

Programa computacional científico para a elaboração automática de listas de estrelas para astronomia de posição (LEDAP): revisão dos conceitos e exemplo de aplicação

RESUMO

É apresentado o LEDAP, programa computacional científico que elabora automaticamente listas de estrelas para a determinação astronômica de precisão da latitude (método de Sterneck), longitude (método das distâncias zenitais absolutas) e azimute (método das estrelas em circum-elongação). As aplicações das listas nas práticas de Astronomia de Posição possibilitam a rápida obtenção de coordenadas astronômicas e respectivos desvios-padrões. O conhecimento das coordenadas astronômicas e geodésicas (juntamente com as precisões) de um ponto permite o observador estimar pelo método astrogeodésico as componentes meridiana (ξ), 1° vertical (η) e o desvio da vertical (i), bem como, os respectivos desvios-padrões por propagação de covariâncias. Neste trabalho, a partir do uso de um teodolito de leitura direta de $1''$ e de um receptor de dupla frequência foram obtidas as coordenadas astronômicas e geodésicas (posicionamento relativo estático) de um pilar de concreto localizado na UNESP, câmpus Presidente Prudente/SP, bem como, as componentes e o desvio, sendo $\xi = 3,3339 \pm 3,3323''$, $\eta = -54,8849 \pm 4,5255''$ e $i = 54,9861 \pm 4,5217''$. Verificou-se que devido às precisões das coordenadas astronômicas serem inferiores às geodésicas, as precisões das componentes e do desvio foram da ordem de $4,5''$, independentemente do método de posicionamento por satélites utilizado, com exceção do Posicionamento por Ponto Simples (PPS) que degradou as estimativas.

PALAVRAS-CHAVE: Astronomia de Posição. Desvio da Vertical. Coordenadas Astronômicas. Método Astrogeodésico. GNSS.

Vinicius Amadeu Stuari Pereira
vpereira@utfpr.edu.br
orcid.org/0000-0001-7990-0789
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Santa Helena, Paraná, Brasil.

Gabriel Oliveira Jerez
gabriel.jerez@unesp.br
orcid.org/0000-0001-6893-2144
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

Paulo de Oliveira Camargo
paulo.camargo@unesp.br
orcid.org/0000-0001-7648-1291
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

INTRODUÇÃO

A determinação de coordenadas de pontos de interesse sobre a superfície da Terra requer o uso de sistemas de coordenadas, seja retangulares ou curvilíneos. Entretanto, os sistemas de coordenadas existentes apresentam diferentes parâmetros de definição (*reference system*), como, por exemplo, a orientação de um eixo de um sistema em relação à vertical (perpendicular ao geóide) e outro sistema em relação à normal (perpendicular ao elipsoide) (ZANETTI; DE FREITAS; VEIGA, 2008).

Com o avanço da tecnologia espacial, em especial o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) no posicionamento, o uso concomitante de diferentes sistemas de coordenadas tornou-se uma atividade habitual aos usuários. Devido a isso, caso não sejam realizadas as transformações ou reduções necessárias às observações para cada tipo de levantamento, as coordenadas obtidas apresentarão inconsistências (ZANETTI; DE FREITAS; VEIGA, 2008). Exemplo de uma inconsistência é a não redução nas medidas angulares em relação ao desvio da vertical (i), que se trata do ângulo compreendido entre a vertical e a normal em um ponto.

A vertical, definida pelo vetor da gravidade terrestre e materializada pelo fio de prumo, é utilizada como referência para a centralização nos instrumentos de medições astronômicas, topográficas e geodésicas. Se a situação se refere a determinação de coordenada astronômica, não há problemas de natureza de geometria, pois tal tipo de coordenada está relacionado à vertical. Porém, para a determinação de coordenada geodésica, cujas observações são executadas com um instrumento que se refere à vertical e os cálculos são realizados no elipsoide (normal), torna-se necessária, porém, geralmente negligenciada, a redução nas observações.

Featherstone e Rüeger (2000) destacam que a determinação do desvio da vertical permite, além da redução de direções horizontais e ângulos zenitais medidos em campo ao elipsoide, realizar:

- a) transformação entre coordenadas astronômicas e geodésicas;
- b) transformação de azimutes astronômicos em azimutes geodésicos, e vice-versa;
- c) redução de distâncias inclinadas medidas em campo ao elipsoide;
- d) determinação de diferenças de altura a partir de ângulos zenitais e distâncias inclinadas.

Ressalta-se também que o desvio da vertical pode ser utilizado na determinação de modelos geoidais e quase-geoidais, conforme pode ser verificado, por exemplo, em Albayrak et al. (2018).

O valor do desvio da vertical é obtido por meio de suas componentes meridiana (ξ) – projeção do desvio no meridiano passante pelo ponto – e 1° vertical (η) – projeção do desvio no plano perpendicular ao meridiano que passa pelo ponto – (GEMAEL, 1999). Vários métodos podem ser utilizados para determinar o desvio, dentre os quais se destacam o astrogeodésico, o gravimétrico, o astrogravimétrico e o Problema Procrustes Simples, através de observações GNSS e LPS (*Local Positioning System*) (GRAFAREND; AWANGE, 2000).

Em relação ao método astrogeodésico, empregado no trabalho, conhecendo-se as coordenadas astronômicas e geodésicas de um ponto obtêm-se as componentes do desvio. A determinação das coordenadas geodésicas trata-se de uma tarefa atualmente relativamente simples se comparada aos métodos astronômicos, os quais requerem, imprescindivelmente, boas condições climáticas e elaboração de listas de estrelas para a observação dos astros, além da habilidade do observador para realizar as leituras. Importante ressaltar que há trabalhos que utilizam câmaras digitais zenitais para tomadas de imagens dos astros, otimizando e facilitando assim as leituras e cálculos astronômicos; exemplos de trabalhos: Albayrak et al. (2019), Halicioglu, Deniz e Ozener (2016) e Vittuari et al. (2016).

