLANIFICACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y GESTIÓN DE RECURSOS SANITARIOS

Dentro de las aplicaciones referidas a la gestión de recursos sanitarios en Utley et al (2003) se aborda el problema de encontrar el balance óptimo entre el número de camas para cuidados intensivos y el de camas en los restantes cuidados. El modelo tiene en cuenta la variación de la demanda y las variaciones en los tiempos de estancia de los pacientes en ambos servicios, necesidades especiales, etc. Otros trabajos tratan el problema de las listas de espera. Así por ejemplo en Everett (2002) se aborda este problema mediante la construcción de un modelo de simulación para la gestión de las listas de espera de cirugía en hospitales públicos. Los pacientes están clasificados por el tipo de intervención y por la urgencia de la misma. El modelo de

simulación sirve de apoyo en las decisiones diarias para la gestión de la lista y para la asignación de pacientes a los hospitales.

Un tratamiento especial tienen las listas de enfermos en espera de un trasplante. Por desgracia todavía muchos pacientes mueren en Europa durante la espera de un trasplante (hígado, corazón, riñón, etc). En Ratcliffe (2001) se propone un modelo de simulación que permite evaluar varias políticas alternativas de gestión de la lista de pacientes que esperan un trasplante de hígado. El modelo compara nueve criterios para el emparejamiento de donante-receptor en el programa de trasplantes, teniendo en cuenta diferentes factores. Otro trabajo interesante del mismo tipo se puede encontrar en Shecheter (2005).

Otro tipo de trabajos aborda el tiempo en las salas de espera hasta que son atendidos por el personal sanitario, incluso cuando se acude a la consulta previa cita. Algunos trabajos analizan la efectividad de diferentes formas de citación (Rohleder and Klassen, 2002) Otros (Aharonson-Daniel et al, 1996; Ashton et al, 2005) centran su estudio en encontrar el equilibrio óptimo entre el coste y el nivel de servicio (tiempo de espera) mediante modelos de teoría de colas y simulación. La mayoría de ellos son estudios en servicios de un hospital (radiología, endoscopias, urgencias, servicios quirúrgicos, cuidados intensivos, terapia de radiación en oncología, etc.)

Un problema muy relacionado con los tiempos de espera es el problema del desbordamiento (“overbooking”) de determinados servicios o bien por debido a la mala planificación de las correspondientes citas o a operaciones de urgencias que surgen. Algunos trabajos se han realizado recientemente en este sentido. Concretamente en El-Sharo et al (2015) se propone un modelo de programación dinámica para reducir el exceso de reservas para las citas de consulta externa. Mientras que en Zonderland et al (2015) se analiza el efecto de la implantación de las unidades de corta estancia en los servicios de urgencia para aliviar el desbordamiento de estos.

9.2 DIMENSIONAMIENTO Y ORGANIZACIÓN DE LOS SERVICIOS MÉDICOS

En algunos trabajos (Swisher and Jacobson, 2002; Swisher et al, 2001; Stahl et al, 2004) se han usado técnicas de simulación y optimización para encontrar la mejor configuración de un centro sanitario, con el número adecuado de recursos materiales y humanos, así como la distribución óptima de los mismos. Este tipo de problemas surge tanto a la hora de planificar un nuevo servicio, como a la hora de reorganizar o mejorar el funcionamiento de uno ya existente. Los objetivos de los estudios suelen ser: minimizar el costo del servicio, maximizar la calidad del mismo y la satisfacción de los pacientes, maximizar la satisfacción del personal sanitario, etc.

Un problema similar se aborda en De Angelis (2003) donde se usa simulación, optimización entera y redes neuronales. El objetivo es determinar la mejor configuración de funcionamiento de un centro de donación de sangre. El estudio estimó, para distintos niveles de presupuesto, el costo de operación, el tiempo total medio de permanencia de los donantes en el sistema y el número óptimo de profesionales sanitarios en el centro.

Las enfermedades coronarias son una de las principales causas de muerte en los países desarrollados. Muchas muertes se deben a paros cardiacos que se producen fuera de centros hospitalarios y que no reciben a tiempo atención médica. Los servicios de la cruz roja austriaca realizaron un estudio piloto sobre la aplicación de desfibriladores externos semi-automáticos por los servicios de emergencias. El éxito de este plan piloto condujo a la realización de un estudio de coste/efectividad Rauner, (2003) para decidir, con un presupuesto restringido, cuántas unidades de desfibriladores externos hay que asignar a cada una de las zonas geográficas. La metodología empleada en este estudio se basa en modelos de optimización con programación entera.

Un problema de localización de centros de tratamientos de diabéticos en la provincia de Burgos se planteó en Pacheco and Casado (2005) y Pacheco et al (2008). Concretamente el primer trabajo buscaba situar estos centros de forma que la mayor parte de los pacientes, antes una situación de coma diabético, puedan ser atendidos en un tiempo razonable para evitar daños graves permanentes. El segundo modelo es una variante del primero. En el se incorpora la probabilidad de daño permanente de un paciente en función del tiempo transcurrido desde que sufre un episodio de coma diabético hasta que es atendido en el centro más cercano. En la figura 12 se muestra las soluciones propuestas para ambos modelos.

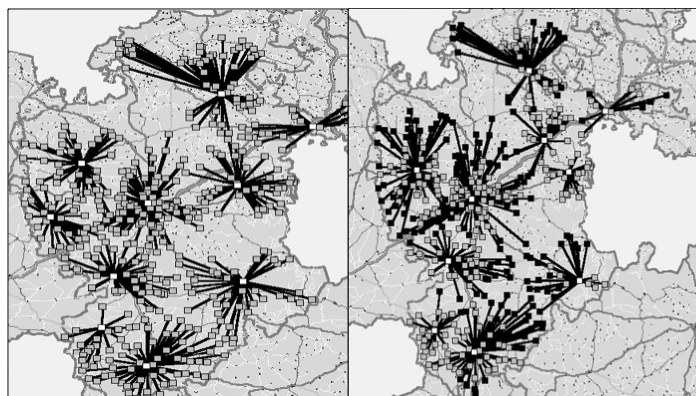


Figura 12. Localización de centros para diabéticos en la provincia de Burgos.

También relacionados con problemas de localización en Jagtenberg et al (2015) se aborda precisamente el problema de relocalización dinámica de ambulancias. El objetivo es reducir al mínimo el porcentaje esperado de llegadas tardías. Las decisiones sobre la forma de redistribuir los vehículos tienen que hacerse en tiempo real, y pueden tener en cuenta el estado de todos los otros vehículos y sus accidentes. Se diseña un metaheurístico para resolver este modelo.

Relacionado con lo anterior recientes trabajos han tratado el tema de la reorganización de servicios para optimizar la gestión de determinados tratamientos. Así, en Crop et al (2015) se presenta un modelo para la optimización del flujo de trabajo para los tratamientos de radioterapia. Por su parte en Lazzaroni and Righini (2015) se considera algunos problemas de optimización derivados de la reorganización de un sistema de salud regional (concretamente Milán y su provincia) para el tratamiento de los pacientes afectados por infarto agudo de miocardio.

9.3 RECURSOS HUMANOS

Los recursos humanos representan la mayor parte del presupuesto económico de muchos centros sanitarios, por lo que una adecuada planificación es deseable en aras de equilibrar la calidad del cuidado al paciente y la satisfacción de los profesionales sanitarios. La planificación de la plantilla requiere la determinación de los horarios y turnos del personal sanitario. Hay que tener en cuenta que un hospital necesita disponer de personal cualificado permanentemente. La planificación de los turnos de la plantilla para diferentes periodos de tiempo (planificación semanal, mensual, anual) está sujeta a diferentes restricciones (normativas legales, tipos de contratos, preferencias personales, cualificación profesional), así como a los distintos requerimientos específicos de cada hospital.

