

UM ALGORITMO METAHEURÍSTICO DE OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO DE CANAIS

Francisco Jácome Sarmento¹, Pedro Antônio Molinas²

RESUMO –Neste artigo é apresentado um algoritmo metaheurístico destinado à busca de solução otimizada para o traçado de canais abertos. Os custos de passagem, segundo cada uma das direções viáveis em um Modelo Digital de Terreno (MDT), são obtidos com base em custos reais de projeto do canal. As seções transversais são projetadas para cada célula do MDT a partir da cota local do fundo do canal e de parâmetros definidores da geometria afetas ao tipo de seção (mista, corte e aterro). Uma função de penalização com base na distância ao ponto de entrega da água é utilizada pelo algoritmo no processo de decisão local pelo qual o traçado evolui no espaço discretizado do MDT. O algoritmo é testado em um canal de cerca de 200 km de comprimento destinado à distribuição de águas da transposição do rio São Francisco no Estado do Rio Grande do Norte.

ABSTRACT –This paper presents a meta-heuristic algorithm for the search of optimal solutions to the path tracing of open channels. The costs-of-passage, according to each of the possible directions in a Digital Elevation Model (DEM), are obtained as functions of the real cost of the channel project. The cross-sections are designed for each cell of the DEM as a function of channel bottom elevation and parameters defined by the geometry of the cross-section type (mixed, cut and fill). A penalty function based on the distance to the point of water delivery is used by the algorithm in local decision-making process by which the path evolves in the discrete space of the DEM. The algorithm is tested on a channel about 200 km length intended for water distribution of the São Francisco River water-transfer project, located at Rio Grande do Norte State.

Palavras - chave: algoritmo metaheurístico, canais abertos, otimização de custos.

-
- 1) Professor da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campus I, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, João Pessoa – PB. E-mail: jacomesarmento@hotmail.com.
 - 2) Sócio Diretor, Acquatool Consultoria S/S Ltda, Avenida dom Luis 300/sala 708, Fortaleza, Ceará. E-Mail: molinas.pedro@gmail.com

1 – INTRODUÇÃO

Historicamente as demandas de adução mediante canais tem evoluído de forma considerável, sendo este equipamento hidráulico responsável pelos primeiros aquedutos da antiguidade, construídos praticamente sem declividade de fundo nem revestimento, evoluindo para os canais modernos com seções hidráulicas otimizadas, revestimentos de baixo atrito e exigências de traçado que devem vencer seqüências de vales e talweg's, transpondo grandes vazões a nível regional.

O problema do traçado de canais destinados ao transporte hídrico entre dois pontos do espaço tridimensional envolve a consideração de diversas condicionantes de natureza técnica, econômica, social, ambiental e legal. Somente em casos raros, o número de condicionantes ou mesmo o poder indutor de solução de uma ou mais delas obriga a adoção de determinada rota para a qual se espera que os custos advindos de sua implantação possam ser absorvidos pela sociedade em face dos benefícios auferíveis.

Na prática, por mais simples e restrita que seja a topologia do domínio que abriga os possíveis traçados, esses são em número extremamente elevado, implicando na necessária aplicação de critérios econômicos que, por eliminação, reduzam as opções elencáveis e permita, não sem a incidência de certa parcela de subjetividade, suplantar a aporia técnica gestada na multiplicidade de alternativas não descartáveis e adotar o traçado definitivo para o sistema adutor.

De fato, a necessária aplicação de subjetividade lapidada pela experiência faz da atividade de projetar o traçado de canais de adução no mundo real uma área extremamente demandadora de profissionais com capacidade de incorporar em seu "traço" a flexibilidade e/ou o engessamento derivado dos mais importantes condicionantes de projeto.

Atualmente, com o emprego de novas tecnologias da informática, a subsunção de alternativas de traçado de canais em espaço de múltiplas dimensões condicionadoras ou restritivas vem reduzindo o emprego da subjetividade, o que não significa, nem mesmo no extremo de sua total eliminação, a dispensa de profissionais experientes como supervisores últimos desses projetos.

Técnicas computacionais baseadas em algoritmos incorporados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) vêm permitindo a consideração objetiva da espacialidade de fatores como topografia, geologia, interferências ambientais, infraestruturais, etc., possibilitando ao projetista experimentar as restrições do problema insertas em um espaço cartesiano deformado, cuja geometria acabada reflete as penalidades em se adotar a passagem do traçado por um determinado ponto do domínio geográfico sob análise.

Classicamente, a solução é buscada em um mapa para o qual o deslocamento de um ponto para o outro no espaço é associado a um custo, comumente denominado "custo de passagem". Os algoritmos propostos visam encontrar o caminho de menor custo de passagem acumulado entre os pontos de partida e chegada informados pelo projetista.

Algoritmos baseados em Programação Dinâmica (PD), geralmente resolvem o problema construindo o mapa de custos de passagem a partir do ponto de chegada, acumulando tais custos segundo o critério pelo qual se adota sempre a direção em que o custo acumulado resultará mínimo em cada passo. Embora de natureza “gulosa”¹, algoritmos como o de Dijkstra (1959) têm sido usados na solução de problemas desse tipo.

Na vasta literatura disponível sobre a determinação do caminho de menor custo para obras longilíneas de engenharia prevalece indubitavelmente o uso de SIG, seja no gerenciamento e na manipulação da informação espacializada das variáveis influentes nos custos e/ou na determinação do caminho mais interessante a ser adotado.

Collischonn e Pilar (2000), valendo-se de uma função envolvendo custo, distância e declividade (local e direcional), propuseram um algoritmo para determinação de caminho de custo mínimo em projetos de canais e estradas. O algoritmo assume a declividade como variável dependente com a qual implicitamente é calculado o plano de custos de passagem. Na relação entre custo e declividade, os autores assumem a existência de uma declividade de projeto de canal para a qual o custo será mínimo. O problema assim formulado e, conforme os autores, resolvido, consiste, portanto, em se determinar sobre o plano de custos de passagem construído com base na declividade direcional do terreno, o caminho para o qual o custo acumulado é mínimo. Note que, nessa forma de abordagem, não há quaisquer menção à geometria de projeto do canal, tão pouco à cota com a qual o mesmo chega ou sai de cada célula do gride, posto ser a declividade física do terreno a única variável considerada como suficiente ao objetivo colimado.

Assim, o custo de passagem por um determinado ponto do espaço é, nesta metodologia, independente do caminho prévio ou posterior percorrido pelo canal, o que equivale a não considerar as restrições construtivas tradicionais de cota de entrega de vazão e geometria ótima do canal.

Yildirim *et al.* (2006) demonstram o uso de vários tipos de dados de diferentes fontes em Sistemas de Informação Geográfica – SIG conjugados com técnicas de análise de redes raster no desenvolvimento de um procedimento de busca de caminho de custo mínimo para obras longilíneas tais como: canais, adutoras, estradas, gasodutos, etc.

Igualmente aplicável a projetos de obras longilíneas, inclusive canais, Bagli *et al.* (2010), em ambiente SIG, abordam o problema da análise do caminho de mínimo custo de forma integrada com avaliação multicritério, esta envolvendo aspectos ambientais (presença de ecossistemas), densidade populacional, etc. No procedimento proposto, o plano de custos e as alternativas de caminhos viáveis são gerados a partir da combinação das variáveis espacializadas associadas à integração metodológica mencionada.

