



ASTRONOMÍA PARA INGENIEROS INQUIETOS

MOVIMIENTOS DE LA TIERRA

Este documento es de uso único e intransferible para el alumno matriculado en el curso. Cualquier reproducción física o digital del documento sin permiso de los autores vulnera los derechos de propiedad intelectual de los mismos.

INDICE

INDICE.....	3
1. ACHATAMIENTO DE LA TIERRA.....	4
2. PRECESIÓN DE LOS EQUINOCCIOS.....	5
3. DESAJUSTE DE LOS HORÓSCOPOS.....	13
4. COMO FECHAR UN DOCUMENTO QUE TIENE REFERENCIAS ASTRONÓMICAS.....	16
5. COMO AJUSTAR LOS ACONTECIMIENTOS ASTRONÓMICOS DE RELATOS HISTÓRICOS ANTIGUOS.....	18
6. OTRAS VARIACIONES ORBITALES. INCLINACIÓN Y EXCENTRICIDAD	20
7. CÓMO FECHAR LA CONSTRUCCIÓN DE UN MONUMENTO QUE TIENE ALINEACIONES ASTRONÓMICAS. PRÁCTICA	22
8. LAS GLACIACIONES E INTERGLACIACIONES. LOS CICLOS DE MILANKOVITCH	31
8.1 ¿Qué nos espera en el futuro considerando los ciclos de Milankovitch?	40
8.2 Análisis de los cambios climáticos a largo plazo	41

1. ACHATAMIENTO DE LA TIERRA

Debe tenerse en cuenta que la fuerza centrífuga de la Tierra, al girar sobre sí misma, ha provocado con el paso de millones de años que la circunferencia en el ecuador tenga un radio algo mayor de lo normal, provocando que la tierra quede un poco achatada por los polos.

Esto es debido a que la fuerza centrífuga es proporcional al radio de giro y es en el ecuador donde el radio de giro es mayor.

