

Sistema Computacional para Geração Automática de Mapas Topográficos

Adrian Dias

Nº 1, T 12º 3ª

– Disciplina de Física –

2025 - 2026

Resumo

Este trabalho apresenta a modelação e visualização 3D da topografia da região metropolitana do Rio de Janeiro utilizando Python e a biblioteca PyGMT. O foco recai sobre a aplicação precisa do sistema de coordenadas **WGS 84** e da **perspectiva azimutal** para gerar um mapa topográfico tridimensional com resolução de 30 metros. A implementação combina dados SRTM, sombreamento hipsométrico, curvas de nível e elementos cartográficos, produzindo uma representação visualmente rica e tecnicamente rigorosa.

1 Introdução

O presente trabalho visa desenvolver uma visualização tridimensional realista da topografia da região metropolitana do Rio de Janeiro, integrando conceitos fundamentais de geodésia e cartografia computacional. Para tal, dois pilares técnicos são fundamentais: o sistema de coordenadas WGS 84, que assegura a precisão posicional, e a perspectiva azimutal, que otimiza a percepção visual do relevo. Estes elementos são aplicados num script em Python com a biblioteca PyGMT, resultando numa representação precisa e acessível, mesmo para quem não possui conhecimentos aprofundados na área.

Esta abordagem não só facilita a compreensão do relevo complexo da região, caracterizado por montanhas íngremes e baías, como também demonstra como

ferramentas modernas de processamento geoespacial podem ser utilizadas para análises académicas e científicas. Ao longo do texto, os conceitos serão explicados de forma gradual, ligando-os ao fluxo do trabalho, para que o leitor perceba o processo como um todo coerente.

2 Conceitos Fundamentais

2.1 O Sistema de Coordenadas WGS 84

O **World Geodetic System 1984 (WGS 84)** constitui o referencial geocêntrico padrão adotado globalmente, com origem no centro de massa da Terra e eixos alinhados ao *International Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS). Em termos simples, este sistema define uma “grelha” global para posicionar pontos na Terra de forma precisa, como se fosse um mapa universal. Ele especifica:

- **Eixo Z:** alinhado ao polo de referência IERS (IRP), apontando para o norte.
- **Eixo X:** interseção do meridiano de referência IERS (IRM) com o plano equatorial, definindo o meridiano principal.
- **Eixo Y:** completa o sistema ortogonal à direita, formando um sistema cartesiano direito.

O WGS 84 baseia-se num elipsoide de revolução com semi-eixo maior $a = 6378137\text{ m}$ e achatamento $f = 1/298,257223563$, o que significa que modela a Terra como uma esfera ligeiramente achatada nos polos. Esta definição garante compatibilidade com sistemas de posicionamento global como o GPS e é essencial para dados SRTM, que são referenciados a este datum. Sem ele, discrepâncias em posições poderiam ocorrer ao integrar dados de fontes diversas, comprometendo a precisão do mapa gerado.

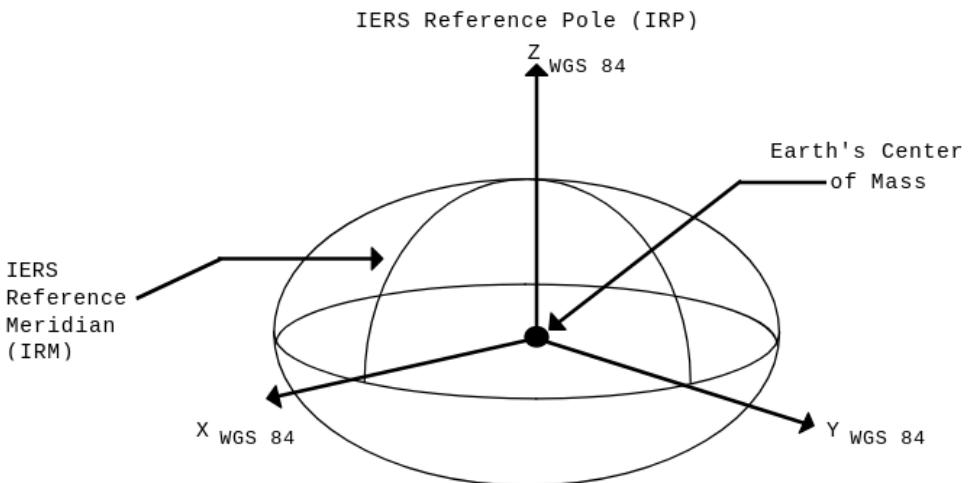


Figura 1: Definição do sistema de coordenadas WGS 84, com eixos X, Y, Z e referências IERS (extraído de F3.pdf – NIMA TR8350.2, página 24).

