

Geometria Básica das Fotografias Aéreas

Paul S. Anderson

7.1. CÂMARAS AEROFOTográfICAS

A câmara fotográfica aérea é constituída, simplificadamente, de uma lente e de um plano negativo de exposição (Figura 7.1). A lente não é, na verdade, uma só: consiste de uma série seqüencial de lentes que, juntas, minimizam a distorção e maximizam a focalização ótima da imagem. Cada lente desse conjunto tem seu próprio centro ótico. Um dos objetos de interesse dos fotogrametristas é o estudo das características desse conjunto de lentes, e em especial, o estudo de centro ótico de cada lente, separadamente. Para nós, os fotointérpretes, é suficiente falar de um só centro ótico deste conjunto de lentes, considerando nossos fins e a precisão das câmaras aerofotográficas.



O raio de luz que passa exatamente pelo centro da lente, isto é, o raio de luz que é perpendicular ao plano da lente, é denominado *eixo ótico*.

O foco da lente é fixo e resulta de uma distância constante, ao longo do eixo ótico, do centro ótico da lente até o plano do negativo; essa distância é chamada, normalmente, de *distância focal*, e é representada pela letra "f". Porém, mais estritamente, esta medida é a "*distância principal* ("c"). A relação entre "f" e "c" é evidente na equação:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{c} + \frac{1}{H}$$

onde "H" é a distância entre a câmara e o objeto fotografado. No caso das fotografias aéreas, "H" é a altura do vôo (altura do avião acima do nível do terreno), que poderá ser de alguns milhares de metros. Portanto, o valor de 1/H é muito pequeno em relação a 1/c; o resultado é que a diferença entre "f" e "c" é mínima, e de importância somente para os fotogrametristas. Por esta razão, a maioria dos textos sobre fotointerpretação, incluindo este livro, usa o símbolo "f", que é mais fácil de se entender e lembrar, em vez de "c".

A distância focal é medida pelo fabricante de câmara aérea, com muita precisão, e anotada na margem de cada fotografia aérea. Em geral trabalhamos com fotografias tiradas com uma distância focal de 152,40mm (seis polegadas), que é uma medida bastante precisa.

Quando o plano do negativo está exatamente perpendicular ao eixo que passa pelo centro ótico da lente, a câmara está bem posicionada e o eixo ótico encontra o plano do negativo exatamente no centro da imagem fotografada. Este ponto central, precisamente localizado no meio da foto, é identificável através das marcas

fiduciais, que são assinaladas nas margens da fotografia no momento em que ela é tomada. Este ponto central é chamado de “ponto principal”, e ele é muito importante no uso das fotografias aéreas.

Notamos na Figura 7.1 (e em muitas outras figuras deste livro) que os raios de luz chegam à câmara de forma convergente, como um feixe de raios não-paralelos. O funcionamento da câmara fotográfica é similar ao do olho humano. Este fenômeno é denominado de *projeção central*, em que o feixe de raios de luz forma um cone. A projeção central tem somente um ponto de perspectiva: a lente. Isto explica porque uma fotografia aérea é bastante diferente de um mapa topográfico, que é elaborado com uma projeção ortogonal, na qual os raios de luz são paralelos entre si e interceptam o terreno em ângulos retos. A importância da projeção central é fundamental à geometria e às características das fotografias aéreas.

