

## **El problema del posicionamiento sobre la Tierra**

Evolución del concepto de posicionamiento y desarrollo de las técnicas de navegación.

Sistemas de referencia y coordenadas Astronómicas

Los planos fundamentales. Coordenadas locales y absolutas. Movimientos de los planos fundamentales. Rotación de la Tierra. Escalas de Tiempo.

### ***1. Evolución del concepto de posicionamiento***

La posición sobre la Tierra es un concepto que ha ido evolucionando a lo largo de la historia. La necesidad del hombre primitivo por regresar a un sitio que había ocupado, poder indicarle a otros donde habían ocurrido determinados hechos, etc, son situaciones que motivaron el nacimiento del concepto de posición y sistemas de referencia.

Para recoger los restos de una presa que había costado mucho conseguir y que rápidamente podía perderse, nuestros más antiguos antepasados hubieron que indicar a sus compañeros como llegar al lugar de interés. Podemos imaginar que lo hicieron así: a partir del Arbol A en dirección al Cerro B hasta el sendero que sube al mismo cerro, tomar el sendero a la izquierda 30 pasos. Al costado derecho del sendero cerca de un arbusto están los restos de la presa.

En estas indicaciones está implícita la noción de posición (desplazamientos limitados entre marcas, Arbol A y sendero, y unidades de medida, 30 pasos) y sistema de referencia (Arbol A, Cerro B, sendero).

Estos conceptos necesariamente vinculados entre sí, evolucionaron fundamentalmente por las necesidades de los primeros navegantes de nuestros mares, para los cuales se tornaba imposible conseguir referencias como las anteriores en la medida que se alejaban de las costas. El sol durante el día y las estrellas en las noches eran las únicas señales que los podían orientar.

Fue precisamente la Astronomía la que planteó las primeras soluciones al concepto de posición. Surgió así la definición de Coordenadas Naturales: Latitud y Longitud Astronómica. De esta manera los navegantes podían saber en el medio del océano más basto su posición y rumbo observando las estrellas. Luego, a partir de un modelo elemental de planeta (esférico, y más tarde elipsoidal) podía conocerse la distancia a otras costas o poblaciones.

En estas condiciones fue posible asignar coordenadas a las cartas náuticas, que hasta entonces eran simplemente dibujos que representaban los objetos en forma relativa. Nace así la Cartografía, ciencia que se ocupará de resolver la representación de la Tierra (superficie con diferentes radios de curvatura) sobre un plano.

El desarrollo social, económico e industrial del último siglo, requirió la realización de obras cada más extendidas sobre los territorios nacionales. En consecuencia, fue necesario crear las condiciones para dar coordenadas a puntos en cualquier sitio sin la necesidad de recurrir a una determinación astronómica (lenta y sujeta a condiciones meteorológicas). Otra limitación de las coordenadas naturales es que no están sujetas a una métrica definida, por lo cual son inadecuadas para la mayoría de los fines prácticos.

Es la Geodesia la que plantea la solución a estos requerimientos, representando la Tierra a partir de un elipsoide de revolución vinculado a la superficie física del planeta (geoide) que definen el nivel medio de los océanos. En estas condiciones es posible transportar coordenadas terrestres a partir de mediciones de ángulos y distancias sobre la superficie, utilizando las expresiones matemáticas que derivan de la geometría del elipsoide.

De esta manera se establecieron puntos (pilares) con coordenadas asignadas que se distribuyeron a lo largo del territorio de cada país. Quedaron constituidas así las conocidas Redes Geodésicas Nacionales, que representan la referencia geodésica por excelencia.

A partir de un punto Datum donde elipsoide y geoide se consideran coincidentes o al menos paralelos, se transportan las coordenadas horizontales o geodésicas: Latitud y Longitud a todos los “puntos trigonométricos” de la Red Geodésica o Marco de Referencia Horizontal.

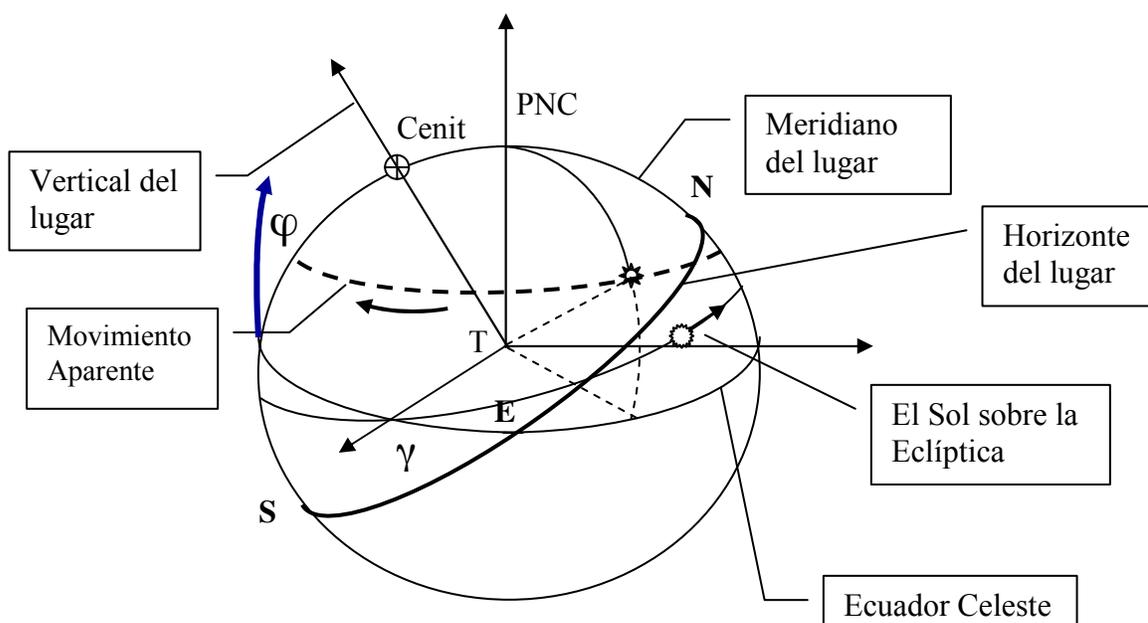
El Sistema de Referencia Vertical se extendió físicamente a través de otros puntos ubicados sobre los caminos llamados puntos de nivelación, que constituyen la Red Altimétrica Nacional. Con origen en un mareógrafo donde el nivel medio del mar es determinado, se define el cero del sistema y por diferencias de alturas se trasladan las cotas.

Estos dos sistemas disociados constituyeron durante décadas la referencia espacial en cada territorio nacional. A partir del advenimiento de la geodesia satelitaria en cada punto geodésico es posible disponer de

coordenadas geocéntricas espaciales (Latitud, Longitud y Altura geodésicas o elipsóidicas). En consecuencia, las dos redes anteriores (geodésica: de puntos trigonométricos; y altimétrica: de puntos de nivelación) pueden ser provistas de coordenadas geodésicas en un Sistema de Referencia único Mundial. Esta situación generó una revolución conceptual y aplicada que aún hoy vivimos.

## 2. Sistemas de Coordenadas Astronómicas

### Elementos de la Esfera Celeste



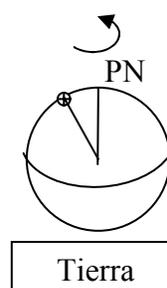
$\gamma$  : Equinoccio vernal o de primavera  
(primer punto de Aries)

**E** : Punto cardinal Este

**N** : Punto cardinal Norte

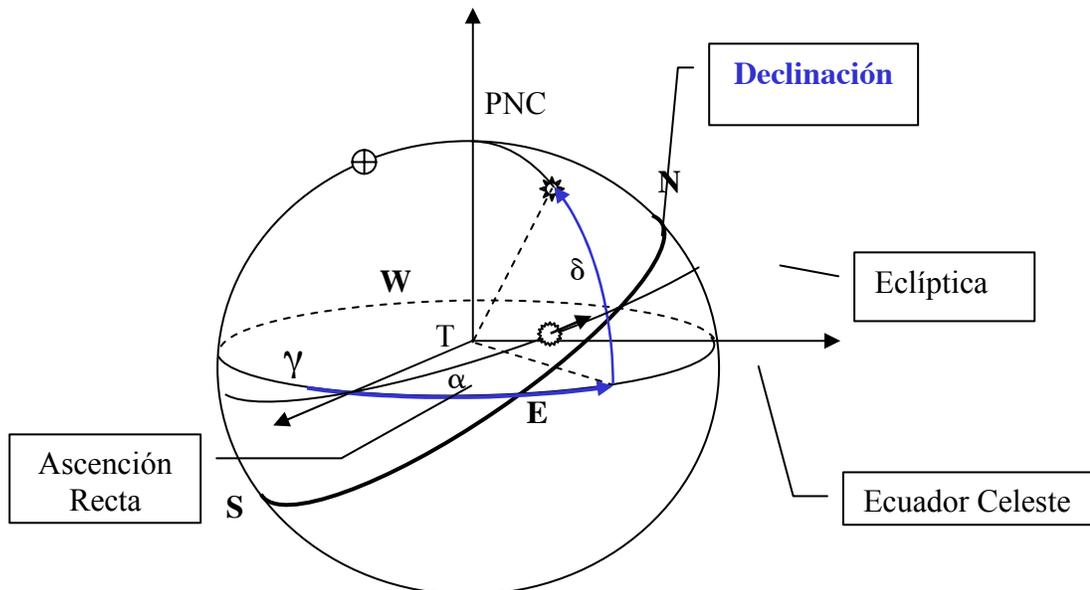
**S** : Punto cardinal Sur

**W** : Punto cardinal Oeste





# Sistema Ecuatorial Absoluto



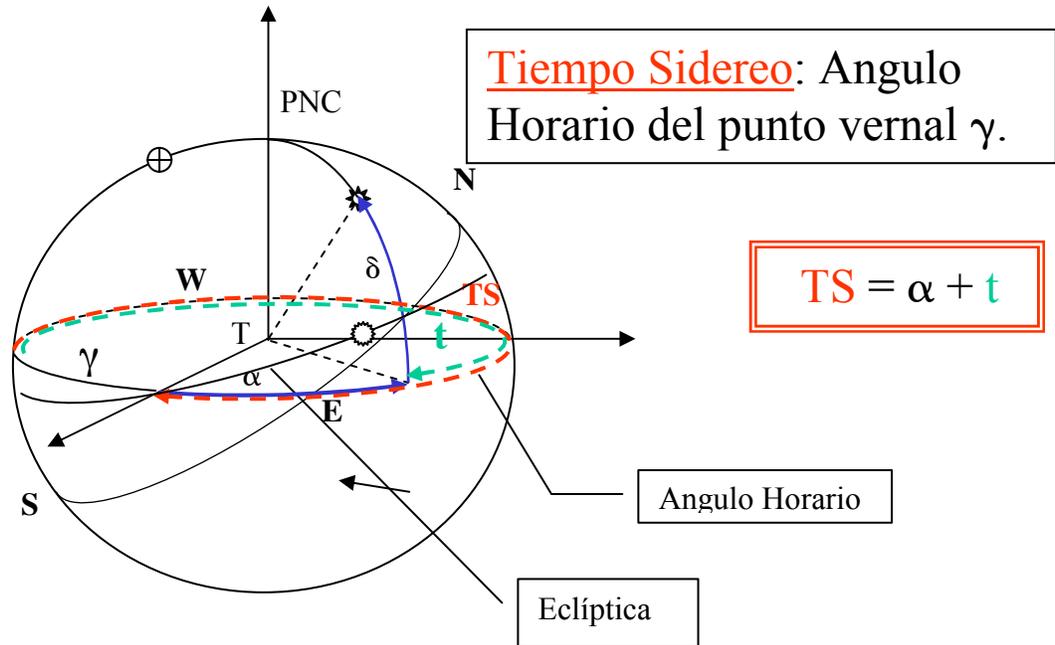
**Ascensión Recta** : Sobre el Ecuador Celeste. Desde el  $\gamma$  en sentido directo hasta el meridiano que pasa por el astro. De 0 a 24 hs.