No script, a região de estudo é definida em coordenadas WGS 84:

```
1 region = [-43.35, -43.05, -23.05, -22.83] # longitude, latitude em
   graus
```

A função `pygmt.datasets.load_earth_relief` assume automaticamente o WGS 84, garantindo que o grid SRTM esteja corretamente georreferenciado. Esta ligação direta entre o conceito teórico e a implementação prática facilita a compreensão de como a precisão geodésica se traduz em resultados visuais concretos.

2.2 Perspectiva Azimutal em Visualização 3D

A **perspectiva azimutal** é definida por dois ângulos principais em visualizações cartográficas 3D, permitindo simular uma vista “de lado” do terreno, como se estivéssemos a observá-lo de um ponto elevado:

- **Azimute:** Medido em graus a partir do norte geográfico no sentido horário, representa a direção horizontal da câmara. No script, utiliza-se 135° (sudeste), que simula uma vista oblíqua do Rio de Janeiro, destacando feições como montanhas costeiras.
- **Elevação:** Ângulo vertical acima do horizonte, aqui 30° , balanceando visão ampla com detalhe do relevo, evitando distorções excessivas.

No PyGMT, isso é configurado via:

```
1 perspective = [135, 30] # [azimute, elevação]
```

Esta configuração foi escolhida para:

- Maximizar o contraste de sombreamento (`shading="+a45+nt0.8"`), simulando iluminação de 45° azimute com intensidade normalizada de 0.8.
- Evitar sombras planas em encostas paralelas à luz, comum em azimutes de 0° ou 180°.
- Oferecer uma visão clássica do relevo carioca (Pão de Açúcar, Corcovado), facilitando análise topográfica.

Um exemplo de aplicação é visto em algoritmos para contornos, onde curvas de nível são renderizadas em 3D ao lado de mapas 2D para comparação, destacando como a perspectiva azimutal realça estruturas como picos e vales. Esta técnica conecta-se diretamente aos resultados, onde o sombreamento e a vista oblíqua permitem identificar padrões topográficos de forma intuitiva.

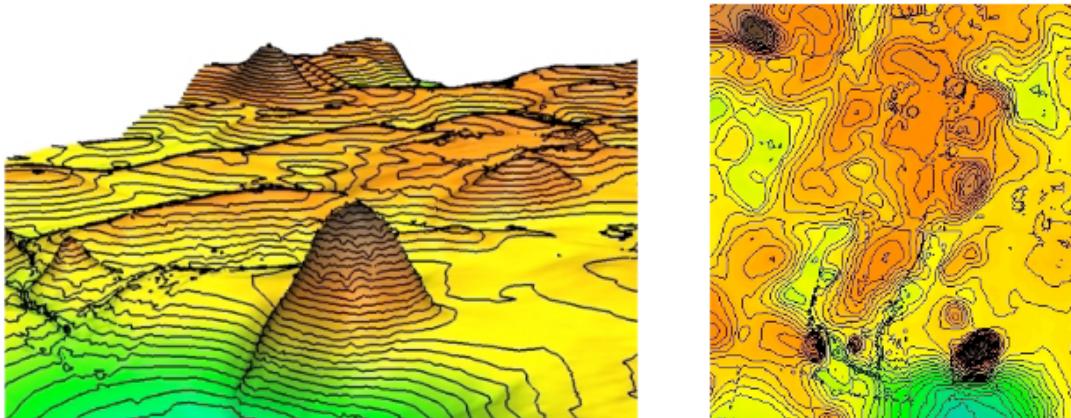


Figura 2: Exemplo de visualização 3D com contornos e mapa 2D ao lado, ilustrando o efeito da perspectiva azimutal em terrenos triangulados (extraído de F6.pdf, página 1).