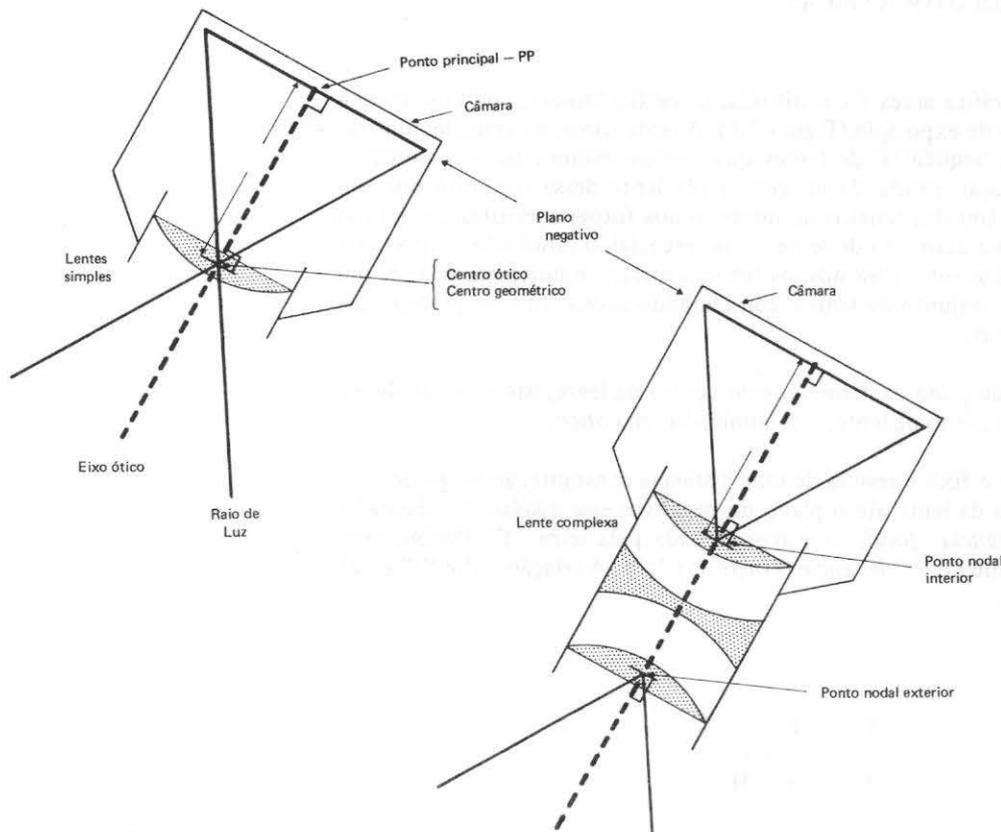


FIGURA 7.1 – Esquemas de câmaras e lentes fotográficas

Até agora estamos falando somente das características internas das câmaras, tanto das indicadas para fotografia terrestre, quanto daquelas fabricadas para fotografia aérea. Quando temos a câmara no ar e tiramos uma fotografia inclinada (Figura 7.2), podemos identificar um outro ponto no terreno que está diretamente embaixo do centro óptico da câmara; a este chamamos de *ponto nadir*. Quando a fotografia não é vertical, o ponto nadir não coincide com o ponto principal, e o ponto que marca o “pé” da bissetriz do ângulo P-O-N é chamado de *isocentro*, que é importante no estudo de fotos inclinadas. Porém, quando a fotografia é exatamente vertical, o ponto nadir e o isocentro são coincidentes com o ponto principal, tal como está demonstrado nas Figuras 6.1 e 7.3. Entendendo as características das câmaras fotográficas, podemos ver, agora, a relação geométrica entre as fotografias aéreas e o terreno.

7.2. GEOMETRIA BÁSICA DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS

A Figura 7.3 mostra, em corte vertical, uma fotografia, uma câmara, e um terreno fotografado. Notamos, principalmente, que todos os raios de luz refletidos

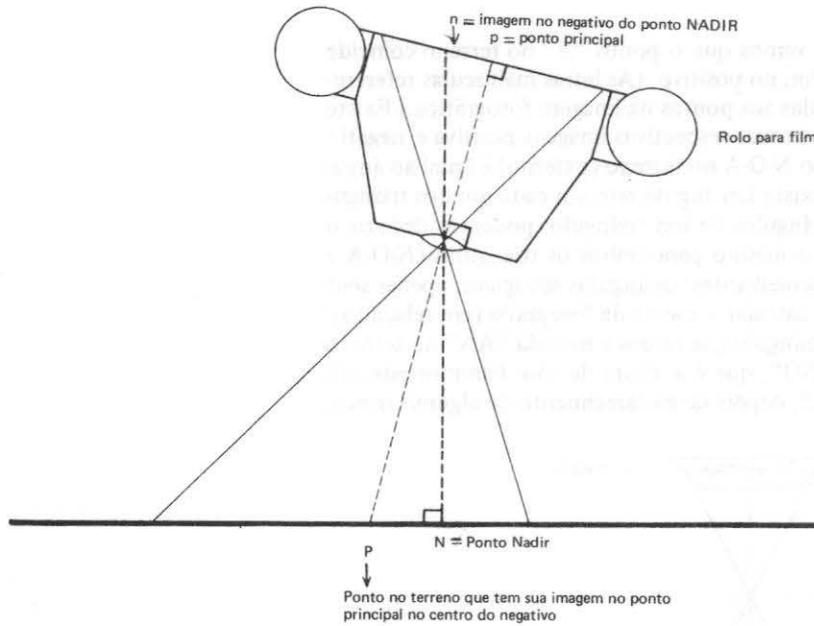


FIGURA 7.2 – Ponto principal e ponto nadir numa foto inclinada

pelos objetos passam pelo centro ótico da lente. Temos um ângulo reto entre o eixo ótico da lente e o plano negativo, e um ângulo reto entre o eixo ótico e o plano do terreno. Isto quer dizer que o ponto principal da fotografia aérea e o ponto nadir representam o mesmo ponto. Estas observações se referem à geometria de uma fotografia vertical.

Também podemos notar a existência de um plano positivo, que está à mesma distância da lente que o plano negativo. A importância disso é que se pode fazer cópias fotográficas por contato, as quais manterão a distância focal da câmara, que é fornecida pelo fabricante. (É óbvio que existem outros planos positivos para reduções e ampliações fotográficas; veja a Figura 7.4).

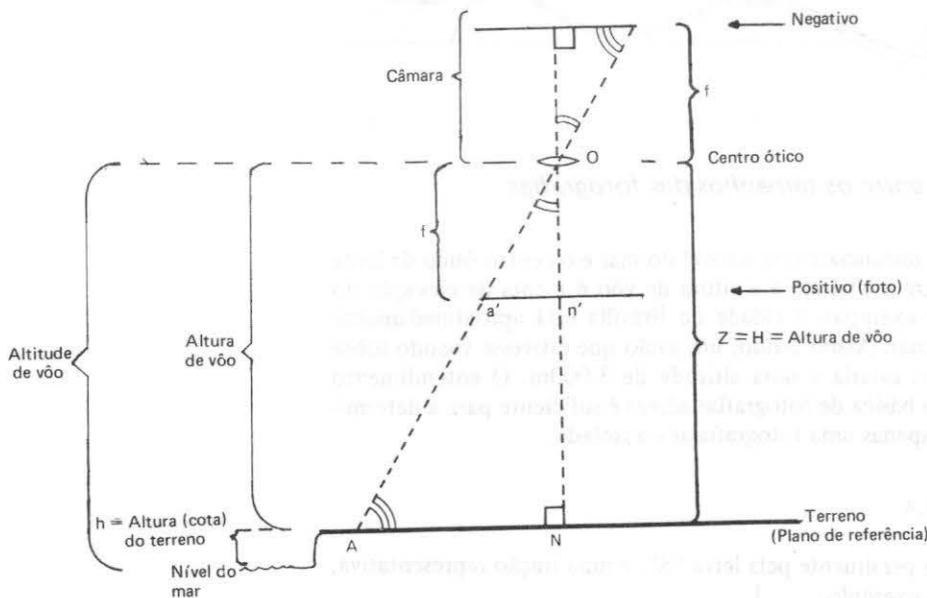


FIGURA 7.3 – Geometria básica de uma fotografia aérea vertical

Ainda observando a Figura 7.3, vemos que o ponto "A" no terreno coincide com o ponto "a" no negativo e, também, no positivo. (As letras maiúsculas referem-se aos pontos no terreno, e as minúsculas aos pontos na imagem fotográfica.) Existe uma linha reta entre esse ponto "A" e as suas respectivas imagens positiva e negativa. Assim, podemos dizer que o ângulo N-O-A no terreno (externo) é igual ao ângulo n-o-a dentro da câmara (interno). Existe um ângulo reto em cada um dos triângulos N-O-A e n-o-a. Conhecendo dois ângulos de um triângulo, podemos deduzir o terceiro e estamos seguros que ele é o mesmo para ambos os triângulos (N-O-A e n-o-a). Os triângulos do diagrama são semelhantes: os ângulos são iguais, apenas seus lados são diferentes. Então, podemos calcular a escala da fotografia (em relação ao terreno), usando essa semelhança de triângulos, se temos a medida "AN" no terreno (distância real) ou então, a medida "NO", que é a altura de vôo. Faremos este cálculo da escala da fotografia no Item 7.3, depois do esclarecimento de alguns termos.

