



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

MODELOS COM ABORDAGEM DE COBERTURA PARA RESPOSTAS A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO NO MAR

Luiz Rodolfo Tinoco Aboim Costa¹, Virgílio José Martins Ferreira Filho²

¹ Coppe/UFRJ, Cidade Universitária, CT Bloco B, sala 108, luizrodolfo@yahoo.com

² Coppe/UFRJ, Cidade Universitária, CT Bloco B, sala 108, Virgilio@ufrj.br

Resumo – Neste artigo é descrito o Modelo de Máxima Cobertura Estendido aplicado ao problema de localização de equipamentos de resposta em acidentes de derramamento de óleo. Este modelo é apropriado para acidentes de derramamento de óleo que ocorrem perto da costa, em corpos d'água semi-fechados onde existe um risco significativo de derramamento, que são vistos como eventos de emergência. Ações de emergência devem ser tomadas para mitigar os danos causados pelo derramamento de óleo.

Este modelo leva em conta a probabilidade relativa de ocorrência dos eventos de derramamento e o impacto após a ocorrência de vários tipos de derramamentos numa abordagem de múltiplos objetivos, ajudando o tomador de decisão a investigar trade-offs em cobrir eventos de derramamento com diferentes potenciais de impacto.

Palavras-Chave: Derramamento de Óleo; Máxima Cobertura; Programação Inteira .

Abstract – In this paper is described a Extend Maximal Covering Model applied for the problem of locating oil spill response equipment. This model is appropriate to oil spills that occur near shore in semienclosed waterways where a significant risk of spillage exists, that are viewed as emergency events. Emergency actions must be taken to mitigate damages caused by an oil spill.

This model takes into account relative probability of occurrence of spill events and the impact after occurrence of various spill types in a multiple objective approach, assisting the decisionmaker investigate trade-offs among covering spills events with differing potential impacts.

Keywords: Oil Spill, Set Covering, Integer Programming .

1. INTRODUÇÃO

Acidentes de derramamento de óleo muitas vezes podem gerar danos de natureza ambiental, econômica e social significativos e por isto demandam estratégias de respostas efetivas. O fator tempo de resposta tem importância fundamental para se ter uma resposta eficiente, principalmente quando o derramamento de óleo ocorre próximo da costa, pois neste caso poderá rapidamente atingir áreas vulneráveis.

Equipamentos de limpeza suficientes deverão estar disponibilizados em locais adequados e em quantidade adequada para chegarem ao local do acidente no tempo mais rápido possível de modo a minimizar os danos gerados e também os custos de limpeza.

2. MODELOS DE RESPOSTA À DERRAMAMENTOS DE OLEO

2.1 – Modelos de Resposta à Derramamento de Óleo

Os problemas de derramamento de óleo possuem uma natureza hierárquica complexa envolvendo a tomada de decisão nos níveis estratégico, tático e operacional. No contexto de tais problemas a maioria dos modelos procuram decidir quanto à localização, ao número e tipo de equipamentos (modelo estratégico) ou na alocação desses equipamentos uma vez que a ocorrência do derramamento seja conhecida (modelo tático). O modelo operacional irá avaliar com muito mais detalhe as ações que deverão ser tomadas durante o acidente com os equipamentos prescritos pelo nível tático.

Modelos matemáticos de otimização foram e vem sendo formulados com o intuito de auxiliar a tomada de decisão em problemas relacionados a derramamento de óleo. Serão citados a seguir alguns trabalhos realizados dentro da linha de modelos estratégicos em problemas de derramamento de óleo.

Psaraftis, Tharakan, Ceder (1985) desenvolveram um modelo estratégico de resposta à derramamento de óleo, que permite definir onde localizar diversos tipos e quantidades de equipamentos de limpeza capazes de responder a futuros vazamentos de óleo. Os autores aplicaram este modelo na região da Nova Inglaterra. Foi formulado um modelo de programação misto inteira com o objetivo de minimizar a soma esperada dos custos do sistema de resposta e dos custos dos danos causados pelos derramamentos. Posteriormente esses mesmos autores, Ceder, Tharakan e Psaraftis (2000) propuseram um algoritmo de síntese em redes para resolver o mesmo problema, salientando que este algoritmo é mais apropriado para problemas reais que envolvem um maior porte.

