

## Decisiones Cuantitativas en la Gestión de una Red Regional de Laboratorios Clínicos

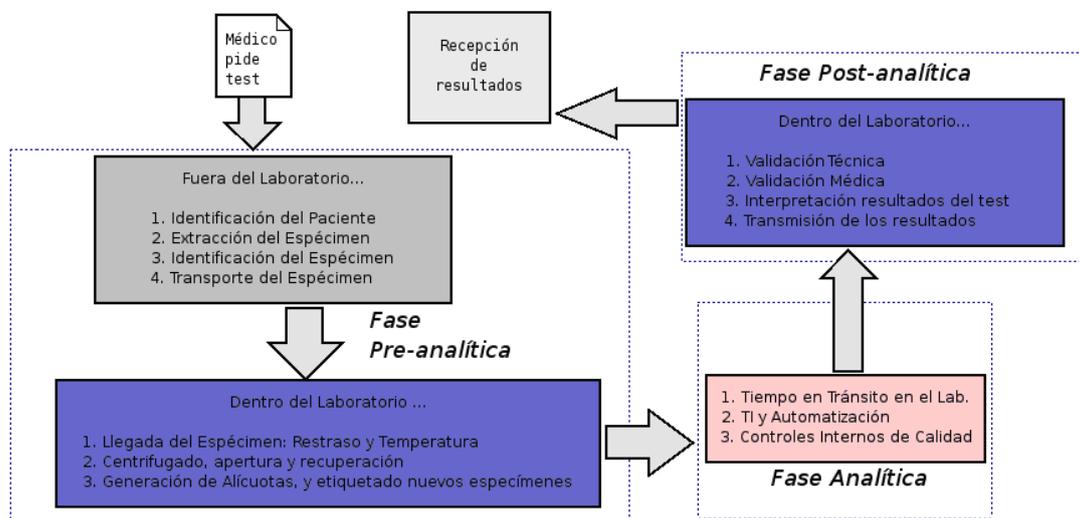
José Luis Andrade-Pineda<sup>1</sup>, Pedro L. González-R<sup>1</sup>, José Manuel Framiñán Torres<sup>1</sup>, José Manuel Molina-Pariente<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Organización. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n. 41092. Sevilla. jlandrade@esi.us.es , pedroluis@esi.us.es , jose@esi.us.es , jmolinap@esi.us.es

**Palabras clave:** Red de Laboratorios Clínicos, transporte especímenes, flujo multicommodity

### 1. Introducción

Cada vez más, los decisores políticos y gestores del área sanitaria emplean técnicas de Investigación Operativa para racionalizar sus decisiones de gestión. En el Sistema Andaluz de Salud, la realización de pruebas clínicas forma parte fundamental del diagnóstico, de las terapias de control y del seguimiento al estado de salud de los ciudadanos. En un contexto en el que la automatización de los Laboratorios Clínicos es un hecho, los esfuerzos para el ofrecimiento de un sistema de ejecución de pruebas clínicas de calidad se centran en la llamada fase preanalítica: la que antecede a la llegada física de la muestra clínica al laboratorio donde se ejecuta. En la Figura 1 se presentan los pasos básicos de todo el proceso de realización de tests clínicos, separando en fases preanalítica, analítica y postanalítica.



**Figura 1.** Fases en el Proceso de Test Clínicos

Existen más de 1500 puntos de demanda a través de los cuales se da servicio a los más de 8 millones de habitantes de Andalucía. La extracción de un espécimen a un paciente en alguno de ellos inicia un proceso que culmina con la ejecución de un test clínico sobre ese espécimen

\* Trabajo en el marco del proyecto de investigación "CORAL- Coordinación y Optimización de la Red Andaluza de Laboratorios", financiado por la Junta de Andalucía.

en alguno de los laboratorios clínicos de la red. De todos los pasos de este proceso (véase Figura 1), la mayor fuente de errores se localiza en la fase preanalítica (Plebani et al., 2006; Schleicher, 2006), esencialmente ligados a errores en la toma de la muestra (uso de un tubo o contenedor inapropiado, error en el código de barras de identificación,...) o en el transporte (pérdidas de estabilidad por retardos excesivos o temperatura inapropiada).