Se pueden encontrar gran variedad de trabajos en relación con la planificación de horarios y asignación de tareas de la plantilla según el tipo de centro (Beaulieu, 2015). La forma habitual de modelizar los problemas de planificación de plantillas es mediante modelos de programación lineal entera relacionados con las diferentes variantes del *Labor Scheduling Problem* (problema de planificación de turnos de trabajo). Estos modelos son *difíciles* y por tanto se diseñan técnicas heurísticas para su resolución de resolver.

El aumento de la esperanza de vida supone un incremento en las necesidades de cuidados médicos y asistenciales entre la población de mayor edad. La demanda

de este tipo de servicios ha crecido en los últimos años. Por ello, se requiere una buena planificación por parte de los servicios sociales y de los servicios médicos, de residencias especializadas o de asistencia individualizada en la vivienda de cada persona. Así, por ejemplo, algunos estudios se han centrado en la planificación de la plantilla que presta atención a domicilio a personas mayores y a personas con necesidades especiales (Eveborn, 2006). La plantilla está integrada por personal de limpieza, personal para ayudar en los cuidados higiénicos personales, enfermeras, médicos y asistentes sociales. Una vez establecidas las necesidades de cada una de las personas que serán atendidas en casa (qué tipo de ayuda necesita y cuántas horas semanales requiere cada tipo de ayuda), se establece el calendario y las rutas de visitas (regulares y especiales) de los trabajadores en plantilla a los distintos usuarios de este servicio a domicilio. Un problema similar se trata en Lieder et al (2015). Se analiza un problema de programación o asignación de tareas a trabajadores en un hogar de ancianos. Cada tarea tiene una pequeña ventana de tiempo (horas en las que preferiblemente se debe realizar esa tarea). Se consideran diferentes niveles de calificación en los trabajadores. El objetivo maximizar el grado de ajuste a las ventanas de tiempo.

En los trabajos de Vlah at al (2011) y Vlah-Jerić and Figueira (2012) se plantea un interesante problema de planificación de pacientes basado en las características concretas de un hospital en Zagreb. Teniendo en cuenta los pacientes que se tiene previsto tratar inicialmente en una determinada fecha, el modelo trata de realizar la programación del mayor número de tratamientos para esa fecha. Se tiene en cuenta la prioridad de cada tratamiento, los recursos humanos y materiales que requiere cada tratamiento y la disponibilidad y capacidad de estos recursos. Se proponen métodos de solución basados en la estrategia búsqueda en entorno variable.

Los modelos de optimización se emplean también para planificar la asistencia a domicilio de pacientes enfermos de SIDA. Concretamente en De Angelis (1998) donde se tiene en cuenta la incertidumbre en cuanto al número de pacientes que solicitarán el servicio y el nivel de cuidado requerido por cada paciente. Estos cuidados incluyen tanto a médicos y enfermeras, como a asistentes sociales.

Dentro de la planificación de horarios y turnos del personal médico, cabe señalar que la inmensa mayoría de trabajos centran su análisis en el personal de enfermería Cheang et al (2003). Así, por ejemplo, algunos estudios construyen un modelo de simulación para analizar y evaluar las necesidades de personal de enfermería en unidades de cuidados intensivos Griffiths et al (2005).

9.4 SERVICIOS SANITARIOS EN PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO

Los países en desarrollo tienen una gran escasez de recursos sanitarios y sufren graves enfermedades. Su esperanza de vida es muy baja en comparación con la de los países industrializados, y la mortalidad infantil suele presentar tasas muy altas. Por ello, la localización de dispensarios, centros de salud y hospitales, la distribución de recursos en estos centros, junto con la adecuada planificación de programas preventivos constituye una tarea fundamental para mejorar la salud de la población de estos países.

Los modelos de IO se utilizan en este contexto desde hace más de cuarenta años, para resolver problemas relacionados con la asignación de recursos para la prevención de enfermedades, como la tuberculosis o la malaria (Parker, 1975; Revelle et al, 1969).

La evaluación de diferentes estrategias para el control y tratamiento de enfermedades sigue siendo un problema de actualidad, con una dificultad añadida cuando las estrategias de prevención pretenden implantarse en zonas con escasa infraestructura médica y social. Muchos trabajos se centran en la prevención y tratamiento del SIDA en países africanos, donde se estima que vive el 70% de la población afectada por esta enfermedad. Por ejemplo, modelos de simulación han sido empleados para evaluar diferentes estrategias de prevención de transmisión del SIDA entre madres e hijos, en el parto o por medio de la lactancia materna Rauner et al (2005).

La escasez de centros sanitarios, junto con las dificultades de accesibilidad que sufre gran parte de la población, por razones geográficas y el escaso desarrollo de las infraestructuras de comunicación, dan una relevancia especial a los problemas de localización de servicios sanitarios en los países en vías de desarrollo. Las técnicas de IO (Rahman and Smith, 200; Flessa, 2003) son utilizadas con éxito en el proceso de decisión de qué tipo de servicio sanitario construir (dispensarios, centro de atención primaria, pequeñas clínicas, grandes hospitales, etc.), y dónde ubicarlos. Los estudios de localización se completan con otros estudios de asignación, reparto y distribución de los recursos sanitarios para actividades preventivas y para medicina curativa. Así por ejemplo en Yarmand et al (2014) se plantea un modelo de programación estocástica para la localización de centros de vacunas antes aparición de epidemias. Este modelo se resuelve mediante algoritmos heurísticos y simulación.

En White et al (2011) se hace una revisión de los principales aplicaciones y aportaciones realizadas hasta ese momento de la Investigación Operativa en países en vías de desarrollo. Se incide en los modelos que han ayudado a la toma de decisiones en política sanitaria.

9.5 PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA CADENA DE SUMINISTRO DE PRODUCTOS MÉDICOS A LOS CENTROS SANITARIOS

Una buena planificación de los problemas relacionados con la distribución de los diferentes productos y aparatos empleados en la asistencia médica, así como una buena gestión de los productos en inventario, puede reducir considerablemente el costo del servicio y tener un importante impacto en la calidad del mismo. Estos problemas de tipo logístico están siendo tratados con especial relevancia en la industria en estos últimos años y, actualmente, se consideran también en el mundo sanitario.

Cabe señalar la variedad de productos suministrados en el contexto sanitario (jeringuillas, guantes de látex, instrumental quirúrgico, medicinas, etc.); las diferentes características de su distribución y almacenamiento (algunos de ellos son muy caros, otros con caducidades cortas, otros con requerimientos especiales para su almacenamiento, etc.); así como los problemas derivados del uso de aparatos especiales (scanner, ecógrafos, rayos, etc.), que requieren operaciones de mantenimiento, reparación y sustitución.

Programas informáticos basados en modelos de optimización sirven de ayuda en la toma de decisiones relacionadas con la distribución de productos farmacéuticos a centros hospitalarios (Swaminathan, 2004).

En esta misma línea el reciente trabajo Jalalpour et al (2015) ha tenido por objeto el desarrollo de una serie de herramientas para la previsión de la demanda de servicios de salud. Estas herramientas se basan en diferentes modelos de predicción y series temporales (en este caso modelos ARMA y variantes) junto a modelos para la toma de decisiones bajo incertidumbre. Así mismo en Hovav and Tsadikovich (2015) se propone un modelo para la gestión de inventarios y distribución de vacunas de gripe. Concretamente se usa un modelo matemático basado en análisis de flujo de red. Se presentan diferentes aplicaciones con datos reales.

