



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-16702-RPQ/854

## TOPODATA: PROCESSAMENTO DOS DADOS SRTM

Márcio de Morisson Valeriano  
Paulo Cesar Gurgel de Albuquerque

Do projeto de Produtividade em Pesquisa "Desenvolvimento de aplicações de dados topográficos SRTM", CNPq, processo n° 307530/2008-6(NV)

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.42>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO:****Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-16702-RPQ/854

## TOPODATA: PROCESSAMENTO DOS DADOS SRTM

Márcio de Morisson Valeriano  
Paulo Cesar Gurgel de Albuquerque

Do projeto de Produtividade em Pesquisa "Desenvolvimento de aplicações de dados topográficos SRTM", CNPq, processo n° 307530/2008-6(NV)

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.42>>

INPE  
São José dos Campos  
2010



*“O mar chama os medrosos, pois os corajosos já são dele.”  
(popular)*



*Dedicado aos professores.*



## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de Produtividade em Pesquisa associada a este trabalho.

Às estudantes Polyanna da Conceição Bispo (UFSCAR) e Leticia Midori Arashiro (UNITAU), que se dedicaram a atividades do projeto através de seus estágios, ainda na graduação.

A aplicação de resultados em pesquisas acadêmicas foi crucial para a percepção das demandas que justificam este projeto. Assim, não se poderia deixar de mencionar os mestrados, na PG-SER (INPE), de Elienê Pontes de Araújo, Polyanna da Conceição Bispo e Viviana Aguilar Muñoz (em andamento) como ricos laboratórios de testes. Da mesma forma, agradecemos a oportunidade de atuação em projetos de variados temas e instituições, pelo olhar de cliente, ao mesmo tempo neutro e crítico, que estes oferecem: *NEGOWAT* (IAC/CIRAD; FAPESP, coord. Raphaële Ducrot - CIRAD); *Integração de dados biológicos e geológicos no baixo Tocantins-Ilha do Marajó: chave na análise da biodiversidade* (FAPESP, coord. Dilce de Fátima Rossetti - INPE); *Sistema para monitoramento da regularização ambiental no espaço rural de Mato Grosso do Sul* (coord. João dos Santos Vila da Silva - EMBRAPA); *Estratégias, modelos e geotecnologias para a caracterização e monitoramento da agrossistemas cafeeiros de Minas Gerais* (CNPq, coord. Helena Maria Ramos Alves – EMBRAPA; UFLA); *Dados SAR/RADARSAT-2 para avaliar estrutura da vegetação na Floresta Nacional de Tapajós* (CNPq, coord. Yosio Edemir Shimabukuro - INPE), além de numerosas outras interações não-formalizadas.

A inúmeros correspondentes, ora anônimos, cujos pedidos, dúvidas, demandas e informações constituíram a força e a direção da iniciativa TOPODATA. Cremos que muitos destes estão aptos a dar prosseguimento a este trabalho, apenas iniciado.

Enfim, aos amigos, aos professores e aos familiares, pela cumplicidade involuntária que tomamos de vocês nos mínimos gestos.



## RESUMO

Este trabalho apresenta os fundamentos teóricos das derivações geomorfométricas e o desenvolvimento metodológico aplicado no processamento dos dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para a construção de um banco de dados geomorfométricos de abrangência nacional. A partir da conceituação física das variáveis geomorfométricas, os recursos de processamento de sistemas de informação geográfica (SIG) foram adaptados a metodologias de estimativa análogas aos procedimentos de medição direta em carta ou em campo. Os processos foram pormenorizados desde a fase de preparo do modelo digital de elevação (MDE), a partir da interpolação, ou refinamento, dos dados SRTM originais, com ênfase aos procedimentos de derivação e aos cuidados de pós-processamento. O processamento, que se manteve restrito às derivações geomorfométricas locais, teve como produto os planos de informação das variáveis primárias: elevação, declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical e curvatura horizontal, em sua expressão numérica contínua e em esquemas de classificação de intervalos. Entre as variáveis secundárias (ou combinadas), foram desenvolvidos planos relativos à forma do terreno, ao delineamento de microbacias e à iluminação solar. Esta foi desenvolvida para estimar a interação da dinâmica solar e o efeito topográfico local para a produção dos 12 planos relativos à situação mensal e um de integração anual. Por fim, os recursos e adaptações aplicados no processamento são discutidos do ponto de vista de suas condições de utilização e das decorrentes implicações técnico-científicas.



## **TOPODATA: THE PROCESSING OF SRTM DATA**

### **ABSTRACT**

This work presents the fundamentals of geomorphometric derivations and the methodological development applied in SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) data processing for the construction of a national full-coverage geomorphometric database. Based on the physical concepts of the geomorphometric variables, processing resources of geographical information system (GIS) were adapted into estimation methodologies analogue to procedures for field or cartographic measurements. The processes were detailed since pre-processing of the digital elevation model (DEM) through interpolation, or refining, of SRTM data, focusing derivation proceedings until post-processing cares. The processing, restricted to local geomorphometric derivations, targeted the production of information layers of the primary variables: elevation, slope, aspect, vertical curvature and horizontal curvature, in their full numerical expression and in interval class schemes. Among secondary (or combined) variables, layers respective to landforms, watershed delineation and solar illumination were developed. Illumination was developed to estimate the interaction between solar dynamics and local topographic effects for the production of the 12 layers relative to monthly situations and an annual integration. Finally, the resources and adjustments applied in the processing are discussed in terms of their conditions of use and the resulting technical and scientific implications.



## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS .....</b>	<b>21</b>
2.1	A informação topográfica .....	21
2.2	Derivações geomorfológicas locais .....	25
2.3	Distâncias horizontais (resolução espacial) .....	28
2.4	Declividade .....	32
2.5	Orientação de vertentes.....	34
2.6	Curvatura vertical.....	36
2.7	Curvatura horizontal .....	38
2.8	Talwegues e divisores de água .....	40
2.9	Iluminação/sombreamento.....	43
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>51</b>
3.1	Preparação dos dados de entrada.....	51
3.1.1	Dados de elevação SRTM.....	51
3.1.2	Dados auxiliares: latitude.....	53
3.1.3	Dados auxiliares: distância horizontal (resolução espacial).....	54
3.2	Interpolações .....	55
3.3	Importação e montagem dos planos de entrada no SIG .....	57
3.4	Derivações geomorfológicas .....	58
3.4.1	Declividade .....	60
3.4.2	Orientação de vertentes.....	62
3.4.3	Curvatura vertical.....	63
3.4.4	Curvatura horizontal e ADD .....	64
3.4.5	Iluminação/sombreamento.....	66
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>



## LISTA DE FIGURAS

2.1 - Modelo da relação entre o meio físico e distribuição da vegetação.....	22
2.2 - Desenvolvimento da informação topográfica....	25
2.3 - Exemplos de janelas móveis e sua aplicação em planos de informação.....	26
2.4 - Polinômios de 1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> e 3 <sup>a</sup> ordem ajustados a um segmento de superfície.....	27
2.5 - Declividade em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).....	32
2.6 - Esquema da estimativa da declividade.....	33
2.7 - Orientação de vertentes em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).....	35
2.8 - Curvatura vertical em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).....	36
2.9 - Estimativa da curvatura vertical.....	37
2.10 - Curvatura horizontal em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).....	38
2.11 - Estimativa da curvatura horizontal.....	39
2.12 - Método da seção transversal para derivação de talvegues e divisores.....	42
2.13 - O processo ADD com feições delineadas pela curvatura horizontal.....	43
2.14 - Geometria de iluminação/sombreamento de um elemento de terreno.....	45
2.15 - Iluminação sob diferentes ângulos de elevação solar e exagero vertical.....	46
2.16 - Dinâmicas diurna do ângulo horário ( $h$ ) e anual da declinação solar ( $\delta$ ).....	47
2.17 - Variação de $\theta_s$ e $\varphi_s$ ao meio-dia do equinócio em função da latitude.....	48
3.1 - Processamento dos dados SRTM para a construção do TOPODATA.....	51
3.2 - Esquema de sobreposição entre folhas adjacentes.....	52
3.3 - Deslocamento longitudinal dos planos de latitude.....	53
3.4 - Preparação dos planos de distâncias horizontais.....	54
3.5 - Montagem por concatenação dos planos de dados interpolados.....	57
3.6 - Deslocamento dos planos de informação requeridos para a derivação.....	58
3.7 - Fase numérica do cálculo da declividade.....	60
3.8 - Pós-processamento da declividade.....	61
3.9 - Processamento geral do MDE para a orientação de vertentes.....	63
3.10 - Pós-processamento da curvatura vertical.....	64
3.11 - Fluxo de processamento do processo ADD e das curvaturas horizontais.....	65
3.12 - Fluxo geral da obtenção dos fatores mensais e anuais de iluminação.....	67
3.13 - Dinâmica anual dos valores de declinação solar.....	68
3.14 - Integração diurna dos fatores de iluminação de uma área plana.....	70
3.15 - Trajetória aparente do sol em diferentes latitudes.....	71
3.16 - Dinâmica da iluminação solar calculada para 4 diferentes latitudes.....	72



## LISTA DE TABELAS

- 2.1 - Distância longitudinal de um arco de 1" sobre o modelo (a) de Terra esférica e (b) da referência WGS-84 em função da latitude ( $Y$ ) e sua diferença..... 30



## 1 INTRODUÇÃO

A oferta de dados topográficos materializada na iniciativa TOPODATA culmina uma extensa marcha de processamentos desde os dados originais da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponíveis para a América do Sul. Tal esforço foi motivado pela perspectiva de uma difusão do uso destes dados por profissionais e estudantes de diversas áreas de aplicação, estimulada por esta oferta. Do ponto de vista de ampla gama de possíveis usuários, o livre acesso a dados que outrora exigiam capacitação específica no trato com modelos digitais de elevação (MDE) significa uma mudança para um novo panorama, em que os custos de se agregarem informações do relevo a estudos do meio físico se tornam sensivelmente reduzidos.

Da forma em que foram disponibilizados até a geração dos produtos finais, os dados SRTM passaram por uma seqüência de processos que engloba essencialmente: o preenchimento das falhas de aquisição, o refinamento da resolução espacial (de 3" para 1") e, enfim, seu desdobramento em variáveis geomorfométricas e outros insumos derivados.

Em sua concepção, o TOPODATA prevê um desenvolvimento cíclico, de modo que o retorno da comunidade de usuários constitua uma das fontes de retroalimentação do sistema, cujos ciclos devem abarcar um número crescente de participantes em toda sua cadeia. Portanto, embora tal iniciativa visasse a contornar a necessidade de capacitação dos potenciais usuários nas técnicas de geomorfometria, a exposição dos métodos, dos procedimentos e de sua fundamentação faz parte das condições preconizadas para a continuidade deste desenvolvimento. Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento deste banco de dados, caracterizar as metodologias aplicadas e especificar possíveis melhorias a serem implementadas nas suas versões futuras.



## 2 FUNDAMENTOS

Neste capítulo serão abordados os aspectos fundamentais relativos à derivação do Modelo Digital de Elevação (MDE) refinado a partir de dados SRTM em variáveis geomorfológicas e seu pós-processamento. Uma vez que a fundamentação sobre interpoladores e a abordagem geostatística do pré-processamento do MDE foi especificamente exposta no documento que antecede o presente (VALERIANO e ROSSETTI, 2008), tais assuntos não serão aqui fundamentados, exceto ocasionalmente, à medida que convierem ao entendimento.

### 2.1 A informação topográfica

A geomorfometria refere-se ao estudo do relevo feito sob abordagem numérica, baseada na mensuração de características geométricas da configuração tridimensional da superfície do terreno (EVANS, 1972). Por uma evolução nos recursos de análise de dados topográficos, o termo geomorfometria tem sido cada vez mais relacionado a análises do MDE através de operações de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). No entanto, a geomorfometria, como ciência, não está rigorosamente restrita a esta condição, o que significaria excluir os conhecimentos fundamentais, desenvolvidos fora do ambiente de SIG, muito antes da popularização do uso de computadores pessoais.

Os estudos que envolvem a modelagem do meio físico trazem consigo demandas por informações topográficas específicas, conforme os modelos conceituais que definem o fluxo de integração dos dados (Figura 2.1). Cada condição ou processo da paisagem tem sua função típica de resposta a diferentes aspectos, ou variáveis, do relevo. Independentemente dos recursos utilizados em sua produção, as informações de interesse requerem um trabalho de análise dos dados topográficos, que fornecem basicamente cotas altimétricas, para a obtenção da informação de interesse. Estas análises, geralmente, abrangem alguma forma de processamento das cotas altimétricas, prática que recentemente vem sendo referida pelo termo *derivações geomorfológicas*, e produzem *variáveis geomorfológicas*.

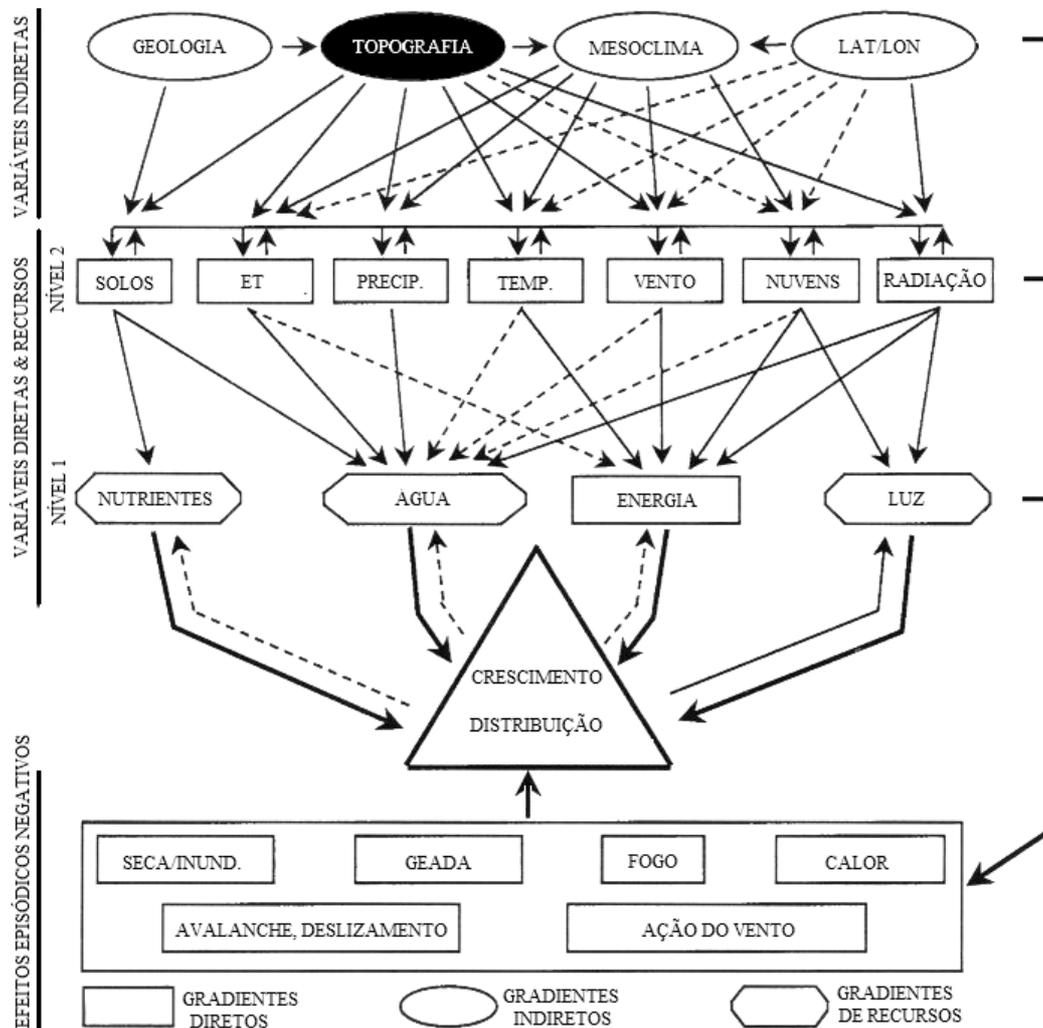


Figura 2.1 – Modelo da relação entre o meio físico e distribuição da vegetação. Fonte: adaptado de Guisan e Zimmermann (2000).

Num sentido amplo, todos os dados extraídos a partir de dados altimétricos podem ser considerados derivações geomorfométricas. No entanto, pode-se restringir o conceito a dados que se refiram estritamente a características geométricas da superfície do terreno, o que se mostra mais apropriado para uma linha autônoma de pesquisa, uma vez livre da ampla gama de conhecimentos envolvidos pelo primeiro conceito. Do ponto de vista do fluxo geral de dados topográficos, a derivação geomorfométrica tem analogia à fase de fotoleitura, quando se fala em fotointerpretação: é o primeiro nível de informação elaborado a partir dos dados básicos, uma simples organização dos insumos básicos (cotas altimétricas) em elementos imediatamente mais complexos. Assim, têm valor descritivo ainda dissociado de significado para os demais aspectos condicionantes da

paisagem. A partir desta etapa, uma análise mais abrangente organiza estes elementos em sistemas sucessivamente mais complexos (fotoanálise), de modo que a informação possa ser progressivamente relacionada aos aspectos de interesse (fotointerpretação).

Ao longo desse fluxo, pode-se perceber um encadeamento ordenado de diferentes níveis de análise do MDE, conforme se percorrem os níveis de complexidade da informação, desde a cota altimétrica de cada ponto até a caracterização ou até a classificação fisiográfica de um compartimento da paisagem. Assim, este encadeamento pressupõe também uma abrangência crescente das análises, pelo que se faz oportuna a distinção entre geomorfometria *local* e *não-local* (ou *regional*).

As variáveis geomorfométricas locais referem-se a feições observadas em curtas distâncias que requerem, no máximo, a observação da vizinhança próxima de um ponto para caracterizá-lo. Por exemplo, a determinação da altitude de um ponto requer somente que se observe o mesmo; para declividade, é necessário ampliar a observação para permitir a comparação dos desníveis em torno do ponto de interesse. Generalizando, as variáveis geomorfométricas locais são obtidos a partir da altimetria, com derivações em torno de cada ponto analisado. Assim, temos a própria altimetria (derivação de ordem zero), declividade e orientação de vertentes (derivadas de 1<sup>a</sup> ordem) e curvaturas vertical e horizontal (derivadas de 2<sup>a</sup> ordem) como variáveis geomorfométricas locais básicas.

As variáveis não-locais se baseiam na análise de diferentes elementos do terreno, geralmente distribuídos por uma região, relacionada ao padrão definido pela distribuição das variáveis locais (MEIJERINK, 1988). Requerem a conexão entre elementos dispersos no espaço geográfico ou a integração/acúmulo por segmentos de área. Exemplos bem conhecidos são ligados à análise de padrões de drenagem, densidade, interflúvio etc., que requerem a análise diferentes elementos da drenagem. Evidentemente, variáveis não-locais têm caráter regional e representam elementos de maior complexidade do que variáveis locais. Há também diferenças espaciais na expressão dessas variáveis - variáveis locais podem ter expressão regional e vice-versa: podemos atribuir uma única densidade de drenagem a toda a área de abrangência de uma microbacia, enquanto podemos ter um valor de declividade local para cada ponto da mesma, por exemplo. Entre as variáveis não-locais mais evidentes em estudos do

meio físico estão o comprimento de rampa, a área de captação, amplitude (relevo interno) e fatores relacionados a formas e densidade. O fato de lidar com arranjo de diferentes elementos da topografia permite um grande número de combinações, de níveis de complexidade e uma diversidade de conceitos englobados no conjunto de variáveis não-locais. Portanto, além de exemplos consagrados, há inúmeras concepções em desenvolvimento ou particularizadas em função de problemas específicos.

Podemos exemplificar o encadeamento de análises locais e regionais com o estudo da estrutura de drenagem. Embora não se configure uma variável numérica, a identificação dos talvegues (ou dos canais de drenagem) e divisores de água também pode ser produto de derivação local (2ª ordem) da altimetria, uma vez que tais feições se caracterizam como pontos notáveis (mínimos e máximos locais) de transecções topográficas. Por outra alternativa, os canais de drenagem podem ser identificados pelo acúmulo da área de captação (geomorfometria não-local), que depende da distribuição da orientação de vertentes, por sua vez uma derivação local. Em ambas formas, o modelo descritivo da drenagem parte de derivações locais, que são organizadas em estruturas mais complexas e de maior abrangência, que definem os canais de drenagem. Prosseguindo a análise, a distribuição espacial destes canais define uma rede de drenagem que, por sua vez, é um elemento de interpretação capaz de fornecer diversas variáveis, como padrão, densidade, textura, angularidade e sinuosidade, que indicam, por exemplo, propriedades físicas do substrato (solos e geologia) e sua evolução.

Dos insumos básicos até as informações finais da topografia, ocorre um gradativo aumento do significado físico, ou concreto, dos dados, acompanhado de particularização das variáveis e diversificação dos conceitos. Dessa forma, prever as possíveis demandas nos níveis mais avançados, bem como atendê-las, torna-se um desafio impraticável. Por outro lado, os dados básicos constituem demandas de ampla gama de aplicações, embora estejam, para muitos casos, aquém do nível de complexidade e particularização desejado para determinadas aplicações, o que requer mais elaboração (Figura 2.2).

