

GRUPO DE ESTUDO: DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GMA

Implementação de um Modelo Espacial Multicritério (MEM) nos estudos de planejamento da transmissão da EPE

**Clayton Borges da Silva (1), Pedro Antonio da Silva Piacesi (2),
Paula Cunha Coutinho de Andrade (1), Thiago Galvão (1)
(1) Empresa de Pesquisa Energética – EPE
(2) Autor independente**

RESUMO

A modelagem espacial multicritério (MEM) tornou-se uma importante ferramenta de planejamento, auxiliando na identificação de áreas para a implantação de infraestruturas energéticas. Ela combina critérios físicos, ambientais, sociais, econômicos e legais, reduzindo subjetividades na tomada de decisão. A Empresa de Pesquisa Energética - EPE tem testado o MEM em estudos de transmissão. No entanto, desafios como a padronização de operações e o tempo gasto no preparo de dados dificultam sua adoção padrão nos relatórios R1. Para otimizar o processo, a EPE desenvolveu o SIMEPE, um modelo interno, baseado em álgebra de mapas, para automatizar as etapas de maior consumo de tempo de operação. O projeto se baseou nas etapas da metodologia CRISP-DM para estruturação do desenvolvimento do modelo. Os principais pontos de melhoria foram as etapas de pré-processamento e processamento dos dados, automatizadas utilizando ferramentas ETL, o que reduziu as etapas de operação manual de dados. O modelo inclui três módulos: (1) entrada de parâmetros, com interface web para seleção de camadas e ponderações de Atrito e Peso; (2) processamento de dados, que executa as etapas de preparação e processamento dos dados, gerando uma superfície de custo; e (3) geração de corredores, que calcula rotas de menor custo entre pontos. A automação reduziu sensivelmente o tempo operacional, permitindo aos analistas maior tempo para a avaliação e discussão dos resultados. O modelo padroniza processos, emite relatórios dos parâmetros adotados e melhora a eficiência da operação, facilitando a incorporação da análise multicritério no planejamento de linhas de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Modelagem Espacial Multicritério, MEM, SIMEPE, CRISP-DM, ETL

1.0. INTRODUÇÃO

As análises espaciais multicritério têm se consolidado como importantes ferramentas para o planejamento, especialmente em obras de infraestrutura. Seu principal valor está na capacidade de avaliar, de forma estruturada, múltiplos fatores como: aspectos físicos, ambientais, sociais, econômicos e legais, identificando as áreas mais adequadas para implantação de empreendimentos. O uso no setor energético é crescente, tanto para a identificação de áreas mais adequadas para empreendimentos pontuais quanto para o estudo de corredores de passagem para linhas de transmissão ou dutos.

Apesar da ampla disponibilidade de estudos sobre a aplicação de modelos espaciais multicritério, ainda são raras as discussões de seu uso fora do ambiente de pesquisa. Em ambiente de produção, os modelos devem ser práticos, capazes de processar informações de variados projetos, com alto grau de padronização metodológica e em prazos reduzidos.

O mais tradicional modelo de análise espacial multicritério (MEM) se fundamenta na álgebra de mapas e consiste na sobreposição de diferentes camadas de informação sobre determinada área de estudo. Cada camada é representada por uma matriz cujos valores representam a adequabilidade de implementação de determinado empreendimento [1]. A partir da ponderação dos valores das diferentes camadas é possível identificar as áreas que apresentam maior ou menor restrição para a implementação ou passagem do empreendimento.

2.0 CONTEXTUALIZAÇÃO

A EPE vem adotando, em caráter experimental, a utilização de MEM em seus estudos de planejamento de linhas de transmissão (Relatórios R1) e gasodutos. O processo utiliza ferramentas GIS baseadas na plataforma ESRI/ArcGis, pacotes de otimização de ferramentas e aplicativos proprietários. Embora todas as ferramentas tenham demonstrado bons resultados na delimitação de corredores, também apresentam limitações operacionais. Os dois principais desafios observados foram: a dificuldade de padronizar as operações em múltiplos projetos, e o elevado tempo para preparação e processamento de dados, especialmente em projetos com muitos empreendimentos e prazos reduzidos. Essas limitações representaram um desafio adicional para a incorporação da MEM como procedimento padrão dos relatórios R1.