**Declinación** : Sobre el meridiano que contiene al astro. Desde el Ecuador Celeste hasta el astro. De  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

## **Las Coordenadas:**

- **NO** dependen de la posición del Observador
- **NO** varían con el tiempo (\*\*\*)

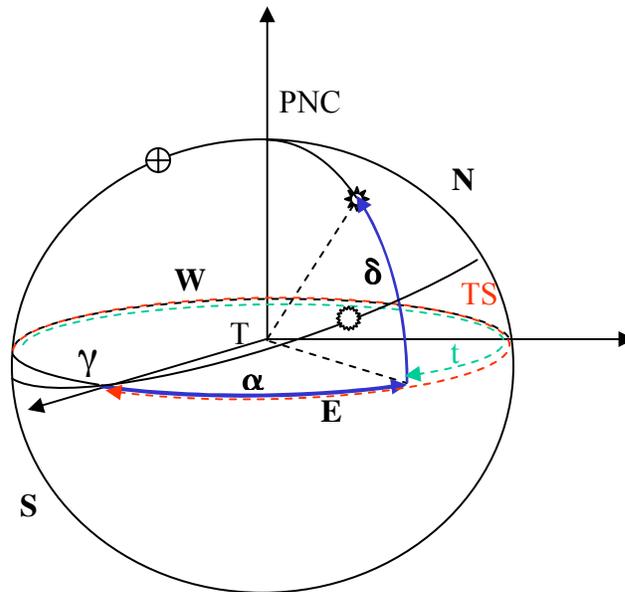
## Sistema Ecuatorial Local



**Angulo Horario** : Sobre el Ecuador Celeste. Desde el Meridiano Superior del lugar hacia el Oeste hasta el meridiano que pasa por el astro. De 0 a 24 hs.

**Declinación** : Sobre el meridiano que contiene al astro. Desde el Ecuador Celeste hasta el astro. De  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

## Tiempo Sidereo y Angulo Horario



Tiempo Sidereo: Angulo  
Horario del punto vernal  $\gamma$ .

$$TS = \alpha + t$$

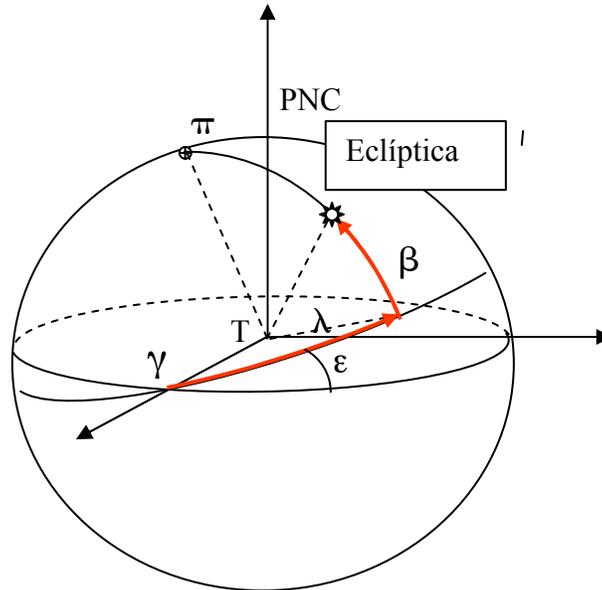
•El ángulo horario es una coordenada estrechamente ligada a la rotación terrestre.

•Mientras la ascensión recta es una coordenada absoluta, el ángulo horario depende de:

\*el lugar de observación

\*el instante de observación (el TS)

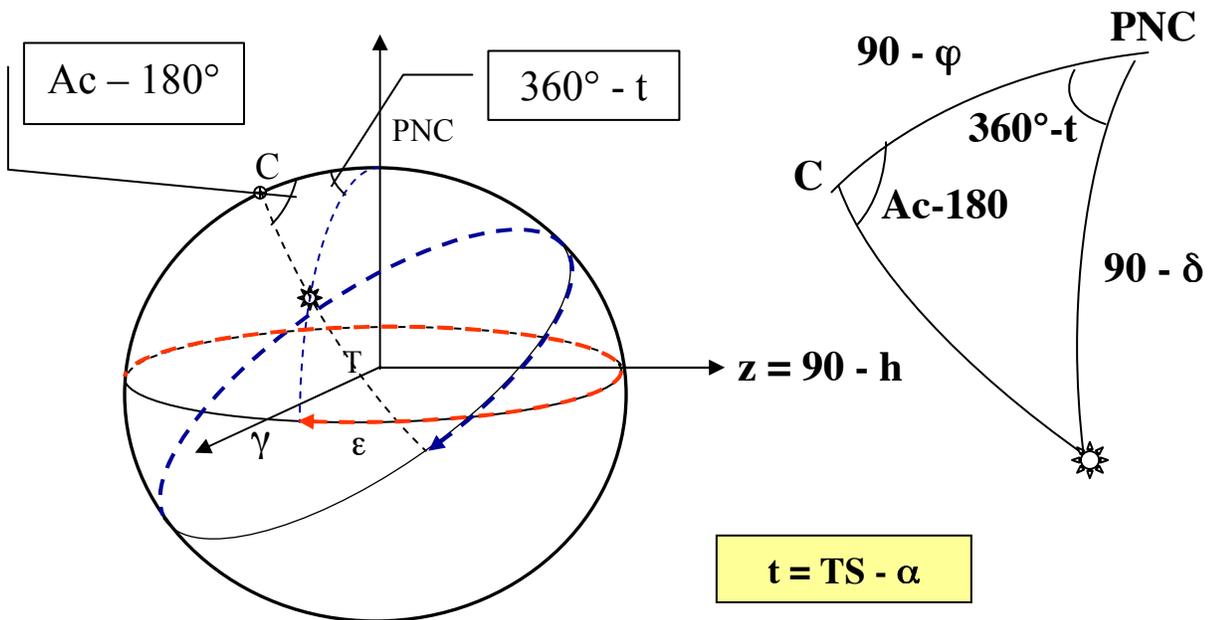
## Sistema Ecliptical Absoluto



**Longitud Ecliptical** : Sobre la Eclíptica. Desde el punto vernal (  $\gamma$  ) en sentido directo hasta el meridiano ecliptical que pasa por el astro. De  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

**Latitud Ecliptical** : Sobre el meridiano que contiene al astro. Desde la Eclíptica hasta el astro. De  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

# Vinculación entre Coordenadas Astronómicas



## Aplicando la Geometría Esférica:

$\cos a = \cos b \cdot \cos c - \sin b \cdot \sin c \cdot \cos A$  Teorema del Coseno

$\sin a / \sin A = \sin b / \sin B = \sin c / \sin C$  Teorema del Seno

Considerando que:

$\sin(A+B) = \sin A \cos B + \cos A \sin B$  y

$\cos(A+B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B$

Ej:

$\cos z = \cos (90-\delta) \cos (90-\varphi) - \sin (90-\delta) \sin (90-\varphi) \cos (360-t)$

$\cos z = \sin \delta \sin \varphi - \cos \delta \cos \varphi \cos t$

$\sin (Ac-180) / \sin (90-\delta) = \sin (360-t) / \sin z$

$\sin Ac \sin z = \sin t \cos \delta$

### ***3. Movimiento de los Planos Fundamentales***

El movimiento de la Tierra en el espacio es relativamente complejo. Por este motivo, para su descripción y modelado es conveniente separarlo en diferentes componentes; básicamente: traslación y rotación. Estos movimientos son ampliamente conocidos pero de una manera parcial. Cuando nos acercamos a la realidad aplicada es necesario sumar nuevas componentes a cada uno de ellos, producto de la interacción de un planeta Tierra aplanado en los polos que interactúa con la Luna, el Sol y el resto de los planetas.

Es así, que la Tierra no se traslada alrededor del Sol sobre un plano fijo en el espacio, ni lo hace a una velocidad constante. En su rotación diaria, tampoco gira con respecto a un eje fijo a la Tierra a velocidad constante. El resultado es un movimiento realmente complejo con el planeta bamboleándose en el espacio mientras se traslada en su órbita.

Los modelos que describen el movimiento terrestre fueron propuestos y desarrollados por la astronomía. En adelante describiremos los elementos más importantes de esos modelos y evaluaremos los ordenes de magnitud involucrados en cada caso.

#### ***3.1 Precesión y Nutación***

##### ***3.1.1 Precesión***

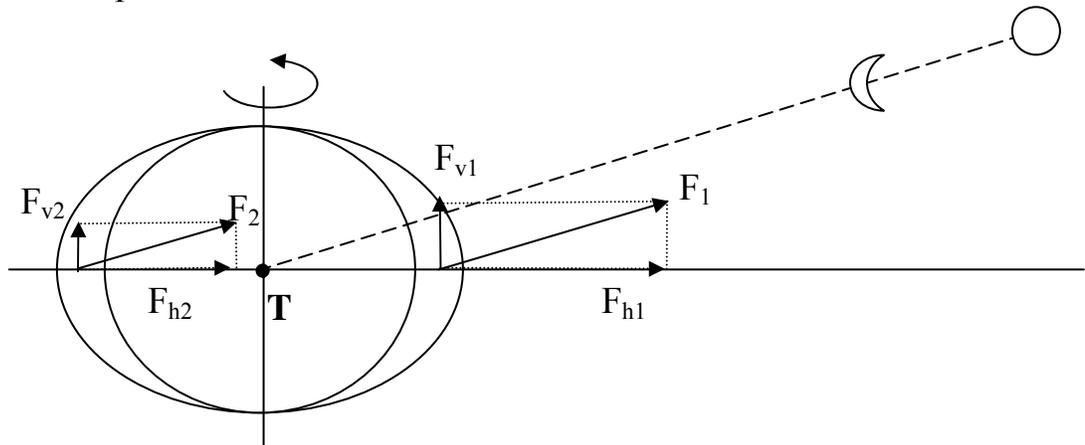
Se asigna este nombre a la componente del movimiento de largo período de los planos fundamentales (ecuador y eclíptica).