¹ Entendendo este termo como a disposição do algoritmo a adotar decisões fortemente condicionadas, ou seja, tomada de decisão que parece ótima por vantagens do tipo local, decisão eficiente para caminhos de menor custo em grafos, mas com severas restrições para a adoção do traçado de canais.

2 - O PROBLEMA, COMO ELE SE CONFIGURA NO MUNDO REAL

Nos projetos de engenharia envolvendo adução por gravidade, o profissional se depara com uma situação que incrementa sobremaneira a complexidade para se extrair uma solução de traçado que possa merecer a denominação de “caminhamento ótimo”.

Ocorre que, no mundo real, os custos de passagem não são constantes independentes das variáveis espaciais x e y (longitude e latitude). O custo de acesso a um dado ponto do espaço, digamos, (x_k, y_k) dependerá da cota do fundo do canal no ponto adjacente (x_p, y_p) àquele que se quer acessar.

Em sendo possível uma mensuração direta desses custos, para se deslocar de (x_p, y_p) para (x_k, y_k) , o cômputo do ônus terá de considerar o modelo de seção transversal no ponto p (seção em corte, em aterro ou, ainda, mista), bem como o modelo de seção transversal com o qual se chega ao ponto k . Além dos reflexos dessa realidade no cálculo do movimento de terra para a implantação da obra (escavação de diferentes tipos de material, momento de transporte e disposição final de excedentes), há ainda a considerar que diferentes modelos de seção transversal demandam diferentes acessórios construtivos como, por exemplo, banquetas, valetas, drenos de fundo, etc.

No modelo digital do terreno, sendo a malha de discretização espacial densa, é de se esperar que as seções transversais de projeto em k e p sejam bastante semelhantes, posto que, concebido para funcionar em regime subcrítico, o trecho de canal entre as duas seções terá seu fundo rebaixado em pouquíssimos centímetros. Por outro lado, dada a curta distância entre as referidas seções, espera-se que o terreno não apresente grande variação de cota nem de espessuras dos estratos geológicos no subsolo do mesmo intervalo $p - k$.

Na hipótese de não se dispor de meios de mensuração direta dos custos de passagem pode-se utilizar, por exemplo, uma função matemática que descreva a variação de custos de construção da seção transversal como função da cota do fundo do canal. Tal função, em tese, poderia dar conta de considerar as discontinuidades na evolução dos custos, em particular, saltos/reduções dos mesmos, quando da adoção de determinada seção transversal que demande/dispense determinados acessórios construtivos, como os já citados.

A experiência demonstra que, genericamente, tais funções atingem um ponto de mínimo para a condição em que o canal é projetado em posição semienterrada (cota do terreno natural próximo à média das cotas do fundo e da berma do canal). A adoção dessa constatação prática e lógica como critério de projeto minimiza o movimento de transporte de materiais quando da implantação da obra, pois, atendidos os requisitos de qualidade (índices físicos), o material escavado pode ser empregado na confecção dos aterros das bermas no mesmo trecho, sem a necessidade de serviços de carga, descarga, espera, etc.

A Figura 1 demonstra, para um caso real (Trecho do Eixo Norte da Transposição do Rio São Francisco), a vantagem do uso desse critério no lançamento do greide hidráulico do canal (Sarmiento, 2011). Nela se identifica claramente a queda relativa de custos unitários (“unitários” no sentido de haverem sido computados por unidade de comprimento do canal – discretizados a cada 20m e denominados "estacas"), aproximadamente entre as estacas 100 e 160, quando comparados aos custos em outros trechos, onde o canal atravessa relevo em cota que redonda ora em grandes cortes, ora em grandes aterros.

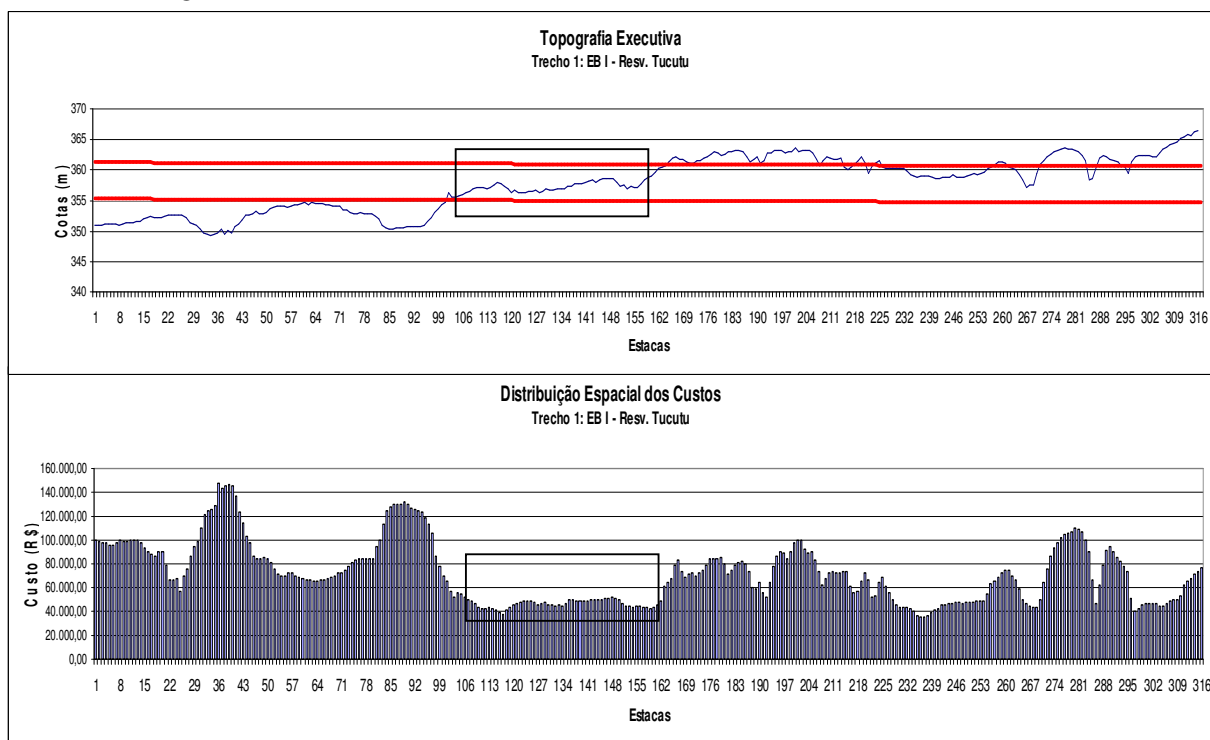


Figura 1 - Reflexos da topografia sobre os custos orçados por segmento entre estacas (fonte: Sarmiento, 2011).

Qualquer que seja a forma de cálculo dos custos de passagem – seja por cubação direta das seções transversais do canal, seja fazendo uso de alguma função matemática que traduza sua variabilidade – incontornável é o problema da dimensionalidade quando se considera que canais de adução, não raramente, podem apresentar extensão de dezenas de quilômetros. A depender da densidade da malha altimétrica, a dimensionalidade decorre do número de pontos viáveis a ser considerado para passagem e, em um segundo momento, evidencia-se também nos inúmeros trajetos resultantes das múltiplas escolhas sequenciais das direções possíveis de serem adotadas na investigação do transporte mais econômico da água entre os pontos de captação e entrega. O processo de busca de uma solução desejável, por mais eficiente que seja o algoritmo, implica em tempo de cálculo bastante elevado para computadores pessoais convencionais.