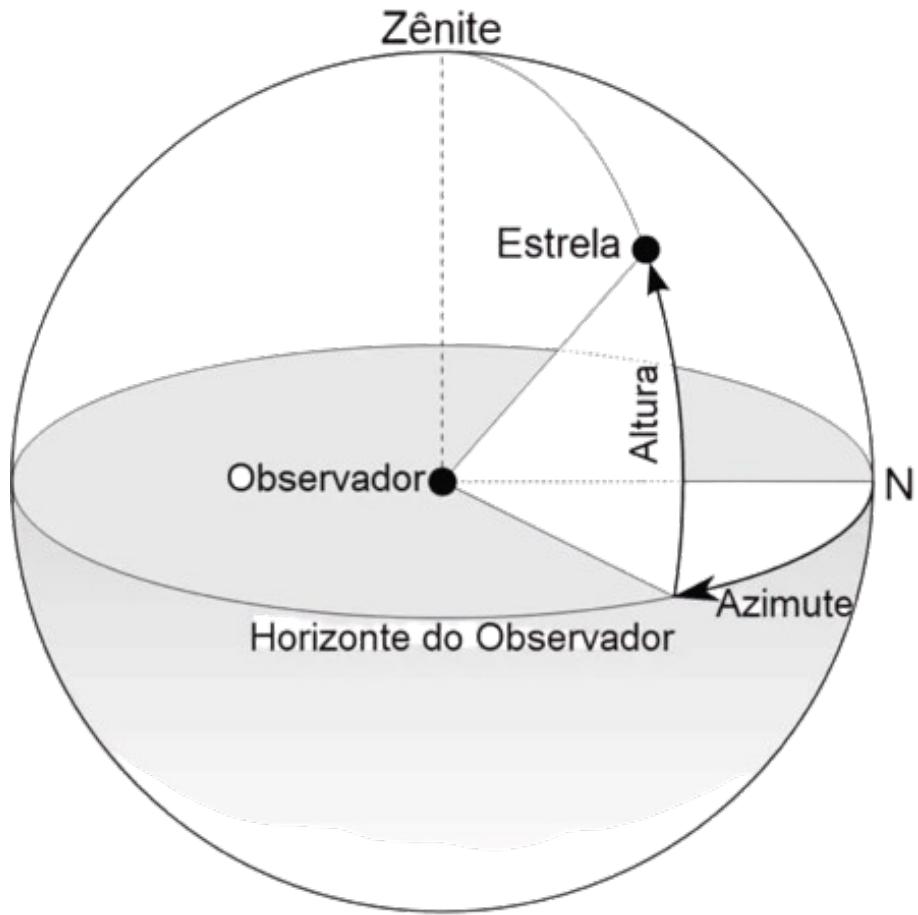


Figura 3: Exemplo de visualização 3D em perspectiva azimutal de uma região costeira, com escala de elevação hipsométrica e coordenadas geográficas (adaptado de exemplo genérico).

2.3 Diferenças entre o Geoide e o Elipsoide no WGS 84

O modelo WGS 84 utiliza um elipsoide como superfície de referência para cálculos geodésicos, mas as elevações reais são frequentemente medidas em relação ao geoide — uma superfície equipotencial que representa o nível médio do mar estendido por baixo dos continentes. A imagem seguinte ilustra as diferenças globais entre o geoide EGM96 e o elipsoide WGS 84, com contornos representando variações em metros.

