4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management
XIV Congreso de Ingeniería de Organización
Donostia- San Sebastián , September 8th -10th 2010

Determinación de un Plan Operativo Semanal para la Red Andaluza de Laboratorios Clínicos *

José Luis Andrade-Pineda[1], Pedro L. González-R[1], José Manuel Framiñán Torres[1] , Manuel Alejandro Dios-Rubio[1]

[1] 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 , mdios@us.es

Resumen

Presentamos un modelo para coordinar el funcionamiento en una Red Regional de Laboratorios Clínicos, cuya resolución permite la reasignación de recursos, la redistribución de cargas y la reorganización de los flujos de muestras clínicas en dicha. Para ello, se determina un plan de producción y transporte: primero en un nivel táctico (anual) y luego a un nivel operativo (semanal). Se plantea como un problema de flujo multicommodity que conduce a una formulación entera mixta. Se presenta experimentación aplicada a la reordenación de las derivaciones de muestras entre los 32 nodos principales de la Red Andaluza de Laboratorios Clínicos.

Palabras clave: Red de Laboratorios Clínicos, Planificación, Flujos en Red, Programación Entera Mixta

1. Introducción

La Red Andaluza de Laboratorios Clínicos (RALC) está constituida por centros totalmente equipados (dotados de técnicas analíticas avanzadas, líneas de procesamiento automatizadas y sistemas de información de laboratorio) que ofrecen a los ciudadanos un catálogo de pruebas clínicas muy completo. Sin embargo, aún persisten carencias en la coordinación de estos laboratorios clínicos como miembros de un sistema en red, lo que deriva en problemas de:

– Falta de accesibilidad apropiada al servicio prestado. El acceso al servicio depende mucho de la ubicación geográfica desde donde se lanza la petición de prueba clínica.

– Falta de autosuficiencia y ausencia de directivas al respecto de las externalizaciones, que son los procedimientos subcontratados a laboratorios ajenos a la organización regional. Con cierta frecuencia, los laboratorios clínicos acuden a externalizar como solución ante problemas de acceso, capacidad y tiempos de respuesta.

En el modelo presentado en (Andrade et al., 2009), se proponía un plan de producción y transporte anual para la RALC. En la literatura se localizan trabajos que también abordan producción y transporte de forma conjunta (Yan y Lai, 2007), y otros que a través de formulaciones espacio-tiempo abordan decisiones operativas, como sucede en (Marín y Codina, 2008) y en (Clark et al., 2004). En este trabajo se parte de (Andrade et al., 2009) y se avanza hacia la obtención de un plan operativo semanal alineado con el plan anual (en tanto que plan maestro definido a nivel táctico).

---

* Trabajo en el marco del proyecto de investigación “CORAL- Coordination and Optimization of the Andalusian Network of Laboratories”, financiado por la Junta de Andalucía.

En primer lugar, se extiende el modelo presentado en (Andrade et al., 2009) para la obtención del plan anual. Los decisores de la RALC han añadido nuevos requisitos para perfilar mejor su decisión táctica inicial, en la forma de un plan maestro de producción y transporte con horizonte anual cuya resolución ha de permitir fijar los niveles de producción óptimos (el nivel de carga de trabajo en cada laboratorio y también su grado de externalización). Estos nuevos requisitos son:

– los costes unitarios de transporte deberían descender por efecto del transporte agregado de pruebas en la misma conexión
– los laboratorios clínicos que operen con niveles de cargas de trabajo por debajo del nivel mínimo establecido, deberían ser penalizados
– se permitiese la fijación de cotas al tráfico entre ciertos pares.

En segundo lugar, se presenta un modelo de programación matemática con el que se tomarán las decisiones operativas en el horizonte semanal, que será utilizado para coordinar mejor el funcionamiento en red de los laboratorios. El escenario que se resuelve englobaría sólo a estos nodos principales de la RALC (lo que denominamos 'Capa de Alta Jerarquía de la RALC'), entre los que se promueven las llamadas derivaciones (procedimientos subcontratados a otros laboratorios de la RALC) como forma de disminuir la factura anual de externalizaciones. Una vez resuelto, se conocerán los flujos entre estos nodos principales y habrá una propuesta para ordenar las derivaciones entre ellos: todo origen (laboratorio origen de una derivación) conoce el detalle de por dónde fluye y dónde ha de ser finalmente procesada cada una de las pruebas que deriva.