Nas ferramentas previamente adotadas, além da definição dos parâmetros de modelagem, específicas para cada empreendimento, o analista precisa padronizar diversos critérios nos dados de entrada. Esse processo exige a repetição de múltiplas etapas para cada camada de informação sempre que um novo estudo é iniciado. A reexecução manual destes procedimentos, especialmente quando feita por diferentes analistas e para empreendimentos diversos, eleva o risco de inconsistências metodológicas e demanda alto tempo operacional.

A Figura 1 apresenta, a título de exemplo, fases de preparação e processamento de dados de diferentes camadas de informação. Cada camada demanda diferentes recursos de processamento até sua conversão em matriz, que serão somadas para a formação da superfície de custo.

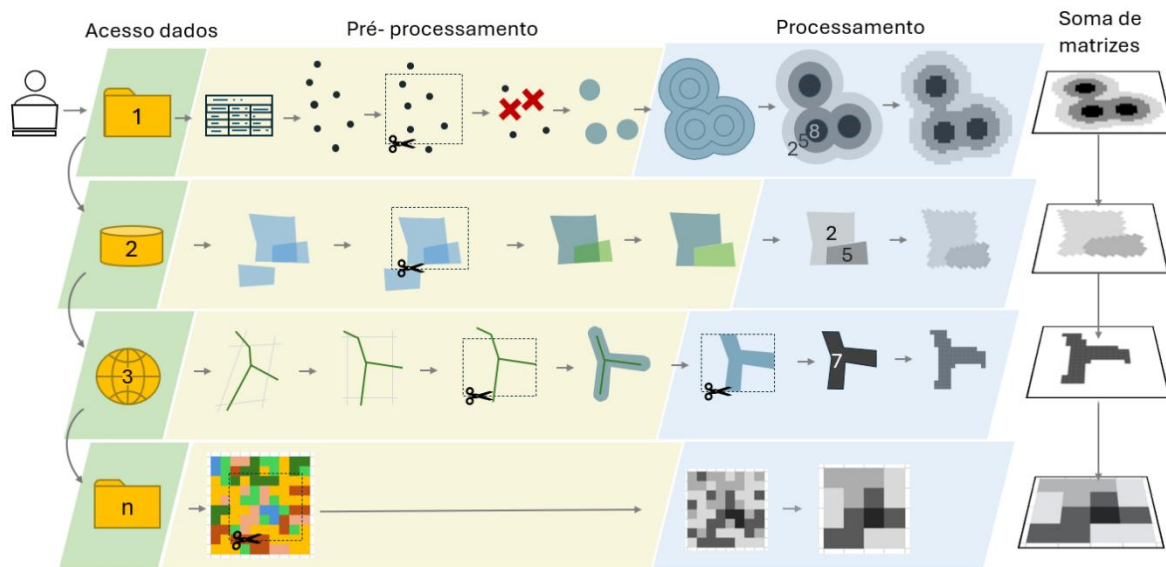


Figura 1 – Exemplos de etapas envolvidas no processamento de dados para modelos baseados em álgebra de mapas.

Essas tarefas, repetitivas, configuram um ambiente ideal para a implementação de processos de automação. Alguns aplicativos já automatizam parte destes processos alcançando ganhos operacionais significativos quando comparados à execução manual do processo. Entretanto, ainda é possível alcançar ganhos expressivos com o acréscimo da automação nas fases de pré-processamento. Estudos sobre as práticas em mineração e modelagem de dados mostram que, em média, até 45% do tempo de desenvolvimento de um modelo é dedicado à análise e preparação dos dados de entrada [3]. Com base nesse diagnóstico, optou-se pelo desenvolvimento de um modelo que incorporasse processos de automação nas etapas de preparação e processamento de dados.

As etapas de concepção do sistema se basearam na metodologia CRISP-DM (*Cross-Industry Standard Process for Data Mining*). Embora esta metodologia seja desenvolvida para aplicações na área de *Data Mining*, a elevada importância das fases de análise e preparação de dados justificou a adaptação da metodologia para seu uso nos processos de concepção e desenvolvimento do modelo.

A principais fases da metodologia CRISP-DM são apresentadas na Figura 2 onde também é possível observar a estimativa de tempo empregado em cada etapa do método.