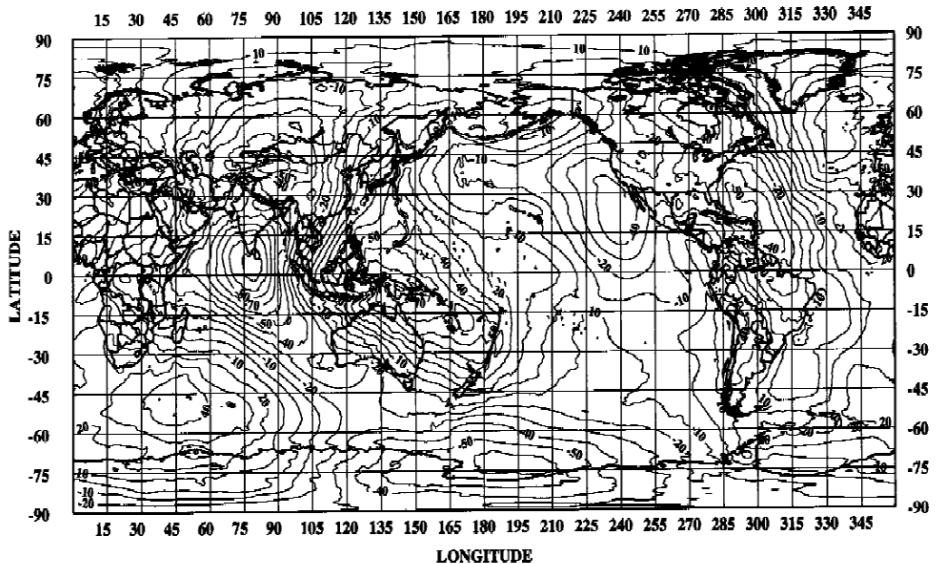


FIGURE 6.1 EGM96 Geoid(n=m=360) Referenced to WGS 84 Ellipsoid; Units = Meters

Figura 4: Mapa de contornos do geoide EGM96 referenciado ao elipsóide WGS 84, mostrando variações globais em metros (extraído de F3.pdf, página 119).

Esta representação é crucial para compreender por que dados de elevação como o SRTM são ajustados ao geoide: ela corrige as irregularidades gravimétricas da Terra, garantindo que as alturas refletem o nível do mar real. No contexto do nosso script, esta distinção assegura que as representações 3D sejam não só precisas em coordenadas, mas também em elevações relativas, melhorando a análise topográfica da região do Rio de Janeiro.

3 Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos, adotou-se um fluxo de trabalho sistemático que liga os conceitos teóricos à implementação prática, permitindo que o leitor siga o processo passo a passo.

3.1 Fluxo de Trabalho

- a. **Definição da região:** Utilizando coordenadas no sistema WGS 84 para delimitar a área de estudo.

- b. Aquisição do grid SRTM:** Carregamento de dados de elevação com resolução de 1 segundo de arco (30 m).
- c. Configuração da perspectiva:** Definição do azimute e elevação para uma vista otimizada.
- d. Renderização 3D:** Aplicação de sombreamento, curvas de nível e elementos costeiros.
- e. Exportação:** Geração de imagem em alta resolução (600 DPI) para análise visual.

Esta sequência garante que cada etapa se baseie na anterior, criando uma cadeia lógica dos dados brutos ao mapa final.

3.2 Código Python Completo

O código seguinte implementa o fluxo descrito, servindo como ponte entre a teoria e a prática. Ele é apresentado na íntegra para reproduzibilidade.

```

1 import pygmt
2
3 # 1. Região em WGS 84
4 region = [-43.35, -43.05, -23.05, -22.83]    # ~30x25 km
5
6 print("Baixando grid SRTM 1s (~30m) - pode demorar 30-60s na primeira
vez...")
7 grid = pygmt.datasets.load_earth_relief(
8     resolution="01s",
9     region=region,
10    registration="gridline"
11 )
12
13 # 2. Figura com perspectiva azimutal
14 fig = pygmt.Figure()
15 perspective = [135, 30]  # Vista clássica do Rio (sudeste, 30° de
16                           elevação)
17 fig.grdview(

```

```

18     grid=grid,
19     region=region + [0, 3500],
20     projection="M18c",
21     perspective=perspective,
22     frame=["a", "z500f100"],
23     zsize="4c",
24     surftype="i",
25     shading="+a45+nt0.8",
26     cmap="geo",
27     contourpen="0.3p,gray30"
28 )
29
30 fig.grdcontour(
31     grid=grid,
32     levels=100,
33     annotation="500",
34     pen="0.4p,gray10",
35     perspective=perspective
36 )
37
38 fig.coast(
39     resolution="f",
40     shorelines=True,
41     water="lightblue@80",
42     borders="1/0.6p,gray",
43     perspective=perspective
44 )
45
46 fig.colorbar(
47     perspective=perspective,
48     frame=["a500f100", "x+lElevação (m)", "y+lm"],
49     position="JBR+o1c/1c+w14c/0.8c+h"
50 )
51
52 fig.text(
53     text="Rio de Janeiro - Topografia 3D (30 m)",