Este trabajo presenta un estudio para la optimización del flujo de pruebas clínicas (tubos con especímenes clínicos) dentro de la Red Andaluza de Laboratorios Clínicos (RALC), constituida por 30 centros totalmente equipados, habitualmente situados en complejos hospitalarios. Esta red está organizada de forma jerárquica, de la misma manera que ocurre con los hospitales públicos andaluces. Hasta ahora, la asignación de centros (demandantes de pruebas) a miembros de la RALC se ha realizado según geografía, por su relación provincial o incluso por relaciones que nada tienen que ver con una planificación ordenada. Según han manifestado los gestores de esta red, es política prioritaria la satisfacción del cliente (paciente), para lo que es necesario mejorar la accesibilidad del servicio (accesibilidad geográfica) así como la calidad del mismo, lo cual pasa por reorganizar / repartir los flujos de las pruebas entre los diferentes laboratorios clínicos. Así pues, con consideración de costes, accesibilidad del servicio, requerimientos de calidad, demanda y capacidad instalada en cada uno de los miembros de la red, se deben tomar decisiones relativas a los transportes de cada prueba clínica hasta el laboratorio clínico apropiado donde debe ejecutarse.

Así planteado, este problema de decisión sugiere apoyarse en una formulación de problema de flujo en red. No obstante, lo primero será conocer el estado del arte de este problema específico aplicado a redes de salud y, por tanto, realizar una revisión de la literatura.

## **2. Revisión Sistemática de la Literatura**

Una revisión sistemática es una forma metodológica precisa de identificar, evaluar y analizar los estudios publicados de una materia en concreto (Kitchenham, 2004). Existe mucha literatura relacionada con problemas de flujo en red y algunos otros problemas clásicos que pueden ser de interés para el modelado de la RALC, por lo que se ha realizado una revisión sistemática para conocer el estado del arte en ‘problemas de flujo en red y logística en redes de salud’. Para ello se conformó un equipo de revisión, en el seno del cual se define un alcance de la revisión y unos términos de búsqueda: ‘clinical labs specimen transportation problem’, ‘clinical specimen distribution’, ‘hospital network transport’, ‘laboratory transport model’. Se decidió incluir sólo trabajos recientes, posteriores al año 1995, en los que se tuviera presente el paradigma actual de integración intensiva de las Tecnologías de Información en los Laboratorios (uso generalizado de los SIL, Sistemas de Información de Laboratorio), y trabajos con una calidad contrastada (sólo revistas científicas o actas de congresos de impacto).

En el proceso de conducción de la revisión surgieron nuevos términos de búsqueda: ‘perishable’, ‘lead time’, ‘optimization/optimisation’, ‘distribution’, ‘modelling’, ‘solving’, ‘managemet’, ‘scheduling’. Todo el proceso de conducción se realizó entre diciembre de 2007 y septiembre de 2008, siendo las siguientes bases de datos de referencias bibliográficas las fuentes elegidas: SCOPUS, ScienceDirect, SCIRUS, ISI Web of Science, Business Premier Source, IEL, Google Scholar y Engineering Village (Bailey, 2007).