15%	20%	25%	15%	10%	15%
Requisitos do Negócio	Avaliação dos dados	Preparação dos dados	Modelagem	Avaliação do modelo	Implantação
Definição dos objetivos	Pesquisa de dados	Seleção dos campos dos dados	Seleção técnicas de modelagem	Avaliar os resultados em relação aos requisitos	Plano de implementação
Histórico prévio	Extração dos dados	Integração de dados	Definir parâmetros de modelagem	Identificação de melhorias	Integração de sistemas
Análise de recursos	Definição dos dados	Filtragem dos dados	Gerar projetos de teste	Aprovação do modelo	Implantação em ambiente de produção
Limitações	Exploração dos dados	Tratamento dos valores faltantes	Construir modelo	Modelo de documentação	Sistemas de monitoramento e manutenção
Riscos	Verificação da qualidade dos dados	Delimitação espacial	Avaliar modelo	Próximos passos	Revisão final
Contingências		Tratamentos de sobreposição			Relatório final
Terminologias		Transformações			Apresentação final
Ferramentas		Análises topológicas			
Técnicas		Filtros de geometria			
Custos e benefícios		Simplificações			

Figura 2 - Fases de desenvolvimento adotadas no modelo CRISP-DM e o esforço normalmente empregado em cada fase. Fonte: Adaptado de Enap 2024

A metodologia CRISP-DM descreve as fases típicas de um projeto, as tarefas envolvidas em cada fase e uma explicação das relações entre essas tarefas [3][4]. Essas etapas e tarefas foram adaptadas para o desenvolvimento do projeto e começam pela definição dos objetivos e requisitos, seguida pelas fases de avaliação e preparação dos dados de entrada, essenciais para a seleção de informações que realmente contribuam para a eficácia do modelo. Na sequência, a fase de modelagem em si, processo que pode exigir retornos às fases anteriores para revisão e ajustes no pré-processamento. Na fase de avaliação, os resultados são analisados e propostos os ajustes necessários antes da aprovação final. Finalmente, há a fase de implementação na qual se estabelecem os processos de operacionalização do modelo, juntamente com os processos de manutenção e melhorias futuras. É a partir da descrição destas etapas que apresentamos uma introdução ao Sistema de Modelagem Espacial Multicritério da EPE (SIMEPE).

3.0 DESENVOLVIMENTO

3.1 Requisitos do Negócio

A partir da experiência adquirida nos modelos anteriores foram identificados os pontos fortes e os processos nos quais há oportunidade de melhoria de desempenho. Com base nesta análise, foram definidos os requisitos e objetivos da aplicação a ser desenvolvida pela EPE. Isso envolveu a compreensão detalhada do funcionamento dos modelos, a avaliação dos recursos disponíveis na empresa, a definição de produtos e a análise dos riscos envolvidos no seu desenvolvimento.

O principal requisito foi que o SIMEPE apresentasse resultados compatíveis àqueles gerados nos modelos em uso, seguindo o mesmo padrão de definição de camadas e composição de cenários, mas implementando processos de automação das etapas de preparação e processamento de dados. Um segundo requisito, foi a emissão de relatórios registrando os parâmetros adotados, documentando e viabilizando a reprodução e comparação de diferentes cenários. O terceiro requisito é que o sistema fosse desenvolvido com recursos disponíveis na empresa.

A decisão pelo desenvolvimento interno do SIMEPE também envolveu riscos. Ainda que a redução da dependência de fornecedores externos possa ser vista como ponto positivo, ela aumenta os riscos envolvidos em manutenção e desenvolvimento do aplicativo. A produção de uma documentação detalhada de cada ferramenta e o contínuo treinamento dos usuários se torna crucial para garantir a operacionalidade do projeto. Os ganhos relacionados ao domínio, autonomia e controle de cada etapa da modelagem associadas às potencialidades de desenvolvimento, entretanto, superam os riscos envolvidos.

3.2 Avaliação dos dados

A busca e seleção de dados para modelos é uma etapa de significativo esforço e consumo de tempo, pois envolve criteriosas avaliações relacionadas à importância do dado na definição de traçados, bem como à qualidade e integridade de cada conjunto utilizado. A definição inicial dos dados foi baseada nas informações já utilizadas nas análises do relatório R1 e se fundamenta nos desafios e oportunidades que os diferentes aspectos espaciais impõem ao projeto.

