

GUSTAVO EDUARDO MARCATTI

OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO GEOMÉTRICO DE ESTRADAS FLORESTAIS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

M313o
2017 Marcatti, Gustavo Eduardo, 1985-
Otimização do traçado geométrico de estradas florestais /
Gustavo Eduardo Marcatti. – Viçosa, MG, 2017.
vii, 47f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Florestas - Administração. 2. Otimização combinatória.
3. Sistemas de informação geográfica. 4. Software -
Desenvolvimento. 5. Python (Linguagem de programação de
computador). 6. Linguagem de programação (Computadores).
7. Metaheurística. 8. Modelo digital de elevação.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal.
II. Título.

CDO adapt. CDD 634.68

GUSTAVO EDUARDO MARCATTI

OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO GEOMÉTRICO DE ESTRADAS FLORESTAIS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 25 de janeiro de 2017.

 _____ Helio Garcia Leite	 _____ Alexandre Rosa dos Santos
 _____ Daniel Henrique Breda Binoti	 _____ Alexandre Simões Lorenzon
 _____ Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro (Orientador)	

AGRADECIMENTOS

Ao meu filho Eduardo, por ser um exemplo de vida e a principal fonte de motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

A minha esposa Franscine, pelo amor, pelo companheirismo, pelo incentivo, pelo frequente apoio, auxílios e amparos no dia-a-dia, que foram imprescindíveis para execução deste trabalho.

Aos meus pais, Theodoberto e Ana Maria, pelo amor, carinho e amizade, pela oportunidade que me propiciaram para estudar, por serem um exemplo de conduta, sendo muito importantes para construção de meu caráter. Aos meus irmãos, pela amizade e pela considerável contribuição para minha formação.

Ao Professor Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro, pelo apoio e ensinamentos. Por ser um excelente mestre e uma excepcional fonte de motivação e incentivo. E sobretudo pela amizade construída ao longo desta caminhada, a qual me orgulho muito.

Ao professor Helio Garcia Leito, pelos frequentes ensinamentos desde os tempos de graduação, pela amizade e por ser um grande exemplo de profissional e mestre.

Ao Professor Alexandre Rosa dos Santos, pela amizade, incentivo, motivação e confiança. E principalmente pelos conselhos no âmbito acadêmico e pessoal.

Aos pesquisadores Alexandre Simões Lorenzon e Daniel Henrique Breda Binoti pelas valiosas sugestões e pela disponibilidade de participação da banca de defesa.

Aos amigos e colegas de graduação do curso de Engenharia Florestal, em especial aos grandes amigos Fabrício e Nero.

Aos amigos do laboratório de geoprocessamento do DEF: Alexandre, Andres, Bruno, Duber, Getulio, Gustavo, Kelly, Julianne, Lucas, Pedro, Thaisa, pelo apoio, ensinamentos, discussões, amizade e principalmente pela convivência harmoniosa e pelos vários momentos de alegria e descontração.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Florestal, em especial aos secretários da pós-graduação Alexandre e Dilson, pelo auxílio constante, ao porteiro Chiquinho, pelo apoio desde o início da graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Projeto Floresta-Escola/Hidroex, por viabilizarem a infraestrutura de hardware e software e pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal pelo conhecimento técnico e científico a mim transmitidos, imprescindíveis para realização deste trabalho.

A todos, que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

GUSTAVO EDUARDO MARCATTI, filho de Ana Maria Leite Marcatti e Theodoberto Marcatti, nasceu em Virginópolis, estado de Minas Gerais, em 19 de julho de 1985.

Em março de 2001, ingressou na Central de Desenvolvimento Agrário de Florestal – CEDAF/UFV, onde obteve o título de Técnico em Agropecuária concomitantemente com o ensino médio, em dezembro de 2003.

Em março de 2007, iniciou o curso de Graduação em Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, obtendo o título de Engenheiro Florestal em 22 de julho de 2011.

Em agosto de 2011, iniciou o Mestrado em Ciência Florestal, na Universidade Federal de Viçosa, obtendo o título de *Magister Scientiae* em fevereiro de 2013.

Em março de 2013, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de Doutorado, pelo Departamento de Engenharia florestal da Universidade Federal de Viçosa. Em 2017, submeteu-se ao exame de defesa de tese para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1 METODOLOGIA	5
2.1.1 Custos relacionados às estradas	5
2.1.2 Restrições técnicas do traçado geométrico da estrada	13
2.1.3 Procedimento de otimização do traçado da estrada	23
2.2 ESTUDO DE CASO	30
2.2.1 Dados espaciais	30
2.2.2 Características da estrada e informações de custos	32
2.3 INFORMAÇÕES COMPUTACIONAIS	33
3. RESULTADOS	34
3.1 ATRIBUIÇÃO HORIZONTAL DO TRAÇADO DA ESTRADA	34
3.2 ATRIBUIÇÃO VERTICAL DO TRAÇADO DA ESTRADA	35
3.3 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	37
4. DISCUSSÕES	38
5. CONCLUSÕES	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

RESUMO

MARCATTI, Gustavo Eduardo, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2017. **Otimização do traçado geométrico de estradas florestais.** Orientador: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro. Coorientador: Vicente Paulo Soares.

Estradas desempenham diversas funções para a sociedade. No setor florestal esse meio de transporte é fundamental, pois é utilizado em praticamente todas as atividades do empreendimento. Dentre essas atividades, o transporte de madeira merece destaque pois, juntamente com a colheita, é a operação mais onerosa do processo produtivo. Diversos elementos podem influenciar o custo do transporte; no entanto, a estrada pode ser considerada como um dos mais importantes, pois possui forte relação com os demais elementos, estando associada a impactos ambientais, além de ter elevados custo de construção e manutenção. O principal desafio dos gestores é determinar o local ideal de construção de estrada, de forma a permitir o tráfego com eficiência e segurança. Neste estudo é proposto um método desenvolvido para otimização do traçado geométrico de estradas florestais, implementado em ambiente de sistema de informações geográficas (SIG). A metaheurística *simulated annealing* foi utilizada para implementar um algoritmo com o objetivo de minimizar o custo total da estrada, atendendo restrições técnicas dos alinhamentos horizontal e vertical. O custo total incluiu: construção, manutenção, utilização e fatores ambientais e sociais. O método desenvolvido é apropriado para a otimização do traçado geométrico de estradas, por atender as condições necessárias: considera todos os custos dominantes e sensíveis, respeitando as restrições técnicas; otimiza as atribuições horizontais e verticais de modo simultâneo; é capaz de retornar uma boa solução para um problema de grande porte em um tempo aceitável; e é compatível com um SIG, o que favorece o processo de tomada de decisão, permitindo lidar com bases de dados extensas e complexas.

ABSTRACT

MARCATTI, Gustavo Eduardo, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2017. **Optimization of the geometric alignment of forest roads**. Adviser: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro. Co-adviser: Vicente Paulo Soares.

Roads perform many functions for society. In the forestry sector, it is a key factor, because it is used in practically all the activities of the enterprise. Among these activities, timber transportation deserves special mention because, together with harvesting, it is the most costly operation of the production process. Several elements can influence the cost of transport; however, the road can be considered as one of the most important because it has a strong relationship with other elements, for instance, being associated with environmental impacts, and also having high construction and maintenance costs. The main challenge for managers is to determine the ideal local for road construction in order to allow efficient and safe traffic. In this study, a method developed for optimization of the geometric alignment of forest roads, implemented in a geographic information system (GIS) environment, is proposed. The simulated annealing metaheuristic was used to implement an algorithm with the objective of minimizing the total cost of the road, addressing technical restrictions of the horizontal and vertical alignment. The total cost included: construction, maintenance, use and environmental and social factors. The developed method is suitable for optimization of the geometric alignment of roads, considering the needed conditions: it considers all the dominant and sensitive costs, respecting the technical restrictions; it optimizes horizontal and vertical assignments simultaneously; it is able to return a good solution to a large problem in an acceptable time; and it is compatible with a GIS, which favors the decision-making process, allowing to deal with extensive and complex databases.

1. INTRODUÇÃO

Estrada é um meio de ligação entre localidades, sendo imprescindível para o desenvolvimento humano (GUCINSKI, 2001; ENTERS et al., 2002). As estradas são utilizadas como meio de transporte de pessoas e produtos; em muitas situações são as únicas formas de acesso a uma localidade. De acordo com Machado (2013), as estradas proporcionam benefícios econômicos e sociais para a sociedade e, em vários países, apresentam papel de destaque no desenvolvimento do setor agrícola.

Em um empreendimento florestal as estradas são fundamentais, pois são utilizadas em praticamente todas as atividades que envolvem o empreendimento, como a abertura do terreno para preparo do solo e plantio, operações de manejo e proteção e, por fim, a colheita e o transporte da madeira. O transporte merece destaque, pois é responsável por uma importante parcela do custo total de produção de madeira e, juntamente com a colheita, é a operação mais onerosa do processo produtivo (WEINTRAUB et al., 1996; MACHADO, 2002; FRISK et al., 2010).

No Brasil, cerca de 65% do transporte de carga é feito utilizando a malha rodoviária; o setor florestal é ainda mais dependente desse meio de transporte (MACHADO et al., 2009). De acordo com Silva et al., (2007), cerca de 85% da madeira transportada no país utiliza estradas e rodovias¹ como meio de transporte. Alguns elementos são essenciais para minimizar o custo do transporte de madeira. Favreau (2012) discute alguns desses elementos: desempenho do transporte rodoviário; estradas florestais; transporte multimodal; acompanhamento da carga em tempo real; colaboração entre companhias madeireiras; e otimização do fluxo de madeira.

O desempenho do transporte rodoviário apresenta relação direta com os demais elementos mas, de forma isolada, é influenciado principalmente pelos equipamentos (carregamento/descarregamento de madeira, veículos de carga), distância de transporte, motoristas e operadores (FAVREAU, 2012). Diversos trabalhos já foram conduzidos nessa linha (NURMINEN e HEINONEN, 2007;

¹ O Código de Trânsito do Brasil define estrada como uma via rural não pavimentada; já rodovia é definida como uma via rural pavimentada. Por ser um conceito mais geral, durante o texto será utilizado apenas o termo estrada.

SILVA et al., 2007; MACHADO et al., 2009). As estradas florestais devem possuir um traçado geométrico de modo a proporcionar eficiência e segurança de tráfego (AKAY e SESSIONS, 2005; EPSTEIN et al., 2006; KANG et al., 2012). O transporte multimodal (exemplo: rodovia-ferrovia) pode promover redução de custos, sobretudo para longas distâncias (WOLFSMAYR e RAUCH, 2014). O acompanhamento da carga em tempo real, tornou-se possível com a popularização do sistema de posicionamento global (GPS, do inglês *global positioning system*). Assim, essas informações podem melhorar o planejamento do transporte de madeira (DEVLIN e MCDONNELL, 2009). A colaboração entre companhias madeireiras no transporte pode minimizar o tempo em que os veículos trafegam descarregados (FRISK et al., 2010). A otimização do fluxo de madeira utiliza técnicas de pesquisa operacional para determinar as melhores rotas a serem seguidas pelos veículos de carga (RÖNNQVIST, 2003; KANZIAN et al., 2013).

Dentre os elementos do transporte citados, as estradas florestais são um dos que mais contribuem para o custo total de transporte e, conseqüentemente, para o custo de produção da madeira (AKAY, 2006), além de apresentar forte relação com os demais elementos. Do ponto de vista econômico e social, as estradas são extremamente importantes. Porém, podem gerar diversos impactos negativos, estando geralmente associadas a custos elevados (JONG e SCHONFELD, 1999; KARLSON et al., 2014).

Além dos custos econômicos diretamente vinculados com a construção, as estradas podem apresentar uma série de outros custos, de ordem ambiental, social e econômica. Portugal et al., 2013, enumeram cerca de vinte riscos de impactos ambientais e sociais negativos relacionados a estradas. Muitos desses riscos podem ser minimizados conforme a escolha do traçado. O principal desafio dos gestores em logística e transporte, em relação a estradas, é estabelecer o local mais adequado para construir novas estradas (determinar o traçado geométrico) e identificar os gargalos nas já existentes para propor alternativas mais eficientes.

A determinação do local de construção da estrada é complexa, pois engloba uma série de restrições e objetivos. Muitos dos objetivos envolvidos são conflitantes, sendo impossível contemplá-los em sua totalidade. O mais apropriado para escolha da localização ideal seria considerar todos os custos

em um procedimento de otimização, de modo a atender as exigências técnicas de concordância vertical e horizontal entre trechos.

Diversas estratégias de otimização podem ser adotadas para otimizar o traçado da estrada. Kang et al. (2012) apresentam uma revisão de literatura sobre o tema. Esses autores estratificaram os trabalhos de acordo com o alvo da otimização (atribuição horizontal, atribuição vertical e atribuição horizontal e vertical simultaneamente) e estratégias de otimização (enumeração, pesquisa numérica, programação dinâmica, programação inteira mista, metaheurísticas, dentre outras). Li et al. (2016) conduziram recentemente uma revisão de literatura sobre as estratégias de otimização.

Um bom modelo de otimização deve considerar as três dimensões (atribuição horizontal – x, y; vertical – z) do traçado da estrada simultaneamente no processo. Esse requisito gera um problema de natureza combinatória que faz com que o problema seja difícil de ser resolvido. Técnicas aproximativas de otimização geralmente são adotadas para lidar com essa classe de problemas e, dentro desse grupo de técnicas, as pesquisas metaheurística têm sido amplamente utilizadas, pois alcançam boas soluções em um tempo razoável.

O algoritmo genético foi a metaheurística mais utilizada nos últimos anos para resolver o problema do traçado de estradas (JHA, 2013; SHAFABI e BAGHERIAN, 2013). A maioria dos trabalhos desenvolvidos utilizando essa metaheurística foi produzida pelo grupo de pesquisa de engenheiros civis da universidade de Maryland (JONG e SCHONFELD, 1999, 2003; JHA e SCHONFELD, 2004; KIM et al., 2005, 2007, KANG et al., 2009, 2012; YANG et al., 2014; LI et al., 2016). Embora os algoritmos genéticos obtenham resultados satisfatórios, Jha e Schonfeld (2004) apontam que a solução do problema é relativamente lenta, principalmente quando a implementação é incorporada a um sistema de informações geográficas (SIG). Outras metaheurísticas podem ser empregadas: Busca Tabu (Aruga et al., 2005 e Aruga et al., (2006) e *simulated annealing* (Akay e Sessions, 2005 e Akay, 2006).

A metaheurística *simulated annealing* (SA) é simples de ser implementada e geralmente retorna soluções tão boas quanto os algoritmos genéticos, para uma série de problemas da pesquisa operacional (BLUM e ROLI, 2003; TALBI, 2009). Além disso, demanda menos recursos computacionais de armazenamento durante o processo de execução. Apesar dessas

características, ela tem sido pouco utilizada em estudos sobre traçado de estradas.

Diante do exposto, este trabalho teve o objetivo de desenvolver e propor um método para otimizar o traçado geométrico de estradas florestais, utilizando o *simulated annealing*, e implementar o método em um ambiente de sistema de informações geográficas (SIG).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 METODOLOGIA

2.1.1 Custos relacionados às estradas

Os custos relacionados a estradas podem ser divididos em custos de planejamento, construção, utilização da estrada, sociais e ambientais (JHA et al., 2006). Os custos de planejamento surgem no estágio inicial do projeto de construção da estrada, abrangendo estudos de demanda de tráfego, de impactos ambientais e sociais, consulta pública, levantamento do uso e ocupação da terra, levantamento topográfico, levantamento dos custos econômicos, estudos de viabilidade (técnica, econômica, ambiental e social), determinação do traçado geométrico, determinação do plano de trabalho, dentre outros (ROGERS e ENRIGHT, 2016).