Iakovou et al (1996) propõem uma estrutura integrada que recorre a algumas questões estratégicas importantes, tais como determinar a localização ótima e a capacidade dos equipamentos para limpeza total levando em conta também as implicações posteriores aos eventos. Utilizam para isto um modelo de programação linear inteira, mostrando a complexidade do problema, propondo um método de solução e resolvendo uma relaxação do problema original. São apresentados também dois problemas reais aplicados à península da Flórida.

3. METODOLOGIA

3.1 Abordagem do Modelo de Localização e Alocação dos Equipamentos de Resposta

O problema estratégico também pode ser tratado sob o enfoque de um problema de localização e alocação. Belardo et al (1984) desenvolveram um modelo utilizando a abordagem de “Cobertura Parcial” para definir os recursos de resposta para grandes derramamentos de óleo marítimos. Desenvolveram uma extensão ao Modelo de Máxima Cobertura proposto por Reville (1974), que utiliza uma abordagem de cobertura, a qual maximiza uma soma ponderada dos centros de demanda cobertos por um número fixo de estabelecimentos de serviços de emergência.

O Modelo de Máxima Cobertura faz parte do conjunto de modelos de localização e utiliza programação discreta. Nele a fonte de demanda (potencial) estará coberta se estiver dentro de uma certa distância de resposta, ou tempo de resposta, de um estabelecimento de serviço de emergência. Procura-se definir para as localizações dos serviços de emergência um conjunto finito de locais possíveis que cubram todas fontes de demanda (potenciais) com um número mínimo de estabelecimentos de serviço ou a um custo mínimo total de servir.

Belardo et al (1984) formularam então um modelo multiobjetivo que utiliza informações de tempo de resposta, de características dos equipamentos, de frequência dos eventos de derramamento, de probabilidade de cobertura, sendo esta última determinada pelo tomador de decisão baseada no impacto do acidente no meio ambiente.

3.2 - Adaptação do Modelo de Máxima Cobertura a um Problema de Resposta ao Derramamento de Óleo

Belardo et al (1984) identificaram quatro aspectos cruciais que devem ser considerados em problemas de resposta ao derramamento de óleo e depois incorporaram esses aspectos ao Modelo de Máxima Cobertura. Estes aspectos são descritos a seguir:

- 1) Características que influenciam a resposta ao evento do derramamento de óleo que são: a localização do evento, o tipo do óleo e a condição do mar correspondente a este evento. Cada combinação possível dessas características será uma fonte potencial de demanda à qual estarão associados requerimentos de cobertura.

- 2) Requerimentos dos recursos - O evento de derramamento estará coberto somente quando cada um dos recursos (equipamentos) necessário estiver posicionado dentro de uma distância tal que atenda ao acidente em um tempo inferior ao tempo de resposta requerido. Além disso é exigido que o equipamento utilizado na cobertura seja adequado ao tipo de óleo e à condição de mar do evento de derramamento.
- 3) As probabilidades estimadas dos possíveis eventos de derramamento de óleo serão levadas em consideração na escolha da localização dos recursos, uma vez que estes são insuficientes para atenderem a todas as respostas. Para estimar as probabilidades de ocorrência de um dado derramamento foram empregadas somente probabilidades condicionais em cima de um conjunto de eventos potenciais de derramamento.
- 4) A identificação de categorias de potenciais danos econômicos/ambientais, os quais variam entre os diferentes eventos de derramamento de óleo permitirá um enfoque multiobjetivo possibilitando o tomador de decisão investigar os trade-offs entre cobrir eventos de derramamentos com diferentes potenciais de impacto, sem confundir esses trade-offs com os devido às diferenças de probabilidade.

3.3 –Formulação do Modelo de Máxima Cobertura Estendido .

Incorporando as características relacionadas ao derramamento de óleo, mencionadas em 3.2, ao Modelo de Máxima Cobertura proposto por Revelle (1974), obtém-se o Modelo de Máxima Cobertura Estendido, proposto por Belardo et al (1984) :

$$\begin{aligned} & \text{Max } (P_A, P_B, P_C) && \text{onde } P_A = \sum_{i \in A} p_i y_i, P_B = \sum_{i \in B} p_i y_i, P_C = \sum_{i \in C} p_i y_i \\ \text{st} & \sum_{j \in N} x_{jk} \leq T_k && \text{(para cada } k) \\ & \sum_{j \in N_{ik}} x_{jk} \geq y_i && \text{(para cada evento de derramamento } i \text{ e cada tipo de} \\ & && \text{recurso } k \text{ requerido para cobrir } i) \\ & 0 \leq y_i \leq 1 && \text{(para cada } i \in M) \\ & x_{jk} = 0 \text{ ou } x_{jk} = 1 && \text{(para cada } j \in N \text{ e } k \in K) \end{aligned}$$

onde

M é o conjunto dos eventos de derramamento, N é o conjunto dos pares site/facilidade existentes.