Enfoque	Modelo	Objetivos	Resolución	Aplicación	Referencia
Búsqueda de nodos y secuenciación	TSP (Travelling Salesman Problem): TSP multiperiodo con demandas estocásticas, urgentes y normales.	Mínimización de los costes de entrega promediados en el largo plazo, cuando son conocidas las probabilidades de las demandas.	Utilización de Procesos de Markov, y por ello útil sólo en una red con un número limitado de nodos.	Sí. Distribución desde Bancos de Sangre.	(Andreatta y Julli, 2008)
	TSP: Aplicación práctica a la entrega de sangre, con demandas estocásticas, urgentes y normales.	Mínimización de los costes de entrega promediados en el largo plazo.	Algoritmos de Colonización de Hormigas.	Sí. Distribución de Sangre.	(Doerner et al., 2008)
	VRPTW( Vehicle Routing Problem with Time Windows): Distribución de fruta y verduras.	Mínimización de costes. Costes función de la distancia, la duración del trayecto y utilización de penalización por retrasos (pérdidas de calidad).	Heurísticas Búsqueda Tabú	Sí. Distribución de Alimentos Frescos.	(Osvald y Stirn, 2008)
	TSP- MTZ (Miller, Tucker, Zemlin): Secuenciación de la Tareas de Cosecha	Mínimize costs, with balance of operation costs together with a quality loss penalty function.	Resolución Exacta de un problema MIP (Mixed Integer Programming).	Sí. Programación de las Cosechas de Uva.	(Ferrer et al., 2008)
Transporte	Producción y Transporte, con Mermas Calidad Comercio Internacional de Productos Perecederos	Mínimización de los costes de producción, mermas y transporte.	N.A.	N.A. Estudio sectorial	(Woods et al., 2006)
Flujo en red: selección de arcos y asignación de flujo	MFC (MultiCommodity Flow): Estrategia de transporte marítimo de petróleo	Multiobjetivo: mínimo coste de transporte, pero también incorporando la minimización de los riesgos económicos derivados de potenciales derrames.	Programación Meta, con metodología de soluciones iterativas.	Sí. Transporte Marítimo Crudo.	(Iakovou, 2001)
	MCF (MultiCommodity Flow): Diseño y flujo en red con costes de arcos dependiente de flujos en otros arcos.	Mínimización de costes de transporte, con costes dependientes de la cantidad de carga en toda la red operada por el mismo carrier aéreo.	Resolución Exacta de un problema MIP (Mixed Integer Programming).	Sí. Empresa de Paquetería Internacional: asignación de carga a sus proveedores (carriers aéreos).	(Cohn et al., 2008)
Localización y Asignación	Cadena de Suministro Bi-etapa Monoproducto: Producción, Distribución y Control de Inventario, en un horizonte de planificación fijo.	Multiobjetivo: Coste Total del sistema, Tiempos de Entrega demoras para las Demandas, Tiempos de Producción, Número Total de Demandas retrasadas, Retraso Total Acumulado, Desviación del Número Total de Demandas	Combinación de Algoritmos Genéticos y Análisis Jerárquico de Procesos (AHP, Analysis Hierarchy Process).	No. Discusión Teórica y simulaciones numéricas.	(Chan y Chung 2005)
Logística Integral (Control Inventario) Multiperiodo	Planificación de Producción y Transporte: Problema MCF (MultiCommodity Flow) para Cadena de Suministro Bi-etapa de multiproducto.	Mínimización de los costes de producción, inventario y transporte.	Heurística Primaldual	No. Discusión Teórica y simulaciones numéricas.	(Eksioglu y Jin, 2006)
	Planificación de Producción y Transporte: Problema de Flujo en Red para Cadena de Suministro Bi-etapa de producto perecedero.	Mínimización de los costes de producción, inventario y transporte.	Heurística basada en descomposición Lagrangiana.	No. Discusión Teórica y simulaciones numéricas.	(Eksioglu et al., 2006)
Planificación y Secuenciación	Distribución y Secuenciación: Bucle de Planificación y Evaluación para el problema de Contingentes de Múnición.	Mínimización de los retrasos en las entregas de los ítems (plazos de entrega) y maximización de la utilización de los elementos de transporte.	Heurísticas, usando la descomposición de Dantzig-Wolfe.	Sí. Herramienta desarrollada para programar desplazamientos de armamento/ munición del ejército americano.	(Clark et al., 2004)
Planificación y secuenciación de despacho	VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows): Plan de Producción y Reparto de hornigón.	Maximización del beneficio en cinco aproximaciones al problema: Admisión de pedidos, plan de tiempos de llegada, planificación del día siguiente, planificación en tiempo real y planificador de entregas.	Técnicas de optimización combinatoria exactas.	Sí. Empresa de Fabricación de hornigón, y plan de despachos para servir los puntos de demanda.	(Durbin y Hoffman, 2008)

Tabla 1. Revisión de Literatura: trabajos seleccionados.

Los principales resultados de la revisión se muestran en la Tabla 1, donde los trabajos seleccionados se listan con detalle del tipo de problema, sus objetivos y el método de resolución adoptado. Se identifican tres tipos de modelos que guardan relación con nuestro problema: Modelos de Red Básica, Modelos de Red Logística y Modelos de Red Avanzados.

En Modelos de Red Básica se agrupa el núcleo de modelos de red, como el de ruta mínima (elección de nodos y su secuencia), el de árbol mínimo (elección de arcos) y el de maximización del flujo (selección de arcos y asignación de flujo). En este grupo se encontrarían problemas clásicos como: asignación, transporte, el problema del viajante, rutas de vehículos, flujo multicommodity... siempre en torno a una estructura de grafo, aunque obviamente con las particularidades de cada caso. Luego, también en torno a grafos pero en referencia a la cadena de suministro, se encontrarían los llamados Modelos de Red Logística, desde los modelos monoproducto a los multiproducto y desde los lineales y deterministas a otros no lineales. Finalmente aparece un grupo de redes especiales, casi en todos los casos en torno a formulaciones espacio-tiempo (replicación temporal de una red espacial: cada nodo de red es un nodo espacial en un instante) y que se han denominado Modelos de Red Avanzados.