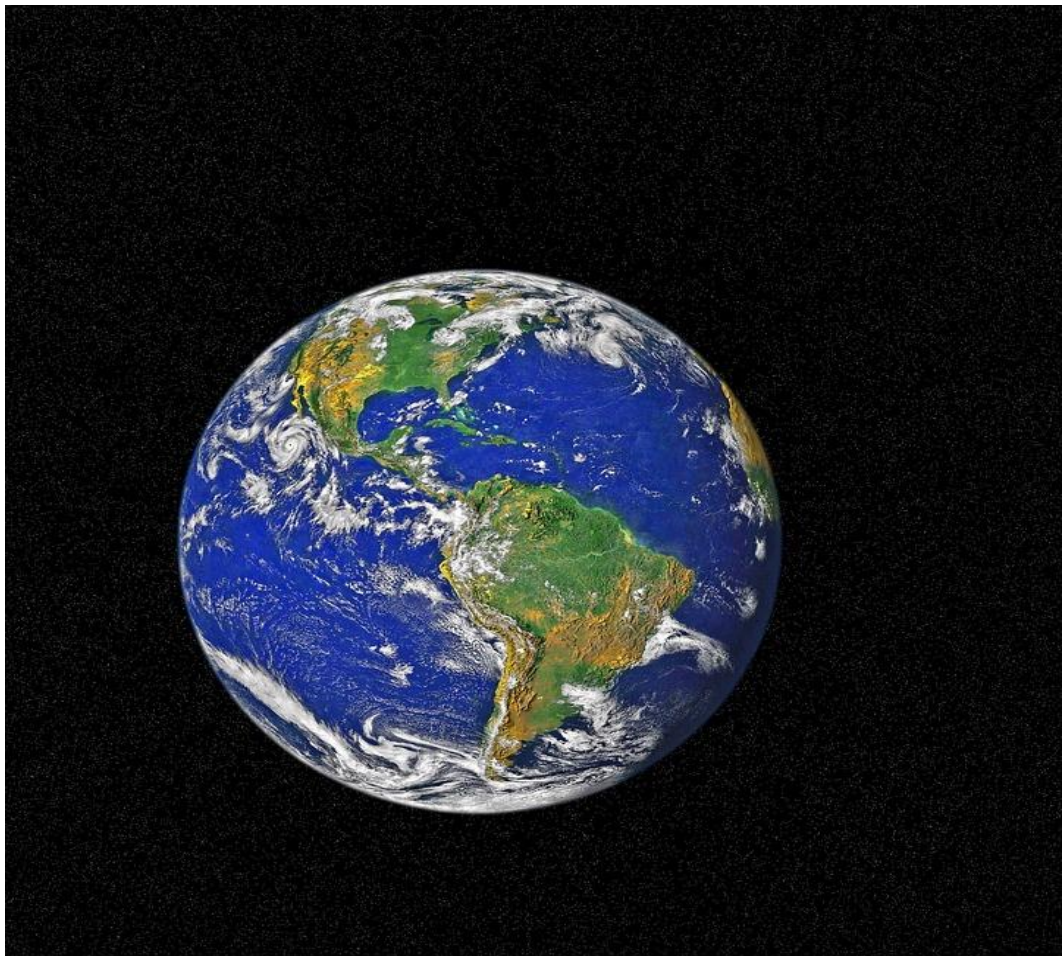


Figura 1: La tierra está achatada por los polos quedando el ecuador deformado con un radio mayor de lo normal (imagen exagerada). Fuente: Pixabay.

2. PRECESIÓN DE LOS EQUINOCCIOS

Hoy se sabe que el eje de la tierra no siempre mira a la estrella polar. En la actualidad apunta a esta estrella pero en el pasado apuntó a Vega, apuntando cada vez a una estrella distinta completando un círculo cada 25.776 años.

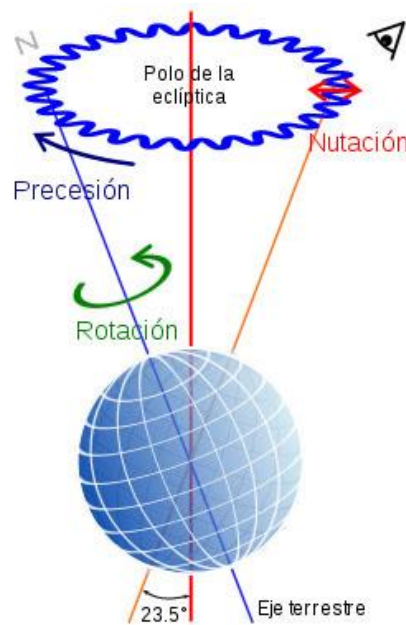


Figura 2

En efecto, anteriormente apuntaba a Alfa del Dragón y hace 13.000 años apuntaba a Vega. En realidad el eje de la Tierra gira en un ciclo de 25.776 años de forma que pasado este tiempo apuntará de nuevo hacia la estrella Polar. Se bambolea como una peonza. Este bamboleo es en realidad debido al achatamiento de la tierra en los polos; en los solsticios la atracción que produce el sol sobre la masa terrestre de su ecuador es mayor sobre la masa ecuatorial que queda cercana al sol que la que queda alejada, lo cual provoca un desequilibrio que produce un giro en el eje de la tierra, por este motivo el eje se bambolea.