As precisões que as coordenadas geodésicas e astronômicas podem apresentar, e que por sua vez influenciam as precisões das componentes do desvio da vertical, estão relacionadas aos métodos de posicionamento GNSS e aos tipos de determinações astronômicas empregados. A determinação da latitude pelo método de Sterneck, da longitude pelo método das distâncias zenitais absolutas e do azimute por observações às estrelas em circum-elongação proporcionam alta precisão nos resultados, da mesma forma que o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) e o posicionamento relativo estático no âmbito geodésico (MONICO, 2008).

Assim, o trabalho visa apresentar o LEDAP (Programa Computacional Científico para Elaboração Automática de Listas de Estrelas para Astronomia de Posição), o qual utiliza as efemérides astronômicas do Observatório Nacional (ON) para a geração de listas para a determinação de precisão da latitude (Sterneck), longitude (distâncias zenitais absolutas) e azimute (estrelas em circum-elongação), bem como empregá-lo em prática de campo. Além disso, determinar e avaliar as precisões das componentes do desvio da vertical (ξ, η) e do próprio desvio (i) por meio do método astrogeodésico, sendo as coordenadas astronômicas obtidas a partir da aplicação das listas do LEDAP e as coordenadas geodésicas calculadas por Posicionamento por Ponto Simples (PPS), Preciso (PPP), relativo estático e relativo estático rápido.

Na sequência é realizada, primeiramente, uma fundamentação teórica sobre os métodos para determinação de precisão da latitude, longitude e azimute astronômicos e do método astrogeodésico.

MÉTODOS DE DETERMINAÇÕES ASTRÔNOMICAS DE PRECISÃO

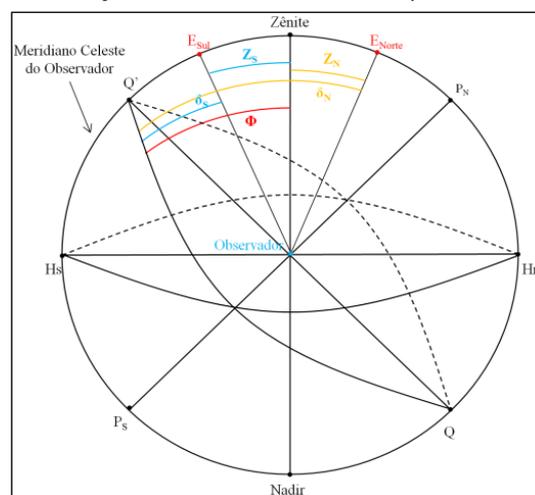
As determinações astronômicas de precisão asseguram, teoricamente, que as coordenadas (latitude e longitude) de um ponto são obtidas com um erro médio inferior a 0,3" (aproximadamente 10 m), e o azimute de uma direção com um erro médio inferior a 0,5", em valores absolutos (COSTA, 1989).

Diversos métodos podem ser utilizados, sendo destacados o método de Sterneck para a latitude, o método das distâncias zenitais absolutas para a longitude e o método de observações às estrelas em circum-elongação para o caso do azimute. A referência consultada para os métodos apresentados a seguir foi Arana e Pereira (2016).

MÉTODO DE STERNECK (LATITUDE)

O método consiste em observar um par de estrelas na passagem meridiana superior (meridiano celeste visível que passa pelo ponto de interesse), sendo uma estrela ao Norte e outra ao Sul do zênite. Nestas passagens realizam-se as leituras dos ângulos zenitais das estrelas (MUELLER, 1969). A Figura 1 apresenta o método, onde E_{Norte} representa a estrela ao Norte do zênite, E_{Sul} a estrela ao Sul do zênite, Z_N o ângulo zenital da estrela ao Norte, Z_S o ângulo zenital da estrela ao Sul, δ_N a declinação da estrela ao Norte, δ_S a declinação da estrela ao Sul, Φ a latitude astronômica do ponto, plano QQ' o Equador Celeste e plano $HnHs$ o horizonte astronômico local.

Figura 1 – Determinação da latitude astronômica pelo método de Sterneck



Fonte: Arana e Pereira (2016).

A latitude astronômica é determinada pela Equação 1, onde z'_N e z'_S são as leituras dos ângulos zenitais das estrelas ao Norte e ao Sul do zênite observados em campo e R_N e R_S as refrações astronômicas das referidas estrelas.

$$\Phi = \frac{\delta_S + \delta_N}{2} + \frac{z'_S - z'_N}{2} + \frac{R_S - R_N}{2} \quad (1)$$

As declinações das estrelas (δ_N, δ_S) devem ser obtidas para a hora legal (HL) do instante das observações. Para isso utiliza-se a interpolação expressada na Equação 2, sendo as declinações das estrelas extraídas das efemérides astronômicas disponibilizadas pelo ON (seção E), por exemplo.

$$\delta = \delta_0 + (HL + F) \cdot \Delta\delta_0 \quad (2)$$

onde δ_0 é a declinação da estrela às 0h TU (Tempo Universal), F o fuso horário do local (positivo a oeste do meridiano astronômico de Greenwich) e $\Delta\delta_0$ a variação horária da declinação.

A refração astronômica (R) pode ser determinada a partir da Equação 3:

$$R = 16,27'' \cdot \text{tg } z' \cdot \frac{P}{273,15^\circ + T} \quad (3)$$

sendo P a pressão atmosférica na unidade mbar e T a temperatura em graus celsius, ambos medidos localmente.