Relacionados con redes de distribución sanitarias encontramos los trabajos de (Andreatta y Lulli, 2008) y de (Doerner et al., 2008), ambos usando el enfoque de problema del viajante para optimizar la entrega de sangre a hospitales desde un banco de sangre gestionado por la Cruz Roja Austríaca. En ambos casos hay dos tipos de entregas: regulares (entrega en 2 días) y urgentes (entregas en el día). En el primer trabajo se usa un método de resolución de cadenas de Markov, lo que puede aplicarse a un problema con pocos nodos, pero no a uno con cientos de ellos como es nuestro caso. El segundo de los trabajos sí que pudiera usarse para una red con más nodos, presentando un método de resolución basado en colonia de hormigas.

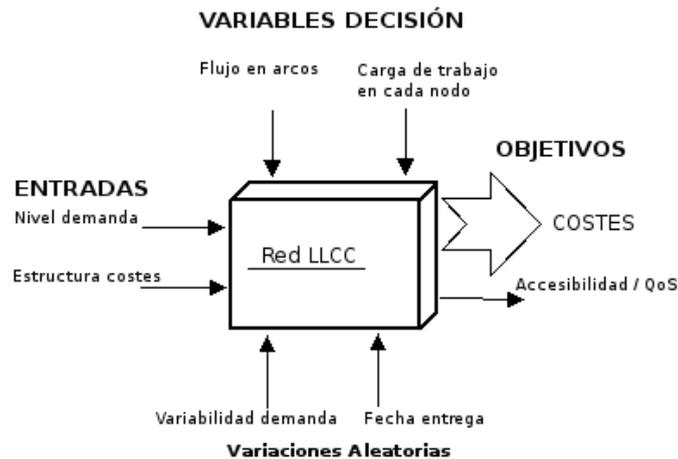
Diferentes tipos de muestra viajan a través de la RALC, por lo que la búsqueda de un modelado multicommodity nos lleva a centrar la atención de nuestra revisión en trabajos MCF (Multi-Commodity Flow). Se localizan aplicaciones reales variadas: transporte de paquetería (Cohn et al., 2008), transporte marítimo (Iakovou, 2001), contingentes de munición (Clark et al., 2004), producción y distribución de hormigón (Durbin and Hoffman, 2008), etc. No obstante, hasta donde conocemos, no existen trabajos en los que se estudien específicamente los problemas logísticos identificados en el problema RALC.

La revisión del estado del arte nos ha ayudado a identificar técnicas de modelado y resolución, y algunos ejemplos de la literatura que guardan ciertas similitudes con el problema planteado, aunque presentan dificultades en su adopción para la RALC. En los siguientes apartados se formaliza el problema de planificación anual de la RALC (plan de producción y transporte), con explicitación de las reglas para la construcción del modelo funcional de red y las hipótesis aplicadas, y la formulación matemática con la que se resuelve dicho modelo.

### **3. Modelado de la Red de Laboratorios Clínicos**

Los objetivos con que los gestores se plantean una optimización de la RALC son: la satisfacción del cliente (paciente), la calidad y garantía de accesibilidad del servicio (accesibilidad geográfica) y la minimización de costes.

Así pues, con consideración de costes, accesibilidad del servicio, requerimientos de calidad, demanda y capacidad instalada en cada uno de los miembros de la red (nodos), se deben tomar decisiones relativas al enrutado de cada prueba clínica hasta el laboratorio clínico apropiado donde debe ejecutarse (véase Figura 2).



**Figura 2.** Tomas de Decisión en RALC

Aunque no aparece explícitamente en la Figura 2, debe contemplarse la existencia de transbordos. Cuando a un laboratorio clínico de la RALC llega un espécimen (procedente de la extracción a un paciente en alguno de los puntos de demanda), puede ejecutar él mismo el test requerido o transbordar la prueba: derivándolo hacia otro miembro diferente de la RALC (otro laboratorio clínico) o hacia un laboratorio externo a la red (pagando por este servicio de outsourcing, denominado externalización). Actualmente los costes de externalización suponen una parte muy importante de los costes totales de provisión del servicio. Se pretende evitar la externalización de pruebas cuando éstas estén en la cartera de producto de alguno de los miembros de la RALC, y acudir a él sea más barato que acudir al laboratorio externo.