Os custos de planejamento podem ser significativos em relação ao custo total da estrada e devem ser estimados para efeito de cálculos e de controle de orçamento – em geral, equivalem a 10% do custo de construção da estrada (MACHADO, 2013), porém normalmente não são considerados no procedimento de determinação do traçado geométrico, pois tendem a ser insensíveis a diferentes alternativas de traçado (JHA et al., 2006).

Geralmente os custos com a construção da estrada são os que mais contribuem para o custo final da obra. Esses custos podem ser subdivididos em diversas categorias e de várias formas. No projeto executivo, esses custos são detalhados o máximo possível; porém, para fins de determinação do traçado, são divididos dentro de poucos componentes. Jha et al. (2006) utilizaram os estudos de OECD (1973) e Chew et al. (1989) como referências para subdividir e atribuir a importância proporcional dos custos de construção em: pavimentação – 30%, terraplanagem – 25%, estruturas (exemplo: pontes) – 20%, drenagem – 10%, aquisição de terras – 5% ~ 10%, outros (exemplo: sinalização) – 10%. Já Machado (2013), considera o planejamento como um componente do custo de construção e, em linhas gerais, distribuiu os custos na seguinte proporção: planejamento – 10%, drenagem – 20%, terraplanagem – 30% e pavimentação – 40%. Os custos de construção são extremamente dependentes do local; por exemplo, para locais com terrenos mais declivosos, os custos de drenagem e

terraplanagem serão mais significativos que os demais; já em locais planos, é esperado o inverso, ou seja, serem menos significativos.

Para a determinação de um traçado geométrico de estradas eficiente para o transporte é necessário considerar os custos de utilização da estrada. Esses custos podem ser subdivididos em: custo operacional do veículo, custo de tempo de viagem e custo de acidentes (AASHTO, 2003). Os custos de utilização são sensíveis ao traçado da estrada; por isso, devem ser utilizados para avaliar as diferentes alternativas. Esses custos apresentam correlação negativa com a qualidade da estrada. De acordo com Machado et al. (2009), os três principais fatores que afetam a qualidade da estrada são a geometria horizontal, geometria vertical e a irregularidade da pista de rolamento, de modo que os dois primeiros sofrem influência direta da localização da estrada no terreno.

A maioria dos impactos ambientais e sociais geralmente é de fácil identificação; por outro lado, são difíceis de serem estimados e quantificados, especialmente em unidades monetárias. A monetarização é importante porque é a unidade comum para computar custos de estradas e todo o processo de tomada de decisão da localização do traçado no terreno é baseado nessa unidade. Uma alternativa para incluir esses impactos no processo de decisão é identificar as áreas sensíveis (local de refúgio de vida silvestre, solos suscetíveis a erosão, solos de baixa estabilidade, áreas de preservação permanente, áreas residenciais, áreas comerciais, dentre outras) e impedir ou atribuir penalidades para a construção nesses locais (KANG et al., 2012). A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais custos relacionados a estradas e a descrição completa desses custos é apresentada em seguida.

Tabela 1. Classificação dos custos relacionados às estradas.

Classificação	Exemplos
Custo de Construção	Terraplanagem, pavimento, aquisição de terras
Custo de Manutenção	Pavimento, limpeza, reparos
Custo de Utilização	
- Operacional do veículo	Combustível, desgaste de pneus, depreciação
- Tempo de viagem	Tempo × valor unitário de tempo
- Acidentes	Predição do número de acidentes e seus custos
Custos Sociais e ambientais	Ruído, poluição do ar, impacto em áreas ambientalmente sensíveis, impacto em áreas de importância socioeconômicas

Fonte: Adaptado de Kang et al. (2012).

2.1.1.1 Custos de construção

- **Custo dependente do comprimento:**

$$C_c = u_p C_N L_P + u_C C_N L_N \quad [1]$$

em que:

C_c = Custo dependente do comprimento (\$);

u_p = Custo unitário do pavimento (\$/m²);

C_N = Comprimento total da estrada (m);

L_P = Largura da porção pavimentada da estrada (m);

u_C = Custo unitário dependente do comprimento, com exceção do pavimento (\$/m²);

L_N = Largura total da estrada (m).

- **Custo de aquisição de terras:**

$$C_A = \sum_{i=1}^{n_P} u_{v_i} \times A_P \quad [2]$$

em que:

C_A = Custo de aquisição de terras (\$);

n_p = Número total de pixels do terreno afetados pela construção da estrada (valor inteiro);

i = i -ésimo pixel afetado pela construção da estrada (valor inteiro);

u_{v_i} = Custo unitário (valor da propriedade) do i -ésimo pixel do terreno afetado pela construção da estrada (\$/m²);

A_p = Área do pixel (m²);

- **Custo de terraplanagem:**

$$C_{TP} = \sum_{i=1}^{n_p} \omega_0 u_{CO_i} F_{CE} A_p H_{CO_i} + \omega_1 u_{AT_i} A_p H_{AT_i} \quad [3]$$

em que:

C_{TP} = Custo de terraplanagem (\$);

n_p = Número total de pixels afetados pelas operações de terraplanagem (valor inteiro);

i = i -ésimo pixel afetado pelas operações de terraplanagem (valor inteiro);

ω_0, ω_1 = Variáveis binárias utilizadas para o cálculo do custo de terraplanagem;

$\omega_0, \omega_1 = 0$ ou 1 ; $\omega_0 + \omega_1 = 1$;

$\omega_0 = 1$ para seção de corte, $\omega_1 = 1$, para seção de aterro;

u_{CO_i} = Custo unitário de corte do i -ésimo pixel (\$/m³);

u_{AT_i} = Custo unitário de aterro do i -ésimo pixel (\$/m³);

F_{CE} = Fator de compactação ou expansão da terra (valor decimal);

A_p = Área do pixel (m²);

H_{CO_i}, H_{AT_i} = Altura da coluna de corte e aterro do i -ésimo pixel (m).

- **Custo de estruturas (exemplo: pontes):**

$$C_E = \alpha_0 + \alpha_1 \times C_{ES} L_{ES} \quad [4]$$

em que:

C_E = Custo de estruturas (\$);

α_0, α_1 = Coeficientes utilizados para computar o custo de estruturas (valor decimal);

C_{ES} = Comprimento da estrutura (m);

L_{ES} = Largura da estrutura (m).

2.1.1.2 Custo de manutenção

$$C_M = C_N u_M \sum_{k=1}^{n_a} \left(\frac{1}{1 + \rho} \right)^k \quad [5]$$

em que:

C_M = Valor presente do custo total de manutenção (\$);

C_N = Comprimento total da estrada (m);

u_M = Custo unitário de manutenção (\$.m⁻¹. ano⁻¹);

n_a = Período analisado ou vida útil da estrada (anos);

k = k -ésimo ano (valor inteiro);

ρ = Taxa de juros anual ou taxa de desconto anual (valor decimal).

2.1.1.3 Custos de utilização da estrada

- **Tempo de viagem:**

$$C_T = \sum_{m=1}^{n_M} \left[v_m t_m u_{CT_m} \left(\frac{e^{(tc-\rho)n_a} - 1}{tc - \rho} \right) \right] \quad [6]$$

em que:

C_T = Valor presente do custo de tempo de viagem (\$);

n_M = Número total de diferentes modais de transporte (valor inteiro);

m = m -ésimo modal (valor inteiro);

v_m = Volume de tráfego do m -ésimo modal (veículo/ano);

t_m = Tempo de viagem do m -ésimo do modal (h);

u_{CT_m} = Custo unitário de tempo do m -ésimo modal (\$/h);

tc = Taxa anual de crescimento de tráfego (valor decimal);

ρ = Taxa anual de juros ou taxa anual de desconto (valor decimal);

n_a = Período analisado ou vida útil da estrada (anos).

A relação entre o traçado de estradas e os custos de utilização não é tão explícita quanto os demais custos. Geralmente essas relações são calibradas empregando-se modelos estatísticos. A variável mais crítica para computar o custo de tempo de viagem e que apresenta maior influência no traçado de estradas é justamente o tempo da viagem, ou seja, o tempo em horas necessário para percorrer toda extensão da nova estrada. Essa variável pode ser obtida por

meio da estimativa de velocidade no trecho ($t[h] = D[km] / V[km/h]$). No presente trabalho utilizou-se o modelo desenvolvido por Polus et al. (1984) e também adotado no trabalho de Jha et al. (2006). Esse modelo estima a velocidade média em função de características geométricas e de tráfego da estrada:

$$\bar{V} = 88.714 - 0.094\bar{C} - 0.282\bar{H} - 0.069G - 0.022T - 3.981D - 0.27Q \quad [7]$$

em que:

\bar{V} = Velocidade média (km/h);

\bar{C} = Curvatura média (graus/km);

\bar{H} = Média de distância vertical entre a i -ésima curva vertical convexa e a seguinte côncava (i -ésima+1) e vice-versa (m/km);

G = Diferença absoluta entre os gradientes do ponto inicial e final da estrada dividida pelo comprimento da estrada (m/km);

T = Porcentagem de veículos de carga pesada trafegando na estrada (fator – fração decimal);

D = Distribuição direcional do tráfego da estrada (fator – fração decimal);

Q = Volume de tráfego (veículos/hora).

- **Custo operacional do veículo:**

$$C_o = \sum_{m=1}^{n_M} \left[v_m C_N u_{CO_m} \left(\frac{e^{(tc-\rho)n_a} - 1}{tc - \rho} \right) \right] \quad [8]$$

em que:

C_o = Valor presente do custo operacional do veículo (\$);

n_M = Número total de diferentes modais de transporte (valor inteiro);

m = m -ésimo modal (valor inteiro);

v_m = Volume de tráfego do m -ésimo modal (veículo/ano);

C_N = Comprimento total da estrada (km);

u_{CO_m} = Custo operacional unitário do veículo do m -ésimo modal (\$/km);

tc = Taxa anual de crescimento de tráfego (valor decimal);

ρ = Taxa anual de juros ou taxa anual de desconto (valor decimal);

n_a = Período analisado ou vida útil da estrada (anos).

O custo operacional do veículo é composto por uma série de custos. Em análises econômicas, o cálculo do custo operacional pode contemplar o

consumo de combustível, óleos lubrificantes, trocas de pneus, depreciação do veículo, salário do motorista, manutenção, dentre outros. O consumo de combustível é o custo operacional mais sensível a diferentes alternativas de traçado; por isso, esse fator deve ser estimado da forma mais acurada possível (JHA et al., 2006). Contudo, os outros custos também podem ser computados para fins de controle de orçamento.

$$u_{CO_m} = p_c f_m + oc_m \quad [9]$$

em que:

u_{CO_m} = Custo operacional unitário do veículo do m -ésimo modal (\$/km);

p_c = Preço do combustível (\$/L);

f_m = Consumo de combustível do m -ésimo modal (L/Km);

oc_m = Outros custos operacionais (\$/km).

Para estimar o consumo de combustível em relação ao traçado da estrada foi utilizado o modelo disponibilizado por Jha et al. (2006). Esse modelo foi calibrado para estimar o consumo de combustível de veículos de carga pesada:

$$F = 509.7646 + 29.8595\bar{G} - 9.9014\bar{V} + 0.0892\bar{V}^2 \quad [10]$$

em que:

F = Consumo de combustível;

\bar{G} = Greide médio de todas as seções da estrada (%);

\bar{V} = Velocidade média (km/h) – estimada pela equação [7].

- **Custo de acidentes:**

$$C_A = u_A F_A \left(\frac{e^{(tc-\rho)n_a} - 1}{tc - \rho} \right) \quad [11]$$

em que:

C_A = Custo de acidentes (\$);

u_A = Custo unitário de acidentes (\$/acidentes);

F_A = Frequência estimada de acidentes (acidentes/ano);

tc = Taxa anual de crescimento de tráfego (valor decimal);

ρ = Taxa anual de juros ou taxa anual de desconto (valor decimal);

n_a = Período analisado ou vida útil da estrada (anos).

Acidentes podem acontecer em qualquer ponto ao longo da estrada; porém, a quantidade de acidentes é substancialmente maior ao longo dos segmentos curvos. Isso ocorre devido a alterações de velocidade e inconsistências no traçado geométrico da estrada. Por esse motivo, o foco principal desta pesquisa foi as curvas da estrada. Esse trabalho utilizou um modelo adaptado do modelo disponibilizado por Jha et al. (2006), para estimar a quantidade de acidentes:

$$F_{A_i} = \sum_{i=1}^{n_C} [(0.31C_{cur_i}V_{T_i} + 0.028G_{cur_i}V_{T_i} - 0.024V_{T_i})(0.978)^{W_i-30}] \quad [12]$$

em que:

F_{A_i} = Frequência estimada de acidentes (acidentes/ano);

n_C = Número de curvas da estrada (valor inteiro);

i = i -ésima curva da estrada (valor inteiro);

C_{cur_i} = Comprimento da i -ésima curva (m);

V_{T_i} = Volume de tráfego em um período de 1 ano (em milhões de veículos) passando pela i -ésima curva (valor inteiro);

G_{cur_i} = Grau de curvatura da i -ésima curva (graus decimais);

W_i = Largura da estrada na i -ésima curva (m).

2.1.1.4 Custo ambiental e social inicial (Penalidade)

$$C_{ASI} = \sum_{i=1}^{n_P} u_{ASI_i} \times A_P \quad [13]$$

em que:

C_{ASI} = Custo ambiental e social inicial. Exemplo: impacto em áreas ambientalmente sensíveis, impacto em áreas de importância socioeconômicas, impacto em áreas de preservação permanente (\$);

n_P = Número total de pixels do terreno afetados pela construção da estrada (valor inteiro);

i = i -ésimo pixel afetado pela construção da estrada (valor inteiro);

u_{ASI_i} = Custo unitário do impacto (penalidade) da i -ésimo pixel do terreno afetado pela construção da estrada (\$/m²);

A_P = Área do pixel (m²).

2.1.1.5 Custo ambiental e social em longo prazo (Penalidade)

$$C_{ASL} = \sum_{m=1}^{n_M} \left[v_m C_N u_{ASLm} \left(\frac{e^{(tc-\rho)n_a} - 1}{tc - \rho} \right) \right] \quad [14]$$

em que:

C_{ASL} = Valor presente do custo ambiental e social em longo prazo. Exemplo: ruído, poluição do ar (\$);

n_M = Número total de diferentes modais de transporte (valor inteiro);

m = m -ésimo modal (valor inteiro);

v_m = Volume de tráfego do m -ésimo modal (veículo/ano);

C_N = Comprimento total da estrada (km);

u_{ASLm} = Custo unitário do impacto (penalidade) do m -ésimo modal (\$/km);

tc = Taxa anual de crescimento de tráfego (valor decimal);

ρ = Taxa anual de juros ou taxa anual de desconto (valor decimal);

n_a = Período analisado ou vida útil da estrada (anos).