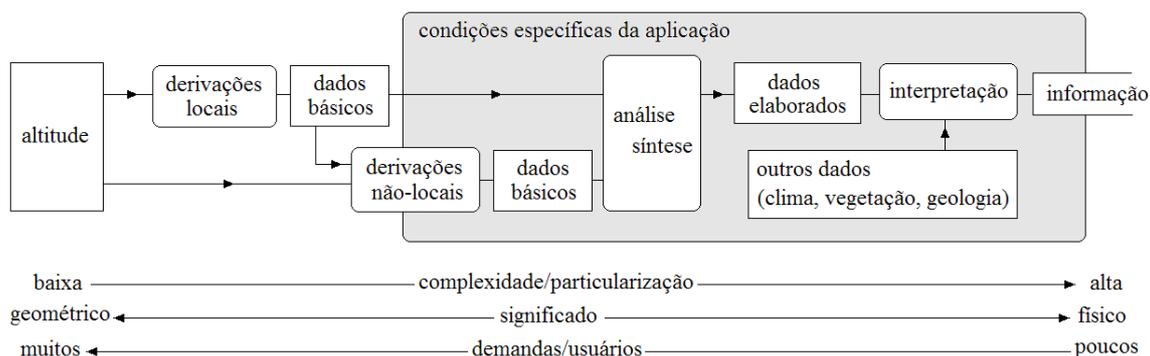


Figura 2.2 – Desenvolvimento da informação topográfica.

Por questões ligadas à capacidade de processamento e armazenamento, foram considerados critérios de utilidade-especificidade para inclusão de variáveis no banco de dados TOPODATA. Após a experimentação de dados geomorfométricos em diferentes projetos de pesquisa, optou-se por oferecer as variáveis altitude, declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical. Como complemento a seus resultados numéricos, oferece também combinações, classificações e formas elaboradas destes com vistas ao fornecimento de insumos para interpretação, tais como forma do terreno, talwegues e divisores, bem como diferentes esquemas de classificação da declividade. Planeja-se incluir também a iluminação solar entre estas combinações. Os conceitos, as formas de utilização e as especificações técnicas destes produtos estão pormenorizados em Valeriano (2008). No presente documento, procura-se abordar especificamente os processos envolvidos em sua derivação.

## 2.2 Derivações geomorfométricas locais

As derivações geomorfométricas são operações aplicadas aos MDE para a obtenção de uma nova informação na mesma estrutura. Podemos descrever esta estrutura, comumente referida pela expressão *raster*, como registros numéricos em matrizes de células (análogas a *pixels*) estruturadas em linhas e colunas georreferenciadas, da mesma forma que se estrutura uma imagem de satélite.

A determinação de variáveis geomorfométricas locais se apóia tipicamente na análise da vizinhança imediata do ponto a ser caracterizado, numa extensão suficiente apenas para que se permita a percepção da conformação tridimensional da superfície naquele local. A execução deste tipo de análise em SIG é feita com operações de vizinhança, que

implicam no uso de janelas móveis (Figura 2.3). Estas são pequenas matrizes de pesos que se aplicam à totalidade dos dados (em cada *pixel*, ou célula, do plano de informação – PI – de entrada, que pode ser um MDE), cujo resultado é atribuído à posição central em cada aplicação da janela móvel. Ao final do processo, um novo plano de informação é produzido, com georreferência correspondente à do plano de entrada.

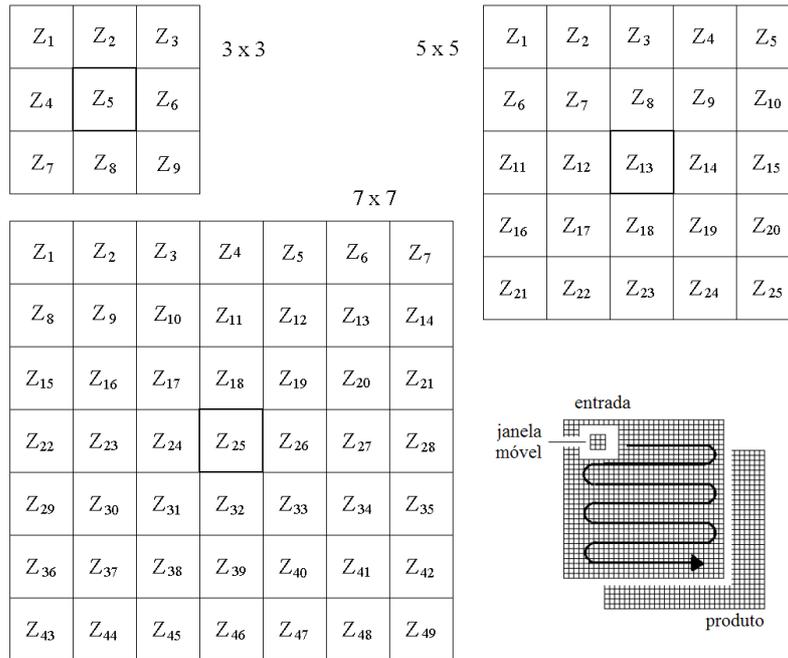


Figura 2.3 – Exemplos de janelas móveis e sua aplicação em planos de informação.

No exemplo da Figura 2.3, são mostrados janelas de dimensões 3x3, 5x5 e 7x7, em que as células da vizinhança são especificadas em relação à célula central. Assim, os resultados de operações na vizinhança de interesse recaem sobre as células centrais, respectivamente, Z<sub>5</sub>, Z<sub>13</sub> e Z<sub>25</sub>.

A modalidade mais simples de operação de vizinhança refere-se a cálculos diretos entre as cotas alcançadas pela janela móvel, como se pode exemplificar para a dimensão 3x3:

$$Z' = a Z_1 + b Z_2 + c Z_3 + d Z_4 + e Z_5 + f Z_6 + g Z_7 + h Z_8 + i Z_9 \quad (2.1)$$

Este resultado deve ser armazenado no plano Z', na posição ocupada pela célula central, Z<sub>5</sub>. Um exemplo simples de aplicação deste funcionamento é a suavização por média móvel, em que os coeficientes a até i (Equação 2.1) têm valor de 1/9. Para um cálculo de derivação, são aplicados coeficientes de modo a expressar os elementos de interesse,

que geralmente envolvem diferenciais. Ainda com janela 3x3, podemos exemplificar um cálculo de gradiente na direção S-N com a atribuição dos pesos +1 e -1 às células  $Z_2$  e  $Z_8$  e nulos para as demais. No plano produzido ( $Z'$ ), teremos a diferença entre as cotas imediatamente a norte e a sul, atribuída à posição de  $Z_5$ . Ao dividirmos  $Z'$  pelo valor da distância entre  $Z_2$  e  $Z_8$ , teremos a componente N-S da declividade, em m/m.

Outra modalidade, mais sofisticada, consiste em ajustar superfícies de tendência em cada posição da janela móvel (Figura 2.4) e proceder às derivações através de abordagem analítica, a partir das equações ajustadas. Deste modo, o gradiente  $Z'$  na direção S-N pode ser calculado como a derivada da equação da superfície de 1ª ordem ajustada às cotas da janela móvel ( $z=A+bx+cy$ ) em relação a  $y$ , o que resulta em  $Z'=c$ .

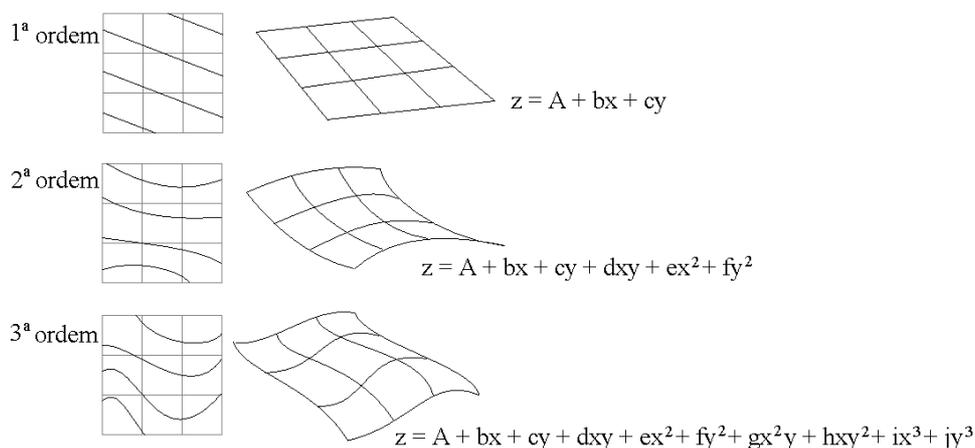


Figura 2.4 – Polinômios de 1ª, 2ª e 3ª ordem ajustados a um segmento de superfície.

A principal vantagem deste modo é retratar o segmento de superfície com um modelo independente da estrutura das células da janela móvel, uma vez que a superfície pode ser estendida arbitrariamente. Além disso, a abordagem analítica permite a derivação direta das superfícies, na ordem (ângulos, curvaturas ou ainda superiores) e pela dimensão (horizontal, vertical etc.) que se queiram. Como possíveis desvantagens, listam-se o caráter estatístico da superfície ajustada e o tempo de processamento, relativamente dilatado, para o ajuste de superfícies de ordens elevadas, devido às grandes dimensões de janelas móveis, aliadas a cálculos mais complexos.

No caso da abordagem analítica, a dimensão horizontal está implícita nas posições dadas pelos conjuntos  $x,y,z$  de cada célula de entrada para ajuste de superfícies. Assim a

simples derivação das equações já expressa os ângulos de interesse e seus diferenciais. No caso da abordagem geométrica, as distâncias horizontais têm que ser declaradas em operações escalares após a operação das janelas móveis, uma vez que nestas são comparadas apenas as cotas altimétricas da vizinhança para a determinação do desnível que ocorre naquele intervalo de distância. É uma relação entre o desnível e a distância correspondente que caracteriza uma medida de declividade, bastando expressar tal razão em porcentagem. Em outras palavras, analisa-se o *diferencial* da altimetria naquele *intervalo de derivação*. Da mesma forma, as demais derivações geomorfométricas são cálculos que envolvem diferenciais entre cotas vizinhas a serem consideradas diante das distâncias nas quais são expressas. A adoção da abordagem geométrica como essência do processamento no TOPODATA tornou necessário considerar o cálculo das distâncias horizontais como um elemento comum às diferentes derivações.

### **2.3 Distâncias horizontais (resolução espacial)**

A determinação das distâncias horizontais pode ser referida pelo cálculo da resolução espacial efetiva no terreno por cada *pixel* dos planos correspondentes aos produtos TOPODATA. É importante lembrar, nesse ponto, que os processos foram desenvolvidos de modo que as especificações originais dos dados SRTM não fossem modificadas, exceto a resolução, refinada por um fator de 3 em  $x$  e em  $y$ . Uma vez que os dados SRTM foram originalmente disponibilizados com espaçamento regular em coordenadas geográficas (sob resolução de 3'' ou 0,000833°, com *datum* e o elipsóide de referência WGS84), a resolução no terreno varia de uma localidade a outra, de acordo com o modelo de projeção destas para coordenadas planas.

Após o processo de refinamento, a resolução nominal dos dados passa a ser de 1'', ou ainda 0,000277°, o que, de modo impreciso, vem sendo referido por “30 metros” por muitos. Se podemos entender a expectativa dos interessados por tal expressão, corremos o risco, ao aceitá-la, de induzir o usuário a usar os dados como se assim tivessem sido estruturados. No caso da necessidade de se usar a resolução como dado analítico, esta simplificação traz erros expressivos para os cálculos, conforme exposto a seguir.

A fundamentação dos cálculos apresentados pode ser encontrada em diversos documentos referentes à Geodésia, de livros básicos a apostilas de aula. Embora tivessem sido consultadas fontes diversas, optamos por recomendar o livro de Snyder (1987) como referência para os que buscarem uma pormenorização destes fundamentos, pela sua difusão relativamente recente e a conseqüente facilidade para seu acesso.

O cálculo inicialmente apresentado adota uma determinação expedita, que considera a Terra perfeitamente esférica. A formulação aplicada neste caso determina o comprimento de arco de 1" na latitude  $Y$  ( $S_Y$ ) – na geodésia, a latitude ( $Y$ ) é usualmente simbolizada pela letra grega  $\phi$ , que neste documento foi atribuída a ângulos azimutais – em função do raio da Terra esférica no equador ( $R_0$ , igual a 6378137m), pela seguinte relação:

$$S_Y = 1'' \text{ (em radianos)} \times R_0 \cos Y \quad (2.2)$$

Para o referencial WGS84, a forma elipsóide da Terra leva a uma formulação mais complexa, que considera ainda os raios de semi-eixo maior e menor (respectivamente,  $a$ , igual a 6378137m, e  $b$ , calculado em função do fator de achatamento, igual a 1/298,257223563), que determinam a excentricidade ( $e$ ) como:

$$e = [ (a - b)^{1/2} / a ]^{1/2} \quad (2.3)$$

Assim, o comprimento do arco no paralelo de latitude  $Y$  ( $S_Y$ ) é determinado pela equação:

$$S_Y = [ a / (1 - e^2 \sen Y)^{1/2} ] \cos Y \quad (2.4)$$

Na Tabela 2.1 estão apresentados os resultados destes cálculos para latitudes entre o equador ( $0^\circ$ ) e o paralelo  $35,5^\circ$ , bem como a diferença entre os mesmos. A diferença encontrada a partir dos cálculos efetuados para o intervalo de latitude estendeu-se até 2,85cm.

Tabela 2.1 – Distância longitudinal de um arco de 1” sobre o modelo (a) de Terra esférica e (b) da referência WGS-84 em função da latitude ( $Y$ ) e sua diferença

$Y$ ( $^{\circ}$ )	Dist. (a) (m)	Dist. (b) (m)	a-b (mm)	$Y$ ( $^{\circ}$ )	Dist. (a) (m)	Dist. (b) (m)	a-b (mm)
0,5	30,9209	30,9209	0,7	18,5	29,3241	29,3340	9,9
1,5	30,9115	30,9116	0,1	19,5	29,1484	29,1593	10,9
2,5	30,8926	30,8928	0,2	20,5	28,9639	28,9758	11,9
3,5	30,8644	30,8648	0,4	21,5	28,7704	28,7834	13,0
4,5	30,8268	30,8274	0,6	22,5	28,5683	28,5823	14,0
5,5	30,7797	30,7807	1,0	23,5	28,3574	28,3725	15,1
6,5	30,7233	30,7246	1,3	24,5	28,1379	28,1541	16,2
7,5	30,6575	30,6593	1,8	25,5	27,9098	27,9271	17,3
8,5	30,5824	30,5847	2,3	26,5	27,6732	27,6917	18,5
9,5	30,49,80	30,5008	2,8	27,5	27,4282	27,4478	19,6
10,5	30,4043	30,4077	3,4	28,5	27,1749	27,1956	20,7
11,5	30,3013	30,3053	4,0	29,5	26,9132	26,9351	21,9
12,5	30,1891	30,1938	4,7	30,5	26,6434	26,6664	23,0
13,5	30,0677	30,0732	5,5	31,5	26,3654	26,3895	24,1
14,5	29,9371	29,9434	6,3	32,5	26,0794	26,1047	25,3
15,5	29,7975	29,8046	7,1	33,5	25,7855	25,8118	26,3
16,5	29,6487	29,6567	8,0	34,5	25,4837	25,5111	27,4
17,5	29,4909	29,4998	8,9	35,5	25,1741	25,2026	28,5

Cabe ainda verificar o comprimento de um arco de 1” sobre o meridiano, ou distância latitudinal. Face à complexidade deste cálculo, é possível determinar o comprimento do arco de 1” sobre o meridiano. O arco de meridiano contado a partir do Equador até uma determinada latitude ( $y$ ) é calculado em função do raio de curvatura da seção meridiana ( $M$ ) pela equação:

$$S_Y = \int_{\{0;y\}} M dY \quad (2.5)$$

O raio de curvatura da seção meridiana ( $M$ ), por sua vez, é dado por:

$$M = a (1 - e^2) / (1 - e^2 \sin^2 y)^{3/2} \quad (2.6)$$

Este cálculo determina o comprimento do arco a partir do Equador (onde  $Y=0^\circ$ ) até a latitude de interesse ( $y$ ). Os resultados deste cálculo mostraram que as distâncias latitudinais variaram em menos de 1% desde o Equador até a latitude extrema dos dados SRTM, de  $60^\circ$ , com valores em torno de aproximadamente 30,833m.

Podemos considerar esta variação desprezível em comparação com a variação das distâncias longitudinais que, da latitude do Equador (onde  $1'' = 30,9221\text{m}$  em  $Y$ ) até a latitude extrema do país (próximo a  $34^\circ$ , onde  $1'' = 25,6624\text{m}$  em  $Y$ ), que corresponde a mais de 20%. Uma vez na função de denominador para o cálculo de muitas variáveis, haveria um viés sistemático destas, de modo que no extremo sul do país resultariam cerca de 20% menores do que no Equador. Porém, as diferenças entre distâncias longitudinais e latitudinais crescem com a latitude, o que significa uma distorção crescente entre os eixos  $x$  e  $y$ , na mesma proporção em que variam as distâncias longitudinais. Portanto, desconsiderar as diferenças entre as distâncias em  $x$  e em  $y$  traz discrepâncias igualmente expressivas entre vertentes N-S e vertentes E-W numa mesma localidade, conforme a latitude local. Próximo a  $34^\circ$ , esta equivale a um viés de cerca de 18%, enquanto na latitude extrema dos dados SRTM ( $60^\circ$ ) chega a 199%.

Como decorrência das considerações acima, devemos considerar o formato dos *pixels* do MDE dos dados SRTM, bem como aqueles obtidos por interpolação, ou refinados, como retangular, de proporção entre os lados variável com latitude, uma vez que ambas condições os trazem sob espaçamento nominal regular nas unidades de coordenadas geográficas. Dessa forma, a dimensão horizontal (que, em grades quadradas regulares, é dada unicamente pela resolução espacial) a ser aplicada nos cálculos das derivações pretendidas terá que ser caracterizada a partir de suas componentes em  $x$  e  $y$ , inicialmente, para que se contornem os desvios sistemáticos dados pela variação destas distâncias com a latitude. Assim, a resolução espacial deverá ser representada por três possíveis valores de distância, a serem armazenados em três planos de informação distintos, com (a) distâncias longitudinais, para atender as operações de derivação em relação às vizinhanças a E e a W; (b) distâncias latitudinais, para atender as operações de derivação em relação às vizinhanças a N e a S; e (c) distâncias diagonais, calculadas como a hipotenusa das duas componentes anteriores, para atender as operações de derivação em relação às vizinhanças a NE, NW, SW e a SE.

## 2.4 Declividade

A estimativa da declividade se baseia na proporção entre desníveis e suas respectivas distâncias horizontais (Figura 2.5). É expressa em graus (de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ ) ou em porcentagem (de 0% a infinito). No caso de isolinhas, em que os desníveis entre as curvas de nível são constantes ( $\Delta z$ , a equidistância vertical), a declividade é estimada através a medição das distâncias horizontais ( $Dh$ ), que constituem o único elemento variável. Em contraposição, em MDE as distâncias é que são constantes, determinadas pela resolução espacial e pelas posições relativas da janela móvel, enquanto os desníveis constituem o elemento variável.

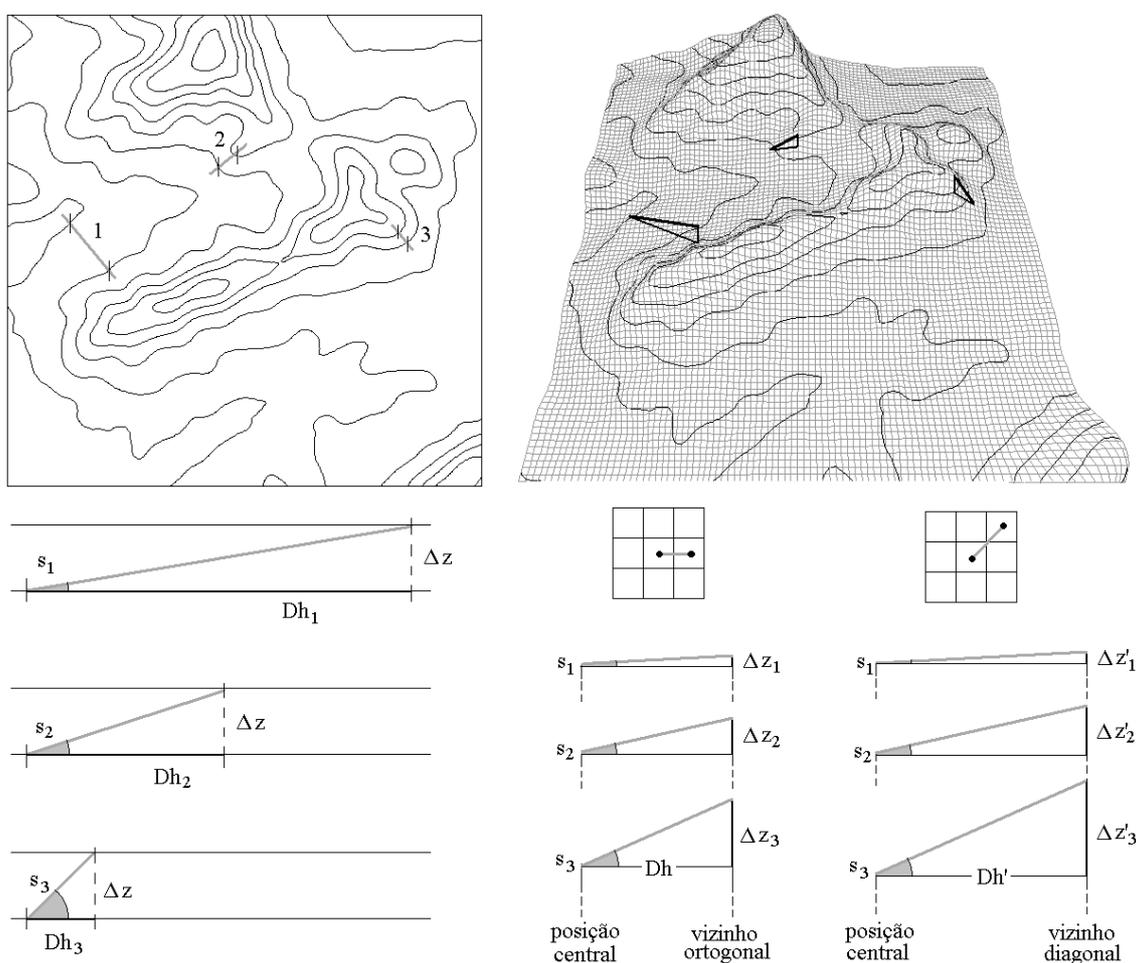


Figura 2.5 – Declividade em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).