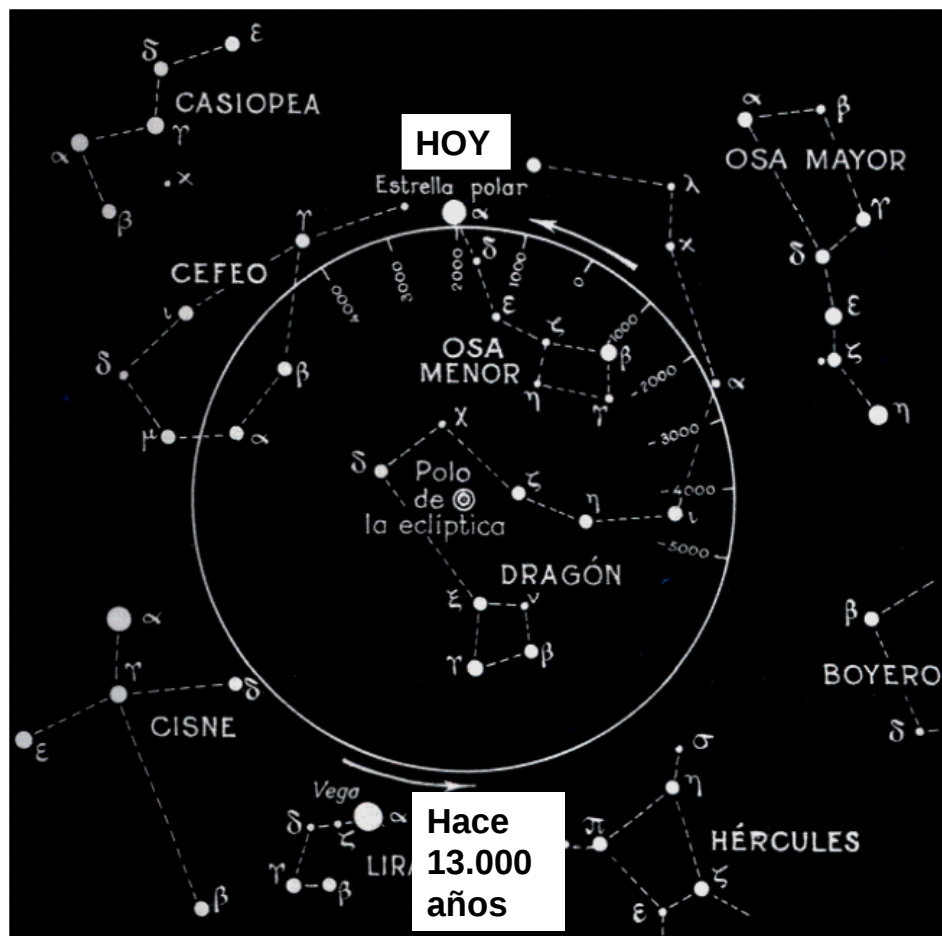


Figura 3

Dibujemos un esquema de la situación de hace 2,000 años y la situación de ahora para que podamos entender como gira el eje de los solsticios:

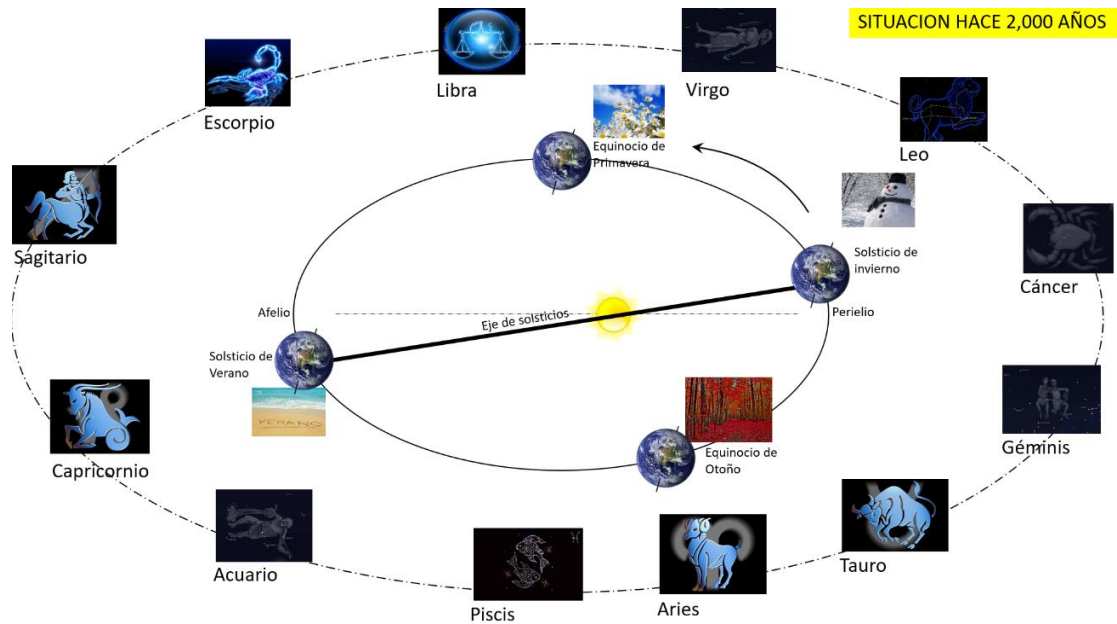


Figura 4

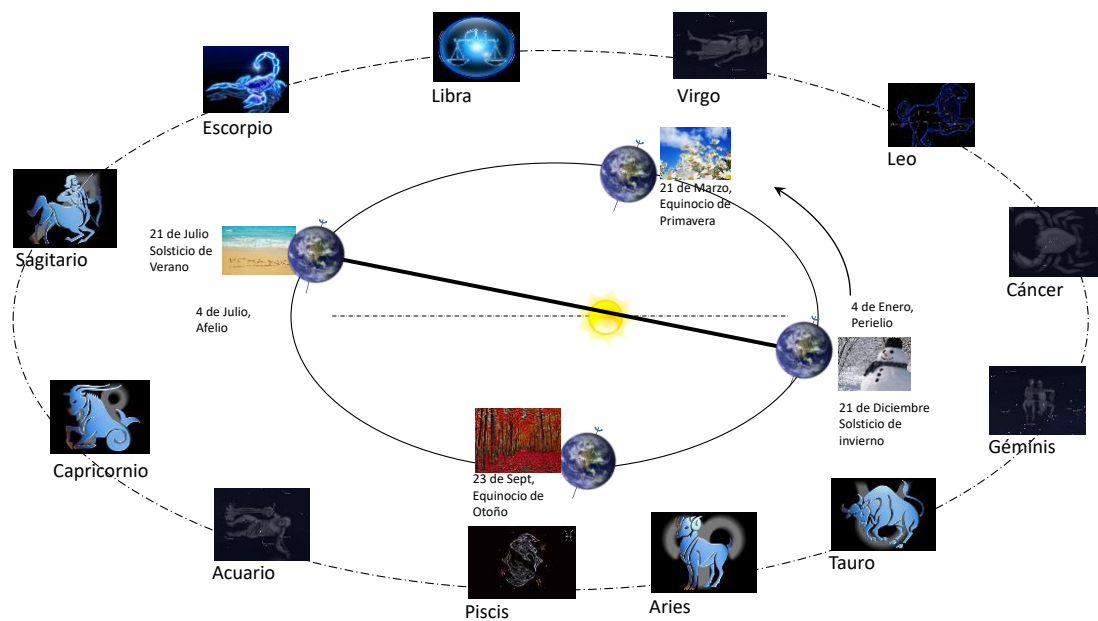


Figura 5: Situación hoy, evolucionado debido a la precesión de los equinoccios.

Podemos ver como el eje de los solsticios ha girado en la dirección contraria a la que gira la tierra alrededor del sol, y por eso el equinoccio de primavera que en la época de Julio César se daba en Aries. Ahora se da en Piscis, un poco antes.

PRACTICA:

¿En qué año fue esculpido el Atlas Farnesio?

Sin duda alguna, la obra artística más antigua de interés para la astronomía es el Atlas Farnesio.