En sucesivos encuentros los gestores han planteado unos objetivos, que han sido transformados para ser cuantificables. Así, los requerimientos de calidad del servicio llevan a limitar las fuentes de error en los transportes (pérdida de estabilidad) evitando conexiones entre puntos que estén separados más allá de una distancia límite,  $D_{\text{limite}}$ . Además, se busca disminuir el número de transbordos que sufre una prueba, no sólo por consideraciones de estabilidad (en cada transbordo: recepción, conservación, almacenamiento, y reenvío) sino por la mayor accesibilidad del servicio en que esto se traduce. La mayor accesibilidad geográfica supone menor retraso en la obtención de los resultados de los tests clínicos, y una mejora efectiva del servicio a los ciudadanos. Por ello, se establece como indicador de calidad el número promedio de saltos que sufre un espécimen en la RALC antes de ser ejecutado, al que en adelante nos referiremos como QoS.

Lógicamente también hay consideraciones económicas, y por ello la minimización de los costes también es un objetivo importante. Los costes de operación tienen cuatro componentes: transporte, transbordos, ejecuciones en RALC y externalizaciones.

Finalizada la captura de requisitos, comenzó una etapa de construcción del modelo funcional de la red, haciendo uso de entidades funcionales, definiendo éstas como módulos que tienen un rol definido en la operativa de la RALC. Las entidades funcionales son:

- Centro Servicio (CS): Punto con capacidad instalada que es capaz de ejecutar tests.
- Punto de Extracción (PE): Puntos de generación de la demanda, es decir, donde se extraen los especímenes a los pacientes. También pueden recepcionar especímenes desde otros PEs, que posteriormente enruta hacia otro lugar.
- Centro de Externalización (EXT): Punto que representa lo externo a la RALC, en concreto, toda la capacidad instalada en centros externos se fija aquí.

La traducción de los elementos reales (Centros de Salud, Laboratorios,...) en estas entidades funcionales no es uno a uno. A modo de ejemplo, la traducción de un gran laboratorio (situado en un gran hospital clínico, por ejemplo) supondría la adición de un PE y de un CS, con conexión a coste de transporte nulo desde el PE hasta el CS, y enlace al resto de puntos con capacidad instalada sólo desde este CS.

Tras este procedimiento de traducción se obtiene un grafo  $G=(V, A)$ , con vértices  $V$  y arcos  $A$ , en el que hay dos vértices especiales: uno de inyección de demanda  $V_0$  y otro el que representa al centro de externalización  $V_{N+1}$ . Es sobre este grafo  $G$  sobre el que se formulará un problema de flujo multicommodity para intentar optimizar la planificación anual de la RALC, ajustando dos variables de decisión básicas: flujo y carga de trabajo. A través de los arcos fluyen los especímenes, cruzando los distintos vértices hasta alcanzar sus destinos, donde finalmente se ejecutan. Cada vértice ejecutará un número determinado de pruebas y ésto marcará cuál es su carga de trabajo.

#### 4. Formulación Matemática

Se parte del grafo  $G=(V, A)$  y se suponen datos deterministas (capacidad, demandas, etc) para el horizonte de planificación anual. Además merece la pena precisar otras hipótesis generales:

- Cartera con un conjunto de  $K$  pruebas distintas, pudiéndose externalizar cualquiera de ellas (no existe un subconjunto concreto de ellas externalizables, todas lo son).
- La demanda total no puede exceder a la capacidad total (incluida una dotación para el nodo de externalización,  $V_{N+1}$ ), en cualquier prueba  $k$ . La capacidad instalada en cualquier CS se denota  $C_{ik}$  y la demanda en cualquier PE se denota  $a_{ik}$
- Se asume que el coste de transporte es conocido en cada arco, y que según datos históricos es:  $c_{ijk}^s$  (coste unitario por km, distinto para cada tipo  $k$ ). El producto de este coste unitario por  $d_{ij}$  (distancia en km) da el valor del coste de transporte en €.
  - Inexistencia de límite a la cantidad transportada a través de cada arco.