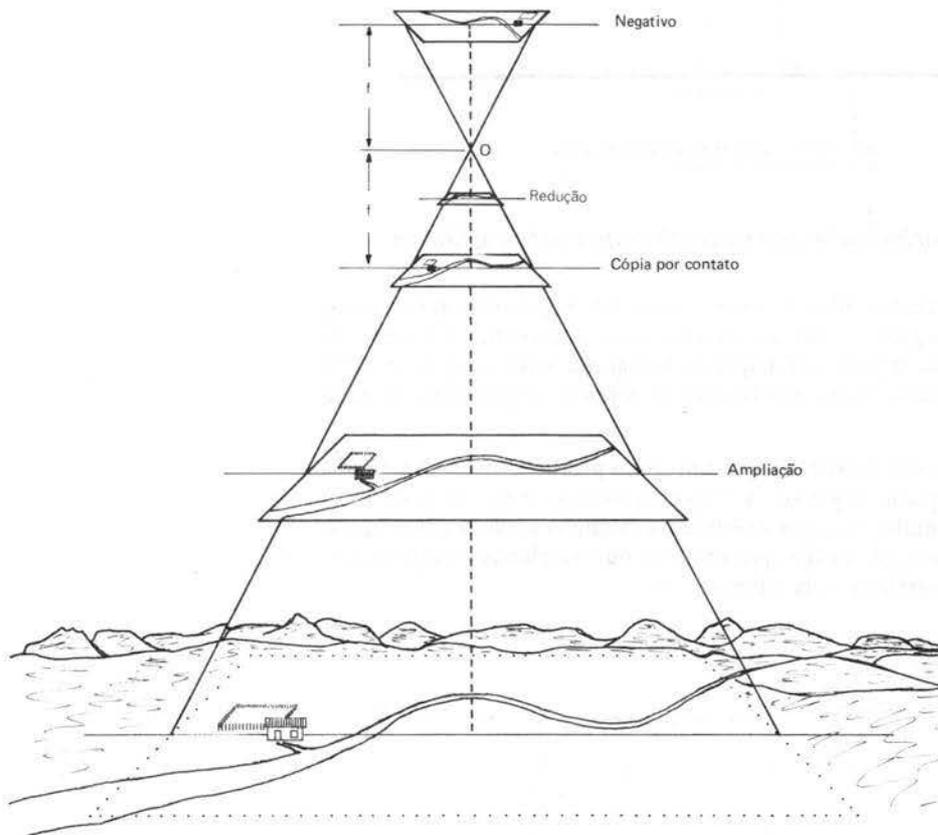


FIGURA 7.4 – Relação entre os tamanhos das fotografias

A *altitude de vôo* é a distância entre o nível do mar e o centro ótico da lente da câmara. A diferença entre a altitude e a altura de vôo é a cota de elevação do terreno acima do mar. Por exemplo, a cidade de Brasília está aproximadamente 1.000m acima do nível do mar. Assim sendo, um avião que estivesse voando sobre Brasília a altura de 2.000m, estaria a uma altitude de 3.000m. O entendimento desses termos e da geometria básica de fotografias aéreas é suficiente para a determinação de escalas, usando-se apenas uma fotografia aérea isolada.

7.3. CÁLCULOS DE ESCALA

A escala, representada geralmente pela letra "S", é uma fração representativa, às vezes chamada "FR"; por exemplo: $\frac{1}{100000}$

Ela pode ser representada também por 1/SN, onde SN é o número da escala ("scale number"), isto é, o denominador da fração representativa (DFR).

Existem, então, três elementos na equação, sendo que precisamos de dois para a determinação do terceiro. Um é a medida na foto; o segundo é a medida no terreno, que pode ser determinada por trabalho de campo; e o terceiro é a escala conhecida ou a que se deseja conhecer.

Usando a semelhança dos triângulos, que é uma relação geométrica, notamos que os triângulos semelhantes, como mostra a Figura 7.3, são o-a-n (interno) e O-A-N (entre a câmara e o terreno). A escala mantém a seguinte relação com estes triângulos semelhantes:

$$\frac{\overline{na}}{\overline{NA}} = \frac{\overline{oa}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{no}}{\overline{NO}} = S$$

e qualquer uma dessas proporções é igual à escala (S).

Observamos que a distância \overline{no} é igual à distância focal (f), e que a distância \overline{NO} (entre a câmara e o terreno) é a altura de voo (H). Assim, concluímos que

$$S = \frac{\overline{no}}{\overline{NO}} = \frac{f}{H}$$

Prosseguindo, para se conhecer a escala da fotografia aérea, somente precisamos saber a distância focal e a altura de voo. Por exemplo, se a distância focal (f) for 150mm e a altura de voo 6000m, a escala da fotografia aérea será:

$$S = \frac{f}{H} = \frac{150\text{mm}}{6000000} = \frac{1}{40000}$$

Nota: a escala é um número *sem* unidade; daí, as unidades de f e de H devem ser as mesmas, quando da realização do cálculo da escala de uma fotografia aérea.