Restrições são impostas pelo método de Sterneck com objetivo de obter resultados de precisão (MATTOS, 1940): 1ª – os ângulos zenitais observados devem menores que 45° ($z'_N < 45^\circ$ e $z'_S < 45^\circ$), 2ª – a diferença entre os ângulos zenitais das estrelas do par não deve exceder 15° ($|z'_N - z'_S| < 15^\circ$), 3ª – o intervalo de tempo decorrido entre a observação da estrela ao Sul e da estrela ao Norte do zênite do par não deve exceder 20 minutos ($|\alpha_N - \alpha_S| < 20 \text{ min}$, onde α é ascensão reta das estrelas, obtidas nas efemérides do ON – seção E) e 4ª – deve-se observar 3 grupos de estrelas, sendo cada grupo composto por 4 pares.

MÉTODO DAS DISTÂNCIAS ZENITAIS ABSOLUTAS (LONGITUDE)

A longitude (Λ) de um determinado local pode ser definida como a diferença entre horas, neste caso entre a hora sideral local (S) e a hora sideral de Greenwich (S_G) (MUELLER, 1969):

$$\Lambda = S - S_G \quad (4)$$

A hora sideral local é obtida a partir da Fórmula Fundamental da Astronomia de Posição ($S = H + \alpha$). A determinação do ângulo horário da estrela (H) é realizada a partir da Equação 5, onde z é o ângulo zenital da estrela corrigido do erro do ponto zenital (Pz) e da refração astronômica (R), Φ a latitude astronômica do local e δ a declinação interpolada da estrela para o instante da observação.

$$\cos H = \frac{\cos z - \text{sen } \Phi \cdot \text{sen } \delta}{\cos \Phi \cdot \cos \delta} \quad (5)$$

O cálculo do ângulo horário pela Equação 5 apresenta dois resultados possíveis: +H para as estrelas a oeste do meridiano local e –H para as estrelas a leste do meridiano local, sendo que neste último caso deve-se somar 360° ou 24h ao valor.

A respeito da circunstância favorável à determinação da longitude, a mesma ocorre na passagem da estrela pelo 1° vertical (azimute astronômico $A_W = 90^\circ$ ou $A_E = 270^\circ$, contado a partir do Sul no sentido horário). Assim, nesta passagem, anotam-se o ângulo zenital observado (z') e os instantes cronométricos (T) em que a estrela cruza os cinco retículos horizontais do instrumento. A temperatura (T) e a pressão (P) são medidas apenas no início e no final das observações, sendo utilizados as médias dos valores. O ângulo zenital corrigido (z) é obtido pela Equação 6:

$$z = z' + Pz + R \quad (6)$$

onde o Pz (não coincidência da vertical do instrumento com a vertical do local) é determinado por meio de séries de leituras do ângulo zenital a alvos fixos nas posições direta (PD) e inversa (PI) do instrumento (Equação 7), e a refração astronômica pela Equação 3.

$$Pz = 180^\circ - \frac{Z_{PD} + Z_{PI}}{2} \quad (7)$$

A hora legal (HI) a ser utilizada na interpolação da declinação da estrela (Equação 2) e no cálculo da hora sideral de Greenwich (Equação 8) é determinada a partir da média dos cinco instantes cronométricos. Uma vez obtido o ângulo horário (H) resta-se determinar o valor da ascensão reta (α) interpolada da estrela e, em seguida, determinar a hora sideral local (S) pela Fórmula Fundamental. O procedimento para o cálculo de α é o mesmo realizado para a declinação.

Por fim, a hora sideral de Greenwich (S_G) é dada por:

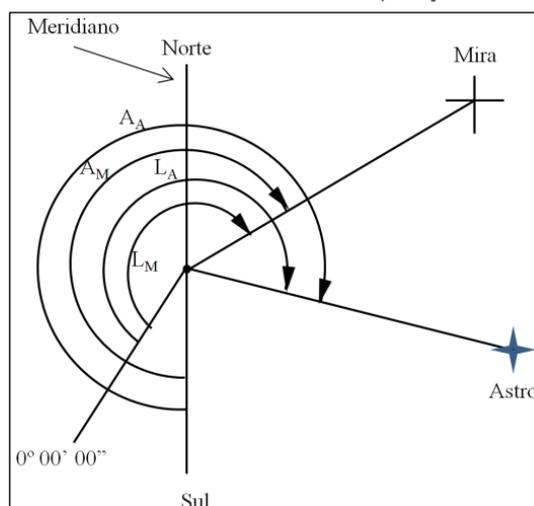
$$S_G = S_0 + (HI + F) \cdot 1,00273790926 \quad (8)$$

onde S_0 é o tempo sideral médio em Greenwich às 0h TU (fornecida nas efemérides do ON – seção F).

MÉTODO DAS OBSERVAÇÕES ÀS ESTRELAS EM CIRCUM-ELONGAÇÃO (AZIMUTE)

Na determinação do azimute astronômico de uma mira (direção de interesse), o astro é considerado um alvo com azimute conhecido. Assim, a questão consiste no transporte de azimutes, do astro para a mira. A Figura 2 apresenta a visualização esquemática do azimute do astro (A_A), do azimute da mira (A_M), da leitura do ângulo horizontal do astro (L_A) e da leitura do ângulo horizontal da mira (L_M).

Figura 2 – Azimute astronômico da mira (direção de interesse)



Fonte: Arana e Pereira (2016).

A partir da Figura 2 obtém-se o cálculo de A_M (Equação 9).

$$A_M = A_A + L_M - L_A \quad (9)$$

A circunstância favorável para a determinação do azimute astronômico consiste em observar a estrela durante o período próximo a elongação. A partir

da leitura do limbo horizontal do instrumento na posição direta obtêm-se os valores de L_M e L_A , quando se observa a mira e a estrela, respectivamente. Para a determinação de A_A utiliza-se a seguinte equação:

$$tg A_A = \frac{sen H}{sen \Phi \cdot \cos H - tg \delta \cdot \cos \Phi} \quad (10)$$

A Equação 10 admite duas raízes possíveis: $+A_A$ e $-A_A$. O valor positivo corresponde às observações às estrelas quando as mesmas estão a oeste do meridiano local, e o valor negativo é utilizado quando as observações às estrelas dão-se a leste do meridiano local.

