

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



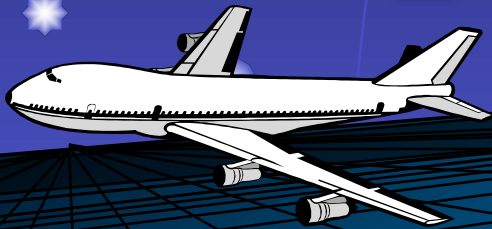
Departamento de Engenharia de Transportes - PTR

Laboratório de Topografia e Geodésia - LTG

PTR 5003 - Fundamentos de Informações Espaciais



Sistemas de Coordenadas e de Referência: ASTRONÔMICOS, GEODÉSICOS E CARTESIANOS





Introdução: *Tipos de Coordenadas*

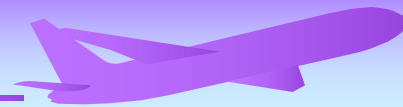
◆ **Coordenadas Geográficas:**

- **Geodésicas ou Elipsóidicas:** latitudes e longitudes referidas à direção da normal.
- **Astronômicas:** latitudes e longitudes referidas à direção da vertical. Referidas a um ponto da superfície da Terra (topocêntrica).

◆ **Coordenadas Cartesianas:**

- **Terrestre:** os eixos são ortogonais e sua origem está no centro de massa da Terra.
- **Celeste:** os eixos são ortogonais e sua origem está no baricentro do Sistema Solar.

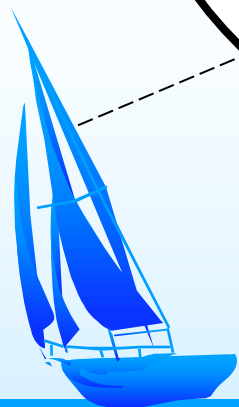




1 - Sistemas de Coordenadas Geográficas

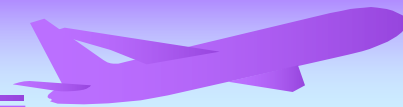
- ◆ As Coordenadas Geográficas foram desenvolvidas com a Navegação e Astronomia de posição.
- ◆ No passado, os navegadores obtinham sua localização na superfície terrestre pela observação dos astros, usando o **Sistema de Coordenadas Geográficas Astronômicas**.
- ◆ Atualmente, a determinação da posição na superfície da Terra é realizada através do rastreo de satélites artificiais, utilizando o **Sistema de Coordenadas Geográficas Geodésicas**.



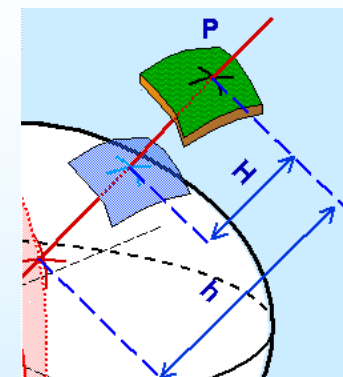
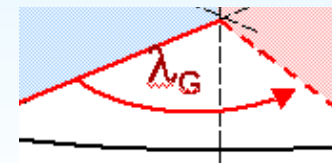


IRP: International Reference Pole (Norte)

Coordenadas Geodésicas

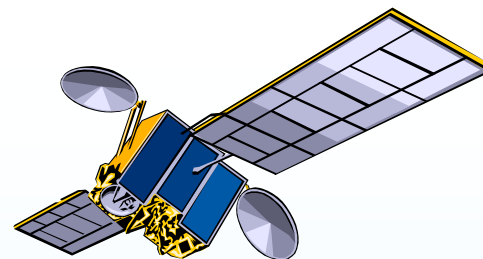
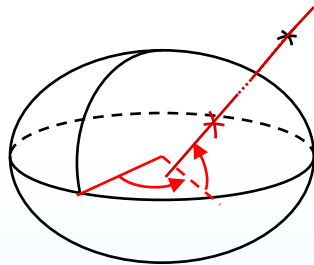
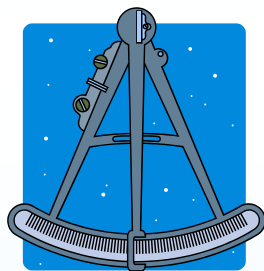


- ◆ λ_G - **Longitude geodésica ou elipsóidica:** ângulo diedro formado pelo meridiano de referência (IRM) e o meridiano local.
- ◆ ϕ_G - **Latitude geodésica ou elipsóidica:** ângulo plano que a normal forma com sua projeção sobre o plano do equador.
- ◆ **h - Altitude geométrica:** separação entre as superfícies física e elipsoidal medida ao longo da normal.
- ◆ **H – Altitude Ortométrica:** separação entre as superfícies física e geoidal medida ao longo da vertical.



Coordenadas Geodésicas

- ◆ As coordenadas geodésicas (ϕ , λ , h) são suficientes para fixar um ponto no espaço. No passado as coordenadas ϕ e λ eram obtidas através da triangulação, enquanto a altitude geodésica era praticamente impossível de ser obtida, pois não havia como obter as alturas geoidais.



- ◆ Com a era espacial, as observações sobre os satélites artificiais permitiram obter as coordenadas cartesianas tridimensionais, que são transformadas no **terno geodésico** (ϕ , λ , h).



Sistema de Coordenadas Astronômicas

Como posicionar um astro na Esfera Celeste ?

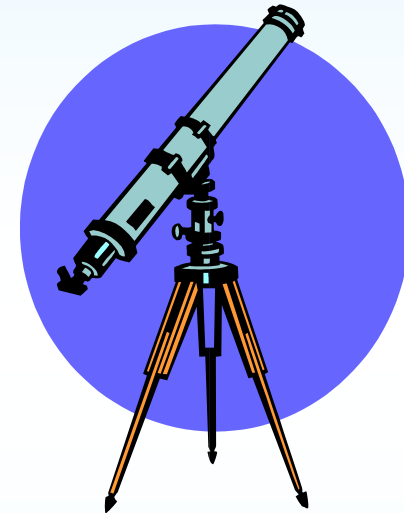
Para definir um Sistema de Coordenadas Astronômicas, são necessários quatro elementos:

- ângulo diedro (abscissa esférica)
- ângulo plano (ordenada esférica)
- distância (indeterminada)
- tempo

Sistema de Coordenadas Astronômicas

Nestes elementos baseiam-se os seguintes Sistemas de Coordenadas Astronômicas:

- Sistema Horizontal ou Zenital
- Sistema Equatorial Horário
- Sistema Equatorial Uranográfico



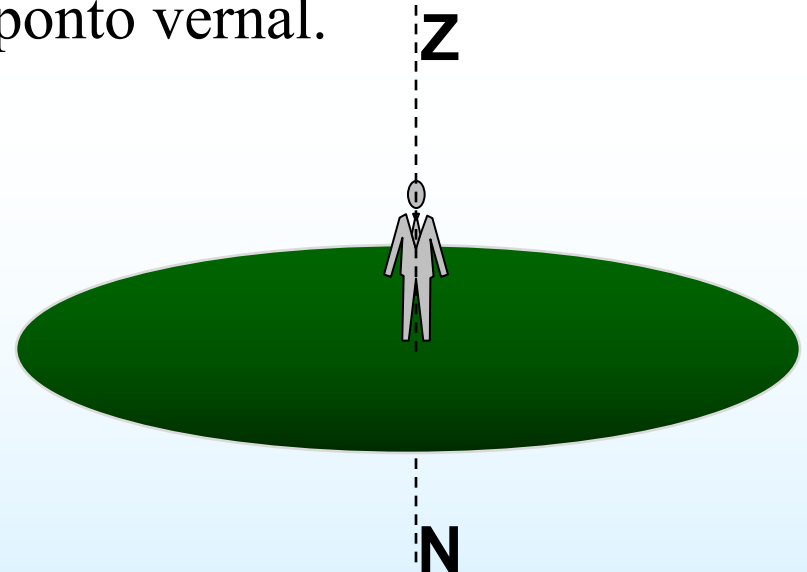
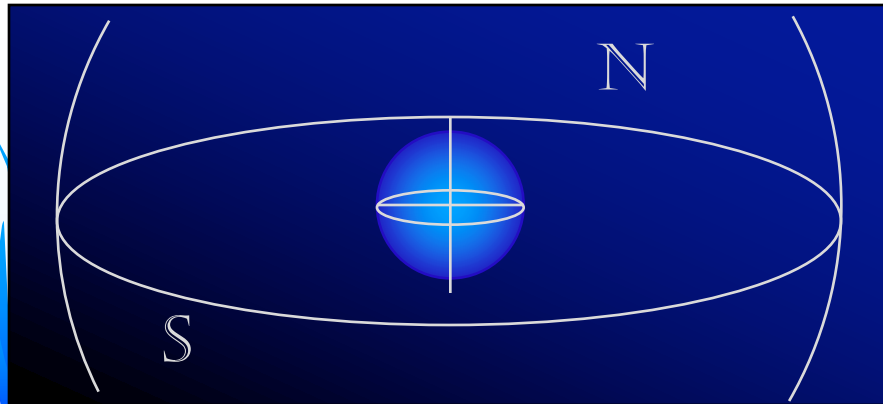
O que diferencia estes Sistemas são as distintas *referências astronômicas* para a origem de coordenadas



Sistemas de Coordenadas Astronômicas

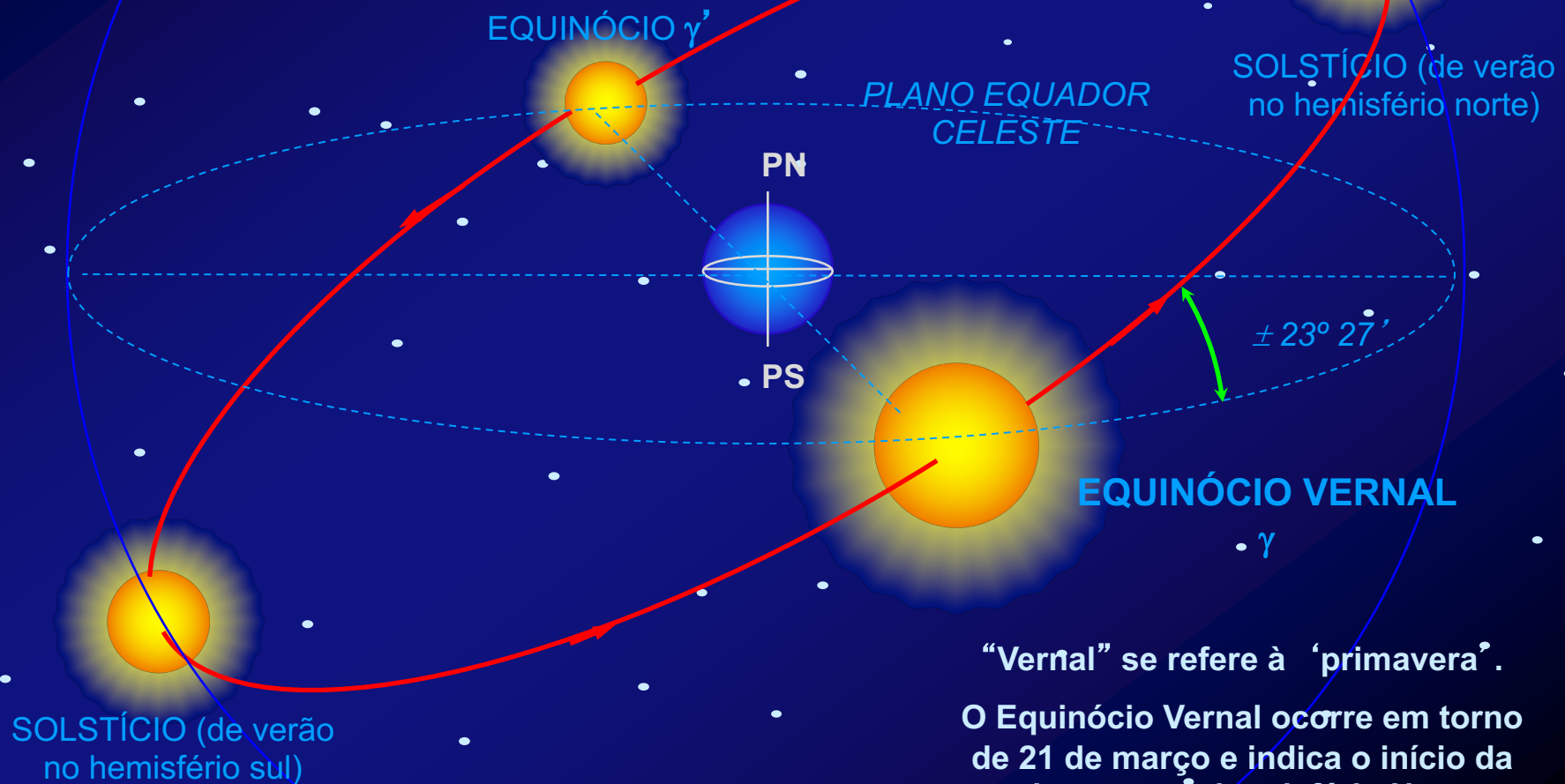
Algumas referências astronômicas:

- Plano do Equador Celeste e Pólos Celestes;
- Plano do Horizonte do Observador, Nadir e Zênite;
- Equinócio de primavera (HN) – ponto vernal.