T_k é o número de equipamentos do tipo k a serem utilizados .

p_i é a probabilidade de que o evento de derramamento i tenha ocorrido dado que o derramamento ocorreu .

P_A, P_B, P_C são as probabilidades de que o impacto econômico/ambiental dos eventos de derramamento dos grupos A, B e C , respectivamente, sejam cobertos.

Se $x_{jk} = 1$, o recurso k será alocado à localização j , e se $x_{jk} = 0$, ocorrerá o contrário.

Se $y_i = 1$, a preferência ao requerimento de cobertura do evento de derramamento i será efetivada, $y_i = 0$ ocorrerá o contrário.

N_{ik} é o subconjunto dos pares site/facilidade que satisfazem aos requerimentos de resposta ao derramamento i .

4- ESTUDO DE CASO

4.1 – Descrição do problema

São apresentados a seguir alguns resultados do modelo estratégico de Máxima Cobertura Estendido, que foi rodado neste trabalho utilizando-se parcialmente os dados do estudo de caso apresentado em Belardo et al (1984).

O Modelo de Cobertura para derramamento de óleo é mais aplicável à áreas geográficas aonde é necessário uma rápida resposta para evitar maiores danos ambientais e aonde existe um significativo risco de derramamento.

Trata-se do corpo d'água Long Island Sound, sob o qual no período do estudo trafegavam navios transportando uma média anual aproximada de 35 milhões de toneladas de produtos derivados de petróleo, sendo uma região ambientalmente sensível e usada por milhões de pessoas inclusive para recreação.

A região citada foi dividida em seis subáreas, pequenas o suficiente, de modo a manter características homogêneas de risco e de sensibilidade. Essas divisões correspondem às áreas geográficas onde podem ocorrer os derramamentos (vide figura 1 e tabelas 1 e 2), que em conjunto com os tipos de óleo que podem ser transportados e as possíveis condições do mar, definem os possíveis eventos de derramamento de óleo.

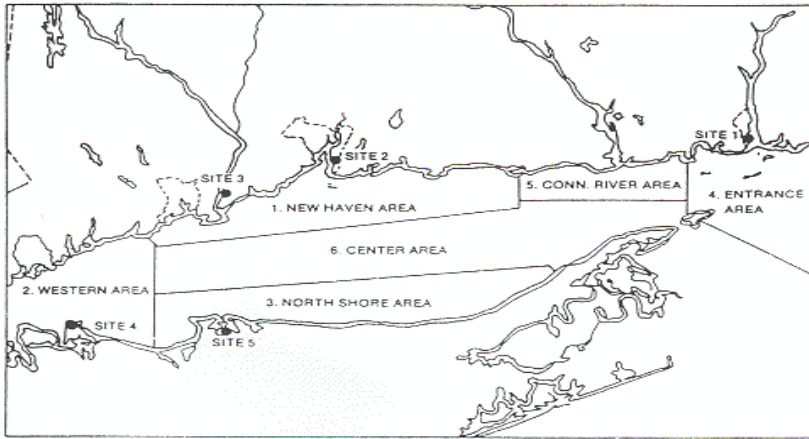


figura 1 – área de estudo - Long Island Sound.

Facilidades	
Site 1	Guarda Costeira 1
Site 2	Guarda Costeira 2
Site 3	Guarda Costeira 3
Site 4	Firma Comercial 1
Site 5	Firma Comercial 2

Áreas Geográficas	
1	New Haven
2	Western Long Island Sound
3	North Shore Long Island
4	Long Island Sound Entrance
5	Connecticut River and approaches
6	Center Sound

tabelas 1a e 1b – Facilidades e áreas geográficas.