Desde el punto de vista de un laboratorio, una derivación es un procedimiento subcontratado a otro miembro de la RALC que le prestará un servicio, por lo que necesitará obtener los resultados en tiempo y forma. Para la coordinación de estos laboratorios los gestores de la RALC integran los sistemas de información de laboratorio (SILs) en una plataforma BPM (*Business Process Management*) centralizada, de forma que sea plausible esta prestación del servicio.

El trabajo que presentamos es un paso más en la gestión coordinada de la RALC apoyada en técnicas de Métodos Cuantitativos y focalizada en la 'Capa de Alta Jerarquía de la RALC'. La plataforma BPM servirá para controlar cuál es la demanda de derivaciones que hay y a su vez, para notificar a estos nodos principales el resultado del plan operativo para la próxima semana que mejor se alinea con el plan maestro anual fijado ya a nivel táctico. Para cada origen de la derivación (O), para cada destino (D) y tipo de muestra (k), el plan operativo le asigna al trío O-D-k el número de unidades apropiado.

2. Formulación del Plan Maestro Anual

Este plan anual se va a obtener una vez resuelto el grafo 'Capa de Alta Jerarquía de la RALC' $G = (V, L)$, tras partir de demandas anuales previstas (deterministas) en los laboratorios clínicos derivadores (vértices en PE, subconjunto de V) y con una nueva formulación, resultante de nuevas consideraciones sobre las ya presentadas en (Andrade et al., 2009):

– Se evalúan los costes de transporte en base a la distancia entre vértices del enlace, pero además se consideran ahorros derivados del hecho de que una variedad de muestras clínicas estén viajando a la vez en el mismo vehículo (mismo porte). Se supone que los proveedores de transporte tienen un plan de descuentos progresivos en cada uno de los enlaces, conforme mayor es el tráfico encargado en dichos enlaces. Esto es una variación del '*Network Flow Problem with Cross-Arc Costs*' presentado en (Cohn et al., 2008), donde había factores de descuento función del tráfico global encargado a cada proveedor. En nuestra formulación, la agregación se modela suponiendo el factor de descuento como función del flujo encargado a cada proveedor de transporte en cada enlace mismo.

- En cuanto a las cotas de tráfico, los enlaces del grafo se suponen afectados por ciertas limitaciones de capacidad, estableciendo cotas superiores al tráfico agregado y también al tráfico de un tipo particular de muestra *k* (perteneciente a *K*, conjunto de tipos de muestras diferentes intercambiadas en la red).
- En determinados laboratorios ($i \in V$) se fijan cargas de trabajo mínimas (W_{ik}), de modo que se intente evitar la activación de dichos laboratorios como ejecutores de pruebas tipo *k* si es que se le pretenden asignar cargas por debajo de sus niveles mínimos.

Las nuevas variables de decisión añadidas a las que ya aparecían en la formulación en (Andrade et al., 2009) (es decir, ejecuciones e_{ik} , flujos s_{ijk} y transbordos t_{ik}) son:

y_{ij} Flujo agregado en el enlace (*i*,*j*).

z_{ij}^{rg} Activación del proveedor de transportes *g* con factor de descuento *r*, para cursar las y_{ij} muestras en el enlace (*i*,*j*).

y_{ij}^{rg} Cantidad de tubos que fluyen por el enlace (*i*,*j*), operados por el proveedor de transportes *g* y afectados por descuentos *r*.