Con esta estructura general, se plantea un problema de programación lineal tipo MCF cuya descripción se muestra en la Tabla 2, aclarando que el objetivo secundario presentado es sólo un indicador de calidad de la solución obtenida, después de haber minimizado sólo con costes.

<b>Planificación Anual RALC</b>		
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>TIPO VARIABLE</b>	<b>VARIABLES</b>
Demanda satisfecha en el vértice $i$ , por ejecuciones de tests tipo $k$ en el vértice $i$ .	Continua y Positiva	$e_{ik}$
Flujo anual de pruebas tipo $k$ a través del arco $(i,j)$	Continua y Positiva	$s_{ijk}$
Transbordos de pruebas tipo $k$ en el vértice $i$ .	Continua y Positiva	$t_{ik}$
<b>RESTRICCIONES</b>		
<b>RESTRICCIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CÓDIGO</b>
<b>INYECCIÓN DE DEMANDA</b>	Desde el vértice 0, o vértice ficticio de inyección de demanda, se inyectan tubos a cada punto de demanda.	(1)

<b>CAPACIDAD</b>	Cota impuesta por el dato de capacidad instalada	(2)
<b>CONTINUIDAD</b>	Ecuación de balance de tubos tipo k, en cada uno de los vértices.	(3)
<b>TRANSBORDOS</b>	Evaluación del número de transbordos de pruebas tipo k en cada vértice i	(4)
	La penalización por sobretransbordos se evalúa aplicando una penalización p al exceso de transbordo por encima de la capacidad instalada $C_{ik}$	(5)
<b>LIMITE DISTANCIA</b>	Sólo se consideran arcos (i,j) tales que distan menos de $D_{limite} = 225$ km	(6)
<b>OBJETIVOS</b>		
<b>OBJETIVOS</b>		<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Minimizar</b>	<b>Primer Obj: Costes</b>	Coste de transporte de cada prueba k en cada arco (i,j) , dado por $c_{ijk}^s$ . Los costes de externalización vienen dados por $c_{i(N+1)k}^s$
		Coste de ejecución de cada prueba k en cada vértice i, dado por: $c_{ik}^e$
		Coste de transbordo de cada prueba k en cada vértice i, dado por: $c_{ik}^t$
		Penalización por sobretransbordo, o nivel de transbordos excesivo. Tiene la forma de una función lineal a trozos.
	<b>Segundo Obj: Accesibilidad/ Calidad Servicio</b>	Número promedio de saltos que sufre cada tubo: QoS. Indicador del grado de accesibilidad geográfica. Cuanto menor sea, significará que en promedio menor es el retraso en la obtención de los resultados y mejor la calidad del servicio prestado.

**Tabla 2.** Descripción de la formulación matemática

A continuación, mostramos una formulación matemática correspondiente:

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{k \in K} \sum_{(v_i, v_j) \in A} s_{ijk} \cdot c_{ijk}^s \cdot d_{ij} + \sum_{k \in K} \sum_{v_i \in V} c_{ik}^t \cdot t_{ik} + \sum_{k \in K} \sum_{v_i \in V} c_{ik}^e \cdot e_{ik} + \sum_{k \in K} \sum_{v_i \in V} PF(t_{ik})$$

s.a.

$$s_{0ik} = a_{ik}, c_{ik}^t = 0, \forall k \in K, \forall i = 1, \dots, N / v_i \in V \quad (1)$$

$$s_{0,N+1,k} = 0, \forall k \in K$$

$$e_{ik} \leq C_{ik}, \forall k \in K, \forall i = 1, \dots, N+1 / v_i \in V \quad (2)$$

$$C_{ik} = 0, \forall k \in K, \forall i = 1, \dots, N+1 / v_i \in PE$$

$$\sum_{i \in P(j)} s_{ijk} - \sum_{l \in S(j)} s_{jlk} = e_{jk}, \forall k \in K, \forall j / v_j \in V \quad (3)$$

$$\sum_{l \in S(j)} s_{jlk} = t_{jk}, \forall k \in K, \forall j / v_j \in V \quad (4)$$

$$PF(t_{ik}) = \begin{cases} p \cdot t_{ik} / C_{ik}, t_{ik} > u \cdot C_{ik} & , \forall k \in K, \forall i = 1, \dots, N / v_i \in V \\ 0 & , t_{ik} \leq u \cdot C_{ik}, \forall k \in K, \forall i = 1, \dots, N / v_i \in V \end{cases} \quad (5)$$

$$d_{ij} \leq D_{limite}, \forall i, j / (v_i, v_j) \in A \quad (6)$$

$$e_{ik}, s_{ijk}, t_{ik} \geq 0 \quad (7)$$

Como es habitual en teoría de grafos, nos referimos a los sucesores de  $j$  como miembros del conjunto  $S(j)$  y a sus predecesores como miembros del conjunto  $P(j)$ . Además, para obtener una formulación más compacta se utilizan otros conjuntos:  $K$  es el conjunto de pruebas, y  $PE$  es el conjunto de puntos de extracción (esto es, un subconjunto de  $V$ ).