Para o cálculo do azimute astronômico do astro deve-se conhecer a latitude astronômica do ponto, o ângulo horário da estrela e a declinação interpolada para o instante de observação. O ângulo horário é proporcionado através da manipulação da Fórmula Fundamental da Astronomia de Posição ($H = S - \alpha$), sendo a ascensão reta interpolada e a hora sideral local obtida pela Equação 11, onde Λ corresponde à longitude astronômica e T o instante da observação da estrela. Ressalta-se que neste método não se faz leituras do ângulo zenital.

$$S = S_0 + \Lambda + (T + F) \cdot 1,00273790926 \quad (11)$$

DETERMINAÇÃO DAS COMPONENTES E DO DESVIO DA VERTICAL PELO MÉTODO ASTROGEODÉSICO E RESPECTIVAS PRECISÕES

No método astrogeodésico as componentes 1° vertical (η) e meridiana (ξ) do desvio da vertical são determinadas por meio de coordenadas astronômicas e geodésicas de um mesmo ponto. De acordo com Gemael (1999):

$$\xi = \Phi - \varphi \quad (12)$$

$$\eta = (\Lambda - \lambda) \cdot \cos \varphi \quad (13)$$

onde Φ é a latitude astronômica, φ a latitude geodésica, Λ a longitude astronômica e λ a longitude geodésica. As componentes assim calculadas são válidas para o desvio da vertical definido por Helmert (TORGE, 1991), pelo fato de o ponto estar na superfície física da Terra e não exatamente no geóide. Para determinar o desvio da vertical (i) realiza-se:

$$i = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \quad (14)$$

A precisão das componentes ξ (σ_ξ) e η (σ_η), bem como as covariâncias ($\sigma_{\xi\eta}$ e $\sigma_{\eta\xi}$), podem ser estimadas a partir da propagação de covariâncias no modelo não linear composto pelas Equações 12 e 13. Considerando que coordenadas geodésicas e astronômicas são estatisticamente independentes (covariância nula), tem-se que a Matriz Variância-Covariância (MVC) das componentes do desvio da vertical ($\Sigma_{\xi\eta}$) é dada por:

$$\Sigma_{\xi,\eta} = \begin{bmatrix} \sigma_{\xi}^2 & \sigma_{\xi\eta} \\ \sigma_{\eta\xi} & \sigma_{\eta}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Phi}^2 + \sigma_{\varphi}^2 & -\sigma_{\varphi}^2 \cdot (\lambda - \Lambda) \cdot \text{sen}\varphi \\ -\sigma_{\varphi}^2 \cdot (\lambda - \Lambda) \cdot \text{sen}\varphi & \sigma_{\varphi}^2 \cdot (\lambda - \Lambda)^2 \cdot \text{sen}^2\varphi + (\sigma_{\lambda}^2 + \sigma_{\Lambda}^2) \cdot \text{cos}^2\varphi \end{bmatrix} \quad (15)$$

sendo σ_{Φ}^2 , σ_{Λ}^2 , σ_{φ}^2 e σ_{λ}^2 as variâncias das coordenadas astronômicas e geodésicas, respectivamente.

A precisão do desvio da vertical (σ_i) é determinada aplicando, também, a propagação de covariâncias no modelo funcional não linear da Equação 14:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\xi^2 \sigma_{\xi}^2 + 2\xi\eta\sigma_{\xi\eta} + \eta^2 \sigma_{\eta}^2}{\xi^2 + \eta^2}} \quad (16)$$

ressaltando que os valores de ξ e η na Equação 16 são em módulo.

LEDAP (PROGRAMA COMPUTACIONAL CIENTÍFICO PARA ELABORAÇÃO AUTOMÁTICA DE LISTAS DE ESTRELAS PARA ASTRONOMIA DE POSIÇÃO)

O LEDAP, implementado em C e disponível em <https://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/software/>, utiliza-se das efemérides astronômicas do ON para a elaboração automática de listas de estrelas, visando auxiliar a determinação astronômica de precisão da latitude, longitude e azimute (Figura 3).

Figura 3 – Interface inicial do LEDAP

```

#####
# LEDAP #
#####

Elaboracao Automatica de Listas de Estrelas para Astronomia de Posicao
- : Latitude (Metodo de Sterneck);
- : Longitude (Metodo das Distancias Zenitais Absolutas)
- : Azimute (Metodo de Observacoes as Estrelas em Circum-Elongacao)

Efemeride Astronomica: Observatorio Nacional (ON)

Desenvolvido por: Prof. Dr. Uinicius Amadeu Stuani Pereira
Universidade Tecnologia Federal do Parana
Campus Santa Helena

Contato: upereira@utfpr.edu.br

-----
<> Lista de Estrelas <->
-----

-> Gerar Lista de Estrelas para a Determinacao Astronomica de Precisao do(a):

[1] Latitude (Metodo de Sterneck)
[2] Longitude (Metodo das Distancias Zenitais Absolutas)
[3] Azimute (Metodo de Observacoes as Estrelas em Circum-Elongacao)

Opcao:

```

Fonte: Autoria própria (2020).