Considerando, por exemplo, os dados obtidos pelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), depurados e disponibilizado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), em

apenas 1 km² tem-se 1.089 pontos a serem considerados na aplicação do algoritmo, este por sua vez, para ser aplicável aos problemas práticos, se defrontará com mapa de custos de passagem formado por funções de x e y e não por valores fixos, como se configuram os mapas dessa natureza nas aplicações didáticas envolvendo obras longilíneas de engenharia, como por exemplo, o traçado otimizado de uma ferrovia mostrado em Ventsel (1983).

Diante do exposto, propõe-se um procedimento algorítmico de natureza metaheurística com o qual se pretende obter a solução mais próxima quanto possível do caminho ótimo entre os pontos de captação e adução e o de entrega da água.

3 – O ALGORITMO METAHEURÍSTICO

O algoritmo proposto tem como dados de entrada as seguintes informações:

- Modelo digital do terreno com malha retangular cotada a cada 30 m (SRTM depurado pelo INPE);
- Espessura dos estratos geológicos subjacentes: se possível cobrindo toda a área viável na qual será pesquisado o traçado mais econômico;
- Ponto de partida (adução) e de entrega da água (inclusive cotas de partida e entrega);
- Geometria da seção do canal: refere-se à seção transversal hidráulica (largura do fundo do canal, profundidade total e inclinação dos taludes internos). A seção transversal de projeto (corte, aterro e mista), da qual é parte a seção hidráulica, é considerada em forma paramétrica;

Além dos dados acima especificados, faz-se necessário a delimitação de uma zona do espaço abrangente dos pontos de partida e chegada, na qual o algoritmo pode decidir com liberdade o caminhamento adotado.

Não se utiliza nenhuma função definidora dos custos de passagem dependente das coordenadas espaciais (x,y). O algoritmo faz uso de uma rotina própria, capaz de projetar, de forma parametrizada, a seção transversal requerida pelo canal com dada cota de fundo e geometria da seção hidráulica informada. Dentre outras flexibilidades, a parametrização faculta à escolha do projetista vários critérios de inserção automática de berma nos cortes mais pronunciados, bem como definir a largura da mesma. Também definível é a inclinação dos taludes nas seções em corte, aterro ou mistas. O projeto geométrico de cada uma das seções é realizado automaticamente sobre o perfil transversal do terreno natural em cada estaca, cujas cotas e distâncias são igualmente extraídas do MDT de forma automática. Originariamente, a rotina foi desenvolvida como parte do sistema computacional SIDOC - Sistema Integrado de Dimensionamento e Orçamento de Canais descrito em Sarmento (2008).

A partir da retícula informada como sendo o ponto de partida do canal, a decisão de evolução do traçado é tomada seguindo os passos a saber:

- 1 – Cada retícula k (Figura 2) possui 8 direções segundo as quais o canal poderá evoluir. Para cada uma delas é projetada e cubada a seção transversal adequada (corte, aterro ou mista). Com base nos custos unitários do movimento de terra (escavações em material de 1ª, 2ª e 3ª categorias e aterros, todos em R\$/m³) é calculado o custo associado a cada uma das direções viáveis;
- 2- Os custos calculados no passo anterior poderão sofrer penalização, caso estejam associados à direções que impliquem em desvio em relação ao ponto-alvo de entrega da água;
- 3 – Penalizados os custos, adota-se a direção de evolução que apresentar o menor dentre aqueles valores.
- 4 – O caminhamento evolui então para retícula associada à direção de menor custo penalizado. Para esta, são então repetidos os passos de 1 a 3.

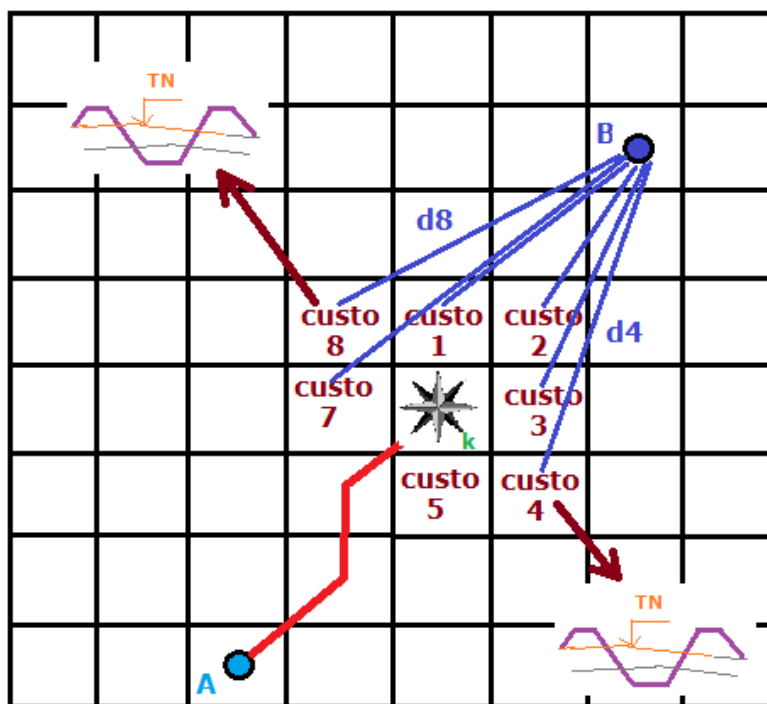


Figura 2 – Representação da estrutura de pesquisa do algoritmo metaheurístico.

4 – APLICAÇÃO DO ALGORITMO METAHEURÍSTICO

O algoritmo descrito foi aplicado para definição do traçado de um canal proposto como obra de integração estadual das águas transpostas a partir do Rio São Francisco (Eixo Norte) para o Rio Grande do Norte. O Eixo denominado Piranhas – Maxaranguape (Figura 3), apresentado em Sarmiento e Molinas (2011), tem como ponto de partida um local adjacente ao lago do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves (cota 100,4m) e desenvolve-se por aproximadamente 200 km,

contornando a região do Sertão Central Potiguar, até atingir a bacia do rio Maxaranguape, futuro manancial da Cidade de Natal.