Uma vez conhecida a escala de uma fotografia aérea, podemos usar essa informação, juntamente com uma medida realizada entre dois pontos (a e b quaisquer) claramente identificáveis sobre a respectiva fotografia, para determinar a distância real (no terreno) entre esse mesmo par de pontos (A e B). A distância \overline{AB} (no terreno) é igual ao valor da medida, na fotografia, entre "a" e "b" dividido pelo valor da escala (S), ou seja, $1/SN$. Outra forma de se fazer esta operação é usando apenas o número do denominador da escala (SN); assim, a distância \overline{AB} no terreno é igual à distância \overline{ab} na fotografia, multiplicada pelo número da escala (SN) da mesma fotografia, ou seja, o denominador da fração representativa (DFR) da escala da fotografia aérea.

$$\overline{AB}_{\text{terreno}} = \overline{ab}_{\text{foto}} \times SN = \overline{ab}_{\text{foto}} \times DFR = \overline{ab}_{\text{foto}} \div S$$

Efetuada-se medições em fotografias aéreas poupa-se, em muitos casos, o trabalho de se viajar a zonas distantes, de difícil acesso, etc. Esta economia de tempo e dinheiro é uma das maiores vantagens do uso das fotografias aéreas verticais; e isto só é possível devido às características geométricas dessas.

É necessário que o fotointérprete conheça muito bem as relações entre a escala e a geometria básica das fotografias aéreas, para que possa fazer medições sobre elas. Muitas vezes faltam algumas informações nas fotografias, ou somente se tem aproximações da altura de voo ou da escala; contudo, temos maneiras de sanar este problema, usando outras medições.

Podemos calcular a escala de uma fotografia aérea qualquer, se tivermos uma medição (em milímetros ou centímetros), feita sobre a respectiva fotografia, entre dois pontos (n e a) nela contidos, mais uma outra medição (em metros ou quilômetros), feita sobre o terreno, entre os mesmos dois pontos (N e A). Isto é possível de acordo com a seguinte relação:

$$S = \frac{1}{SN} = \frac{\bar{n}a}{\bar{N}A}$$

Até agora falamos somente de fotografias isoladas, e não de pares montados para obtenção de imagens estereoscópicas. Desta maneira, só estamos falando da escala planimétrica (no plano horizontal do terreno), e não da altimétrica (da altura de objetos), a qual está apresentada no próximo capítulo.

Um outro aspecto da escala é o de que, pelas suas características geométricas, a fotografia aérea tem a distância focal fixa. Porém, às vezes, numa mesma fotografia aérea existem duas, três ou mais zonas com cotas (alturas do relevo) diferentes, como está ilustrado na Figura 7.5. Esta situação é comum nas zonas aciden-

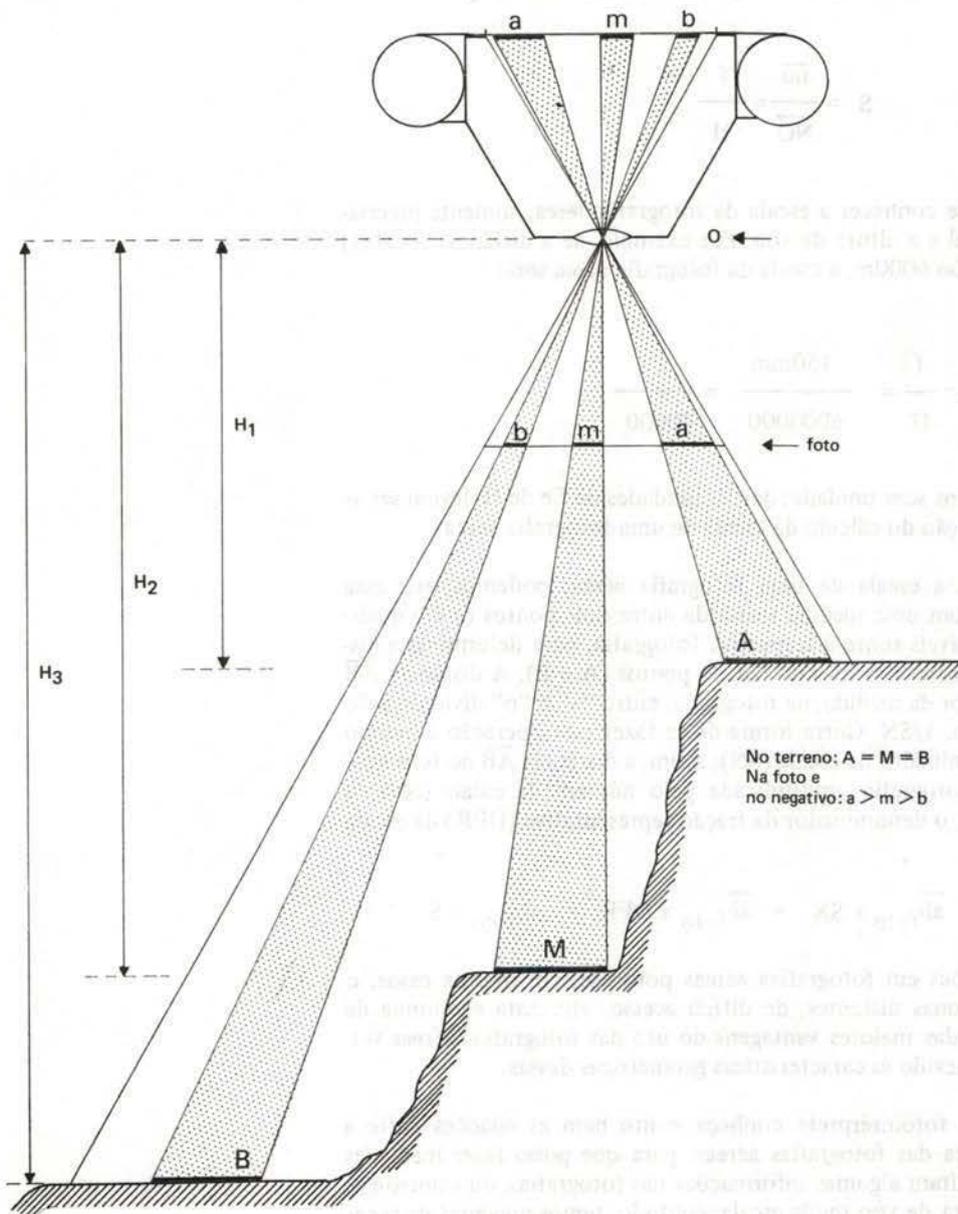


FIGURA 7.5 – A fotografia aérea tem escalas diferentes para altitudes diferentes do terreno