Áreas com cobertura vegetal, como florestas nativas, silvicultura ou canaviais, implicam custos adicionais relacionados a alteamento de torres, supressão e compensações por lucro cessante, além de serem potenciais causas de desligamentos em caso de queimadas. A existência de aeródromos, áreas de mineração ou pivôs de irrigação demandam indenizações e adaptações de

projeto que aumentam os custos e podem atrasar os cronogramas de construção. Aspectos físicos associados a relevos acidentados ou travessias de rios expressivos, aumentam a complexidade dos projetos e custos construtivos. Por outro lado, a proximidade com infraestruturas existentes como linhas de transmissão ou rodovias pode trazer benefícios relacionados a melhor infraestrutura de acesso. A avaliação prática desses fatores determinou a escolha das categorias de dados incluídas no modelo.

Os critérios para a inclusão dos dados foram feitos camada por camada, com as premissas da utilização de dados oficiais ou desenvolvidos por instituições renomadas, apresentando boa frequência de atualização e resolução espacial adequada aos objetivos do modelo.

A maioria dos dados processados pelo SIMEPE estão previamente incorporados ao banco de dados da EPE. Essa decisão garante um primeiro nível de pré-processamento, uma vez que os dados do banco são submetidos a análises de integridade, padronização de atributos e projeções, além de estarem submetidos à política de atualização de dados da empresa.

Dados complementares de outras fontes também podem ser implementados pelo usuário, desde que estejam no formato de polígono. Essa restrição ocorre porque os dados não são submetidos às fases de pré-processamento e precisam estar padronizadas para o correto funcionamento. O SIMEPE admite até três camadas de dados adicionais, visando a entrada de áreas de bloqueio editadas pelo usuário ou de informações indisponíveis nas bases de dados da EPE.

3.3 Preparação dos dados

A álgebra de mapas é um método de processamento espacial baseado em operações matriciais [1]. O processo requer a representação dos dados em formatos compatíveis com cálculos de sobreposição e análise de áreas. Dados de entrada em formato matricial são processados diretamente pelo modelo, enquanto dados tabulares ou vetoriais precisam ser padronizados para o formato poligonal, que permite cálculos espaciais baseados em área, tais como união e intersecção antes de serem convertidos para raster. Esses processos de padronização são executados na fase de pré-processamento.

O pré-processamento foi a etapa de maior ganho operacional em todo o processo, visto que sua execução manual demanda do usuário a repetição de diversas operações de preparo a cada nova camada, conforme é demonstrado na Figura 1.

Em todos os casos, foram necessários processos de tratamento dos dados, devidamente realizados a partir de ferramentas ETL (*Extract, Transform, Load*). Os principais tratamentos executados foram: derivação de atributos, simplificações de geometria, derivação de classes, eliminação de sobreposições de polígonos de mesma camada, filtragem de geometrias com erros topológicos, limpeza de atributos, transformações de tabelas em pontos, e de ponto e linha em polígono.

3.4 Modelagem

A incorporação de várias camadas de dados no mesmo espaço geográfico agrega diferentes interesses e objetivos, por vezes conflitantes [1]. Uma das formas de se abordar esse conflito tem sido a composição de diferentes cenários nos quais as camadas são agrupadas sob a ótica de diferentes critérios. A partir da variação da composição ou representatividade de diferentes critérios é possível desenvolver diferentes cenários, cada qual contemplando interesses divergentes e permitindo ao analista a avaliação de diferentes alternativas no estudo [1][5].

A Figura 3 apresenta a composição de um cenário hipotético com 21 camadas de informação e cinco critérios. Cada camada deve receber um valor de Atrito que indica o nível de dificuldade de implementação do empreendimento sobre cada pixel daquele dado. O Atrito deve ter valores entre 1 e 10. A definição de cenários é feita pelo arranjo dos dados primários em agrupamentos que representem diferentes interesses, potencialidades ou recursos. O usuário deve definir o agrupamento que melhor caracteriza seu critério de análise e posteriormente definir o percentual ou Peso de participação de cada critério no cenário em questão. A ponderação entre o Atrito e o Peso de cada critério determinará a efetiva representatividade da camada de informação na composição daquele cenário.