9.6 EFICIENCIA SANITARIA

En las últimas décadas se han publicado numerosos artículos relacionados con la evaluación de la eficiencia de las organizaciones sanitarias. Este tipo de investigación se centra en el uso adecuado de los recursos y en identificar fuentes potenciales de ahorro o de mejora de la calidad asistencial. La medida de la eficiencia en organizaciones sanitarias relaciona recursos consumidos con servicios producidos.

La investigación en esta área debe ser revisada cautelosamente y los resultados de los estudios interpretados y usados con mucho cuidado. La dificultad estriba

en cómo medir los servicios producidos y en la calidad de los datos disponibles.

Uno de los métodos más usados para medir la eficiencia en organizaciones sanitarias es el análisis envolvente de datos (Data Envelopment Analysis, DEA) que se basa en modelos de programación lineal. Numerosos estudios Hollingsworth (2003) sobre eficiencia aplican DEA para: evaluar programas de salud rural, medir centros de atención primaria, estudiar centros de salud mental, evaluar la eficiencia de médicos de atención primaria o de un hospital, medir la eficiencia de tratamientos médicos, evaluar las unidades de cuidados perinatales, valorar a los pacientes con traumatismo craneal en unidades de cuidados intensivos, analizar la eficiencia de aparatos portátiles de diálisis, estudiar la eficiencia de servicios de urgencias, etc.

En España se han publicado numerosos estudios (Puig-Junoy, 2000), usando DEA, para medir la eficiencia de centros de atención primaria, de médicos de medicina general, de mutuas de prestaciones sanitarias ambulatorias, así como el efecto sobre la eficiencia sanitaria de la especialización, de la creación de equipos de trabajo o de la descentralización sanitaria.

En trabajos recientes se han empleado otras técnicas. Así en Andrade-Longaray et al, (2015) se utiliza el enfoque Multi-Criterio para el desarrollo de un modelo que puede ayudar a los gerentes de los hospitales universitarios de Brasil a evaluar su gestión institucional y comprobar el grado de cumplimiento de las metas establecidas por las administraciones regionales y federales.

9.7 ESTUDIOS PARA LA PREVENCIÓN Y TRATAMIENTO DE ENFERMEDADES Y OTRAS APLICACIONES CLÍNICAS

Numerosos trabajos se centran en el estudio del coste y de la efectividad de diferentes tratamientos y terapias preventivas, permitiendo la comparación de diferentes políticas de actuación. Así, algunos artículos tratan enfermedades como la retinopatía en enfermos diabéticos; la detección y erradicación de la bacteria *Helicobacter pylori*; la detección y curación de mujeres infectadas por *Chlamydia trachomatis*; programas de prevención de SIDA; tratamientos para la osteoporosis en mujeres tras la menopausia (Stevenson et al, 2005); prevención de enfermedades cardiovasculares (Babad et al, 2002), etc. En este sentido en un muy reciente trabajo (Joly et al, 2015) se presenta un modelo de programación lineal entera mixta para apoyar a los médicos del SIDA en la formulación de planes terapéuticos reales para los pacientes. El modelo se resuelve por métodos de optimización a gran escala. Los resultados indican que la planificación de la terapia basada en este modelo tiene un potencial mucho mayor que las terapias actuales en horizontes de tiempo amplios.

Algunos estudios investigan el problema de inmunización infantil, desde el punto de vista biomédico, programático y económico (Jacobson et al, 2005).

Una gran variedad de aplicaciones clínicas usan diferentes modelos de IO en la lucha contra el cáncer: intentando mejorar la precisión y la objetividad de la diagnosis y prognosis de cáncer de mama por medio de programación lineal (Mangasarian et al, 1995); para diseñar planes de radioterapia externa (Holder, 2003); en la planificación de tratamientos en terapia de radiación interna y en el diseño de un sistema soporte de ayuda a la toma de decisiones clínicas (Lee and Aider, 2004). En esta línea en el reciente trabajo de Christopher et al (2015) se presenta un método de diagnosis de propósito general que combinan modelos de clasificación basado en reglas junto con la metaheurística PSO.

Por último, señalar la utilización de optimización matemática, algoritmos metaheurísticos y redes neuronales para la construcción de sistemas computacionales que ayudan en la interpretación de imágenes de resonancia magnética y de otros tipos de imágenes para diagnosis (Yeh, 2005). Así en Valsecchi et al (2013) se hace una revisión del uso de metaheurísticos al registro de imágenes médicas basado en análisis de intensidades

10. APLICACIONES EN BIOINFORMÁTICA

La Bioinformática (así como la Biología Computacional) se refiere a estudios interdisciplinarios que incluyen campos como la informática, la investigación operativa, la estadística y la química. El principal objetivo de la Bioinformática es resolver problemas de análisis de datos biológicos, normalmente a nivel molecular. Para ello los bioinformáticos organizan, modelan, investigan y descubren una gran cantidad de información biológica que después es almacenada en grandes bases de datos biológicas. Los mayores esfuerzos de investigación en el campo se realizan en el alineamiento de secuencias, el descubrimiento de genes, el acoplamiento de genomas, la predicción de interacciones entre proteínas, el modelado de la evolución, etc. Muchos de estos problemas una vez modelados y formulados resultan ser problemas de optimización difíciles como por ejemplo el problema del alineamiento múltiple, la búsqueda de patrones, el plegamiento de proteínas, entre otros muchos. Estos problemas además de ser difíciles tienen además un fuerte carácter combinatorio y no es de extrañar, por tanto, que en los últimos años hayan surgido con fuerza adaptaciones de varias estrategias metaheurísticas que han demostrado funcionar bien en otros problemas combinatorios.

Comentaremos a continuación algunos de estos problemas que todos ellos se relacionan con cadenas de ADN o proteínas:

- Problema del Descubrimiento de “motifs” en secuencias de ADN en un determinado organismo. Un motif es un pequeño patrón de ácido nucleico (es decir una sub-cadena o secuencia de ADN de pequeño tamaño) que realiza cierta función biológica como, por ejemplo, ser el punto de unión entre proteínas. La identificación de motifs tiene por tanto grandes beneficios desde un punto de vista biológico así como potenciales beneficios médicos.

Estos motifs se encuentran mezclados entre una gran cantidad de información biológica en las secuencias de ADN por lo que descubrirlos no es trivial. Este es un problema de optimización combinatoria NP-hard, es decir de gran complejidad.

Este problema se ha estudiado en González-Alvarez et al (2012) considerando diferentes objetivos:

- 1) maximizar la longitud o tamaño del motif para darnos la certeza de que la solución tiene un significado biológico real y no ha sido formado por casualidad;
 - 2) maximizar el número de secuencias encontradas similares al motif resultante (secuencias que forman el soporte). Cuanto mayor sea el soporte, más robusto será el resultado final, ya que es respaldado por un mayor número de secuencias.
 - 3) maximizar la similitud de las secuencias que forman el soporte del motif resultante entre ellas y con el propio motif.
- Problema de alineamiento de secuencias. Un alineamiento de secuencias en bioinformática es una forma de representar y comparar dos o más secuencias o cadenas de ADN, ARN, o proteínas para resaltar sus zonas de similitud, que podrían indicar relaciones funcionales o evolutivas entre los genes o proteínas comparados. Las secuencias se escriben con las letras (representando aminoácidos o nucleótidos) en una matriz (una fila por secuencia). En cada fila o secuencia, si es necesario, se insertan espacios para que las zonas con idéntica o similar estructura se alineen.