O princípio de estimativas sobre MDE, embora simples, requer o estabelecimento de critérios que resolvam o cálculo entre oito diferentes possibilidades de desnível, dada a

existência de oito vizinhos numa janela móvel 3x3. Normalmente, as diferentes alternativas para esta questão são tomadas indiferentemente às avaliações de desempenho, motivo pelo qual os algoritmos internos dos SIG produzem resultados diferentes. No entanto, grandes diferenças de correlação e de exatidão já foram observadas, em pesquisas providas de dados de controle, como decorrência das condições do MDE prévias à derivação (VALERIANO 2003), bem como das diferentes metodologias de cálculo (MORETTI et al., 1989; VALERIANO 2002b). Estes estudos indicaram os principais fatores de desempenho da estimativa da declividade: a preparação do MDE, a metodologia de cálculo e os cuidados de pós-processamento.

O princípio básico adotado fundamenta-se no cálculo da soma de vetores ortogonais da declividade (MORETTI et al., 1989). O método faz uso de operações de vizinhança sobre o modelo digital de elevação segundo a soma de dois vetores ortogonais,  $S_x$  e  $S_y$ , as componentes, respectivamente em  $x$  e em  $y$ , da declividade (Equação 2.7):

$$S = (S_x^2 + S_y^2)^{1/2} \quad (2.7)$$

A metodologia de melhor desempenho, aplicada no TOPODATA, foi obtida através de aprimoramentos sutis sobre este princípio (VALERIANO, 2002b): uso de dois sistemas de eixos (cardinais, ou “em cruz” – N-S e E-W e diagonais, ou “em xis” – NE-SW e NW-SE) e a adoção do maior valor, em vez da média, de cada par de desníveis recíprocos, conforme esquematizado na Figura 2.6.

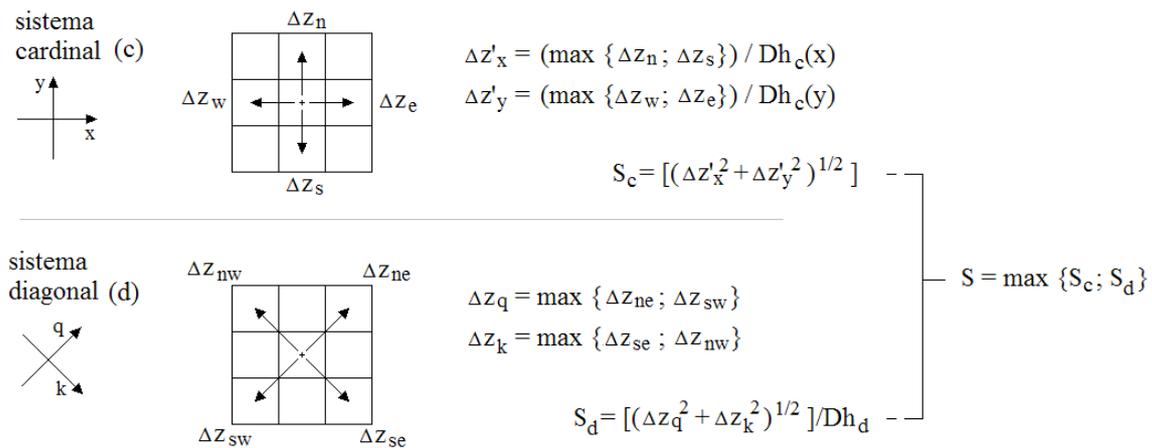


Figura 2.6 – Esquema da estimativa da declividade.

Ressalta-se, com relação à Figura 2.6, que há diferentes valores de distância horizontal, uma vez que a distância diagonal ( $Dh_d$ ) é maior do que a distância cardinal ( $Dh_c$ ) e igual nas 4 direções diagonais, enquanto as direções cardinais diferem entre latitudinal (constante, igual a 30,833m) e longitudinal, que varia com a latitude (v. item 2.3).

A metodologia adotada incluiu a aplicação de filtragens (média, 3x3) no pós-processamento, que se mostraram eficazes no aumento da correlação geral com os dados de controle. Porém, observando os valores em diferentes faixas de declividade (acima e abaixo de 15%), observou-se que estas vantagens estão restritas às declividades baixas. As características da distribuição numérica e espacial da declividade indicaram a conveniência pela preservação dos valores altos, mais raros, esparsos e portanto sujeitos a reduções indesejáveis pelo processo de filtragem (VALERIANO 2003; 2002b). Tais observações foram contempladas por cuidados específicos no processamento desenvolvido para a declividade.

## **2.5 Orientação de vertentes**

Em isolinhas, a orientação de vertentes é definida pela direção transversal às curvas de nível e no sentido descendente, isto é, acompanha o fluxo esperado do escoamento superficial (Figura 2.7). Como ângulo azimutal, é expressa em graus, variando de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . O encadeamento das direções ao longo das vertentes é conhecido como *linha de fluxo*. Em MDE, da mesma forma que a declividade, a orientação de vertentes dispõe de metodologias variadas para sua determinação, devido ao mesmo problema de oito possibilidades de vizinhança, que pode se tornar complexa conforme a situação. Apesar de constar entre os recursos básicos de diversos SIG, a explicitação de métodos de obtenção pode ser interessante, seja por uma eventual necessidade de se incluir na programação de algoritmos, ou para experimentar possíveis aprimoramentos.

A forma mais simples e intuitiva de solução seria adotar a direção de maior desnível, mas pode haver mais de um inconveniente nesta alternativa. O mais evidente é restringir os resultados a uma distribuição discreta, nas direções de octantes ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  e  $315^\circ$ ). Outro problema, embora contornável, é a possibilidade de se optar pelo maior desnível em vez da maior declividade, nos casos em que a proporção

entre os desníveis absolutos seja ultrapassada pela proporção inversa entre as respectivas distâncias horizontais (item 2.3).

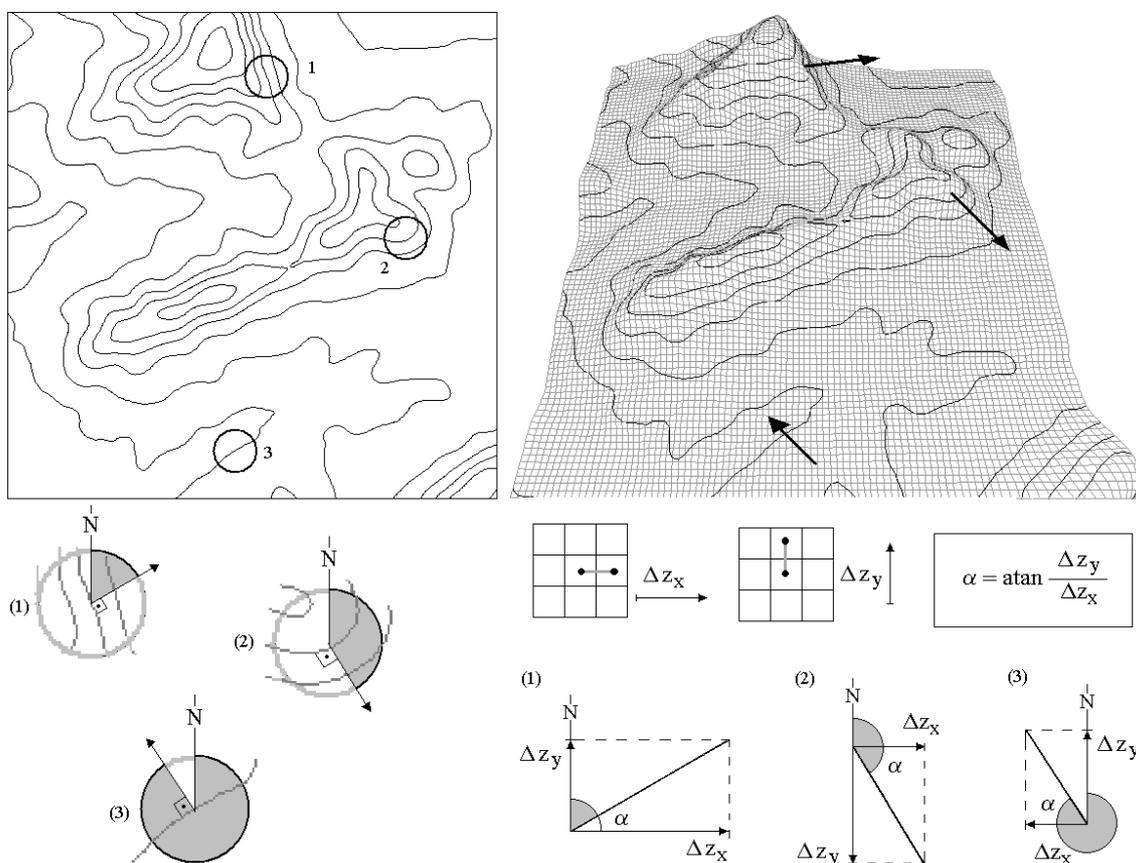


Figura 2.7 – Orientação de vertentes em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).

Os métodos praticados de estimativa da orientação por processamento de MDE se fundamentam em operações trigonométricas sobre as componentes ortogonais da declividade. O princípio esquematizado na Figura 2.7, baseado no arco-tangente da razão entre as componentes, é seguido de uma lógica pareada de seus sinais para a determinação do quadrante, enfim aplicada ao cálculo do ângulo azimutal (de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ ). As possíveis diferenças entre algoritmos advêm de diferentes modos de se estabelecerem as componentes ortogonais. No entanto, os resultados de diferentes algoritmos se mostram semelhantes, de modo geral, sem que se percebam diferenças funcionais que surgiram necessidade de aprimoramentos. Demais tratamentos da variável já calculada (pós-processamento) mostram-se inócuos ou, quando não, trazem efeitos indesejáveis, mesmo que se contornem as implicações devidas à natureza

circular da orientação de vertentes (VALERIANO, 1999). Enfim, como prática de pós-processamento desta variável, observa-se somente o fatiamento nas direções cardinais (N, S, E e W) ou em octantes (N, NE, NW, S, SE, SW, E e W), quando se desejam tais distribuições.

## 2.6 Curvatura vertical

A estimativa da curvatura vertical se baseia na observação de dois segmentos consecutivos de vertente ao longo de uma linha de fluxo. Tal condição requer a observação de três isolinhas (em carta) ou três células (em MDE) sequenciais. Em analogia à estimativa da declividade, no primeiro caso se comparam distâncias horizontais e no último os desníveis de dois segmentos da vertente, anterior (a) e posterior (p) ao ponto analisado (Figura 2.8).

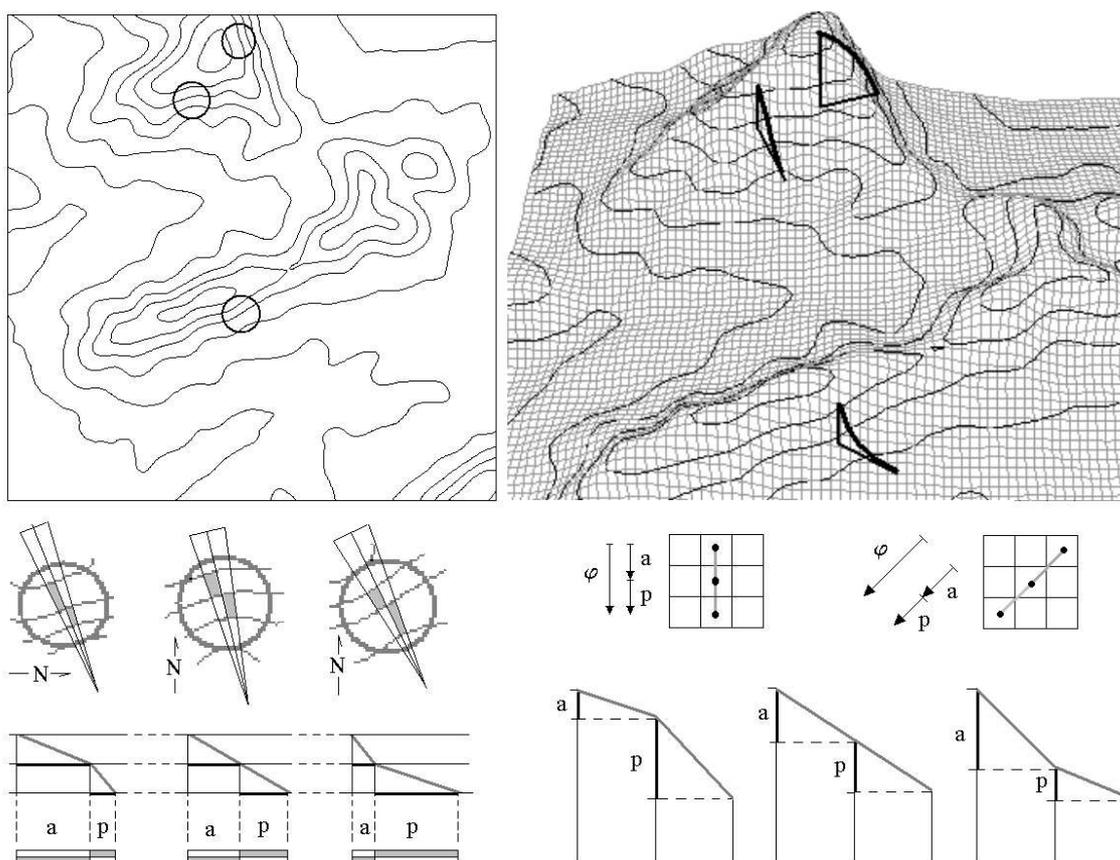


Figura 2.8 – Curvatura vertical em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).

O valor (módulo) da curvatura é uma medida desta diferença de ângulo de declividade em relação à respectiva distância horizontal e, portanto, quando não há diferença, o resultado é nulo. Conforme o caráter convexo ou côncavo da curvatura, temos valores positivos ou negativos. Embora seja uma questão arbitrária, costuma-se atribuir valores positivos a convexidades e vice-versa.

O fundamento da extração de curvaturas a partir de MDE traz implícito que devem ser considerados segmentos de terreno somente na direção das linhas de fluxo. Portanto, seu cálculo deve ser controlado pela orientação de vertentes (VALERIANO, 2003b). Tal condição pode ser convenientemente atendida com a aplicação do cálculo nas (oito) diferentes direções de vizinhança, cujos resultados são selecionados em função da classe de orientação que vertentes (em octantes). Na falta de operações condicionadas (operador *.if.*), a programação deste método pode ser feita com booleanas de cada classe de orientação (Figura 2.9).

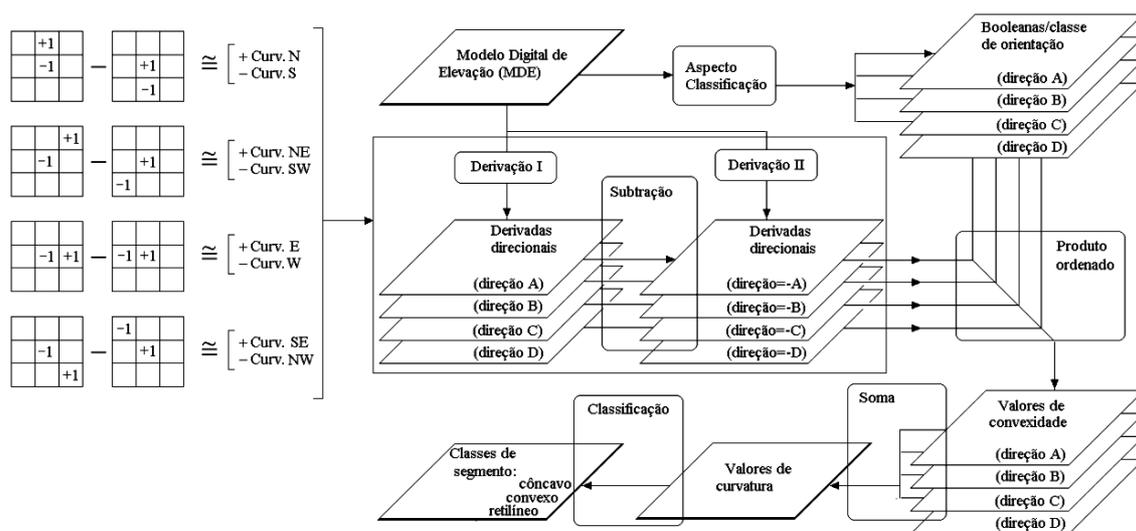


Figura 2.9 – Estimativa da curvatura vertical. Fonte: Adaptado de Valeriano, 2003b.

A seqüência de operações para o cálculo da curvatura vertical consiste na aplicação seqüencial de duas janelas móveis de diferenças direcionais recíprocas sobre a elevação, que resulta em curvaturas direcionais, divisão das diferenças pelas distâncias horizontais e seleção dos resultados mediante a multiplicação (sobreposição) por booleanas de orientação correspondentes aos 8 octantes, seguida da soma destes produtos. Os resultados numéricos são então classificados em intervalos selecionados para sua

caracterização qualitativa em segmentos de vertentes côncavos, retilíneos e convexos (Figura 2.9).

## 2.7 Curvatura horizontal

A medida da curvatura horizontal se baseia na mudança da orientação de vertentes em relação à distância horizontal, ao longo das curvas de nível. Da mesma forma que para as curvaturas verticais, é expressa em ângulo por distância. Sobre cartas topográficas, refere-se à própria curvatura das isolinhas. Sua estimativa em MDE se baseia na comparação, mediante janelas móveis, entre as orientações em torno do ponto analisado (Figura 2.10). A diferença de ângulos pode indicar divergência ou convergência das linhas de fluxo, situações em que o valor calculado tem sinais respectivamente opostos, positivos e negativos, como convenção, uma vez que a ordem de subtração entre direções vizinhas deve ser fixa.

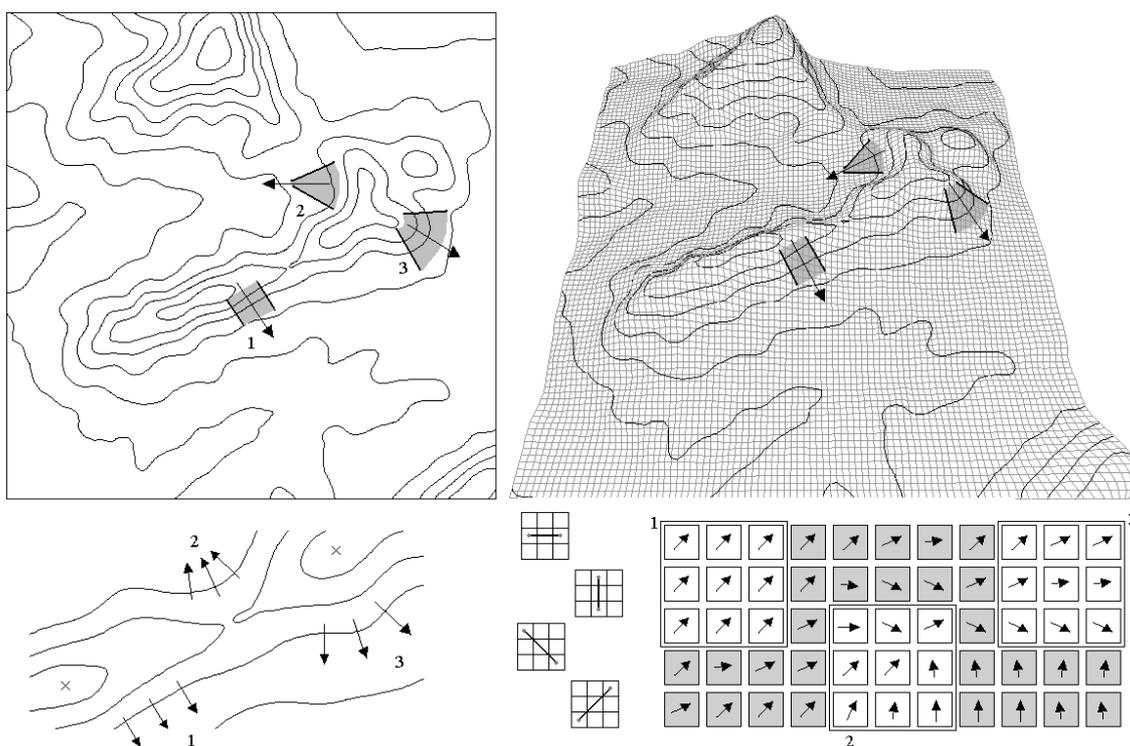


Figura 2.10 – Curvatura horizontal em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).

A solução por janelas móveis requer, como para curvatura vertical, que se selecione em cada ponto somente a diferença alinhada de acordo com a orientação de vertentes local.

Porém, a direção de derivação da curvatura horizontal deve ser paralela à isolinha local, isto é, transversal à orientação de vertentes. Dessa forma, a seqüência de operações para o cálculo da curvatura horizontal consiste na operação da função *aspecto*, para obtenção da orientação de vertentes, seguida da aplicação de janelas móveis de diferenças direcionais, que resulta em curvaturas direcionais, divisão das diferenças pelas distâncias horizontais e seleção dos resultados mediante uma multiplicação (sobreposição) por booleanas de orientação correspondentes aos 8 octantes, seguida da soma destes produtos. Os resultados numéricos são então classificados em intervalos selecionados para sua caracterização qualitativa em vertentes convergentes, planares e divergente (Figura 2.11).