Como en (Andrade et al., 2009), la función objetivo incorpora componentes de transportes, transbordos, ejecuciones y sobretransbordos (en la forma de una función de penalización $PF(t_{ik})$ asignada a aquellos nodos $i \in V$ más preocupados de transbordar pruebas que de ejecutarlas). Sin embargo, en esta nueva formulación también se toma en consideración el efecto de la agregación, con presencia de un factor de descuento DF^{rg} en el cómputo de los costes de transporte (véase (1)). Otra novedad está en la inclusión de una componente adicional para penalizar niveles de cargas de trabajo en los laboratorios e_{ik} por debajo de ciertos niveles mínimos establecidos, en la forma de una función lineal a trozos $PF_2(e_{ik})$. Con todo, el Plan Maestro Anual se obtiene resolviendo el siguiente problema:

Datos de Entrada

a_{ik} Demanda de pruebas tipo *k* en cada vértice *i*. Valor no nulo si es que *i* es un punto de extracción en el conjunto de *PE*.

C_{ik} Capacidad de ejecución de pruebas tipo *k* en cada vértice *i*.

D_{limite} Distancia límite impuesta para evitar pérdidas de estabilidad de las muestras.

c_{ijk}^{S} Coste unitario de transporte de cada prueba *k* en cada arco *(i,j)*, por *km*.

$c^S_{i(N+1)k}$ Coste unitario de externalización de la prueba k en cada vértice i.

c^E_{ik} Coste unitario de ejecución de la prueba k en cada vértice i.

c^T_{ik} Coste unitario de transbordo de la prueba k en cada vértice i.

u Umbral para la activación de la penalización por sobretransbordos.

p Penalización unitaria por sobretransbodos.

Y_{ij} Cota al tráfico agregado a través del enlace (i, j).

S_{ijk} Cota al tráfico tipo k a través del enlace (i, j).

W_{ik} Nivel mínimo de carga de trabajo de *tests* tipo k fijado al vértice i.

p^{low} Penalización unitaria que aplica cuando las ejecuciones están por debajo de W_{ik} .

L^{rg} Límite inferior del rango de descuento r ofertado por el *carrier* g.

U^{rg} Límite inferior del rango de descuento r ofertado por el *carrier* g.

DF^{rg} Factor de descuento que aplicará el *carrier* g cuando el flujo a través de un enlace que opera esté en el rango $[L^{rg}, U^{rg}]$.

Modelo

$$Min \ Z_A = \sum_{g\in G} \sum_{r\in R^g} \sum_{k\in K} \sum_{(v_i,v_j)\in L} c^S_{ij} \cdot (1-DF^{rg}) \cdot d_{ij} \cdot y^{rg}_{ij} \quad + \tag{1}$$

$$+\sum_{k\in K}\sum_{v_i\in V} c^T_{ik}\cdot t_{ik} + \sum_{k\in K}\sum_{v_i\in V} c^E_{ik}\cdot e_{ik} + \sum_{k\in K}\sum_{v_i\in V} [PF(t_{ik}) + PF_2(e_{ik})]$$

s.a.

$$,\forall k\in K,\ \forall i=1,\dots,N/v_i\in V \tag{2}$$

$$s_{0,N+1,k}=0 \qquad ,\forall k\in K,\ \forall i=1,\dots,N+1/v_i\in V$$

$$s_{0\mathrm{ik}}=a_{ik},\quad c^T_{ik}=0$$

$$e_{ik}\le C_{ik}$$

$$\sum_{i\in P(j)} s_{ijk} - \sum_{l\in S(j)} s_{jlk} = e_{jk} \qquad ,\forall k\in K, \forall i=1,\dots,N+1/v_i\in PE \tag{3}$$

$$C_{ik}=0$$

$$,\forall k\in K,\ \forall j/v_j\in V \tag{4}$$

$$\sum_{l \in S(j)} s_{jlk} = t_{jk} \qquad , \forall k \in K,\ \forall j / v_j \in V / C_{ik} > 0 \qquad (5)$$

$$PF(t_{ik}) = \begin{cases} p \cdot t_{ik} / C_{ik} & , t_{ik} > u \cdot C_{ik} \quad , \forall k \in K, \forall i = 1,\ldots,N / v_i \in V \\ 0 & , t_{ik} \le u \cdot C_{ik} \quad , \forall k \in K, \forall i = 1,\ldots,N / v_i \in V \end{cases} \qquad (6)$$