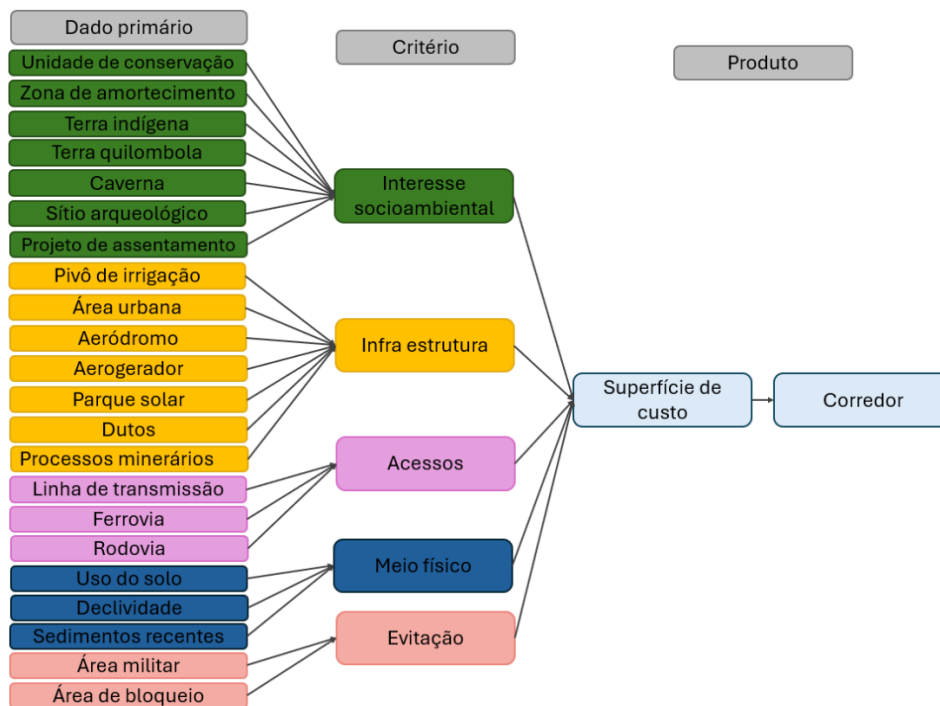


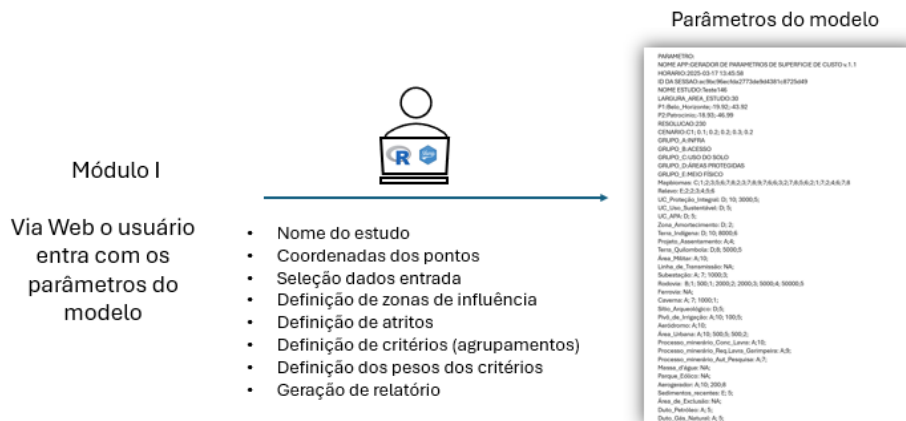
Figura 3 – Exemplo de composição de cenário

A implementação desta estrutura é executada por meio de três módulos que incluem as etapas de (1) entrada dos parâmetros do modelo e geração de relatório; (2) processamento de dados e geração da superfície de custo; e (3) cálculo do corredor de menor custo.

Módulo I – Criação do Projeto

O módulo I, foi desenvolvido em R/Shiny e viabiliza a inserção dos parâmetros de entrada do modelo como o nome do empreendimento, suas coordenadas, seleção das camadas de informação de interesse para o estudo, atribuição dos valores de cada camada (Atrito), definição dos critérios de agrupamento e atribuição da participação de cada critério (Peso).

O dado de saída é um arquivo de texto que cumpre as funções de documentar os parâmetros do cenário, armazenar estes parâmetros para utilização em novas rodadas e servir como dado de entrada para o módulo de processamento de dados. A Figura 4 apresenta esquematicamente o processo de inclusão de dados e geração do relatório a partir do Módulo I.