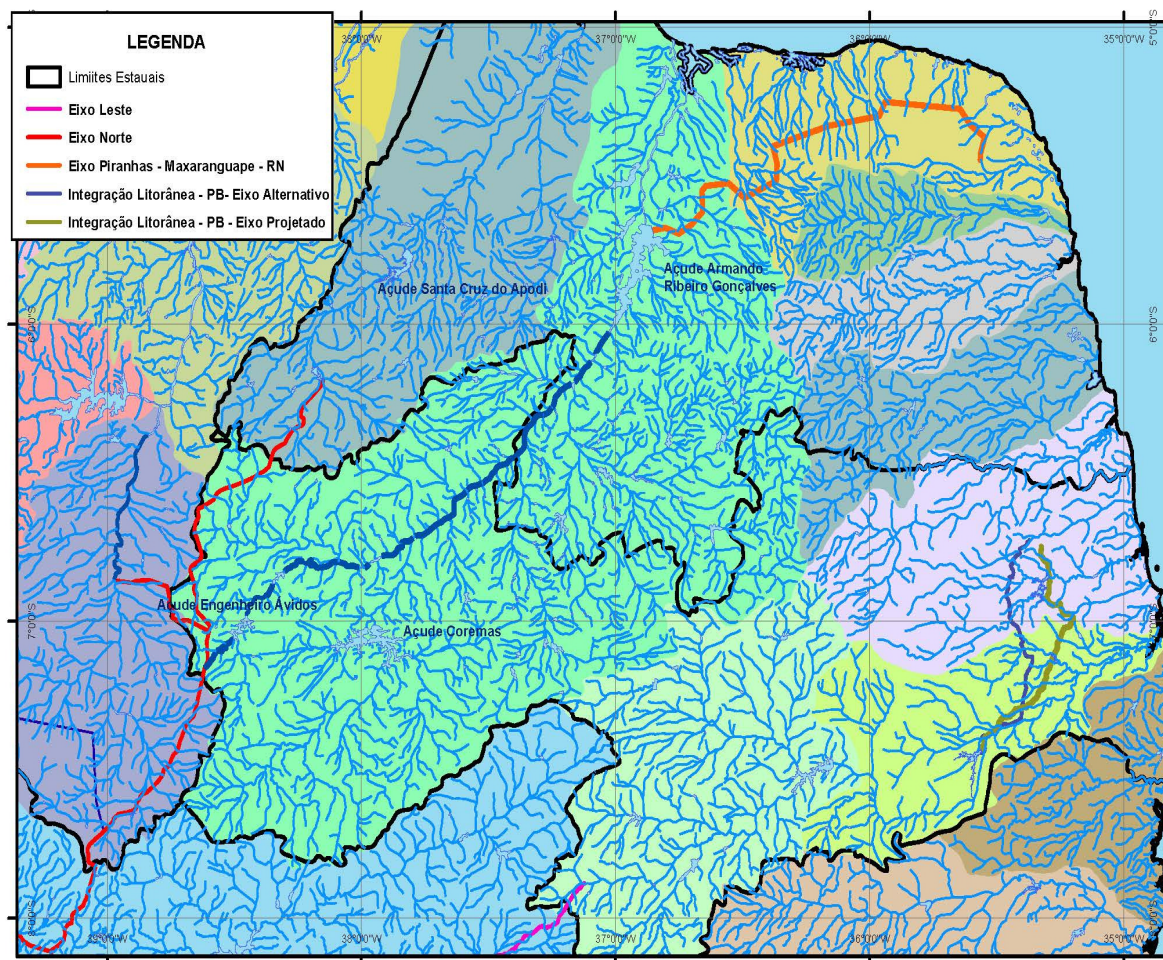


Figura 3 - Mapa regional mostrando a localização deste empreendimento no contexto regional.

O algoritmo proposto foi incorporado ao sistema computacional denominado **HidroProj** e aplicado à concepção da obra aludida.

Inicialmente, foi destacado do modelo digital do terreno, elaborado para a bacia hidrográfica do Piranhas-Açu e adjacências, a área de interesse a ser beneficiada com a integração desejada.

A área viável se estendeu da longitude 36,8838°, latitude 4,723575° (canto superior esquerdo) até a longitude 35,34194°, latitude 5,446429° (canto inferior direito).

Para o desenvolvimento do traçado em questão foram considerados os seguintes dados:

- Cota do terreno no ponto de partida = 100,4 m
- Cota do terreno no ponto de entrega da água = 86,3 m
- Vazão de projeto = 15 m³/s
- Canal:

- Seção trapezoidal
- Base = 2 m
- Profundidade = 3 m
- Talude hidráulico (H:V) = 3:2
- Declividade = 10 cm/km
- Revestido com placas de concreto

Foram ainda adotados os mesmos preços unitários licitados pelo PISF, no Lote 1 do Eixo Norte da obra de transposição do rio São Francisco (Ano base de 2007):

- Escavação de material de 1ª Categoria ($\text{R\$/m}^3$) = 4,74
- Escavação de material de 2ª Categoria ($\text{R\$/m}^3$) = 5,01
- Escavação de material de 3ª Categoria ($\text{R\$/m}^3$) = 20,49
- Aterro compactado ($\text{R\$/m}^3$) = 2,39

Fazendo uso do sistema HidroProj foram estudadas diversas variantes conforme se apresenta a seguir.

4.1 – Aplicação: Condição Inicial

Delimitação de faixa de pesquisa da solução ótima – Na condição inicial, o traçado é feito sem nenhuma restrição de caminho. Assim, a retícula (pixel) adjacente à retícula k (atual) é escolhida livremente com base no menor custo. A razão entre as distâncias da retícula de menor custo e o ponto de entrega da água e aquela de menor distância ao mesmo ponto de entrega é usada para penalizar o custo quando a retícula de menor custo não calha de ser a de menor distância ao referido ponto de entrega. Quando as duas retículas mencionadas coincidem a razão é igual a unidade e não há penalização (multiplicação do custo pela razão entre as distâncias).

Traçado resultante – Conforme se vê na Figura 4 (o traçado manual é mostrado em vermelho, com aparência mais retilínea), o traçado do algoritmo de tomada de decisão local (em azul), “atraído” por aterros relativamente mais baratos do que cortes, leva a um caminho que termina por esbarrar em um zona de cotas mais elevadas. Nesse ponto, devido a que escavações são muito profundas, as seções transversais ao eixo do canal precisam ser alargadas para permitir a cubação e a solução adotada foge aos critérios usuais de viabilidade.

Tendo o canal um comprimento total da ordem de 200 km, natural é se esperar que alguma restrição ou bloqueio de caminhamento precise ser imposto pelo projetista para que essa zona não seja adentrada. Em face dessa assertiva, partiu-se para o estabelecimento de condições de restrição capazes de fazer o algoritmo seguir critérios usuais de viabilidade. A definição dos trechos com caminhos a serem bloqueados orienta-se pelo princípio da minimização das intervenções de bloqueio, ou seja, da maximização da liberdade para o traçado automático, impedindo apenas que

descaminhos óbvios comprometam ou tenham demasiada influência no desenvolvimento final do canal.

4.2 - Aplicação: Condição 1

Delimitação de faixa de pesquisa da solução ótima – Na condição 1, o traçado é feito restringindo-se a área de pesquisa apenas composta pelos morros à direita do caminhamento (elevações na direção da região do Sertão Central). O HidroProj traça então, de acordo com os critérios já aludidos, o trajeto mais econômico até o final da folha topográfica disponibilizada, entretanto, sem chegar exatamente ao ponto de entrega da água.

Traçado resultante – A condição 1 (Figura 5) de execução do HidroProj, assim como as demais a serem mencionadas a seguir, mostra claramente a existência de um trecho demandante de restrição de caminhamento, ou seja, de um ponto a partir do qual se faz necessário impedir que o algoritmo desvie o desenvolvimento do canal em relação ao ponto de entrega. Isso, mais uma vez, devido a atração provocada pela relação de preços de corte e aterro, tão favorável a este último que, mesmo com a penalização, impõe desvios em relação ao ponto de entrega como mais atrativo.