tadas. A altura de vôo de zonas mais baixas é maior do que a de zonas mais altas, cujos pontos são mais elevados. Digamos que distâncias iguais no terreno (de, por exemplo, 1km) aparecem maiores no negativo quando as áreas são mais elevadas, e menores quando as áreas são menos elevadas. Teoricamente, a escala da fotografia aérea varia segundo a altitude de cada ponto do terreno, e somente áreas de mesmas altitudes podem ter escalas iguais, mesmo se estiverem separadas uma da outra na imagem fotográfica. Na prática, quando uma área é *relativamente* plana (com diferenças de relevo inferiores a 3% da altura de vôo), podemos, normalmente, usar a escala do nível médio do relevo, sem prejudicar a precisão do levantamento. Mas, se precisamos de medidas exatas ou se a área mostra um relevo acidentado, é aconselhável calcular as escalas dos vários níveis do terreno.

7.4. CLASSIFICAÇÃO DE ESCALAS

São três as maneiras principais de denotar escalas: a (1) absoluta, a (2) comparação relativa, e a (3) classificação arbitrária.

1) A forma absoluta é dada pelos próprios valores numéricos da escala, os quais podem ser representados por uma fração representativa (1/50.000), por um gráfico (0 1 2 3 4 5 6) ou por uma expressão (dois centímetros equivalem a um quilômetro).

2) Podemos classificar escalas segundo uma comparação relativa, usando as palavras maior ou menor. Assim, entre duas escalas diferentes fornecidas, a maior é aquela que tem a maior fração representativa. Em outras palavras, quando o denominador diminui, a escala aumenta. Por exemplo, a escala de 1/60.000 é menor do que a de 1/40.000, e esta, por sua vez, é maior do que a de 1/100.000.

3) A classificação arbitrária controlada se constitui numa organização de escalas absolutas em grupos "lógicos", através do uso das palavras grande, média e pequena. Contudo, o que é lógico para uma disciplina não é necessariamente conveniente para uma outra. Um sistema de classificação arbitrária de fotografias aéreas, usado na geologia e na engenharia florestal, é o seguinte:

. ESCALA "GRANDE": de 1:1 até 1:15000 (inclusive);

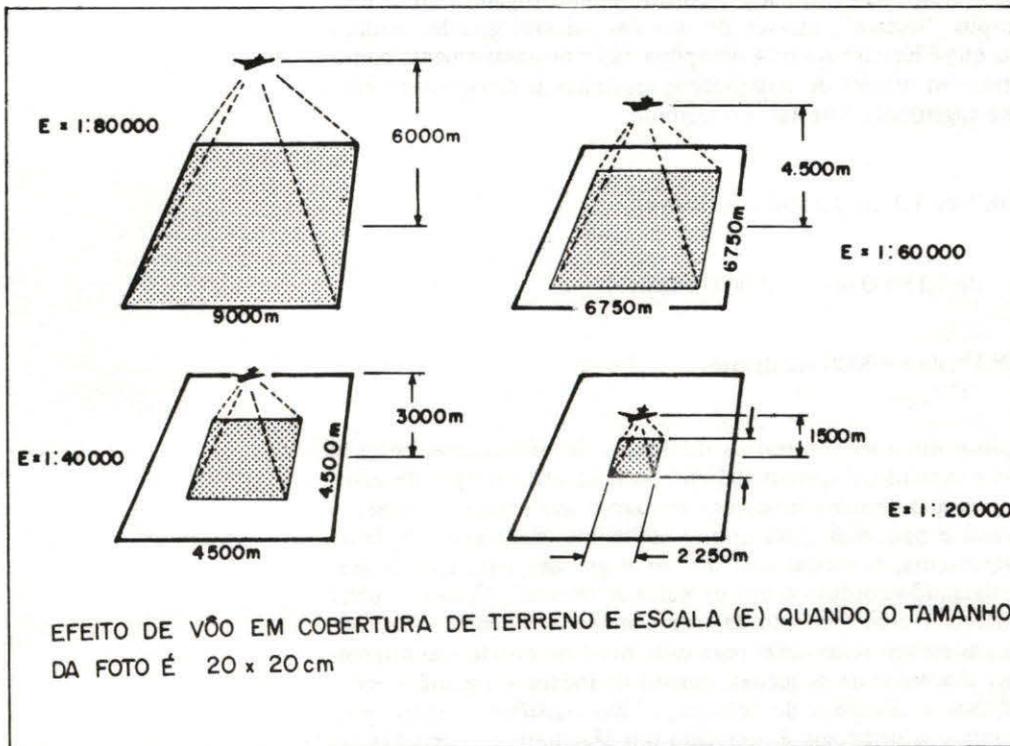
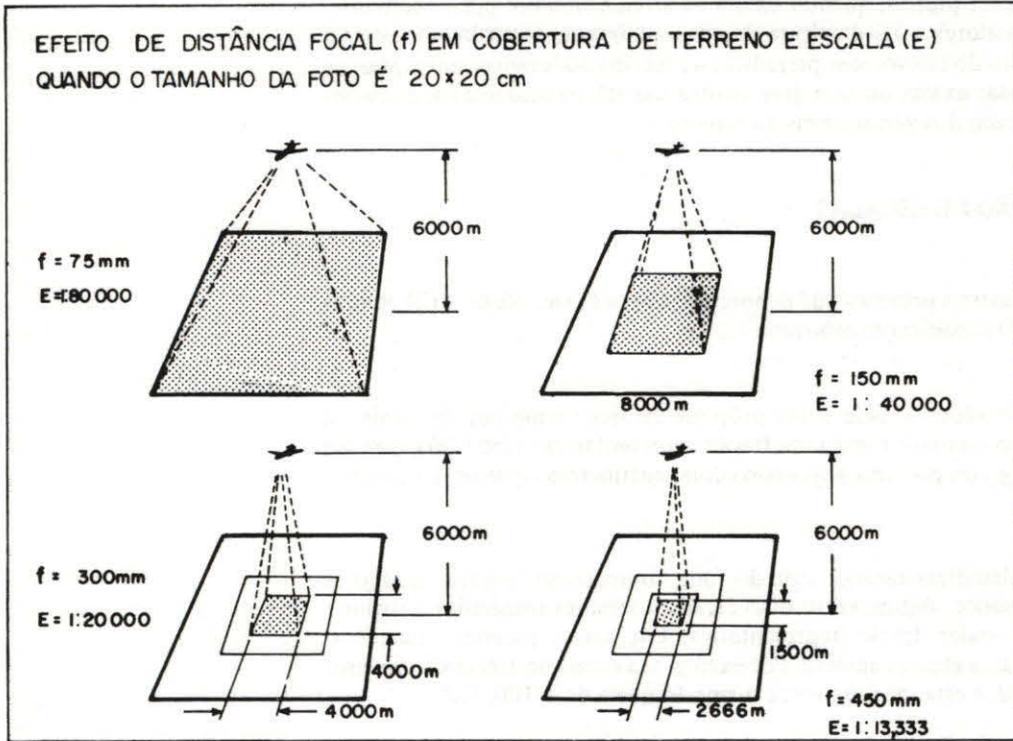
. ESCALA "MÉDIA": de 1:15000 até 1:60000 (inclusive);