2.1.2 Restrições técnicas do traçado geométrico da estrada

O projeto de uma estrada é composto basicamente de um traçado horizontal, um perfil vertical, e de seções transversais (GRIPP JUNIOR e MACHADO, 2013). O traçado horizontal é a projeção de uma estrada em três dimensões sobre um espaço bidimensional (coordenadas X, Y) e é composto de dois tipos de elementos de projeto: trechos retos (tangentes às curvas) e trechos curvos. Esse último tipo contempla: curva de concordância horizontal simples (curva circular), curva composta sem transição e curva composta com transição (espiral). Já o perfil vertical é a projeção do traçado em um plano vertical e é composto de trechos retos conectados por curvas de concordância vertical (parábolas), que podem ser côncavas ou convexas. A seção transversal é o corte da estrada feito em um plano vertical perpendicular ao eixo, e pode ser de três formas: corte, aterro ou mista (transição entre corte – aterro ou aterro – corte). Os elementos técnicos que compõem um projeto geométrico de uma estrada podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Elementos geométricos de estradas florestais.

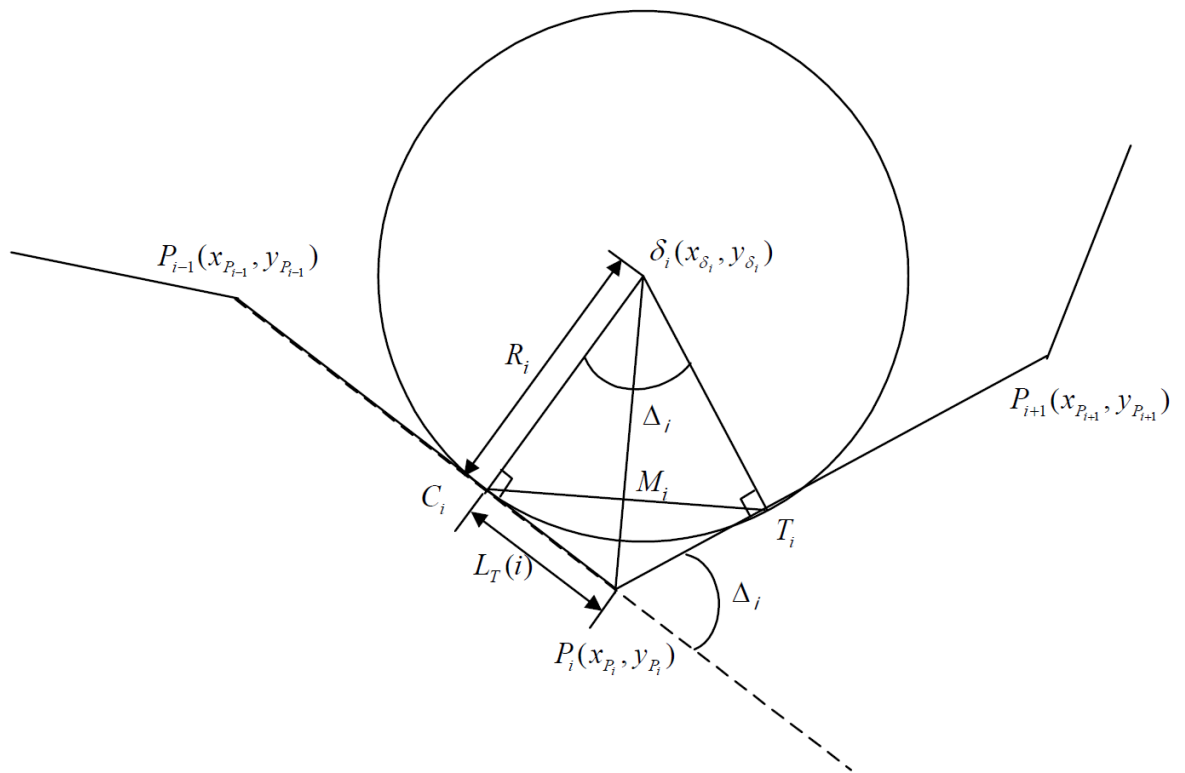
Elementos geométricos						
Axiais ou Longitudinais	Planimétricos	Trechos retos	Tangentes às curvas			
		Trechos curvos	Curvas de concordância horizontal	Simples		
				Compostas	Sem transição	
	Com transição					
	Altimétricos	Trechos retos	Greides retos	Tangentes às curvas		
		Trechos curvos	Greides curvos	Curvas de concordância horizontal	Côncavas	
				Convexas		
Transversais	Seções transversais	Corte				
		Aterro				
		Mista				

Fonte: Gripp Junior e Machado (2013).

Para a estrada proporcionar ao usuário eficiência e segurança de tráfego ela deve atender algumas exigências técnicas de concordância vertical e horizontal entre trechos. As exigências podem ser relacionadas ao raio mínimo de curva horizontal, distância mínima de visibilidade horizontal, gradiente máximo de alinhamentos verticais, comprimento mínimo de curvas verticais côncavas e convexas, dentre outras. Os padrões para essas exigências podem ser encontrados em manuais técnicos de projetos geométricos de estradas (AASHTO, 2001). Os veículos de carga também podem apresentar algumas exigências específicas no próprio manual do veículo.

2.1.2.1 Adequação do alinhamento horizontal (planimétrico) da estrada conforme as exigências técnicas

Neste trabalho foram utilizadas apenas curvas circulares de concordância simples para conectar os trechos retos da estrada. Os elementos que compõem esse tipo de curva podem ser observados na Figura 1.



Fonte: Jha et al. (2006).

Figura 1. Elementos de uma curva de concordância circular simples.

em que:

$P_i(x_{P_i}, y_{P_i})$: Ponto de interseção das tangentes.

$C_i(x_{C_i}, y_{C_i})$: Ponto de curvatura (início da curva) pertencente ao $P_i, i = 1, \dots, n$.

$T_i(x_{T_i}, y_{T_i})$: Ponto de tangente (final da curva) pertencente ao $P_i, i = 1, \dots, n$.

$M_i(x_{M_i}, y_{M_i})$: Ponto médio do segmento de linha entre C_i e T_i pertencente ao $P_i, i = 1, \dots, n$.

$\delta_i(x_{\delta_i}, y_{\delta_i})$: Centro da curva circular pertencente ao $P_i, i = 1, \dots, n$.

R_i : Raio da curva circular pertencente ao $P_i, i = 1, \dots, n$.

Δ_i : Ângulo central da curva, que é igual ao ângulo de deflexão das tangentes ao $P_i, i = 1, \dots, n$.

$L_T(i)$: Comprimento da tangente externa da curva - C_i para P_i e P_i para T_i .

Para alocar as curvas circulares entre os segmentos retos é necessário determinar cada um dos elementos que compõem a curva, para cada um dos pontos de interseção dos trechos retos (tangentes). A curva horizontal é definida principalmente pelo seu raio. Esse raio pode ser o maior limitante de tráfego no trecho, quanto menor é o raio mais restritivo é o tráfego no local.

O raio mínimo que uma curva deve ter é definido principalmente pela velocidade diretriz. A velocidade diretriz (V_D) é a velocidade em que é possível trafegar em condições aceitáveis de conforto e segurança em um trecho da estrada que apresenta características normais de rugosidade e ondulações (GRIPP JUNIOR e MACHADO, 2013). Para estradas não pavimentadas, esses autores recomendam as seguintes velocidades diretrizes: relevo plano – 60 a 80 km/h; relevo ondulado – 40 a 60 km/h; relevo montanhoso – 30 a 40 km/h. A velocidade diretriz é definida considerando-se uma série de fatores, como tipo e frequência de tráfego demandado para o local, características do local, dentre outros. De acordo com AASHTO (2001), o raio mínimo pode ser definido utilizando a equação [15].

$$R_{min} = \frac{V_D^2}{127(0.01e + f)} \quad [15]$$

em que:

R_{min} = Raio mínimo de curvatura (m);

V_D = Velocidade diretriz (km/h);

e = Razão de superelevação (%);

f = Coeficiente de fricção lateral (fator adimensional).

A superelevação é a inclinação transversal de uma via. Em trechos retos, essa inclinação é menos acentuada e tem o objetivo principal de escoar água da pista. Em trechos curvos ela faz com que a força centrípeta e a força do peso do veículo exerçam uma força de sentido para baixo, aumentando assim o atrito e, conseqüentemente, a aderência entre o pneu e a pista. Geralmente as recomendações de superelevação variam de 4 a 12% em trechos curvos. Já o coeficiente de fricção lateral depende do pavimento da pista. Outra forma de determinar o raio mínimo é consultar manuais técnicos e científicos sobre o tema. Para determinar os demais elementos que compõem uma curva foram utilizadas as equações trigonométricas disponibilizadas por Jha et al. (2006), como mostrado abaixo:

Ângulo central da curva:

$$\begin{aligned}\Delta_i &= \cos^{-1} \left(\frac{(\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i-1}) \cdot (\mathbf{P}_{i+1} - \mathbf{P}_i)}{\|\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i-1}\| \|\mathbf{P}_{i+1} - \mathbf{P}_i\|} \right) \\ &= \cos^{-1} \left(\frac{(x_{P_i} - x_{P_{i-1}})(x_{P_{i+1}} - x_{P_i}) + (y_{P_i} - y_{P_{i-1}})(y_{P_{i+1}} - y_{P_i})}{\sqrt{(x_{P_i} - x_{P_{i-1}})^2 + (y_{P_i} - y_{P_{i-1}})^2} \sqrt{(x_{P_{i+1}} - x_{P_i})^2 + (y_{P_{i+1}} - y_{P_i})^2}} \right)\end{aligned}\quad [16]$$

Comprimento da tangente:

$$L_T(i) = R_i \times \tan \frac{\Delta_i}{2} \quad [17]$$

Ponto de curvatura (início da curva):

$$\begin{aligned}\mathbf{C}_i &= \begin{bmatrix} x_{C_i} \\ y_{C_i} \end{bmatrix} = \mathbf{P}_i + L_T(i) \frac{\mathbf{P}_{i-1} - \mathbf{P}_i}{\|\mathbf{P}_{i-1} - \mathbf{P}_i\|} \\ &= \begin{bmatrix} x_{P_i} + L_T(i)(x_{P_{i-1}} - x_{P_i}) / \sqrt{(x_{P_{i-1}} - x_{P_i})^2 + (y_{P_{i-1}} - y_{P_i})^2} \\ y_{P_i} + L_T(i)(y_{P_{i-1}} - y_{P_i}) / \sqrt{(x_{P_{i-1}} - x_{P_i})^2 + (y_{P_{i-1}} - y_{P_i})^2} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad [18]$$

Ponto de tangente (final da curva):

$$\begin{aligned}\mathbf{T}_i &= \begin{bmatrix} x_{T_i} \\ y_{T_i} \end{bmatrix} = \mathbf{P}_i + L_T(i) \frac{\mathbf{P}_{i+1} - \mathbf{P}_i}{\|\mathbf{P}_{i+1} - \mathbf{P}_i\|} \\ &= \begin{bmatrix} x_{P_i} + L_T(i)(x_{P_{i+1}} - x_{P_i}) / \sqrt{(x_{P_{i+1}} - x_{P_i})^2 + (y_{P_{i+1}} - y_{P_i})^2} \\ y_{P_i} + L_T(i)(y_{P_{i+1}} - y_{P_i}) / \sqrt{(x_{P_{i+1}} - x_{P_i})^2 + (y_{P_{i+1}} - y_{P_i})^2} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad [19]$$

Ponto médio do segmento de linha entre C_i e T_i :

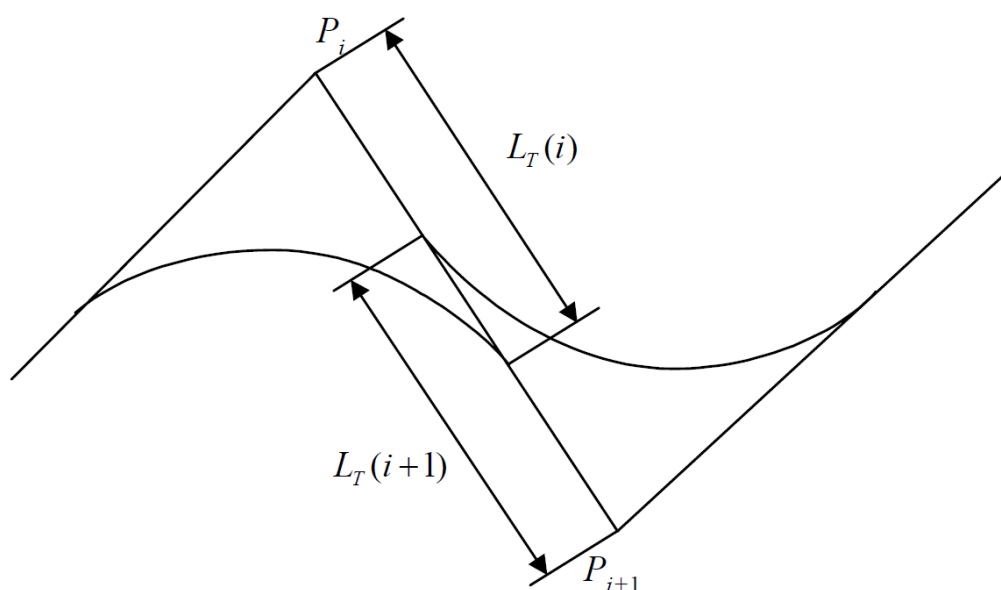
$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} x_{M_i} \\ y_{M_i} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (\mathbf{C}_i + \mathbf{T}_i) = \begin{bmatrix} (x_{C_i} + x_{T_i})/2 \\ (y_{C_i} + y_{T_i})/2 \end{bmatrix} \quad [20]$$

Ponto central da curva:

$$\delta_i = \begin{bmatrix} x_{\delta_i} \\ y_{\delta_i} \end{bmatrix} = \mathbf{P}_i + R_i \sec \frac{\Delta_i}{2} \frac{\mathbf{M}_i - \mathbf{P}_i}{\|\mathbf{M}_i - \mathbf{P}_i\|} \quad [21]$$

Em algumas situações, o comprimento entre pontos de interseção consecutivos (P_i e P_{i+1}) é menor do que o comprimento da soma dos dois

comprimentos de tangente correspondentes ($L_T(i) + L_T(i + 1)$); nesse caso, não é possível alocar a curva, pois não há espaço suficiente (Figura 2). Para contornar esse problema, pode-se empregar duas alternativas: (1) Reduzir o raio de curvatura e aplicar uma penalidade monetária a este trecho; (2) Descartar a alternativa de trajeto. A primeira alternativa deve ser utilizada com cautela, pois a redução do raio de curvatura pode impossibilitar o tráfego de alguns tipos de veículos e a determinação do valor da penalidade é difícil de ser estimado. A segunda alternativa é mais conservadora e mais simples de ser implementada, por isso foi adotada no presente estudo.



Fonte: Jha et al. (2006).

Figura 2. Exemplo de descontinuidade em uma curva horizontal.