4.3 - Aplicação: Condição 2

Delimitação de faixa de pesquisa da solução ótima – Na condição 2 (Figura 6), o traçado é feito sob restrição do acesso não apenas aos morros à direita do caminhamento de encosta em direção ao ponto de entrega, mas também à esquerda da faixa de caminhamento. A restrição de acesso à esquerda se inicia no ponto de inflexão a partir do qual os traçados manual e automático divergem (condição 1). Sob efeito dessa restrição, o sistema computacional traça então, de acordo com os critérios já aludidos, o trajeto mais econômico, tangenciando esporadicamente a linha de impedimento de acesso à esquerda, aproximando-se do ponto de entrega desejado tanto quanto a referida linha o faz.

Traçado resultante – A principal conclusão a cerca do traçado resultante sob tal condição é a de que, a partir do ponto de inflexão (ponto próximo daqueles de menor latitude), sempre será necessária a delimitação de uma faixa dentro da qual o sistema terá a “liberdade” de escolha de caminho. Isso provavelmente decorre do fato de a vertente da encosta naquele trecho ser mais recortada, o que faz surgir com mais frequência a opção de o algoritmo encontrar uma cabeceira e por ela descer em direção ao vale, atraído pelos aterros de custo relativamente mais baixos do que os cortes. Na sequência do traçado resultante, é mostrada uma ampliação de parte do trecho restringido à esquerda do caminhamento do canal (Figura 7). Nela é possível ver que, (i) com certa frequência o traçado “ricocheteia” na reta de restrição de caminho (em preto) e segue buscando o caminho ótimo; (ii) a restrição (linha em preto) não precisaria ser contínua, posto que prevalecem intervalos em que o caminhamento ótimo é condicionado pela mesma.

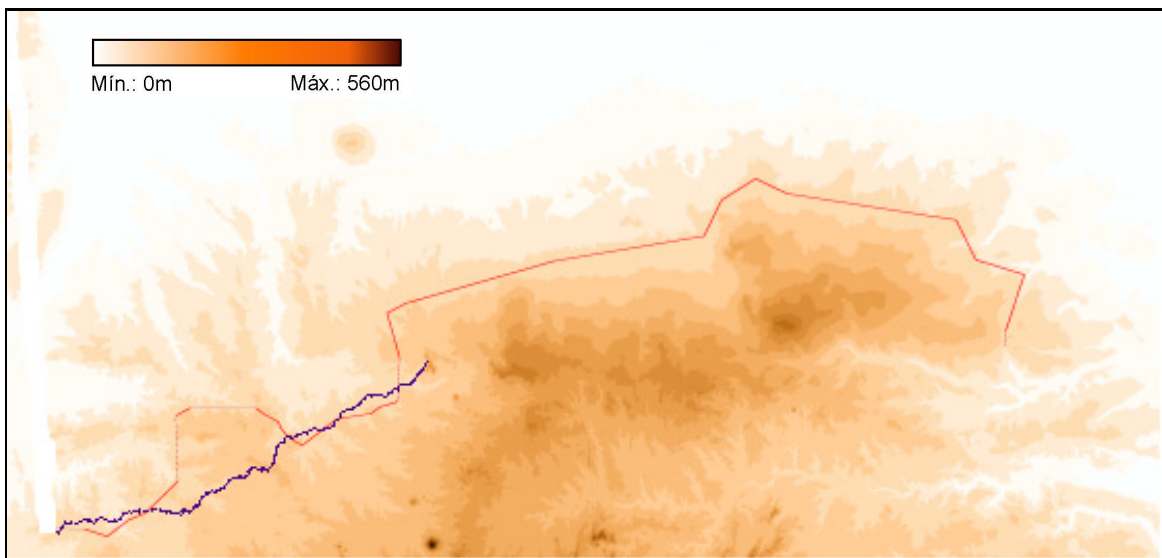


Figura 4: Traçado resultante da condição Inicial.

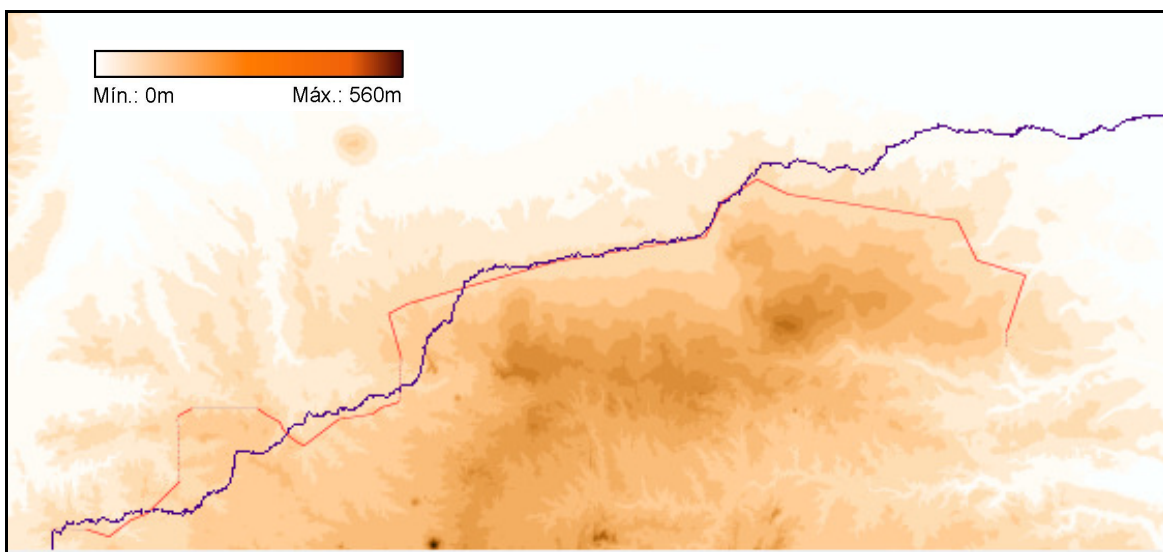


Figura 5: Traçado resultante da condição 1.

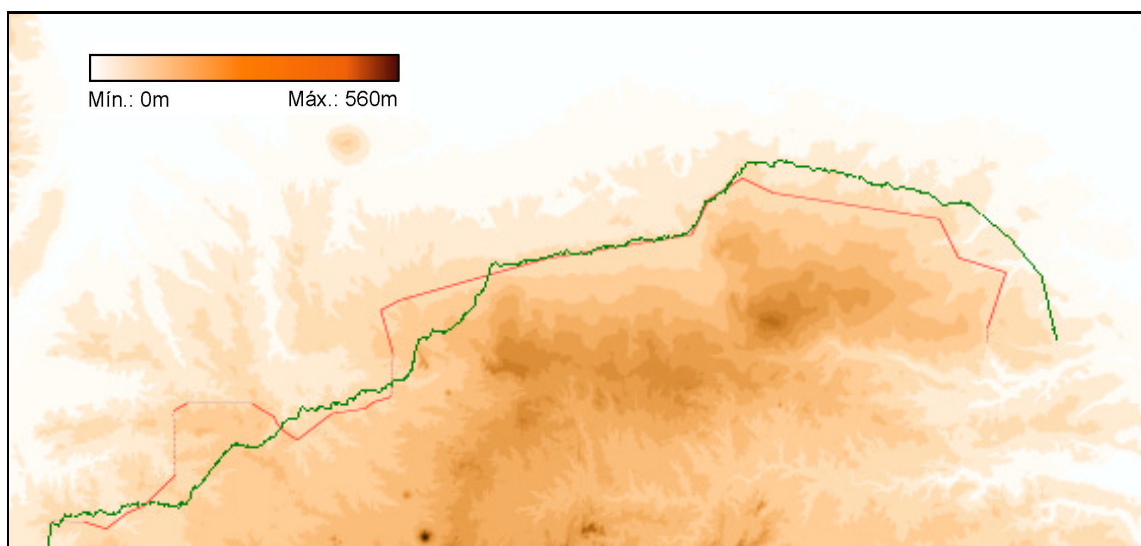


Figura 6: Traçado resultante da condição 2.