. ESCALA "PEQUENA": de 1:60000 em diante

Esta classificação é útil para mostrar as diferenças de preferências entre as diversas disciplinas. Por exemplo, a agronomia, que tenta identificar tipos de solos, precisa trabalhar com escalas grandes (maiores), enquanto que estudos geológicos requerem escalas médias e pequenas, para que se tenha uma visão mais ampla da área. Então, para a agronomia, as escalas normais são as grandes, e para a geologia, médias ou pequenas, deixando confuso o uso da palavra "normal". Cada disciplina faz estudos em três níveis: reconhecimento da área, semi-detalhamento, e detalhamento. Naturalmente, as escalas necessárias para cada nível de estudo são diferentes, e tanto podem ser chamadas de pequenas, quanto de médias ou grandes, independentemente, conforme a disciplina de aplicação. Uma classificação mais apropriada para a agronomia e a pedologia é oferecido por Marchetti e Garcia (1977, pags. 28 - 29). É óbvio que as classificações arbitrárias são úteis, porém causam muita confusão quando não são devidamente especificadas em cada relatório de pesquisa.

7.5. CÂMARAS AÉREAS E ESCALAS

Uma outra classificação das fotografias aéreas é de acordo com as características da câmara, especialmente segundo a distância focal, a qual influi no ângulo da imagem recebida no negativo (Figura 7.6).



ADAPTADO DE U.S. DEPT. OF DEFENSE: TM 20-246 p. 2-20

FIGURA 7.6 – Influência da altura de vôo e da distância focal na tomada de fotografias aéreas

Quando as fotografias de tamanhos padronizados são tomadas a uma altura de vôo constante, mas com câmaras aéreas de distâncias focais diferentes, as escalas das imagens também são diferentes. Considerando que o tamanho do filme é o mesmo (geralmente 23 por 23 centímetros), a escala aumenta ou diminui em relação à distância focal da câmara. Nessas últimas décadas, a câmara fotográfica mais usada tem sido a *grande-angular*, que tem uma distância focal de 6 polegadas, ou seja, 152 milímetros, e um campo visual de 90 graus. A câmara *super-grande-angular* tem um campo visual de 120 graus e uma distância focal de 90 milímetros. Com a mesma altura de vôo, a super-grande-angular fornece fotografias em escalas menores, mas, em compensação, proporciona maior visão lateral. A câmara *normal*, usada já antes de 1960, tem um campo visual de 60 graus e uma distância focal de 210 milímetros; ela cobre uma área menor, mas com mais detalhes. Uma outra maneira de mostrar quase a mesma coisa é dizer que aviões, quando equipados com câmaras de distâncias focais diferentes, precisam voar em alturas diferentes para conseguir fotografias aéreas numa mesma escala.

Algumas vantagens e desvantagens das diversas escalas fotográficas são as seguintes: escalas maiores apresentam maiores detalhes, mas escalas menores permitem uma vista mais ampla, proporcionando uma melhor visão de conjunto da região; as escalas menores facilitam a identificação dos macroelementos geomorfológicos, mas não dos microelementos, como a erosão de solos. Uma desvantagem de escalas maiores é que, por exemplo, duplicando a escala (como de 1/60.000 para 1:30.000), o número de fotografias *quadruplica* para a representação da mesma área. Isto, logicamente, aumenta o custo dos vôos, pois cresce, em consequência, o número de fotografias que devem ser reveladas, copiadas e compiladas para um trabalho. Também, implica numa maior mão-de-obra na elaboração dos mapas finais, devido ao grande trabalho de unir os vários "overlays" interpretados, pois será grande o número de fotografias a serem alinhadas para visão estereoscópica.

7.6. DESLOCAMENTO DEVIDO AO RELEVO (E ÀS ALTURAS DOS OBJETOS)

Na *realidade* (no terreno), um objeto que possua uma dimensão vertical (altura), como uma árvore, um prédio, penhasco ou montanha, tem o topo na mesma posição *planimétrica* que a base, isto é, o topo está diretamente acima da base (veja os pontos C_1 e C_3 da Figura 7.7). Isto também ocorre numa carta topográfica, aonde o topo e a base estão sempre no mesmo lugar, devido à projeção ortogonal da carta (veja o Item 7.1), na qual os raios de observação são paralelos uns aos outros e perpendiculares à superfície observada. Também, numa fotografia aérea vertical de uma área *plana*, todos os pontos do terreno estão representados nas suas *posições corretas*. Porém, objetos que possuam uma dimensão vertical (altura) têm seus topos deslocados.