2.1.2.2 Adequação do alinhamento vertical (altimétrico) da estrada conforme as exigências técnicas

O alinhamento vertical consiste de seções retas, conhecidas como greides tangentes, conectadas por curvas verticais. As principais restrições com relação ao alinhamento vertical da estrada dizem respeito ao greide máximo permitido e ao mínimo comprimento da curva vertical. Trechos com greides elevados podem comprometer a eficiência de tráfego, pois a velocidade de locomoção é reduzida para transpor esses trechos. A restrição de comprimento mínimo está relacionada com o conforto e segurança de tráfego. A primeira etapa para determinar o comprimento mínimo da curva é obter a distância de

visibilidade de parada. De acordo com AASHTO (2001), a distância de visibilidade de parada pode ser derivada da equação [22]:

$$S = 0.278Vt + 0.039 \frac{V_D^2}{a} \quad [22]$$

em que:

S = Distância de visibilidade de parada (m);

V_D = Velocidade diretriz (km/h);

t = Tempo de reação de parada (s), geralmente atribuído como 2.5 s;

a = Razão de desaceleração (m/s^2), atribuída como $3.4 m/s^2$.

Existem dois tipos de curvas verticais: curva convexa e côncava. Para computar o comprimento mínimo dessas curvas deve-se considerar duas situações:

- **Curva convexa**

(1) Situação em que a distância de visibilidade de parada é menor que o comprimento mínimo [23] (Figura 3), e (2) situação em que a distância de visibilidade de parada é maior que o comprimento mínimo [24]:

$$L = \frac{AS^2}{100(\sqrt{2h_1} + \sqrt{2h_2})^2} \quad S < L \quad [23]$$

$$L = 2S - \frac{200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{A} \quad S > L \quad [24]$$

em que:

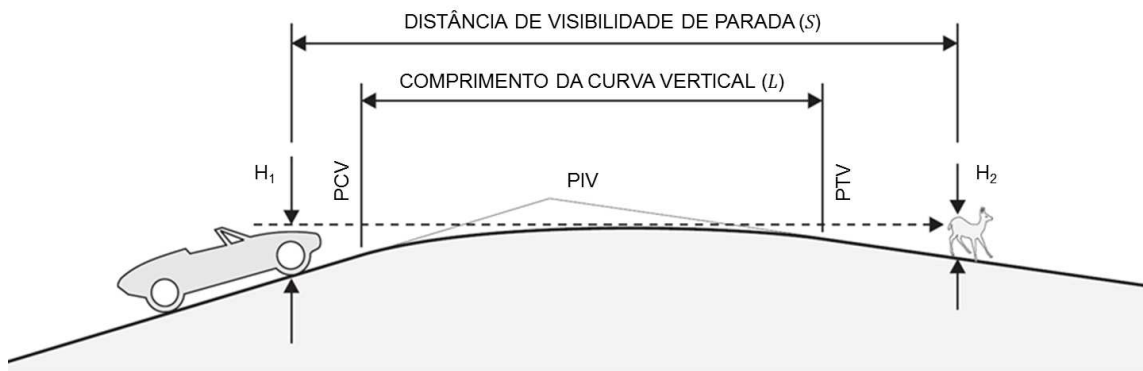
L = Comprimento da curva vertical (m);

h_1 = Altura do olho do motorista em relação a superfície da estrada (m), geralmente atribuída como 1.080 m;

h_2 = Altura de determinado objeto em relação a superfície da estrada (m), geralmente atribuída como 0.6 m;

S = Distância de visibilidade de parada (m);

A = Diferença algébrica entre greides tangentes consecutivos (%).



Fonte: Zhao e Tonias (2014).

Figura 3. Comprimento mínimo de uma curva convexa.

- **Curva côncava**

(1) Situação em que a distância de visibilidade de parada é menor que o comprimento mínimo [25], e (2) situação em que a distância de visibilidade de parada é maior que o comprimento mínimo [26]:

$$L = \frac{AS^2}{120 + 3.5S} \quad S < L \quad [25]$$

$$L = 2S - \left(\frac{120 + 3.5S}{A} \right) \quad S > L \quad [26]$$

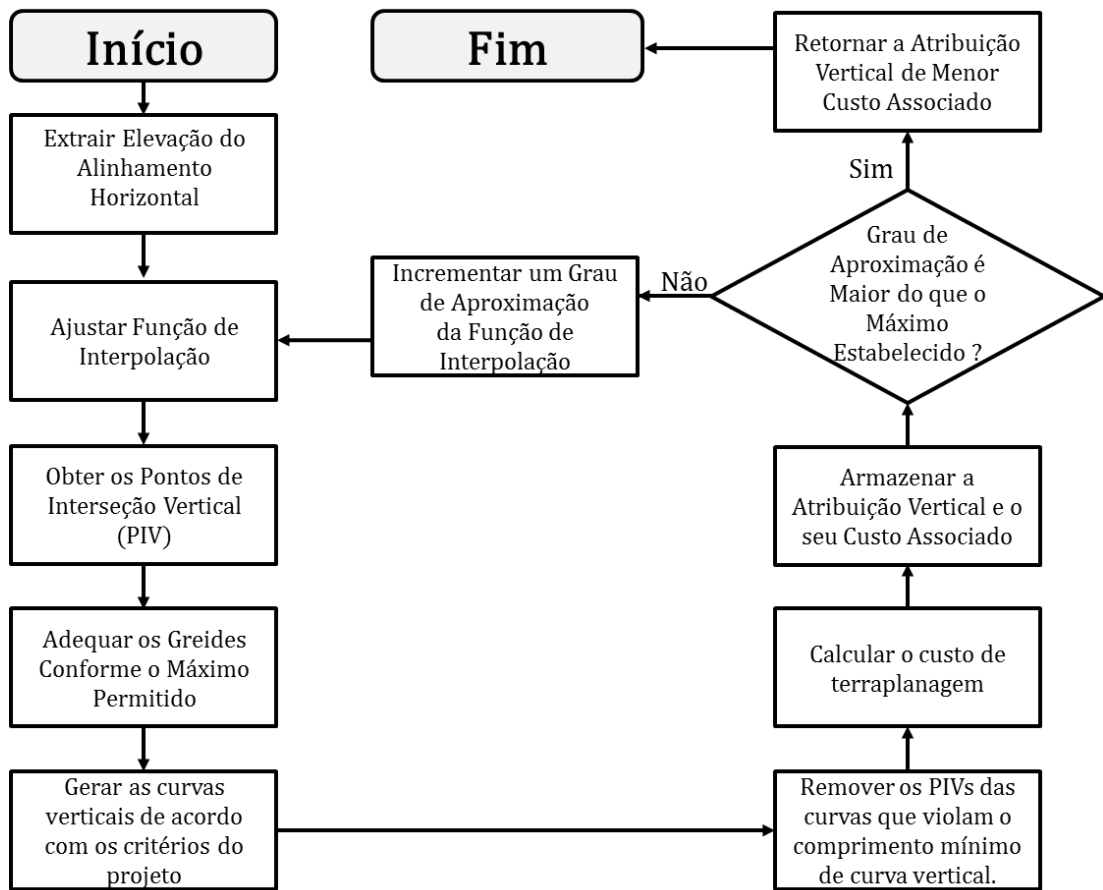
Em que:

L = Comprimento da curva vertical (m);

S = Distância de visibilidade de parada (m);

A = Diferença algébrica entre greides tangentes consecutivos (%).

A metodologia proposta por Soknath e Piantanakulchai (2013) foi utilizada neste trabalho para adequar a estrada às exigências técnicas de concordância vertical. Estes autores utilizam uma função de interpolação como método aproximativo do perfil do terreno. Após a obtenção da função aproximativa, uma série de processos iterativos são executados para adequar o alinhamento vertical da estrada conforme às exigências técnicas. A descrição do método é apresentada a seguir e o fluxograma pode ser observado na Figura 4.



Fonte: Adaptado de Soknath e Piantanakulchai (2013).

Figura 4. Fluxograma para adequação do alinhamento vertical da estrada.

- 1) Extrair os valores de elevação do alinhamento horizontal (obter o perfil do terreno);
- 2) Ajustar função de interpolação aos dados de elevação. De início utilizar baixo grau de aproximação da função e depois incrementar o grau de aproximação sucessivamente até um limite. O resultado será avaliado conforme a minimização dos custos de operações de terraplanagem (corte – aterro). Diversos métodos de interpolação podem ser utilizados nessa etapa. Soknath e Piantanakulchai (2013), utilizaram regressão polinomial, Moreb (2009) utilizou funções *splines* para realizar tarefa semelhante. Neste trabalho foram utilizadas as funções *splines*;
- 3) Extrair todos os pontos de máximo e mínimo da função de aproximação. Esses pontos tem a função de representar os Pontos de Interseção Vertical (PIV) da estrada, exemplo: Figura 5;
- 4) Checar o greide de cada linha tangente e então fazer os ajustes caso necessário, utilizando o procedimento abaixo:
 - [a] – Obter os greides referentes a cada segmento reto da atribuição vertical através da sequência dos pontos de interseção vertical.
 - [b] – Iniciar o processo iterativo em todos os segmentos, com exceção do último;

Se o greide excede o máximo permitido ele deve ser reduzido até o máximo permitido. Isso é feito fixando o primeiro ponto e movendo o segundo ao longo do segundo segmento de modo que o greide do segundo se mantenha inalterado. Em caso de o algoritmo não

encontrar o ponto que adequa o greide nesse segundo segmento o próximo PIV deverá ser removido.

[c] – Se o último segmento viola o máximo greide permitido então o algoritmo deverá ser aplicado na ordem reversa, ou seja, iniciar no último PIV.

[d] – Repetir o procedimento até que nenhuma violação seja encontrada.

5) Gerar a curva vertical de acordo com o critério do projeto, neste trabalho foi utilizado curvas polinomiais;

6) Remover os PIV das curvas que violam a restrição de comprimento mínimo da curva vertical. Utilizar o procedimento abaixo:

[a] – Calcular o comprimento mínimo requerido das curvas verticais utilizando as equações [23], [24], [25] e [26];

[b] – Avaliar se existe descontinuidade entre duas curvas verticais consecutivas, para isso, basta utilizar a equação abaixo e obter a variável D:

$$D = \frac{1}{2}(L_V(i + 1) + L_V(i)) - |PIV(i + 1), PIV(i)|$$

Esse procedimento segue a mesma lógica para evitar descontinuidades nas curvas horizontais (**tópico 2.1.2.1**). Porém situações de descontinuidades nas curvas verticais são mais comuns, e assim um procedimento de correção deve ser aplicado. Se o valor de D for menor do que zero significa que ocorre um problema de descontinuidade Figura 6;

[c] – Remover desnecessários PIV se ocorrer descontinuidades nas curvas verticais (valor negativo de D);

[d] – Recalcular D de acordo com os novos PIV;

[e] – Repetir as etapas [c] e [d] até nenhum valor negativo de D ser encontrado;

7) Calcular o custo de terraplanagem de acordo com o **tópico 2.1.1.1**;

8) Armazenar a atribuição vertical e o seu custo associado;

9) Avaliar o critério de parada (número do grau de aproximação da função de interpolação). Se o critério for atendido deve-se retornar como resultado a atribuição vertical de menor custo associado, caso contrário incrementar um grau de aproximação da função de interpolação e retornar ao passo 2).

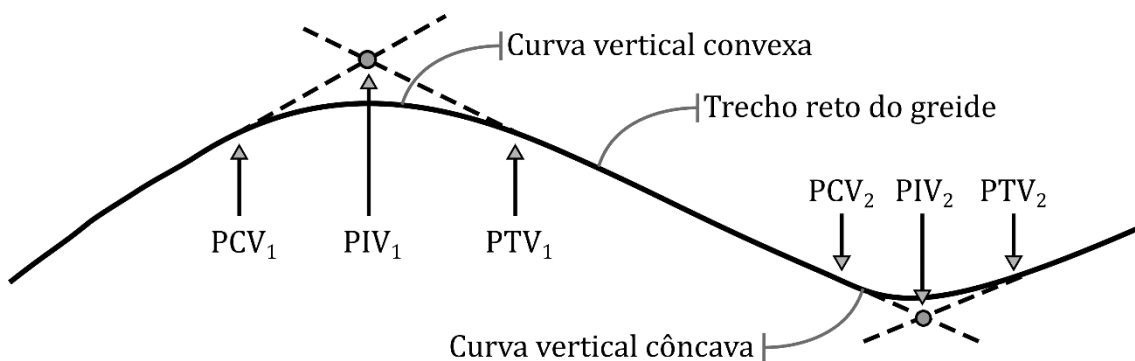
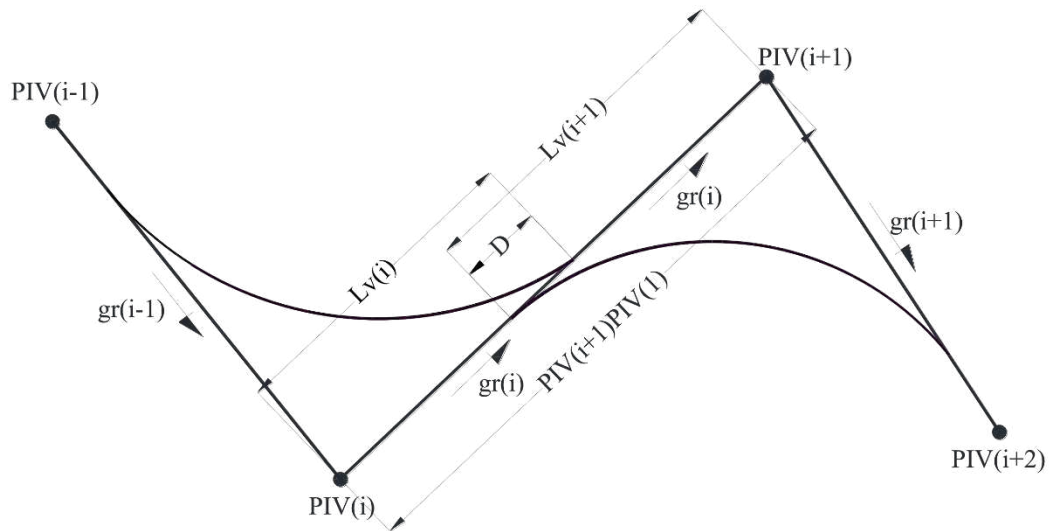


Figura 5. Representação dos Pontos de Interseção Vertical (PIV), Pontos de Curvatura Vertical (PCV – início da curva vertical) e Pontos Tangentes Verticais (PTV – fim da curva vertical).



Fonte: Soknath e Piantanakulchai (2013).

Figura 6. Exemplo de descontinuidade em uma curva vertical.