De esta forma con esta representación matricial si varias secuencias de ADN alineadas comparten un ancestro común, las no coincidencias pueden interpretarse como mutaciones puntuales (sustituciones), y los huecos como mutaciones por inserción o eliminación introducidas en uno o ambos linajes en el tiempo que transcurrió desde que divergieron. Por tanto permite la reconstruc-

ción filogenética. El alineamiento de secuencias proteicas, permite detectar regiones de variabilidad o conservación en una familia de proteínas.

Por tanto el alineamiento de secuencias es un problema cuya resolución da grandes beneficios en el campo de la biología y la química. Por otra parte también es un problema combinatorio difícil y cuando el número de elementos del problema es grande (tamaño de las cadenas) el problema no puede ser resuelto por métodos exactos siendo necesario el uso de técnicas aproximadas o heurísticas. Uno de los primeros métodos heurísticos se propuso en Smith and Waterman (1981). En Mount (2004) se explican con detalle algunos de los métodos heurísticos para este problema, incluyendo los populares *FASTA* y *BLASTA*.

- Ensamble de cadenas de ADN para reconstrucción de genomas (cadenas completas de ADN) de un organismo. La obtención de un ensamblado completo y de alta calidad tiene implicaciones interesantes en Medicina y Biología. El problema es encontrar un patrón (del genoma) de menor tamaño posible que contenga a todas las cadenas de partida. Hay que tener en cuenta que las cadenas de partida pueden tener fragmentos idénticos, con lo cual la solución no es trivial. Un trabajo pionero de este campo fue el de Miller and Powell (1994). Trabajos relevantes posteriores fueron los de Prinzie and Van den Poel (2006,2007). Finalmente en Boza et al (2015) se combinan métodos heurísticos con enfoque de máxima verosimilitud.

Referencias bibliográficas

- Aharonson-Daniel L, Paul R, Hedley A. “Management of queues in out-patient departments: the use of computer simulation” *Journal of Management in Medicine* 10, pp. 50-58 (1996)
- Ahmadi M, Seifi A, Tootooni B “A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district” *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review* 75, pp. 145-163 (2015)
- Alabas-Uslu C “A Self-tuning Heuristic for a Multi-objective Vehicle Routing Problem,” *Journal of Operations Research Society* 59, 7, pp. 988-996 (2008)
- Alba E, Martí R (eds.) *Metaheuristic Procedures for Training Neural Networks* Springer, (2006)
- Albareda-Sambola M, Hinojosa Y, Marin A, Puerto J “When centers can fail: A close second opportunity” *Computers & Operations Research* 62, pp. 145-156 (2015)
- Al-Sultan KH “A Tabu Search Approach to the Clustering Problem” *Pattern Recognition* 28, pp. 1443-1451 (1995)
- Alvarez A, Casado S, González-Velarde JL, Pacheco J “A Computational Tool for Optimizing the Urban Public Transport: A Real Application” *Journal of Computer and System Sciences International* 49, 2, 244–252 (2010)
- Andrade-Longaray A, Ensslin L, Rolim-Ensslin S, da Rosa IO “Assessment of a Brazilian public hospital’s performance for management purposes: A soft operations research case in action” *Operations Research for Health Care* 5, pp. 28-48 (2015)
- Ángel-Bello F, Álvarez A, García I “Two improved formulations for the minimum latency problem” *Applied Mathematical Modelling* 37, pp. 2257–2266 (2013)
- Angel-Bello F, Martínez-Salazar I, Alvarez, A, “Minimizing waiting times in a route design problem with multiple use of a single vehicle” *Electronics Notes on Discrete Mathematics* 41 pp. 269–276 (2013)
- Ashton R, Hague L, Brandreth M, Worthing-Ton D, Cropper S. “A simulation-based study of a NHS Walk-in Centre” *Journal of Operational Research Society* 56, pp. 153-161 (2003)
- Babad H, Sanderson C, Naidoo B, White I, Wang D “The development of a simulation model of primary prevention strategies for coronary heart disease” *Health Care Management Science* 5, pp. 269-274 (2002)
- Babu GP, Murty MN “A Near-Optimal Initial Seed Value Selection in K-means Algorithm using Genetic Algorithms” *Pattern Recognition Letters* 14, pp. 763-769 (1993)
- Bal H, Orkcu HH “A new mathematical programming approach to multigroup classification problems” *Computers and Operations Research* 38, 1, pp. 105–111 (2011)

-
- Bala J, Dejong K, Huang J, Vafaie H, Wechsler H “Using Learning to Facilitate the Evolution of Features for Recognizing Visual Concepts” *Evolutionary Computation* 4, 3, pp. 297-311 (1996)
- Battiti R “Reactive Search: Toward Self-Tuning Heuristics” in *Modern Heuristics Search Methods* (Rayward-Smith VJ, editor) John Wiley and Sons Ltd, chapter 4. pp. 61-83 (1996)
- Beaulieu H, Ferland JA, Gendron B, Michelon P. “A mathematical programming approach for scheduling physicians in the emergency room” *Health Care Management Science* 3, pp. 193-200 (2000)
- Bigotte JF, Krass D, Antunes AP, Bermam O “Integrated modeling of urban hierarchy and transportation network planning” *Transportation Research Part A Policy and Practice* 44, 7, pp. 506-522 (2010)
- Boza V, Brejova B, Vinar T “GAML: genome assembly by maximum likelihood” *Algorithms for Molecular Biology* 010, 18 (2015)
- Brucker P “On the Complexity of Clustering Problems” *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* 157, pp. 45-54 (1978)
- Carrizosa E, Martin-Barragan B “Two-group classification via a biobjective margin maximization model” *European Journal of Operational Research* 173, 3, pp. 746–761 (2006)
- Cheang B, Li H, Lim A, Rodrigues B. “Nurse rostering problems, a bibliographic survey” *European Journal of Operational Research* 151, pp. 447-460 (2003)
- Chen S, Jang C “Neural network structure optimization and its application for passenger flow predicting of comprehensive transportation between cities” *Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services* 1-2, pp. 1087-1091 (2007)
- Chevrier R, Liefogheb A, Jourdan L, Dhaenens C (2012) “Solving a dial-a-ride problem with a hybrid evolutionary multi-objective approach: Application to demand responsive transport” *Applied Soft Computing* 12, 4, pp. 1247-1258 (2012)
- Christopher JJ, Nehemiah HK, Kannan A “A Swarm Optimization approach for clinical knowledge mining” *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 121, 3, pp. 137-148 (2015)
- Churchman CW *Introducción a la investigación operativa* Aguilar (1957)
- Corberán A, Fernández E, Laguna M, and Martí R “Heuristic Solutions to the Problem of Routing School Buses with Multiple Objectives” *Journal of the Operational Research Society*.53, 4, pp. 427-435 (2002)
- Corne D, Dhaenens C, Jourdan L “Synergies between operations research and data mining: The emerging use of multi-objective approaches” *European Journal of Operational Research* 221, pp. 469–479 (2012)
- Cotta C, Sloper C, Moscato P “Evolutionary Search of Thresholds for Robust Feature Set Selection: Application to the Analysis of Microarray Data” *Lecture Notes In Computer Science* 3005, pp. 21-30 (2004)
-