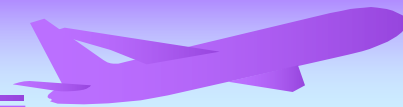


Posições (aparentes) do Sol na Esfera Celeste

“Equinócio”: duração do dia e da noite são equivalentes



“Vernal” se refere à ‘primavera’.
O Equinócio Vernal ocorre em torno de 21 de março e indica o início da primavera no hemisfério Norte.

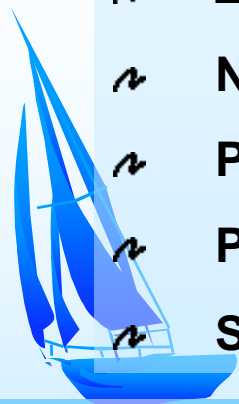
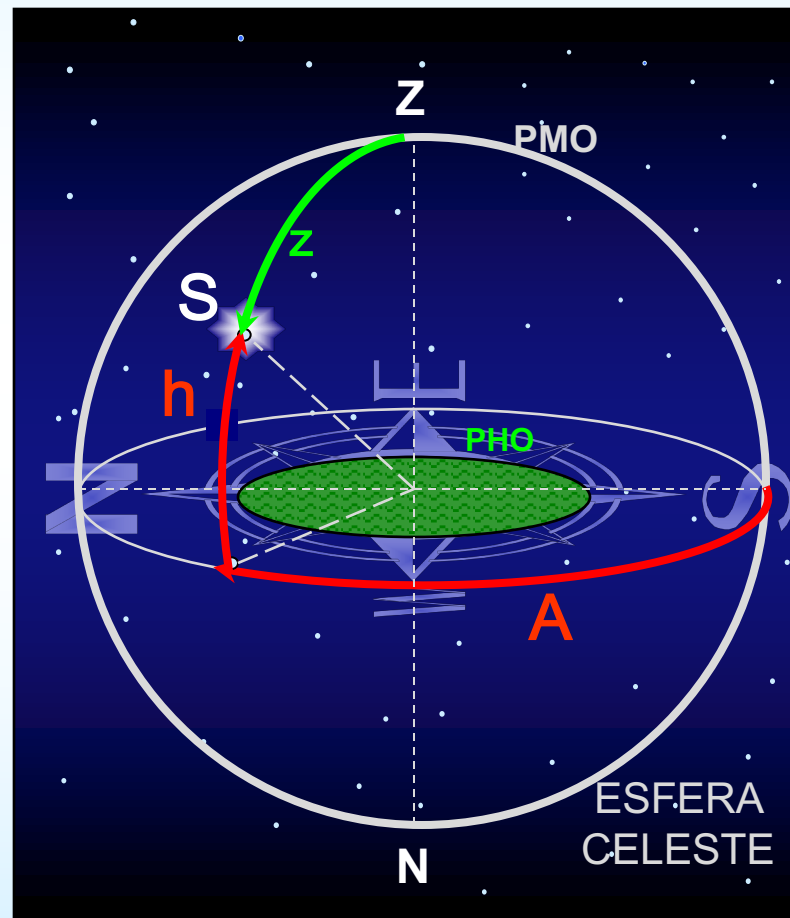


Coordenadas astronômicas

SISTEMA HORIZONTAL ou ZENITAL

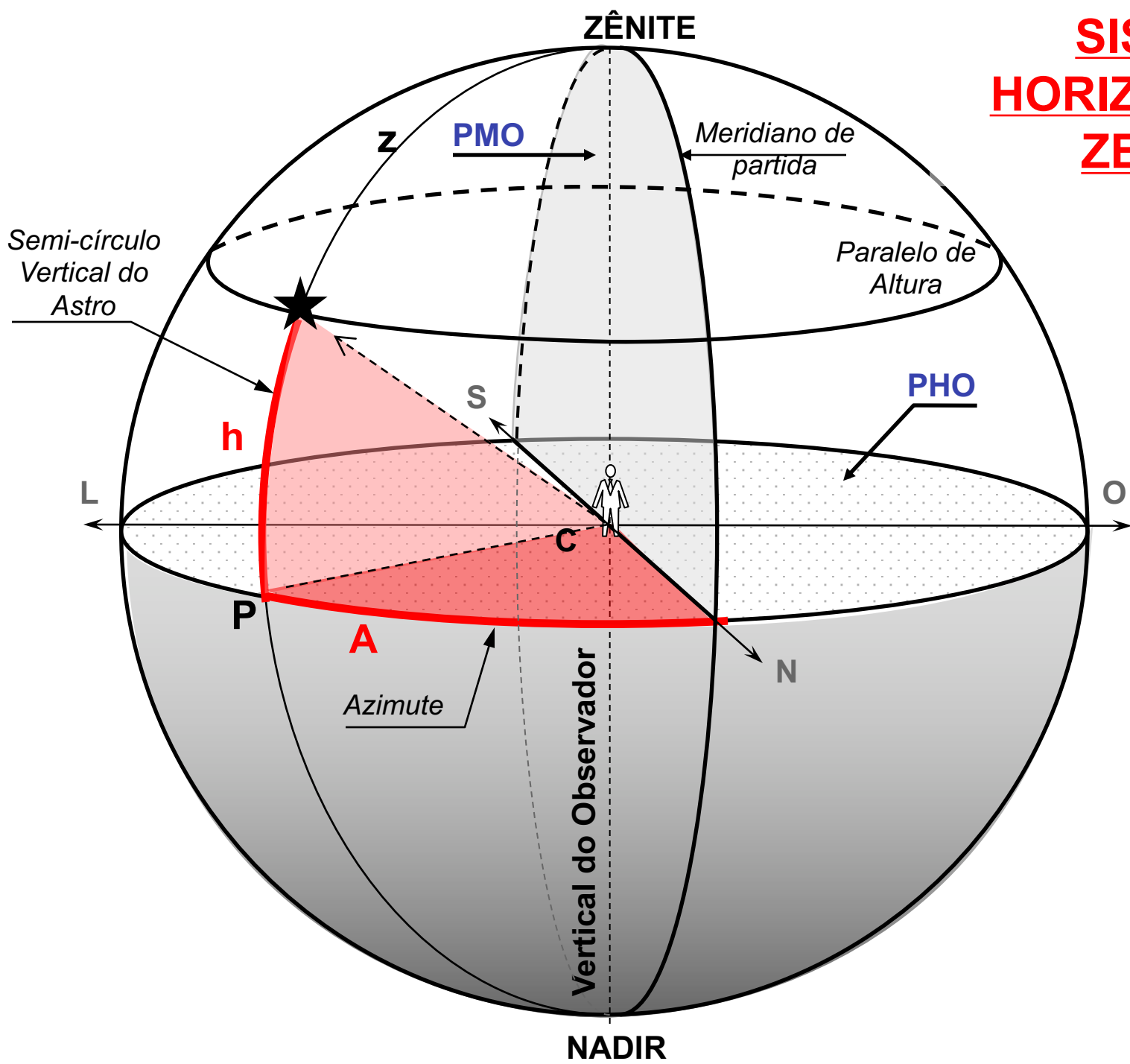
Referências: plano horizontal;
zênite; meridiano do observador

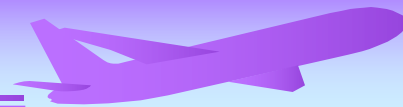
- ~ **h** – altura angular (0° a 90°)
- ~ **z** - distância zenital
- ~ **A** – azimute, a partir do Norte*, sentido oeste (0° a 360°)
- ~ **Z** – zênite
- ~ **N** – nadir
- ~ **PHO**: plano do horizonte do observador
- ~ **PMO**: plano do meridiano do observador
- ~ **S**: posição do astro



*alguns astrônomos contam o azimute a partir do Sul

SISTEMA HORIZONTAL ou ZENITAL



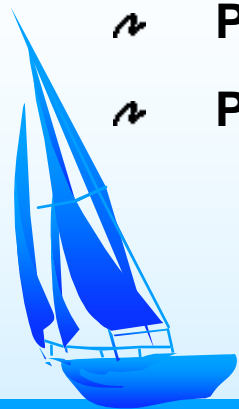


Coordenadas astronômicas

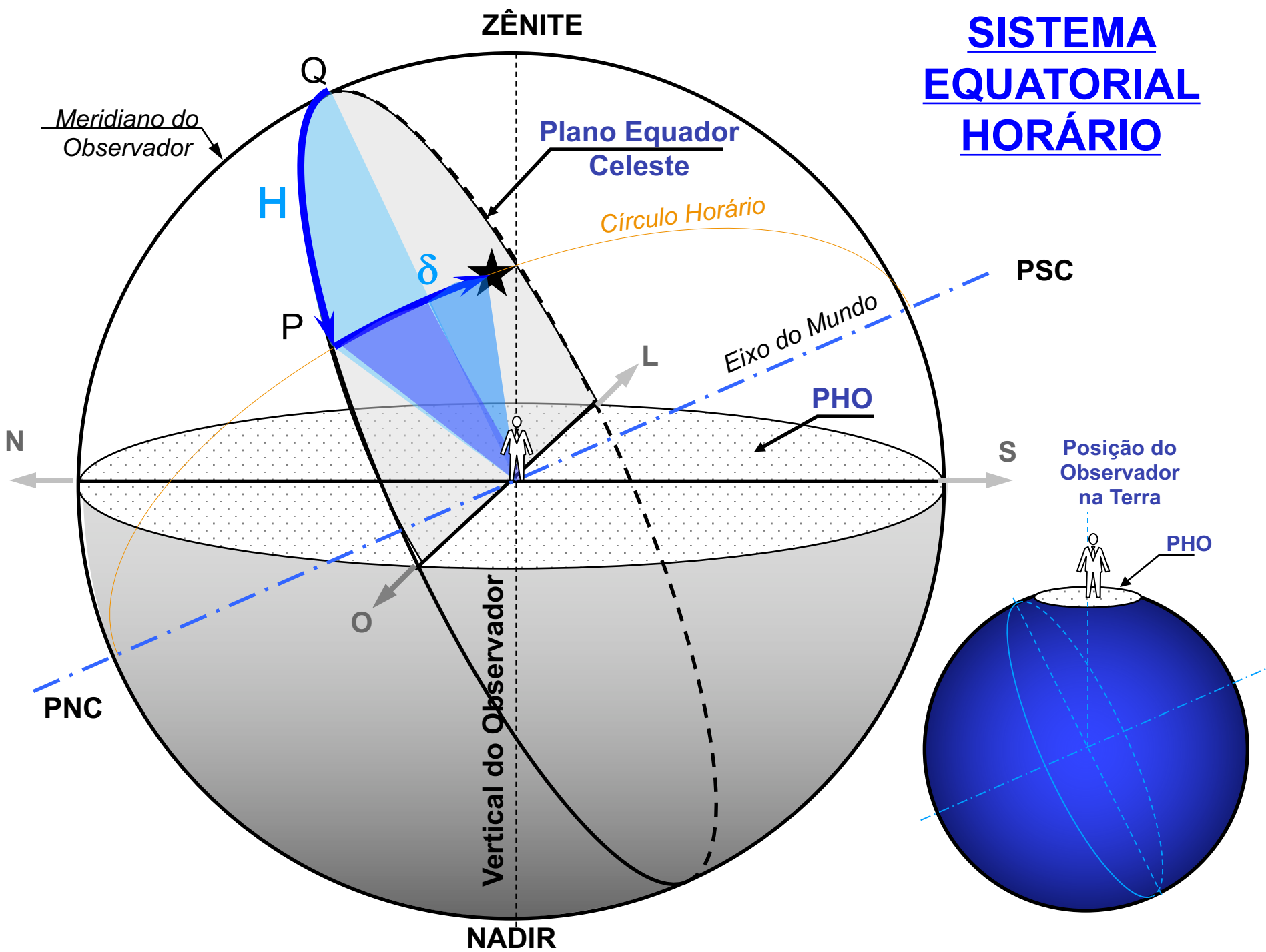
SISTEMA EQUATORIAL HORÁRIO

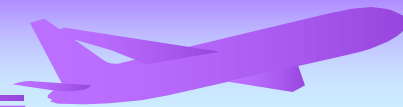
Referências: equador; pólos celestes; meridiano observador