$$d_{ij} \le D_{limit} \qquad , \forall i, j / (v_i, v_j) \in L \qquad (7)$$

$$y_{\text{i,N+1}} = y^{rg}_{i,N+1} = z^{rg}_{i,N+1} = 0 \qquad , \forall j / (v_0, v_j) \in L \qquad (8)$$

$$y_{\text{0,j}} = y^{rg}_{0,j} = z^{rg}_{0,j} = 0 \qquad , \forall j / (v_i, v_{N+1}) \in L$$

$$\sum_g \sum_{r \in R^g} z^{rg}_{i,j} = 1 \qquad , \forall i \ne 0, j \ne N+1 / (v_i, v_j) \in L \qquad (9)$$

$$y_{ij} = \sum_{k \in K} s_{jlk} \qquad , \forall i \ne 0, j \ne N+1 / (v_i, v_j) \in L \qquad (10)$$

$$y_{ij} = \sum_g \sum_{r \in R^g} y^{rg}_{i,j} \qquad , \forall i \ne 0, j \ne N+1 / (v_i, v_j) \in L \qquad (11)$$

$$y^{rg}_{ij} \ge L^{rg} \cdot z^{rg}_{ij} \qquad , \forall r, g\ \forall i \ne 0, j \ne N+1 / (v_i, v_j) \in L \qquad (12)$$

$$y^{rg}_{ij} \le U^{rg} \cdot z^{rg}_{ij} \qquad , \forall r, g\ \forall i \ne 0, j \ne N+1 / (v_i, v_j) \in \overline{L}$$

$$s_{ijk} \le S_{ijk} \qquad , \forall i \ne 0, j \ne N+1 / (v_i, v_j) \in L \qquad (13)$$

$$y_{ij} \le Y_{ij} \qquad , \forall k \in K, \forall i \ne 0, j \ne N+1 / (v_i, v_j) \in L$$

$$PF_2(e_{ik}) = \begin{cases} \ldots & = 1,\ldots,N / v_i \in V \\ 0 \quad , \quad e_{ik} \ge W_{ik} & , \forall k \in K, \forall i = 1,\ldots,N / v_i \in V \end{cases} \qquad (14)$$

$$e_{ik}, s_{ijk}, t_{ik} \ge 0 \qquad (15)$$

En las ecuaciones (2) se impone la inyección de demanda desde un nodo ficticio $i = 0$. Las (3) son limitaciones de capacidad instalada. Las ecuaciones de balance o continuidad en los vértices se presenta en (4) y también en (5), donde evaluamos los transbordos. En (6) se especifica la función de penalización por sobretransbordos y en (14) la que penaliza el ajuste de los laboratorios ejecutores con cargas de trabajo excesivamente pequeñas, ambas en la forma de función lineal a trozos. En cuanto al efecto agregación, en (8) se controla que no aplique a los enlaces que tengan por extremo el nodo ficticio de inyección ($i = 0$) o el nodo de externalizaciones ($i = N+1$), mientras que en (10) se llena la variable de flujo agregado y en (9) se impone que cada enlace esté operado exactamente por un proveedor de transportes. Con las ecuaciones (11) y (12) se controla el rango de descuento a que se ajusta el flujo asignado al enlace dentro de la oferta del proveedor de transportes. En (13) se imponen las cotas tanto al flujo agregado como al flujo por tipo de prueba.

La solución del Plan Maestro Anual (1)-(15) es entera en el supuesto de que las demandas, capacidades, mínimos de carga y cotas establecidas sean enteras. Por ello, en la definición de las variables de decisión (15) no ha sido necesario imponer integridad.