Este programa no es estrictamente lineal, ya que la función objetivo  $Z_1$  no lo es, debido a la función de penalización  $PF(t_{ik})$ , que es una función lineal a trozos de la que captura el nivel de transbordos en cada nodo,  $t_{ik}$ . No obstante, debe tenerse en cuenta que CPLEX (el software de resolución empleado) la linealiza introduciendo variables binarias auxiliares.

## 5. Casos de Estudio y Experimentos.

El modelo presentado se ha usado para modelar dos casos de estudio, y apoyar por tanto a los decisores de la RALC en ambos.

Un primer caso de estudio planteado ha sido el de ‘Planificación Anual de las Derivaciones entre los 30 nodos principales de la RALC’. Los experimentos realizados para este primer caso de estudio están siendo considerados como estudio de viabilidad de la activación de dos centros logísticos con los que reorganizar todas las derivaciones en la comunidad.

Experimento	$uu$	$up$	Componentes de Costes Operacionales				Total Costes	Indicador QoS
			Transporte	Transbordos	Penalización	Ejecución		
1	11,25	55	16510,05	1096,60	51,9891	21226	38884,6391	1,2760012
2	00,25	55	16510,05	1096,60	88,5736	21226	38921,2236	1,2760012
3	11	5500	16435,30	1070,35	5799,1805	21413,5	44718,3305	1,2666874
4	11	11500	30184,30	429,75	0	22101,5	52715,5500	1,1071096

**Tabla 3.** Caso estudio 1: Experimentos

Diversas cuestiones relacionadas con el ajuste de parámetros del modelo han tenido que ser evaluadas, en particular: las ponderaciones de las componentes de la función objetivo y los valores para el umbral de sobretransbordos y su penalización, y su relación con el grado de externalización en la red. Por ejemplo, se ha observado que cuando  $u=1.0$  y se actúa penalizando en mayor medida los sobretransbordos, hay que hacerlo con cuidado, ya si  $p$  es excesivamente grande puede llevar a que se acuda a subcontratar más de lo deseable (véase el experimento 4 de la Tabla 3). Externalizar en exceso no es la mejor opción económicamente hablando, aunque se obtenga un buen indicador de QoS.

Un segundo caso de estudio es el de ‘Planificación Anual de la Atención Primaria en una provincia Andaluza’, que ha sido implementado y alimentado con datos históricos. Se

optimiza la organización del servicio de diagnósticos clínicos de la Asistencia Primaria en la provincia, partiendo de la casuística real: 1) municipios cabecera de zona que reciben los tubos de su comarca, y luego envían aguas arriba en la red jerárquica, 2) municipios dotados de centros ampliadores de cobertura (por ejemplo, los típicos hospitales de comarca que no son propiamente del grupo de los 30 nodos principales de la RALC). El grafo tiene del orden de 100 vértices y 300 arcos, muestras agrupadas en  $K=6$  grupos,  $u=1.2$  y  $p=50$ , resultando una planificación alternativa que tiene un parámetro QoS de 1.2542 saltos medios.

En todos los casos presentados las soluciones obtenidas son enteras, como cabía esperar de la estructura del modelo formulado y la integridad de los datos de demanda y capacidad. Los informes de CPLEX 9.1 indican resolución por aplicación de simplex dual.

En esta primera fase del proyecto se han validado de manera satisfactoria los resultados obtenidos, así como la interpretación de los mismos por parte de los gestores de la RALC. Sin embargo, surgen nuevas cuestiones e intereses que harán seguir trabajando en evoluciones de este modelo inicial. Concretamente, en el proceso de validación del mismo han surgido las siguientes cuestiones: 1) Para activar sólo la ejecución de un determinado tipo de pruebas si existe una carga de trabajo suficiente, ¿qué efecto tendría fijar un nivel mínimo de carga antes de activar la ejecución de un tipo de pruebas  $k$  en un laboratorio en concreto? y 2) Para acotar la carga de trabajo que un determinado laboratorio demande de otro dado, ¿qué efecto tendría fijar cotas superiores al flujo entre ellos?