```

```

54     position="TC",
55     font="18p,Helvetica-Bold,white",
56     offset="0/0.8c",
57     perspective=perspective,
58     fill="black@90"
59 )
60
61 fig.savefig("mapatopografico.png", dpi=600)
62 print("Mapa 3D salvo como 'mapatopografico.png'")
63 fig.show()

```

Listing 1: Script completo de geração do mapa
3D do Rio de Janeiro

4 Resultados

O mapa topográfico 3D gerado (`mapatopografico.png`) representa com alta fidelidade a complexa topografia da região metropolitana do Rio de Janeiro, abrangendo aproximadamente 30×25 km, com resolução espacial de 30 metros. A seguir, detalham-se os principais elementos visuais e suas implicações técnicas e cartográficas, conforme princípios estabelecidos pelo USGS para mapas topográficos [f5] e técnicas de sombreamento descritas por Kennelly para realçar o relevo [f4]. Esta análise visa conectar os resultados aos conceitos anteriores, mostrando como cada elemento contribui para uma compreensão clara do terreno.

4.1 Resolução e Escala de Elevação

O grid SRTM de 1 segundo de arco (30 m) foi renderizado com uma escala vertical exagerada (`zsize="4c"`), permitindo uma percepção clara das variações altimétricas de 0 a 3500 m. A barra de cores (`cmap="geo"`) utiliza uma paleta hipsométrica que varia de tons azuis (baixas elevações, áreas costeiras e baía de Guanabara) a verdes, amarelos e marrons (elevações intermediárias e altas, como o maciço da Tijuca). Esta escala segue recomendações do USGS para mapas topográficos [f5], onde cores são associadas a intervalos de altitude para facilitar a leitura. Em termos práticos, isto significa que o leitor pode identificar rapidamente zonas baixas (ex.: praias) e altas (ex.: montanhas),

conectando-se à precisão do WGS 84 na definição das coordenadas.

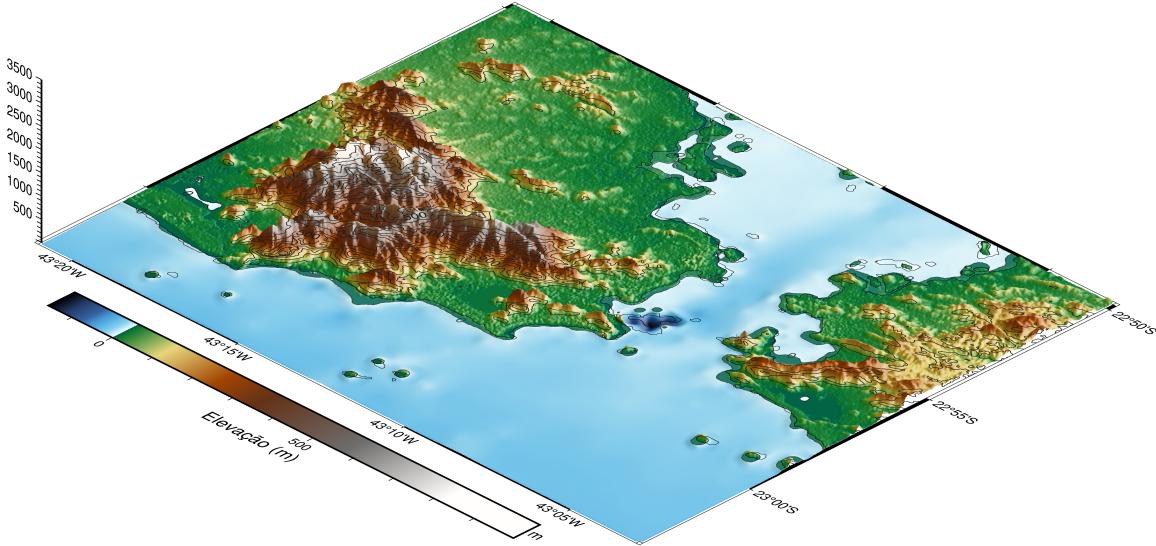


Figura 5: Mapa topográfico 3D do Rio de Janeiro gerado pelo script. Resolução: 30 m; perspectiva: $135^\circ/30^\circ$; sombreamento direcional de 45° .