- ~ δ – declinação (0° a 90°)
- ~ **H** – ângulo anti-horário diedro entre o PMO e o meridiano que contém o astro (0h a 24 hs)
- ~ **PNC** – Pólo Norte Celeste
- ~ **PSC** – Pólo Sul Celeste



SISTEMA EQUATORIAL HORÁRIO



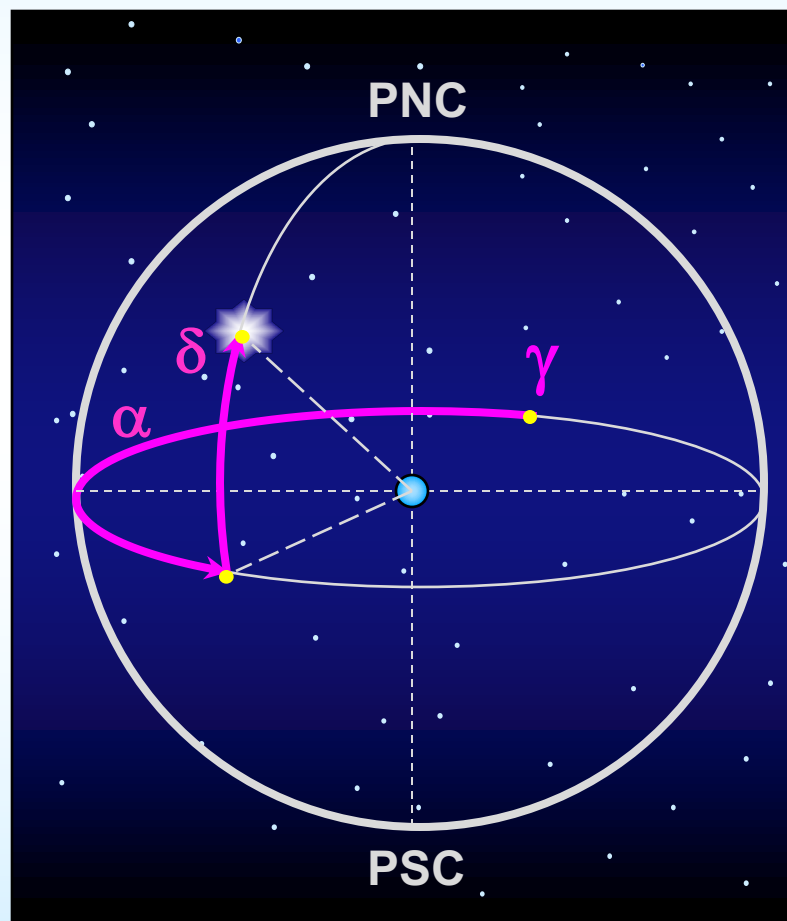


Coordenadas astronômicas

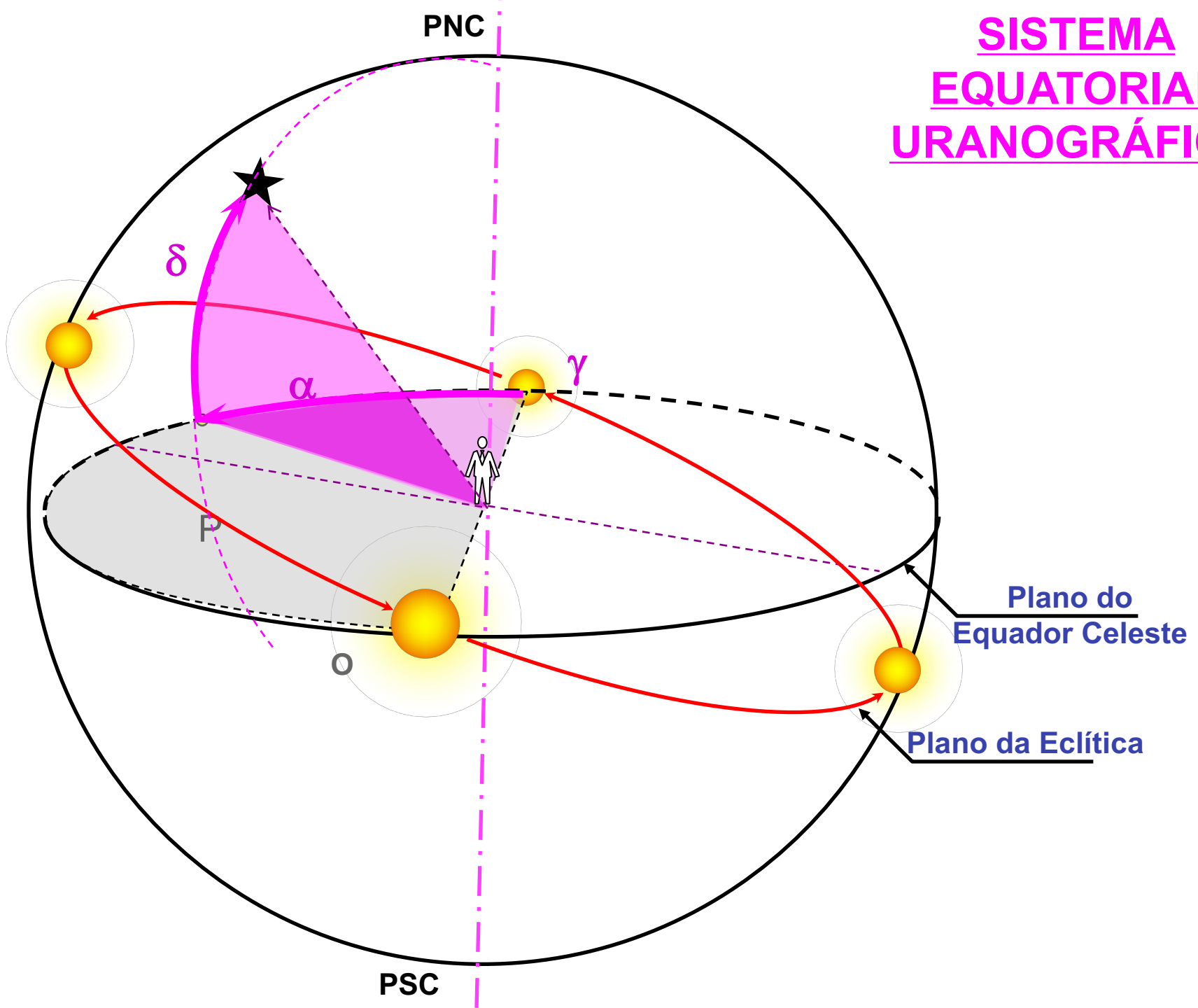
SISTEMA EQUATORIAL URANOGRÁFICO

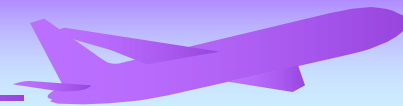
Referências: equador; pólos celestes; e ponto vernal γ

- ~ α – ascensão reta, sentido anti-horário (0° a 360° ou 0h a 24h)
- ~ δ – declinação (-90° a $+90^\circ$)
- ~ γ – ponto vernal
- ~ **PNC** – Pólo Norte Celeste
- ~ **PSC** – Pólo Sul Celeste



SISTEMA EQUATORIAL URANOGRÁFICO

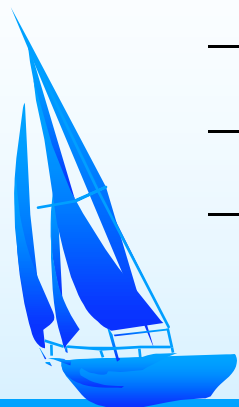
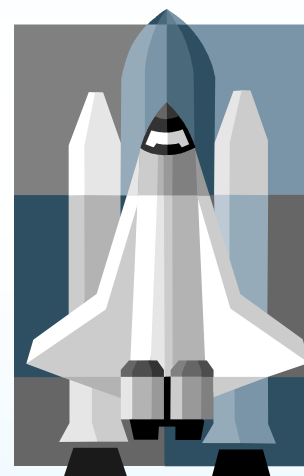


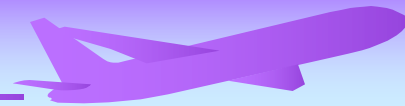


2 - Sistemas de Coordenadas Cartesianas

- ◆ A Era Espacial despertou o interesse por uma série de problemas envolvendo a forma, a dimensão e os movimentos da Terra. Concluiu-se que era necessário, entre outros tópicos, estudar, qualificar e quantificar:

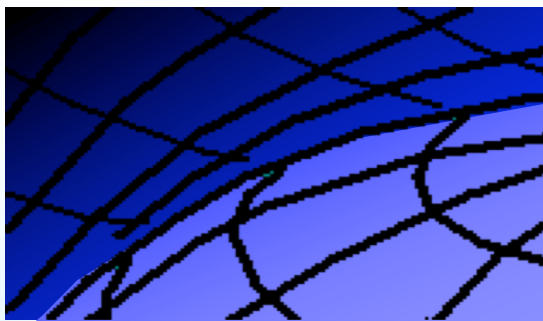
- O nível médio do mar;
- O movimento de rotação;
- As marés terrestres e oceânicas;
- O deslocamento em grandes estruturas;
- As variações no eixo de rotação (precessão, nutação, movimento do pólo)



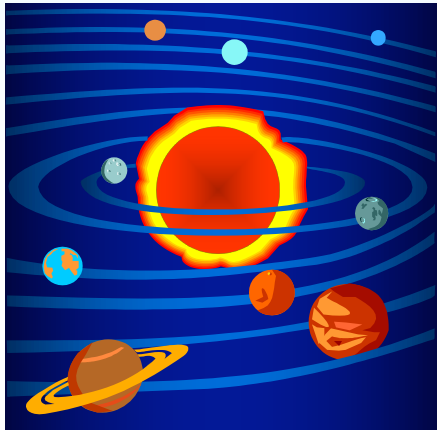


- ◆ Para realizar as referidas tarefas concluiu-se que dois sistemas cartesianos de referência eram necessários e suficientes:

- Referencial Cartesiano Celeste
- Referencial Cartesiano Terrestre



Referencial Cartesiano Celeste

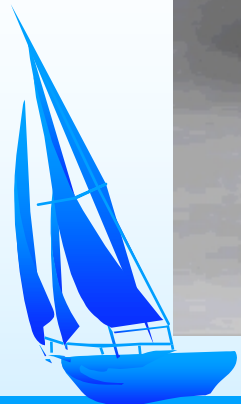
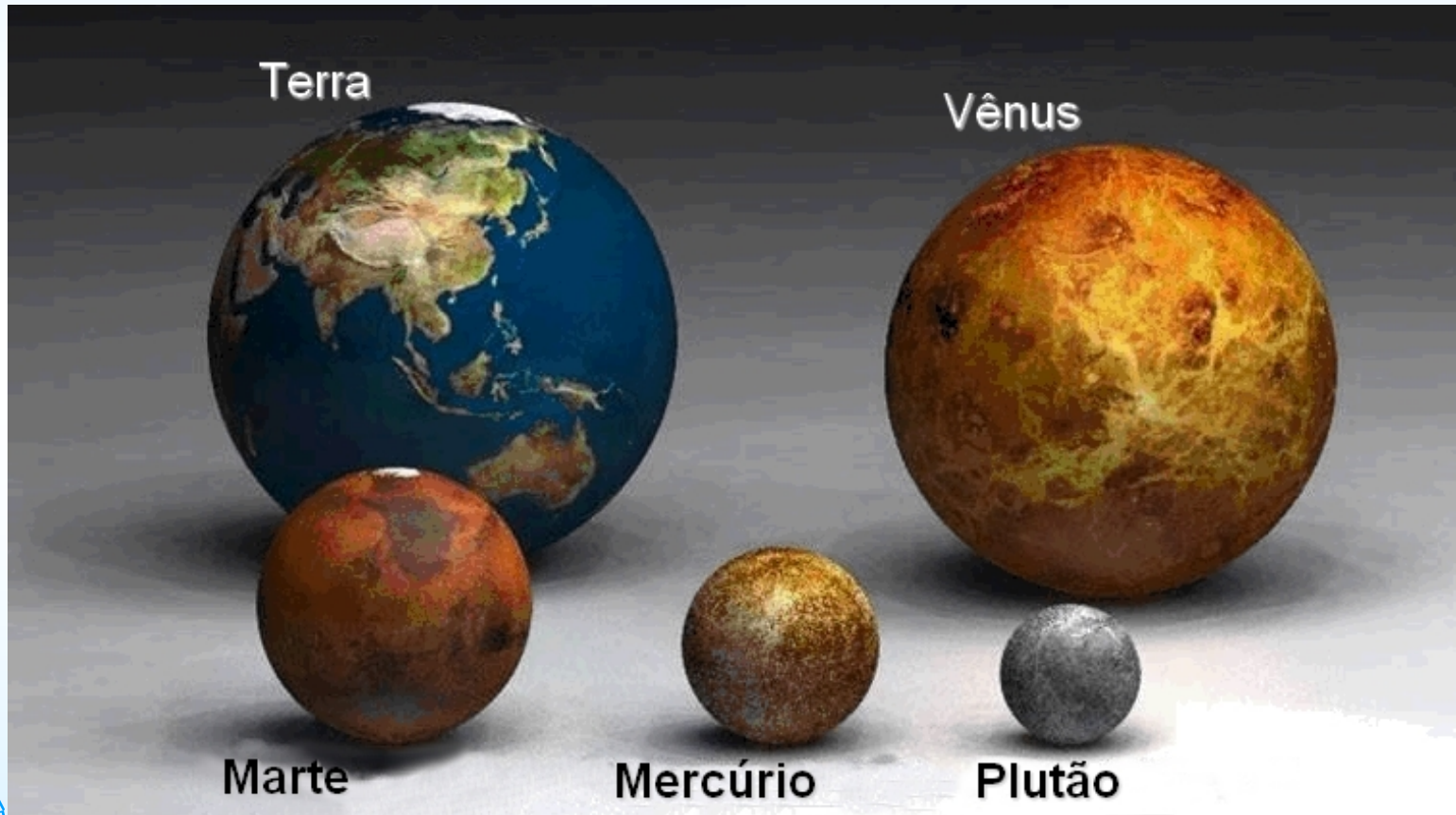


- Origem: Baricentro do sistema solar
- o eixo OX é orientado na direção do Equinócio Vernal para a época J2000.0*
- o eixo OZ é orientado na direção do Pólo Celeste de Referência para a época J2000.0* o eixo OY a 90° de OX completando um sistema dextrógiro.

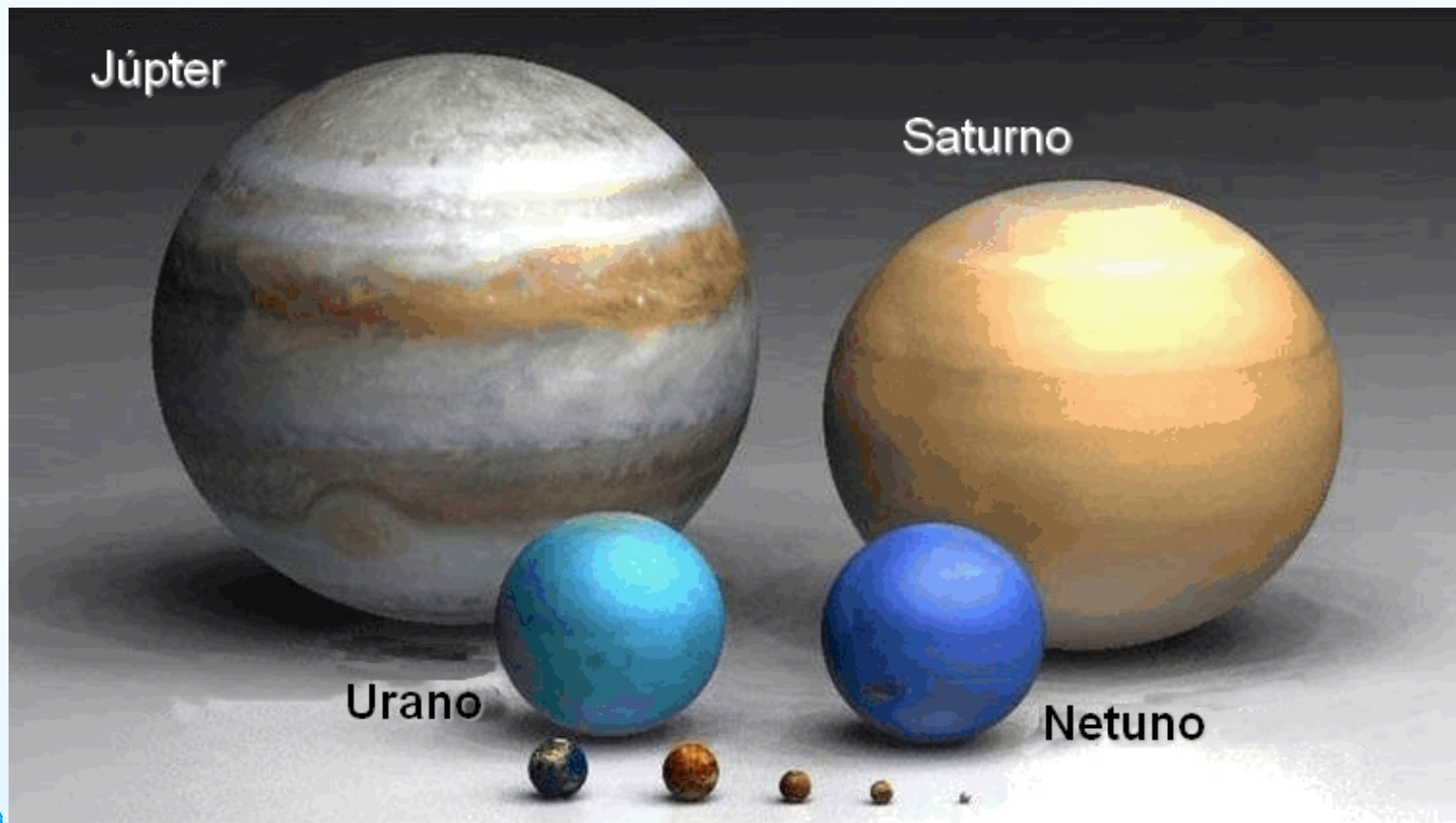
* (corresponde a 1 de Janeiro de 2000, 11:58:55.816, TUC – Tempo Universal Coordenado)