Este efecto es provocado por la acción del Sol y la Luna sobre la forma elipsoidal de la Tierra. En otras palabras, es un efecto que no existiría si la Tierra fuera un cuerpo esférico.

Como la Luna y el Sol se mueven en órbitas que no coinciden con el plano del Ecuador se produce una diferencia de fuerzas gravitacionales a uno y otro lado del Ecuador (un torque) que tiende a llevar al Ecuador a coincidir con la Eclíptica, cosa que de hecho ocurriría de no ser porque la Tierra está rotando sobre su propio eje.

Cualquier punto dentro de la esfera, tiene un punto simétrico que está a igual distancia del astro que ejerce su atracción gravitatoria, para el caso la

Luna y el Sol. No se produce dentro de la esfera ningún efecto que tienda a hacer rotar al plano ecuatorial. En cambio las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  sobre los abultamientos son diferentes porque un lado está más cerca y otro más lejos. Tienden a hacer rotar el plano ecuatorial hasta ponerlo en coincidencia con el plano de la eclíptica.



- a)  $F_1 > F_2$  por efecto de distancia  $F = \frac{G.M.m}{d^2}$
- b)  $F_{h1} > F_{h2}$  y  $F_{v1} > F_{v2}$
- c) Los Torques de las componentes horizontales y verticales de las fuerzas con respecto al Centro de Masa de la Tierra (T) son:
- Nulo para las componentes horizontales
  - Distinto de cero para las componentes verticales. En este caso existe un momento de las fuerzas que tiende a rotar el plano en el sentido contrario a las agujas del reloj. Es decir, el plano del ecuador tenderá a alinearse con el plano de la eclíptica.

$$\tau = \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial t}$$

$\tau$  : Torque de las Fuerzas Exteriores

El Torque  $\tau$  es perpendicular al plano que contiene al eje de rotación y el polo de la eclíptica. Aplicando la convención de la mano derecha, el torque está dirigido hacia el lector.

Como consecuencia de la rotación de la Tierra se produce una composición de efectos que hace que la Tierra se comporte como un giróscopo y reaccione con un movimiento circular de su eje de rotación en torno al eje del plano de la Eclíptica. Es el mismo efecto por el cual un trompo que rota sobre su eje, inclinado respecto del piso no se cae sino que “precede”.

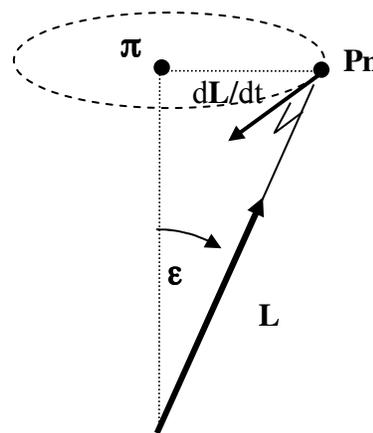
El Momento angular  $L$  experimenta un cambio diferencial perpendicular al plano que contiene el eje de rotación y el polo de la Eclíptica.

$$\mathbf{L}(T+dT) = \mathbf{L}(T) + d\mathbf{L}/dt \cdot dT$$

El Nuevo momento angular  $L(T+dT)$  tendrá el mismo módulo pero distinta dirección que  $L(T)$ .

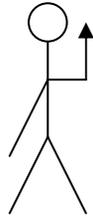
Luego el Polo Celeste  $\mathbf{P}_n$  comienza a describir un círculo de radio  $\varepsilon$  en torno de  $\pi$ , que cumple un ciclo en aproximadamente 25800 años.

Este movimiento del Polo Celeste se ve reflejado en un desplazamiento del plano del Ecuador en sentido de las agujas del reloj. En consecuencia se producirá una retrogradación de los nodos con ritmo de  $\approx 50''/\text{año}$ .

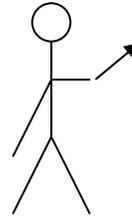
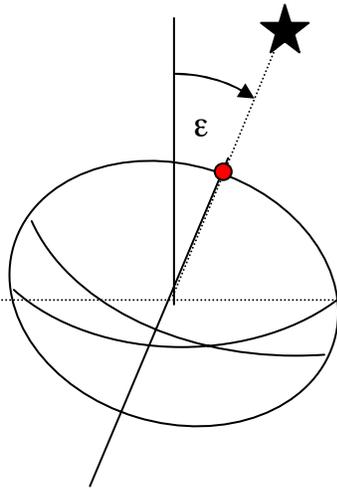


Este fenómeno secular (porque es acumulativo) modifica las coordenadas celestes de los astros. Fue descubierto por Hipparcos (125 a.C.).

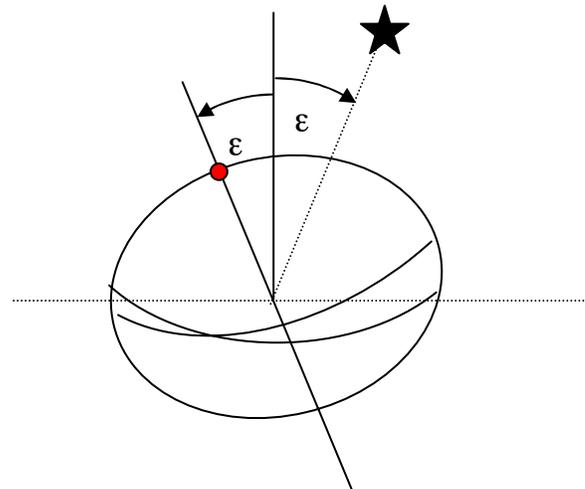
Para tener una idea más clara del impacto de la precesión sobre la posición de los astros con respecto a la Tierra, imaginemos lo que ocurrirá con la actual estrella polar dentro de 13000 años. Un observador ubicado en el Polo Norte observa la estrella sobre su cabeza. Dentro de 13000 años otro observador parado en el mismo lugar (el Polo Norte) observará la misma estrella en una posición muy diferente. La situación será:



Hoy



dentro de 13000 años

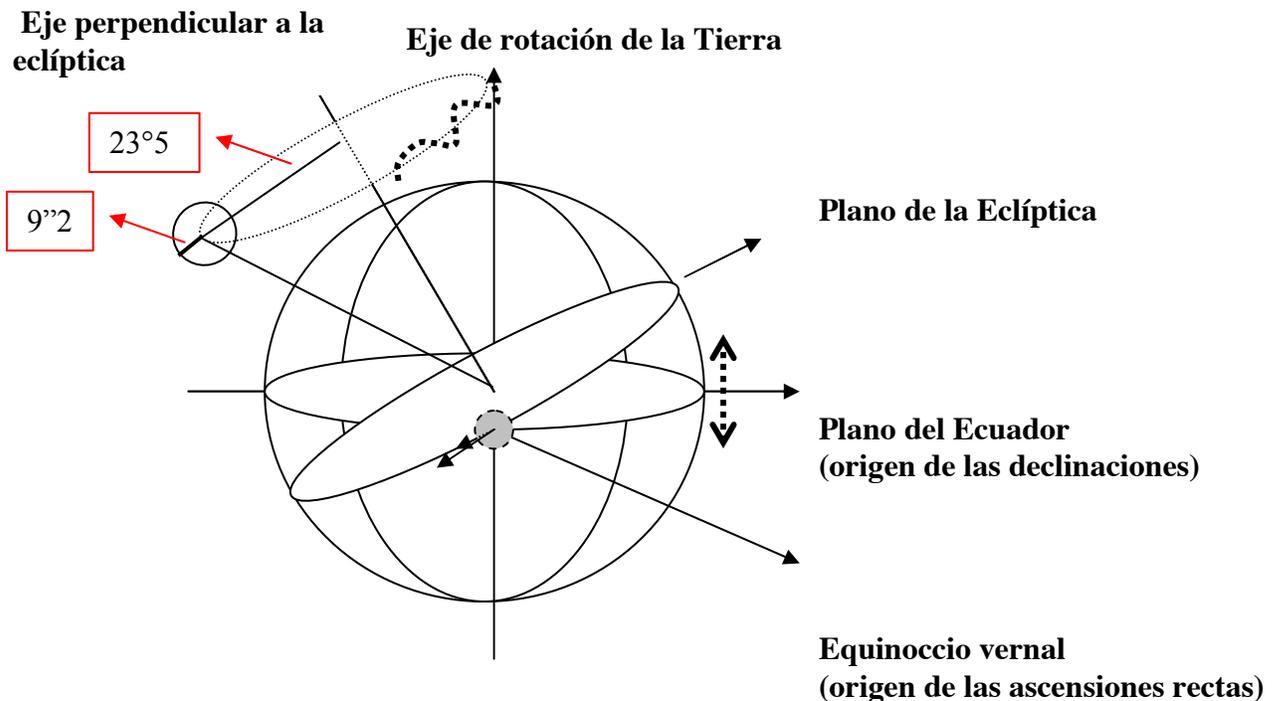


Dado que la oblicuidad de la eclíptica es  $\varepsilon \cong 23^\circ 5'$ , la actual estrella polar ( $\delta = 0^\circ$ ) en 13,000 años estará a  $47^\circ$  del Polo ( $\delta = 43^\circ$ ).

### 3.1.2 Nutación

Las causas que producen la Precesión presentan mayor complejidad que la descrita hasta aquí, simplemente porque el Sol y la Luna se mueven a lo largo de sus órbitas y las fuerzas que hemos descrito son *continuamente variables*.

No obstante, el efecto final es el mismo, solo que el eje de la Tierra no describe un círculo en el espacio, sino una figura con pequeñas sinuosidades alrededor del círculo. Esa suma de pequeños efectos periódicos se conoce como Nutación y su magnitud es de unos pocos segundos no acumulativos, sino periódicos. Por esa razón, recién fue puesta de manifiesto por Bradley en el año 1728 (18 siglos después que Hipparcos describiera la Precesión de los Equinoccios).



Debe quedar claro que este es un efecto pequeño superpuesto a la Precesión que siempre está presente. Sobre el polo, se produce una pequeña oscilación alrededor del círculo precesional y la velocidad del polo no es uniforme. Sobre el Ecuador, del mismo modo, se producen pequeñas variaciones en el ángulo Ecuador-Eclíptica (“oblicuidad de la Eclíptica”). Para el equinoccio, la Precesión domina el movimiento retrógrado, pero la

velocidad es continuamente variable, aunque siempre en el mismo sentido.

### ***3.1.3 Posiciones Aparentes***

Para un observador en la Tierra la posición más útil de un astro o un satélite será la que pueda asociarse fácilmente a un sistema terrestre.

Se definen varias posiciones de un objeto celeste en función de los movimientos considerados (precesión – nutación) y el origen del sistema considerado (Sol – Tierra).