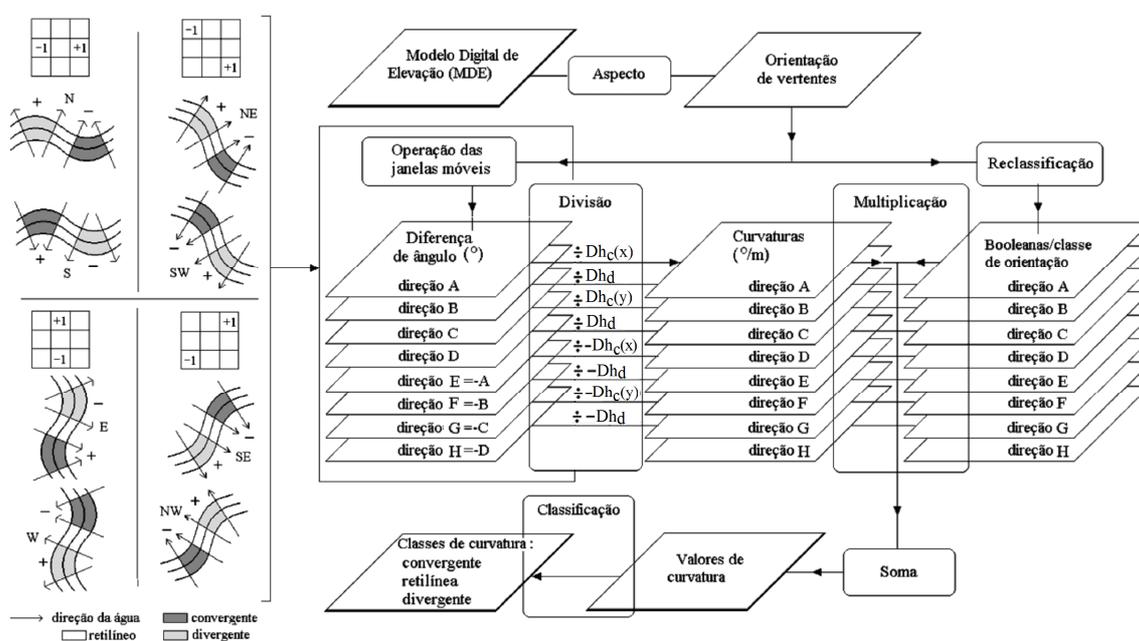


Figura 2.11 – Estimativa da curvatura horizontal. Fonte: Adaptado de Valeriano e Carvalho Júnior, 2003.

Enquanto os valores de curvatura vertical se distribuem de modo estruturado no espaço geográfico, em padrões distintos, separados por faixas de singularidades (VALERIANO, 2003b), a curvatura horizontal apresenta-se bastante detalhada em pequenos elementos de textura, com transições de alta frequência entre locais convergentes e divergentes (VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003). Esta condição pode eventualmente motivar esforços de generalização da curvatura horizontal

para uma percepção mais generalizada de padrões. Porém, a mesma característica desfavorece a produção de um insumo mais suavizado da curvatura horizontal, com pós-processamento. Uma vez que não se recomendam tratamentos sobre a orientação de vertentes (item 2.5), a suavização prévia do próprio MDE pode ser uma opção mais simples e portanto conveniente, em alternativa à utilização de janelas móveis de maiores tamanhos (5x5, 7x7 e assim por diante), como forma de determinação em escala mais generalizada (MOORE et al., 1993).

## **2.8 Talvegues e divisores de água**

A determinação de feições de drenagem oferecida atualmente em módulos funcionais de SIG se baseia no cálculo da *área de captação* (LINDSAY, 2003) – ou *fluxo acumulado* - que, quando atinge valores acima de níveis críticos (limiares), indica canais de drenagem. Esta abordagem foi desenvolvida para aplicação em MDE independente de dados climáticos e pedológicos. O único condicionante permitido ao usuário, mediante um processo de interação empírica, é o estabelecimento do limiar de fluxo acumulado acima do qual se caracteriza a drenagem. Tais metodologias têm como pressuposto a uniformidade do regime hídrico no sistema solo-atmosfera, que permitiria estabelecer a uma relação entre área de captação, volume infiltrado, volume escoado e, portanto, a possibilidade de fluxo canalizado. Desde que se possam abstrair as diferenças nestes condicionantes, sobretudo naqueles referentes ao substrato do terreno, este recurso tem se difundido rapidamente entre usuários de SIG, pela sua facilidade de aplicação e resultados rápidos. No entanto, além da fragilidade de seus pressupostos, este recurso é intrinsecamente relacionado à escala de detalhamento dos dados de entrada no que se refere à representação de feições críticas para o cálculo. Mudanças na expressão de divisores de água, por exemplo, afetam diretamente o cálculo das áreas de captação, efeito que se propaga desde as captações de primeira ordem. A natureza desta ressalva é comum às derivações regionais (não-locais) da topografia, em que a escala de análise tem influência direta nos resultados.

Abordagens locais ao delineamento da drenagem foram por longo tempo pesquisadas por especialistas (PEUKER e DOUGLAS, 1975, O'CALLAGHAN e MARK, 1984, BAND, 1986, SKIDMORE, 1990 e VALERIANO, 1999), dadas as condições

geomorfométricas locais que caracterizam os canais de drenagem. Entre tais condições pode-se exemplificar (a) locais de encontro de vertentes de orientações convergentes, (b) locais em que cada janela móvel apresenta 7 vizinhos de cota acima de sua célula central (e somente um abaixo, ou a jusante), (c) pontos de mínimo em seções transversais, ou (d) a complexa rede de condições incorporadas nas metodologias de delineamento de microbacias desenvolvidas por Band (1986).

Independentemente da abordagem, local ou regional, os métodos de delineamento da drenagem por análise de MDE devem ser vistos de maneira restrita, como aproximações auxiliares ao seu desenho. Deve-se lembrar que não há uma perfeita associação entre a expressão topográfica de canais e a presença de cursos d'água, mesmo abstraídas as simplificações do MDE: rios sem canais perceptíveis e canais sem rios. Além disso, uma mesma configuração de geomorfometria local e regional terá diferentes expressões quando localizada sobre substrato poroso ou impermeável, assim como sob clima úmido ou árido. Com vistas à produção de um insumo para o desenho da drenagem, baseada em análises padronizadas de aspectos geomorfométricos, considerou-se necessário respeitar estas limitações e manter-se restrito à possível expressão geométrica de canais, ou seja, ao delineamento de talvegues. Para a produção deste insumo, análises locais são alternativas convenientes pelo seu significado geométrico, o que o mantém na fase indiferenciada do fluxo da informação topográfica (na região clara da Figura 2.2). As mesmas considerações são válidas para os divisores de água.

O processo ADD – *Aspect, Drainage and Divides* - (VALERIANO, 2002) foi desenvolvido sob estas considerações, como forma de ressaltar a estrutura da drenagem exibida por MDE para auxiliar o desenho da hidrologia superficial e a avaliação de modelos para microbacias (em testes de interpoladores). Entre as primeiras aplicações, o mesmo delineamento de talvegues foi utilizado sobre MDE derivados de dados RADARSAT com vistas ao realce de possíveis pontos de controle para georreferência (Valeriano et al., 2002). Em essência, o produto consiste no delineamento de talvegues e divisores sobreposto a uma representação apropriada da orientação de vertentes. Dessa forma, são expostos em uma mesma representação os condicionantes topográficos dos fluxos laminares e canalizados da água superficial. Embora os elementos para a produção de um ADD possam ser delineados de formas diversas e

independentes (cálculos, digitalização, levantamentos etc.), nos primeiros desenvolvimentos, os divisores e talvegues foram calculados com base em seções transversais (Figura 2.12).

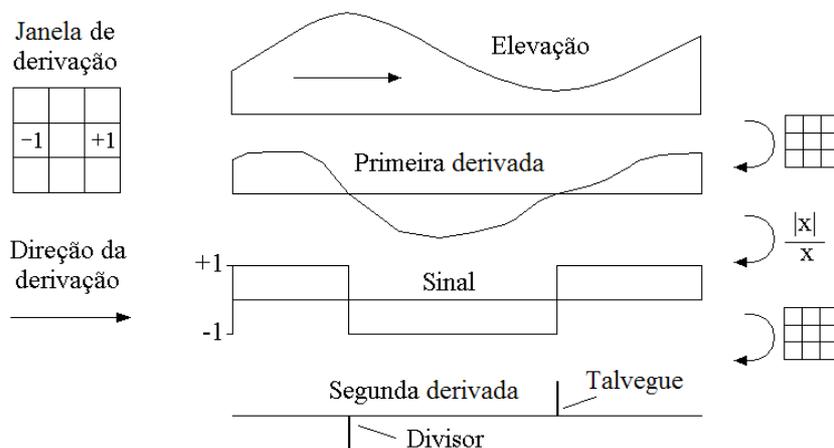


Figura 2.12 – Método da seção transversal para derivação de talvegues e divisores. Fonte: adaptado de Valeriano et al. (2006).

Após um período de experimentação com produtos ADD, foram feitas tentativas a fim de se aprimorar o processo, sobretudo o delineamento dos talvegues. Isoladamente, o método das seções transversais produziu redes de feições lineares contínuas correspondentes aos talvegues e divisores existentes, porém a largura destas feições por vezes não permitia um bom posicionamento dos canais e divisores, assim como detalhes (sinuosidade) de seus cursos, e ocasionalmente causava fusão entre redes desconexas, conforme as condições exibidas pelo MDE. No escopo do desenvolvimento do TOPODATA – estudos não publicados – os demais princípios de derivação local da drenagem foram programados e testados especificamente sobre os MDE interpolados para o banco de dados (VALERIANO e ROSSETTI, 2008), individualmente e em combinações. Os testes indicaram uma combinação entre seleção de limiares de curvatura horizontal e o processo ADD original como uma alternativa de bom desempenho e relativa simplicidade em todas as condições observadas. Tal método reúne as condições geomorfométricas locais (a) e (c) listadas acima. As condições (a) de convergência de vertentes - ou divergência, para divisores - de orientações opostas, perceptíveis por contrastes nas representações de orientação de vertentes, mostram-se explícitas na distribuição de curvatura horizontal (Figura 2.13). Nos testes para este

desenvolvimento, verificou-se que os talwegues e divisores evidenciados pela seção transversal puderam ser aplicados no cálculo das curvaturas horizontais, para contornar uma situação de ambigüidade que ocorre em vertentes perfeitamente contrapostas ( $180^\circ$ ). Nesta situação extrema, pequenas nuances entre as derivações causam inversões ocasionais do sinal da curvatura em pontos isoladas. A definição dada pela seção transversal elimina tais ambigüidades e ambos processos (curvatura horizontal e ADD) foram fundidos na programação.

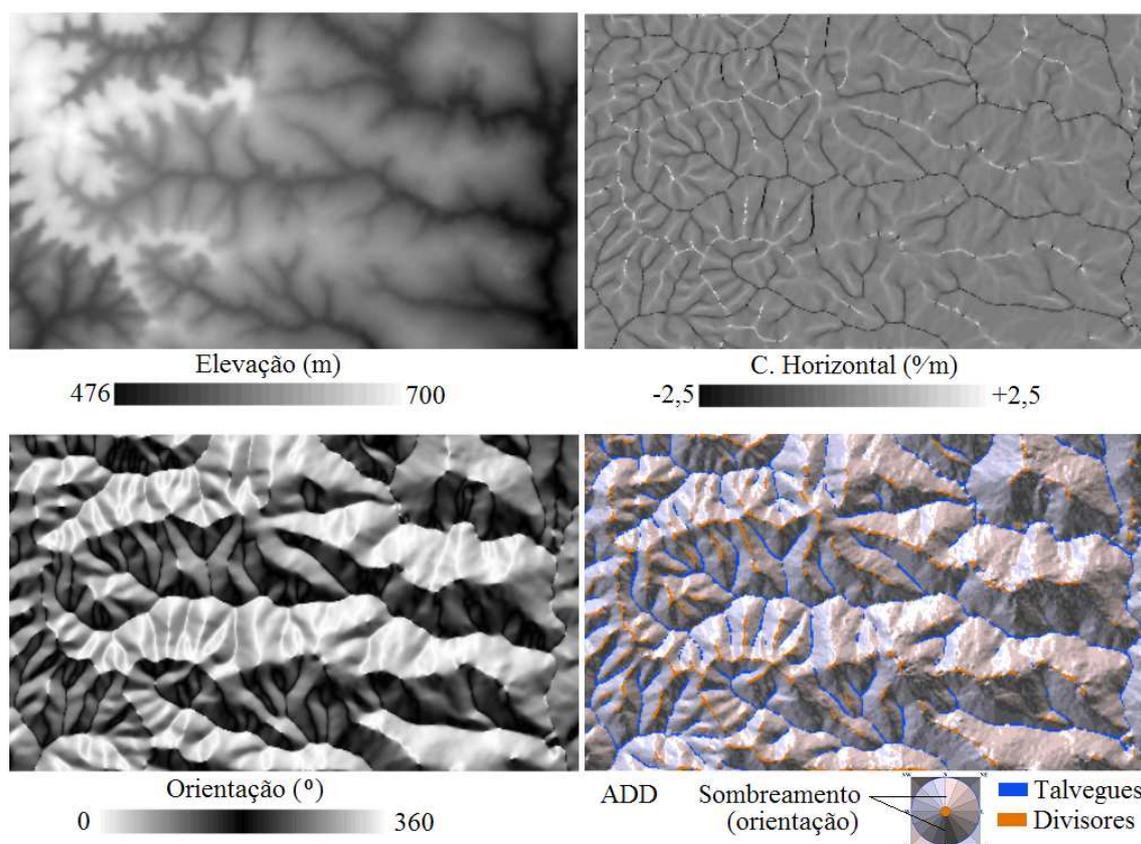


Figura 2.13 – O processo ADD com feições delineadas pela curvatura horizontal.

## 2.9 Iluminação/sombreamento

Não é raro encontrar, entre trabalhos de geoprocessamento, o uso das variáveis declividade e orientação de vertentes como insumos isolados para a compartimentação do terreno em unidades homogêneas. Enquanto o uso direto e isolado da declividade se justifica por fundamentos conceituais, o mesmo não ocorre com a orientação, exceto quando há conhecimento prévio de sua relação com determinadas condições do terreno.

Apesar disso, percebe-se que em muitos casos seu uso reflete, além da facilidade de obtenção com recursos básicos de SIG, uma tentativa simplificada de incorporar variações no regime de radiação como condicionante à diferenciação de compartimentos. Nesses casos, são definidas classes de orientação relativas a uma condição média de iluminação (ou do sombreamento, reciprocamente) por simples fatiamento, de forma que, em classes, temos vertentes Sul como sombreadas e Norte como iluminadas, com Leste e Oeste em situação intermediária (no hemisfério Sul e vice-versa no hemisfério Norte). Quando relacionada ao brilho de imagens de satélites, o Norte é substituído pelo azimute solar no momento da aquisição, para imagens óticas, ou da posição da antena transmissora, no caso de RADAR.

Embora muitas simplificações, justificadas por questões operacionais, possam representar desvios aceitáveis em relação à realidade, a iluminação requer um nível mínimo de cuidados sem o quais não se atinge um desempenho funcional razoável. Esta questão é mais complexa, e resolvida mais adequadamente somente sob uma abordagem que considere os vetores de iluminação e da normal à superfície no espaço tridimensional. Se mantivermos a geometria de iluminação (elevação e azimute solar) constante, resta a geometria da superfície, definida em função dos ângulos de declividade e orientação de vertentes, que varia de um local a outro (Figura 2.14). Assim, na definição de Wilson e Gallant (2000), a iluminação pode ser considerada uma variável geomorfométrica secundária, uma vez que advém da combinação de dois ou mais atributos topográficos primários.

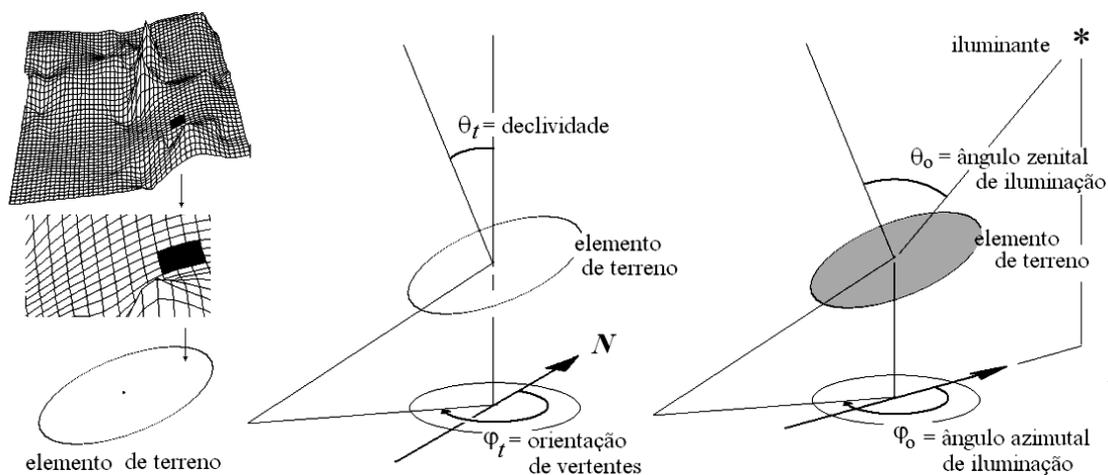


Figura 2.14 – Geometria de iluminação/sombreamento de um elemento de terreno.

Esta variável corresponde ao que se estuda na física do sensoriamento remoto como fator cosseno ( $\cos\theta_o$ ), ou efeito cosseno (SLATER, 1980), uma vez que afeta brilho das imagens de satélites, ou na climatologia física, aplicado na estimativa na radiação solar direta (SELLERS, 1965), definido pela Equação 2.8, da trigonometria esférica:

$$\cos\theta_o = \cos\theta_s \cos\theta_t + \sin\theta_s \sin\theta_t \cos(\varphi_s - \varphi_t) \quad (2.8)$$

em que  $\cos\theta_o$  é o fator cosseno,  $\theta_s$  é o ângulo zenital solar,  $\theta_t$  é o ângulo zenital da normal à superfície do terreno (que corresponde à declividade),  $\varphi_s$  é o ângulo azimutal solar e  $\varphi_t$  é o ângulo azimutal da normal à superfície (que corresponde à orientação de vertente). O ângulo azimutal de iluminação ( $\varphi_o$ , Figura 2.14) é a diferença entre  $\varphi_s$  e  $\varphi_t$ . Consideradas as condições atmosféricas, é evidente que tanto o brilho de imagens como a radiação solar são subestimadas pela Equação 2.8, que não considera a fração difusa da radiação incidente. Para tratamento de dados de RADAR, por outro lado, ou do brilho de imagens de planetas desprovidos de atmosfera, esta solução é bem mais próxima da realidade. Para o cômputo da radiação difusa, o conceito de abertura (*openness*), um descritor geomorfométrico (YOKOYAMA et al., 2002), pode ser empregado para o cálculo do ângulo sólido de exposição local à abóbada celeste, porém resta caracterizar a densidade ótica da atmosfera, variável no espaço e no tempo. Em todos os casos, restam ainda as componentes adicionais, de sombras projetadas pelas feições positivas do relevo e da iluminação de segunda ordem, provinda da reflexão de faces do próprio terreno, em interações múltiplas. A primeira componente pode ser modelada, com aumento da complexidade da análise, enquanto que a segunda depende do albedo das superfícies responsáveis pelas reflexões. Com todas estas restrições, podem-se conceber ao menos duas aplicações das derivações puramente geomorfométricas relacionadas à iluminação: como esquema de representação do MDE para interpretação visual de feições do relevo (Figura 2.15) e como insumo numérico para representar, mesmo com simplificações, a iluminação como variável bioclimatológica.

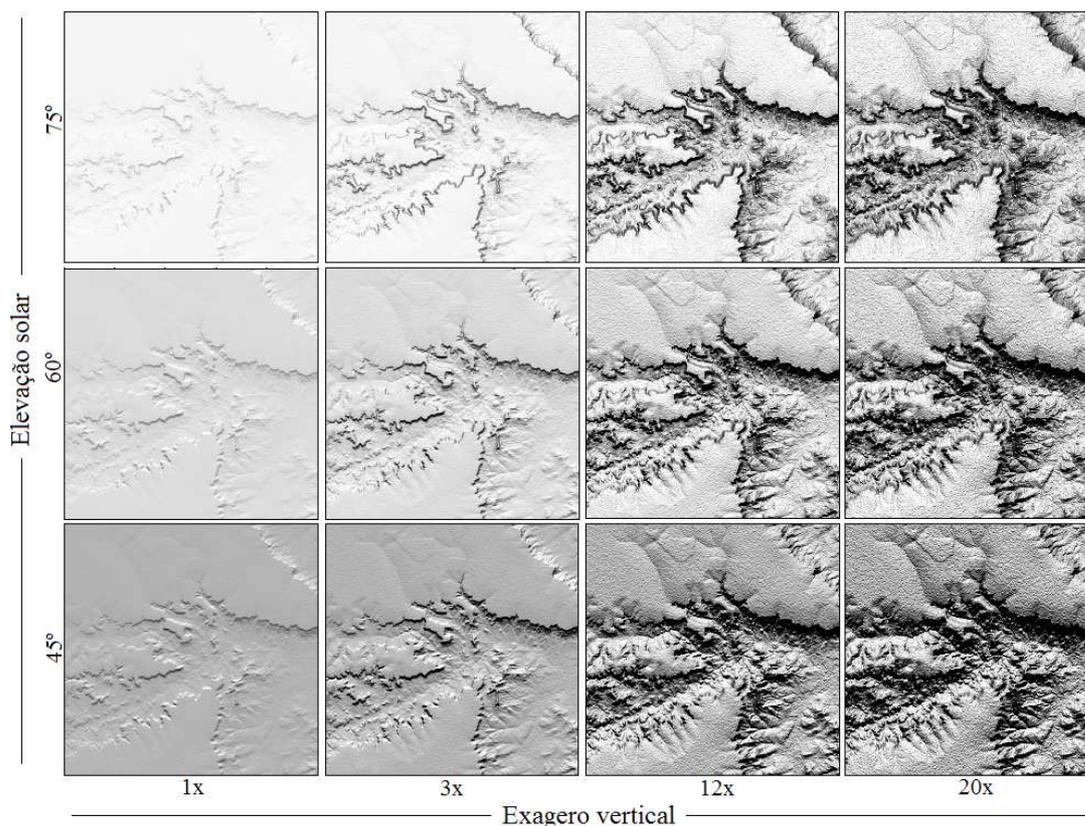


Figura 2.15 – Iluminação sob diferentes ângulos de elevação solar e exagero vertical.