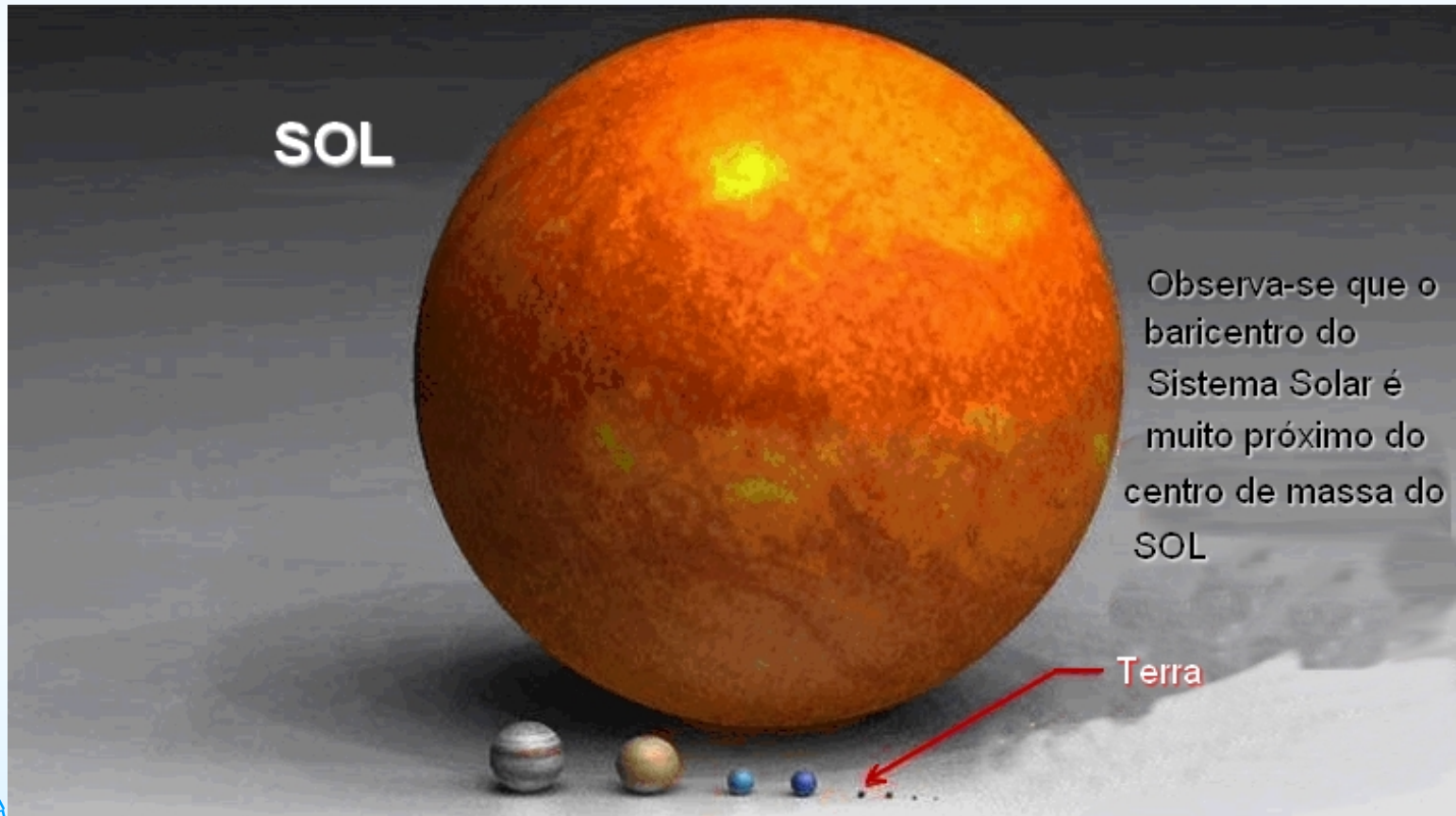
Referencial Cartesiano Celeste

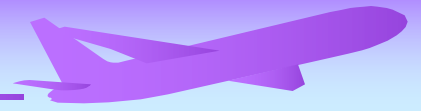


Referencial Cartesiano Celeste

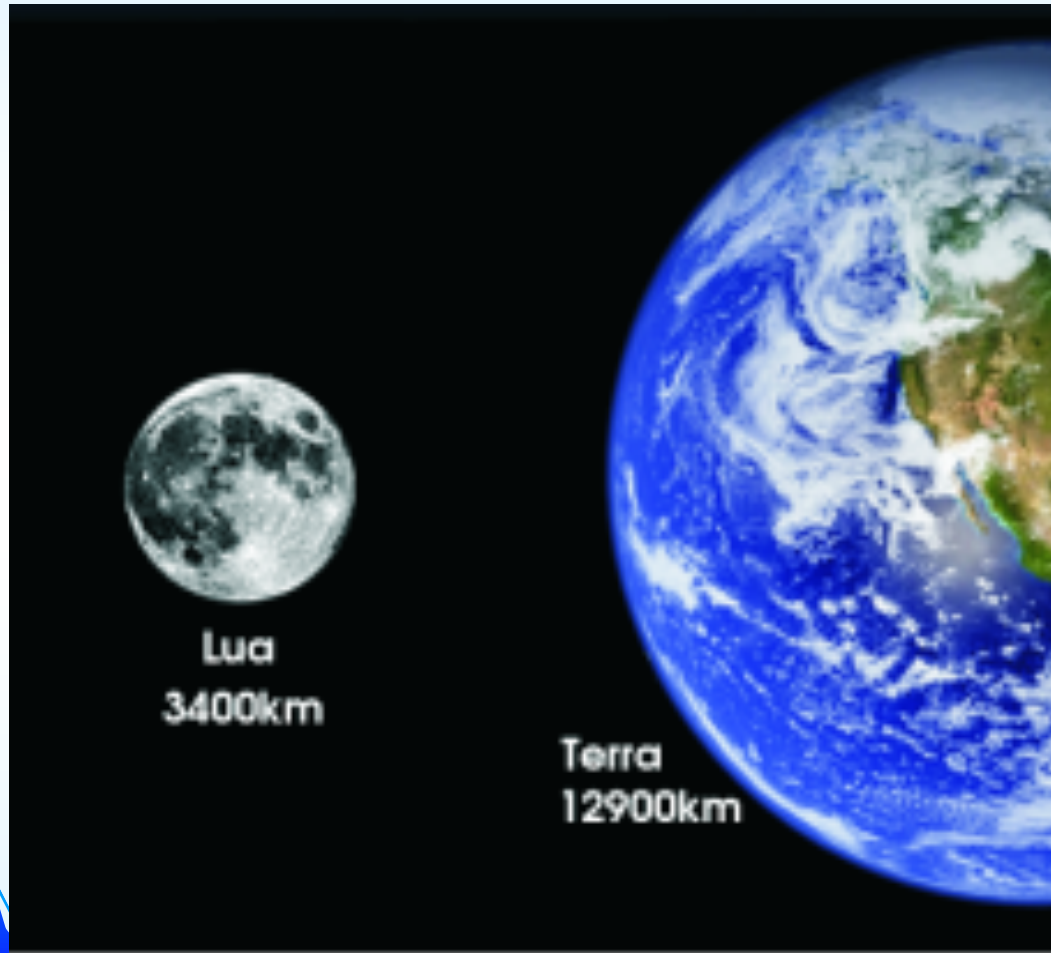


Referencial Cartesiano Celeste



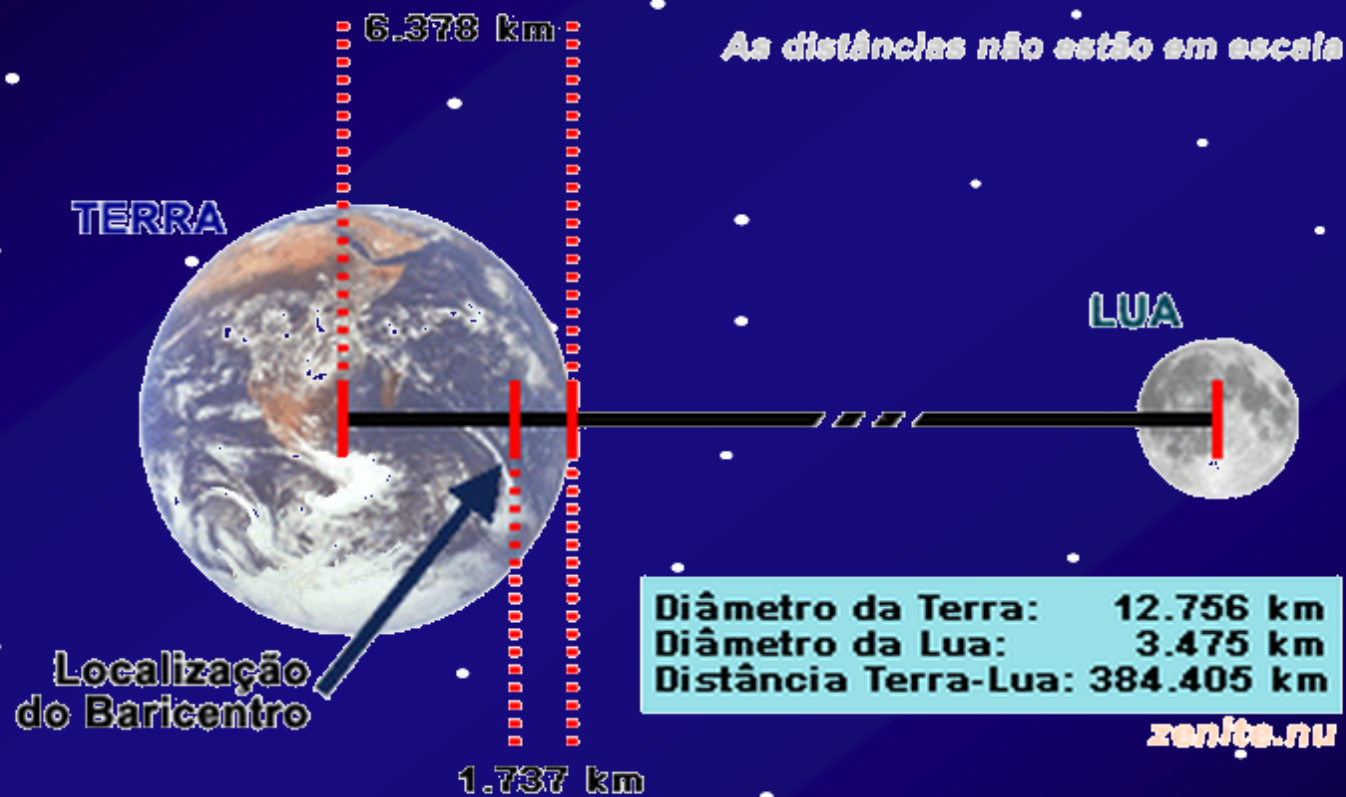


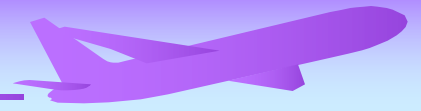
Sistema Terra - Lua



No caso do sistema Terra-Lua, a massa da segunda influi significativamente, sendo que o centro de massa do sistema encontra-se a aproximadamente $\frac{2}{3}$ do raio da Terra, a partir do centro da mesma.







Sistema Terra - Lua

No sistema Terra-Lua quem gira ao redor do sol é o baricentro do sistema.

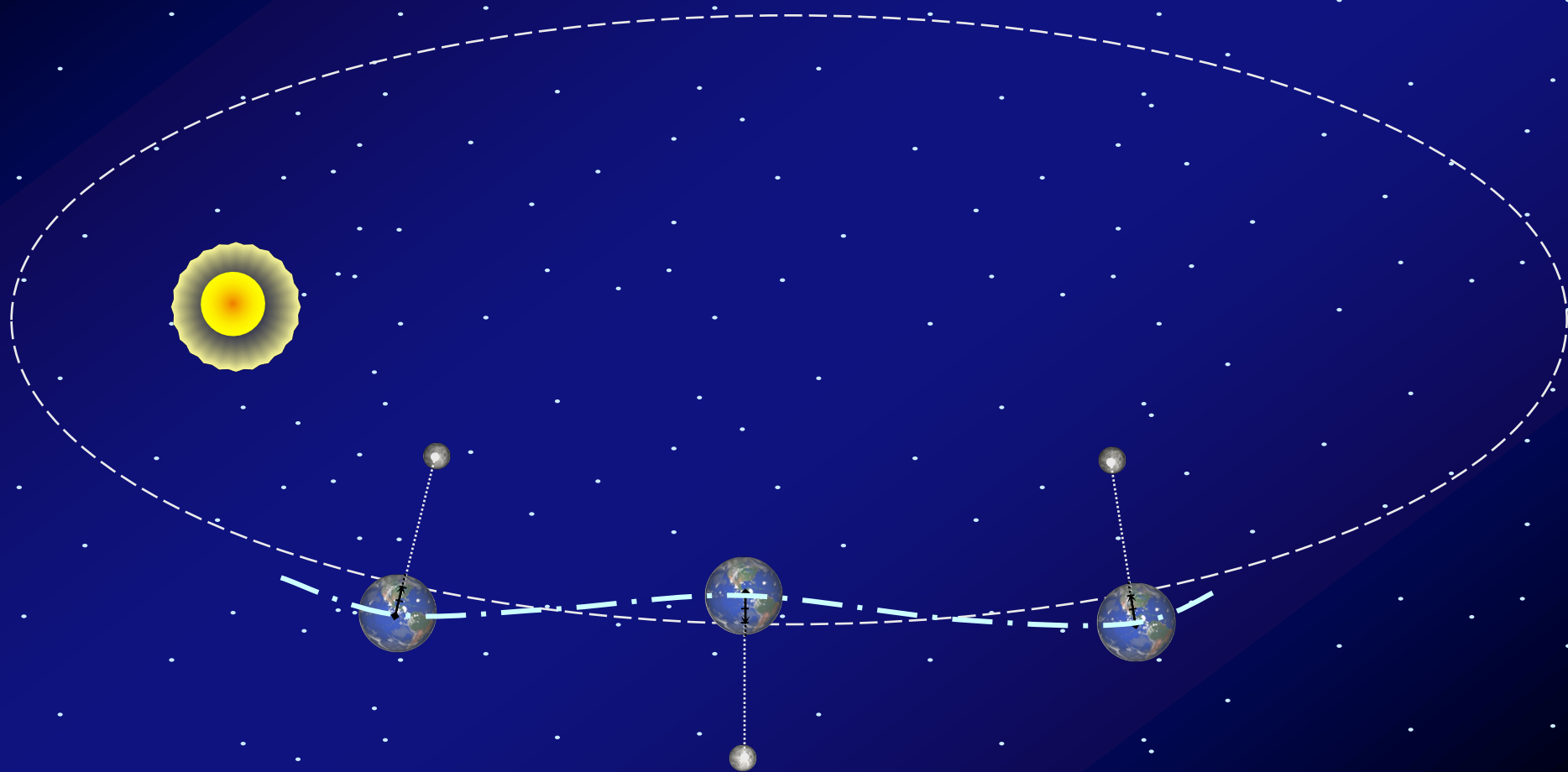
Quem gira ao redor da Terra não é a Lua.

O sistema gira ao redor do baricentro do mesmo.

O geocentro oscila entorno da órbita ao redor do sol, sendo o seu período igual ao período lunar.



Órbita do sistema Terra-Lua



Referencial Cartesiano Celeste

O referencial celeste é materializado através de um certo número de **quasares** dos quais se conhecem as coordenadas uranográficas (α , δ).

Os quasares estão tão distantes da Terra que não apresentam paralaxe e também se comportam como se fossem objetos fixos no espaço. Com isso, o referencial que eles materializam (celeste) tem fixas a origem e a orientação dos eixos.

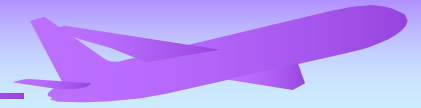
As observações aos quasares são conduzidas através do **VLBI (Very Long Baseline Interferometry)**.