2.1.3 Procedimento de otimização do traçado da estrada

O procedimento de otimização do traçado geométrico da estrada utiliza a metaheurística *simulated annealing*. O *simulated annealing*, ou arrefecimento simulado, foi desenvolvido baseando-se em um processo termodinâmico empregado na metalurgia, em que uma matéria-prima aquecida é arrefecida lentamente. Isso faz com que os átomos que compõem o material organizem-se numa estrutura uniforme de menor energia interna, ou seja, de maior estabilidade e resistência. O *simulated annealing* apresenta geralmente as seguintes etapas de execução:

- **Identificadores:**

S_0 = Solução inicial;

S_{A_i} = Solução atual referente à iteração i ;

S = Solução final;

T_0 = Temperatura inicial;

T_{A_i} = Temperatura atual referente à iteração i ;

N = Número máximo de iterações;

α = Fator de redução da temperatura;

$f(S_{A_i}), f(S)$ = Valor da função objetivo (função de custo) correspondente a S_{A_i} e S , respectivamente;

i = Variável que controla o *loop* (a repetição iterativa);

GeraSoluçãoVizinha(S) = Função que gera uma solução alternativa baseada na vizinhança de S ;

Aleatório() = Função que gera um número aleatório baseado na distribuição de probabilidade uniforme no intervalo $[0, 1]$;

- **Entradas (fornecidas pelo usuário):**

S_0 (geralmente gerada de forma aleatória); T_0 ; α ; N ;

- **Início de execução do algoritmo:**

Início:

$S = S_0$

$T_{A_i} = T_0$

$i = 0$

Repita enquanto ($i < N$):

$S_{A_i} = \text{GeraSoluçãoVizinha}(S)$

$\Delta F_i = f(S_{A_i}) - f(S)$

Se ($\Delta F_i \leq 0$) *ou* ($e^{-\Delta F_i/T_{A_i}} > \text{Aleatório}()$) *então:*

$S = S_{A_i}$

$T_{A_i} = T_{A_i} \cdot \alpha$

$i = i + 1$

Retornar S

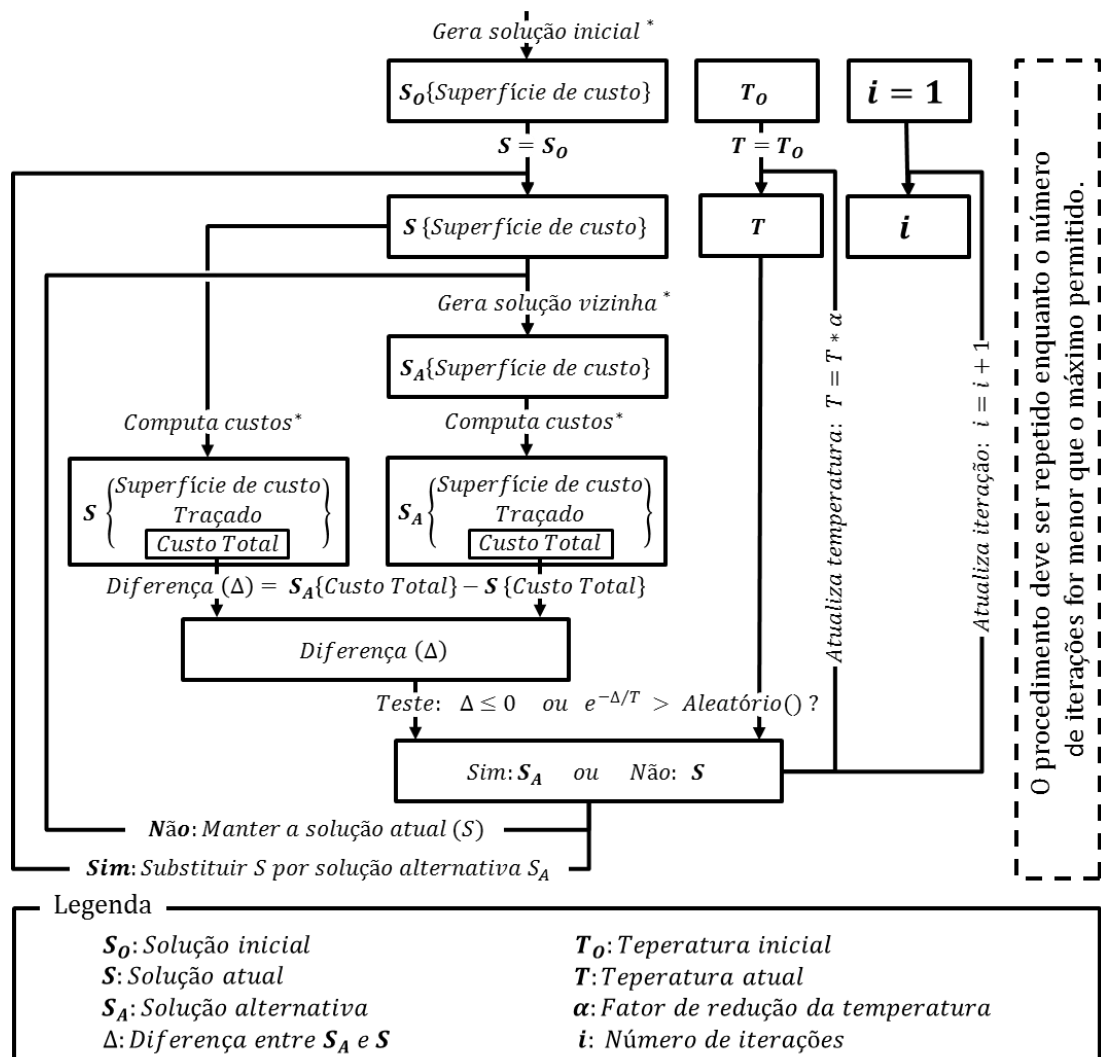
Fim

A função que gera a solução alternativa baseada na vizinhança de S é de extrema importância para o *simulated annealing*. Essa função está diretamente relacionada com a qualidade da solução final e pode ser adaptada para gerar diversas soluções alternativas, dessa forma aumentando as chances de obter soluções de boa qualidade. Porém, essa estratégia não foi adotada no presente estudo, pois cada solução alternativa requer muito tempo de processamento

para ser avaliada, além de utilizar muita memória para o armazenamento. Essa última limitação prejudica também a solução do problema via algoritmos genéticos, em que é necessário gerar uma população com diversas soluções (geralmente superior a 30 soluções).

O teste de aceitação – $\Delta F_i \leq 0$ ou $e^{-\Delta F_i/T_{A_i}} > Aleatório()$ – de uma nova solução também é muito importante para essa metaheurística. Esse teste utiliza o critério de Metropolis (METROPOLIS et al., 1953) na expressão de decisão. O critério permite que ocasionalmente soluções piores que a atual sejam aceitas durante a execução do procedimento. Tal característica previne o algoritmo de caminhar para um mínimo local rapidamente. Na medida em que o processo avança, o parâmetro de temperatura decresce gradativamente de acordo com o fator de redução (α) e isso faz com que a probabilidade de aceitar soluções piores que a atual diminua, de modo que, ao final do processo, seja quase igual à zero.

Para otimizar o traçado geométrico da estrada, o algoritmo *simulated annealing* pode ser formulado de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 7:



* (Gera solução inicial, Gera solução vizinha e Computa custos): Descrição nos tópicos seguintes.

Figura 7. Etapas de execução do algoritmo *simulated annealing* para otimizar o traçado geométrico de estradas.

- **Superfície de custo do terreno**

A superfície de custo do terreno conduz o delineamento do traçado de uma estrada: o traçado proposto é utilizado para computar os custos totais relacionados à obra. A ponderação da superfície de custo é geralmente feita de forma arbitrária; porém, no presente estudo, essa ponderação foi feita com o objetivo de minimizar o custo total da obra. O algoritmo *simulated annealing* foi o responsável por ditar como a superfície de custo deve ser alterada para alcançar esse objetivo. Durante a execução do procedimento, a ponderação da superfície de custo é alterada progressivamente afim de se obterem traçados de custos monetários mais reduzidos.

Cada pixel da superfície do terreno (formato raster) deve ter um custo de deslocamento associado; esse custo foi definido em escala relativa, variando de

1 a 100. O custo foi composto a partir da combinação ponderada de três informações espaciais: (1) modelo digital de elevação, mais especificamente das informações de inclinação do terreno (INC); (2) uso e ocupação da terra – USO – (penalidades ambientais e sociais) e (3) valor de aquisição de terras relativo a cada propriedade (PROP). Esse custo também pode ser composto por características geológicas e geotécnicas do terreno, tipos de solos, informação de estabilidade do solo, dentre outros.

A superfície de custo representa as soluções do algoritmo (solução inicial (S_0), solução atual (S) e solução alternativa (S_A)) e, ao final da execução, são retornados a superfície de custo referente à solução otimizada, o traçado (adequado de acordo as restrições de atribuição horizontal e vertical) derivado dessa superfície e os custos monetários específicos e total da obra.

- **Geração da solução inicial (S_0)**

A solução inicial (superfície de custo inicial) foi gerada de forma a atribuir pesos iguais às três informações espaciais (INC, USO e PROP). Cada informação recebeu valor de importância igual a 0,33 na solução inicial. As informações de USO e PROP foram reclassificadas de modo que seus valores e penalidades tivessem variação de 1 a 100. A inclinação do terreno também foi convertida em escala relativa de 1 a 100. Porém, na solução inicial, todos os pixels dessa informação espacial receberam valor constante igual a 1, independente da intensidade da inclinação (Figura 8A). Com o avanço da execução do procedimento, os valores dos pesos podem ser alterados (Figura 8B).

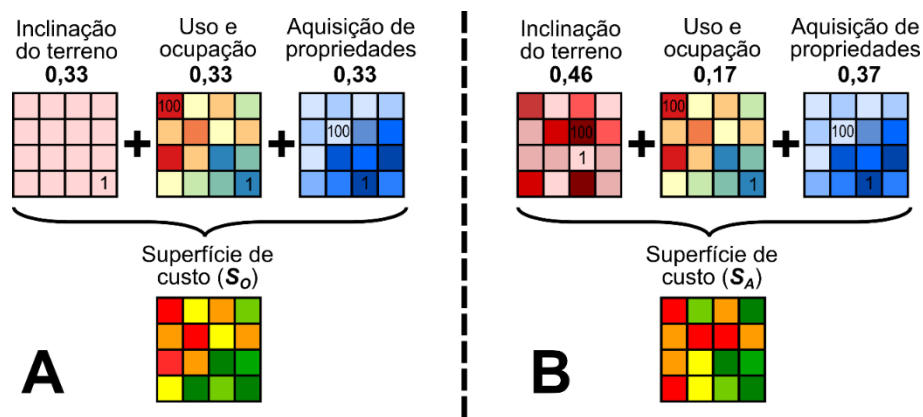


Figura 8. Superfície de custo que representa a solução inicial (A) e exemplo de superfície de custo de uma nova solução alternativa (B).

- **Geração da solução vizinha**

A função que gera uma nova solução alternativa utiliza procedimentos aleatórios, baseando-se na vizinhança da solução atual. Essa nova solução é criada a partir da alteração dos valores de pesos das informações espaciais (INC, USO, PROP), que inicialmente são iguais a 0,33, e alteração dos pesos atribuídos à intensidade de inclinação, iguais a 1 na solução inicial.

O peso da inclinação diz respeito à impedância associada ao pixel. As alterações com relação a esses pesos foram feitas utilizando um procedimento aleatório específico, que se baseia nos pesos da solução atual para propor pesos alternativos. A restrição fundamental desse procedimento é gerar novos pesos baseados em uma função monotonicamente crescente, ou seja, inclinações maiores não devem receber pesos menores, isso para ser condizente com a prática, em que maiores inclinações possuem maior impedância. A direção da alteração, isto é, se os pesos devem ser mais ou menos restritivos foi aleatória. Já a intensidade da alteração (quanto maior a intensidade maior é a diferença entre os pesos atuais e alternativos), foi baseada na temperatura do *simulated annealing*, i.e., quanto menor a temperatura, menor é a intensidade de alteração. A Figura 9 ilustra como os pesos atribuídos à inclinação afetam o traçado da estrada.

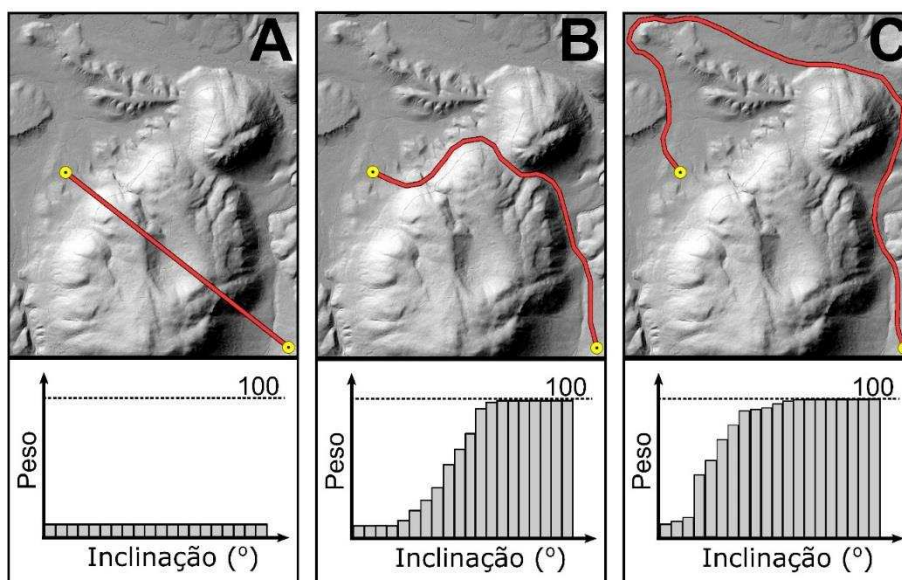


Figura 9. Influência do peso da inclinação do terreno na geração de traçados alternativos. (A) Pesos constantes e iguais a 1: representa a solução inicial e é o menos restritivo; (B); peso aumenta com o aumento da inclinação; (C) o peso aumenta mais ainda.

- **Computação de todos os custos referentes às estradas**

Esta função pode ser considerada o núcleo do procedimento de otimização; é a etapa mais importante e complexa da metodologia, em que as atribuições horizontais e verticais são geradas, além de se computarem todos os custos monetários referentes ao traçado. Esses custos são utilizados como base para regra de decisão do *simulated annealing* e correspondem à função objetivo do procedimento de otimização. A função (*Computa custos*) deve ser executada utilizando a superfície de custo referente à solução alternativa (S_A) ou à solução atual (S). Para a solução atual, a função é executada apenas na primeira iteração ($i = 1$); nas demais iterações, os resultados referentes à solução atual são recuperados da solução alternativa referente à iteração anterior. A função para computar custos pode ser formulada de acordo com o fluxograma da Figura 10.