## 6. Conclusiones.

Se ha presentado un modelo útil para su aplicación como herramienta de gestión en la toma de decisiones de los responsables de la Red de Laboratorios Clínicos de Andalucía. En particular el modelado realizado captura las características estructurales de la red y es versátil como para poder soportar diversos casos de estudio.

En la medida en que está en proceso un tercer caso de estudio de 'Planificación Anual de la Atención Primaria en toda Andalucía' (está resultando difícil la recopilación de datos), el modelado está aún en fase de validación. En la actualidad se está trabajando en un modelo más complejo que considere costes de transporte no sólo basados en la distancia, sino que además tengan en cuenta el efecto de transporte agregado de tubos en el mismo porte.

## Referencias

Plebani, M.;Ceriotti, F.;Messori, G.;Ottomano, C.;Pansini, N.;Bonini, P. (2006). Laboratory network of excellence: Enhancing patient safety and service effectiveness. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, Vol44, 2, pp.150-160.

Schleicher, E. (2006). The clinical chemistry laboratory: current status, problems and diagnostic prospects. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, Vol384, 1, pp.124-131.

Kitchenham, B. (2004). Procedures for Performing Systematic Reviews. <opac.keele.ac.uk> Biblioteca electrónica de la Keele University, ISSN-1353-7776 / Keele University Technical Report TR/SE-0401,

Bailey, J. (2007). Search Engine Overlaps: Do they agree or disagree? Proceedings - ICSE 2007 Workshops: Second International Workshop on Realising Evidence-Based Software Engineering, REBSE'07, art. no. 4273274

Chan, F.T.S.;Chung, S.H. (2005). Multicriterion genetic optimization for due date assigned distribution network problems. *Decis.Support Syst.*, Vol39, 4, pp.661-675.

- Eksioglu, S.D.;Jin, M.Z. (2006). Cross-facility production and transportation planning problem with perishable inventory. *Computational Science and its Applications - Iccsa 2006*, Pt 3, Vol3982, pp.708-717.
- Eksioglu, S.D.; Eksioglu, H; Romeijn, E.H. (2006). A Lagrangean heuristic for integrated production and transportation planning problems in a dynamic, multi-item, two-layer supply chain. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 39 (2), pp. 191-201.
- Ferrer, J.;Mac Cawley, A.;Maturana, S.;Tolozza, S.;Vera, J. (2008). An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations. *International Journal of Production Economics*, Vol112, 2, pp.985-999.
- Woods, M.;Thornsby, S.;Raper, K.C.;Weldon, R.N. (2006). Regional Trade Patterns: The Impact of Voluntary Food Safety Standards. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie*, Vol54, 4, pp.531-553.
- Osvold, A.;Stirn, L.Z. (2008). A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food. *J.Food Eng.*, Vol85, 2, pp.285-295.
- Andreatta, G.;Lulli, G. (2008). A multi-period TSP with stochastic regular and urgent demands. *Eur.J.Oper.Res.*, Vol185, 1, pp.122-132.
- Doerner, K.F.;Gutjahr, W.J.;Hartl, R.F.;Lulli, G. (2008). Stochastic local search procedures for the probabilistic two-day vehicle routing problem. *Studies in Computational Intelligence*, Vol144, pp.153-168.
- Cohn, A.;Davey, M.;Schkade, L.;Siegel, A.;Wong, C. (2008). Network design and flow problems with cross-arc costs. *European Journal of Operational Research*, Vol189, 3, pp.890-901.
- Iakovou, E.T. (2001). An interactive multiobjective model for the strategic maritime transportation of petroleum products: risk analysis and routing. *Safety Science*, Vol39, 1-2, pp.19-29.
- Clark, S.J.;Barnhart, C.;Kolitz, S.E. (2004). Large-scale optimization planning methods for the distribution of United States Army munitions. *Mathematical and Computer Modelling*, Vol39, 6-8, pp.697-714.
- Durbin, M.;Hoffman, K. (2008). The dance of the thirty-ton trucks: Dispatching and scheduling in a dynamic environment. *Operations Research*, Vol56, 1, pp.3-19.