VLBI

Materialização do Referencial Celeste pela Interferometria de ondas emitidas por quasares



Estação VLBI

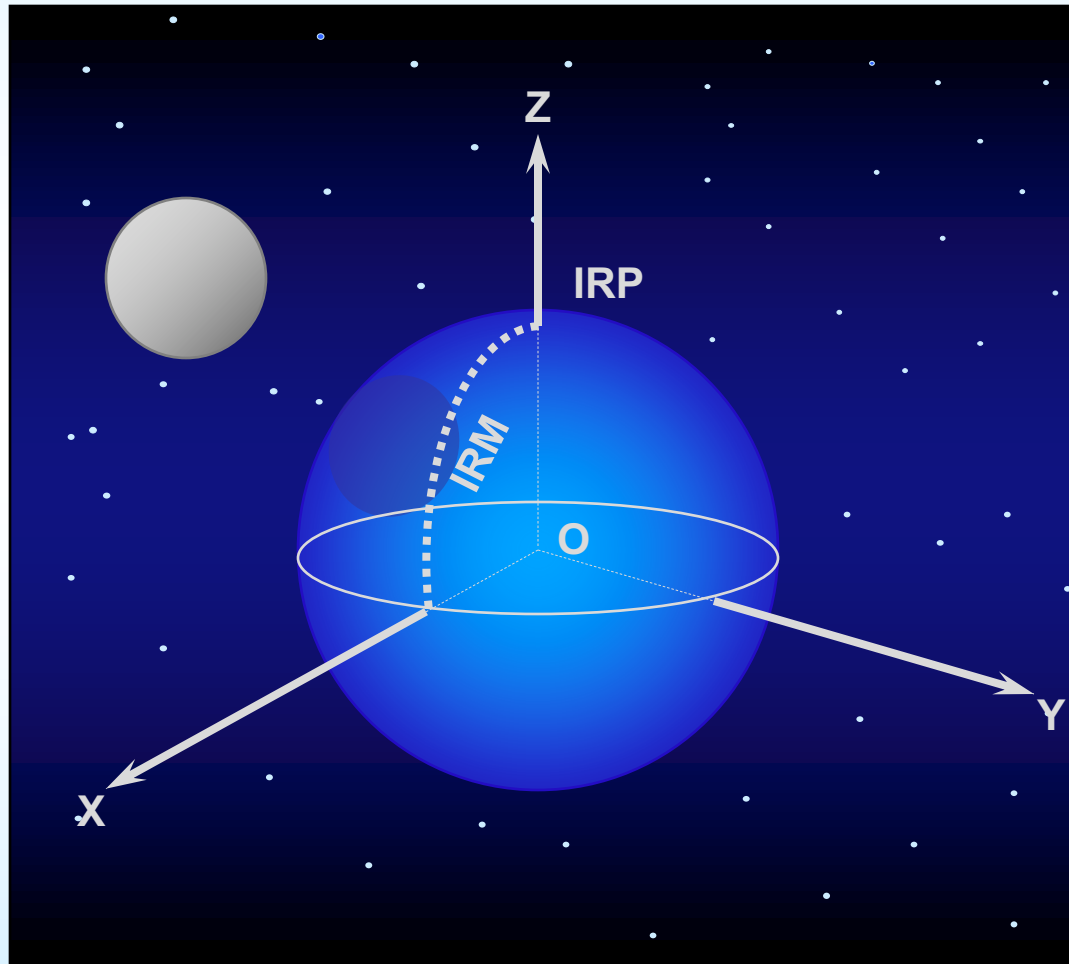


Referencial Cartesiano Terrestre

- Origem: Centro de massa da Terra (geocêntrico);
- o eixo OX é orientado na direção do IRM (International Reference Meridian);
- o eixo OZ é orientado na direção do IRP (International Reference Pole);
- o eixo OY a 90° de OX completando um sistema dextrógiro.



Referencial Cartesiano Terrestre





Sistema Terrestre de coordenadas cartesianas

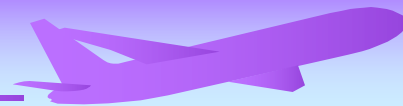
O Sistema de Referência Terrestre é fixo à Terra. Portanto, rotaciona, translada e sofre mudanças de origem e orientação em relação ao Sistema Celeste.

Uma de suas materializações é o **WGS-84**, utilizado pelo GPS. Outra materialização muito usada atualmente é oriunda das observações da **rede IGS (International GNSS Service)**. Trata-se de um catálogo de coordenadas das estações IGS, bem como, suas velocidades, conhecidas pela sigla ITRF.

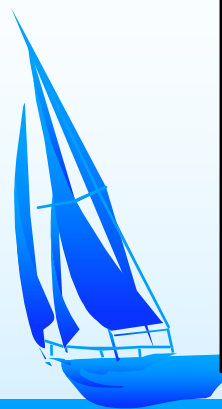
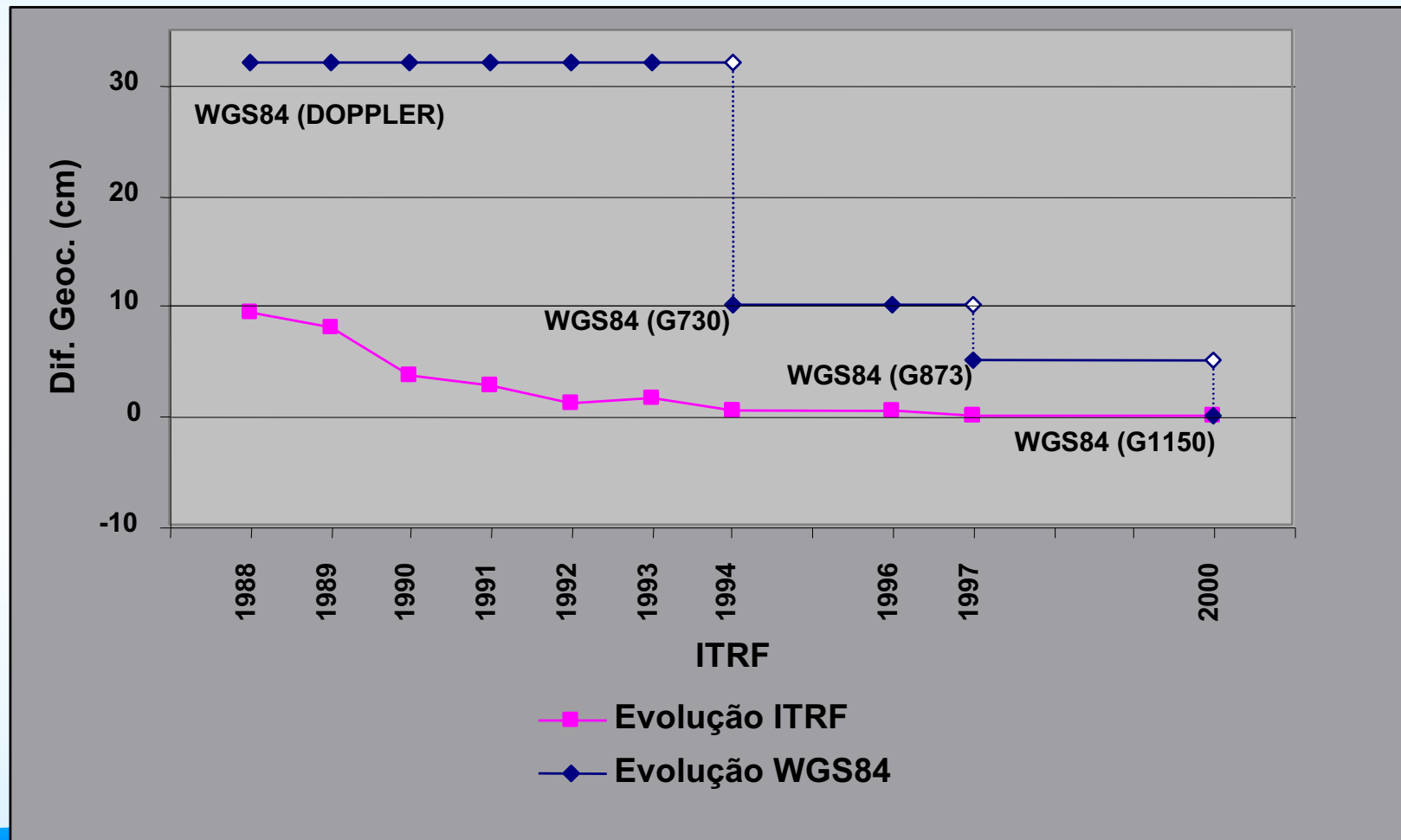
ITRF2000 refere-se à materialização do ano 2000.

SIRGAS2000 está referido à época 2000,4.

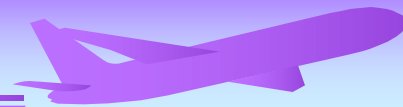




ITRF x WGS84



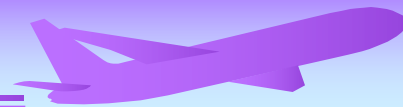
Vinculação entre os sistemas Terrestre e Celeste



- ◆ A vinculação entre os sistemas terrestre e celeste é essencial em várias aplicações que envolvam Informações Espaciais.
- ◆ No caso da Engenharia Civil, atualmente é possível controlar os deslocamentos das estruturas com confiabilidade utilizando o GPS. Com efeito, os pontos de referência, usados no controle podem ser monitorados em relação ao sistema celeste e, desta forma, garantir a independência da determinação do deslocamento em relação ao referencial.



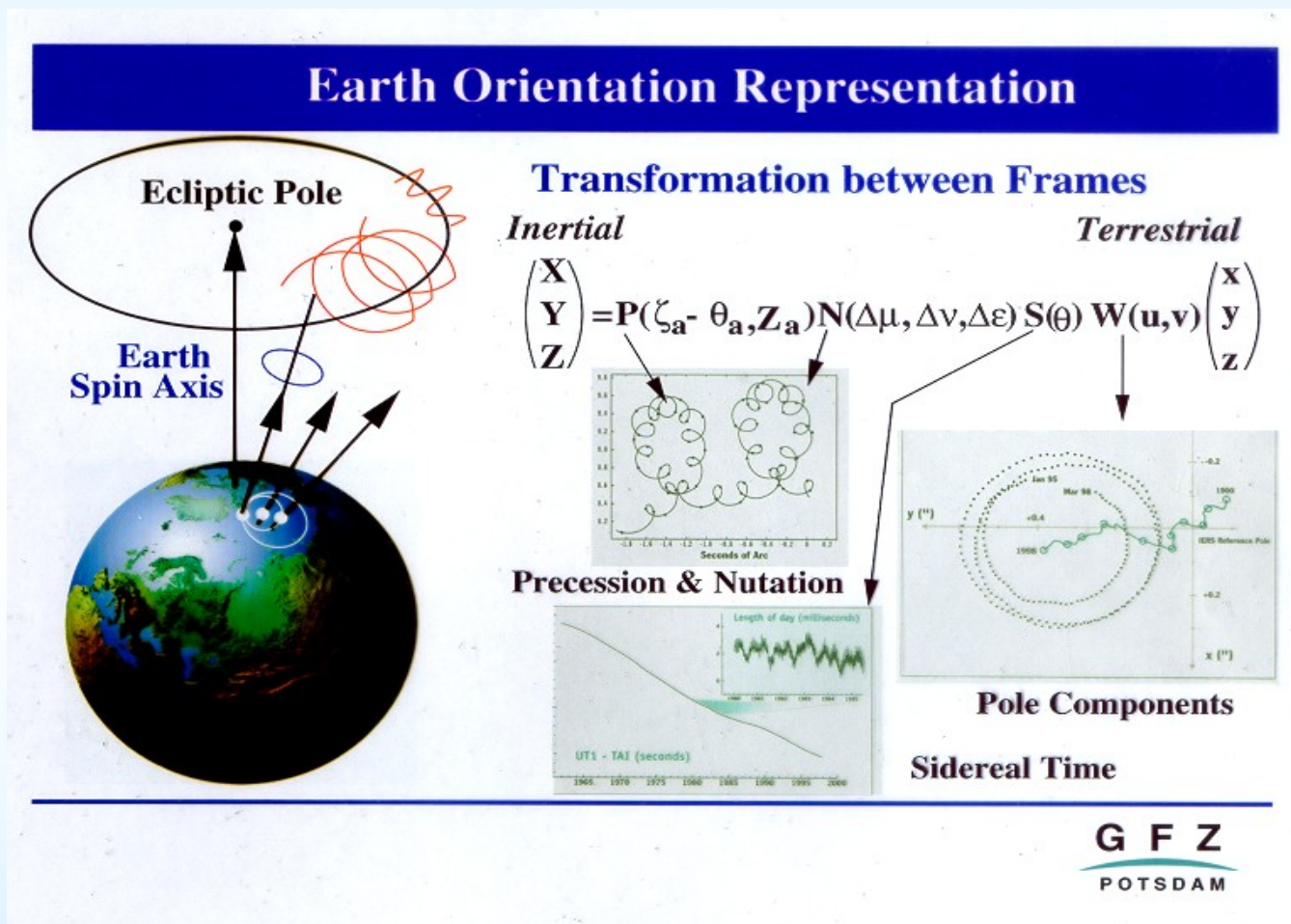
Vinculação entre os sistemas Terrestre e Celeste