**Posición Aparente:** es la posición instantánea del objeto visto desde el centro de la Tierra.

**Posición Verdadera:** es la posición instantánea del objeto visto desde el Sol.

**Posición Media:** considerando únicamente la precesión.

**Posición Media de una época (ej. 2000):** considerando la precesión, puede llevarse a la época de interés.

Ejemplo:

Consideremos conocer la posición de un objeto en la época de observación  $T_0$ . Si queremos compararla con la posición del mismo objeto observado en la época  $T^*$ , debemos realizar algunos pasos previos a la comparación, por ejemplo a la posición observada en  $T_0$ :

**$X_a(T_0)$  : Posición Aparente (observada)**

**$X_a(T_0)$  / Cambio de Origen (Tierra  $\rightarrow$  Sol) / :  $X_v(T_0)$**

**$X_v(T_0)$  / Efecto de Nutación / Efecto de Precesión / :  $X_m(T_0)$**

**$X_m(T_0)$  / Precesión desde  $T_0 \rightarrow T^*$  / :  $X_m(T^*)$**

En la práctica estas correcciones se realizan a través de Rotaciones aplicadas al vector de las coordenadas:

**$X_m(T^*) = R(P) \cdot R(N) \cdot X_v(T_0)$**

Donde:

**R(N) : matriz de la nutación provista por la astronomía.**

**R(P) : matriz de la precesión provista por la astronomía.**

$$\mathbf{X} = (x, y, z)^T$$

#### ***4. Tiempo***

El tiempo es de gran importancia para la Geodesia. Muchas de las observaciones geodésicas están basadas en la medición de tiempos de vuelo de ondas electromagnéticas; y es fundamental disponer de una escala de tiempo uniforme para modelar los movimientos de un satélite artificial.

##### ***4.1 Tiempo Sidereo y Tiempo Universal***

El movimiento de rotación de la Tierra representa una forma natural de medir el tiempo. En astronomía y geodesia se introducen sistemas de tiempo que permiten vincular las observaciones realizadas desde la Tierra con algún sistema no-rotacional (fijo en el espacio).

La Tierra rota dentro de la esfera celeste y un meridiano terrestre proyectado gira entre las estrellas a un ritmo de una vuelta completa cada 24 horas SIDEREAS. Oportunamente volveremos sobre la diferencia entre horas sidéreas y solares, pero por el momento resulta muy clara la idea de que una rotación completa de la Tierra sobre su eje queda reflejada por el movimiento de sus meridianos entre las estrellas, por esa razón a este intervalo de tiempo lo llamaremos día sidéreo.

Si razonamos a la inversa, y nos paramos en un meridiano terrestre, veremos girar la esfera celeste sobre nuestra cabeza a un ritmo de 24 horas sidereas por cada rotación completa.

Es evidente que para un observador sobre la Tierra es fundamental poder asociar la coordenada celeste  $\alpha$ , con la hora que marcará la posición de un meridiano determinado entre las estrellas.

**TSL (Tiempo Sidereo Local) =  $t_\gamma$  (ángulo horario del punto vernal)**

TSG (TS en Greenwich)

$$\lambda = \text{TSL} - \text{TSG}$$

En cada caso podemos hablar de Tiempo Sidereo aparente o medio, dependiendo que hayamos considerado la nutación o la precesión.

En relación a las coordenadas del objeto:

$$\text{TSL} = t(*) + \alpha(*)$$

Supongamos que tenemos un reloj de tiempo sidereo que acumula 24 hs. al cabo de una rotación completa de la Tierra. Ese reloj empieza a funcionar cuando el equinoccio vernal pasa sobre el meridiano del observador y acumulará 24 hs. cuando el mismo punto vuelva a pasar al día siguiente. La hora de tal reloj nos indica cuanto tiempo ha transcurrido desde que el equinoccio pasó por el meridiano y ese tiempo se denomina tiempo sidereo local TSL.

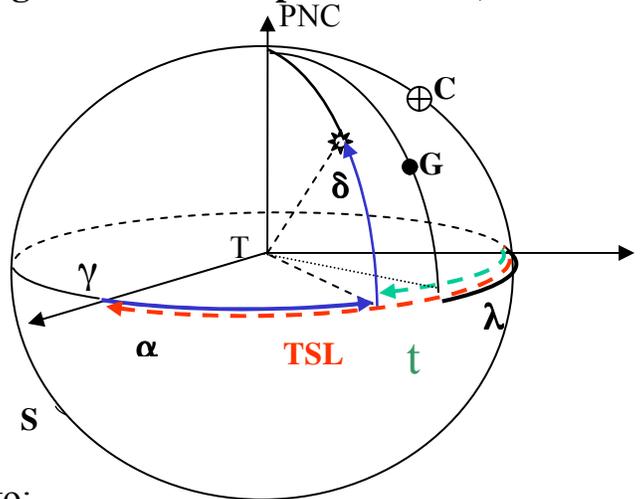
Si quisiéramos saber cuanto tiempo ha transcurrido desde que pasó una estrella cualquiera, simplemente tenemos que restar al TSL la  $\alpha$  de la estrella lo que nos dará una medida que llamaremos ángulo horario local de la estrella AHL que nos indica precisamente su posición con respecto al meridiano local.

Dicho de otra forma:

- Disponemos de un reloj de Tiempo Sidereo Local, luego, en todo momento conocemos TSL.

- Conocemos las coordenadas  $\alpha$  y  $\delta$  del astro que deseamos ubicar en el cielo.

- Podemos calcular el ángulo horario del astro para el instante en que lo vamos a apuntar con un telescopio como:

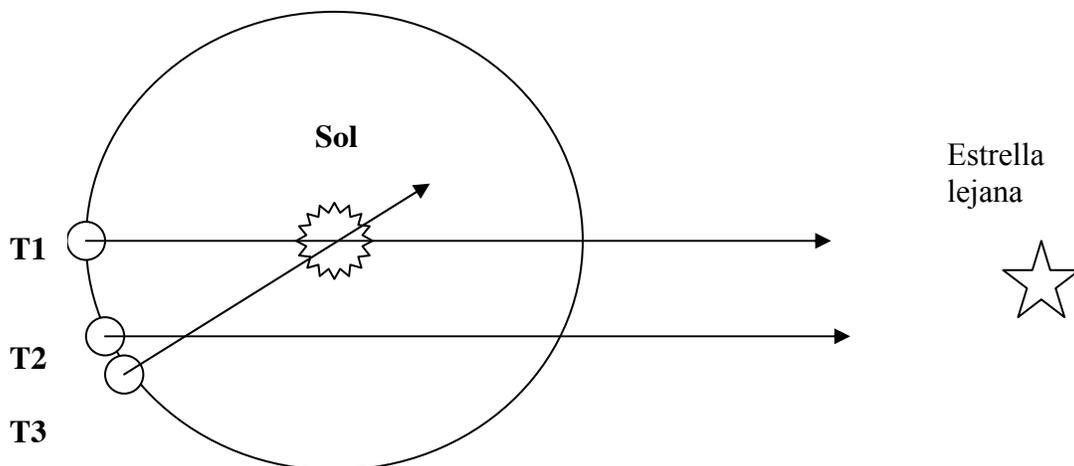


$$t = \text{TSL} - \alpha$$

Esta medida nos indica a que distancia está el astro del meridiano local.

En un telescopio con montura ecuatorial, es decir, con un eje principal paralelo al eje de rotación de la Tierra, la declinación  $\delta$  se puede “calar” (apuntar) directamente, mientras que la coordenada restante es el ángulo horario local AHL, que se calcula para el instante en que vamos a apuntar el telescopio. Inmediatamente de localizado el objeto en el campo del telescopio, este se mueve alrededor del eje principal movido por un motor controlado por el reloj sidéreo de manera que el telescopio sigue al astro sin necesidad de intervención del observador.

Al mismo tiempo que rota sobre sí misma, la Tierra se traslada en el espacio moviéndose en una órbita casi circular alrededor del Sol. El fenómeno visible más notable que se origina por la rotación es la sucesión de los días y las noches. Con respecto a la traslación, es la causante de las estaciones. Dos fenómenos en principio separables e independientes.



En la figura aparecen representadas tres posiciones de la Tierra (T1, T2 y T3) a lo largo de su trayectoria de traslación alrededor del Sol. En la posición T1, el Sol y una determinada estrella lejana aparecen alineadas. Para el punto sobre la Tierra que se encuentra alineado también en ese instante, será el mediodía verdadero ya que tendrá al Sol exactamente en el Cenit.

Supongamos que 24 hs. sidéreas después, el mismo punto de la Tierra se vuelve a alinear con la misma estrella. Pero la Tierra se ha trasladado de la posición T1 a la posición T2, y como consecuencia de esta traslación el Sol no está alineado en el mismo instante.

Para que el Sol vuelva a pasar por encima del mismo punto de la Tierra, es necesario un pequeño giro adicional, y en ese intervalito la Tierra pasa a la posición T3.

El intervalo de tiempo entre las posiciones T1 y T2 equivale a una rotación completa de la Tierra con respecto a las estrellas (1 día sidéreo = 24 hs. sidéreas).

El intervalo de tiempo entre las posiciones T1 y T3 equivale a una rotación completa de la Tierra con respecto al Sol (1 día solar = 24 hs. solares).

Si analizamos cuidadosamente lo que ocurre a lo largo del año, resulta evidente que el tiempo sidéreo se va adelantando al tiempo solar. Como sabemos, un año tiene aproximadamente 365 días solares, en ese mismo intervalo se producen 366 días sidéreos. De ese razonamiento podemos calcular que:

**365 días solares => mismo intervalo de tiempo =>366 días sidéreos**

**1 día solar = 366/365 días sidéreos = 1.0027 días sidéreos**

**Esto quiere decir que 1 día sidéreo es aproximadamente 3 min 56 seg más corto que un día solar, y es acumulativo día tras día.**

Este fenómeno es trascendente y su comprobación está a nuestro alcance, simplemente observando cuidadosamente que las estrellas salen un poco más temprano todos los días. A lo largo de varios días veremos como todo el cielo estrellado observado a una hora (solar) determinada se va corriendo hacia el Oeste. Esto produce el cambio de constelaciones que podemos observar a lo largo del año.

El tiempo solar es utilizado para la vida diaria. Se relaciona con la ubicación del sol con referencia al meridiano local.

## **El Tiempo Solar ( $T_{\oplus}$ ) = $t_{\oplus}$ + 12 hs**

Debido a que el movimiento del sol sobre la eclíptica no es uniforme, se genera un “sol ficticio” que se mueve a velocidad constante sobre el ecuador y que encuentra el sol verdadero en los equinoccios.

## **Tiempo Solar Medio ( $T_{\oplus m}$ ) = $t_{\oplus m}$ + 12 hs**

$$T_{\oplus m} = TU + \lambda$$

$$TU : \text{Tiempo Universal} = T_{\oplus m} (\text{Greenwich})$$

Formalizando todo lo dicho en relación con la medida del tiempo podemos decir que 1 día sidéreo es el intervalo que media entre dos pasos sucesivos del equinoccio por el meridiano del observador.