Figura 6



Figura 7: *Atlas Farnesio.*

Esta obra representa de manera asombrosa el mapa estelar de la antigüedad. Sabemos que la escultura es del siglo II y que es una copia de una obra helenística. Se conserva en el Museo Arqueológico Nacional de Nápoles.

Con los conocimientos adquiridos en este curso podrías ayudar mucho a los especialistas en arte para informarles en qué fecha se esculpió esta escultura.

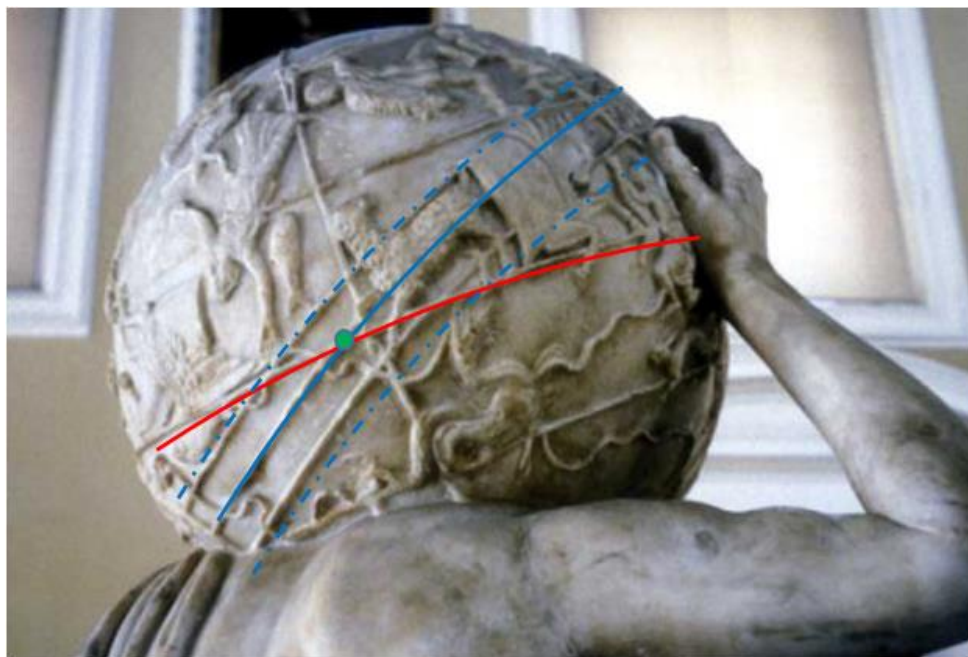


Figura 8

Con un simple vistazo a la foto es fácil adivinar que la línea que cruza la esfera en forma inclinada (en azul en el dibujo) es la eclíptica, por donde se encuentran las constelaciones del zodiaco. La constelación del carnero es Aries. La siguiente de la derecha es Tauro y la anterior (a la izquierda de Aries es el río de Piscis).

También podemos ver la línea del ecuador celeste (en rojo en el dibujo). El ecuador celeste es la intersección del plano del ecuador de la Tierra sobre la bóveda celeste.

Se puede ver en la escultura que la intersección entre el ecuador celeste y la eclíptica está justo entre Aries y Piscis en aquella época. Es decir, en esos días en que se diseñó esta escultura el equinoccio de primavera se producía cuando el sol estaba justo abandonando Piscis.

Si vamos ahora a Star Walk y miramos en qué día ocurre que el sol comienza a abandonar piscis, vemos que ocurre el 19 de Abril.



Figura 9: Vemos que en la actualidad, cuando el sol se encuentra abandonando piscis es el día 19 de Abril.

Antes de seguir es necesario explicar algo más. Vemos que en Star Walk, Aries aparece a la izquierda de Piscis, y Tauro a la izquierda de Aries.

¡Sin embargo en la escultura se encuentran en sentido contrario! Esto es debido a que lo que vemos en la escultura es la visión de un titán que se encontrara fuera del universo. Y lo que vemos en Star Walk es la visión de una hormiguita que se encuentra dentro (es la diferencia entre ver un calcetín y su reverso).