-
- Cozzolino A, Rossi S, Conforti A “Agile and Lean Principles in the humanitarian supply chain. The case of the United Nations world food programme” *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management* 2, 1, pp. 16–33 (2012)
- Crespo E, Martí R, Pacheco J (coordinadores) *Procedimientos Metaheurísticos en Economía y Empresa*, Monografías de *Rect@* 3, Tirant lo Blanch (2007)
- Crop F, Lacornerie T, Mirabel X, Lartigau E. “Workflow optimization for robotic stereotactic radiotherapy treatments: Application of Constant Work In Progress workflow” *Operations Research for Health Care* 6, pp. 18-22 (2015)
- Das A, Mazumder TN and Gupta AK “Pareto frontier analyses based decision making tool for transportation of hazardous waste” *Journal of Hazardous Materials* 227, pp. 341-352 (2012)
- De Angelis V “Planning home assistance for AIDS patients in the city of Rome, Italy” *Interfaces* 28, pp. 75-83 (1998)
- De Angelis V, Felici G, Impelluso P. “Integrating simulation and optimisation in health care centre management” *European Journal of Operational Research* 50, pp. 101-114 (2003)
- Delgado C *Nuevas Técnicas Metaheurísticas: Aplicación al Transporte Escolar* Departamento de Economía Aplicada, Universidad de Burgos, Burgos, PhD Thesis (2002)
- Delgado C, Pacheco J “MinMax Vehicle Routing Problems: Application to School Transport in the Province of Burgos” *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* 505, pp. 297-318 (2001)
- Derigs U and Friederichs S “On the application of a transportation model for revenue optimization in waste management: a case study” *Central European Journal of Operations Research* 17, 1, pp. 81-93 (2009)
- Dragan D, Kramberger T and Lipicnik M “Monte Carlo Simulation-based Approach to Optimal Bus Stops Allocation in the Municipality of Lasko” *Promet-Traffic & Transportation* 23, 4, 265-278 (2011)
- Eisted R, Larsen AW and Christensen TH “Collection, transfer and transport of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contribution” *Waste Management & Research* 27, 8, pp. 738-745 (2009)
- El-Sharo M, Zheng B, Yoon SW, Khasawneh MT “An overbooking scheduling model for outpatient appointments in a multi-provider clinic” *Operations Research for Health Care*, 6, pp. 1-10 (2015)
- Escribano Ródenas MC, Busto Caballero AI “Sixto Ríos García: el matemático que impulsó la Estadística española en el siglo XX” *Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española* 12, 2, pp. 369–391 (2009)
- Escudero LF “Algunas reflexiones personales sobre la IO” *BEIO, Boletín de la Sociedad de Estadística e Investigación-Operativa* 25,2, pp. 158-171 (2009)
- Escudero LF, Lopez-Cerda MA “SEIO and the history of OR in Spain” *BEIO, Boletín de la Sociedad de Estadística e Investigación-Operativa* 28,1, pp. 24-56 (2012)
-

-
- Eveborn P, Flisberg P, Ronqwist M. "Laps Care, an operational system for staff planning of home care" *European Journal of Operational Research* 171, pp. 962-976 (2006)
- Everett JE. "A decision support simulation model for the management of an elective surgery waiting system" *Health Care Management Science* 5, pp. 89-95 (2002)
- Feo TA, Resende MGC "A Probabilistic Heuristic for a Computationally Difficult Set Covering Problem" *Operations Research Letters* 8, pp. 67-71 (1989)
- Feo TA, Resende MGC "Greedy Randomized Adaptive Search Procedures" *Journal of Global Optimization* 2, pp. 1-27 (1995)
- Flessa S. "Priorities and allocation of health care resources in developing countries: a case study from de Mtwara region, Tanzania" *European Journal of Operational Research* 150, pp. 67-80 (2003)
- Freed N, Glover F "Simple but powerful goal programming models for discriminant problems" *European Journal of Operational Research* 7, pp. 44-60 (1981).
- Ganster H, Pinz A, Rohrer R, Wildling E, Binder M, Kittler H "Automated Melanoma Recognition" *IEEE Transactions on Medical Imaging* 20, 3, pp. 233-239 (2001)
- García de la Parra A "Racionalización de la red de autobuses de tránsito rápido (BRT). Análisis de diferentes objetivos. Aplicación a la ciudad de México" Dpto. *Economía Aplicada*, Universidad de Burgos. PhD Thesis. (2015)
- García FC, García M, Melián B, Moreno JA, Moreno M "Solving Feature Selection Problem by a Parallel Scatter Search" *European Journal of Operational Research* 169, 2, pp. 477-48 (2006)
- Garrido RA, Lamas P, Pino FJ "A stochastic programming approach for floods emergency logistics" *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review* 75, pp. 18-31 (2015)
- Glover F "A Template for Scatter Search and Path Relinking" in *Artificial Evolution* (Hao JK, Lutton E, Ronald E, Schoenauer M, Syner D, eds.) Springer LNCS 1363, pp. 13-64 (1998)
- Glover F "Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence" *Computers and Operations Research* 13, pp. 533-549 (1986)
- Glover F "Genetic Algorithms and Scatter Search: Unsuspected Potentials" *Statistics and Computing* 4, pp. 131-140 (1994)
- Glover F "Tabu Search: Part I" *ORSA Journal on Computing* 1, pp. 190-206 (1989)
- Glover F "Tabu Search: Part II" *ORSA Journal on Computing* 2, pp. 4-32 (1990)
- Glover F, Laguna M "Tabu Search" in *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems* (C. Reeves ed.) Blackwell Scientific Publishing, pp. 70-141 (1993)
- Glover F, Laguna M *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Boston (1997)
- Gómez JR, Pacheco J, Gonzalo-Orden H "A Tabu Search method for a Bi-objective Urban Waste Collection Problem" *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 30, 1, pp. 36-53 (2015)
-

-
- González-Alvarez DL, Vega-Rodríguez MA, Gómez-Pulido JA, Sánchez-Pérez JM “Prediciendo Motifs en secuencias de ADN aplicando Búsqueda de Entornos Variables Multiobjetivo” *VIII Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados*, Albacete, (2012)
- Griffiths JD, Price-Lloyd N, Dmíthies M, Williams JE “Modelling the requirements for supplementary nurses in an intensive care unit” *Journal of Operational Research Society* 56, pp. 126-133 (2005)
- Hansen P, Mladenovic N “J-Means: A new Local Search Heuristic for Minimum Sum-of-Squares Clustering” *Pattern Recognition* 34, 2, pp. 405-413 (2001)
- Ho SC, Haugland D “Local search heuristics for the probabilistic dial-a-ride problem” *OR Spectrum* 33, 4, pp. 961-988 (2011)
- Holder A. “Designing radiotherapy plans with elastic constraints and interior point methods” *Health Care Management Science* 6, pp. 5-16 (2003)
- Holguín-Veras J, Jaller M, Van Wassenhove LN, Pérez N, Wachtendorf T “On the unique features of post-disaster humanitarian logistics” *Journal of Operations Management* 30, pp. 494–506 (2012)
- Holland J *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor (1975)
- Hollingsworth B. “Non-parametric and parametric applications measuring efficiency in health care” *Health Care Management Science* 6, pp. 203-218 (2003)
- Hong X, Lejeune MA, Noyan N “Stochastic network design for disaster preparedness” *IIE Transactions* 47, 4, SI, pp. 329-357 (2015)
- Hovav S, Tsadikovich D “A network flow model for inventory management and distribution of influenza vaccines through a healthcare supply chain” *Operations Research for Health Care* 5, pp. 49-62 (2015)
- Howard R “Classifying a Population into Homogeneous Groups” in *Operational Research in the Social Sciences* (Lawrence JR editor) Tavistock Publ., London (1966)
- Hoyos MC; Morales RS, Akhavan-Tabatabaei R “OR models with stochastic components in disaster operations management: A literature survey” *Computers & Industrial Engineering* 82, pp. 183-197 (2015)
- Huang K, Jiang Y, Yuan Y, Zhao L “Modeling multiple humanitarian objectives in emergency response to large-scale disasters” *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review* 75, pp. 1-17 (2015)
- Hui LCK, Lam KY, Chea CW “Global optimisation in neural network training” *Neural Computing & Applications* 5, 1, pp 58-64 (1997)
- Inza I, Larranaga P, Sierra B “Feature Subset Selection by Bayesian Networks: A Comparison with Genetic and Sequential Algorithms” *International Journal of Approximate Reasoning*, 27, 2, pp. 143-164 (2001b)
- Inza I, Larrañaga P, Etxeberria R, Sierra B “Feature Subset Selection by Bayesian networks based optimization” *Artificial Intelligence* 123, pp. 157-184 (2000)
-