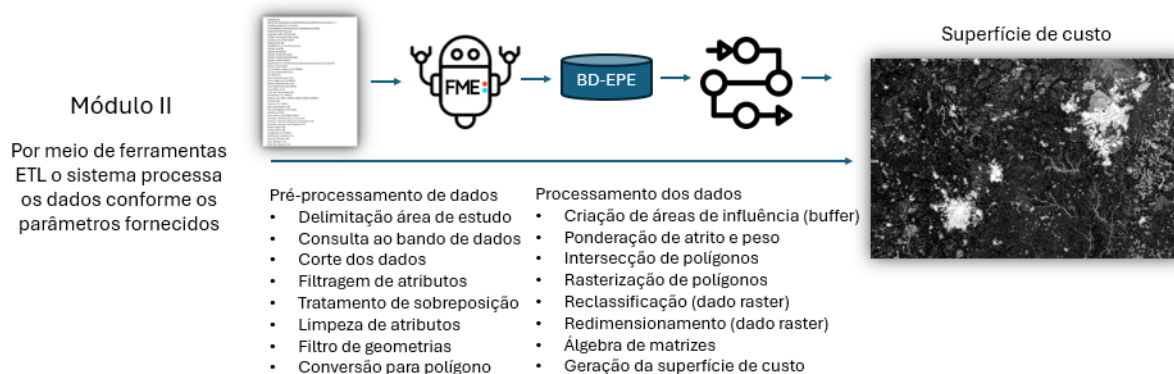


Figura 5 - Processo de criação da superfície de custo a partir do Módulo II

Módulo III – Geração de Corredor

O módulo III tem por objetivo analisar a superfície de custo e identificar o melhor caminho entre os pontos A e B. Essa aplicação foi desenvolvida sobre a plataforma R/Shiny e o centro de processamento se baseia nas ferramentas do pacote *gdistance* para calcular o corredor de menor custo entre os pontos definidos pelo usuário. Dentre suas funcionalidades, o módulo III reconhece automaticamente a localização dos pontos A e B a partir do raster gerado no módulo II. O usuário tem a opção de edição do valor mínimo da matriz da superfície de custo, permitindo a modulação do valor de base do raster, o que pode ser útil para ajustar o custo de construção do empreendimento. O principal produto é o raster do corredor de menor custo. A Figura 6 apresenta, esquematicamente, a entrada (superfície de custo) e o produto de saída.

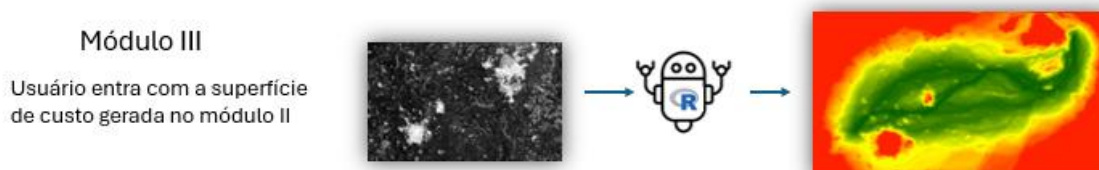


Figura 6 - Cálculo do corredor de menor custo a partir do Módulo III.

3.5 Avaliação

Para análise de desempenho, foram realizados testes de processamento. A Tabela 1 apresenta detalhes de processamento de três corredores com resolução espacial de 250 metros. Os resultados indicam expressivo ganho de tempo no processo uma vez que modelos anteriormente utilizados demandavam de 6 a até 16 horas de trabalho entre as etapas de preparação e processamento dos dados. Embora ainda existam funcionalidades a serem aprimoradas e implementadas, o atual estágio de desenvolvimento permite o processamento de modelos em diferentes cenários numa fração do tempo anteriormente necessário.

Tabela 1 - Tempo total empregado nas etapas de processamento de dados (módulos II) e cálculo do corredor (módulo III) no SIMEPE.

Pontos A e B	Extensão entre pontos (km)	Colunas e linhas	Camada de dados processada	Tempo de processamento
SE Brasília Leste, e SE Trindade	220	1170 x 733	20	22 min 17 seg.
SE Crato II e SE Chapada III	145	1087 x 474	17	8 min 43 seg.
SE Dianópolis II e SE Gilbués II	260	1270 x 1099	18	12 min 55 seg.

3.6 Implantação

Os três módulos do SIMEPE foram disponibilizados para uso aos analistas da EPE em ambiente web por meio da intranet da empresa. Sua interface de entrada está em desenvolvimento, mas versões preliminares podem ser visualizadas na Figura 7. Os principais processos de manutenção observados são decorrentes de atualização de sistemas internos e das bases cartográficas que eventualmente tem seu padrão alterado, exigindo reconfiguração das ferramentas ETL.