El equinoccio de primavera hoy se da el 20 de Marzo, es decir, se ha adelantado 30 días desde entonces. Sabemos ya que esto se debe a la precesión de los equinoccios y sabemos que en 25.776 años el equinoccio habrá dado la vuelta completa (equivalente a un adelanto de 365 días). Haciendo una simple regla de tres vemos que 30 días de adelanto equivalen a 2.118 años, lo cual nos coloca en el 100 antes de Cristo, en pleno arte helenístico.

¿Qué gran astrónomo griego vivió en aquella época? Ni más ni menos que el propio descubridor de la precesión de los equinoccios. Hiparco murió en el 120 a.d.C. Su trabajo científico fue eternizado en 3D en una escultura helenística prodigiosa. Curiosamente la propia precesión de los equinoccios nos permite ahora datar la escultura. A buen seguro fue idea de Hiparco inmortalizar el cielo de su época en piedra para que los “sabios” del futuro pudieran comprobar de manera evidente la precesión.

La escultura que se conserva es romana copiada del modelo griego original. Esta escultura demuestra también que los romanos copiaban de los griegos su arte, hasta tal punto, que no lo modificaban aunque lo dictaran las estrellas. Un artista romano avezado habría modificado el mapa estelar del Atlas Farnesio para adecuarlo al cielo de su época, que ya habría cambiado sensiblemente.

De esculpirse hoy, tendría este aspecto. Vemos como el equinoccio se ha movido (punto verde), y también el ecuador celeste ha cambiado de orientación. El plano de la eclíptica se mantiene constante (plano azul).

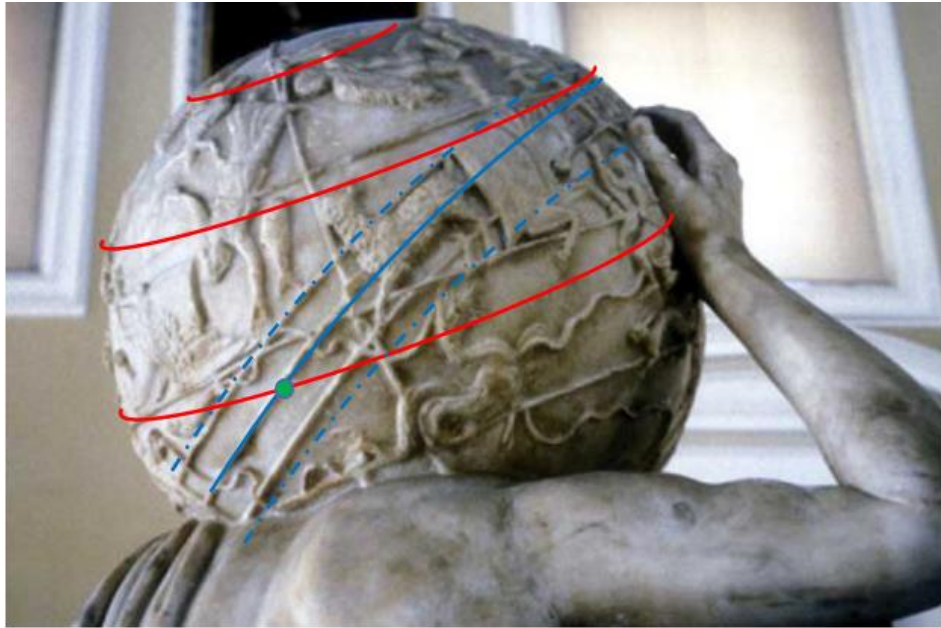


Figura 10

3. DESAJUSTE DE LOS HORÓSCOPOS

Visto todo lo anterior, sabemos que **el calendario gregoriano se adapta casi exactamente al año trópico** y así se resolvió el problema de que los solsticios y los equinoccios cambien de fecha. Pero sin embargo, no se resuelve el problema de que el sol, en un mismo día del año, acaba proyectándose en una constelación distinta con el paso del tiempo.