As condições de cálculo da iluminação para o atendimento às duas finalidades são diferentes. Como insumo visual, interessa o realce do relevo, para o que contribuem iluminante posicionado a baixos ângulos de elevação (complemento do ângulo zenital, ou  $90^\circ - \theta_s$ ) e exagero vertical do MDE (Figura 2.15). Tais condições diferem daquelas que representam o aspecto bioclimatológico com maior exatidão: sem exagero vertical e geometria de iluminação representativa da dinâmica anual e diurna do disco solar.

Na Figura 2.15, a coluna à esquerda representa o relevo sem exagero vertical, que, sob iluminação a ângulos elevados traz pouca contribuição para sua percepção. À medida que se promove o exagero vertical, assim como a inclinação solar, as feições se tornam mais claras com realce do sombreado, com o crescente prejuízo da percepção de feições localizadas nas vertentes sombreadas. Como não se recomendam ângulos azimutais de iluminação com componente a Sul (de  $90^\circ$  a  $270^\circ$ ) por causarem percepção invertida – pseudoscopia (VALERIANO, 2007), o iluminante deve estar a Norte, em torno do azimute de  $0^\circ$ , o que faz das vertentes orientadas para Sul as mais sombreadas.

Portanto, convém encontrar um ponto ótimo entre as combinações possíveis, em que as perdas sejam compensadas pela percepção. Como alternativa, pode-se prover mais de um produto, com direções (azimutais) de iluminação complementares, por exemplo,  $45^\circ$  e  $315^\circ$ . Programas com capacidade de gerar sombreamentos arbitrários podem suprir casos em que a configuração escolhida apresenta limitações ao uso pretendido.

Quanto à iluminação como variável bioclimatológica, mantém-se o modelo sem exagero vertical (1x, na Figura 2.15), porém o iluminante deve se posicionar de acordo com a situação representativa do Sol no período de interesse. Nesse caso, os ângulos solares  $\varphi_s$  e  $\theta_s$  são controlados por ciclos de dinâmica anual, da declinação ( $\delta$ ), e diurna, do ângulo horário ( $h$ ), de acordo com a Figura 2.16.

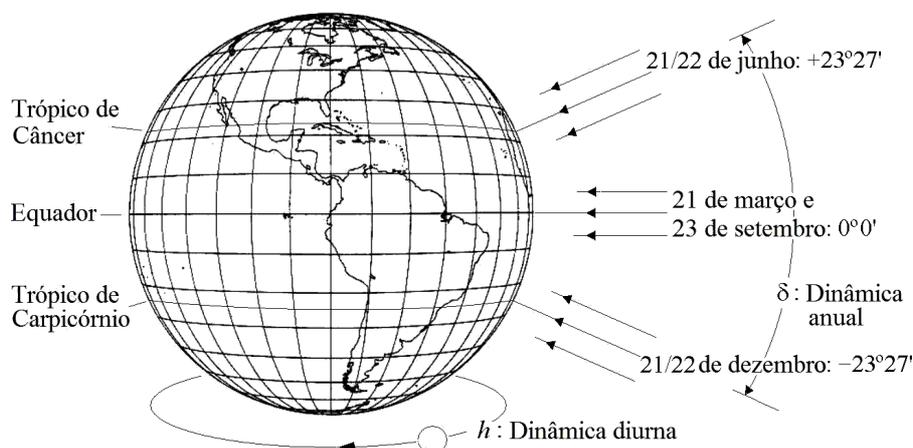


Figura 2.16 – Dinâmicas diurna do ângulo horário ( $h$ ) e anual da declinação solar ( $\delta$ ).

É necessário estabelecer a situação desejável de declinação solar ( $\delta$ ) e ângulo horário ( $h$ ) para aplicar a Equação 2.8 com os valores de  $\theta_s$  e  $\varphi_s$  correspondentes, calculados como (OMETTO, 1981):

$$\cos \theta_s = \sin Y \cdot \sin \delta + \cos Y \cdot \cos \delta \cdot \cos h \quad (2.9)$$

$$\sin \varphi_s = \cos \delta \sin h / \sin \theta_s \quad (2.10)$$

em que  $Y$  representa a latitude local. O ângulo horário ( $h$ ) e o de declinação ( $\delta$ ) são calculados em função da hora local e do dia do ano ( $D$ ) pelas equações:

$$h = 15^\circ \cdot [hora\ local - 12] \quad (2.11)$$

$$\delta = -23,45^\circ \cdot \cos((360^\circ/365) \cdot (D+10)) \quad (2.12)$$

No caso de um único insumo, pode-se representar uma situação média anual, *i. e.*, como num dia de equinócio, com o disco solar sobre o Equador (Figura 2.17). No meio-dia local, a elevação solar varia de acordo com a Latitude, e o azimute solar ( $\varphi_s$ ) deve ser de  $0^\circ$  (N), para o hemisfério Sul, ou de  $180^\circ$  (S), para o hemisfério Norte. Embora o disco solar nesta posição configure a situação de maior intensidade de radiação solar, esta não representa a média da variação diurna.

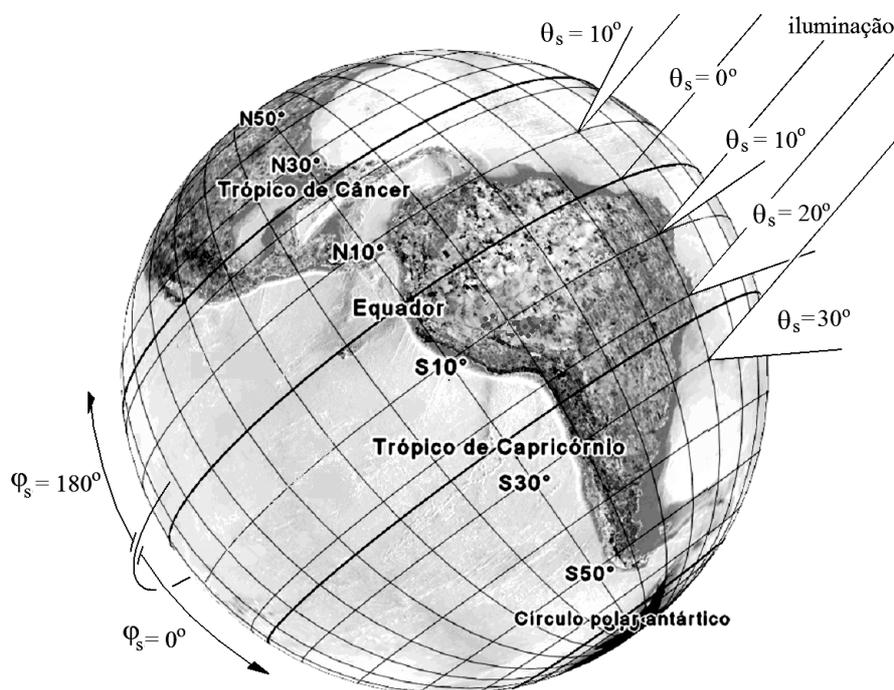


Figura 2.17 – Variação de  $\theta_s$  e  $\varphi_s$  ao meio-dia do equinócio em função da latitude.

Para acolher com fidelidade as variações naturais da geometria solar num insumo representativo da situação média, este deve considerar as dinâmicas diurna e anual dos ângulos de iluminação e integrar as diferentes condições vigentes ao longo do período de interesse. Para um insumo designado a caracterizar determinados períodos do ano, como valores mensais para serem integrados no ciclo de uma cultura agrícola, por exemplo, pode-se calcular a posição do disco solar representativa de cada mês. Casos mais específicos vão exigir tantos mais produtos quanto mais restritos forem os períodos considerados. Os cuidados com a adequação da geometria à situação de interesse não livram o cálculo da iluminação das ressalvas à sua exatidão como variável climática e

das limitações para sua estimativa. Assim, este insumo não deve ser aplicado diretamente como parâmetro para o cálculo da radiação solar, mesmo que restrita à sua fração direta, embora se garantam, do ponto de vista bioclimatológico, as relações numéricas que permitem caracterizar sua distribuição, na escala da exposição topográfica, com bases coerentes.



### 3 DESENVOLVIMENTO

Neste item serão tratadas as linhas gerais do processamento aplicados aos dados SRTM para a construção do TOPODATA, desde o pré-processamento até as derivações básicas de 1ª ordem (declividade e orientação de vertentes) e de 2ª ordem (as curvaturas horizontal e vertical), passando pelo cálculo das distâncias horizontais. Em seguida, serão descritos os processos de pós-processamento para a produção de insumos elaborados. O fluxo geral deste processamento está esquematizado na Figura 3.1.

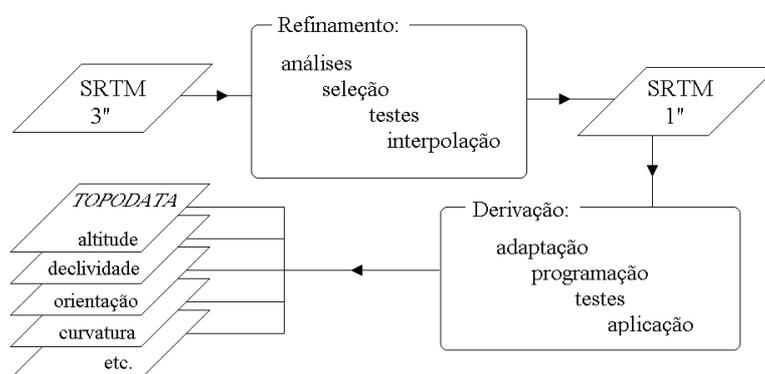


Figura 3.1 – Processamento dos dados SRTM para a construção do TOPODATA.

Partes do processamento exposto na Figura 3.1 estão pormenorizados em documentos precusores, como o desenvolvimento da metodologia geral do refinamento (VALERIANO, 2004) e a seleção do modelo de interpolação (VALERIANO e ROSSETTI, 2008). Embora as fases a partir da derivação sejam enfatizadas no presente documento, convém cobrir as demais etapas, mesmo que com relativa brevidade.

#### 3.1 Preparação dos dados de entrada

##### 3.1.1 Dados de elevação SRTM

Os dados SRTM utilizados para o território nacional correspondem àqueles que hoje se conhecem como versão 1, que era disponibilizada em meados de 2003 pelo Centro de Distribuição de Dados da USGS (*United States Geological Survey*), no endereço <http://seamless.usgs.gov/index.php> em formatos diversos. A obtenção destes dados está relatada em Valeriano (2004). Atualmente, a USGS vem oferecendo outras versões dos dados SRTM, atualizados conforme a evolução dos métodos adotados para pré-

processamento. Os dados da versão 1 ainda podem ser encontrados através da página do *Jet Propulsion Laboratory* da *National Agency for Space Administration* (JPL), a partir do endereço <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, em formato de extensão *hgt*.

A coleção de dados usados para o território nacional foi capturada em formato *geotiff* (TIFF com georreferência) da versão 1. Possíveis expansões (exemplo, América do Sul) do TOPODATA, além da coleção mencionada para o Brasil (VALERIANO, 2004), devem utilizar dados de versões mais modernas, a partir daquela atualmente disponibilizada pela USGS, que é a versão 4. Os dados, originalmente coletados na área exata de cada quadrícula da articulação em 1:250.000 do Sistema Cartográfico Brasileiro, foram concatenados em mosaico para novo recorte, cujas folhas excedem a posição das bordas originais em uma distância de  $\Delta h$  (Figura 3.2), para contornar efeitos indesejáveis de descontinuidade. As coletas planejadas para futuras áreas de cobertura (i.e., além do Brasil) já devem ser feitas com esta sobreposição entre folhas adjacentes.

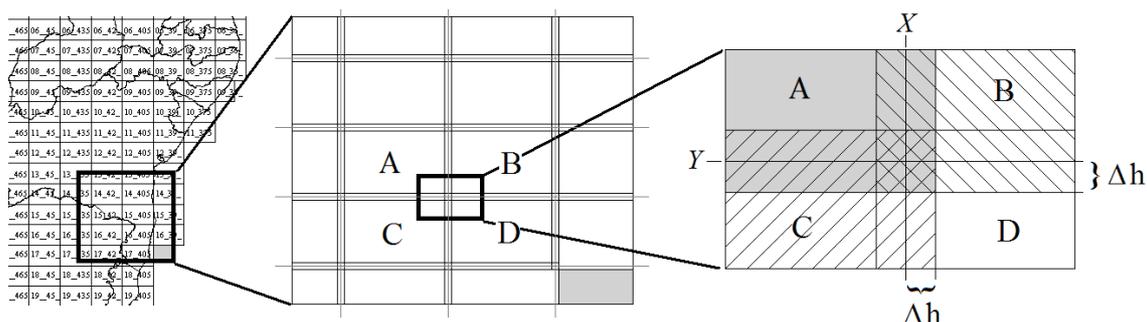


Figura 3.2 – Esquema de sobreposição entre folhas adjacentes.

A preparação dos dados de entrada se resume ao preenchimento de falhas, conversão e exportação para o formato ASCII em 3 colunas de  $x$ ,  $y$  e  $z$ , operações realizadas com o programa *ENVI* (RESEARCH SYSTEMS Inc., 2002). Cada arquivo foi recortado com margens ( $\Delta h$ ) de 30 *pixels* ( $0,025^\circ$  ou  $\sim 2700\text{m}$ ) em cada lado (Figura 3.2), configurando uma grade de 1860 colunas por 1260 linhas. Os processamentos foram feitos com estas dimensões excedentes até a finalização dos produtos, quando finalmente os resultados foram cortados nos limites  $X$  e  $Y$  exatos das quadrículas.

### 3.1.2 Dados auxiliares: latitude

A latitude é uma variável de entrada para os cálculos de iluminação/sombreamento (Equação 2.9 no item 2.10). Uma vez que neste cálculo é operada localmente em operações escalares e de sobreposição, foi necessário criar planos de informação com valores de latitude de cada *pixel*. A preparação dos dados de altitude em cada folha é simples a princípio, bastando indicar a própria coordenada  $y$  como a cota ( $z$ ) de interesse. Assim, basta aplicar interpolações sobre o esquema  $x,y,z$ , porém com colunas  $x,y,y$  (coluna  $z$  igual à coluna  $y$ ). Dada a continuidade e o baixo gradiente da variação da latitude ao longo das quadrículas, considerou-se a interpolação linear suficiente para a produção dos planos de latitude.

Embora simples, a aplicação direta deste princípio iria requerer, para o Brasil, 559 planos de informação adicionais de latitude, com os decorrentes custos de espaço computacional, de tempo de processamento e de organização de arquivos. A solução adotada foi criar uma única coluna de folhas ao longo de um meridiano (longitudes constantes) e replicar, a cada longitude, o arquivo correspondente à faixa de latitude em questão (Figura 3.3).

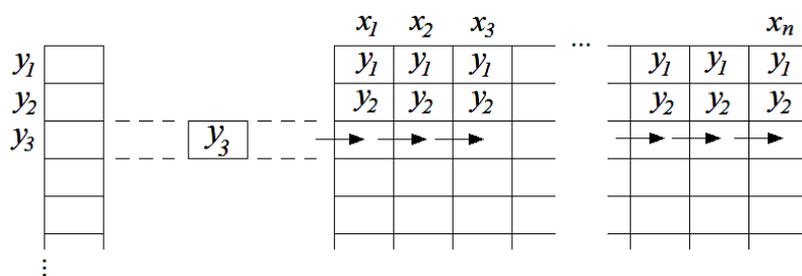


Figura 3.3 – Deslocamento longitudinal dos planos de latitude.

Assim, cada folha de prefixo 02\_NN (canto superior esquerdo a 2º de latitude), por exemplo, foi duplicada com novo nome para ter seus valores repostos pelos valores de um único plano de informação, criado com as latitudes correspondentes àquelas das folhas 02\_NN. Na prática, esta operação configura um deslocamento longitudinal de um mesmo plano de latitudes. A mudança do plano de latitude ( $y_n$ ) é feita no começo do processamento de cada linha de quadrículas, enquanto o deslocamento longitudinal ( $x_n$ ) é feito antes do processamento de cada quadrícula de uma mesma latitude (Figura 3.3).

Uma vez que a latitude foi utilizada somente para a Equação 2.9, foram calculados os senos das latitudes previamente, e os deslocamentos foram aplicados sobre estes, para economia geral do processo.

### 3.1.3 Dados auxiliares: distância horizontal (resolução espacial)

Ao longo dos processos de derivação, a distância horizontal, expressa em metros no terreno, é uma variável básica para se determinarem os intervalos de derivação, usados como denominador em grande parte das derivações geomorfométricas. Do mesmo modo que no cálculo da latitude, esta variável requer a construção de planos de informação auxiliares. Em analogia ao exposto no item 3.1.2, o princípio de criação de uma única quadrícula de resolução espacial requer a espacialização de dados em colunas  $x,y,z$ , em que  $z$  deve corresponder aos valores de distância para um arco de 1" (a resolução do MDE em coordenadas geográficas, constante). Os valores de distância para este arco variam com a latitude, conforme os fundamentos expostos no item 2.3, que por sua vez foram programados em uma planilha, para fornecer distâncias longitudinais em função de arcos e latitudes arbitrários. Para a criação do arquivo  $x,y,Dh_c(x)$ , em que  $Dh_c(x)$  é o espaçamento, ou distância, longitudinal, estes valores foram gerados em pontos a 15' de espaçamento (4 posições por grau). Os arquivos  $x,y,Dh_c(x)$  assim gerados foram então interpolados nas folhas de interesse (Figura 3.4).

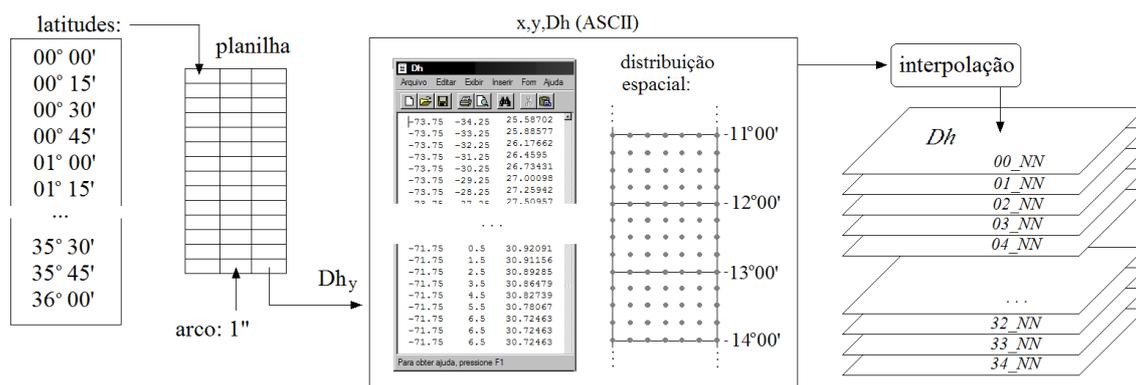


Figura 3.4 – Preparação dos planos de distâncias horizontais.

Os planos de distância longitudinal foram criados através de interpolação polinomial, linear ao longo do eixo da longitude e quadrática ao longo da latitude. Em analogia ao que foi feito para as latitudes, uma única coluna de quadrículas foi calculada e, do

mesmo modo (Figura 3.3), cada quadrícula correspondente a um faixa de latitude foi deslocada longitudinalmente. Assim inseridas em SIG, as distâncias longitudinais foram combinadas com a distância latitudinal, tomada como constante (30,833m), para criação dos planos de distância diagonal (item 2.3), também aplicados nas derivações (item 3.4).

### 3.2 Interpolações

As interpolações foram programadas em programas de lote (macros) do aplicativo *Surfer* (GOLDEN SOFTWARE, 1995), versão 6.0, que permite a programação com relativa facilidade. O programa define o arquivo ( $x,y,z$ ) de entrada, as colunas de  $x$ ,  $y$  e  $z$ , a geometria da superfície interpolada – posição geográfica das extremidades, número de linhas e colunas – e o método de interpolação com seus parâmetros de controle. Para fins de migração posterior à interpolação (para o SIG, em que a grade formada será derivada), o programa inclui ainda o corte vertical da quadrícula em 4 segmentos. A expressão geral de interpolação de cada folha foi estruturada conforme a seguinte sintaxe:

```
SET srf=CreateObject("Surfer.App")

srf.GridData ("_6_615.txt",xcol=0,ycol=1,zcol=2,\
xmin=-61.525,xmax=-59.975,ymin=4.975,ymax=6.025,nrow=3780,ncol=5580,\
GridMethod=1,OutGrid="_6_615.grd",outfmt=1,\
variotype=2,varioscale=1,variolenh=0.0093,errorvariance=0)
srf.GridExtract("_6_615.grd", c1=0001, c2=1395, OutGrid="_6_615a", OutFmt=2)
srf.GridExtract("_6_615.grd", c1=1396, c2=2790, OutGrid="_6_615b", OutFmt=2)
srf.GridExtract("_6_615.grd", c1=2791, c2=4185, OutGrid="_6_615c", OutFmt=2)
srf.GridExtract("_6_615.grd", c1=4186, c2=5580, OutGrid="_6_615d", OutFmt=2)
```

A linha isolada na abertura do excerto é uma formalidade de início de cada arquivo de macro. As demais linhas constituem um módulo a ser repetido a cada folha, com as modificações pertinentes (arquivo de entrada, geometria e nome de saída), podendo-se anexar quantos módulos se queiram. A primeira linha (*srf.GridData...*) de cada módulo define a entrada, com a especificação do arquivo de dados e suas colunas; a segunda linha (*xmin=...*) define a geometria da nova grade; a terceira linha (*GridMethod=...*) especifica o método de interpolação e o arquivo de saída com seu formato; a quarta linha (*variotype=...*) contém os parâmetros de controle da interpolação, que variam conforme o método aplicado. No caso dos dados de elevação, o método aplicado foi a krigagem, pelo que os parâmetros são os coeficientes geoestatísticos selecionados para a

interpolação (VALERIANO e ROSSETTI, 2008). As últimas quatro linhas referem-se ao corte da grade formada.