-
- Inza I, Merino M, Larrañaga P, Quiroga J, Sierra B, Giralda M “Feature Subset Selection by Genetic Algorithms and Estimation of Distribution Algorithms - A Case Study in the Survival of Cirrhotic Patients Treated with TIPS” *Artificial Intelligence In Medicine* 23, 2, pp. 187-205 (2001a)
- Ioachim I, Desrosiers J, Dumas Y, Solomon MM, Villeneuve D “A Request Clustering-Algorithm for Door-to-Door Handicapped Transportation” *Transportation Science* 29, 1, pp. 63-78 (1995)
- Jacobson S, Sewell EC, Karnani T “Engineering the economic value of two paediatric combination vaccines” *Health Care Management Science* 8, pp. 29-40 (2005)
- Jagtenberg CJ, Bhulai S, van der Mei RD “An efficient heuristic for real-time ambulance redeployment” *Operations Research for Health Care* 4, pp. 27-35 (2015)
- Jain A, Zongker D “Feature Selection: Evaluation, Application, and Small Sample Performance”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 19, 2, pp. 153-158 (1997)
- Jalalpour M, Gel Y, Levin S “Forecasting demand for health services: Development of a publicly available toolbox” *Operations Research for Health Care* 5, pp. 1-9 (2015)
- Jancey RC “Multidimensional Group Analysis” *Australian Journal of Botany* 14, pp. 127-130 (1966)
- Joly M, Pinto JM, Rondo PHC; Rodrigues R, Ferreira JLP, Cavalcanti JS, Brigido LFM, Odloak D “Combine operations research with molecular biology to stretch pharmacogenomics and personalized medicine-A case study on HIV/AIDS” *Computers & Chemical Engineering* 80, pp. 114-129 (2015)
- Jones D, Collins A, Hand C “A classification model based on goal programming with non-standard preference functions with application to the prediction of cinema-going behavior” *European Journal of Operational Research* 177, 1, pp. 515–524 (2007)
- Jones DF, Mirrazavi ZK, Tamiz M “Multi-objective meta-heuristics: an overview of the current state-of-the-art” *European Journal of Operational Research* 137, 1, pp. 1-9 (2002)
- Jourdan L, Dhaenens C, Talbi E “A Genetic Algorithm for Feature Subset Selection in Data-Mining for Genetics”. *MIC 2001 Proceedings, 4th Metaheuristics International Conference* pp. 29-34 (2001)
- Jozefowicz N, Semet F, Talbi EG “Multi-objective vehicle routing problems” *European Journal of Operational Research* 189, 2, pp. 293-309 (2008)
- Kennedy J, Eberhart R “Particle Swarm Optimization” *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks* Vol. IV, pp. 1942–1948 (1995)
- Kilci F, Kara BY, Bozkaya B “Locating temporary shelter areas after an earthquake: A case for Turkey” *European Journal of Operational Research* 243, 1, pp. 323-32 (2015)
- Kim JH, Soh S “Designing Hub-and-Spoke School Bus Transportation Network: A Case Study of Wonkwang University” *Promet-Traffic & Transportation* 24, 5, 389-394 (2012)
-

-
- Kirpatrick S, Gelatt Jr CD, Vecchi MP "Optimization by Simulated Annealing" *Science* 220, pp. 671-680 (1983)
- Kohavi R "Wrappers for Performance Enhancement and Oblivious Decision Graphs" Stanford University, Computer Science Department (1995)
- Kovacs G, Spens K "Humanitarian logistics in disaster relief operations" *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 37, 2, pp. 99-114 (2007)
- Laguna M (2002) "Scatter Search" in Handbook of Applied Optimization (Pardalos PM and Resende MGC, eds.) Oxford University Press pp. 183-193 (2002)
- Lassiter K, Khademi A, Taaffe KM "A robust optimization approach to volunteer management in humanitarian crises" *International Journal of Production Economics* 163, pp. 97-111 (2015)
- Lazzaroni F, Righini G "Optimal re-organization of a hemodynamics units system: A case study" *Operations Research for Health Care* 5, pp. 10-20 (2015)
- Lee EK, Aider M. "Optimization and decision support in brachytherapy treatment planning". In: Brandeau MA, Sainfort F, Pierskalla WP, editors. *Operations Research and Health Care*. Kluwer pp. 721-740 (2004)
- Lee S, Yang J, Oh KW (2003) "Prediction of Molecular Bioactivity for Drug Design Using a Decision Tree Algorithm" *Lecture Notes in Artificial Intelligence* 2843 pp. 344-351 (2003)
- Lewis PM "The Characteristic Selection Problem in Recognition Systems" *IEEE Transactions on Information Theory* 8, pp. 171-178 (1962)
- Li L, Zhang H, Wang X, Lu W, Mu Z "Urban Transit Coordination Using an Artificial Transportation System" *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12, 2, 374-383 (2011)
- Lieder A, Moeke D, Koole G, Stolletz R "Task scheduling in long-term care facilities: A client-centered approach" *Operations Research for Health Care* 6, pp. 11-17 (2015)
- Liu H, Liu T, Liu L, Guo HC, Yu YJ, Wang Z "Integrated Simulation and Optimization Approach for Studying Urban Transportation-Environment Systems in Beijing" *Journal of Environmental Informatics* 15, 2, pp. 99-110 (2010)
- Liu H, Motoda H *Feature Selection for Knowledge Discovery and Data Mining* Boston, Kluwer Academic (1998)
- Mandujano P, Giesen R, Ferrer JC "Model for Optimization of Locations of Schools and Student Transportation in Rural Areas" *Transportation Research Record* 2283, pp. 74-80 (2012)
- Mangasarian OL "Linear and Nonlinear Separation of Patterns by Linear Programming" *Operations Research* 13, pp. 444-452 (1965)
- Mangasarian OL "Misclassification minimization" *Journal of Global Optimization* 5, pp. 309-323 (1994)
-