Advertencia: *Es importante tener en cuenta que la App recomendada en este curso (Star Walk) no tiene en cuenta la precesión de los equinoccios. De manera que si miramos en qué situación se encuentra el sol el 20 de Marzo de 1600 podremos comprobar que en la app se encuentra en la misma estrella que el 20 de Marzo de 2018, sin embargo en realidad debe apuntar en 1600 a una estrella bien diferente, el equivalente a seis días de viaje de sol por la eclíptica ($0,014 \text{ días/año} \times 418 \text{ años} = 5,9 \text{ días}$).*

PRACTICA:

Calcula, utilizando lo aprendido, en qué siglo debieron inventarse los horóscopos.

Fijémonos en las fechas de los horóscopos que manejan los supuestos astrólogos de las “Psuedo-televisiones”

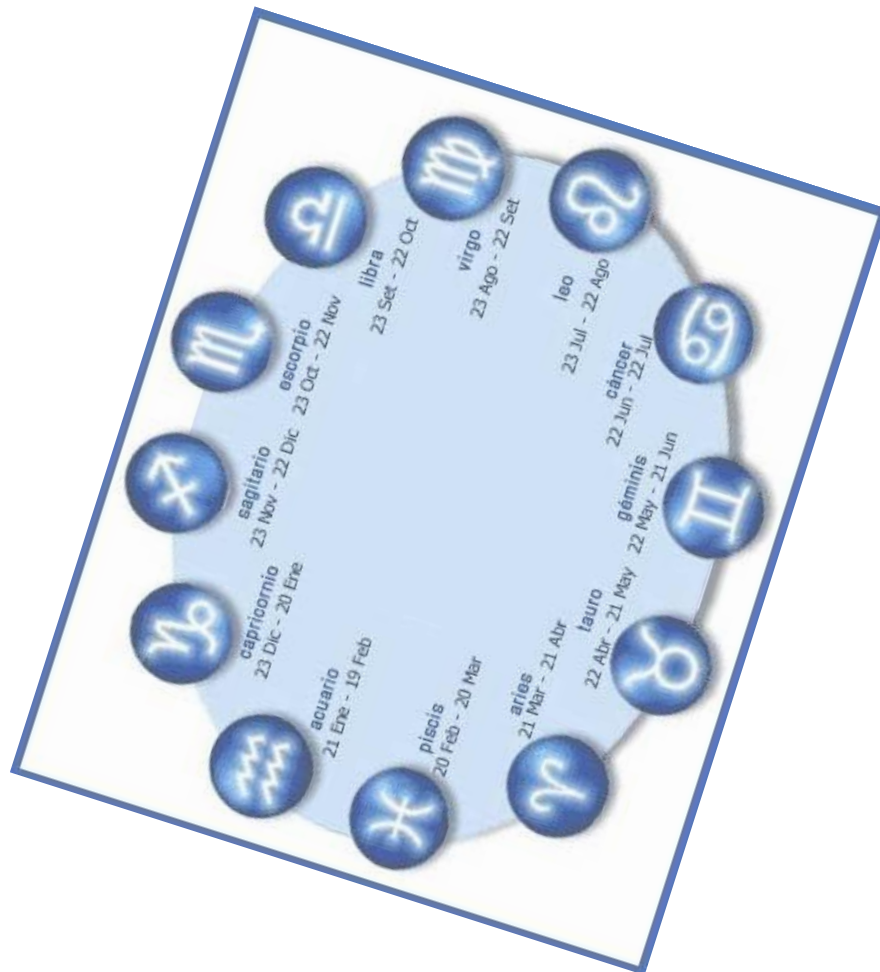


Figura 11: La figura aparece inclinada de manera deliberada porque es mi intención, a lo largo del presente curso, colocar siempre a la derecha Géminis y Cáncer y a la izquierda Sagitario y Capricornio. Por razones didácticas. De manera que cuando veamos la Tierra a la izquierda del sol sabremos que es verano. Si la vemos abajo es otoño. Si la vemos a la derecha es invierno y si la vemos arriba es primavera.