3. Formulación del Plan Operativo Semanal

Partiendo del Plan Maestro Anual (con valores ya conocidos para las variables de decisión ejecuciones y flujos, designadas en adelante e_{ik}^{a} y s_{ijk}^{a} respectivamente) se formula ahora un Plan Operativo Semanal que se alinea con aquél. Un modelo en el que cada muestra tiene un código único asignado (Γ), y en el que con una variable binaria $\overline{\alpha_{ijk}^{\Gamma}}$ se activan los enlaces (*i*, *j*) por los que efectivamente fluye y con una variable binaria $\overline{\beta_{ik}^{\Gamma}}$ se indica el vértice i donde se ejecuta dicha muestra. La resolución del modelo permite obtener la planificación operativa: todo origen (punto de demanda) de una muestra a derivar, Γ, conoce el detalle de por dónde debe fluir y dónde ha de ser finalmente procesada dicha muestra Γ (destino).

En la mecánica de trabajo prevista, el modelo formulado se resuelve semanalmente de forma centralizada y luego los resultados se publican en la herramienta BPM comentada, para notificar a los miembros de la ‘Capa de Alta Jerarquía de la RALC’ el plan operativo de la próxima semana. Así, se fijaría el número de unidades a cada uno de los tríos O-D-*k*, tal y como vemos en la Tabla 1 de ejemplo.

Tabla 1. Ejemplo de resultados de una optimización semanal

Identificador de trío O-D-*k*	**Origen**	**Destino**	**Tipo *k***	**Cantidad Semanal**
1	B1	EXT8	K1_sangre	30
2	C2	G6	K1_sangre	8
3	C2	D3	K1_sangre	30
4	C2	EXT8	K1_sangre	10
5	C2	E4	K1_sangre	20
6	B1	F5	K1_sangre	10
7	C2	D3	K2_orina	7
8	C2	G6	K2_orina	3
9	B1	E4	K2_orina	6
10	B1	D3	K2_orina	8

Para la formulación matemática del plan operativo semanal se consideran conjuntos adicionales: $\overline{L}$ son los enlaces activados en el plan maestro anual para algún *k*, Γ es el conjunto de unidades a rutar en la programación semanal y $TK(\Gamma)$ es el conjunto cuyo único elemento es el tipo concreto de prueba a que pertenece la unidad Γ. Pues bien, el modelo matemático para la obtención del Plan Operativo Semanal es el siguiente:

$$Min\ Z_S = \sum_{g\in G}\sum_{r\in R^g}\sum_{k\in K}\sum_{(v_i,v_i)\in L} c_{ij}^S \cdot (1-DF^{rg})\cdot d_{ij}\cdot y_{ij}^{rg} \quad + \qquad (16)$$

$$+\sum_{k\in K}\sum_{v_i\in V} c_{ik}^T\cdot t_{ik} + \sum_{k\in K}\sum_{v_i\in V} c_{ik}^E\cdot e_{ik} + \sum_{k\in K}\sum_{v_i\in V}[PF(t_{ik})+PF_2(e_{ik})]$$

s.a. (2)-(15)

$$\sum_{(i,j)\in\bar{L}}\alpha_{ijk}^{\Gamma} \le 1 \qquad ,\forall\Gamma,\ \forall k\in TK(\Gamma),\ \forall j\ne N+1\ /\ (v_i,v_j)\in\bar{L},\quad con\ s_{ijk}^a>0 \qquad (17)$$

$$s_{ijk} = \sum_{\Gamma}\sum_{k\in TK(\Gamma)}\alpha_{ijk}^{\Gamma} \qquad ,\forall k\in K,\forall i,j\ /\ (v_i,v_j)\in\bar{L},\quad con\ s_{ijk}^a>0 \qquad (18)$$

$$\sum_{(i,j)\in\bar{L}}\alpha_{ijk}^{\Gamma} = 1 \qquad ,\forall\Gamma,\ \forall k\in TK(\Gamma),\ \forall i=0\ /\ (v_o,v_j)\in\bar{L},\quad con\ s_{ijk}^a>0 \qquad (19)$$