Del mismo modo, 1 día solar es el intervalo de tiempo entre dos pasos sucesivos del Sol por el meridiano del observador. Como se puede deducir, ambas escalas de tiempo se dicen “rotacionales” porque se miden teniendo como base un fenómeno natural repetitivo y medible: la rotación de la Tierra.

A modo de comentario, corresponde agregar que ninguno de estos tiempos es uniforme, porque el “reloj Tierra” presenta pequeñas irregularidades en su rotación (fracciones de segundo).

En el caso del tiempo solar, definido de la manera simple en que lo hicimos, presenta irregularidades de varios minutos en distintas épocas del año producto entre otras cosas de la elipticidad de la órbita de la Tierra. Estas irregularidades pueden calcularse satisfactoriamente mediante la llamada “Ecuación del Tiempo” que permite transformar al tiempo solar verdadero en un “tiempo solar medio” que se parece mucho al tiempo que llevamos en nuestros relojes.

### ***4.2 Tiempo atómico y la hora oficial***

Como hemos visto, para construir una escala de tiempo es necesario disponer de algún fenómeno natural o artificial que tenga características de “repetitivo y medible”. Por ejemplo, un péndulo es un buen ejemplo de tal fenómeno: el movimiento se repite, y podemos definir una unidad de tiempo en base a un número de oscilaciones que podemos contar (medir).

Durante siglos, los relojes de péndulo sirvieron para conservar el tiempo, y en los Observatorios Astronómicos se realizaban las observaciones necesarias para corregir esos relojes en base a la observación del tiempo sidéreo y el tiempo solar materializados por el movimiento de las estrellas y el Sol respectivamente. Es decir, que el reloj Tierra permitía corregir el reloj mecánico (de péndulo o de cuerda) y así la hora que cada país adoptaba era controlada astronómicamente.

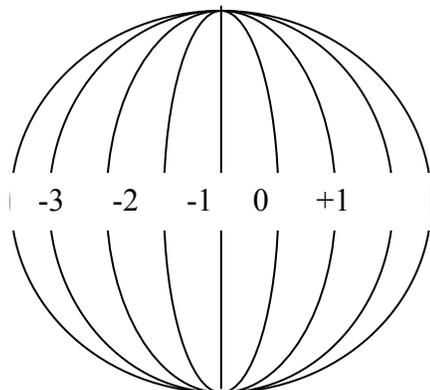
En los años cuarenta y cincuenta se desarrollaron primero los relojes de cuarzo basados en las oscilaciones de los cristales de ese material, y luego los relojes atómicos, basados en un fenómeno atómico que permite controlar las oscilaciones de un reloj electrónico.

Estos relojes alcanzaron rápidamente un nivel de estabilidad (y de uniformidad) que superaba al del “reloj Tierra” y permitía medir sus irregularidades.

En la actualidad, nuestros servicios de hora oficiales (en Argentina, el diseminado por el Observatorio Naval Buenos Aires) están basados en la escala de Tiempo Atómico Internacional, muy próxima del Tiempo Solar en el meridiano de Greenwich.

#### Sobre Husos y Costumbres:

Para adaptar la hora de cada país a su longitud, se adopta un sistema de franjas (husos) que particionan imaginariamente al planeta en 24 zonas cada una de las cuales difiere de la siguiente en 1 hora:



Si en el meridiano de Greenwich es una hora cualquiera, los países que se encuentran en el Huso 1 (hacia el Oeste) tienen una hora menos (más temprano), mientras que los que están al Este tienen una hora más, y así sucesivamente a medida que nos alejamos en una u otra dirección, las diferencias horarias se incrementan.

Por ejemplo, a nuestro país le correspondería el huso 3. Es decir que por estar al Oeste deberíamos tener 3 horas menos que en Greenwich ( a las 12 GMT deberíamos tener las 9). En Alemania, que está al Este de Greenwich debería tener una hora más, para el caso las 13.

No obstante, cada país adopta el huso que mejor le convenga según sus propias costumbres. En Argentina habitualmente nos manejamos con el huso 3, pero periódicamente revivimos la polémica:

Huso 3 vs. Huso 4:

Algunos conceptos complementarios:

- Que sentido tiene la división aceptada internacionalmente de franjas (husos) horarias de 1 hora ?

Exactamente en el centro de cada franja se da la situación particular que la mitad de la noche verdadera (es decir, del intervalo entre la puesta del sol y la salida al día siguiente) se produce aproximadamente a la hora 0.

Dicho de otro modo, entre la hora de puesta del sol y la hora 0, pasa aproximadamente el mismo tiempo que entre las 0 y la salida del sol.

Veamos que pasaría en La Plata cuya longitud al Oeste de Greenwich es muy próxima a 4 hs, si se adoptara el huso 4:

el 1ero de julio el sol se pondría a las 16 hs 51 min y saldría al día siguiente a las 7 hs, es decir que el intervalo entre la puesta y la 0 hs es de 7 hs. 9 min.

Y entre las 0 hs y la salida del sol, de 7 hs.

Se daría en esta situación la “simetría de la medianoche verdadera” que establece la convención de husos horarios internacionales.

- Cual ha sido la situación habitual ?

En los últimos años nuestros relojes han estado en huso 3. Esto produce una asimetría respecto de la hora 0 porque es menor el intervalo que media entre esta hora y la puesta del sol, que el que transcurre entre las 0 hs y el amanecer.

- Que es lo correcto ?

Lo correcto es que adoptemos aquella hora que mejor se ajuste a las costumbres:

Si nos gusta ponernos en actividad plena temprano, y volver a casa también temprano, deberíamos adoptar el huso 4 que producirá el efecto deseado: “el sol saldrá antes”.

Si por el contrario preferimos empezar nuestras actividades un poco más tarde a la mañana, estirar el regreso a casa, cenar a las 22 y acostarnos casi a medianoche, el huso 4 producirá el efecto contrario, tendremos una larga noche invernal que comenzará aproximadamente a las 17 hs.

- Estos razonamientos son válidos para todo el país ?

No, esta forma de pensar es válida al Este de Argentina. Efectivamente para las provincias cordilleranas, el huso 3 en el que hemos estado habitualmente es muy inapropiado porque amanece muy tarde.

Muchos países cuya extensión en el sentido Este – Oeste es importante, adoptan distintas horas por región.

Esta es la solución más racional desde un punto de vista abstracto. Adoptar el huso horario 4 durante el invierno solo en las provincias del Oeste.

Seguramente habrá conflictos con aquellas empresas que tienen sistemas u organizaciones nacionales. No obstante cabe imaginar que las mismas tendrán suficientes recursos técnicos para resolver el problema.

### ***4.3 El Tiempo Universal Coordinado***

El Tiempo Atómico, como hemos visto, no depende para nada de la rotación terrestre. El razonamiento del ítem anterior en relación con la necesidad que las definiciones científicas guarden relación y se adapten a la vida del hombre también se aplica a este caso.

El Tiempo Atómico es perfectamente uniforme y la rotación de la Tierra no. No obstante nuestra vida se rige por la rotación de la Tierra, desarrollamos nuestras actividades en función de la sucesión de los días y las noches.

Para evitar un apartamiento no deseado entre el Tiempo Atómico y el Tiempo Solar se emplea el Tiempo Universal Coordinado, que es una escala de tiempo que marcha como el tiempo atómico, pero que está sujeto a saltos de 1 segundo entero para que no se aparte del Tiempo Solar en más de 0.9 de segundo.

Esta es la razón por la que a veces leemos la noticia que todos los relojes del mundo se atrasan 1 segundo a las 12 de la noche del 30 de junio o el 31 de diciembre.

De manera que la hora que tenemos en nuestros relojes se rige por esta escala de Tiempo Universal Coordinado simplemente corregida un número entero de horas en función del huso horario adoptado.

## 5. La Rotación de la Tierra

La rotación de la Tierra puede describirse a partir de un vector dirigido al Polo Norte del eje instantáneo de rotación y por una velocidad angular  $\omega$ .

La dirección y la magnitud del vector rotacional cambian con el tiempo debido a procesos astronómicos y geofísicos.

Estos procesos incluyen las variaciones de las fuerzas del Sol y la Luna, y la redistribución de masas en la atmósfera, en la hidrosfera, en el sólido terrestre, y en el núcleo líquido.

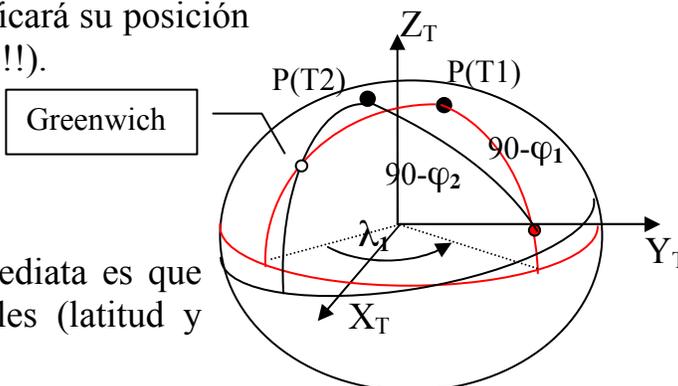
Los cambios son seculares, periódicos ó cuasi-periódicos, y de naturaleza irregular (Lambeck 1980, Moritz and Mueller 1987, Dickey 1995).

### 5.1 Movimiento del Polo

Es el movimiento del eje de rotación instantáneo relativo a la corteza terrestre visto desde un Sistema de Referencia fijo a la Tierra ( $X_T, Y_T, Z_T$ ).

Es decir, el Polo modificará su posición sobre la corteza terrestre ( ... !!!).

En la época T1 se ubica en P(T1) y un tiempo más tarde en P(T2).



Una consecuencia inmediata es que varían las coordenadas locales (latitud y longitud) del observador.

T1 .....  $\varphi_1; \lambda_1$

T2 .....  $\varphi_2; \lambda_2$

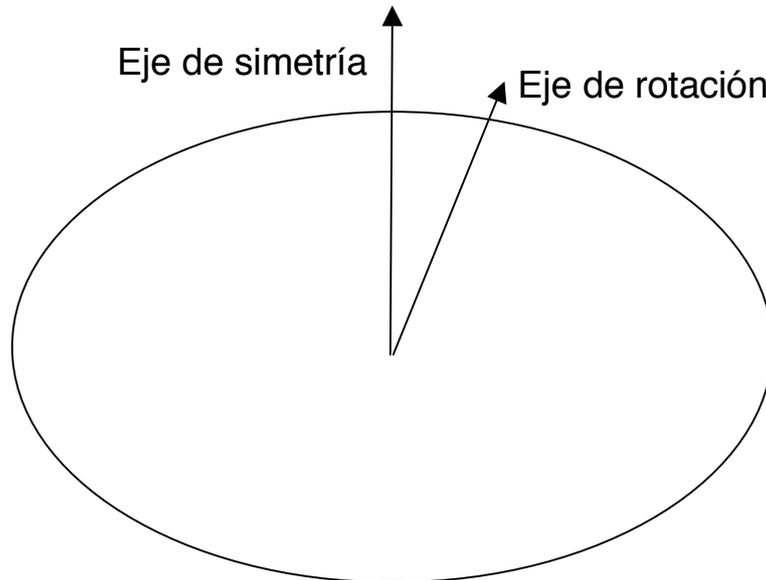
Es un resultado de gran importancia. La amplitud de esta variación es de varios metros (aprox. 15 m), y tiene varias componentes:

- Una oscilación libre con período cercano a 435 días (período de Chandler) y amplitud de 0."1 a 0."2 (3 a 6 metros). Visto desde el polo norte, el movimiento se desarrolla en el sentido de las agujas del reloj.