Foram consideradas três categorias de óleo : altamente refinado, levemente refinado e volátil (vide tabela 3). (obs: óleo bruto não é transportado nesta região).As condições do mar foram resumidas em seis categorias a partir de dimensões que determinam a efetividade de resposta dos equipamentos: vento, altura das ondas e corrente (vide tabela 4).

Tipos de óleo	
1	Produtos Voláteis
2	Produtos levemente refinados
3	Produtos fortemente refinados

tabela 3 – tipos de óleo

Condições de Mar	
1	Corrente < 2 nós, Vento < 15 nós, Mar < 2 pés
2	Corrente < 2 nós, Vento : 15 a 50 nós, Mar < 2 pés
3	Corrente < 2 nós, Vento : 15 a 50 nós, Mar : 2 a 8 pés
4	Corrente : 2 a 5 nós, Vento < 15 nós, Mar < 2 pés
5	Corrente : 2 a 5 nós, Vento : 15 a 50 nós, Mar < 2 pés
6	Corrente : 2 a 5 nós, Vento : 15 a 50 nós, Mar : 2 a 8 pés

tabela 4 – categorias de condição de mar

De todas as combinações de eventos de derramamento possíveis, que nesta aplicação são 108 (6 x 3 x 6), deverão ser eliminadas as que forem consideradas impossíveis de ocorrer. Em seu trabalho, Belard et al(1984) citam que foram desconsiderados 36 eventos, considerados impossíveis de ocorrer. Na adaptação feita neste trabalho considerou-se que a categoria 6 relativa à condição de mar, não poderia ocorrer nas área geográficas 1,2,3 e 6.

O modelo escolherá entre os potenciais candidatos a dar cobertura aos eventos de derramamento de óleo, aqueles que oferecerão uma cobertura máxima (os candidatos correspondem à combinação site /equipamento para os cinco sites e seis equipamentos considerados).

Deverá, então, ser previamente definido, para cada evento de derramamento de óleo, os respectivos elementos do conjunto de cobertura, isto é, cada par site /equipamento que tem a capacidade de atender ao critério de tempo de resposta adequado e também aos critérios do equipamento ser adequado para o tipo de óleo e para a condição de mar do evento de derramamento considerado.

O modelo considera que a unidade padrão dos equipamentos é a necessária para controlar (conter, remover, dispersar) o equivalente a um derramamento de 1000 ton.

Deverá ser definido o tempo limite de resposta para todos os eventos de derramamento, devendo ser estabelecida também uma matriz tempo/distância, que relaciona o tempo de transporte de cada uma das localizações dos equipamentos até o centróide das regiões do derramamento.

Na adaptação feita neste trabalho, como os dados de distância não foram definidos no artigo original, foram estipulados valores de distância para cada par facilidade/centróide da área geográfica, permitindo assim o estabelecimento de uma condição de cobertura em relação ao tempo limite de resposta que também foi arbitrado.

O modelo deverá considerar também a adequação dos equipamentos de resposta ao evento de derramamento considerado com relação aos aspectos tipo de óleo e condição do mar. Tais requerimentos são mostrados na tabela 5.

Equipamentos utilizados na resposta	Tipos de óleo	Condições do mar
Equipamento de remoção para mar calmo	2,3	1,2,4
Equipamento de contenção para mar calmo	2,3	1,2
Equipamento de remoção para mar alto	2,3	3,5,6
Equipamento de contenção para mar alto	2,3	3,4,5,6
Equipamento de dispersão para mar calmo	1	1,4
Equipamento de dispersão para mar alto	1	2,3,5,6

tabela 5 – capacidade de resposta dos equipamentos.

No estudo de Belardo et al(1984), e também nesta aplicação, considerou-se a não disponibilidade, dos equipamentos de dispersão. Isto implicará que os eventos envolvendo o tipo de óleo 1, (vide tabela 5), não serão cobertos.

Dentro do conjunto de eventos de derramamento sobre investigação do tomador de decisão, o modelo procurará atender (cobrir) aos eventos definidos como prioritários, e dentro destes aos que ocorrem com maior probabilidade.

No estudo de Belardo et al (1984), a partir de intensa pesquisa, foram definidas três possíveis categorias de impacto ambiental (A- alto impacto, B- médio impacto e C- baixo impacto), as quais foram atribuídas para cada uma das seis regiões geográficas previamente definidas, (Vide tabela 6).