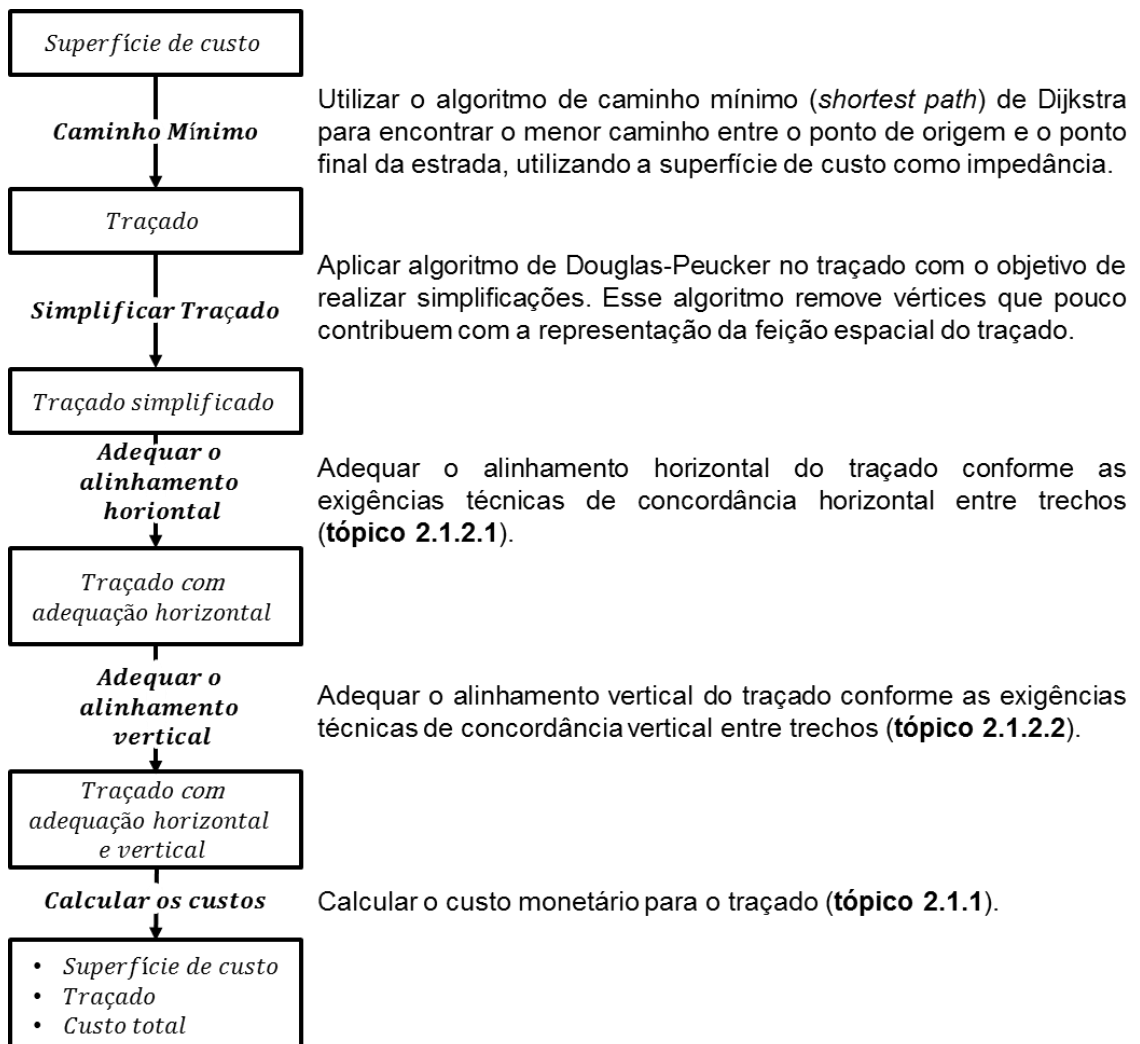


Figura 10. Etapas da função *Computar custos*.

2.2 ESTUDO DE CASO

Para avaliar a metodologia de otimização do traçado geométrico de estradas florestais foi formulado o seguinte problema: determinar o melhor local de construção de uma estrada para interligar duas localidades A e B de interesse, considerando-se aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais.

2.2.1 Dados espaciais

Foi utilizado um modelo digital de elevação (MDE) derivado de dados LiDAR (*Light Detection And Ranging*), representado no formato raster com tamanho de pixel de 1 m \times 1 m. Esses dados são originários do portal de dados topográficos de alta resolução OpenTopography (2015), e correspondem a uma área de aproximadamente 120 km². A inclinação do terreno foi computada, uma vez que ela é essencial para a execução do procedimento de otimização. A informação espacial de uso e ocupação da terra, bem como os valores monetários das propriedades, não correspondem às verdadeiras informações locais. Essas feições foram importadas de outras áreas, ou seja, são informações fictícias, sendo necessárias para que o procedimento de otimização seja completo. A distribuição espacial dessas informações espaciais é apresentada na Figura 11.

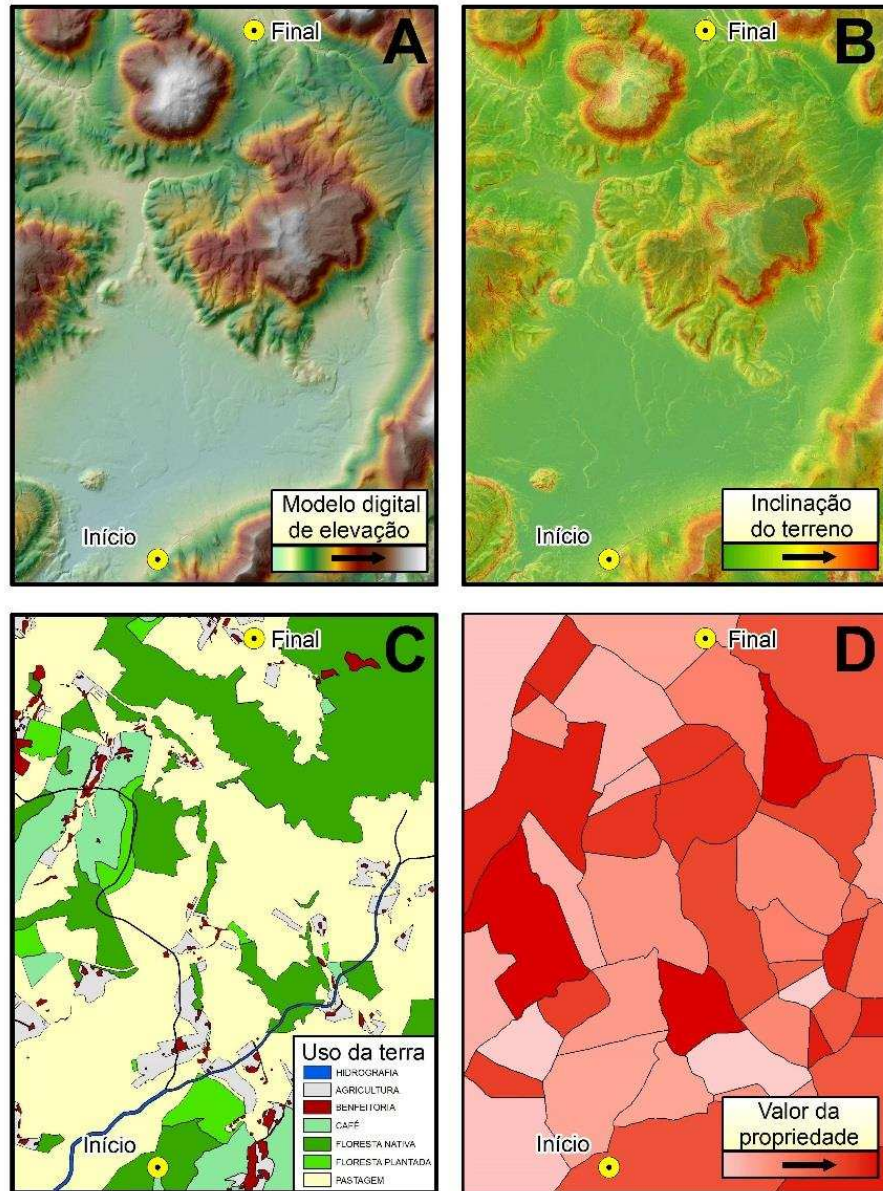


Figura 11. Modelo digital de elevação (A); inclinação do terreno (B); uso e ocupação da terra (C); valores monetários das propriedades (D).

2.2.2 Características da estrada e informações de custos

As características da estrada e informações de custos utilizadas no trabalho são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Características referentes ao traçado da estrada e informações de custos monetários.

Variável de entrada	Valor
Distância entre o ponto de início e final da estrada	11,8 km
Largura da estrada	2 pistas de 7m/pista
Velocidade diretriz	80 km/h
Razão de superelevação	6%
Coefficiente de fricção	0,14
Greide máximo permitido	5%
Custo unitário dependente do comprimento	40 \$/m
Custo unitário das propriedades	0 - 20 \$/m ²
Custo unitário da penalidade APP*	100 * 20 \$/m ²
Custo unitário da penalidade hidrografia	1.000 * 20 \$/m ²
Custo unitário da penalidade área residencial	10.000 * 20 \$/m ²
Inclinação do corte/aterro	0,5 ; 0,4
Custo unitário de corte/aterro	35 \$/m ³ ; 20 \$/m ³
Fator de compactação da terra	0,9
Coefficientes para estimar custo de pontes	$\alpha_0 = 68.851$; $\alpha_1 = 400$
Custo unitário de manutenção	3,3 \$/m/ano
Período analisado	30 anos
Taxa de juros	9%
Volume de tráfego anual	5.000
Porcentagem de veículos de carga	10%
Custo unitário de tempo de viagem (automóvel)	9 \$/h
Custo unitário de tempo de viagem (caminhão)	16 \$/h
Custo da gasolina	1,25 \$/L
Custo do diesel	0,85 \$/L
Custo unitário de acidentes	20.000 \$/acidentes
Número de iterações do <i>simulated annealing</i>	1.000
Temperatura inicial do <i>simulated annealing</i>	10
Taxa de redução da temperatura	0,995

* Penalidade referente à área de preservação permanente, caracterizada como ambientalmente sensível, cujo valor é 100 vezes maior que o custo unitário da propriedade de valor mais elevado da área de estudo (JHA et al., 2006).

Fontes: Jha et al. (2006) e Kang et al. (2012).

2.3 INFORMAÇÕES COMPUTACIONAIS

Todo o procedimento de otimização do traçado geométrico de estradas foi desenvolvido na linguagem de programação Python, de forma completamente integrada com o *software* de sistemas de informações geográficas ArcGIS (ESRI, 2015). Para aumentar a eficiência de execução do algoritmo, todas as bases de dados espaciais armazenadas em formato raster foram transferidas para a memória RAM do computador, passando a ser armazenadas no formato de matriz nativa da biblioteca Numpy (WALT VAN DER et al., 2011) do Python, a cada momento em que se fez necessário, durante todo o processo de execução.

A biblioteca Numpy é destinada à computação numérica e foi utilizada para as operações básicas envolvendo matrizes, tais como operações matemáticas, acesso a índices e álgebra booleana. Também foi utilizada a biblioteca Scipy do Python (JONES et al., 2001) – destinada à matemática, ciências e engenharia. Essa biblioteca foi importante para desenvolver o procedimento que realiza os cálculos de terraplanagem e para computar caminhos mínimos por meio do algoritmo de Dijkstra, implementado de forma extremamente eficiente utilizando-se Heaps de Fibonacci. Já a biblioteca Arcpy (criada pela ESRI para executar as ferramentas do ArcGIS no ambiente do Python, bem como fazer a integração entre eles para o desenvolvimento de novas ferramentas) foi utilizada apenas para fazer a integração do procedimento de otimização com o ArcGIS.

Para executar a metodologia foi utilizada uma Workstation Móvel DELL Precision, com 16 Gb de memória RAM e processador i7 2.5GHz.

3. RESULTADOS

3.1 ATRIBUIÇÃO HORIZONTAL DO TRAÇADO DA ESTRADA

A Figura 12A ilustra a atribuição horizontal do traçado geométrico da estrada, referente à solução de custo mínimo. Em maior nível de detalhe é possível observar parte da estrada antes (Figura 12B) e após (Figura 12C) a adequação às exigências técnicas relativas à atribuição horizontal. A estrada apresenta 13,7 km de extensão e possui curvas alocadas em cada um dos 11 pontos de interseção (P_i) entre trechos retos. Essas curvas foram alocadas respeitando-se as especificações do projeto, com raio de curva mínimo igual a 250 m. O cumprimento dessa restrição possibilita o trânsito com segurança e eficiência.

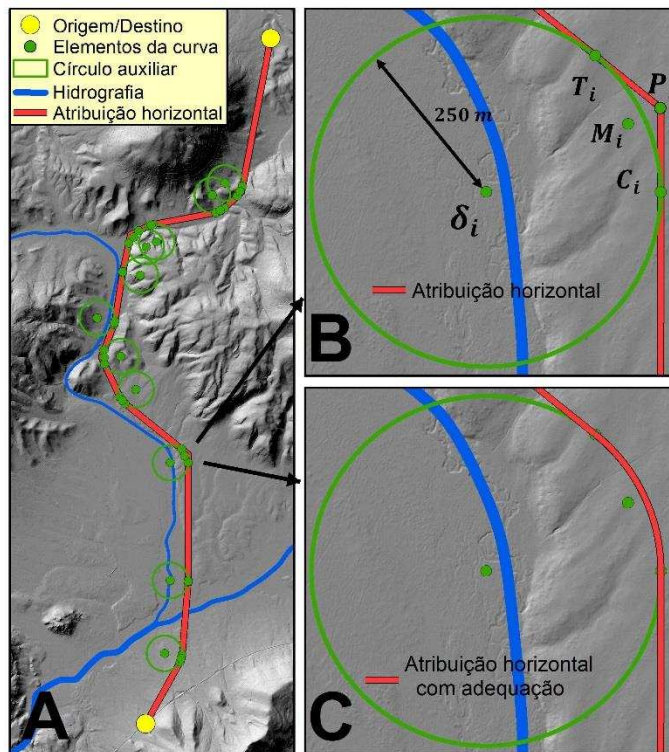


Figura 12. Atribuição horizontal do traçado geométrico da estrada (A). Maior nível de detalhe em um dos pontos de interseção (P_i) entre trechos retos (B); atribuição horizontal com a curva já alocada conforme as exigências técnicas (C).

3.2 ATRIBUIÇÃO VERTICAL DO TRAÇADO DA ESTRADA

Para que o tráfego na estrada seja eficiente, assim como estipulado no projeto, é necessário que a atribuição vertical apresente greides inferiores ao máximo permitido (5% de acordo com o problema proposto). A Figura 13 apresenta os pontos de interseção vertical (PIV), bem como os greides associados a eles. Pode-se observar que não houve violação com relação a essa exigência técnica: o máximo greide alcançado na estrada foi igual a 4,7 % em valor absoluto. A restrição do comprimento mínimo das curvas verticais também foi atendida, possibilitando assim trafegar com segurança e conforto.

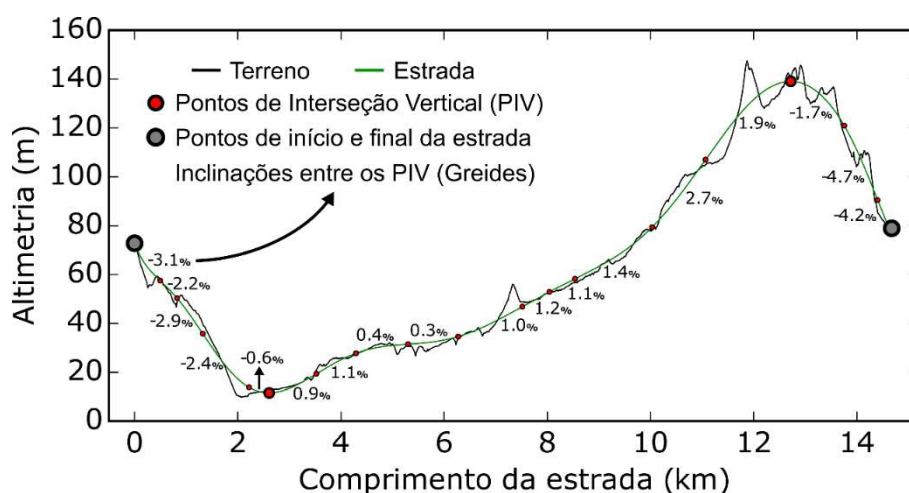


Figura 13. Perfil do eixo da estrada ilustrando a atribuição vertical conforme as exigências técnicas.

A Figura 14 ilustra trechos da estrada em que será necessário realizar obras de terraplanagem. Com essa figura é possível observar a qualidade com que os cortes e aterros foram produzidos, permitindo computar a movimentação de terra com elevada acurácia e em nível de pixel. Essas características são imprescindíveis para o sucesso do procedimento de otimização pois, via de regra, as operações de terraplanagem são as que mais oneram a construção das estradas. A maioria dos trabalhos disponíveis na literatura utiliza funções aproximativas para computar o volume de operações de corte e aterro (JHA et al., 2006). Isso pode reduzir a acurácia dos resultados e assim conduzir o algoritmo de otimização para soluções piores.