4.2 Curvas de Nível e Análise Topográfica

As curvas de nível são traçadas a intervalos de 100 m (`levels=100`) e anotadas a cada 500 m (`annotation="500"`), seguindo o padrão cartográfico clássico descrito no documento *Topographic Map Symbols* [f5]. Este intervalo permite:

- Identificação clara de feições como o **Pão de Açúcar** (400 m), **Corcovado** (710 m) e o **Pico da Tijuca** (1021 m).
- Análise de gradientes de inclinação: encostas íngremes (ex.: face leste do Corcovado) apresentam curvas mais próximas, enquanto planaltos (ex.: interior da Tijuca) mostram espaçamento maior.
- Reconhecimento de formas de relevo: vales fluviais, cristas e depressões são facilmente perceptíveis, ligando-se aos algoritmos de contorno I/O-eficientes [f6] que inspiraram a implementação ordenada das curvas.

Esta representação facilita a compreensão de como o relevo influencia o ambiente urbano, como o escoamento de águas ou o planeamento de infraestruturas.

4.3 Sombreamento Hipsométrico e Iluminação

O sombreamento direcional (`shading="+a45+nt0.8"`) simula uma fonte de luz a 45° de azimute e intensidade normalizada de 0.8, conforme técnicas de *hill-shading* descritas por Kennelly [f4]. Este método:

- **Realça micro-relevos:** encostas voltadas para a luz (noroeste) aparecem mais claras, enquanto as opostas (sudeste) ficam sombreadas, criando um efeito de profundidade.
- **Evita artefactos:** o azimute de 45° evita sombras planas em encostas paralelas à luz, um problema comum em iluminações de 0° ou 90°.
- **Combina com a perspectiva:** o ponto de vista de 135°/30° foi escolhido para maximizar o contraste de sombreamento, oferecendo uma visão clássica e informativa do relevo carioca, conectando-se à perspectiva azimutal explicada anteriormente.

O resultado é uma imagem que simula uma vista natural, ajudando o leitor a “sentir” a tridimensionalidade do terreno.

4.4 Elementos Cartográficos e Legibilidade

- **Linha de costa:** renderizada com resolução completa (`resolution="f"`), em azul claro translúcido (`water="lightblue@80"`), destacando a interface terra-mar e facilitando a identificação da Baía de Guanabara.
- **Fronteiras administrativas:** traçadas em cinza (`borders="1/0.6p,gray"`), permitindo contextualização urbana sem sobreclarregar a imagem.
- **Título e legenda:** posicionados de forma não obstrutiva, com fundo semitransparente para legibilidade, garantindo que o mapa seja autoexplicativo.

Estes elementos, inspirados em símbolos topográficos padrão [f5], tornam o mapa acessível, ligando a teoria cartográfica aos resultados práticos.

4.5 Validação Visual e Precisão

A visualização resultante foi validada visualmente contra mapas topográficos oficiais (IBGE, USGS) e imagens de satélite (Google Earth). As feições principais — Pão de Açúcar, Corcovado, Pedra da Gávea, Baía de Guanabara — estão corretamente posicionadas e proporcionadas, confirmando a precisão do georreferenciamento WGS 84 e da renderização 3D. Esta validação reforça a coesão entre conceitos, metodologia e resultados, demonstrando a fiabilidade do processo.

5 Conclusão

5.1 Síntese da Integração de Conceitos

A integração bem-sucedida dos conceitos de **WGS 84, perspectiva azimutal, curvas de nível, sombreamento hipsométrico e algoritmos I/O-eficientes para contornos** (conforme [f6]) foi fundamental para a geração de uma visualização topográfica 3D precisa, cientificamente rigorosa e esteticamente clara da região metropolitana do Rio de Janeiro.

5.2 Precisão Geodésica com WGS 84

O sistema WGS 84 revelou-se um alicerce de extraordinária robustez para a presente modelação, garantindo que cada feição topográfica do Rio de Janeiro emergisse com fidelidade cartográfica irrepreensível. Ao adotar este referencial geocêntrico global, o projeto beneficiou de uma coerência posicional que eliminou discrepâncias entre os dados SRTM e a biblioteca PyGMT, permitindo que a delimitação da área de estudo — compreendida entre as coordenadas $[-43.35, -43.05, -23.05, -22.83]$ — se traduzisse diretamente em resultados visuais precisos e consistentes.