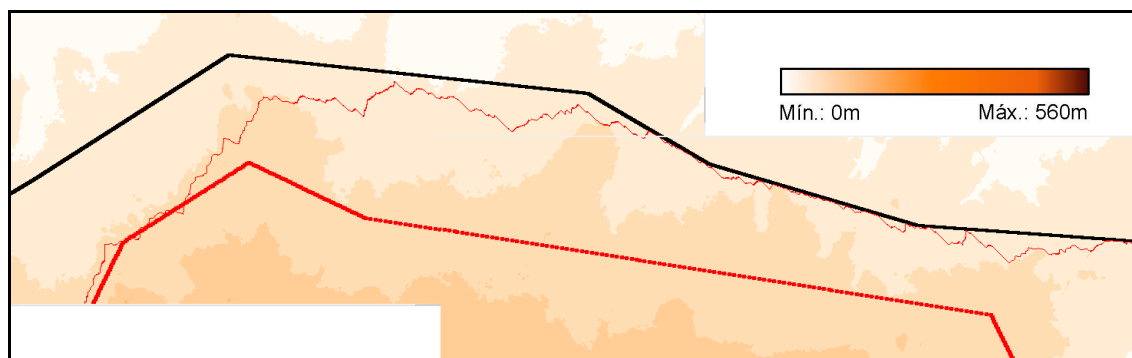


Figura 7: Ampliação de parte do trecho restringido à esquerda com linha de restrição em preto.

4.4 - Aplicação: Condição 3

Delimitação de faixa de pesquisa da solução ótima – Em relação à condição 2, a diferença é que a linha de restrição à esquerda é posta praticamente coincidindo com o traçado manual, à exceção do último trecho de inflexão na direção do ponto de entrega da água (Figura 8).

Traçado resultante – Conforme esperado o traçado do canal no trecho restringido à esquerda torna-se praticamente coincidente com o traçado manual, à exceção da parte final onde, propositalmente, deixam de se aproximar o traçado manual e a linha de restrição de acesso. Outra observação digna de nota é a coincidência não forçada (pois não há restrição nem à esquerda nem à direita) entre os traçados automático e manual no trecho relativamente longo imediatamente anterior àquele restringido à esquerda.

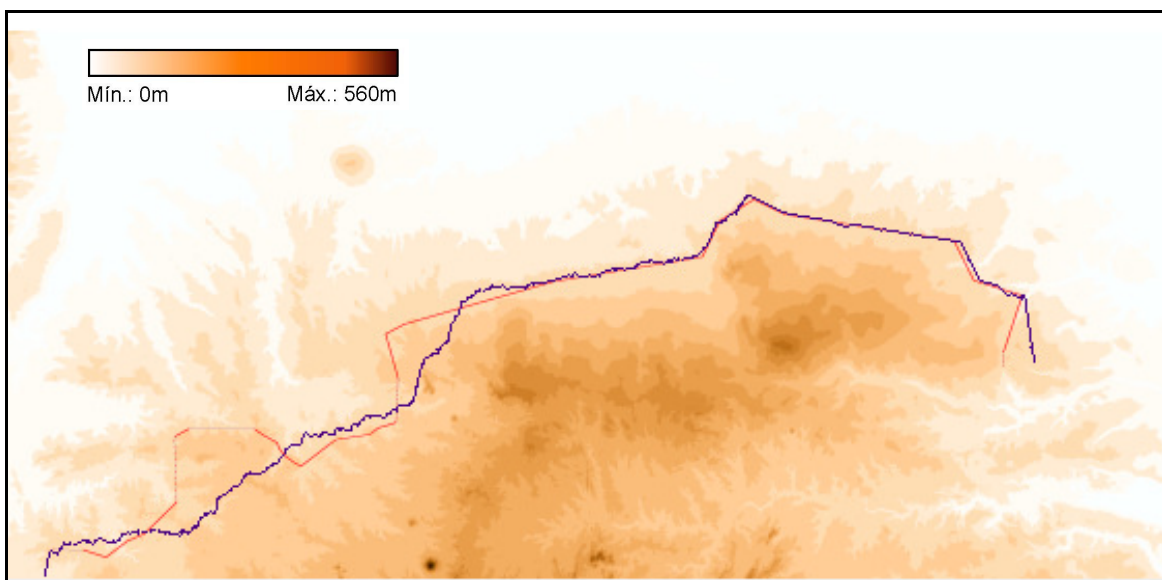


Figura 8: Traçado resultante da condição 3.

A Figura 9 e 10 mostram respectivamente o perfil resultante da execução do algoritmo sob a condição 3 e o perfil associado ao traçado feito manualmente. Concernente à relação entre a solução manual e a automática, o perfil mostrado na Figura 9 faculta as seguintes leituras:

- Há pelo menos quatro “momentos trágicos” em que o critério de decisão local, teleguiado pelo critério de penalização pela distância, leva o traçado a enfrentar grandes cortes e grandes aterros. Na

ordem em que aparecem no perfil mostrado na Figura 9, são eles: (i) aterro com altura superior a 30 metros; (ii) corte com altura de 46 metros (indicado no perfil); (iii) outro corte não tão elevado, mas um pouco mais longo e; (iv) outro aterro, no final do traçado, este perfeitamente contornável pela simples manutenção da linha de restrição mais acima da encosta (aproximando-a do traçado manual).

- Quanto ao 1º aterro, este decorre da decisão de o algoritmo, afastando-se do traçado manual, buscar aterros ao invés de cortes. Assim, o traçado automático cruza o primeiro vale topográfico mais abaixo do que a opção feita no traçado manual.

- O “momento trágico” associado ao 1º trecho em corte (item ii) ocorre quando o algoritmo, movido pela penalização com base na distância, decide avançar cortando o morro, ao invés de contorná-lo como faz o traçado manual. O mesmo se dá com o 2º corte (item iii) mais pronunciado.

- O último aterro, conforme acima mencionado, sendo de interesse, pode ser eliminado, trazendo-se a linha de restrição para mais próximo do traçado manual, ou seja, forçando-se o canal a persistir em cotas mais elevadas da encosta.

- Excetuando-se os trechos decorrentes dos quatro “momentos trágicos” mencionados, o traçado obtido com o algoritmo metaheurístico exibe o comportamento notadamente eficiente, a saber o traçado de um canal semi-enterrado, configuração de greide tal que os volumes de corte compensam localmente volumes de aterro, evitando assim gastos adicionais com momentos de transporte.

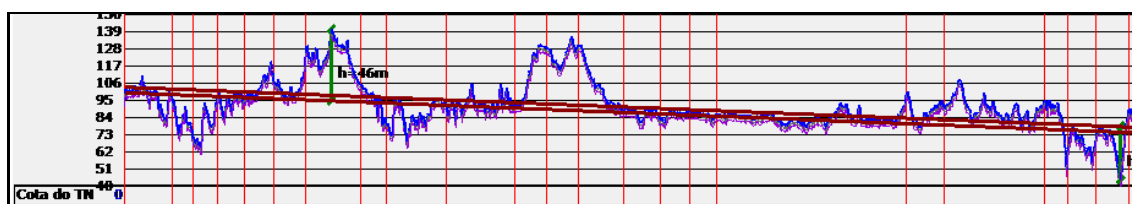


Figura 9: Perfil resultante da condição 3.