$$e_{ik} = \sum_{\Gamma}\beta_{ik}^{\Gamma} \qquad ,\forall\Gamma,\ \forall k\in TK(\Gamma),\ \forall i\ne 0,\ \ con\ e_{ik}^a>0 \qquad (20)$$

$$\sum_{v_i\in V/e_{ik}^a>0}\beta_{ik}^{\Gamma} \le 1 \qquad ,\forall\Gamma,\ \forall k\in TK(\Gamma) \qquad (21)$$

$$\sum_{i\in P(j)}\alpha_{ijk}^{\Gamma} - \sum_{l\in S(j)}\alpha_{jlk}^{\Gamma} = \beta_{jk}^{\Gamma} \qquad ,\forall\Gamma,\ \forall k\in TK(\Gamma),\ \forall i\ne 0 \qquad (22)$$

$$y_{\mathrm{ij}}, y_{ij}^{rg} \ge 0,\quad z_{ij}^{rg}, \overline{\alpha_{ijk}^{\Gamma}}, \overline{\beta_{ik}^{\Gamma}}\ binarias \ge 0 \qquad (23)$$

Las restricciones (2)-(15) son las presentadas ya para el plan maestro anual, pero usadas a una escala semanal. Los datos de demandas y capacidades serán los semanales, como semanales serán las variables de decisión: ejecuciones e_{ik}, flujos s_{ijk} y transbordos t_{ik}. En la práctica, ante la ausencia actual de los datos semanales a programar (aún no se ha pilotado la herramienta BPM) éstos parámetros semanales se obtienen por prorrateo simple de los anuales, y se denotan: $\overline{a_{ik}}$, $\overline{C_{ik}}$, $\overline{Y_{ij}}$, $\overline{S_{ijk}}$, $\overline{W_{ik}}$, $\overline{L^{rg}}$, $\overline{U^{rg}}$. Lo realmente nuevo en la formulación semanal respecto a la anual con la que intenta alinearse son las ecuaciones (17)-(23), en las que entran en liza las variables binarias $\overline{\alpha_{ijk}^{\Gamma}}$ y $\overline{\beta_{ik}^{\Gamma}}$. En (17) se inspecciona cada vértice de la red, para cada unidad Γ, y se obliga a que si esa unidad pasa por ese vértice, salga sólo hacia uno de los posibles enlaces salientes. Es decir, que sólo tenga un sucesor, o tal vez incluso ninguno, si es que es finalmente procesada ahí. En (18) se llenan las variables de flujo semanal con las variables $\overline{\alpha_{ijk}^{\Gamma}}$, considerando sólo los enlaces activos en el plan maestro anual (grafo reducido). Se llena con un sumatorio que recorre todas las unidades Γ, y que considera la $\overline{\alpha_{ijk}^{\Gamma}}$ si es que *k* coincide con el tipo de muestra correspondiente a la unidad Γ. Con la restricción (19) estaríamos expresando que cualquier unidad Γ debería ser inyectada en exactamente un sucesor del vértice inyector V_0. Con la restricción (20) miramos en todos los vértices activados para ejecutar pruebas en el plan maestro, para cada tipo de prueba k, y sumamos las variables binarias $\overline{\beta_{ik}^{\Gamma}}$ para llenar las variables de decisión 'nivel de carga semanal'. Con la restricción (21) imponemos que no haya más de un ejecutor asignado a una unidad Γ. Por último, la ecuación (22) es una ecuación de balance entre las variables binarias $\overline{\alpha_{ijk}^{\Gamma}}$ y $\overline{\beta_{ik}^{\Gamma}}$, evaluada en todos los puntos salvo en el inyector (ya considerado balance flujos en ecuaciones (21)).

El problema presentado es un problema MIP (*Mixed Interger Programming*) muy combinatorio, en el sentido de que hay muchas elecciones discretas (binarias) que hacer, de modo que su resolución exacta implicará encontrar el óptimo entre una infinidad de alternativas posibles. Como vemos a continuación, la cantidad de variables binarias manejadas ($\overline{\alpha_{ijk}^{\Gamma}}$ y $\overline{\beta_{ik}^{\Gamma}}$) es un factor que puede llegar a limitar la viabilidad del esquema propuesto para el Plan Operativo Semanal de la 'Capa de Alta Jerarquía de la RALC'.