Na fotografia aérea existe somente um raio de luz perpendicular à superfície, que é o raio que passa pelo ponto nadir. Se uma árvore, por exemplo, está exatamente no ponto nadir, o seu topo e a sua base aparecem, na fotografia, como um único ponto, tal como num mapa. Mas, para qualquer outro ponto afastado do PP e que tenha uma dimensão vertical (altura), como o penhasco $\overline{C_1C_3}$ da Figura 7.7, tem-se um raio de luz passando pela base ($\overline{OC_3}$) e outro pelo topo ($\overline{OC_1}$). O raio que passa pelo topo é o mesmo que, na sua continuação, marca um outro ponto " C_2 " na superfície plana (ao nível da base) (veja a Figura 7.7). Estes raios formam a imagem do penhasco na fotografia. Lembre-se de que a fotografia é completamente plana; portanto, a altura do penhasco $\overline{C_1C_3}$ é representada por uma medida $\overline{c_1c_2}$ na fotografia. Esta mudança aparente da posição planimétrica é chamada *deslocamento devido ao relevo*, uma das características mais importante das fotografias aéreas. Esse deslocamento ocorre, na fotografia aérea, para cada objeto com altura diferente da do nível datum do ponto nadir. A posição do objeto é lateralmente deslocada em relação à sua própria base ou à qualquer outra base selecionada (veja o prédio do Congresso Nacional na Figura 7.8).

Estes deslocamentos devido ao relevo são radiais a partir do ponto nadir da fotografia aérea. Devemos lembrar que, nas fotografias verticais, o ponto nadir coincide com o ponto principal, que é fácil de ser identificado. Por isso é comum

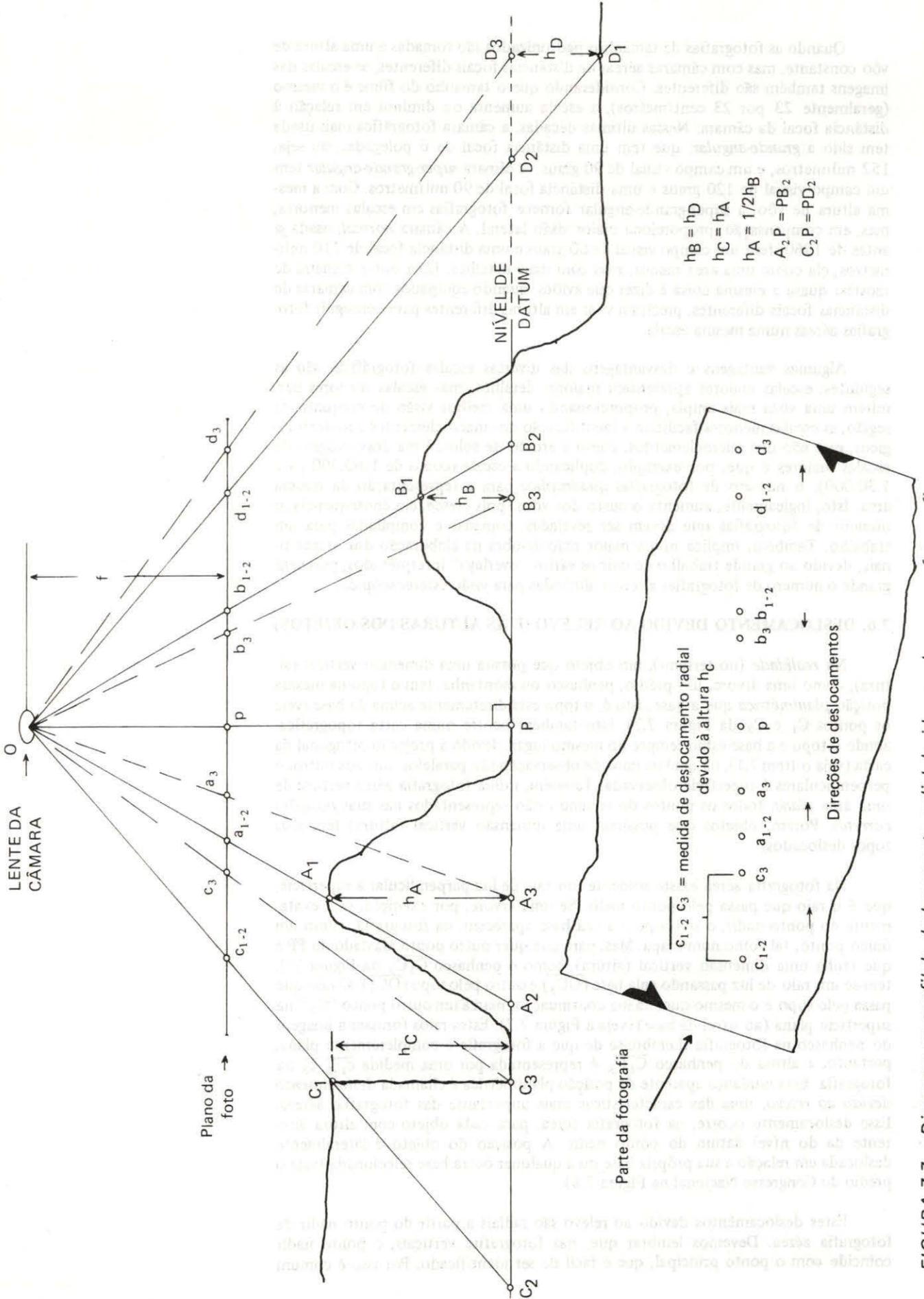


FIGURA 7.7 — Diagrama em perfil do deslocamento radial devido ao relevo numa fotografia aérea vertical



FIGURA 7.8 – Deslocamento radial devido ao relevo e à altura. (Número da foto: 7737; data: 15-11-1977) (com ponto principal marcado) (Cortesia da CODEPLAN)

considerar o nível do ponto nadir como um nível ou plano de datum para este tipo de fotografia aérea. A partir desse plano datum, qualquer imagem que esteja num nível diferente sofre um deslocamento radial.