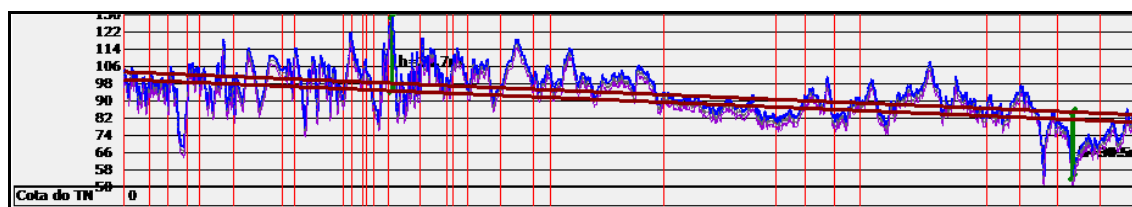


Figura 10: Perfil resultante da Alternativa Manual.

4.5 - Aplicação: Condição 3A

Delimitação de faixa de pesquisa da solução ótima – Em relação à condição 3, a diferença é que se assumem as soluções consideradas melhores no traçado manual. Assim, a execução do algoritmo consiste na busca de um aprimoramento daquele traçado (Figura 11).

Traçado resultante – De fato, o resultado das restrições ou bloqueios que levam ao presente traçado conseguem otimizar a solução manual. Nesta, observa-se a recorrência de diversos trechos

longos e retilíneos. Tal alternativa trás de fato melhorias consideráveis ao traçado manual e enfatiza a utilidade do algoritmo para os fins propostos.

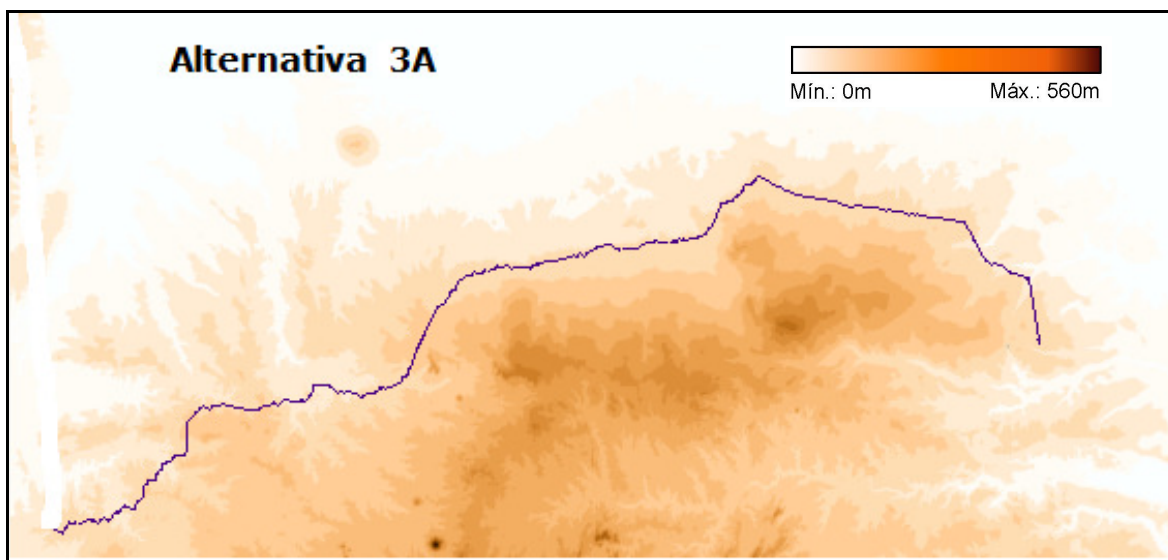


Figura 11: Traçado resultante da condição 3A.

A Figura 12 ilustra as possibilidades de uso do algoritmo no apoio à concepção de variantes de desenho da solução de travessia de determinados trechos. Na referida figura, o traçado mais retilíneo é o traçado realizado manualmente pelo projetista.

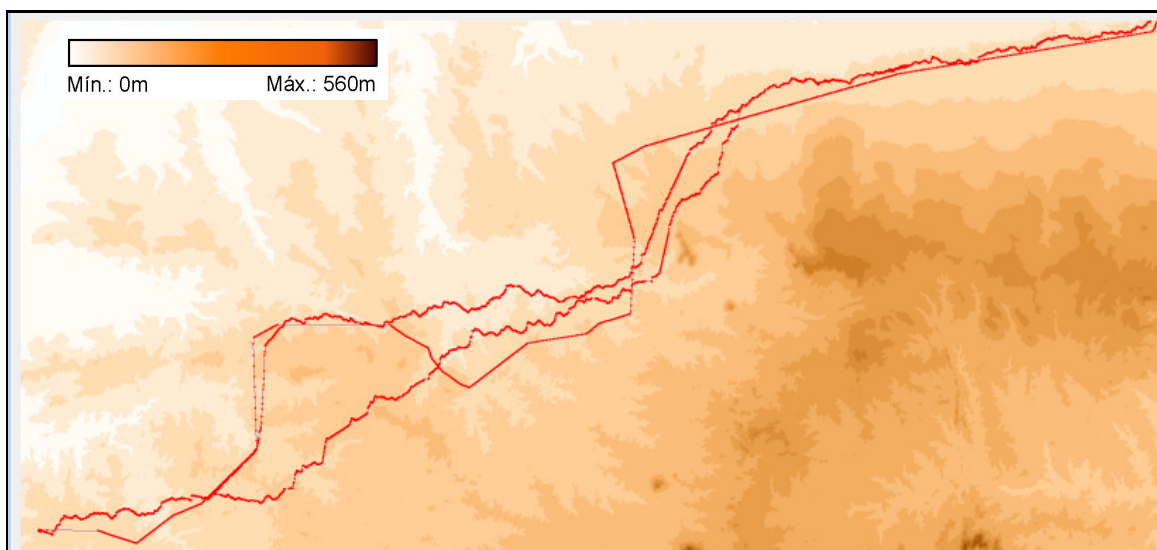


Figura 12: Variantes de travessia para um trecho.

4.6 - Outras alternativas estudadas

Com o objetivo de melhor demonstrar o comportamento do algoritmo proposto, duas alternativas adicionais foram consideradas. Em ambas, os pontos de chegada e de partida do canal são exatamente os mesmo já estudados. A diferença consiste apenas no fato de o canal, na 1ª alternativa, partir com fundo na cota 110m e não 100,4m, ou seja, o canal partiria de um aterro com

10 metros de altura em relação ao terreno natural. Na 2ª Alternativa a altura do aterro mencionado seria de 20 metros.

A Figura 13 mostra as diferenças planimétricas entre as duas alternativas e em relação ao traçado manual. Na sequência (Figura 14) é mostrado o perfil para o caso de o canal partir sobre um aterro de 20 metros de altura.