Para a elaboração da lista para a latitude pelo método de Sterneck devem ser consideradas as restrições impostas pelo método, apresentadas anteriormente. Além disso, é necessário o conhecimento aproximado das coordenadas astronômicas do local (Φ_0, Λ_0). O procedimento é descrito a seguir:

- a) Escolhida a hora legal do início das observações (H_{li}), calcula-se a hora sideral correspondente (S_i), dada pela Equação 17;

$$S_i = S_0 + \Lambda_0 + (HI_i + F) \cdot 1,00273790926 \quad (17)$$

- b) Na passagem meridiana as estrelas possuem ângulo horário nulo ($H = 0h$), o que implica em $S = \alpha$. Assim, de posse do catálogo estelar, escolhem-se as estrelas cuja $\alpha > S_i$;
- c) Calcula-se a distância zenital aproximada das estrelas (z_0) com a Equação 18, utilizando a latitude aproximada do local e a declinação contida no catálogo, sendo que, para respeitar a 1ª restrição devem-se determinar os limites da declinação das estrelas, onde estrelas ao Sul do zênite possuem $(\Phi_0 - 45^\circ) < \delta_s < \Phi_0$, e estrelas ao Norte do zênite $\Phi_0 < \delta_N < (\Phi_0 + 45^\circ)$;

$$z_0 = \pm(\Phi_0 - \delta) \quad (18)$$

- d) Calculado os limites de declinação, escolhem-se as estrelas que estejam nestes intervalos, bem como, respeitando a 2ª e a 3ª restrições do método;
- e) Determina-se a hora legal (HI) correspondente a hora sideral (lembrando que $S = \alpha$) de cada estrela selecionada, através da equação a seguir;

$$HI = \frac{S - S_0 - \Lambda_0}{1,00273790926} - F \quad (19)$$

- f) Ao final é gerada uma tabela contendo todas as informações necessárias para realizar e anotar as observações.

Para a elaboração da lista para a longitude pelo método das distâncias zenitais absolutas deve ser considerada a condição da passagem pelo 1º vertical ($|\delta| < |\Phi_0|$), sendo que para que o fenômeno seja visível é necessário que Φ_0 e δ tenham o mesmo sinal. Além disso, deve-se conhecer a longitude aproximada do local (Λ_0). O procedimento para a elaboração da lista é descrito a seguir:

- a) Estabelecida a HI_i , calcula-se S_i pela Equação 17;
- b) Com auxílio de um catálogo estelar, selecionam as estrelas que atendam $|\delta| < |\Phi_0|$, sendo δ e Φ_0 com o mesmo sinal;
- c) Calcula-se o ângulo horário das estrelas utilizando a Equação 20, onde a raiz positiva (+H) é atribuída às passagens das estrelas a oeste do 1º vertical ($A_W = 90^\circ$) e a raiz negativa (-H) às passagens a leste do 1º vertical ($A_E = 270^\circ$), sendo que neste caso soma-se 360° ou 24h;

$$\cos H = \frac{tg \delta}{tg \Phi_0} \quad (20)$$

- d) Obtidos os ângulos horários das estrelas, tanto para a passagem a oeste quanto a leste do 1º vertical, determinam-se as horas siderais locais dessas passagens utilizando a Fórmula Fundamental $S = H + \alpha$, sendo a ascensão reta contida no catálogo;

- e) Excluem-se as passagens das estrelas cujas horas siderais sejam inferiores a S_i ;
- f) Calcula-se a distância zenital aproximada das estrelas (z_0) a partir da Equação 21;

$$\cos z_0 = \frac{\text{sen } \delta}{\text{sen } \Phi_0} \quad (21)$$

- g) Ordenam-se as estrelas selecionadas pela hora sideral local e calcula-se a hora legal correspondente a partir da Equação 19;
- h) Ao fim é elaborada uma tabela contendo todas as informações necessárias para realizar e anotar as observações.

Já para a elaboração da lista para o azimute pelo método das observações às estrelas em circum-elongação deve ser atendida a condição de elongação ($|\delta| > |\Phi_0|$), com Φ_0 e δ possuindo o mesmo sinal. Além disso, deve-se conhecer a longitude aproximada do local (Λ_0). O procedimento para a elaboração da lista é descrito na sequência:

- a) Estabelecida a H_i , calcula-se S_i pela Equação 17;
- b) Com auxílio de um catálogo estelar, selecionam as estrelas que atendam $|\delta| > |\Phi_0|$, sendo δ e Φ_0 com o mesmo sinal;
- c) Calcula-se o ângulo horário das estrelas utilizando a Equação 22, onde a raiz positiva (+H) é atribuída para a elongação a oeste e a raiz negativa (-H) para a elongação a leste do meridiano do local, sendo que neste caso soma-se 360° ou 24h ao valor;

$$\cos H = \frac{\text{tg } \Phi_0}{\text{tg } \delta} \quad (22)$$

- d) Obtidos os ângulos horários das estrelas tanto para a elongação a oeste quanto a leste, determina-se a hora sideral local desses momentos utilizando a fórmula $S = H + \alpha$, sendo a ascensão reta contida no catálogo;
- e) Excluem-se as elongações das estrelas cujas horas siderais sejam inferiores a S_i ;
- f) Calcula-se a distância zenital aproximada das estrelas (z_0) a partir da Equação 23;

$$\cos z_0 = \frac{\text{sen } \Phi_0}{\text{sen } \delta} \quad (23)$$

- g) Calcula-se o azimute aproximado das estrelas (A_0) pela Equação 24, sendo a raiz positiva (+A) atribuída a elongação a oeste e a raiz negativa (-H) a elongação a leste do meridiano do local;

$$\text{sen } A_0 = \frac{\cos \delta}{\cos \Phi_0} \quad (24)$$

- h) Ordenam-se as estrelas selecionadas pela hora sideral local e calcula-se a hora legal correspondente a partir da Equação 19;
- i) Ao fim, é gerada uma tabela contendo todas as informações necessárias para realizar e anotar as observações.

Independente de qual opção escolhida na Figura 3, informações devem ser fornecidas pelo usuário por meio da interface do programa: data de interesse; hora legal do início das observações; hora legal do término das observações; fuso do local (positivo a oeste do meridiano astronômico de Greenwich); latitude e longitude aproximadas do local.

As coordenadas aproximadas do local podem ser obtidas por posicionamento com GNSS ou via Google Earth, por exemplo. Caso não se conheça o fuso horário do local, pode-se acessar o site da Divisão Serviço da Hora do ON (<http://www.horalegalbrasil.mct.on.br/>) para a obtenção do valor.