As grades de dados altimétricos produzidas nesta etapa correspondem aos arquivos de extensão *.grd* disponibilizados no TOPODATA, de formato binário e com as bordas estendidas para sobreposição. Ressalta-se que os cortes para migração foram produzidos em formato ASCII como condição para sua importação pelo SIG. Estes ocupam o dobro do espaço computacional em relação ao formato binário, porém foram descartados logo após a importação pelo SIG.

Os lotes programados para a criação dos planos de distância horizontal (resolução espacial) obedeceram às mesmas características de geometria e de funcionalidade geral, exceto pelo arquivo de entrada e pelo método de interpolação (polinomial) e os decorrentes parâmetros de controle, que configuram o grau (ordem) do polinômio de ajuste em *x* e em *y* (*maxXorder* e *maxYorder*):

```
srf.GridData ("c:\sig\srf\dh.txt",xcol=0,ycol=1,zcol=2,\
xmin=-73.525,xmax=-71.975,ymin=-34.025,ymax=-32.975,nrow=3780,ncol=5580,\
GridMethod=3,OutGrid="res33s.grd",outfmt=1,searchmethod=1,Dupmethod=1,\
MaxXOrder=1,MaxYOrder=2,TotalOrder=3)
srf.GridExtract("res33s.grd", c1=0001, c2=1395, OutGrid="res33sa", OutFmt=2)
srf.GridExtract("res33s.grd", c1=1396, c2=2790, OutGrid="res33sb", OutFmt=2)
srf.GridExtract("res33s.grd", c1=2791, c2=4185, OutGrid="res33sc", OutFmt=2)
srf.GridExtract("res33s.grd", c1=4186, c2=5580, OutGrid="res33sd", OutFmt=2)
```

Para a criação dos planos de latitude, os módulos puderam ser aplicados sobre os mesmos arquivos de dados SRTM, porém especificaram-se as colunas de modo que a coluna de latitudes foi especificada como fonte dos valores de *z* (*zcol=1*). O método de interpolação polinomial foi configurado para ser de 1ª ordem (linear) nos dois eixos.

```
srf.GridData ("_6_615.txt",xcol=0,ycol=1,zcol=1,\
xmin=-61.525,xmax=-59.975,ymin=4.975,ymax=6.025,nrow=3780,ncol=5580,\
GridMethod=3,OutGrid="lat_6n.grd",outfmt=1,searchmethod=1,Dupmethod=1,\
MaxXOrder=1,MaxYOrder=1,TotalOrder=1)
srf.GridExtract("lat_6n.grd", c1=0001, c2=1395, OutGrid="lat_6na", OutFmt=2)
srf.GridExtract("lat_6n.grd", c1=1396, c2=2790, OutGrid="lat_6nb", OutFmt=2)
srf.GridExtract("lat_6n.grd", c1=2791, c2=4185, OutGrid="lat_6nc", OutFmt=2)
srf.GridExtract("lat_6n.grd", c1=4186, c2=5580, OutGrid="lat_6nd", OutFmt=2)
```

As grades de latitude e distância horizontal criadas diretamente pela interpolação foram descartadas, uma vez que estas variáveis são estritamente insumos auxiliares para derivação. Portanto, somente os cortes foram preservados para importação pelo SIG, em que serão utilizados nos cálculos de derivação geomorfométrica, e então descartados.

### 3.3 Importação e montagem dos planos de entrada no SIG

O processamento principal dos dados foi conduzido no programa *Idrisi* versão 2.0 (EASTMAN, 1995), através de programas de lote estruturados na linguagem interna do SIG – IML (*Idrisi Macro Language*). Por este mesmo recurso, foi programada a importação e a montagem dos planos de informação básicos (altimetria e dados auxiliares de latitude e distância horizontal) a partir dos cortes das grades interpoladas. Na importação de uma grade do *Surfer*, um único comando basta. Porém, dado a limitação do SIG em relação ao número de colunas do arquivo a ser importado, as grades foram importadas em partes (os quatro cortes ao fim de cada módulo, v. item 3.2) para serem montadas por concatenação (processo conhecido também como “mosaicagem”). Este consiste na criação de uma imagem vazia seguida da colagem das partes nas posições apropriadas (Figura 3.5).

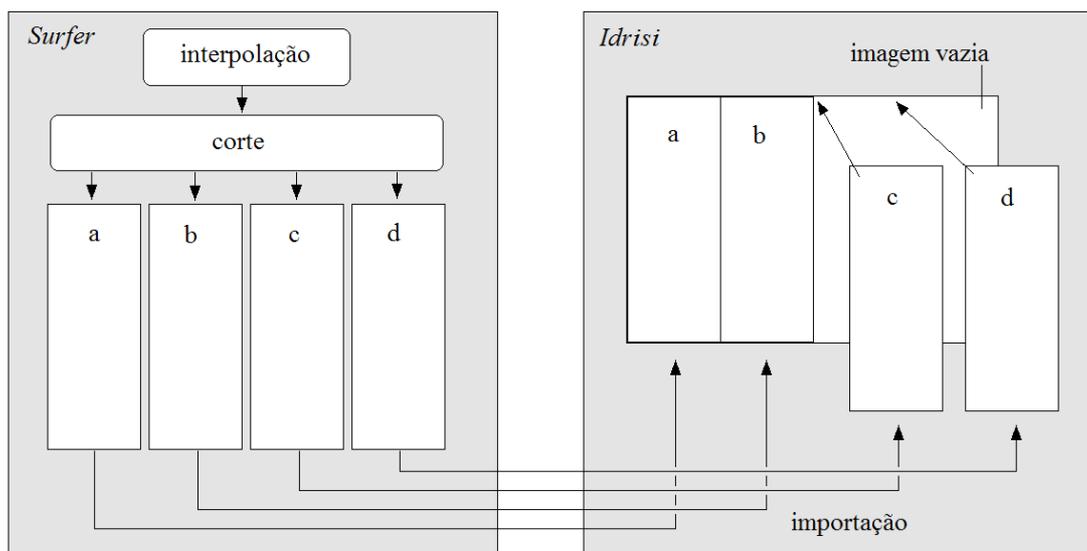


Figura 3.5 – Montagem por concatenação dos planos de dados interpolados.

Em IML, cada linha corresponde a um comando completo de uma operação e sua sintaxe é normalmente formada pelo nome da operação, seguido do arquivo, ou arquivos, de entrada e, enfim, os parâmetros da operação. Seis comandos foram necessários para a importação e montagem de uma folha. No excerto abaixo, as quatro primeiras linhas são os comandos de importação dos cortes de grades do *Surfer*, a quinta perfaz a criação da a imagem vazia e a última controla a montagem por concatenação.

Em todos os dados importados (altimetria, latitude e distâncias horizontais), as dimensões excedentes das folhas foram mantidas, devido ao grande número de operações de vizinhança planejadas para estes planos de informação.

```
srfidris x 1 _6_615a a lat/long m
srfidris x 1 _6_615b b lat/long m
srfidris x 1 _6_615c c lat/long m
srfidris x 1 _6_615d d lat/long m
initial x _ 2 1 0 2 5580 3780 lat/long deg -61.525 -59.975 4.975 6.025 1 m
concat x _ 4 _6_615zn 1 a 1 0 0 b 1 1395 0 c 1 2790 0 d 1 4185 0
```

As importações foram estruturadas em um único arquivo de macro de cada variável, cada qual com todas as folhas encadeadas. Após esta etapa, todos os arquivos referentes aos cortes de grade foram descartados.

### 3.4 Derivações geomorfométricas

As derivações geomorfométricas foram desenvolvidas inicialmente em programas de lote independentes, em desenvolvimentos autônomos publicados em anos anteriores ao desenvolvimento do TOPODATA. Após a pesquisa de adaptação às características dos dados SRTM, os programas foram fundidos em um único lote para a derivação do conjunto das variáveis de interesse. Numa única folha, a derivação completa requer três planos de informação, a latitude, as distâncias horizontais e a altimetria (Figura 3.6).

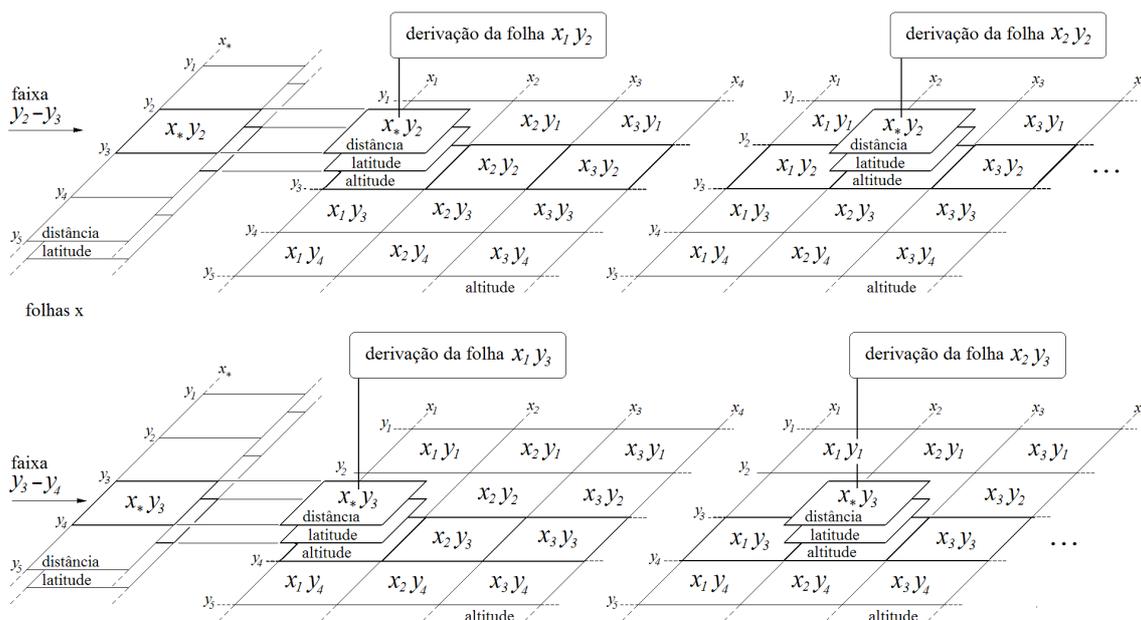


Figura 3.6 – Deslocamento dos planos de informação requeridos para a derivação.

Para implementação das condições requeridas para a derivação de uma folha, os dados auxiliares de latitude (`lat_yy.img`) e de distância horizontal longitudinal (`rex_yy.img`) de cada faixa latitudinal de folhas são alocados na longitude apropriada (Figura 3.6) através de uma operação de concatenação. Nesta operação, foi criada uma imagem vazia (`res.img`) com a mesma geometria da folha em questão e os valores de latitude (`lat_6n`, para a folha do exemplo, `_6_615`, respectiva à folha de latitude 6° norte), assim como de distâncias horizontais longitudinais (`rex_6n`), são copiados nas linhas e colunas da nova imagem. Os comandos para isto são:

```
initial x res 2 1 0 1 _6_615 m
concat x _6_615 1 res 1 rex_6n 1 0 0
initial x lat 2 1 0 1 _6_615 m
concat x _6_615 1 lat 1 lat_6n 1 0 0
```

Destes comandos foram criadas as imagens dos planos de latitude (`lat.img`) e distância horizontal longitudinal (`rex_yy.img`), de cada folha a ser derivada, como aquela do exemplo exposto acima. Enquanto a distância horizontal latitudinal é aplicada como constante (30,833m), a distância horizontal diagonal (`red.img`, abaixo) é calculada como a hipotenusa as componentes ortogonais da distância pelas operações escalares:

```
scalar x rex_yy rex2 5 2
scalar x rex2 rex2rey2 1 950.673889
scalar x rex2rey2 red 5 0.5
```

Os outros elementos de cálculo das derivações advêm dos dados de altitude, através de operações aplicadas ao MDE. As principais operações das derivações consistem, geralmente, em análises de vizinhança (v. item 2.2), também conhecidas por “filtragens”. Estas operações – comando *filter* – são especificadas pelos coeficientes das janelas móveis, que foram elaboradas para fornecer os diversos gradientes, diferenças e valores requeridos nas equações de estimativa das variáveis geomorfométricas. Além dessas, as operações de sobreposição, escalares e transformações – respectivamente, os comandos *overlay*, *scalar* e *transfor* – constituem as principais operações de SIG

Muitas vezes, o fluxo de operações teve que ser desdobrado em diferentes marchas de processamento em função de condições locais específicas. Assim, diferentes modos de cálculo foram encadeados em paralelo, configurando um fluxo não-linear, com mais de uma saída. Uma vez que as operações em estrutura de macro recaem de maneira

uniforme sobre toda a área dos planos de informação tratados, técnicas de lógica booleana foram usadas para controle do fluxo entre os processos paralelos, de modo a se unificarem os resultados válidos em um único plano final. As imagens booleanas usadas foram criadas com operações de reclassificação (comando *reclass*) sobre os dados que condicionam a forma de cálculo. Nas curvaturas, por exemplo, os resultados de diferentes cálculos de derivações direcionais são selecionados em função da orientação de vertente com este artifício (Figuras 2.9 e 2.11).

### 3.4.1 Declividade

O cálculo da declividade foi baseado na derivação em janelas móveis de dimensões 3x3. O método fundamentado no item 2.4 requer o desnível de cada ponto em relação a cada um de seus 8 vizinhos na janela móvel. Dos desníveis recíprocos em cada direção (exemplos: a N e a S; a NE e a SW etc.) foram comparados para seleção dos valores máximos. Foram considerados dois sistemas de eixos ortogonais, diagonal ou em xis (NE-SW e NW e SW) e cardinal ou em cruz (N-S e E-W). Para cada sistema, os desníveis máximos em cada um dos eixos ortogonais foram operados para determinação do vetor resultante. Cada vetor de desnível ( $\Delta z$ ) foi dividido pela respectiva distância horizontal (as cardinais - longitudinal ou latitudinal – divididas antes da comparação e as diagonais, divididas após as comparações) para determinação das declividades parciais ( $\Delta z'$ ). Das declividades dos dois sistemas, foi selecionada a de maior valor como a estimativa final da declividade (SN, Figura 3.7).

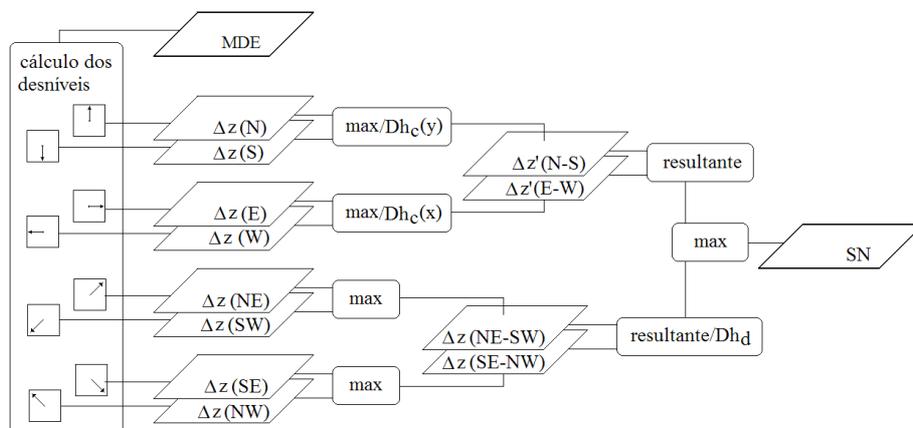


Figura 3.7 – Fase numérica do cálculo da declividade.

Para a programação do cálculo da declividade, os desníveis foram produzidos com os comandos abaixo, que contêm no seu final os 9 coeficientes das janelas móveis, na ordem de leitura apresentada na Figura 3.7. As operações restantes consistem em operações locais e transformações diversas, em atendimento ao fluxo exposto nas Figuras 3.7 e 3.8, com os comandos *overlay*, *scalar* e *transfor*, essencialmente.

```

filter x _____zn dn 6 0 1 0 0 -1 0 0 0 0
filter x _____zn ds 6 0 0 0 0 -1 0 0 1 0
filter x _____zn de 6 0 0 0 0 -1 1 0 0 0
filter x _____zn dw 6 0 0 0 1 -1 0 0 0 0
filter x _____zn dne 6 0 0 1 0 -1 0 0 0 0
filter x _____zn dsw 6 0 0 0 0 -1 0 1 0 0
filter x _____zn dse 6 0 0 0 0 -1 0 0 0 1
filter x _____zn dnw 6 1 0 0 0 -1 0 0 0 0

```

Numa primeira etapa de pós-processamento (Figura 3.8), a primeira estimativa da declividade (SN) foi suavizada quatro vezes com filtro média de tamanho 3x3 e o resultado ajustado por um acréscimo de 3%, seguindo a metodologia estabelecida em estudos anteriores (VALERIANO, 2003). Tais medidas promovem a correlação com dados medidos através da diminuição da dispersão dos resultados de declividade e o efeito sobre a distribuição geral é compensado com o ajuste. Este plano (SN<sub>1</sub>) e a primeira estimativa da declividade (SN), ambos ainda na forma numérica, foram integrados numa segunda etapa do pós-processamento, de reclassificações e filtragens, essencialmente, para geração dos planos de classes de declive, SA, SB e SC (Figura 3.8).

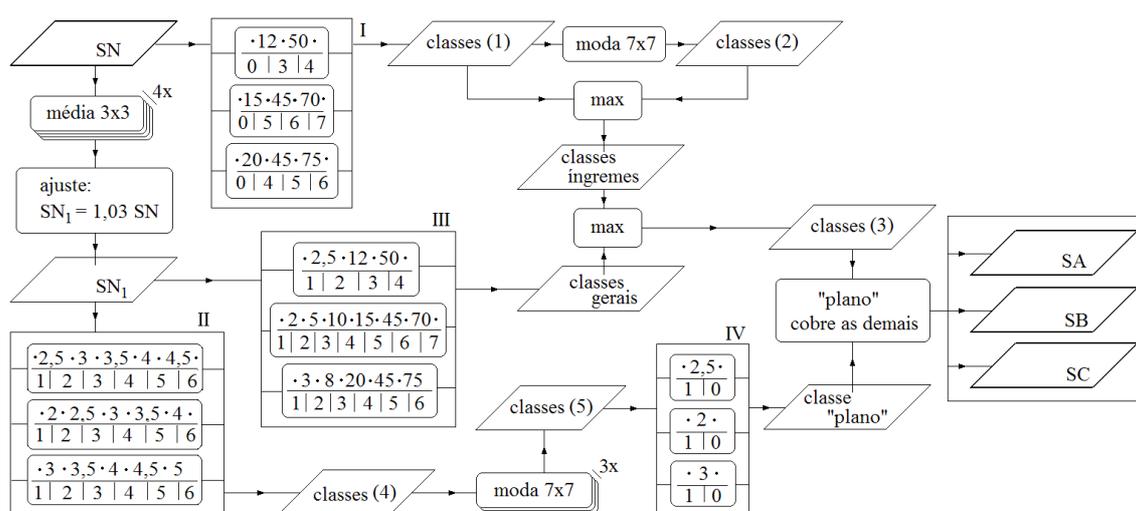


Figura 3.8 – Pós-processamento da declividade.

No fluxo geral do pós-processamento da declividade (Figura 3.8), são aplicadas operações de fatiamento (*reclassificação* ou, mais simplesmente *classificação*) em quatro modalidades, com finalidades distintas. Para que se preservem ao máximo os valores mais altos de declividade, uma classificação (I) foi aplicada diretamente sobre o plano SN, para definição das classes mais íngremes. Dada sua raridade e distribuição esparsa, as áreas íngremes são suscetíveis a remoção nos processos de filtragem. No entanto, uma suavização das classes através de filtro moda mostrou-se oportuna para incluir eventuais picos e talvegues na classe do relevo de seu entorno, pois estas feições constituem, indesejavelmente, pontos isolados de classe plana quando não se observa este cuidado.

Na outra extremidade da distribuição dos valores de declividade, as áreas planas são classificadas em intervalos mais estreitos pelos diferentes sistemas de limites rígidos. Assim, o fatiamento direto e simples costuma resultar em limites geográficos difusos entre as classes mais baixas de declividade, apesar de a tendência de maior contigüidade das áreas planas ser uma condição comum e natural, devido aos fatores de formação do relevo. Ao contrário, tal efeito se caracteriza por um mapeamento de numerosos segmentos pequenos de terreno na classe plana, em alternância à classe imediatamente superior, em torno do que seria uma linha coesa de separação, mais realista e conveniente. A este mecanismo soma-se o efeito dossel, cuja contribuição relativa é mais expressiva em áreas planas, o que torna o mapeamento da declividade mais sensível a qualquer perturbação. Com o intuito de promover a coesão dos segmentos nesta situação, foi desenvolvido um processo de suavização mais intensa, baseado em filtro moda em janela 7x7. Neste processo, o fatiamento da classe mais baixa incluiu, no intervalo logo acima, várias classes de intervalo mais estreito. Dessa forma, a identificação da classe “plana” como moda pela filtragem é favorecida pelo seu confronto com numerosos segmentos de classes distintas, em vez de uma única classe “não-plana” (Figura 3.8).

### **3.4.2 Orientação de vertentes**

A orientação de vertente foi produzida pela função *aspect* do SIG diretamente, sem quaisquer modificações em seu funcionamento interno. No entanto, seu uso foi

acompanhado de operações de pré e pós-processamento, conforme o encadeamento exposto na Figura 3.9.