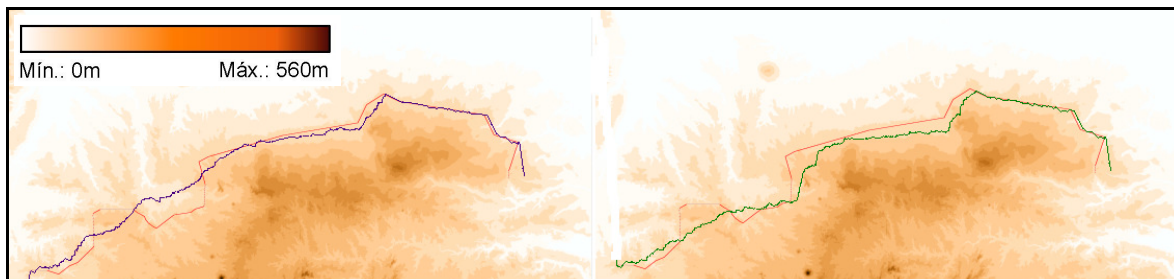


Figura 13: 1ª Alt.(esquerda) - canal - aterro 10m; e 2ª. Alt. (direita) – canal - aterro de 20m.

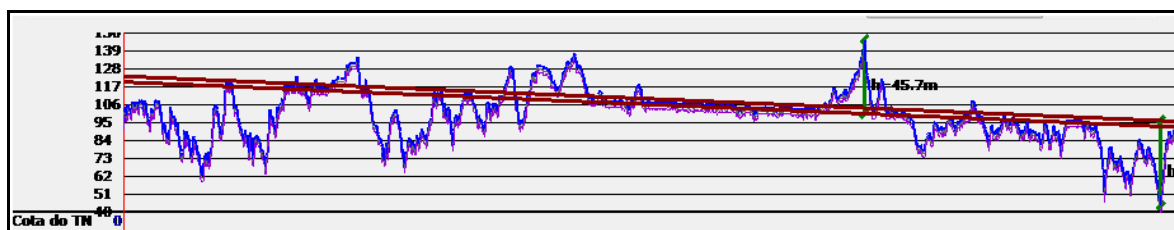


Figura 14: Perfil da 2ª Alternativa: canal sobre aterro de 20 metros de altura.

5 – CONCLUSÕES

O algoritmo metaheurístico, conforme ora proposto, tem na metodologia de cálculo dos custos de passagem seu mais significativo diferencial a distingui-lo em relação aos seus correlatos (em objetivo) disponíveis na literatura. Conforme visto, o algoritmo, desenvolvido numa plataforma independente de software do tipo SIG, enfrenta o problema da elaboração do plano de custos de passagem conforme este se apresenta na prática.

Mesmo tendo de esboçar para cada pixel (largura igual a 30m) a seção geométrica real de projeto, isso para cada uma das oito direções viáveis, o desempenho computacional do algoritmo foi satisfatório, dado que, em se tratando de um canal com cerca de 200 km de comprimento, o tempo de processamento médio resultou em pouco mais de 30 minutos (desempenho afeto a computador tipo laptop com processador Core – i3).

Na forma como originalmente aqui proposto, o algoritmo oferece automaticamente, sem demandar restrições manuais de acesso a zonas de relevo e/ou geologia indesejáveis, o traçado mais econômico para a adução a partir de um dado ponto de partida prefixado até sua entrega em algum ponto do Modelo Digital do Terreno (MDT) utilizado. Sob essa condição (de não se ter rigidamente estabelecido o ponto de entrega da água), o greide da solução obtida satisfaz ao critério econômico

lógico segundo o qual o canal deve apresentar a maior extensão possível semienterrada. Admite-se aqui ser a solução otimizada (não sendo possível provar matematicamente que se trata de uma solução ótima global, dado o caráter heurístico do algoritmo utilizado), composta a partir de decisões ótimas locais (pixel a pixel, conforme esquema da Figura 2), as quais se exibem em traçado de custo otimizado, associado ao ponto de partida predefinido e à cota de elevação do fundo do canal adotada. O fundamento dessa conclusão empírica se baseia na qualidade dos resultados obtidos, sob condição de quase completa liberdade de traçado, concedida ao algoritmo para tomar as decisões locais sem rigidez de imposição em alcançar ponto de entrega da água predeterminado. Assim, fazendo uso de uma função de penalização “leve”, conforme visto, baseada apenas na medida da distância entre a célula em teste e o pretensão ponto de entrega de água, as decisões locais que se afastam deste último somente serão influenciadas pela penalização quando trouxerem impactos significantes, a ponto de implicarem na manutenção da direção desejável, em detrimento da economia de custo auferível se se desse preferência à célula outra, localizada em direção distinta daquela que diretamente leva ao ponto de entrega.

Utilizado em composição com restrições impostas pelo projetista, o algoritmo se constitui numa poderosa ferramenta de busca de caminho otimizado em faixa de pesquisa predeterminada e, - não menos importante -, permite a identificação de traçados preliminares com a simples restrição de áreas de relevo onde a experiência do profissional julga infrutífera a passagem.

Se por um lado essa composição descarta áreas inviáveis de ser rota de passagem para o projeto, por outro lado o bloqueio sistemático do acesso às mesmas evita que o algoritmo seja atraído por determinadas configurações de relevo sedutoras da perspectiva de custos (e.g.: aterros mais baratos do que cortes), mas altamente nocivas para o traçado como um todo, posto terem o potencial de imolarem uma solução globalmente interessante, vitimada, não raramente, pela preponderância da “gula” do algoritmo em um único ponto, a partir do qual tem início o descaminho do traçado, deixando visualmente perceptível na trajetória, as consequências de uma decisão singular, localmente adequada, mas globalmente trágica.

A busca de funções de penalização mais adequadas é a meta a ser perseguida. De fato, a determinação do caminho de custo mínimo em um plano de custos de passagem realista como o utilizado pelo algoritmo metaheurístico aqui proposto precisa contar com penalizações que em mesmo grau de realismo traduzam os impactos das decisões tomadas localmente, propiciando um equilíbrio ótimo entre o comprimento da rota e o movimento de terra demandado, este, o mais significativo conjunto de itens de um projeto de adução gravitária via canal.

BIBLIOGRAFIA

BAGLI, S., GENELETTI, D., ORSI, F. (2010), *Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts*, Environmental Impact Assessment Review, Vol 31, pp:234–239, Elsevier Inc.

COLLISCHONN, W., PILAR, J.V., (2000), *A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals*. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* ; 14(4): pp: 397-406.

DIJKSTRA, E.W., (1959). *A note on two problems in connection with graphs*. *Numerische Mathematik*, 1, 269–271.

SARMENTO, F. J. (2008). *Otimização de Custos de Adução na Transposição do Rio São Francisco*. IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Nordeste. Salvador – BA.

SARMENTO, F. J., MOLINAS, P.A. (2011). *A Gestão das Águas da Transposição do Rio São Francisco no Nordeste Brasileiro*. XIV World Water Congress. Porto de Galinhas – PE.

VENTSEL, E.S. (1983). *Investigación de operaciones: problemas, principios, metodología*. Moscú: MIR. 280 p.

YILDIRIM, V; NISANCI, R e REIS, S. (2006), *A GIS Based Route Determination in Linear Engineering Structures Information Management (LESIM)*. XXIII FIG Congress, Munich, Germany, http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ps03/ps03_11_yildirim_etal_0544.pdf.