A partir do programa, o arquivo da lista escolhida é criado no diretório em que se encontra o mesmo. Para exemplificação, a Figura 4 apresenta trechos iniciais das três listas elaboradas para o dia 17 de maio de 2016 na UNESP, câmpus Presidente Prudente/SP (-22°07'; -51°24').

Figura 4 – Trechos das listas elaboradas pelo LEDAP para o dia 17 de maio de 2016 na UNESP, câmpus Presidente Prudente/SP

```
#####
# LEDAP #
#####

Lista de Estrelas - Latitude (Método de Sterneck)

17/05/2016 - Hora Legal de Início: 19h 00min - Lat: -22o 07'
                                                Lon: -51o 24'

Estado do Relógio: _____

Est. | Mag. | HL | Zo | Az. | Par | Z' | P | T
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
392 | 4.3 | 19h 09min 22s | 9o 02' 08'' | 0 | 83
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
393 | 4.0 | 19h 09min 57s | 36o 42' 27'' | 0 | 84
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
396 | 3.8 | 19h 15min 08s | 31o 20' 16'' | 180 | 84
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
410 | 3.2 | 19h 31min 50s | 5o 50' 11'' | 180 | 85
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
414 | 4.6 | 19h 38min 52s | 15o 06' 37'' | 0 | 85
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
1283 | 4.1 | 19h 41min 57s | 3o 43' 47'' | 180 | 86
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----

#####
# LEDAP #
#####

Lista de Estrelas - Longitude (Método das Distâncias Zenitais Absolutas)

17/05/2016 - Hora Legal de Início: 19h 00min - Lat: -22o 07'
                                                Lon: -51o 24'

Estado do Relógio: _____

Pressão Inicial: _____ mbar Temperatura Inicial: _____ oC

Est. | Mag. | HL | Zo | Az. | Z' | T1 T2 T3 T4 T5
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
1212 | 4.5 | 19h 01min 28s | 32o 49' 05'' | 90
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
585 | 3.5 | 19h 06min 22s | 80o 43' 22'' | 270
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
1394 | 4.8 | 19h 10min 33s | 66o 38' 13'' | 270
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
209 | 2.8 | 19h 18min 45s | 74o 09' 17'' | 90
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
1371 | 4.5 | 19h 25min 34s | 51o 51' 23'' | 270
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
266 | 4.2 | 19h 29min 30s | 56o 17' 30'' | 90
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----

#####
# LEDAP #
#####

Lista de Estrelas - Azimute (Método de Observações a Estrelas em Circum-
Elongacao)

17/05/2016 - Hora Legal de Início: 19h 00min - Lat: -22o 07'
                                                Lon: -51o 24'

Estado do Relógio: _____

Est. | Mag. | HL | Zo | Az | Lm | La | T
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
574 | 4.0 | 19h 00min 42s | 65o 44' 08'' | 334o 21' 52''
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
283 | 2.3 | 19h 00min 59s | 39o 47' 03'' | 70o 13' 13''
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
506 | 4.3 | 19h 02min 11s | 46o 27' 17'' | 295o 18' 49''
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
520 | 2.2 | 19h 02min 40s | 50o 40' 37'' | 299o 44' 36''
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
537 | 2.6 | 19h 04min 26s | 55o 55' 55'' | 306o 56' 21''
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
558 | 3.4 | 19h 08min 33s | 61o 31' 39'' | 318o 32' 03''
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
```

Fonte: Autoria própria (2020).

APLICAÇÃO, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando as listas elaboradas pelo programa realizou-se a determinação da latitude astronômica, no dia 17 de maio de 2016, e a longitude astronômica, no dia 23 de maio de 2016, para um pilar de concreto com dispositivo de centragem forçada localizado na UNESP, câmpus Presidente Prudente/SP. Um teodolito ZEISS THEO 010A de leitura direta de 1" foi utilizado, bem como os acessórios termômetro, barômetro e cronômetro.

As observações obtidas em campo para a latitude e longitude são apresentadas sucessivamente nas Tabelas 1 e 2. Ressalta-se que apenas 1 grupo de estrelas foi observado para a determinação da latitude e quatro estrelas para a longitude.

Tabela 1 – Observações obtidas para a determinação da latitude pelo método de Sterneck

Est.	Mag.	HI (hh:mm:ss)	z_0 (°:':")	Az. (°)	Par	z' (°:':")	P (mbar)	T (°C)
423	3.3	19:56:26	37:27:21	180	89	37:27:57,5	978,0	16,0
428	4.2	20:03:05	32:27:53	0	89	32:27:59,6	978,0	16,0
431	4.0	20:07:01	04:20:31	180	92	04:21:06,0	978,3	16,0
439	4.8	20:22:18	12:43:10	0	92	12:42:53,0	978,6	15,0
442	3.7	20:27:39	44:42:13	0	94	44:41:19,5	979,0	15,0
1304	4.4	20:30:05	42:14:38	180	94	42:14:25,6	979,0	15,8
1311	4.5	20:42:55	28:38:20	180	97	28:38:10,3	979,0	15,7
455	3.0	21:01:08	36:43:26	0	97	36:42:37,7	979,0	15,0

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 2 – Observações obtidas para a determinação da longitude pelo método das distâncias zenitais absolutas

Est.	548	293	577	622
Mag.	2.8	4.0	4.0	2.6
HI (hh:mm:ss)	20:10:35	20:21:22	20:36:50	20:45:17
z_0 (°:':")	42:31:27	63:44:04	47:07:19	60:45:13
Az. (°)	270	90	270	270
z' (°:':")	42:25:39,9	63:43:06,2	47:07:14,5	60:35:32,2
T_1 (hh:mm:ss)	20:10:27	20:21:03	20:36:16	20:45:21
T_2	20:10:45	20:21:18	20:36:34	20:45:39
T_3	20:11:02	20:21:33	20:36:51	20:45:56
T_4	20:11:18	20:21:48	20:37:08	20:46:13
T_5	20:11:36	20:22:03	20:37:25	20:46:30
Pressão (mbar)	Inicial: 986,0	Final: 987,5		
Temperatura (°C)	Inicial: 10,0	Final: 9,0		

Fonte: Autoria própria (2020).