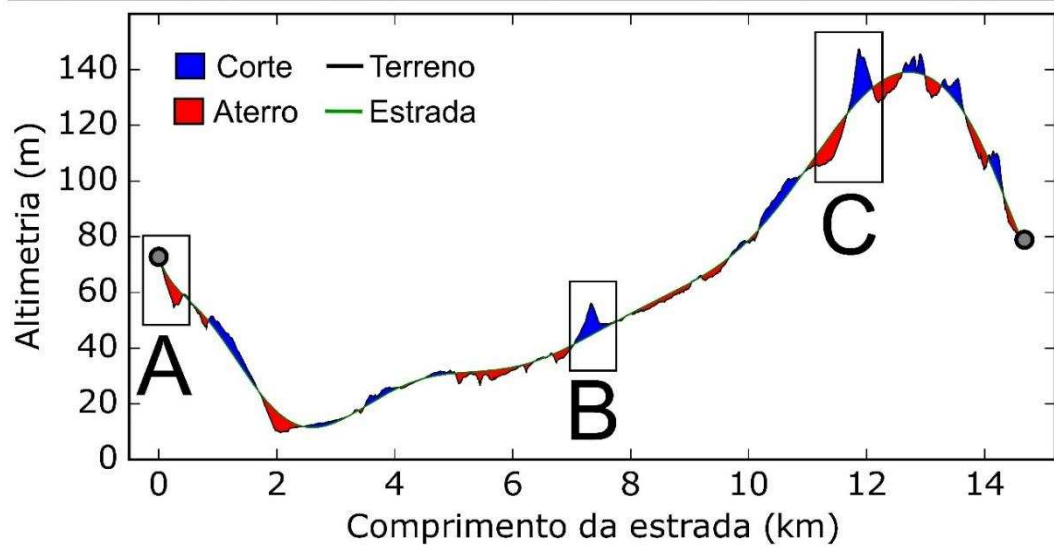
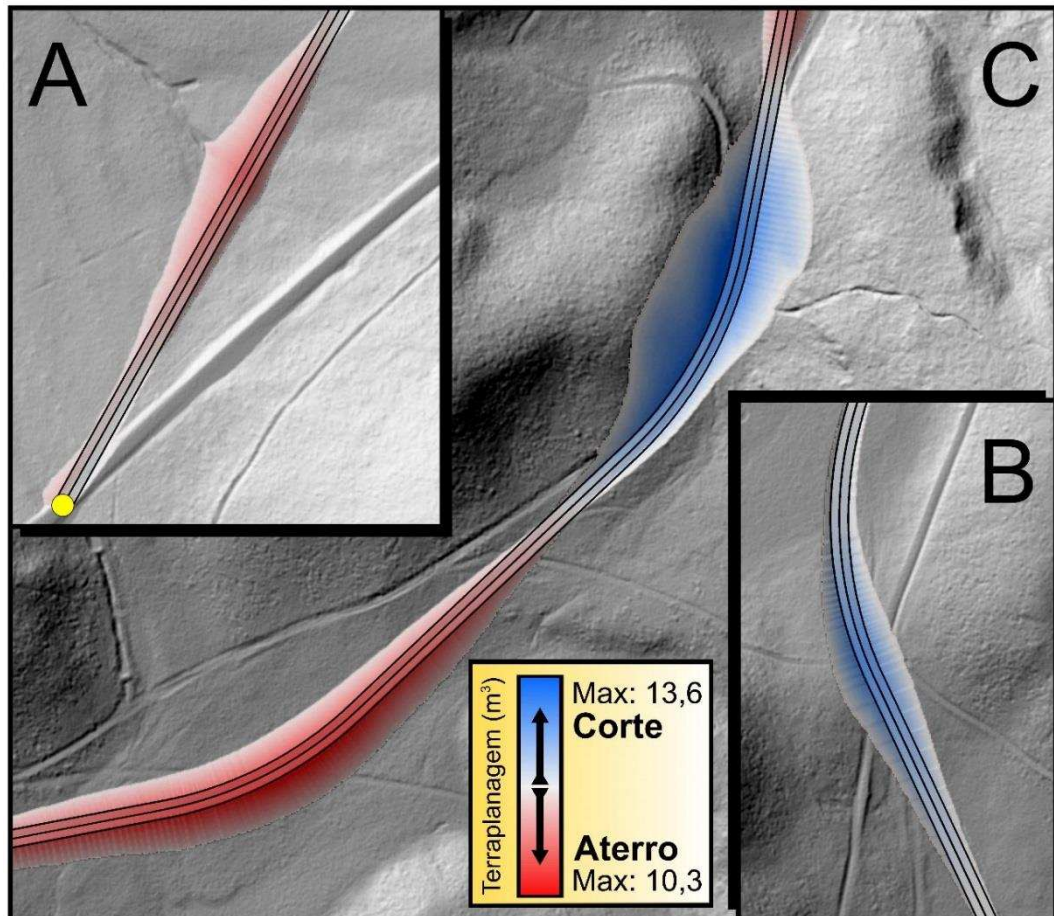


Figura 14. Destaque de trechos da estrada em que será necessário realizar obras de terraplanagem.

3.3 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

A solução que minimiza o custo do traçado geométrico da estrada foi obtida após 685 iterações e corresponde a um valor aproximado de \$ 2,3 milhões (Figura 15A). O custo de construção foi o mais significativo, seguido do custo de utilização da estrada (Figura 15B). O tempo total de execução do procedimento de otimização foi de aproximadamente 20 horas. O link: <https://youtu.be/ZH5klceWRMk> apresenta uma animação 3D do traçado de custo mínimo gerado de acordo com o problema proposto no estudo de caso.

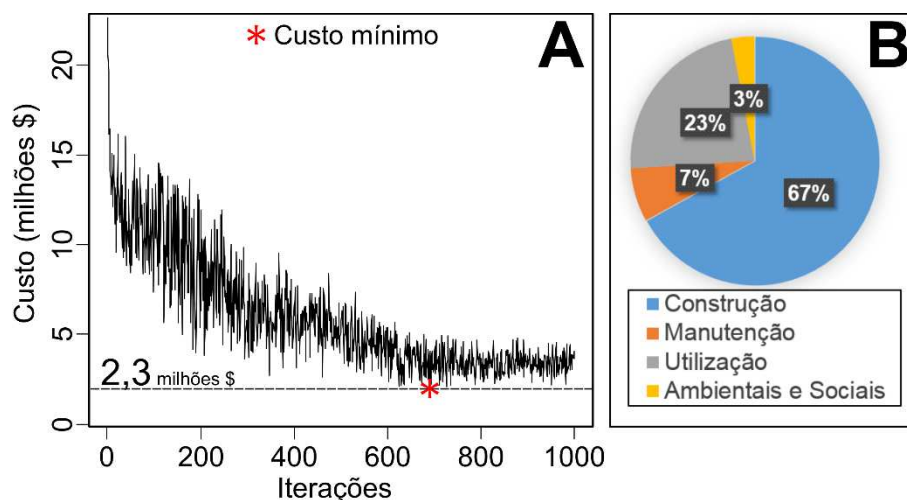


Figura 15. Alteração no valor da função objetivo com o decorrer das iterações do procedimento de otimização (A); distribuição dos custos referentes à solução de custo mínimo (B).

Após a primeira iteração, o valor da função de custo apresentou redução significativa (Figura 15A). Isso se deve ao fato de que, na solução inicial (primeira iteração), a superfície de custo referente à inclinação do terreno apresenta peso constante e assim favorece a construção de uma estrada retilínea. Por se tratar de uma região montanhosa, os custos com a adequação do traçado conforme as exigências técnicas tornam-se extremamente elevados, onerando substancialmente o custo total da obra. À medida em que o procedimento avançou, o valor da função de custo apresentou grande oscilação e reduções gradativas. Isso ocorreu até a iteração de número 600; a partir desse ponto, a função tendeu a estabilizar e a oscilar menos. Geralmente esse comportamento indica que a solução está próxima do ótimo.

4. DISCUSSÕES

De acordo com Jha et al. (2006), as condições necessárias para uma boa metodologia de otimização do traçado geométrico de estradas podem ser resumidas com as questões apresentadas na Tabela 4. Essa tabela também apresenta as respostas para as questões de acordo com a metodologia formulada neste trabalho. Estas condições são úteis para avaliar e apresentar as principais características da metodologia proposta.

Tabela 4. Condições necessárias para uma boa metodologia de otimização.

#	Descrição das condições	Respostas
(1)	Considera todos os custos dominantes e sensíveis?	sim
(2)	Formula todas as restrições necessárias?	sim
(3)	Gera um traçado realista?	sim
(4)	É capaz de lidar com retrocessos no alinhamento horizontal?	sim
(5)	Otimiza simultaneamente os alinhamentos horizontais e verticais?	sim
(6)	Tem um espaço de busca contínuo?	sim
(7)	Evita automaticamente regiões inacessíveis?	sim
(8)	Encontra solução ótima ou próxima do ótimo?	não investigado
(9)	Encontra a solução em um tempo razoável?	não investigado
(10)	Tem baixos requisitos de armazenamento computacional?	não investigado
(11)	É compatível com Sistemas de Informações Geográficas (SIG)?	sim

Todos os custos dominantes e sensíveis às diferentes alternativas de traçados devem ser considerados em uma boa metodologia de otimização (JONG e SCHONFELD, 1999; JHA et al., 2006; KANG et al., 2012), e assim satisfazer à condição (1). Dentre os mais importantes, podem-se citar o custo de construção e o de utilização da estrada. Esses dois tipos de custos apresentam algumas peculiaridades, tais como, a dominância em relação aos demais, são mais difíceis de serem computados e geralmente são conflitantes (HIRPA et al., 2016). A última peculiaridade pode ser exemplificada por estradas que acompanham a conformação do relevo e, assim, apresentam baixo custo de construção; porém, são caracterizadas por muitas curvas e subidas/decidas mais acentuadas. Essas características colaboram para que a estrada apresente baixa eficiência e baixa segurança de tráfego, o que contribui para a elevação do custo de utilização. O oposto também é verdadeiro: uma estrada

completamente reta apresentaria o custo mínimo de utilização, mas provavelmente o custo de construção seria extremamente elevado, pois seriam necessárias muitas operações de terraplanagem, principalmente em regiões montanhosas.

Outra particularidade com relação ao custo de utilização é que frequentemente ele é desconsiderado em projetos de construção de estradas, sobretudo em processos licitatórios mal formulados, em que condições mínimas de eficiência e segurança de tráfego não são adequadamente definidas. O contratante da obra sempre arcará com o custo de utilização, pois trata-se de um custo de longo prazo. Outros motivos de não consideração desse custo são o desconhecimento, falta de planejamento estratégico e baixa capacidade de investimento inicial.

Os impactos ambientais e sociais são importantes em um cenário de curto e longo prazo no projeto de uma estrada, e cada vez se tem mais consciência de que esses impactos ocasionam outros custos econômicos, além de afetarem o bem-estar da sociedade (MISHRA et al., 2013; FRIEDRICH, 2015). Por esses motivos, esses custos também devem ser considerados. O custo de manutenção não apresenta a mesma importância dos custos anteriores, mas está diretamente ligado ao comprimento da estrada sendo, assim, sensível a diferentes alternativas de traçado (KANG et al., 2012).

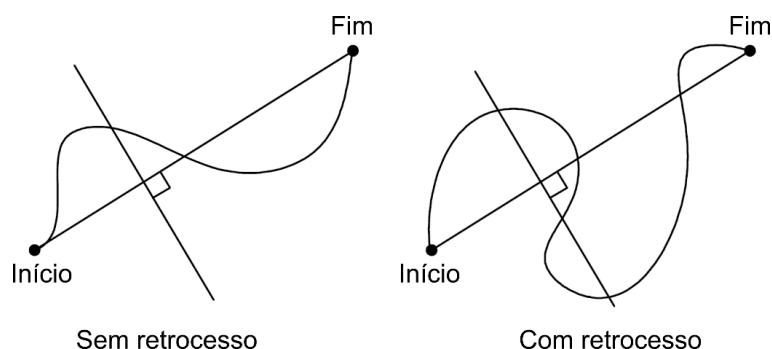
Além dos custos, a metodologia deve satisfazer às restrições técnicas, especificamente com relação ao alinhamento horizontal e vertical (GRIPP JUNIOR e MACHADO, 2013). De modo geral, a melhor alternativa para conectar dois locais é por meio de um trecho reto, pois trata-se do menor caminho para realizar tal tarefa. Todavia, podem existir fatores que impossibilitam a construção de uma estrada com tal geometria e, conseqüentemente, devem-se adotar trechos curvos (horizontal e vertical) para transpor adequadamente essas situações. De acordo com Gripp Junior e Machado (2013), esses fatores podem estar relacionados à topografia da região, às características geológicas e geotécnicas do terreno e a questões ambientais e sociais.

Para que a estrada apresente condições de eficiência e segurança de tráfego, ela deverá apresentar curvas horizontais com raios iguais ou superiores ao raio mínimo estabelecido no projeto, apresentar curvas verticais que forneçam uma transição gradual entre dois greides tangentes consecutivos e trechos com inclinação inferior à máxima permitida (GARBER e HOEL, 2014). O

procedimento de otimização do traçado deve ser capaz de garantir o atendimento simultâneo dessas restrições e assim satisfazer à condição (2).

A condição (3) é muito importante e apresenta papel de destaque no processo de tomada de decisão, em que o resultado deverá fazer sentido e ser condizente com a prática. Devido à possibilidade de se expressar o resultado por meio de imagens e modelos tridimensionais, essa condição é facilmente avaliada, sobretudo por especialistas.

O retrocesso – condição (4) – de uma estrada é caracterizado quando o alinhamento horizontal é interceptado mais de uma vez por uma reta perpendicular à reta formada entre os pontos de início e final do alinhamento horizontal (Figura 16). Intuitivamente, o retrocesso é indesejável, pois claramente torna a estrada mais longa. Contudo, esse recurso poderá ser indispensável em alguns cenários, como em situações em que é necessário contornar cidades e montanhas. De acordo com Jha et al. (2006), muitos modelos de otimização do traçado encontrados na literatura não são capazes de lidar com retrocesso, especificamente os baseados em programação dinâmica.



Fonte: Jha et al., 2006.

Figura 16. Alinhamento horizontal sem e com retrocesso.

Procedimentos que otimizam os alinhamentos horizontais e verticais simultaneamente são complexos, pois o problema é difícil de ser formulado e resolvido (CHEW et al., 1989; HIRPA et al., 2016). Porém, o atendimento da condição (5) é imprescindível, pois as atribuições horizontal e vertical são interdependentes, sendo que quase todos os seus componentes de custos são altamente correlacionados (JONG e SCHONFELD, 1999). A atribuição horizontal definida previamente pode onerar em demasia os custos com a adequação da atribuição vertical conforme as exigências técnicas e, assim, aumentar os custos totais relacionados às estradas ou até mesmo inviabilizar a construção da obra.

A metodologia proposta otimiza os alinhamentos horizontais e verticais simultaneamente, pois aborda ambos em uma mesma iteração no algoritmo de otimização, em que os custos derivados da atribuição vertical podem afetar a localização da atribuição horizontal na iteração seguinte.