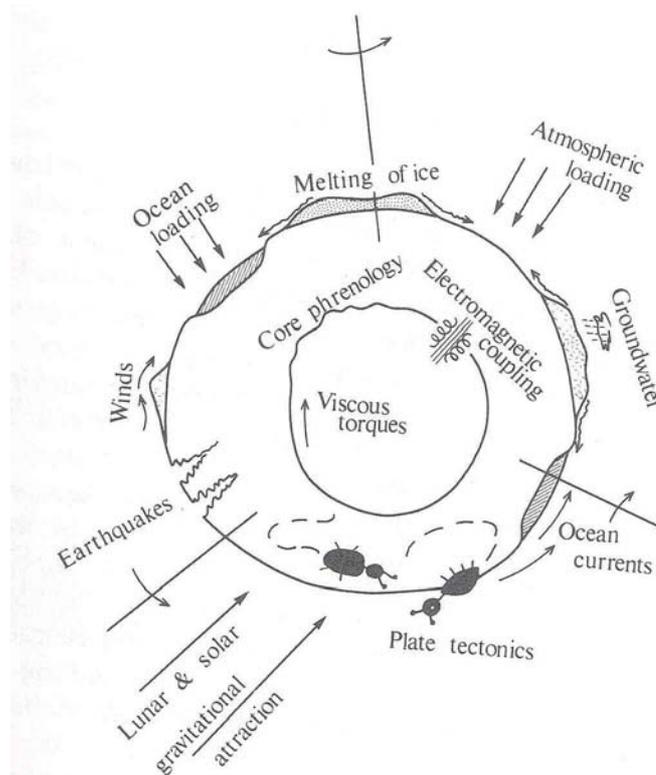
El movimiento de Chandler se produce porque el "eje de rotación instantáneo" (spin) no coincide exactamente con el "eje principal de Inercia" de la Tierra.

## Variación de la orientación del eje de rotación terrestre con relación al cuerpo terrestre

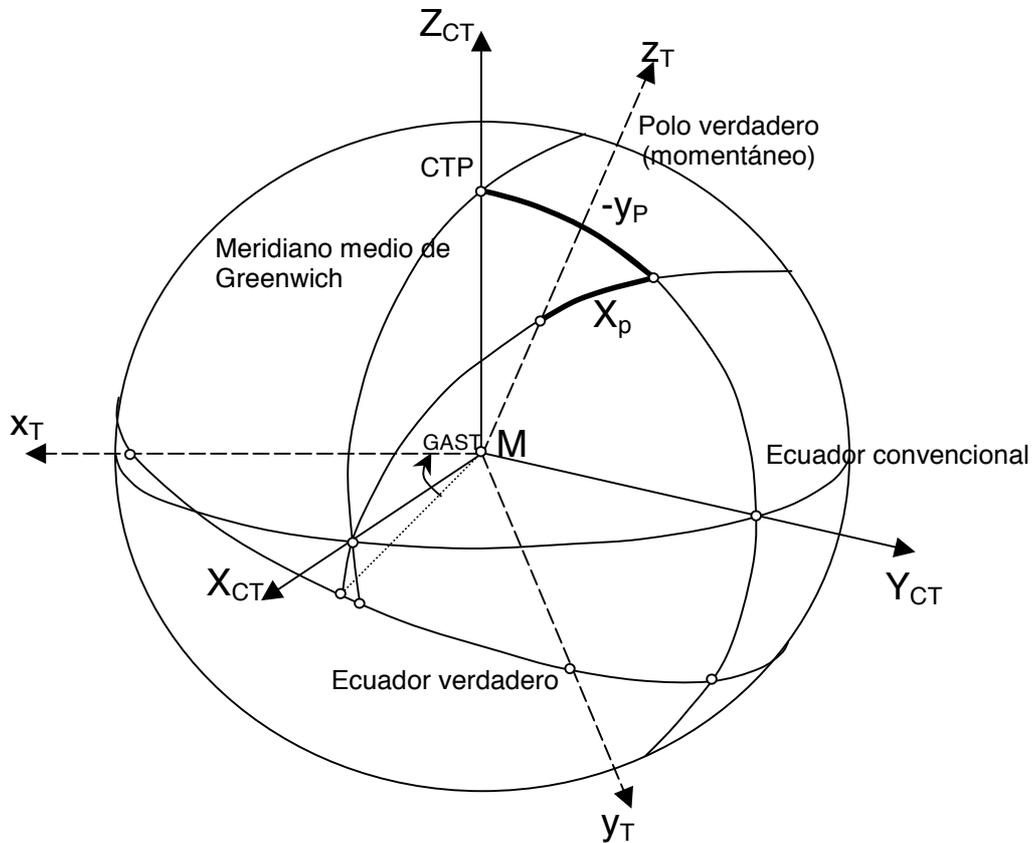
1. El eje de la rotación de la Tierra **no** coincide con el eje de simetría de las masas (eje de inercia mayor)



2. El impulso de rotación varía por desplazamientos de masas terrestres



## Variación de la orientación del eje de rotación terrestre con relación al cuerpo de la Tierra



## Reducción del movimiento del polo de rotación

<p>Sistema terrestre convencional (Conventional Terrestrial System, CTS)</p> <p>Eje Z = eje del sistema de coordenadas de los puntos definidos en el sistema convencional</p>	<p>Movimiento del polo <math>(x_P, y_P)</math> →</p>	<p>Sistema ecuatorial momentáneo (verdadero)</p> <p>Eje Z = polo de efémerides celestes (Celestial Ephemeris Pole, CEP)</p>
---	--	---

Si la Tierra fuera rígida, el eje de rotación giraría en torno del eje principal de inercia con un período de

$$A / (C - A) = 305 \text{ días (período de Euler)}$$

A y B (A=B): momentos de inercia ecuatoriales

C: momento de inercia polar

Dicho de otra manera, las diferencias entre los períodos de Chandler y Euler se deben a la no-rigidez de la Tierra.

- b) Una oscilación anual forzada por desplazamientos estacionales de masas de aire y agua. Tiene el mismo sentido que el de Chandler y una amplitud de  $0.''05$  a  $0.''1$ .
- c) Un movimiento secular del polo debido al derretimiento de los hielos polares y los movimientos tectónicos en gran escala. Consiste en un desplazamiento irregular de unos  $0.''003$  / yr en dirección  $80^\circ$  W.
- d) Variaciones irregulares en pocos días o años. Alcanzan los  $0.''02$ . Están originadas fundamentalmente en redistribución de masas dentro de la atmósfera, cambios en el volumen de los océanos, y terremotos.

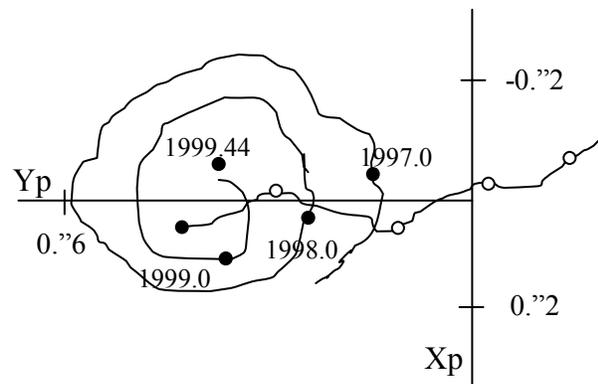
El resultado de todas estas componentes es una espiral deformada del polo instantáneo en torno de un punto imaginario.

En un año, la desviación de la posición media permanece menor que  $0.''3$  (9 m).

La posición del polo con respecto al sólido terrestre se refiere al IRP.

IRP: IERS Reference Pole.

IERS: International Earth Rotation Service



La posición del polo instantáneo con respecto al IRP queda definida por dos coordenadas:  $x_p$ ;  $y_p$  definidas en un plano tangencial al polo. El eje  $x_p$  está dirigido al meridiano de Greenwich, y el eje  $y_p$  hacia  $90^\circ$  W.

## ***5.2 La Velocidad de Rotación - LOD***

La velocidad de rotación de la Tierra presenta pequeñas variaciones que pasan totalmente inadvertidas para el hombre, pero que involucran fenómenos geofísicos internos y atmosféricos de gran magnitud.

La Velocidad de Rotación  $\omega$  de la Tierra también es variable. Estas variaciones son generalmente descritas por el exceso en el tiempo de revolución con respecto a 86400 segundos y es llamada Longitud del Día (LOD: Length Of Day). Las mismas son derivadas de la comparación del tiempo observacional o astronómico (TU: tiempo Universal) con el tiempo uniforme que definen los más modernos relojes atómicos (Tiempo Atómico).

Pueden definirse las siguientes componentes para la LOD:

- a) variaciones anuales y semianuales de magnitud del orden de 1 milésimo de segundo en la duración de 1 día
- b) variaciones decenales (decenas de años) que pueden alcanzar algunos milésimos de segundo Efectos estacionales
- c) variaciones seculares (un frenado del orden de los 2 milésimos de segundo por siglo)
- d) variaciones bruscas impredecibles del orden de los milésimos de segundo.

Actualmente se están descubriendo efectos más pequeños con períodos que van desde unas pocas horas a varios días.

Mientras el Movimiento del Polo afecta las observaciones dependiendo de la posición del observador, los cambios en LOD actúan en forma uniforme sobre todo los puntos.

Las coordenadas del Polo  $x_p$ ;  $y_p$  ; LOD y  $\omega$  son calculadas y provistas por el Earth Orientation Parameters (EOP) del IERS (International Earth Rotation Service) con una resolución diaria y una exactitud de  $\pm 0''.0003$  y  $\pm 0.02$  ms (Reigber and Feissel 1997).

La posición del Geocentro (origen del sistema terrestre) también sufre pequeñas variaciones detectadas a partir de la determinación precisa de órbitas

satelitarias. La magnitud es de varios mm/yr y es causada por la redistribución de masas en el planeta.