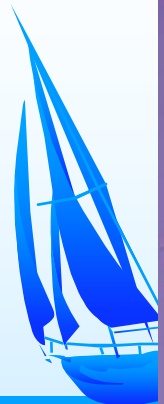
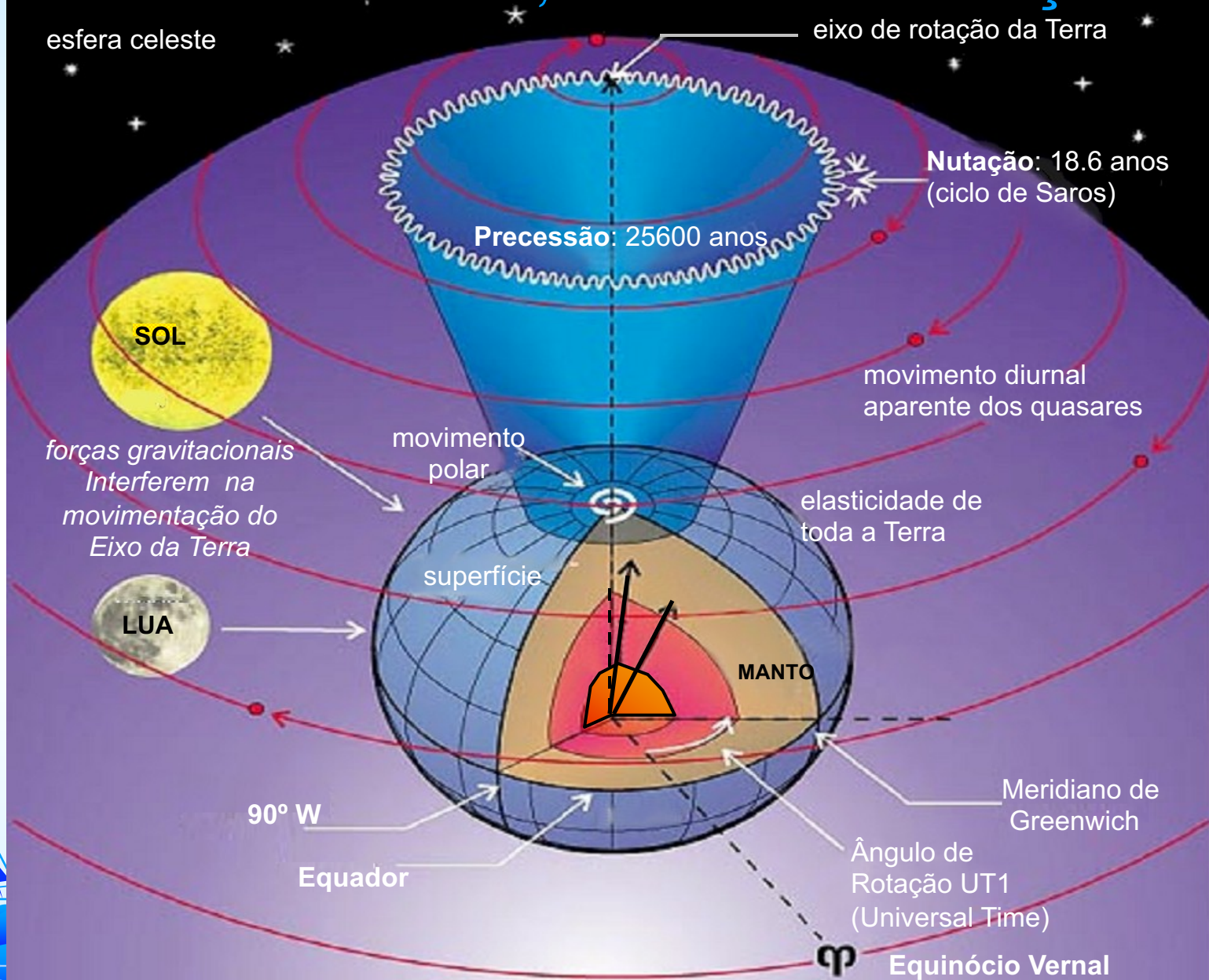
- ◆ A vinculação entre os sistemas terrestre e celeste é dada pelos parâmetros de orientação da Terra: **precessão, nutação, e movimento do pólo**, variáveis com o **tempo sideral**. Os modelos de precessão e nutação são muito bem conhecidos atualmente.
- ◆ A rede IGS (*International GNSS Service*) permite monitorar e determinar a variação do movimento de rotação e o movimento do pólo.
- ◆ Com isso pode-se monitorar coordenadas do sistema terrestre (variável) em relação ao celeste (fixo).



Vinculação entre os sistemas Terrestre e Celeste

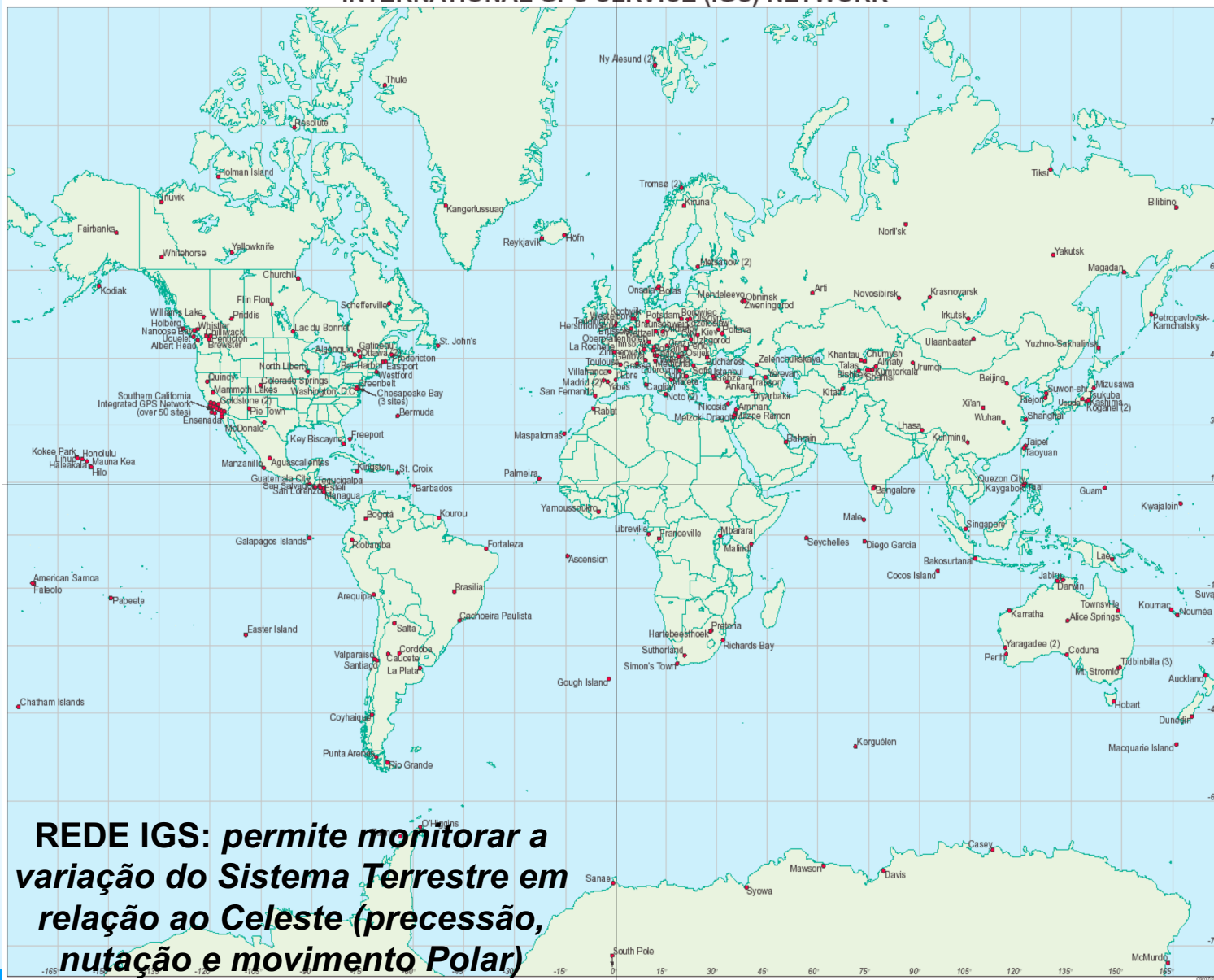


Movimentação do Eixo de Rotação Terrestre: Movimento Polar, Precessão e Nutação





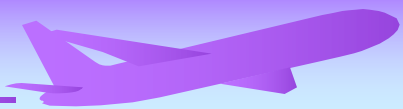
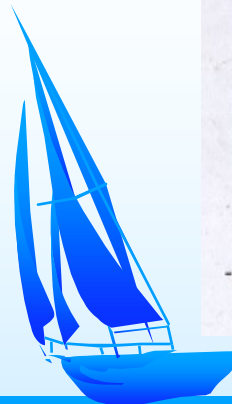
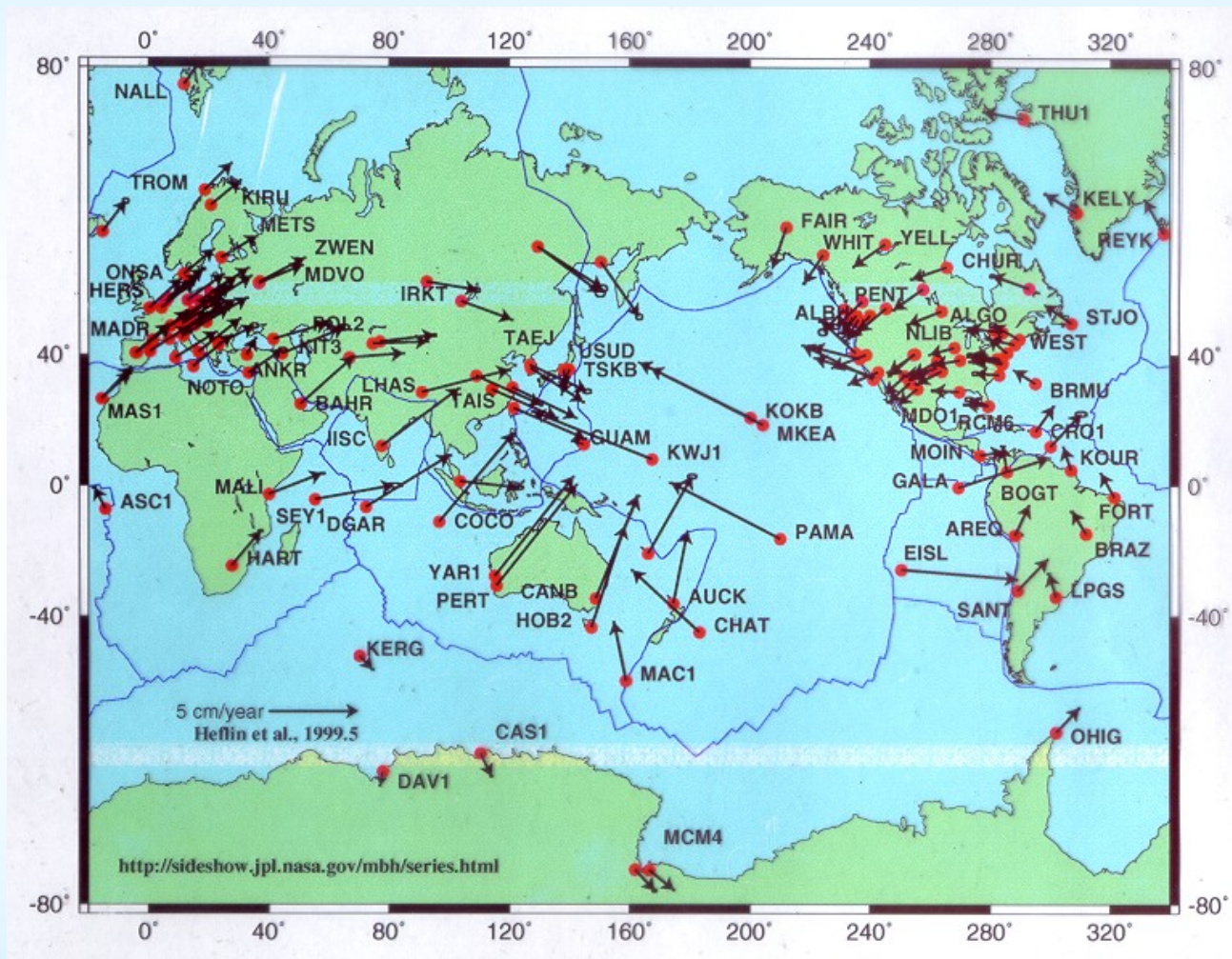
INTERNATIONAL GPS SERVICE (IGS) NETWORK