Figura 7 - Painel de entrada dos módulos de parâmetros, de processamento e de geração de corredor

4.0 CONCLUSÕES

A implementação do SIMEPE reduziu sensivelmente o tempo operacional para geração dos corredores. A redução desse prazo tem proporcionado maiores oportunidades de avaliação dos resultados e, quando necessário, rápida redefinição de parâmetros e reprocessamento.

O desenvolvimento ainda trouxe ganhos relacionados à compreensão e domínio de cada etapa de modelagem, desde os métodos de tratamento das bases de dados, o controle fino dos processos de rasterização e reamostragem até o cálculo dos corredores. Essa compreensão aprofundada do processo permite uma avaliação crítica dos resultados e o reconhecimento de anomalias, sejam de processamento ou metodológicas.

Os próximos passos incluem a implementação do módulo de cálculo dos Atritos utilizando o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) como parte integrante do módulo I. A implementação de lógica *fuzzy* para definição de áreas de influência e a migração dos processos implementados no módulo II, atualmente em ambiente FME, para a linguagem R. Isso permitirá consolidar o modelo em uma única ferramenta, aumentando ainda mais o nível de automação do sistema.

5.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] Chakhar, Salem & Mousseau, Vincent. (2015). Multicriteria Decision Making, Spatial. 10.1007/978-3-319-23519-6_839-2.
- [2] Cordeiro, J. P.; Barbosa, C.C.F.; Câmara. G. Análise espacial de dados geográficos 01/08/2007 disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap8-algebra.pdf>
- [3] ENAP (Brasil). Introdução à Ciência de Dados. Escola Virtual – Gov.br, 2024. Disponível em: <https://www.escolavirtual.gov.br/curso/976>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- [4] IBM. SPSS Modeler SaaS: Introduction to CRISP-DM. Disponível em: <https://www.ibm.com/docs/en/spss-modeler/saas?topic=guide-introduction-crisp-dm>. Acesso em: 16 julho. 2024.
- [5] Multi-Criteria Analysis Shell for Spatial Decision Support MCAS-S version 4. Disponível em: awe.gov.au/abares/aclump/multi-criteria-analysis Acesso em: 15 fevereiro. 2025.

DADOS BIOGRÁFICOS



Clayton Borges da Silva é Geógrafo formado pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), mestre em Sensoriamento Remoto pelo INPE, especialista em Geomática e em Gestão Ambiental pela Faculdade Católica de Uberlândia. Analista da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) desde 2015, atuando nos estudos socioambientais de planejamento energético. Anteriormente atuou no Serviço Florestal Brasileiro, foi consultor em estudos ambientais e empresas especializadas em análise espacial e serviços de geoprocessamento.



Pedro Antonio da Silva Piacesi é geógrafo e mestre em geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Foi bolsista de pós-graduação na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) entre 2023 e 2025, onde atuou em estudos socioambientais voltados para a expansão do sistema de transmissão. Entre 2020 e 2025 integrou o laboratório de Geografia Marinha da UFRJ como bolsista de pesquisa com foco no desenvolvimento e aplicação de modelos multicritérios para avaliação da vulnerabilidade e resiliência de sistemas costeiros.



Paula Cunha Coutinho de Andrade é Engenheira Civil formada pela Universidade Federal Fluminense (UFF) e mestre em Engenharia Civil, com ênfase em Recursos Hídricos e Saneamento pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Analista de Pesquisa Energética da Superintendência de Meio Ambiente da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) desde 2007, com atuação em análises socioambientais, custos fundiários e socioambientais, recursos hídricos e impactos das mudanças climáticas no planejamento energético. Desde 2022 atua como consultora técnica da EPE, coordenando os estudos socioambientais e fundiários associados ao planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica.



Thiago Galvão é Geógrafo, especialista em Geoprocessamento pelo IG/UNB. Analista da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) desde 2015, atuando nos estudos socioambientais do planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica e das atividades de petróleo e gás natural. Anteriormente, trabalhou por 12 anos em Gestão de Riscos de Desastres Naturais, a serviço do Ministério das Cidades. Atuou ainda como consultor em estudos de Zoneamento Ecológico-Econômicos – ZEEs