4. Experimentación y Casos de Estudio

Se han resuelto distintas instancias para estudiar la tratabilidad de nuestra formulación en un equipo con procesador Intel Core2 Quad Q6600 a 2.4 GHz, con 4 GB de memoria RAM, un sistema operativo de 64 bits WinXP Professional x64 Edition y utilizando el solver Cplex (v11.1). Tal y como se hacía en (Andrade et al., 2009), se usa el número promedio de saltos que sufre una prueba antes de ser ejecutada como un indicador de la calidad del servicio prestado por la RALC (*QoS*). Este indicador se usará tanto para el maestro anual como para el programa semanal que derivemos de él con la formulación presentada en el apartado 3.

Como se ha explicado, la motivación para este trabajo era la ordenación de la 'Capa de Alta Jerarquía de la RALC', que es representada por un grafo dirigido $G^1 = (V^1, L^1)$ con 146 enlaces y 48 vértices. Por ello, la primera batería de experimentos hechos trabaja con este grafo G^1 y con K=6, que son los tipos distintos que se espera manejar (véase Tabla 2). En cada experimento, el primer paso de resolución del plan maestro anual reduce el tamaño del grafo funcional sobre el que se plantea el modelo de programa semanal. Así de 146 enlaces iniciales, sólo 90 están activos. En la Tabla 2 se observa que el indicador de calidad *QoS* que se obtiene de la planificación operativa semanal es muy similar al del plan maestro anual del que emana. También se aprecia que para el grafo G^1, con instancias de hasta el millón de variables binarias, se obtiene una rápida solución del plan operativo semanal. Sin embargo, cuando el número de tubos semanales a 'reordenar' en esta 'Capa de Alta Jerarquía de la RALC' pasa cierto límite, el *pool* de memoria de Cplex se desborda y se aborta la resolución exacta del MIP. Esto es lo que sucede en la instancia que cierra la Tabla 2.

Tabla 2. Optimización semanal, con $K=6$ sobre la Capa de Alta Jerarquía RALC: Grafo $G^1 = (V^1, L^1)$

Nº de tubos programados	QoS Anual	Nº tríos O-D-*k*	Total Cost	QoS semanal	Tiempo (segundos)	Tamaño del Problema
7312	1,127	1027	13842,5408	1,1379	121	647965 binarias 1956 continuas
10374	1,127	1152	19643,52	1,1377	185	919240 binarias 1956 continuas

12146	1,127	1197	23010,8363	1,1381	338	1076223 binarias 1956 continuas
18264	1,127	-	*'Ran out of Memory'*	-	-	1617811binarias 1956 continuas

En este punto proponemos una segunda batería de experimentos. Dado que venimos de detectar una limitación ligada al número de variables binarias, una posible alternativa sería acotar la gestión operativa a un número menor de tipos *K*. Así, en la Tabla 3 se presentan experimentos que trabajan con el grafo G^1 en el caso hipotético en que nuestro esquema se utilice sólo para ordenar $K=2$ tipos de pruebas. De nuevo vemos como hasta el millón de binarias el esquema propuesto encuentra solución óptima en tiempos pequeños, y sin embargo por encima de éste valor acaba faltando memoria (error Cplex '*Ran out of Memory*'). Se ha probado a ejecutar con otro *solver* (Gurobi 2.0.2) y los resultados en relación a la gestión de la memoria y al tiempo de resolución son, para esta formulación concreta, peores.