-
- Mangasarian OL, Street WN, Wolberg WH “Breast cancer diagnosis and prognosis via linear programming” *Operations Research* 43, 4, pp. 570-577 (1995)
- Marler RT, Arora JS “Survey of multi-objective optimization methods for engineering” *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26, pp. 369-395 (2004)
- Miller MJ, Powell JI “A Quantitative Comparison of DNA Sequence Assembly Program” *Journal of Computational Biology* 1, 4, pp. 257-269 (1994)
- Mladenovic N “A Variable Neighborhood Algorithm - A New Metaheuristic for Combinatorial Optimization” *Abstracts of papers presented at Optimization Days*, Montreal, pp. 112 (1995)
- Molina J “Multi-objective Metaheuristics: Overview and current trends” in http://eco-mat.ccee.uma.es/mateco/JMolina/SORG_JMolina.pdf(2012)
- Moscato P “*On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts: Toward Memetic Algorithms*” Caltech Concurrent Computation Program, C3P Report 826 (1989)
- Mount DM. (2004). *Bioinformatics: Sequence and Genome Analysis* 2nd ed. Cold Spring Harbor Laboratory Press: Cold Spring Harbor, New York.
- Moura JL, Ibeas A, dell’Olio L “Optimization-Simulation Model for Planning Supply Transport to Large Infrastructure Public Works Located in Congested Urban Areas“ *Networks and Spatial Economics* 10, 4, pp. 487-507 (2010)
- Narendra PM, Fukunaga K “A Branch and Bound Algorithm for Feature Subset Selection” *IEEE Transactions on Computers* 26, 9, pp. 917-922 (1977)
- Newman JR *El Mundo de las matemáticas* Grijalbo (1956)
- Ozdamar L, Ertem MA “Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics” *European Journal of Operational Research* 244, 1, pp. 55-65 (2015)
- Pacheco J “A Scatter Search Approach for the Minimum Sum-of-Squares Clustering Problem” *Computers & Operations Research* 32, 8, pp. 1325-1335 (2005)
- Pacheco J, Álvarez A, Casado S, Alegre J “Heuristic Solutions for Locating Health Resources” *IEEE Intelligent Systems* 23, 1, pp. 57-63 (2008)
- Pacheco J, Alvarez A, Casado S, Gonzalez-Velarde JL “A tabu search approach to an urban transport problem in northern Spain” *Computers and Operations Research* 36, 3, pp. 967-979 (2009)
- Pacheco J, Caballero R, Laguna M, Molina J “Bi-objective Bus Routing: An Application to School Buses in Rural Areas” *Transportation Science* 47, 3, pp. 397-411 (2013)
- Pacheco J, Casado S “Solving two location models with few facilities by using a hybrid heuristic. A real health resources case” *Computers & Operations Research* 32, 12, pp. 3075-3091 (2005)
- Pacheco J, Casado S, Angel-Bello F, Alvarez A “Bi-Objective Feature Selection for Discriminant Analysis in Two-Class Classification” *Knowledge-Based Systems* 44, pp. 57-64 (2013)
-

-
- Pacheco J, Casado S, Núñez L “A Variable Selection Method based in Tabu Search for Logistic Regression Models” *European Journal of Operational Research* 199, 2, pp. 506–511 (2009)
- Pacheco J, Casado S, Núñez L, Gómez O “Analysis of New Variable Selection Methods for Discriminant Analysis” *Computational Statistics and Data Analysis* 51, 3, pp. 1463–1478 (2006)
- Pacheco J, Martí R “Tabu Search for a Multiobjective Routing Problem” *Journal of the Operational Research Society* 57, pp. 29–37 (2006)
- Paquette J, Bellavance F, Cordeau JF, Laporte G “Measuring quality of service in dial-a-ride operations: the case of a Canadian city” *Transportation* 39, 3, pp. 539–564 (2012)
- Park J, Kim BI “The school bus routing problem: A review” *European Journal of Operational Research* 202, 2, pp. 311–319 (2010)
- Parker A. “Programme selection/resource allocation model for control of malaria and related parasitic diseases” *Computers & Operations Research* 10, pp. 375–389 (1975)
- Parragh SN, Cordeau JF, Doerner KF, Hartl RF “Models and algorithms for the heterogeneous dial-a-ride problem with driver-related constraints” *OR Spectrum* 34, 3, pp. 593–633 (2012)
- Parragh SN, Doerner KF, Hartl RF, Gandibleux X “A Heuristic Two-Phase Solution Approach for the Multi-Objective Dial-A-Ride Problem” *Networks* 54, 4, pp. 227–242 (2009)
- Parragh SN, Schmid V “Hybrid column generation and large neighborhood search for the dial-a-ride problem” *Computers & Operations Research* 40, 1, pp. 490–497 (2013)
- Prinzie A, Van den Poel D “Incorporating sequential information into traditional classification models by using an element/position-sensitive SAM” *Decision Support Systems* 42, 2, pp. 508–526 (2006)
- Prinzie A, Van den Poel D “Predicting home-appliance acquisition sequences: Márkov/Márkov for Discrimination and survival analysis for modeling sequential information in NPTB models” *Decision Support Systems* 44, 1, pp. 28–45 (2007)
- Puig-Junoy J. “Eficiencia en atención primaria de salud: una revisión crítica de las medidas frontera” *Revista Española de Salud Pública* 74, pp. 1–16 (2000)
- Rahman S, Smith D. “Use of location-allocation models in health service development planning in developing nations” *European Journal of Operational Research* 123, pp. 437–452 (2000)
- Rancourt ME, Cordeau JF, Laporte G, Watkins B “Tactical network planning for food aid distribution in Kenya” *Computers & Operations Research* 56, pp. 68–83 (2015)
- Ratcliffe J, Young T, Buxton M, Eldabi T, Paul R, Burroughs A, Papatheodoridis G, Rolles K. “A simulation modelling approach to evaluating alternative policies for the management of the waiting list for liver transplantation” *Health Care Management Science* 4, pp. 117–124 (2001)
- Rauner M, Bajmoczy N “How many AEDs in which region? An economic decision model for the Austrian Red Cross” *European Journal of Operational Research* 150, pp. 3–18 (2003)
-

-
- Rauner MS, Brailsford SC, Flessa S. "Use of discrete-event simulation to evaluate strategies for the prevention of mother-to-child transmission of HIV in developing countries" *Journal of Operational Research Society* 56, pp. 222-233 (2005)
- Renkli C, Duran S "Pre-Positioning Disaster Response Facilities and Relief Items" *Human and Ecological Risk Assessment* 21, 5, SI, pp. 1169-1185 (2015)
- Revelle C, Feldman F, Lynn WR. "An optimization model of tuberculosis epidemiology" *Management Science* 16, pp. 190-211 (1969)
- Rivera JC, Afsar HM, Prins C "A multistart iterated local search for the multitrip cumulative capacitated vehicle routing problem" *Computational Optimization and Applications* 61, pp. 159-187 (2015)
- Rohleder T, Klassen K. "Rolling horizon appointment scheduling: a simulation study" *Health Care Management Science* 5, pp. 201-209 (2002)
- Ruisanchez F, dell'Olio L, Ibeas A "Design of a tabu search algorithm for assigning optimal bus sizes and frequencies in urban transport services" *Journal of Advanced Transportation* 46, 4, 366-377 (2012)
- Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ "Learning internal representations by error propagation" in *Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition*, vol. 1 (Rumelhart DE and McClelland JL, eds.) Cambridge, MA: MIT Press. pp. 318-362 (1986)
- Salman FS, Yucel E "Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case" *Computers & Operations Research* 62, pp. 266-281 (2015)
- Schilde M, Doerner KF, Hartl RF "Metaheuristics for the dynamic stochastic dial-a-ride problem with expected return transports" *Computers & Operations Research* 38, 12, pp. 1719-1730 (2011)
- Schmid V "Hybrid large neighborhood search for the bus rapid transit route design problem" *European Journal of Operational Research* 238, 2, 427-437 (2014)
- Schölkopf B, Smola AJ *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization and Beyond*, MIT Press (2001)
- Scholten K, Scott PS, Fynes B "(Le) agility in humanitarian aid (NGO) supply chains" *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 40, 8/9, pp. 623-635 (2010)
- Sebestyen G *Decision-Making Processes in Pattern Recognition* New York, MacMillan. (1962)
- Sharma S, Mathew TV "Multiobjective network design for emission and travel-time trade-off for a sustainable large urban transportation network" *Environment and Planning B-Planning and Design* 38, 3, pp. 520-538 (2011)
- Shawe-Taylor J, Cristianini N *Support Vector Machines and other kernel-based learning methods*, Cambridge University Press (2000)
- Shechter SM, Bryce CL, Alagoz O, Kreke JE, Stahl JE, Schaefer AJ, Angus DC, Roberts MS. "A clinically based discrete-event simulation of end-stage liver disease and the organ allocation process" *Medical Decision Making* 25, pp. 199-209 (2005)
-