O uso da função *aspect*, que calcula a orientação de vertentes, foi precedido pela suavização do MDE, mediante a aplicação de filtro de média em 3x3 seguido de duas aplicações de filtro de média em 7x7. Uma vez calculada a orientação de vertentes (ON), esta foi classificada em octantes respectivos às direções cardinais e diagonais, codificados de 1 a 8. A forma final das classes proveio da filtragem de moda (3x3) dos octantes provenientes da classificação (Figura 3.9).

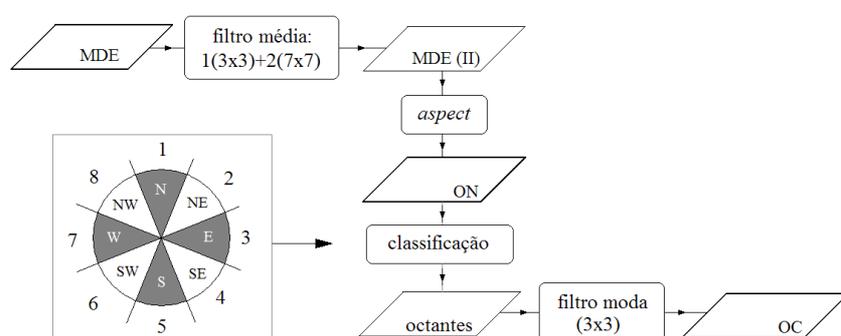


Figura 3.9 – Processamento geral do MDE para a orientação de vertentes.

### 3.4.3 Curvatura vertical

A curvatura vertical foi calculada com uma seqüência de operações (fluxo geral na Figura 2.9 e pós-processamento na Figura 3.10), cujo núcleo consiste na derivação de 2ª ordem da altimetria em relação à distância horizontal, no sentido da orientação de vertente. Em cada direção de octante, esta derivação foi programada como duas passagens seqüenciais de janelas móveis, que operam os dois desníveis (anterior e posterior) recíprocos a seu centro, porém no mesmo sentido (Figura 2.8 e 2.9). Pelas linhas exemplificadas abaixo, obtêm-se os desníveis  $d_1$  e  $d_{-1}$ , que correspondem aos acréscimos de altitude ao se encaminhar na direção Norte.

```
filter x _____zn d1 6 0 1 0 0 -1 0 0 0 0
filter x _____zn d_1 6 0 0 0 0 0 1 0 0 -1 0
```

Ao se dividirem estes desníveis pelas respectivas distâncias horizontais, obtêm-se as tangentes e, por trigonometria, os valores da declividade anterior e posterior (considerando a direção de derivação) ao ponto analisado. Normalizando-se esta

diferença pela distância horizontal correspondente, estimam-se valores de curvatura na direção de derivação. Esta operação foi repetida nas direções N, NE, E e SE. As inversões de sinal para as vertentes opostas a estas direções (S, SW, W e NW) ocorrem de tal modo que os resultados serão os mesmos. Portanto, o plano de octantes (3.4.2) foi reclassificado em 4 booleanas, as quais contemplam, cada uma, os dois sentidos recíprocos de sua direção, através dos comandos:

```
reclass x i oc b_N 2 1 1 2 0 2 5 1 5 6 0 6 9 1 9 10 -9999
reclass x i oc b_NE 2 0 1 2 1 2 3 0 3 6 1 6 7 0 7 10 -9999
reclass x i oc b_E 2 0 1 3 1 3 4 0 4 7 1 7 8 0 8 10 -9999
reclass x i oc b_SE 2 0 1 4 1 4 5 0 5 8 1 8 9 0 9 10 -9999
```

Os produtos ordenados entre estas 4 booleanas e seus respectivos valores de curvatura foram somados para o armazenamento dos resultados válidos em um único plano de informação. Este primeiro resultado foi ainda suavizado por três passagens de filtro de média em 3x3, antes do armazenamento final dos valores de curvatura vertical (VN). Para a classificação da curvatura vertical no esquema de 3 classes (V3 - côncava, retilínea e convexa), foi utilizado o plano VN original, sem tratamento. Para o esquema de 5 classes (V5), o plano VN foi mais uma vez suavizado, com filtro média em janela de dimensão 7x7 (Figura 3.10).

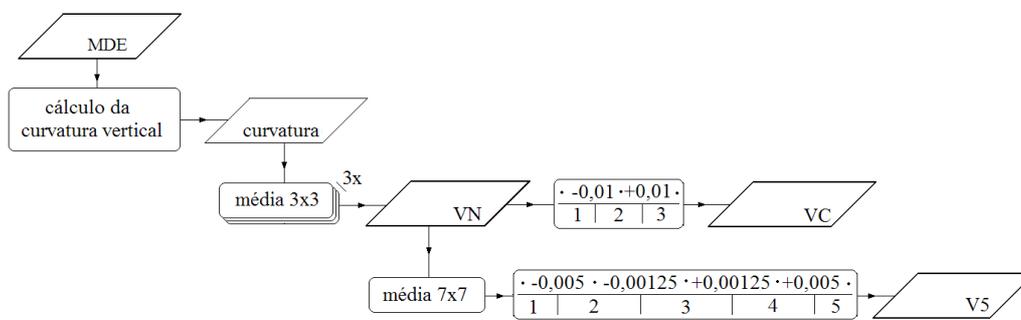


Figura 3.10 – Pós-processamento da curvatura vertical.

### 3.4.4 Curvatura horizontal e ADD

A curvatura horizontal foi desenvolvida inicialmente como um descritor geomorfométrico autônomo, com vistas à caracterização de atributos do terreno relacionados à convergência e divergência dos fluxos superficiais. Além desta finalidade, os casos extremos de sua distribuição mostram-se notavelmente associados

às feições de drenagem, ou talwegues (convergentes) e ao posicionamento dos divisores de água (extrema divergência). Para ambos os casos, a essência de sua determinação (Figura 2.11) pode ser mantida, assim como sua conceituação e demais aspectos decorrentes de sua distribuição. Porém, as condições desejáveis para sua determinação podem mudar de uma aplicação à outra.

Os estudos de desenvolvimento desta variável trouxeram resultados que sugerem seu caráter altamente local, dado o extremo detalhamento de sua distribuição e a relativa estabilidade dos padrões quando observada em escala regionalizada. Tais observações indicam a conveniência de se promover uma generalização da curvatura horizontal, para favorecer a caracterização do terreno em manchas ou segmentos com razoável coesão espacial. Se tal generalização convém à caracterização do terreno, não se pode dizer o mesmo quando se objetiva o delineamento das feições de drenagem. Assim, a obtenção da curvatura horizontal foi repetida sob duas condições, de acordo com a suavização do MDE de entrada. Os resultados mais generalizados (do MDE suavizado) foram aplicados a saídas diversas, enquanto o resultado detalhado (do MDE original) foi aplicado ao delineamento da drenagem (Figura 3.11).

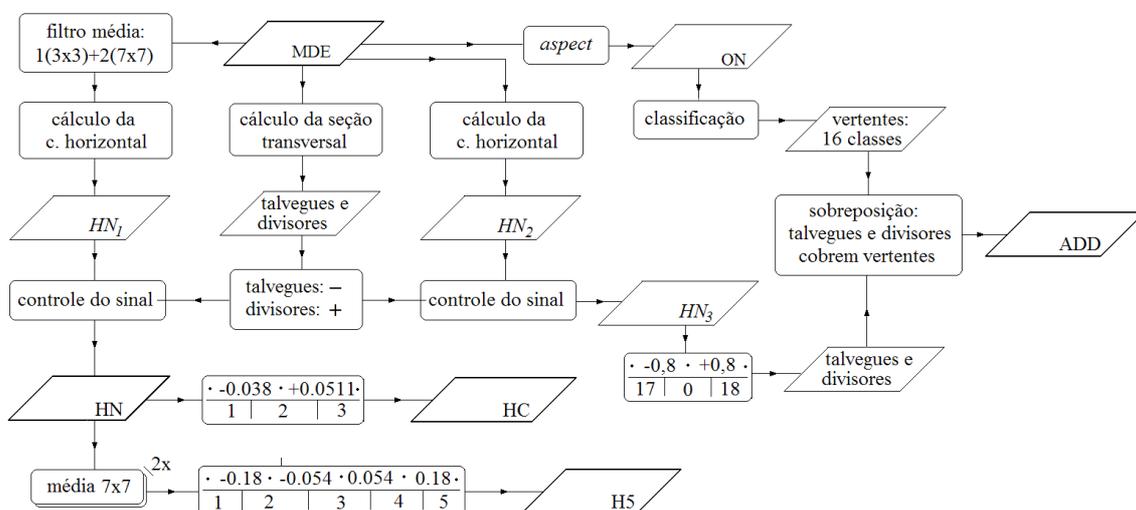


Figura 3.11 – Fluxo de processamento do processo ADD e das curvaturas horizontais.

Ocasionalmente, nas situações extremas de convergência e divergência, quando a diferença de orientações vizinhas se aproxima de  $180^\circ$ , ocorre uma inversão do sinal esperado. Tal problema decorre da relação invertida entre o valor local da orientação e a diferença de direção entre os ângulos vizinhos, o que é possível ocorrer em vertentes

contrapostas, uma vez que as diferenças angulares de  $179^\circ$  ou  $181^\circ$ , embora próximas em absoluto, correspondem a bissetrizes diametralmente opostas. Assim, o controle do sinal da curvatura nos talvegues e divisores indicados pela análise da seção transversal (Figura 2.12) foi acrescido ao fluxo geral de obtenção das curvaturas horizontais. Dessa forma, parte do processo ADD original (VALERIANO, 2002) foi incorporado ao cálculo de curvatura horizontal e, reciprocamente, as feições de drenagem do produto ADD passaram a ser aquelas evidenciadas pela curvatura horizontal (Figura 3.11).

### 3.4.5 Iluminação/sombreamento

Os processos relativos à iluminação tiveram saídas com funções distintas para o usuário. Um produto simples foi elaborado para servir de insumo para análise visual do terreno, com situação de iluminação favorável a esta função, o que incluiu a aplicação de exagero vertical no MDE. Uma outra linha de processamento foi elaborada para produzir os valores de iluminação correspondentes às condições reais da dinâmica solar vigente, anual e diurna, para ser usada como uma variável para aplicação em ecofisiologia.

No primeiro caso, testes com diferentes intérpretes com diferentes preocupações em áreas de relevo distintos levaram a se estabelecer como configuração um exagero vertical de 12x, iluminante a Norte ( $0^\circ$  em azimute solar,  $\varphi_s$ ) e com elevação (complemento do ângulo zenital solar,  $\theta_s$ ) a  $60^\circ$ . Devido ao grande número de operações trigonométricas aplicadas sobre os dados desta configuração, estes foram atribuídos a planos de informação nos procedimentos de entrada de dados. Este procedimento consistiu na criação de uma imagem (*initial*), com geometria copiada da folha sob processamento (aqui com o prefixo “\_\_\_\_”), ao qual se atribuem os dados de interesse, de acordo com as linhas de comando abaixo:

```
initial x ev 2 1 12.0000 1 ____zn deg
initial x fs 2 1 00.0000 1 ____zn deg
initial x e 2 1 60.0000 1 ____zn deg
```

A partir destes planos de informação de entrada, juntamente com a declividade (\_\_\_\_sn) e a orientação de vertentes (\_\_\_\_on), o cálculo da iluminação foi dirigido à solução da Equação 2.8 (item 2.9), através de conversões (radianos), operações trigonométricas,

escalares e de sobreposição. Como singularidade deste fluxo, temos o rebatimento dos resultados finais (cossenos) negativos para o valor nulo. Cabe a ressalva de que o cálculo implementado não levou em conta a projeção de sombras de uma vertente a outra, ou ao solo, devido a problemas de operacionalização da rotina programada.

No segundo caso, que será referido aqui como *iluminação solar*, a configuração do iluminante foi definida conforme a dinâmica do Sol, o que requer o atendimento prévio das Equações 2.9 a 2.12 (item 2.9), que permitem calcular os ângulos  $\theta_s$  e  $\varphi_s$ . Visto que estes são função da latitude, os respectivos planos foram empregados de acordo com o esquema descrito ao longo do item 3.1.2.

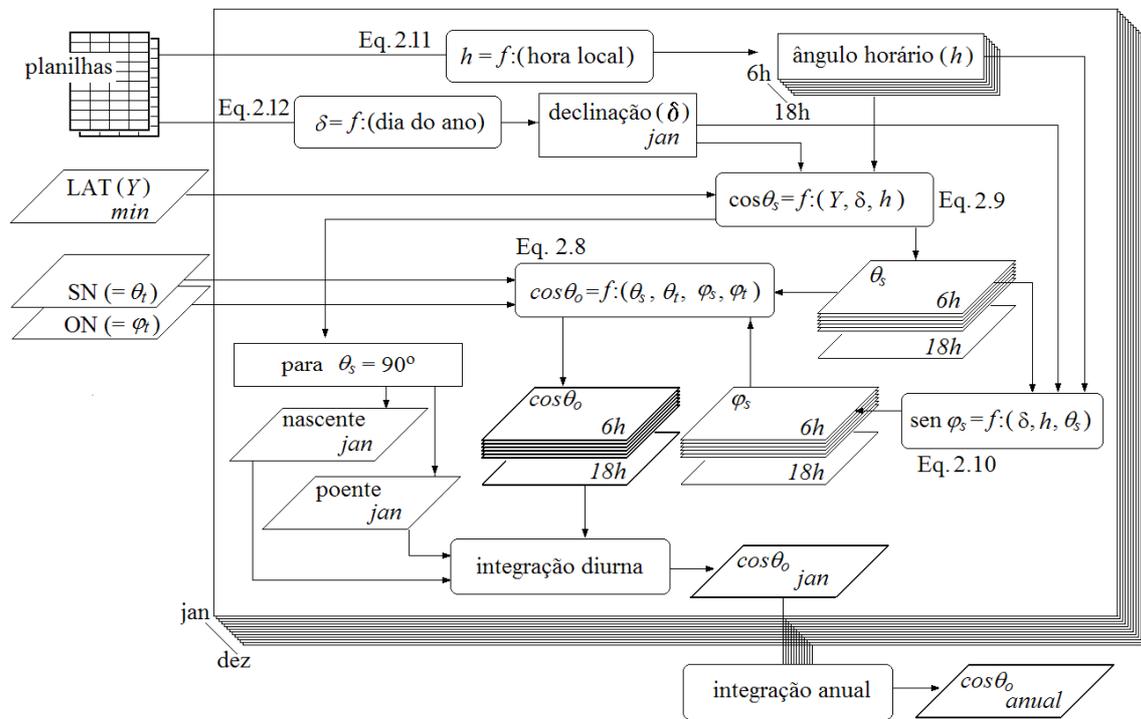


Figura 3.12 - Fluxo geral da obtenção dos fatores mensais e anuais de iluminação.

Na estrutura geral do algoritmo (Figura 3.12), o cálculo de  $\theta_s$  e  $\varphi_s$  foi feito para diferentes horários do dia representativo de cada um dos 12 meses. Em cada horário, estes resultados são aplicados conforme a Equação 2.8 para obtenção dos respectivos fatores momentâneos de iluminação ( $\cos \theta_o$ ), que requer sua integração com os planos de declividade (\_\_\_\_sn) e de orientação de vertentes (\_\_\_\_on). Os fatores momentâneos foram integrados ao longo do dia para o cálculo de cada um dos fatores mensais de

iluminação e estes, enfim, integrados para a determinação do fator anual. Ao fim do programa, são armazenados como produtos finais os 12 planos de fatores mensais e um com valores anuais, a serem submetidos aos pós-processamento (conversões de formato, essencialmente) antes de serem colocados à disposição. Em resumo, os processos correm em ciclos de funções subordinadas segundo a ordem: hora-mês-ano-folha-latitude: cumpridos os cálculos horários, integram-se os valores mensais, que são por sua vez integrados anualmente para os resultados de uma folha. Após este ciclo se completar para todas as folhas de mesma latitude, reinicia-se com nova latitude e assim por diante. O processamento das etapas deste fluxo geral será pormenorizado a seguir.

Num primeiro módulo, a programação incide sobre os planos auxiliares de entrada relativos à latitude juntamente com a declinação solar vigente para o cálculo dos ângulos solares locais ( $\theta_s$  e  $\varphi_s$ ) nos diferentes meses do ano. Uma vez fixos os valores de latitude de cada folha ao longo do ano (variam somente no espaço), tal determinação se inicia com a determinação do ângulo de declinação solar, que depende somente da época do ano considerada (Equação 2.12) e que, portanto, foi feita fora do ambiente SIG e seus resultados inseridos como valores escalares. Como simplificação, foram tomados os dias 15 de cada mês, exceto nos meses de junho e dezembro, quando há uma inflexão na dinâmica da declinação solar (Figura 3.13). Nesses meses, o valor foi tomado a partir da integração dos valores diários.

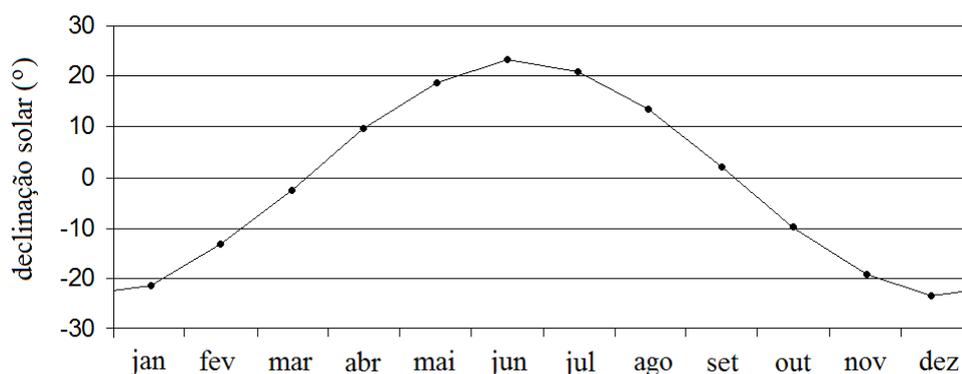


Figura 3.13 – Dinâmica anual dos valores de declinação solar.

Com a declinação (do mês) e a latitude, calculam-se os horários do nascente e do poente daquele mês pela Equação 2.9, invertida para  $\theta_s = 90^\circ$ . Observa-se que, a partir deste ponto, com a inclusão da latitude, introduz-se a dimensão espacial. Portanto, os horários

de nascente e poente são armazenados em planos de informação de SIG. Da mesma forma, o ângulo zenital solar  $\theta_s$  é calculado pela Equação 2.9 (aqui na forma direta), em função dos ângulos horários (Equação 2.11, ainda tabular, obtidos via planilha) respectivos aos horários, escolhidos arbitrariamente, 6:00h, 8:00h, 10:00h, 12:00h, 14:00h, 16:00h e 18:00h. A Equação 2.10 relaciona o ângulo horário, a declinação e o ângulo zenital para a determinação do ângulo azimutal solar  $\phi_s$ . O ângulo zenital solar  $\theta_s$  refere-se ao fator de iluminação na situação hipotética da superfície terrestre perfeitamente esférica, isto é, sem relevo. Este e o ângulo azimutal  $\phi_s$  são, enfim, sobrepostos à declividade e à orientação de vertentes para o cálculo do fator cosseno ( $\cos\theta_o$ ) através da Equação 2.8. A integração dos valores diurnos de  $\cos\theta_o$  é feita em conjunto com os horários de nascente e poente como limites do dia solar, o que resulta no fator de iluminação mensal. O fator anual é calculado como a média dos fatores mensais (Figura 3.12).

Os fatores momentâneos foram calculados para os horários acima independentemente do período de luz determinado pelos horários de nascente e poente. Adiante, na integração diurna, somente os valores pertinentes foram computados. A integração foi determinada como a área delimitada pelos fatores momentâneos dentro do período de luz, conforme a Figura 3.14. Esta integração geométrica obedeceu a três condições possíveis de período, conforme o horário de nascente (e, reciprocamente, de poente): (a) após 08:00h, (b) entre 06:00h e 08:00h e (c) antes de 06:00h (Figuras 3.14–a, –b e –c, respectivamente). Em testes de simulação, estes horários abrangem todas as condições possíveis. Na latitude extrema da cobertura dos dados SRTM ( $60^\circ$ ), por exemplo, o período de luz diurna varia de 02:45h a 21:15h no verão até 09:15h a 14:45h no inverno. Evidentemente, operações relativamente simples podem requerer soluções extensas e complexas para sua implementação em programas de lote. A resolução das Equações de 2.8 a 2.12 nas possíveis condições de combinação entre os diversos elementos (declinação, latitude e ângulo horário) requer preparações e cuidados sem os quais se produzem resultados espúrios. Para citar o exemplo mais comum, lembra-se que todas as operações trigonométricas requerem ângulos expressos em radianos, o que exige constantes conversões entre as unidades. As constantes transformações inversas (arco-

seno, arco-cosseno etc.) requerem muitas vezes a reconstrução, com lógica de quadrantes, dos ângulos simples ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ) para o domínio circular ( $0^\circ$  a  $360^\circ$ ).