Tabla 3. Optimización semanal, con $K=2$ sobre la Capa de Alta Jerarquía RALC: Grafo $G^1= (V^1, L^1)$

Nº de tubos programados	**QoS Anual**	**Nº tríos O-D-*k***	**Total Cost**	**QoS semanal**	**Tiempo (segundos)**	**Tamaño del Problema**
10700	1,197	981	20842,5408	1,1696	52	940182 binarias 598 continuas
11745	1,197	1022	23144,8013	1,1695	59	1044057 binarias 598 continuas
13000	1,197	-	*'Ran out of Memory'*	-	-	1226097 binarias 598 continuas

Por último, un nuevo esfuerzo para analizar la tratabilidad del problema nos lleva a plantearnos cuánto podría crecer la red sobre la que resolver la programación semanal. Es decir, si nos fuésemos a una red $G^2= (V^2, L^2)$ con un número de vértices y enlaces mayor, ¿sería factible usar la formulación del presente trabajo? Para responder a esta pregunta hemos generado aleatoriamente una red de 380 vértices y unos 1600 enlaces, que contiene relaciones de jerarquía como las presentes en la RALC y que tras la resolución del plan maestro anual tiene 749 enlaces activos. De nuevo suponemos que el número de pruebas es $K=6$, y realizamos nuevos experimentos (en la Tabla 4 presentamos resultados). Tal y como cabía esperar, el número de tubos a cursar hasta el colapso del *solver* es menor en este grafo G^2.

Tabla 4. Optimización semanal, con $K=6$ sobre una Capa de Alta Jerarquía RALC más densa, aleatoriamente generada: Grafo $G^2= (V^2, L^2)$

Nº de tubos programados	**QoS Anual**	**Nº tríos O-D-*k***	**Total Cost**	**QoS semanal**	**Tiempo (segundos)**	**Tamaño del Problema**
1185	1,1472	975	73667,9444	1,1383	41	609409 binarias

$\forall i \neq 0, j \neq 1$

						11926 continuas
1888	1,1472	1580	73667,9444	1,1488	1809	1144346 binarias 12832 continuas
2000	1,1472	-	'*Ran out of Memory*'	-	-	1443777 binarias 13171 continuas

Con esto damos por finalizada nuestra experimentación, y concluimos que la viabilidad de la formulación propuesta para la formulación de un Plan Operativo Semanal en la RALC está condicionada a que el número de variables binarias totales esté en torno al millón (según el estado actual de los *solvers*). Como ya hay en la RALC una elección del número de tipos distintos de pruebas (*K=6)* y del grafo de la red (G^1), en el uso práctico de nuestra formulación la complejidad computacional será función del número de unidades semanales Γ que se programen. Cuando el número de unidades (especimenes) se eleve demasiado, una alternativa que se podría explorar es la agrupación de varios especimenes del mismo tipo *k* en un código único asignado (Γ). Piénsese por ejemplo en que cada unidad Γ contenga una decena de especimenes. De esta forma se sacrificaría granularidad en la decisión de rutado (lo que puede ser factible en el caso de un número de tubos a derivar elevado como ocurre en este escenario), para conseguir que el problema presentado aquí pueda ser resuelto sin que el entorno de desarrollo codificado colapse.

Como conclusión se puede decir que, con las limitaciones expuestas (hasta unas 10000 unidades semanales), se ha dotado a los gestores de la RALC de una herramienta para fijar para el corto plazo las cargas de trabajo y rutado de las derivaciones que permitan a los laboratorios clínicos alinearse con la estrategia anual definida por el Plan Maestro Anual. Además, nuestra formulación encaja perfectamente en el marco de gestión integrada de la red de laboratorios clínicos basado en una plataforma BPM centralizada: de ella se obtienen datos de entrada al modelo desarrollado (demandas previstas y capacidades) y en ella se publican los resultados del Plan Operativo Semanal.

Referencias

Andrade, J.L.; González-R, P.; Framiñán, J.M., Molina-Pariente; J.M. (2009). Decisiones Cuantitativas en la Gestión de una Red Regional de Laboratorios Clínicos. Vol3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management,

Yan, S.;Lai, W. (2007). An optimal scheduling model for ready mixed concrete supply with overtime considerations. Automation in Construction, Vol16, 6, pp.734-744.

Marín, Á.;Codina, E. (2008). Network design: taxi planning. Annals of Operations Research, Vol157, 1, pp.135.

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.

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.