Realizados os cálculos apresentados na seção “Métodos de Determinações Astronômicas de Precisão”, foram determinados quatro valores para a latitude (cada par proporciona um valor) e quatro valores para a longitude. Com esses valores obtiveram-se as médias e as estimativas dos desvios-padrões. Em relação à determinação das coordenadas geodésicas foi utilizado um receptor Topcon Hiper GGD de dupla frequência para a coleta de dados GNSS, realizada no dia 16 de maio de 2016. As coordenadas pelo PPS foram obtidas a partir do *software* PPS *On-line* (<https://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/pps-on-line/>) e pelo PPP no *software online* CSRS-PPP (<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php?locale=en>). Já os posicionamentos relativo estático e estático rápido foram realizados no *software* TBC (*Trimble Business Center*). Mais detalhes sobre os conceitos teóricos dos métodos de posicionamento utilizados podem ser consultados em Monico (2008) e Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008). As coordenadas astronômicas e geodésicas do pilar, e as respectivas precisões, são apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Coordenadas astronômicas e desvios-padrões do pilar de concreto localizado na UNESP, câmpus Presidente Prudente/SP

Φ	σ_{Φ}	Λ	σ_{Λ}
$-22^{\circ} 07' 18,0957''$	$3,3323''$	$-51^{\circ} 25' 26,5818''$	$4,8851''$

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 4 – Coordenadas geodésicas e desvios-padrões do pilar de concreto localizado na UNESP, câmpus Presidente Prudente/SP

Método de Posicionamento	φ	σ_{φ}	λ	σ_{λ}
PPS	$-22^{\circ} 07' 21,3427''$	$0,0522''$	$-51^{\circ} 24' 27,2465''$	$0,0706''$
PPP	$-22^{\circ} 07' 21,4288''$	$0,0009''$	$-51^{\circ} 24' 27,3362''$	$0,0015''$
Estático	$-22^{\circ} 07' 21,4296''$	$0,0002''$	$-51^{\circ} 24' 27,3352''$	$0,0002''$
Estático Rápido	$-22^{\circ} 07' 21,4295''$	$0,0002''$	$-51^{\circ} 24' 27,3353''$	$0,0002''$

Fonte: Autoria própria (2020).

A determinação astronômica de precisão proporcionou um desvio-padrão de $3,3323''$ em latitude e de $4,8851''$ em longitude. Em relação aos desvios-padrões das coordenadas geodésicas destaca-se a baixa precisão proveniente do PPS ($0,0522''$ e $0,0706''$) em comparação aos demais métodos de posicionamento GNSS.

As componentes do desvio da vertical (ξ, η) e o próprio desvio (i) foram obtidos a partir das Equações 12, 13 e 14, bem como, os respectivos desvios-padrões pelas Equações 15 e 16. Os resultados são apresentados na Tabela 5. Destaca-se que foram determinadas as componentes e o desvio utilizando cada uma das coordenadas geodésicas provenientes dos métodos supracitados.

Tabela 5 – Componentes, desvio da vertical e respectivos desvios-padrões obtidos a partir do uso de coordenadas geodésicas provenientes dos métodos de posicionamento GNSS

Método de Posicionamento	ξ	σ_{ξ}	η	σ_{η}	i	σ_i
PPS	3,2470"	3,3327"	-54,9670"	4,6738"	55,0628"	4,6706"
PPP	3,3331"	3,3323"	-54,8839"	4,5255"	54,9850"	4,5217"
Estático	3,3339"	3,3323"	-54,8849"	4,5255"	54,9861"	4,5217"
Estático Rápido	3,3338"	3,3323"	-54,8848"	4,5255"	54,9860"	4,5217"

Fonte: Autoria própria (2020).

Com base nas precisões das componentes do desvio da vertical estimadas (Tabela 5) verifica-se que, independentemente do método de posicionamento GNSS empregado para a determinação das coordenadas geodésicas, a magnitude do erro nas componentes meridiana e 1° vertical é estritamente relacionada às precisões das coordenadas astronômicas, haja vista que o posicionamento GNSS proporciona resultados mais precisos. Salienta-se que as precisões de ξ e η utilizando-se as coordenadas geodésicas do PPS foram mais degradadas que dos demais métodos, sendo possível recomendar o não uso deste método para a determinação do desvio da vertical. As mesmas análises das componentes podem ser aplicadas ao desvio da vertical e a sua precisão.

CONCLUSÕES

O programa computacional (LEDAP) foi desenvolvido com objetivo de facilitar e otimizar a elaboração de listas de estrelas para a determinação astronômica de precisão da latitude pelo método de Sterneck, da longitude pelo método das distâncias zenitais absolutas e do azimute pelo método de observações às estrelas em circum-elongação. É apresentada também a propagação de covariâncias nos modelos funcionais das componentes meridiana e 1° vertical e do próprio desvio da vertical, com o intuito de estimar as precisões desses elementos.

A partir da aplicação das listas de estrelas e de diferentes métodos de posicionamento GNSS foram obtidas as coordenadas astronômicas e geodésicas, e as respectivas precisões, de um pilar de concreto localizado no câmpus da UNESP de Presidente Prudente/SP. Pelo método astrogeodésico, as componentes meridiana e 1° vertical e o desvio da vertical foram determinados e, a partir da propagação de covariâncias, as precisões. As magnitudes das precisões das componentes mostram que as mesmas são relacionadas à magnitude da precisão das coordenadas astronômicas, podendo-se verificar que é indiferente a escolha do método de posicionamento GNSS a ser aplicado para obter as coordenadas geodésicas, com exceção do PPS.