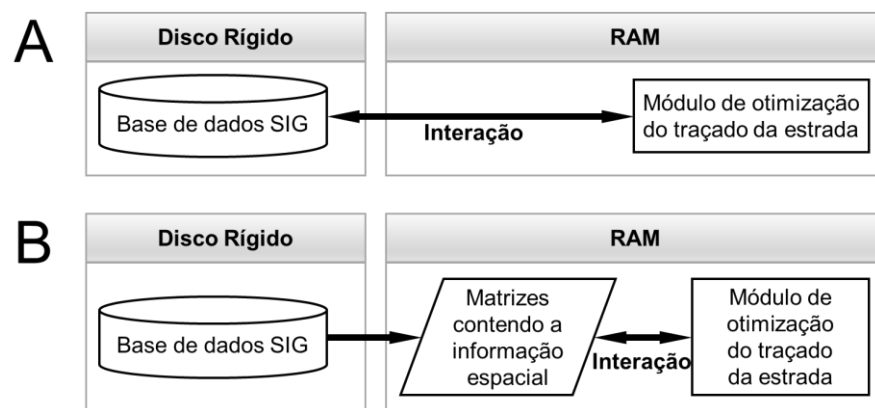
O procedimento de otimização deve ser implementado de forma a permitir a busca em um ambiente contínuo, inclusive no espaço tridimensional, isto é, deve possibilitar a alocação da estrada em qualquer local da área de estudo. Porém, locais inacessíveis devem ser automaticamente evitados, o que foi feito por intermédio da atribuição de penalidades. Essas características representam as condições (6) e (7).

As condições (8), (9) e (10) não foram investigadas neste trabalho. A condição (8) não foi avaliada devido à complexidade de se obter a solução ótima (CHEW et al., 1989; JHA et al., 2006); porém procedimentos metaheurísticos, tais como o *simulated annealing*, são conhecidos por retornarem boas soluções, geralmente próximas da ótima (BLUM e ROLI, 2003; TALBI, 2009). As condições (9) e (10) dizem respeito à eficiência computacional, em termos de tempo de processamento e memória requerida do sistema para executar o algoritmo. Para responder as questões referentes a essas condições seria necessário derivar a complexidade computacional do algoritmo, ou realizar uma série de experimentos com problemas de diferentes tamanhos para estimá-la. Devido ao elevado nível de detalhe (pixel de 1 m²) das bases de dados utilizadas no presente trabalho (exemplo: modelo digital de elevação com aproximadamente 130 milhões de pixels, ocupando 0.5 Gb de memória do sistema), o problema proposto no estudo de caso (**tópico 2.2**) pode ser considerado de grande porte. Apesar disso, a solução foi obtida em um tempo aceitável, de aproximadamente 20 horas.

A incorporação da metodologia em um ambiente SIG segue uma tendência geral de todos os setores da sociedade. A localização geográfica constitui um componente importante dos dados e conseqüentemente essencial para gerar informações, interpretar resultados e tomar decisões. No caso específico da otimização do traçado de estradas, o ambiente SIG possibilita lidar com bases de dados altamente complexas, oriundas de projetos do mundo real (JHA e SCHONFELD, 2004; SHAFahi e BAGHERIAN, 2013). O SIG pode ser utilizado para extrair dados e informações relevantes para computar custos e seus recursos de análises espaciais podem ser explorados na implementação

do algoritmo (JHA e SCHONFELD, 2000). Além disso, o SIG pode auxiliar o gestor na etapa final do processo de tomada de decisão, em que é necessário avaliar se o traçado gerado apresenta condições de ser implementado na prática. Neste contexto, o SIG pode ser utilizado para realizar análises espaciais, gerar diferentes tipos de mapas e modelos tridimensionais, e com isso conferir maior segurança ao gestor na avaliação do projeto. Por todas essas vantagens e utilidades, a compatibilidade com um SIG perfaz a condição (11), além de compor um dos objetivos do presente trabalho.

A principal limitação da incorporação do procedimento de otimização em um SIG é o aumento do tempo computacional para se executar o algoritmo. Esse problema foi relatado por diversos autores (JHA e SCHONFELD, 2004; JHA et al., 2006; KANG et al., 2009; SHAFahi e BAGHERIAN, 2013). A implementação utilizando a biblioteca Numpy do Python, para armazenar e manipular as bases de dados espaciais, possibilitou que o processamento fosse inteiramente realizado na memória RAM do computador. Além disso, essa biblioteca é extremamente otimizada para o cálculo numérico, sobretudo para operações que envolvam matrizes. Assim, foi possível reduzir significativamente o tempo de processamento. Shafahi e Bagherian (2013) adotaram estratégia semelhante de implementação; entretanto, utilizaram a biblioteca ArcEngine do ArcGIS em ambiente .Net. A Figura 17 evidencia a diferença dos métodos de interação entre o módulo de otimização e as bases de dados espaciais.



Fonte: Adaptado de Shafahi e Bagherian (2013).

Figura 17. Métodos de interação entre o módulo de otimização do traçado da estrada e as bases de dados espaciais de sistemas de informações geográficas (SIG). Comumente adotado (A) e o adotado no presente trabalho (B).

5. CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida é apropriada para a otimização do traçado geométrico de estradas, pois atende às condições necessárias para esse fim, tais como: considera todos os custos dominantes e sensíveis, e.g., custo de construção e utilização da estrada; gera traçados realistas e que respeitam as restrições técnicas; é capaz de lidar com retrocessos na estrada; otimiza os alinhamentos horizontais e verticais simultaneamente; o algoritmo apresenta espaço de busca contínuo e tridimensional, mas é capaz de evitar automaticamente regiões inacessíveis; embora a eficiência computacional não tenha sido investigada, foi evidenciado que o procedimento é capaz de retornar uma boa solução para um problema de grande porte em um tempo aceitável; e por fim, a metodologia é compatível com sistemas de informações geográficas (SIG).

A incorporação da metodologia em um ambiente SIG é importante, pois pode auxiliar o gestor a avaliar se o traçado gerado apresenta condições de ser implementado na prática, além de permitir lidar com bases de dados complexas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. Washington, DC. 2001: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2001.

AASHTO. **User Benefit Analysis for Highways Manual**. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2003.

AKAY, A. E. Minimizing total costs of forest roads with computer-aided design model. **Sadhana**, v. 31, n. 5, p. 621–633, 2006.

AKAY, A. E.; SESSIONS, J. Applying the decision support system, TRACER, to forest road design. **Western Journal of Applied Forestry**, v. 20, n. 3, p. 184–191, 2005.

ARUGA, K.; SESSIONS, J.; AKAY, A.; CHUNG, W. Simultaneous optimization of horizontal and vertical alignments of forest roads using Tabu Search. **International Journal of Forest Engineering**, v. 16, n. 2, p. 137–151, 2005.

ARUGA, K.; TASAKA, T.; SESSIONS, J.; MIYATA, S. Tabu search optimization of forest road alignments combined with shortest paths and cubic splines. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 27, n. 1, p. 37–47, 2006.

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, v. 35, n. 3, p. 268–308, 2003.

CHEW, E. P. P.; GOH, C. J. J.; FWA, T. F. F. Simultaneous optimization of horizontal and vertical alignments for highways. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 23, n. 5, p. 315–329, 1989.

DEVLIN, G. J.; MCDONNELL, K. Performance accuracy of real-time GPS asset tracking systems for timber haulage trucks travelling on both internal forest road and public road networks. **International Journal of Forest Engineering**, v. 20, n. 1, p. 45–49, 2009.

ENTERS, T.; DURST, P. B.; APPLGATE, G.; KHO, P. C. S.; MAN, G. **Applying reduced impact logging to advance sustainable forest management: international conference proceedings 26 February to 1 March 2001, Kuching, Malaysia**. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand, 2002.

EPSTEIN, R.; WEINTRAUB, A.; SAPUNAR, P.; et al. A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. **Operations Research**, v. 54, n. 6, p. 1017–1027, 2006.

ESRI. **Environmental Systems Research Institute**. USA, 2015.

FAVREAU, J. Challenges in forest transportation. **Workshop Value Chain Optimization (VCO). Logistics and Transportation in the Forest Sector**, 2012. Montréal, Canadá.

- FRIEDRICH, J. Integrating neglected ecological impacts of road transport into corporate management. **Ecological Indicators**, v. 54, p. 197–202, 2015.
- FRISK, M.; GÖTHE-LUNDGREN, M.; JÖRNSTEN, K.; RÖNNQVIST, M. Cost allocation in collaborative forest transportation. **European Journal of Operational Research**, v. 205, n. 2, p. 448–458, 2010.
- GARBER, N. J.; HOEL, L. A. **Traffic and highway engineering**. Cengage Learning, 2014.
- GRIPP JUNIOR, J.; MACHADO, C. C. Traçado geométrico. In: C. C. MACHADO (Ed.); **Construção e conservação de estradas rurais e florestais**. p.441, 2013.
- GUCINSKI, H. **Forest roads: a synthesis of scientific information**. DIANE Publishing, 2001.
- HIRPA, D.; HARE, W.; LUCET, Y.; PUSHAK, Y.; TEFAMARIAM, S. A bi-objective optimization framework for three-dimensional road alignment design. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 65, p. 61–78, 2016.
- JHA, M. K. Metaheuristic applications in highway and rail infrastructure planning and design: implications to energy and environmental sustainability. **Metaheuristics in water resources, geotechnical and transport engineering**, p. 365–384, 2013.
- JHA, M. K.; JHA, M. K.; SCHONFELD, P. M.; JONG, J.-C. **Intelligent road design**. WIT Press, 2006.
- JHA, M. K.; SCHONFELD, P. A highway alignment optimization model using geographic information systems. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 38, n. 6, p. 455–481, 2004.
- JHA, M.; SCHONFELD, P. Geographic information system-based analysis of right-of-way cost for highway optimization. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, , n. 1719, p. 241–249, 2000.
- JONES, E.; OLIPHANT, T.; PETERSON, P. SciPy: Open source scientific tools for Python, 2001. URL <http://www.scipy.org>, 2001.
- JONG, J.-C.; SCHONFELD, P. Cost functions for optimizing highway alignments. **Transportation Research Record**, , n. 1659, p. 58–67, 1999.
- JONG, J.-C.; SCHONFELD, P. An evolutionary model for simultaneously optimizing three-dimensional highway alignments. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 37, n. 2, p. 107–128, 2003.
- KANG, M.-W.; JHA, M. K.; SCHONFELD, P. Applicability of highway alignment optimization models. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 21, n. 1, p. 257–286, 2012.
- KANG, M. W.; SCHONFELD, P.; YANG, N. Prescreening and Repairing in a Genetic Algorithm for Highway Alignment Optimization. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 24, n. 2, p. 109–119, 2009.

KANZIAN, C.; KÜHMAIER, M.; ZAZGORNIK, J.; STAMPFER, K. Design of forest energy supply networks using multi-objective optimization. **Biomass and Bioenergy**, v. 58, p. 294–302, 2013.

KARLSON, M.; MÖRTBERG, U.; BALFORS, B. Road ecology in environmental impact assessment. **Environmental impact assessment review**, v. 48, p. 10–19, 2014.

KIM, E.; JHA, M. K.; SCHONFELD, P.; KIM, H. S. Highway alignment optimization incorporating bridges and tunnels. **Journal of Transportation Engineering**, v. 133, n. 2, p. 71–81, 2007.

KIM, E.; JHA, M. K.; SON, B. Improving the computational efficiency of highway alignment optimization models through a stepwise genetic algorithms approach. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 39, n. 4, p. 339–360, 2005.

LI, W.; PU, H.; SCHONFELD, P.; ZHANG, H.; ZHENG, X. Methodology for optimizing constrained 3-dimensional railway alignments in mountainous terrain. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 68, p. 549–565, 2016.

MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. Universidade Federal de Viçosa, 2002.

MACHADO, C. C. Construção e conservação de estradas rurais e florestais. In: C. C. Machado (Ed.); **Planejamento de estradas florestais**. p.441, 2013. Viçosa, MG.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S.; BIRRO, M. H. B.; MACHADO, R. R. **Transporte rodoviário florestal**. Viçosa, MG, 2009.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H.; TELLER, E. Equation of state calculations by fast computing machines. **The journal of chemical physics**, v. 21, n. 6, p. 1087–1092, 1953.

MISHRA, S.; KANG, M.-W.; JHA, M. K. Empirical model with environmental considerations in highway alignment optimization. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 20, n. 4, p. 1–12, 2013.

MOREB, A. A. Spline technique for modeling roadway profile to minimize earthwork cost. **Journal of Industrial and Management Optimization (JIMO)**, v. 5, n. 2, p. 275–283, 2009.

NURMINEN, T.; HEINONEN, J. Characteristics and time consumption of timber trucking in Finland. **Silva Fennica**, v. 41, n. 3, p. 471, 2007.

OECD. *Optimisation of Road Alignment by the Use of Computers*. , 1973. Paris.

OPENTOPOGRAPHY. A Portal to High-Resolution Topography Data and Tools. Disponível em: <<http://opentopo.sdsc.edu/gridsphere/gridsphere?cid=datasets>>. Acesso em: 15/1/2015.

POLUS, A.; LIVNEH, M.; CRAUS, J. **Effect of traffic and geometric measures on highway average running speed**. 63rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, 1984.

PORTUGAL, C. R. M.; MACHADO, C. C.; SILVA, E. Gestão ambiental e impactos em estradas rurais e florestais. In: C. C. MACHADO (Ed.); **Construção e conservação de estradas rurais e florestais**. p.441, 2013. Viçosa, MG.

ROGERS, M.; ENRIGHT, B. **Highway engineering**. John Wiley & Sons, 2016.

RÖNNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical programming**, v. 97, n. 1–2, p. 267–284, 2003.

SHAFABI, Y.; BAGHERIAN, M. A Customized Particle Swarm Method to Solve Highway Alignment Optimization Problem. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 28, n. 1, p. 52–67, 2013.

SILVA, M. L. DA; OLIVEIRA, R. J. DE; VALVERDE, S. R.; MACHADO, C. C.; PIRES, V. A. V. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. **Resvista Árvore**, v. 31, n. 6, p. 1073–1079, 2007.

SOKNATH, M. I. L.; PIANTANAKULCHAI, M. Vertical Alignment Optimization using Customized Polynomial Regression Model. **Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, 2013.

TALBI, E.-G. **Metaheuristics: from design to implementation**. John Wiley & Sons, 2009.

WALT, S. VAN DER; COLBERT, S. C.; VAROQUAUX, G. The NumPy array: a structure for efficient numerical computation. **Computing in Science & Engineering**, v. 13, n. 2, p. 22–30, 2011. AIP Publishing.

WEINTRAUB, A.; EPSTEIN, R.; MORALES, R.; SERON, J.; TRAVERSO, P. A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries. **Interfaces**, v. 26, n. 4, p. 1–12, 1996.

WOLFSMAYR, U. J.; RAUCH, P. The primary forest fuel supply chain: a literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 60, p. 203–221, 2014.

YANG, N.; KANG, M.-W.; SCHONFELD, P.; JHA, M. K. Multi-objective highway alignment optimization incorporating preference information. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 40, p. 36–48, 2014.

ZHAO, J. J.; TONIAS, D. E. **Bridge Engineering: Design, Rehabilitation and Maintenance of Modern Highway Bridges**. Lulu Press, Inc, 2014.