Uma boa ilustração deste fato pode ser feita em sala de aula com um retroprojetor e um cilindro transparente de plástico ou celofane (diâmetro de 2 a 4cm, altura de 4 a 7cm). Localizando o cilindro de pé no centro do projetor, a imagem projetada na tela é a de um círculo, que representa um cilindro visto de cima. Quando o cilindro está deslocado do centro da tela, ele é somente visto parcialmente de lado, com deslocamento radial a partir do centro. Além disso, quanto mais afastado do ponto principal estiver o cilindro, maior será o deslocamento radial e maior, também, a porcentagem visível do seu lado.

Uma outra demonstração pode ser feita individualmente, observando-se a ponta de um lápis (ou outro objeto reto) com somente um olho (o olho humano

recebe a imagem com uma projeção central ou cônica, tal como a câmara aérea). Movimentando a cabeça lateralmente para ver o fenômeno (Se se preferir, pode-se mover o lápis de forma paralela, e não em forma de arco).

Podemos fazer quatro observações sobre aspectos que influem no deslocamento radial:

1º) O deslocamento é maior quando o objeto está mais afastado do ponto nadir. Por exemplo, veja na Figura 7.7 o deslocamento do ponto C_1 em comparação com o deslocamento do ponto A_1 , medindo a distância entre C_1 e C_3 e entre A_1 e A_3 na fotografia aérea. Isto também pode ser observado na Figura 7.9a.

2º) Para pontos situados à mesma distância do ponto nadir, os deslocamentos radiais são menores para objetos com alturas menores. Veja o caso das duas Torres na Figura 7.9b.

3º) A influência da altura do vôo pode aumentar o deslocamento devido ao relevo (Fig. 7.9.c) Quando a altura de vôo (H) é menor, o deslocamento devido à altura do objeto é maior. Isto acontece, também, quando temos câmaras com lentes de ângulos de abertura maiores, as quais captam mais os lados dos objetos.

4º) Notamos que o deslocamento devido ao relevo de um objeto tem *duas* representações diferentes, quando estamos usando um *par* de fotografias aéreas para visão estereoscópica. Por exemplo, o deslocamento devido ao relevo de um ponto qualquer na fotografia 1 de um par é diferente do deslocamento devido ao relevo do mesmo ponto na fotografia 2, que é tirada de uma outra posição. Esses dois deslocamentos, juntos, são importantes para medições de paralaxe e de alturas, que será o tópico do próximo capítulo.

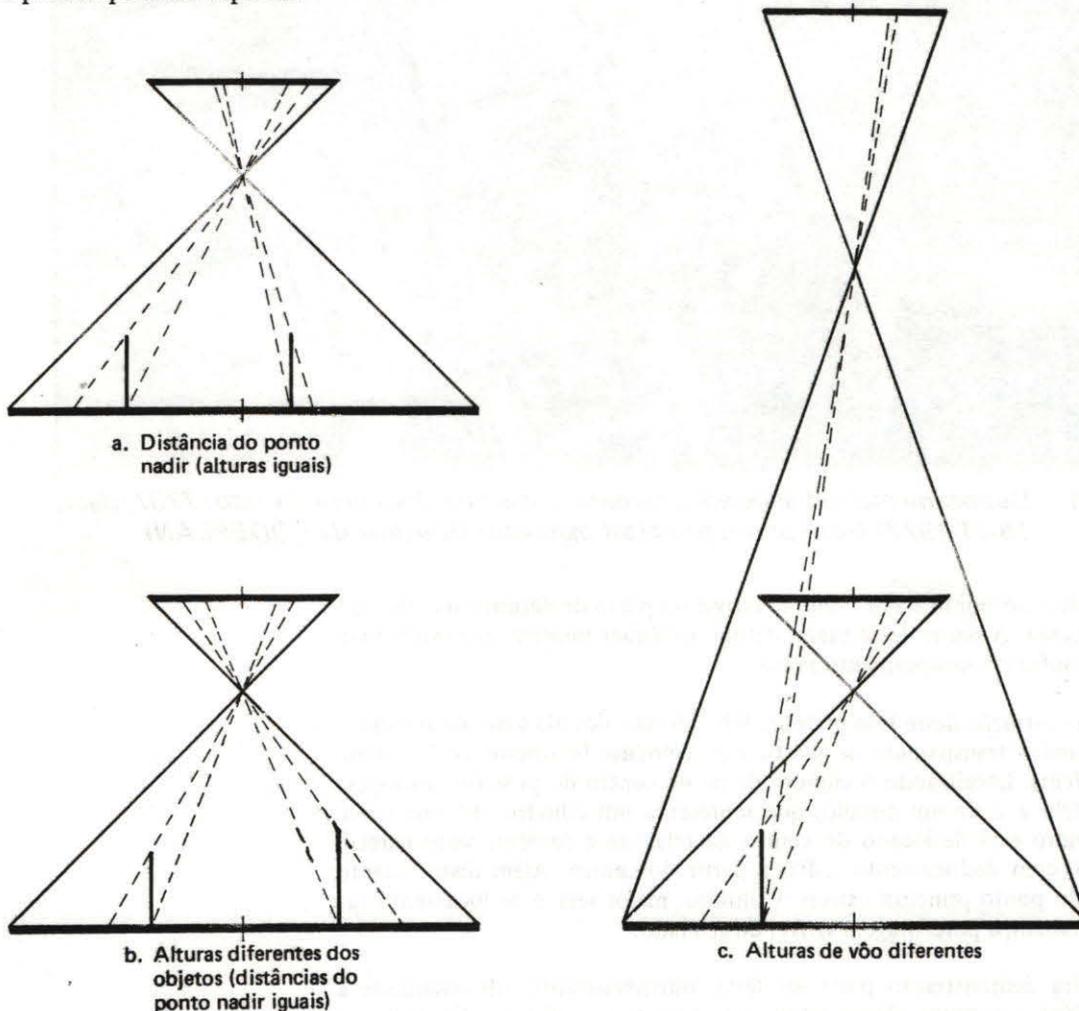


FIGURA 7.9 – Fatores que influem no deslocamento radial