Cuando la Tierra retrasa en un milésimo de segundo su rotación:

$$1 \text{ día} = 86400.001 \text{ seg.}$$

Cuando hablamos de variaciones periódicas queremos decir que lo que pierde en un momento lo gana posteriormente y en promedio no hay ninguna modificación significativa. Para terminar con esta breve descripción, podemos detenernos en las variaciones seculares (o progresivas) que a diferencia de las variaciones periódicas tienen un efecto acumulativo (marchan siempre en el mismo sentido).

Las variaciones seculares de la rotación de la Tierra tienen como causa el frotamiento del mar sobre el fondo, especialmente en mares poco profundos, producido por las mareas. Este fenómeno consume energía que se resta de la rotación y tendrá inevitablemente el resultado de retardar la velocidad de rotación hasta que la Tierra muestre a la Luna una sola cara ! De todos modos no es para preocuparnos, a este ritmo, en los próximos mil años un día duraría 86402 seg. (2 segundos más lento que en la actualidad).

Indudablemente las mareas que la Tierra provocó en la Luna desde el comienzo de los tiempos han sido mucho más fuertes que las recíprocas y produjeron el efecto mencionado: la Luna muestra una sola cara a la Tierra.

## Observación de la rotación terrestre

### Observaciones históricas:

- Eclipses registrados en la historia, especialmente, los solares:  
Reconstrucción de su visibilidad a partir de las efemérides del Sol y de la Luna. Cálculo de la velocidad de rotación terrestre requerida para cumplir con las coordenadas del lugar donde el eclipse fue visible.
- Cambios climáticos (tropicales, glaciales): Indicio para establecer el desplazamiento del ecuador y del polo (deriva del polo).
- Fenómenos geológicos y geofísicos (p. ej. Paleomagnetismo):  
Reconstrucción de la orientación de materiales magnéticos según el campo geomagnético antiguo

### Observaciones clásicas: Astronomía óptica

- Corrección de coordenadas de estrellas (declinación y ascensión recta)  
→ Precesión, nutación
- Corrección de las coordenadas terrestres (latitud y longitud)  
→ Movimiento del polo
- Corrección del tiempo (corrección por longitud)  
→ Variación de la velocidad de rotación terrestre (UT1 - UTC, LOD)

### Observaciones modernas:

#### a. Radio astronomía

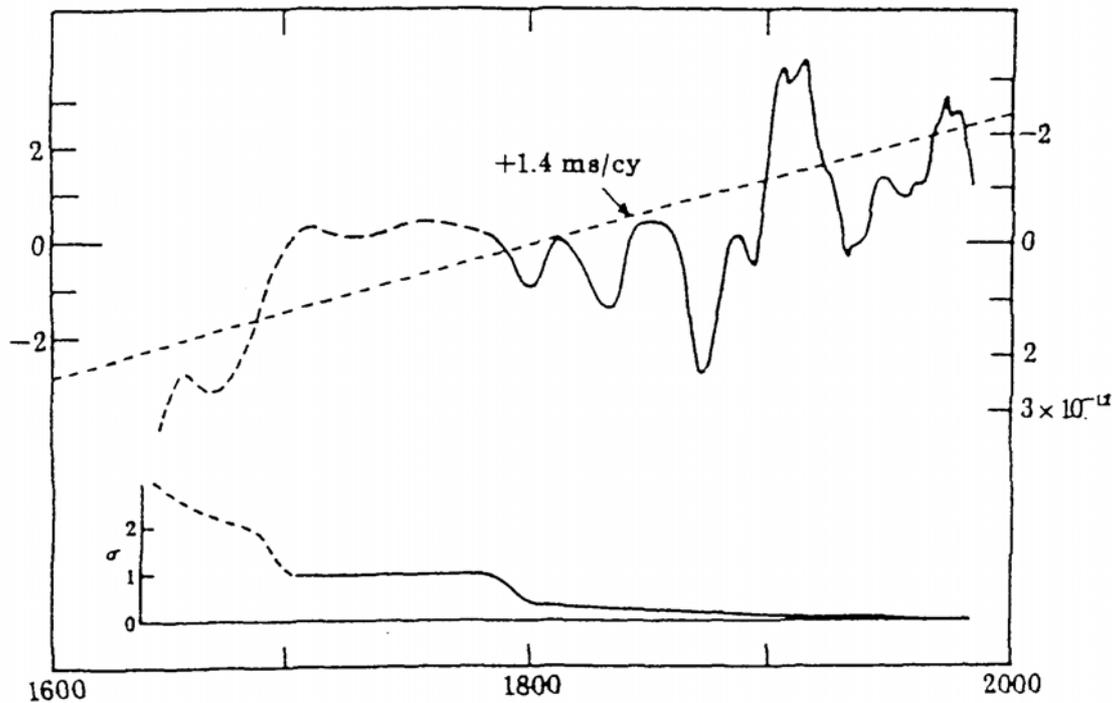
- Interferometría de líneas bases muy largas (VLBI): variación de azimutes de las líneas bases  
→ Movimiento del polo, corrección del tiempo: UT1-UTC (p. ej. LOD)

#### b. Observaciones satelitales

- Rastreo Láser de Satélites (SLR) y Posicionamiento Global por Satélites (GPS): Cambio de posición de las estaciones de observación (sistema terrestre) con respecto a las trayectorias de los satélites (sistema cuasi-inercial)  
→ Movimiento del polo  
(por GPS: corrección del tiempo con respecto a VLBI, UT1 - UTC)

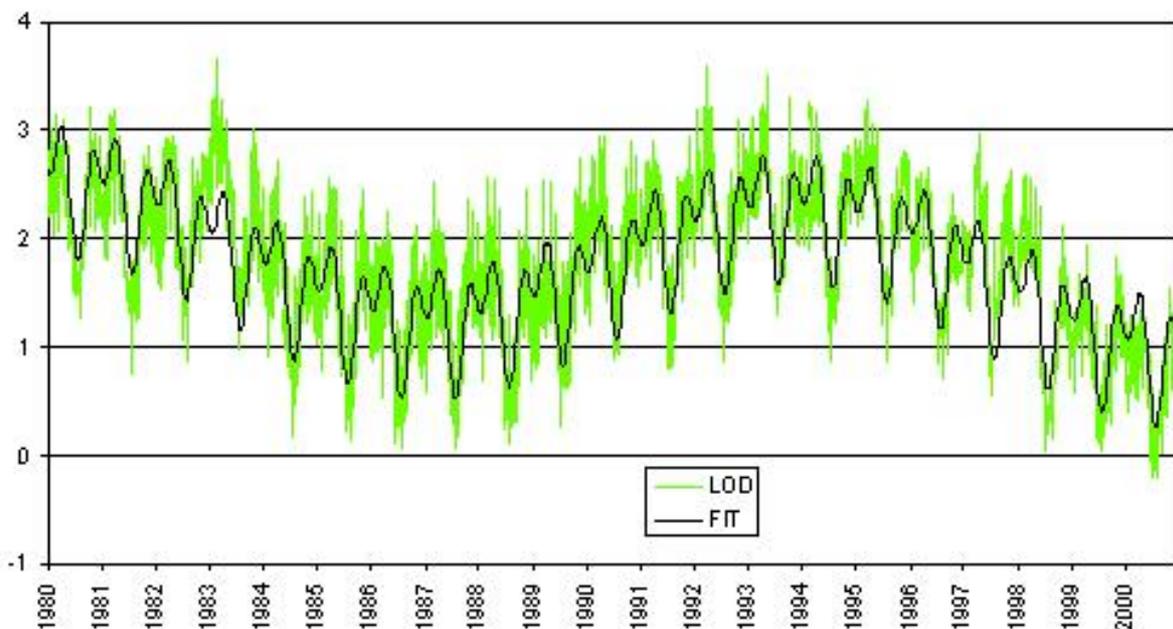
## Variación de la velocidad de rotación terrestre (Longitud del día, "Length of Day", LOD)