Áreas	1	2	3	4	5	6
	New Haven	Western Long Island Sound	North Shore Long Island	Long Island Sound Entrance	Connecticut River and approaches	Center Sound
Grupo Impacto	B	A	C	B	A	C

tabela 6 – categoria de impacto ambiental por área geográfica.

As probabilidades relativas dos eventos correspondentes as seis áreas geográficas consideradas foram as mesmas utilizadas por Belardo et al (1984), (vide tabela 7). As probabilidades condicionais relacionadas aos eventos, entretanto, não foram divulgadas, sendo portanto arbitradas neste trabalho.

Áreas	1	2	3	4	5	6
	New Haven	Western Long Island Sound	North Shore Long Island	Long Island Sound Entrance	Connecticut River and approaches	Center Sound
Grupo Impacto	25%	20%	15%	20%	10%	10%

tabela 7 – probabilidade relativa dos eventos relativo à área geográfica.

4.2 – Resultados do modelo

Os valores de probabilidade de cobrir os derramamentos dos grupos A, B e C estão relacionados à prioridade do tomador de decisão, expressa na função objetivo, no potencial de cobertura dos candidatos e também na probabilidade de ocorrência dos eventos de derramamento.

O tomador de decisão poderá investigar trade-offs em cobrir essas diferentes áreas. É importante notar que uma cobertura eficiente de um grupo poderá não satisfazer a cobertura dos demais grupos.

Serão apresentados a seguir resultados do modelo para algumas estratégias arbitrárias, definidas mais a frente, sendo identificadas duas soluções eficientes que permitirão que o tomador de decisão expresse sua preferência, ou seja, que compare essas soluções eficientes.

Numa fase posterior deste trabalho será pesquisada uma metodologia adequada para determinação de soluções eficientes para um problema de maior porte do que o atual.

A título de ilustração serão mostrados resultados obtidos para seis estratégias arbitrárias que são definidas a seguir:

- Estratégia 1 (A)- Estratégia de cobrir prioritariamente as regiões mais vulneráveis (de alto impacto ambiental – grupo A).
- Estratégia 2 (B)- Estratégia de cobrir prioritariamente as regiões com médio impacto ambiental – (grupo B).
- Estratégia 3 (ABC)- Estratégia de cobrir todas as regiões (grupos A, B e C).
- Estratégia 4 (A+B) C/ B \geq 9% - Estratégia de cobrir prioritariamente os grupos A e B ao mesmo tempo que se deseja cobrir com pelo menos 9% de probabilidade o grupo B.
- Estratégia 5 (A+C) C/ B \geq 10,8% - Estratégia de cobrir prioritariamente os grupos A e C ao mesmo tempo que se deseja cobrir com pelo menos 10,8% de probabilidade o grupo B.

Os resultados do modelo para as estratégias definidas acima são apresentados nas tabelas 8 e 9. Nestas podemos verificar os pares site da facilidade/ equipamentos definidos para cada estratégia, o número de eventos de derramamento cobertos (tabela 8) e a probabilidade de cobertura para cada categoria de impacto existente (tabela 9).

Podemos verificar que para essas estratégias citadas, a solução da estratégia 3 domina a da estratégia 1, e a solução da estratégia 5 domina as soluções das estratégias 1, 2, e 4, mas não domina a solução da estratégia 3.

	Nº eventos cobertos	Núm. do Site	Nome	Equipamentos
Estratégia 1 (A)	18	1	Guarda Costeira 1	Equipamentos (remoção/contenção para mar alto)
		2	Guarda Costeira 2	Equipamentos (remoção/contenção para mar baixo)
Estratégia 2 (B)	14	1	Guarda Costeira 1	Equipamentos (contenção/remoção para mar alto)
		3	Guarda Costeira 3	Equipamentos (contenção/remoção para mar baixo)
Estratégia 3 (A+B+C)	52	2	Guarda Costeira 2	Equipamentos (remoção/contenção para mar alto)
		2	Guarda Costeira 2	Equipamentos (remoção/contenção para mar baixo)
Estratégia 4 (A+B) c/ B>=9%	31	1	Guarda Costeira 1	Equipamentos (remoção/contenção para mar alto)
		2	Guarda Costeira 2	Equipamentos (remoção/contenção para mar baixo)
Estratégia 5 (A+C) c/ B>=10,8%	44	1	Guarda Costeira 1	Equipamentos (remoção/contenção para mar alto)
		2	Guarda Costeira 2	Equipamentos (remoção/contenção para mar baixo)

tabela 8 – Núm. de eventos de derramamentos cobertos e localização dos equipamentos para algumas estratégias especificadas