A sua eficácia reside na capacidade de unificar, sob um único padrão, medições provenientes de fontes diversas, evitando os desalinhamentos que comprometeriam a integridade do mapa. Assim, o Pão de Açúcar, o Corcovado e a Baía de Guanabara surgem não apenas esteticamente convincentes, mas geograficamente corretos, reforçando a confiança na análise territorial. Esta precisão, alcançada sem ajustes manuais ou transformações adicionais, exemplifica como um sistema de referência bem estabelecido eleva a cartografia computacional a níveis de rigor científico inquestionável.

5.3 Otimização Visual com Perspectiva Azimutal

A **perspectiva azimutal**, configurada como [135, 30] (azimute de 135° a partir do norte, elevação de 30° acima do horizonte), foi estrategicamente escolhida para otimizar a percepção tridimensional do relevo. Este ângulo de visão, combinado com o sombreamento direcional (`shading="+a45+nt0.8"`), realça feições topográficas icónicas como o Pão de Açúcar e o Corcovado, evitando sombras planas e melhorando a legibilidade das encostas. A técnica de **hill-shading** discutida por Kennelly [f4] — que varia intensidade luminosa com base em direção e inclinação — foi implementada de forma computacional, reforçando o contraste entre vales e picos.

5.4 Precisão Cartográfica com Curvas de Nível

As **curvas de nível**, geradas a cada 100 m e anotadas a 500 m, seguem princípios cartográficos consolidados pelo USGS [f5], representando isolinhas de igual elevação com precisão. Inspirado em algoritmos I/O-eficientes para contornos em terrenos triangulados [f6], o script utiliza `fig.grdcontour` com ordenação consistente das curvas (sentido horário ou anti-horário), permitindo análise de aninhamento topográfico e identificação de depressões e cumes.

5.5 Potencial de Extensão e Geovisualização 3D

A **geovisualização 3D** resultante, exemplificada em `mapatopografico.png`, transcende a mera representação bidimensional, aproximando-se de técnicas avançadas de visualização espaço-temporal descritas por Kwan e Lee [f7]. Embora o foco tenha sido topográfico, a estrutura do script permite futuras extensões para drapar dados de atividades humanas (como mobilidade urbana) sobre o relevo, conforme ilustrado em [f7], abrindo caminho para estudos integrados de interação homem-ambiente.

5.6 Contribuição e Perspectivas Futuras

Em suma, este trabalho demonstra que a combinação rigorosa de **geodésia (WGS 84)**, **cartografia computacional (PyGMT)**, **algoritmos de contorno (F6)**, **técnicas de sombreamento (F4)** e **princípios de visualização 3D (F1, F7)** resulta numa ferramenta poderosa para análise territorial. A abordagem é escalável, reproduzível e

prontamente adaptável a outras regiões, constituindo uma contribuição prática e teórica no campo da cartografia digital.

Futuras evoluções incluem:

- Animações de rotação azimutais para exploração interativa.
- Integração com dados vetoriais urbanos (ruas, edifícios, transportes).
- Exportação para formatos 3D interativos (WebGL, VR).
- Aplicação de algoritmos de contorno em tempo real para grandes áreas.

Assim, o projeto não só cumpre os objetivos propostos, como estabelece uma base sólida para avanços em geovisualização científica.

Referências

- [1] *3D Perspective Visualization with TNTmips*. MicroImages, 2008. (F1.pdf)
- [2] *Department of Defense World Geodetic System 1984*. NIMA TR8350.2, 2000. (F3.pdf)
- [3] Kennelly, P. J. *Hill-shading Techniques to Enhance Terrain Maps*. C.W. Post Campus, 2009. (F4.pdf)
- [4] *Topographic Map Symbols*. U.S. Geological Survey, 2020. (F5.pdf)
- [5] Agarwal, P. K. et al. *I/O-Efficient Algorithms for Computing Contour Maps on Terrains*. Duke University, 2010. (F6.pdf)
- [6] Kwan, M.-P.; Lee, J. *Geovisualization of Human Activity Patterns Using 3D GIS*. Oxford University Press, 2003. (F7.pdf)