-
- Sheu JB, Pan C “Relief supply collaboration for emergency logistics responses to large-scale disasters” *Transportmetrica A-Transport Science* 11, 3, pp. 210-242 (2015)
- Shi Y, Eberhart R “A modified particle swarm optimizer” *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Anchorage (USA), pp. 69–73 (1998)
- Shy S, Suganthan PN “Feature Analysis and Clasification of Protein Secondary Structure Data” *Lecture Notes in Computer Science* 2714, pp. 1151-1158 (2003)
- Sierra B, Lazkano E, Inza I, Merino M, Larrañaga P, Quiroga J “Prototype Selection and Feature Subset Selection by Estimation of Distribution Algorithms. A Case Study in the Survival of Cirrhotic Patients Treated with TIPS” *Lecture Notes in Artificial Intelligence* 2101, pp. 20-29 (2001)
- Silver EA, Vidal RV, Werra (de) D “A Tutorial on Heuristic Methods” *European Journal of Operational Research* 5, 3, pp. 153-162 (1980)
- Smith T, Waterman M (1981) “Identification of Common Molecular Subsequences” *Journal of Molecular Biology* 147, 1, pp. 195-197.
- Stahl JE, Ratther D, Wiklund R, Lester J, Bein-Feld M, Gazelle S. “Reorganizing the system of care surrounding laparoscopic surgery: A cost-effectiveness analysis using discrete- event simulation” *Medical Decision Making* 24, pp. 461-471 (2004)
- Steubing B, Zah R, Ludwig C “Heat, Electricity, or Transportation? The Optimal Use of Residual and Waste Biomass in Europe from an Environmental Perspective” *Environmental Science & Technology* 46, 1, pp. 164-171 (2012)
- Stevenson MD, Brazier JE, Calvert NW, Lloyd-Jones M, Oakley JE, Kanis JA “Description of an individual patient methodology for calculating the cost-effectiveness of treatments for osteoporosis in women” *Journal of Operational Research Society* 56, pp. 214-221 (2005)
- Swaminathan J, Ashe M, Duke K, Maslin L, Wilde L. “Distributing Scarce drugs for the Medpin Program” *Interfaces* 34, pp. 353-358 (2004)
- Swisher J, Jacobson S. “Evaluating the design of a family practice healthcare clinic using discrete-event simulat”ion” *Health Care Management Science* 5, pp. 75-88 (2002)
- Swisher JR, Jacobson S H, Jun J, Balci O. “Mod-eling and analyzing a physician clinic environment using discrete event (visual) simulation” *Computers & Operations Research* 28, pp. 105-125 (2001)
- Taha HA *Investigación de Operaciones Séptima Edición Alfaomega* (2004)
- Tamoto E, Tada M, Murakawa K, Takada M, Shindo G, Teramoto K, Matsunaga A, Komuro K, Kanai M, Kawakami A, Fujiwara Y, Kobayashi N, Shirata K, Nishimura N, Okushiba SI, Kondo S, Hamada J, Yoshiki T, Moriuchi T, Katoh H “Gene expression Profile Changes Correlated with Tumor Progression and Lymph Node Metastasis in Esophageal Cancer” *Clinical Cancer Research* 10, 11, pp. 3629-3638 (2004)
- Tuzkaya UR, Yilmazer KB, Tuzkaya G “An Integrated Methodology for the Emergency Logistics Centers Location Selection Problem and its Application for the Turkey Case” *Journal of Homeland Security and Emergency Management* 12, 1, pp. 121-144 (2015)
-

-
- Utley M, Gallivan S, Davis K, Daniel P, Reeves P, Worrall J. "Estimating bed requirements for an intermediate care facility" *European Journal of Operational Research* 150, pp. 92-100 (2003)
- Valsecchi A, Damas S, Santamaria J "Evolutionary Intensity-based Medical Image Registration: A Review" *Current Medical Imaging Reviews* 9, 4, pp. 283-297 (2013)
- Van Wassenhove LN "Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear" *Journal of Operations Research Society* 47, 5, pp.475–489 (2006)
- Verma A, Gaukler GM "Pre-positioning disaster response facilities at safe locations: An evaluation of deterministic and stochastic modeling approaches" *Computers & Operations Research* 62, pp. 197-209 (2015)
- Vitoriano B, Tinguaro-Rodriguez J, Tirado G, Martin-Campo FJ, Ortuno MT, Montero J "Intelligent Decision-Making Models for Disaster Management" *Human and Ecological Risk Assessment* 21, 5, SI, pp. 1341-1360 (2015)
- Vlah S, Lukac Z, Pacheco J "Use of VNS Heuristic for Scheduling of Patients in Hospital" *Journal of Operational Research Society* 62, 7, pp. 1227–1238 (2011)
- Vlah-Jerić S, Figueira JR "Multi-objective scheduling and a resource allocation problem in hospitals" *Journal of Scheduling* 15, 5, pp-513-535 (2012)
- White L, Smith H, Currie C "OR in developing countries: A review" *European Journal of Operational Research* 208, 1, pp. 1-11 (2011)
- Wong MLD, Nandi AK "Automatic Digital Modulation Recognition Using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm" *Signal Processing* 84, 2, pp. 351-365 (2004)
- Xu G, Papageorgiou LG "A mixed integer optimisation model for data classification" *Computers and Industrial Engineering* 56, 4 pp. 1205–1215 (2009)
- Yarmand H, Ivy JS, Denton B, Lloyd AL "Optimal two-phase vaccine allocation to geographically different regions under uncertainty" *European Journal of Operational Research* 233, 1, pp. 208-219 (2014)
- Yeh JY, Wu C, Lin H, Chai J "Myocardial border detection by branch and bound dynamic programming in magnetic resonance images" *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 79, pp. 19-29 (2005)
- Zanakis SH, Evans JR "Heuristic Optimization: When, Why and How to Use It" *Interfaces*, 11, 5, pp. 84-91 (1981)
- Zhu Y, Lin CJ, Zhong Y, Zhou Q, Lin CJ, Chen C "Cost optimization of a real-time GIS-based management system for hazardous waste transportation" *Waste Management & Research* 28, 8, pp. 723-730 (2010)
- Zidi I, Mesghouni K, Zidi K, Ghedira K "A multi-objective simulated annealing for the multi-criteria dial a ride problem" *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25, 6, 1121-1131 (2012)
- Zonderland ME, Boucherie RJ, Carter MW, Stanford DA "Modeling the effect of short stay units on patient admissions" *Operations Research for Health Care* 5, pp. 21-27 (2015)
-