Grupo Impacto	Estratégia 1 (A)	Estratégia 2 (B)	Estratégia 3 (A+B+C)	Estratégia 4 (A+B) c/ B>=9%	Estratégia 5 (A+C) c/ B>=10,8%	Valor máximo possível neste problema
Pa	10,00%	0,00%	12,40%	10,00%	10,00%	30,00%
Pb	0,00%	10,80%	8,40%	10,80%	10,80%	45,00%
Pc	0,00%	0,00%	5,88%	0,00%	4,20%	25,00%

tabela 9 - Probabilidade de cobertura dos grupos para as diferentes estratégias.

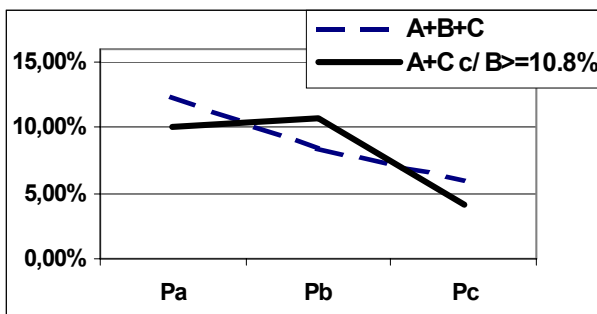


figura 2 – Tradeoff entre as estratégias eficientes.

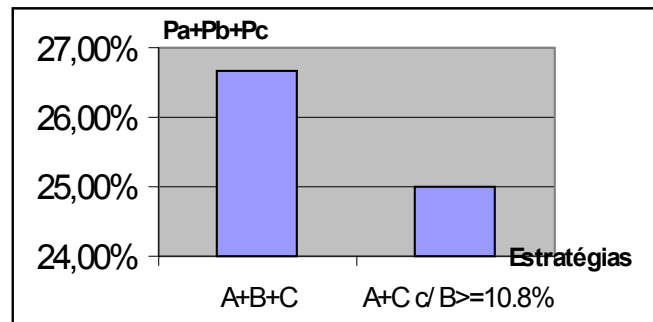


figura 3 – Probabilidade de cobertura total p/ as estratégias eficientes.

Como vimos, as soluções da estratégia 3 (A+B+C) e da estratégia 5 (A+C) c/ B>=10,8% são soluções eficientes, podendo então ser investigado o trade-off relacionado entre elas. Na figura 2 podemos verificar um aumento na probabilidade de cobrir a área com médio impacto ambiental (grupo B), como é determinado na estratégia 5, implicará, em relação a estratégia 3, numa redução de cobertura tanto da área de alto impacto ambiental (grupo A), quanto da área com baixo impacto ambiental (grupo C). Além disso, podemos verificar que a proteção global das áreas (Pa+Pb+Pc) sofrerá uma queda de 26,68% para 25% (figura 3).

5. Agradecimentos

Esta pesquisa contou com o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo (ANP) para o Setor Petróleo e Gás, através do programa PRH-ANP/MCT N° 21.

6. Referências -

- BELARDO, S., HARRAID, I., WALLACE, W. A., WARD, J. A partial covering approach to siting response resources for major maritime oil spills. *Management Science*, Vol. 30, No 10, pp. 1184-1196, 1984.
- PARFATIS, H. N., THARAKAN, G. G., CEDER, A. Optimal response to oil spills: the Strategic decision case". *Operations Research* Vol.34. , 1986.
- IAKOVOU, E. , CHI M. IP, DOULIGERIS, C. , KORDE, A. - Optimal location and capacity of emergency cleanup equipment for oil spill response , *European Journal of Operational Research*, 96, 72-80, 1996.
- CEDER A. , THARAKAN G, PSARAFTIS H^a - Synthesis algorithm for na oil spill problem of complementary locations on networks , *Applied Mathematical Modelling* 25 , 269 – 285 , 2001.
- REVELLE C, CHURCH, R., - Maximal covering location problem". *Papers Reg. Sci. Appl.*, Vol. 32, pp. 101-118, 1974