Assim, utilizando um teodolito de leitura direta de 1" e as coordenadas geodésicas do posicionamento relativo estático foram obtidos $\xi = 3,3339 \pm 3,3323''$, $\eta = -54,8849 \pm 4,5255''$ e $i = 54,9861 \pm 4,5217''$ para um pilar de concreto localizado na UNESP de Presidente Prudente/SP.

Scientific computer program for the automatic elaboration of star lists for position astronomy (LEDAP): review of concepts and application example

ABSTRACT

LEDAP is presented, a scientific computer program that automatically prepares lists of stars for precision astronomical determination of latitude (Sterneck method), longitude (absolute zenith distances method) and azimuth (circum elongation method). The applications of the lists in the Position Astronomy practices make it possible to quickly obtain astronomical coordinates and respective standard deviations. The knowledge of the astronomical and geodetic coordinates (together with the precisions) of a point allows the observer to estimate the meridian (ξ), 1st vertical (η) components and the vertical deviation (i) by the astrogeodetic method, as well as the respective standard deviations for covariance propagation. In the work, from the use of a 1" direct reading theodolite and a dual frequency receiver it were obtained the astronomical and geodetic coordinates (static relative positioning) of a concrete pillar located at UNESP, campus Presidente Prudente/SP, as well as, the components and the vertical deviation, being $\xi = 3.3339 \pm 3.3323''$, $\eta = -54.8849 \pm 4.5255''$ and $i = 54.9861 \pm 4.5217''$. It was verified that due to the precision of the astronomical coordinates being inferior to the geodesics, the precision of the components and the deviation were of the order of 4.5", regardless of the satellite positioning method used, except for the Single Point Positioning (SPP) that degraded the estimates.

KEYWORDS: Position Astronomy. Vertical Deviation. Astronomical Coordinates. Astrogeodetic Method. GNSS.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Observatório Nacional pelo fornecimento das efemérides astronômicas, a CAPES pelo apoio financeiro por meio de bolsa de doutorado e ao INCT GNSS-NavAer, financiado pelo CNPq (processo 465648/2014-2), FAPESP (processo 2017/50115-0) e CAPES (processo nº 88887.137186/2017-00) pelo ambiente de trabalho.

REFERÊNCIAS

ALBAYRAK, M.; HALICIOGLU, K.; BASOGLU, B.; KILIC, Y. Investigating the function of the star trails to improve the determination of gravity field. *In: AGU Fall Meeting Abstracts*, 2018, Washington. **Proceedings** [...] Washington: AGUFM, 2018.

ALBAYRAK, M.; HALICIOGLU, K.; OZLUDEMIR, M. T.; BASOGLU, B.; DENIZ, R.; TYLER, A. R. B.; AREF, M. M. The use of the automated digital zenith camera system in istanbul for the determination of astrogeodetic vertical deflection. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 25, n. 4, 2019.

ARANA, J. M.; PEREIRA, V. A. S. **Astronomia de Posição – Geodésia II**. Notas de Aulas do Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica da FCT/UNESP, Presidente Prudente. Disponível em: <<https://cloud.utfpr.edu.br/index.php/s/OJHotXvEjvbVjgC>>. Acesso em: 2 fev. 2016.

COSTA, S. M. A. **Projeto Pró-Astro**. 1989. 187f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

FEATHERSTONE, W. E.; RÜEGGER, J. M. The importance of using deviations of the vertical for the reduction of survey data to a geocentric datum. **The Australian Surveyor**, v. 45, n. 2, p. 46-61, 2000.

GEMAEL, C. **Geodésia Física**. 1 ed. Curitiba: Editora UFPR, 1999. 302p.

GRAFAREND, E. W.; AWANGE, J. L. Determination of vertical deflections by GPS/LPS measurements. **Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation and Landmanagement**, v. 125, n. 8, p. 279-288. 2000.

HALICIOGLU, K.; DENIZ, R.; OZENER, H. Digital astro-geodetic camera system for the measurement of the deflections of the vertical: tests and results. **International Journal of Digital Earth**, v. 9, n. 9, p. 914-923, 2016.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation: Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York: Springer-Verlag Wien, 2008. 516p.

MATTOS, A. H. **Astronomia de Campo**. 3 ed. Rio de Janeiro: F. Briguiet & Cia., 1940. 95p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação**. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.

MUELLER, I. **Spherical and Practical Astronomy as applied to Geodesy**. New York: Frederick Ungar Publishing Co, 1969.

TORGE, W. **Geodesy**. 2 ed. Berlin: de Gruyter, 1991.

VITTUARI, L.; TINI, M. A.; SARTI, P.; SERANTONI, E.; BORGHI, A.; NEGUSINI, M.; GUILLAUME, S. A comparative study of the applied methods for estimating deflection of the vertical in terrestrial geodetic measurements. **Sensors**, v. 16, n. 4, p. 565, 2016.

ZANETTI, M. A. Z.; DE FREITAS, S. R. C.; VEIGA, L. A. K. Determinação do desvio da vertical. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 60/4, p.319-329, 2008.

Recebido: 19 mai. 2020

Aprovado: 06 ago. 2020

DOI: 10.3895/rbgeo.v8n3.12418

Como citar: PEREIRA, V. A. S.; JEREZ, G. O.; CAMARGO, P. O. Programa computacional científico para a elaboração automática de listas de estrelas para astronomia de posição (LEDAP): revisão dos conceitos e exemplo de aplicação. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 8, n. 3, p. 163-180, jul/set. 2020. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Vinicius Amadeu Stuani Pereira

Prolongamento da Rua Cerejeira, s/n, CEP 85892-000, Bairro São Luiz, Santa Helena, Paraná, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