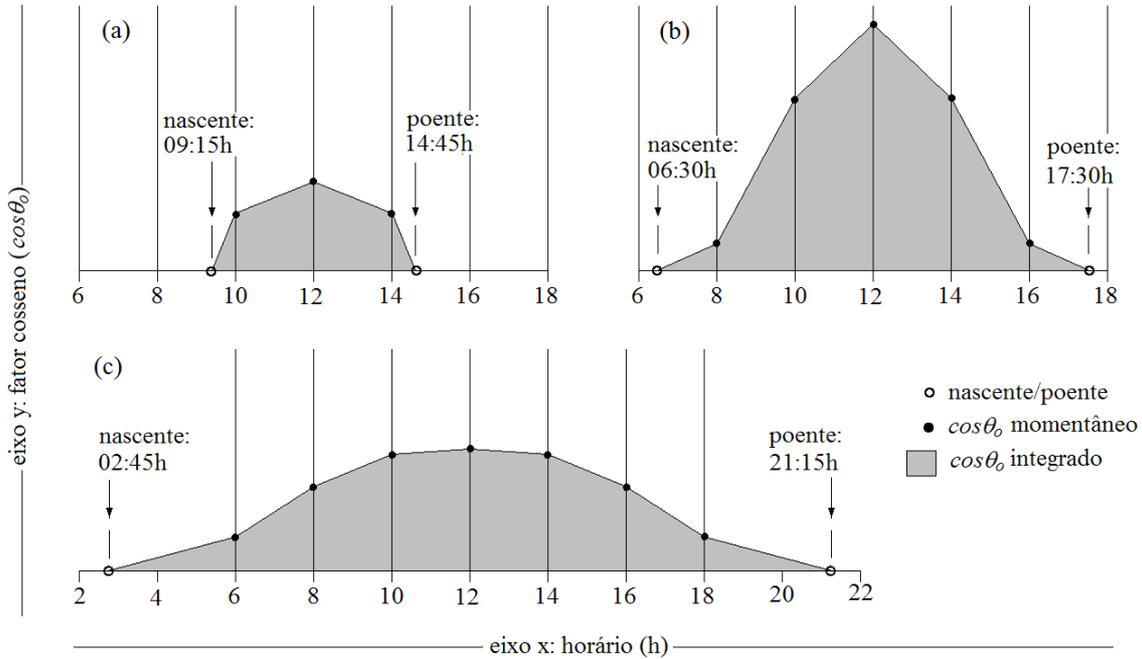


Figura 3.14 – Integração diurna dos fatores de iluminação de uma área plana.

Uma fonte notável de cuidados advém da circularidade das variáveis angulares, sobretudo as interações azimutais ( $\varphi_s$ ), que assumem valores de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , enquanto o tratamento dos ângulos zenitais ( $\theta_s$ ), restritos entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , traz menos chances de problemas. A condição primordial que define duas linhas opostas de cálculo de  $\varphi_s$  é a relação entre declinação e latitude,  $\delta-Y$ , cujo sinal implica no sentido do movimento azimutal aparente do sol ( $\varphi_s$ ), horário ou anti-horário. Outro cuidado se refere ao sentido crescente ou decrescente do módulo de  $\varphi_s$ , que pode inverter seu sentido nas fases do dia em que se posiciona no hemisfério relativo oposto à sua situação no meio-dia (em amarelo nos diagramas da Figura 3.15). Este efeito é tão mais intenso e comum quanto maior for a latitude.

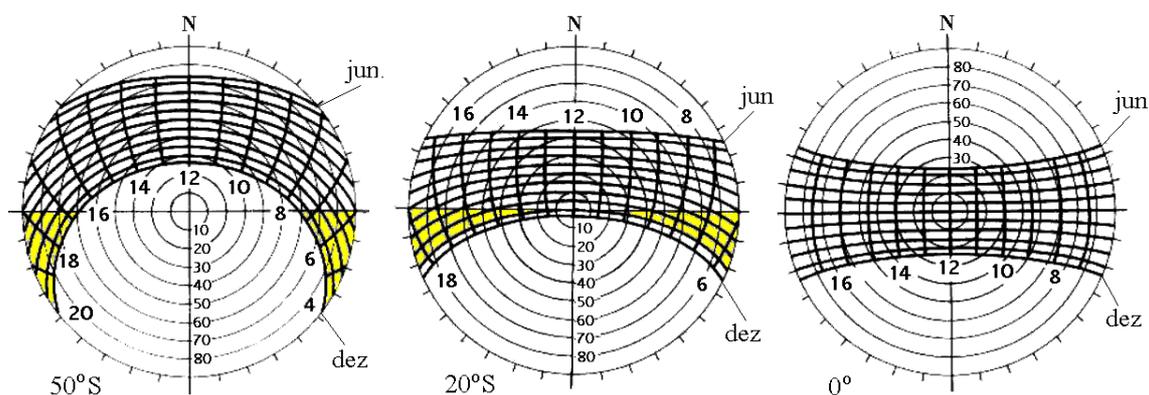


Figura 3.15 - Trajetória aparente do sol em diferentes latitudes.

Tais cuidados requerem um grande número de mecanismos de controle das combinações entre as variáveis, o que faz da programação uma tarefa extensa e meticulosa. Dado o grande número de operações que isso implica, é praticamente impossível evitar erros advindos das condições descritas acima, muito dos quais não são percebidos pela simples inviabilização do fluxo, pois este se conclui com resultados aparentemente válidos. No entanto, estes erros só se identificam com exame de representações do resultado, quando se percebem diferenças nas direções de sombreamento em relação ao resultado esperado para a combinação de data, horário e posição testada. Assim, o desenvolvimento do algoritmo foi acompanhado de testes intensivos. A avaliação dos resultados é particularmente favorecida no caso da iluminação pela facilidade com que se observam as variações de  $\varphi_s$ , sobretudo, devido à percepção natural das condições de sombreamento do relevo. Na Figura 3.16 se apresentam resultados de uma mesma área (Monte Roraima) em 4 diferentes latitudes.

Os arquivos de iluminação mensal e anual foram armazenados em formato *geotiff* sem seus correspondentes para visualização. Como já mencionado, estes planos foram desenvolvidos sob a perspectiva de uso analítico, na modelagem da ecofisiologia. No entanto, caso o usuário necessite sua visualização, recomenda-se a aplicação de um realce linear de contraste por duas alternativas. Caso se pretenda uma percepção condizente com a situação absoluta de iluminação, o realce deve ser aplicado com extremos nos valores 0 e 1, o que corresponde ao intervalo de variação de do efeito cosseno. Dessa forma, situações distintas de iluminação podem ser comparadas visualmente e as relações de brilho aparente entre as diferentes imagens estarão

coerentes. Caso se pretenda simplesmente promover maior contraste para favorecer a observação da distribuição espacial da iluminação, pode-se aplicar o realce no mesmo intervalo da distribuição corrente (nos valores mínimo e máximo de sua distribuição). É oportuno lembrar que, para percepção do sombreamento com vistas à observação da configuração geomorfológica do terreno, recomenda-se a representação desenvolvida sob condições arbitrárias e com exagero vertical, descrito no início desta seção.

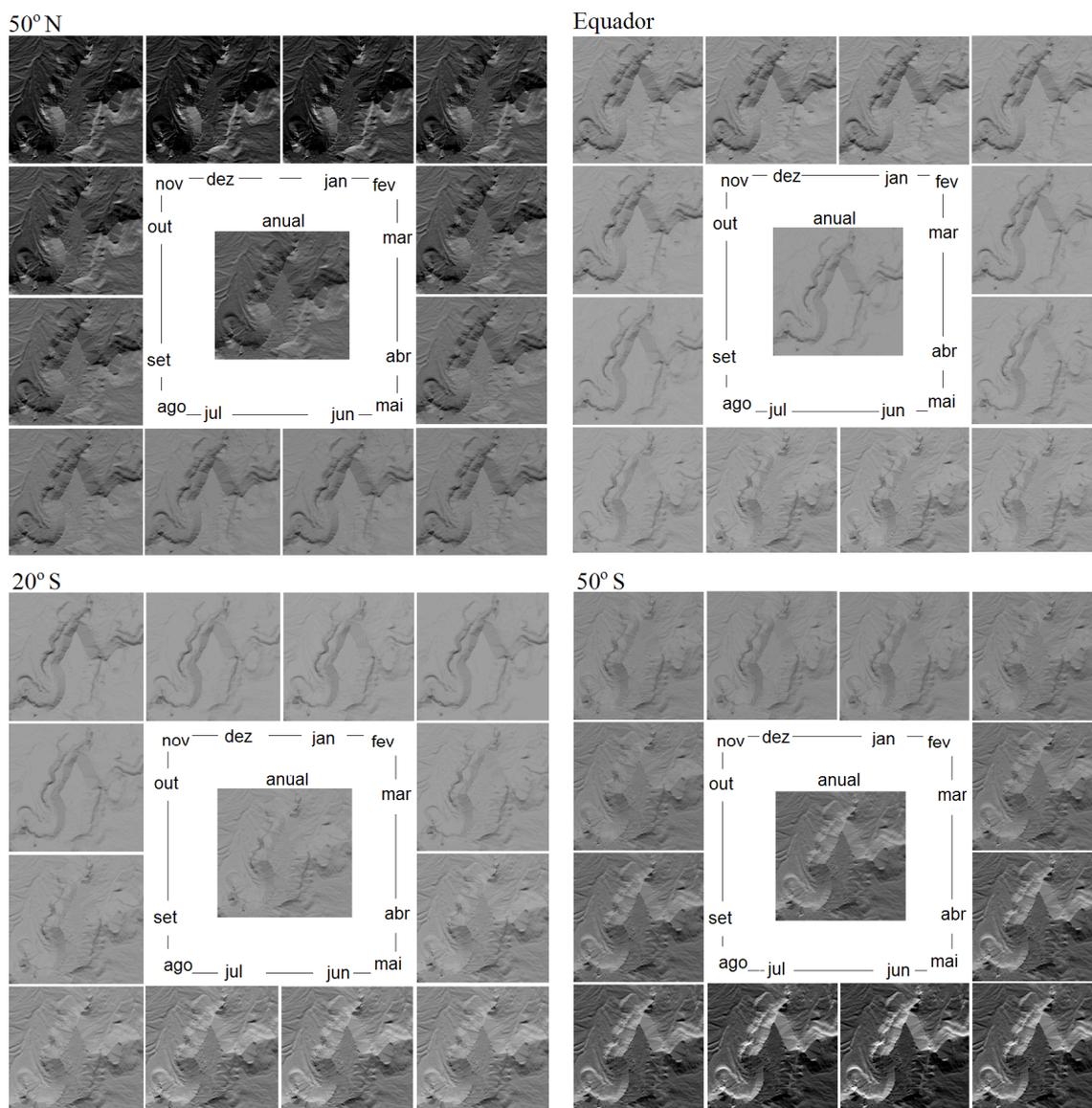


Figura 3.16 – Dinâmica da iluminação solar calculada para 4 diferentes latitudes.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na descrição dos métodos aplicados à derivação dos dados SRTM, é possível observar as alternativas que foram adotadas para a geração de variáveis geomorfométricas com sentido relacionado à natureza de seus conceitos. Entretanto, também se pode perceber que as soluções aplicadas representam, naturalmente, diferenças em relação aos métodos de medição direta, em cartas topográficas e em campo. Tais diferenças se devem, na maioria dos casos, à presente abordagem, que podemos classificar de modelagem, dada a natureza estimativa e simplificada das feições de relevo assim caracterizadas, desde o próprio conceito de MDE. Além desses desvios intrínsecos, a operacionalização dos processamentos na extensão em que se pretendem aplicar obrigou a uma série de adaptações conceituais que representam discrepâncias adicionais aos dados produzidos, quando consideramos a realidade concreta do relevo. Desta forma, os métodos descritos reforçam o caráter aproximativo dos dados geomorfométricos, que devem ser considerados em seu contexto geográfico, a rigor, como indicadores regionais da situação relativa do terreno, jamais medidas pontuais e exatas.

Os conceitos de resolução e escala, igualmente, devem ser considerados com cautela. As derivações, aplicadas mediante o uso de janelas móveis, são operações de vizinhança (VALENZUELA, 1991), o que significa uma abrangência das análises além das dimensões definidas pela resolução de armazenamento. O fato de serem aplicadas sobre os dados SRTM interpolados poderia amenizar parcialmente este efeito, porém o próprio refinamento, convém lembrar (VALERIANO e ROSSETTI, 2008, Figura 3.7), traz por si um espalhamento considerável das diferenças altimétricas. O número de operações de vizinhança em cada derivação, além das fases de pré- e pós-processamento, correspondem a uma generalização em graus variados, porém nunca desprezível. O que nos permite estimar variáveis nestas condições é a relativa continuidade altimétrica predominante na paisagem natural, expressa pela dependência espacial, ou autocorrelação, de cotas vizinhas e, em graus variados, de suas derivações (VALERIANO, 1999). Os testes de desenvolvimento destes processos levaram a diferentes graus de generalização (dados pelo número e a extensão das janelas móveis aplicadas), em função dos melhores resultados obtidos entre as condições testadas.

Em muitos casos, como os diferentes níveis de suavização aplicados entre as classes de declividade (Figura 3.8), por exemplo, o resultado reproduz o efeito de uma abordagem multi-escala (MOORE et al., 1993), de uma maneira dirigida pela experimentação. Neste caso, diferentes escalas foram adequadas de forma a se adaptarem as classes à distribuição numérica e espacial típica da declividade quando calculada sobre a superfície terrestre (VALERIANO, 2003): declividades altas são raras e sua distribuição esparsa requer detalhamento para sua expressão cartográfica. Ao mesmo tempo, as extensas áreas das classes de baixa declividade dificilmente têm as transições coesas em torno dos limites rígidos aplicados em seu fatiamento, de modo que a generalização torna o mapeamento mais conveniente às suas aplicações. Isto se explica pelos intervalos de fatiamento mais estreitos para as classes mais planas, regra de todos os esquemas de classificação da declividade. Soma-se a este mecanismo a sensibilidade dos dados SRTM ao efeito dossel e objetos não-topográficos (VALERIANO, 2004) que, embora independa da declividade em absoluto, tende a ser mais expressiva em termos relativos quando comparados às variações altimétricas dos terrenos planos. Nesta situação, pequenas perturbações são suficientes para resultar em declividades que serão computadas em classes de declividade acima daquela exibida pelo terreno.

Independentemente dos processos propositais de generalização, as próprias variáveis diferem entre si quanto à abrangência requerida para sua análise, bem como quanto à sua variabilidade espacial intrínseca. No primeiro aspecto, pode-se relacionar a abrangência da análise à ordem de derivação, isto é, a elevação (ordem zero) mais localizada do que a declividade e a orientação de vertentes (derivações de primeira ordem); por sua vez, estas serão mais localizadas do que as curvaturas (segunda ordem). Esta relação representa as condições teóricas do cálculo das variáveis, porém os mecanismos de formação do relevo, sua distribuição e a natureza das variáveis geomorfométricas levam a uma percepção diferente. As diferenças de comportamento espacial das derivações, por sua vez, haviam sido observadas desde os estudos de desenvolvimento metodológico para seu cálculo.

Com regra geral, as derivações horizontais (orientação e curvatura horizontal) são mais exigentes em detalhe do que as verticais (declividade e curvatura vertical). O caso extremo corresponde à curvatura horizontal (VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR,

2003), cujo conceito já implica a alternância de valores opostos: a um local convergem fluxos que divergem de sua vizinhança e vice-versa. Assim, na face de uma mesma vertente, sucedem-se áreas divergentes e convergentes, como regra.

Do mesmo modo, as derivações de maior ordem têm distribuição espacial sistematicamente mais detalhada do que suas primitivas, de modo geral, apesar de seu cálculo exigir uma área maior de análise. É possível e esperado que haja variações nesse aspecto quando se consideram relevos distintos: por exemplo, em relevo em que há abundância de faces retas porém inclinadas, pode-se esperar maior variabilidade da elevação do que da declividade (ou mesmo da orientação de vertentes, quando se observa uma situação restrita). À medida que se considera uma área maior, esta situação particularizada tende a se diluir, e a regra geral começa a prevalecer. Os cuidados em resposta a este efeito levaram a uma maior generalização da escala (em geral, suavização com filtro de média) das variáveis de maior ordem de derivação. Sempre que isto foi necessário, as derivações verticais (declividade e curvatura vertical) foram filtradas em pós-processamento, enquanto as horizontais (orientação de vertentes e curvatura horizontal), dadas suas restrições teóricas e práticas, foram calculadas sobre o MDE previamente generalizado.

Outro fator a influir nas características da expressão espacial das derivações geomorfométricas advém da natureza matemática de cada variável e sua decorrente distribuição de valores. Este efeito é notável no caso da curvatura vertical, cujo histograma concentra frequências em torno de  $0^\circ/\text{m}$  (retilíneo), de tal modo que, uma vez linearizados em relação à sua amplitude, os valores tendem a se distribuir com estrutura mais regionalizada do que a própria elevação (VALERIANO, 2003b). Para a curvatura horizontal, o mesmo padrão de distribuição numérica, porém ligado à distribuição espacial da orientação de vertentes, leva ao comportamento oposto, em que cada porção de terreno, com poucas exceções, apresenta toda gama de valores possíveis (VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003). Enfim, as observações feitas no relevo geral levam a crer que as variáveis possam ser listadas, com as devidas exceções e nuances localizadas, segundo uma ordem de generalização crescente: curvatura horizontal, orientação, declividade, elevação e curvatura vertical.

Quanto aos detalhes do presente processamento das metodologias de derivação, as operações principais foram cercadas de cuidados acerca da preparação do MDE (pré-processamento) e do tratamento dos resultados imediatos (pós-processamento). Estes foram desenvolvidos com base fortemente empírica, como mencionado, e buscaram reproduzir os resultados mais promissores em testes sobre os dados SRTM preparados especificamente pelos processos de refinamento adotados no TOPODATA, ou seja, refinados de 3 arco-segundos para 1 arco-segundo, por krigagem segundo o modelo selecionado (VALERIANO e ROSSETTI, 2008). Evidentemente, outros dados, de outros sensores, ou mesmo simplesmente dados SRTM com outra (ou sem) preparação, podem requerer cuidados diferentes para a obtenção de seus melhores resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAND, L. E. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 22, n. 1, p. 15-24, 1986.

EASTMAN, J. R. **Idrisi for Windows: User's Guide**. Worcester: Clark University, 1995. 440p.

EVANS, I. S. **General geomorphology, derivatives of altitude and descriptive statistics**. In: Chorley, R. J., *Spatial Analysis in Geomorphology*. London: Methuen e Co. Ltd. (Ed.), p. 17-90, 1972.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer Version 6.01- Surface Mapping System**. Golden: Golden Software, Inc., 1995.

GUISAN, A.; ZIMMERMANN, N. E. Predictive habitat distribution models in ecology. **Ecological Modelling**, v.135, n.2-3, p. 147-186, 2000.

LINDSAY J. B. A physically based model for calculating contributing area on hillslopes and along valley bottoms. **Water Resources Research**, v.39, n.12, p.1332-1337, 2003.

MEIJERINK, A. M. J. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. **ITC Journal**, v.1988, n.1, p.23-44, 1988.

MOORE, I. D.; LEWIS, A.; GALLANT, J. C. **Terrain attributes: estimation methods and scale effects**. In: *Modelling change in environmental systems*. Jakeman, A. J.; Beck, M. B.; McAleer, M. J. John Wiley e Sons Ltd. (Ed.), Chichester (Eng.). 584p. Chapter 8, p.189-214, 1993.

MORETTI, E., KOFFLER, N. F., TEIXEIRA, A. L. A. Técnicas digitais para mapeamento de declividade e orientação de vertentes baseadas no uso de sistemas de informação geográfica. **Boletim de Geografia Teórica** (Rio Claro), v.19, n.37/38, p.29-52, 1989.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision and Image Processing**, v. 28, n.3, p.323-344, 1984.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres. 1981, 425p.

PEUKER, T.K.; DOUGLAS, D. H. Detection of surface specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. **Computer Graphics and Image Processing**, v.4, n.4, p.375-387, 1975.

RESEARCH SYSTEMS INC. **Environment for Visualizing Images – ENVI Version 3.6**. Colorado: Boulder, 2002. 126p.

SELLERS, W. D. **Physical Climatology**, University of Chicago Press, Chicago, 1965. 272pp.

SKIDMORE, A. K. Terrain position as mapped from a gridded digital elevation model. **International Journal of Geographical Information Systems**, v.4, n.1, p.33-49, 1990.

SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading, MA, Addison-Wesley, 1980. 575p.

SNYDER, J. P. **Map Projections-A Working Manual**. Washington, DC, U.S. Geological Survey, 1987. (Professional paper 1395). 383p.

VALENZUELA, C. R. **Data analysis and models**. In: BELWARD, A. S.; VALENZUELA, C. R. **Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries**. Euro Courses: Remote Sensing, Netherlands: Kluwer, 1991. v.1, cap. 18, p. 335-48.

VALERIANO, M. M. **Estimativa de variáveis topográficas para modelagem da perda de solos por geoprocessamento**. Rio Claro, UNESP, 1999. 172p. (Tese de Doutorado).

VALERIANO, M. M. **Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem**. São José dos Campos: INPE, 2002. 54 p. (INPE-9364-RPQ/736).

VALERIANO, M. M. Programação do cálculo da declividade em SIG pelo método de vetores ortogonais. **Espaço e Geografia**, v.5, n.1, p.69-85, 2002b.

VALERIANO, M. M.; MELO, A. R.; SARRAIPA, L. A. S. ; NEGREIROS, I. P. M.; PALLONE FILHO, W. Formação de base topográfica digital (1:1.000.000) do Estado de São Paulo com dados RADARSAT-1. **Acta Scientiarum**, v.24, n.6, p.1825-1831, 2002.

VALERIANO, M. M. Mapeamento da declividade em microbacias com sistemas de informação geográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.7, n.2, p.303-310, 2003.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.539-546, 2003b.

VALERIANO, M. M., CARVALHO Jr., O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em Microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.4, n.1, p.17-29. 2003.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004. 72 p. (INPE-10550-RPQ/756).

VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D.; MENDES JR, J. N.; LIMA, D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazônia with SRTM-90m data. **Computers e Geosciences**, v. 32, n. 8, p.1169-1181, 2006.

VALERIANO, M. M. Visualização de imagens topográficas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p.1377-1384.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p. (INPE-15318-RPE/818).

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. **TOPODATA**: seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2008. 50p. (CNPq, processo n. 306021/2004-8, NV). Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/topodata/documentos.php>>. Acesso em: 05 jan. 2009.

WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. **Terrain analysis: principles and applications**. 1<sup>a</sup> edição. New York: John Wiley e Sons, Inc., 2000. 478p. ISBN: 0-471-32188-5.

YOKOYAMA, R., SHIRASAWA, M., PIKE, R. J. Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.68, n.3, pp.257-266, 2002.