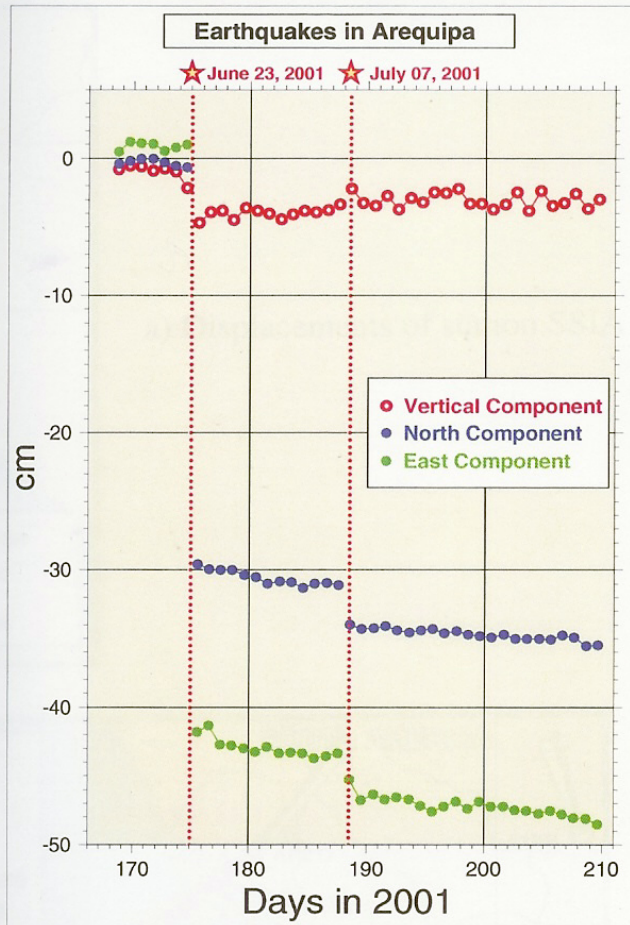
REDE IGS: *permite monitorar a variação do Sistema Terrestre em relação ao Celeste (precessão, nutação e movimento Polar)*



Movimento das placas



Terremoto no Peru

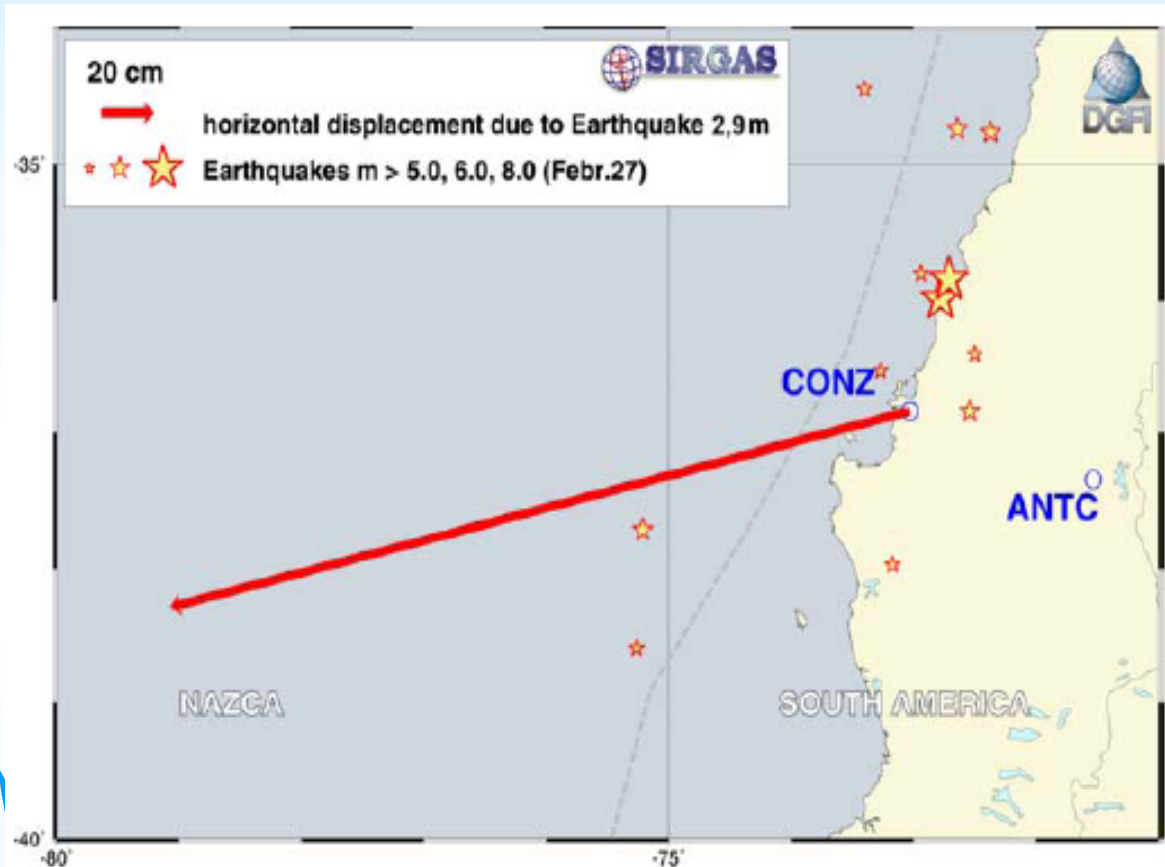
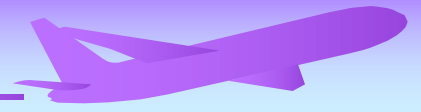


b) Earthquakes in Peru

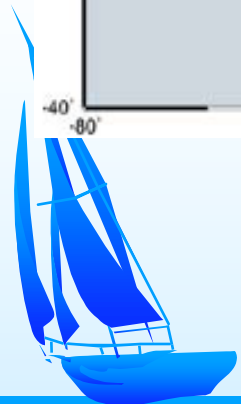
- ◆ Deslocamento nas três coordenadas provocado pelo terremoto na estação de Arequipa em 2001.



Terremoto no Chile



- ◆ Deslocamento da estação GPS de Concepcion provocado pelo terremoto em 27 de fevereiro de 2010.

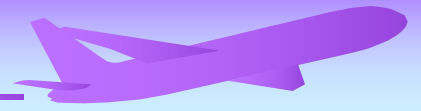




Agreement of Individual Solutions with Combined Solution

	North	East	Height
IBGE	± 2.6 mm	± 3.6 mm	± 7.8 mm
DGFI	± 2.6 mm	± 3.7 mm	± 7.0 mm
BEK	± 2.2 mm	± 4.0 mm	± 6.8 mm





3 – Transformações entre Sistemas de Coordenadas

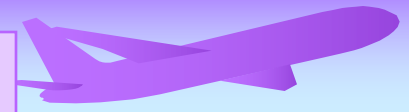
- ◆ A seguir serão apresentadas as fórmulas para converter as coordenadas entre os Sistemas Geodésico e Cartesiano, e entre diferentes sistemas cartesianos.

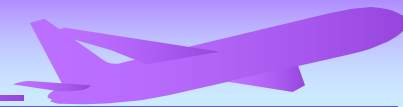


Transformação de Coordenadas Geodésicas (φ, λ, h) $\Rightarrow$ Cartesianas (X, Y, Z)

$$\begin{aligned}X &= (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\Y &= (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\Z &= [(1 - e^2)N + h] \sin \varphi\end{aligned}$$

A aplicação destas fórmulas exige que a origem do sistema cartesiano coincida com o centro geométrico do elipsóide.





$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = f(2 - f)$$

onde:

h = altitude geométrica

N = grande normal (raio de curvatura da secção 1º vertical)

e = excentricidade do elipsóide

a = semi-eixo maior do elipsóide

b = semi-eixo menor do elipsóide

f = achatamento do elipsóide

φ = latitude geodésica

λ = longitude geodésica

X, Y, Z = coordenadas cartesianas geocêntricas



*Transformação de
Coordenadas Cartesianas (X, Y, Z)
⇒ Geodésicas (φ , λ , h)*

$$\frac{Y}{X} = \tan\lambda \therefore \lambda = \arctan \frac{Y}{X}$$





Transformação de Coordenadas Cartesianas (X, Y, Z) $\Rightarrow$ Geodésicas (φ , λ , h)

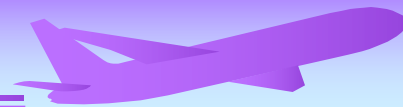
Para o cálculo de φ faz-se
necessário uma **iteração**:

$$P = \sqrt{X^2 + Y^2} = (N + h)\cos\varphi$$
$$\tan\varphi = \frac{Z}{P} \left(1 - e^2 \frac{N}{N + h}\right)^{-1} \quad (1)$$

$$h = \frac{P}{\cos\varphi} - N \quad (2)$$

Em uma primeira aproximação, faz-se $h = 0$ e obtém-se φ (por 1). Com este φ calcula-se N e depois h (por 2). Com este novo h calcula-se novo φ e assim sucessivamente.





Parâmetros de Translação entre os Sistemas de Coordenadas

De WGS84 $\Rightarrow$ SAD69

$$\Delta x = +66,35 \text{ m}$$

$$\Delta y = -3,88 \text{ m}$$

$$\Delta z = +38,22 \text{ m}$$

(Atualizado em 2008)

De C. Alegre $\Rightarrow$ SAD69

$$\Delta x = -138,70 \text{ m}$$

$$\Delta y = +164,40 \text{ m}$$

$$\Delta z = +34,40 \text{ m}$$

De SAD69 $\Rightarrow$ WGS84

$$\Delta x = -66,35 \text{ m}$$

$$\Delta y = +3,88 \text{ m}$$

$$\Delta z = -38,22 \text{ m}$$

De SAD69 $\Rightarrow$ C. Alegre

$$\Delta x = +138,70 \text{ m}$$

$$\Delta y = -164,40 \text{ m}$$

$$\Delta z = -34,40 \text{ m}$$