### Observaciones históricas y clásicas [ms]

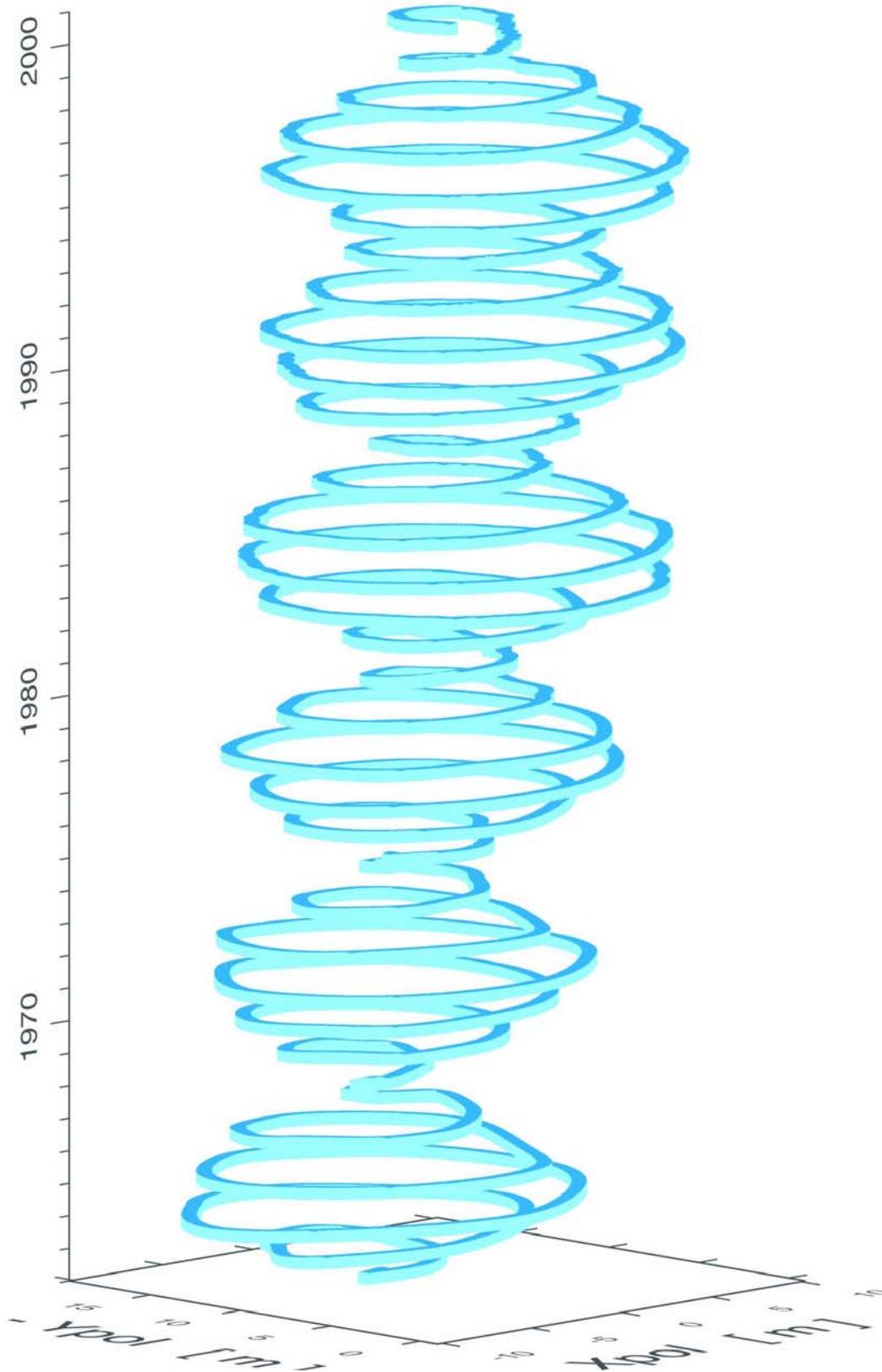


### Observaciones modernas (IERS)

#### Aproximación por ondas de 14 años, un año y medio año [ms]

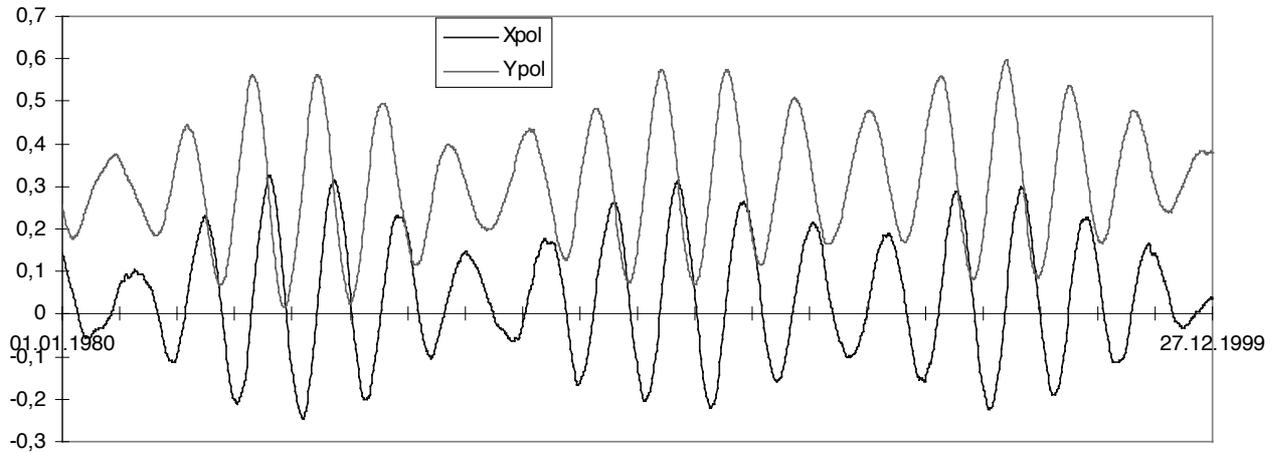


## Observaciones modernas: Movimiento del polo

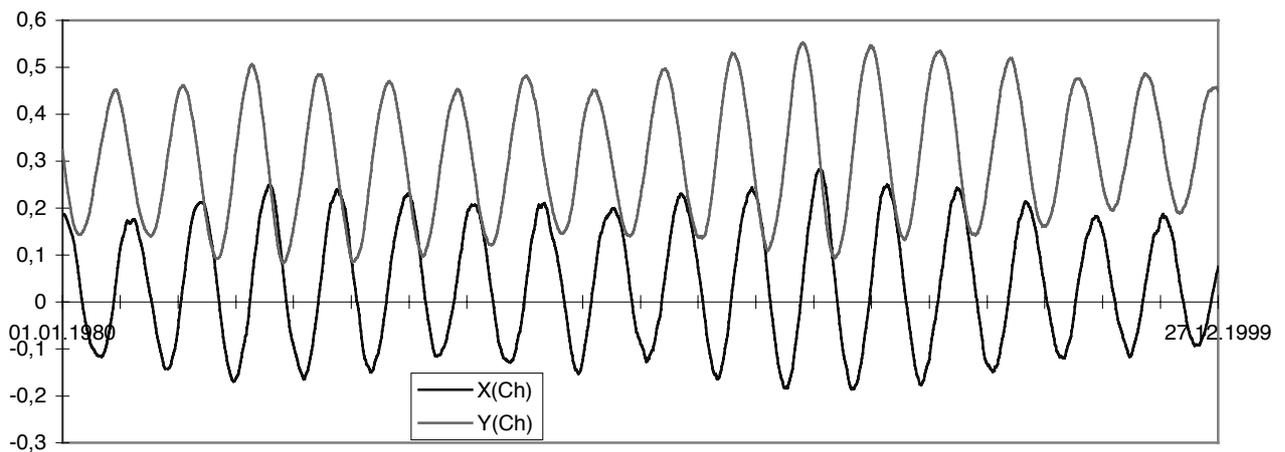


## Descomposición del movimiento del polo

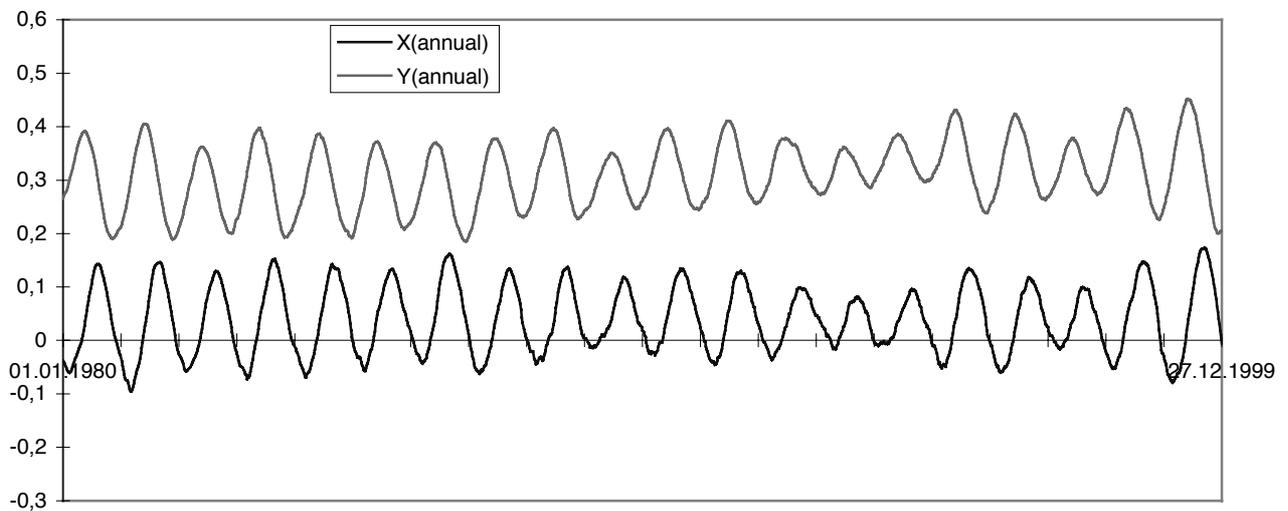
### Movimiento total [ " ]



### Período Chandler (variación libre) [ " ]

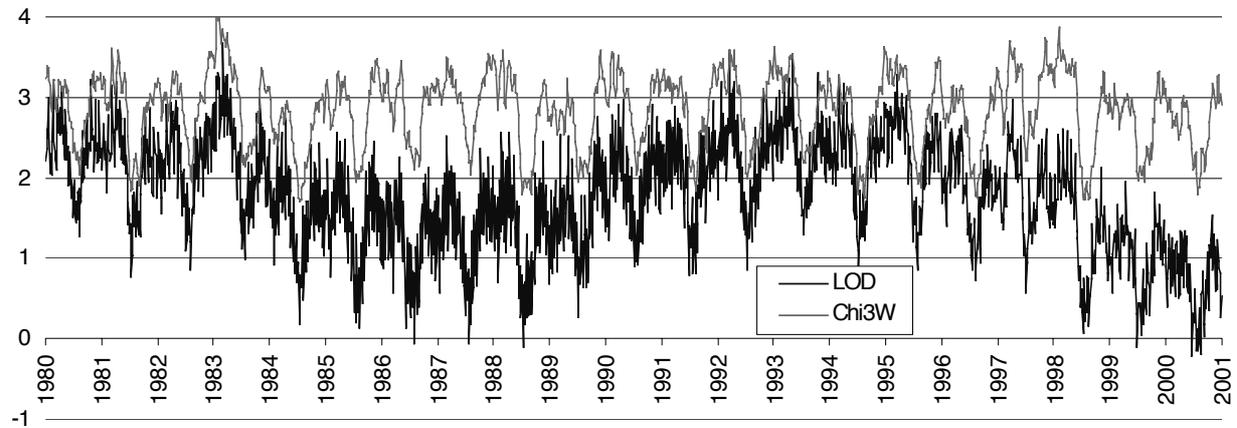


### Período anual (variación forzada) [ " ]

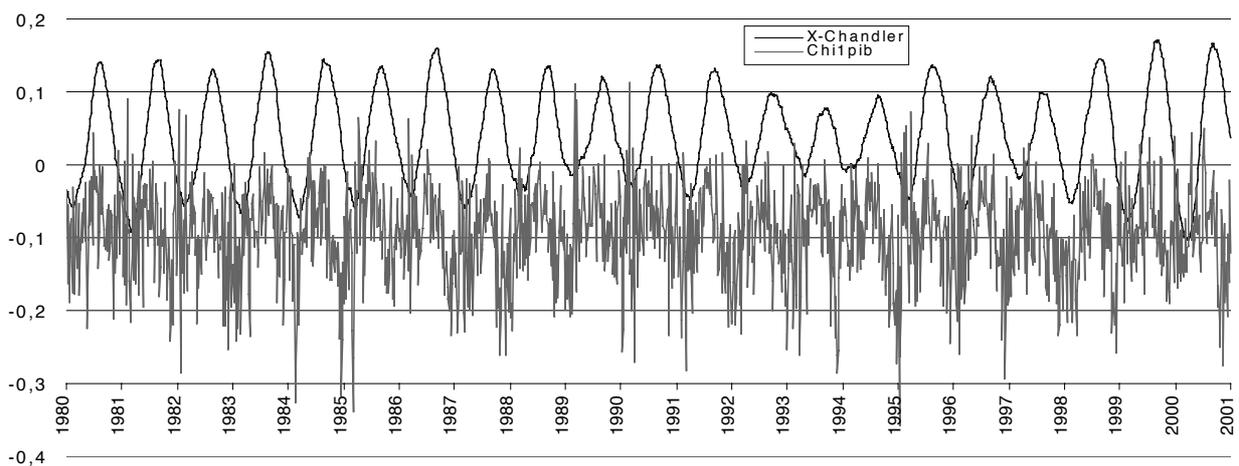


## Causas de la variación de la rotación terrestre

### Longitud del día (LOD) e impulso de vientos zonales (Chi3W) [ms]



### Componente X(polo) e impulso de la presión atmosférica (Chi1P) ["]



### Componente Y(polo) e impulso de la presión atmosférica (Chi2P) ["]