Utilizando la app Star Walk fijémonos en la fecha en que realmente el sol está en Tauro a día de hoy (2019). Entra en la constelación el 14 de Mayo y sale el 14 de Junio. Sin embargo según la tabla astrológica de los horóscopos debería entrar el 22 de Abril. ¡Hay un desfase de 22 días!

¿Por qué?

El año sideral (el que corresponde al tiempo que tarda el sol en situarse de nuevo en la misma estrella) dura 365,25636 días. Y el año del calendario gregoriano dura 365,2475, es decir, hay un desfase entre ellos de 0,00886 días/año. Desde 1582 hasta hoy han pasado 435 años y ha habido un desfase de 3,85 días entre el calendario civil gregoriano y el calendario sideral.

Sabemos que además en ese año hay que restar 10 días (puesto que 10 días desaparecieron del calendario en Octubre como ya hemos visto).

Calculemos ahora cuánto desfase ha habido hasta el año de la reforma de Julio César (46 a.d.C.). El año juliano duraba 365,25 días. Luego el desfase era de 0,00636 días/año. Entre ambas reformas pasaron 1.628 años. Luego el desfase en días entre ambas reformas fue de 10,35 días de desfase entre el calendario civil juliano y el calendario sidereal.

Es decir la acumulación de desfase entre ambas fechas es de $3,85+10+10,35=24,2$ días¹. Algo más de los 22 días de desfase que hay actualmente entre las fechas de los horóscopos tradicionales y los reales. Por tanto parece que las fechas de los horóscopos se fijaron un poco más tarde. En realidad los fijó Ptolomeo en el Siglo II d.C. en base a las constelaciones zodiacales de la tradición babilónica.

Aquel que crea que los horóscopos afectan a la vida de las personas, deberá elegir si su horóscopo es el que le corresponde según los babilonios, el que corresponde según los romanos, o el que le corresponde ahora, porque el sol ahora ya no está en las constelaciones que le corresponde a cada día según el calendario astrológico.

¹ Téngase en cuenta que el desfase de 14 días se da entre las fechas (según el calendario oficial) en que el sol entra realmente en cada constelación en 2017 y las fechas (según el calendario oficial) en que realmente entra en el año 1. Por tanto es evidente que los ajustes que hacemos en el calendario oficial están influyendo.

4. COMO FECHAR UN DOCUMENTO QUE TIENE REFERENCIAS ASTRONÓMICAS

EJERCICIO PRÁCTICO:

La magnífica obra de Hesiodo “Los Trabajos y los días” tiene continuas referencias astronómicas. ¿Sabrías calcular en qué momento fue escrito?

“Al salir las Pléyadas, comienza la recolección, y la labranza cuando ellas se ocultan” (se ocultan cuarenta días y cuarenta noches).

Se sabe que la fecha que regía estas labores era el equinoccio de primavera. 20 días antes se hacía labranza, y 20 días después del equinoccio se hacía la recolección.

Utilizando la app Star Walk se puede ver que, actualmente, el sol pasa por las pléyades 40 días después del equinoccio de primavera. Pero, según nos indica Hesiodo, cuando el sol estaba en las Pléyades, sucedía el equinoccio de primavera.

Por tanto el equinoccio se ha adelantado 40 días.

¿Cuándo fue escrito el documento?

$$(40/360) \times 25,776 = 2,824 \text{ años}$$

Es decir Hesiodo debió escribir este documento hace 2,824 años (en el 824 a.d.c. aproximadamente). Desde entonces el eje de la tierra ha ido girando poco a poco y el equinoccio de primavera se ha ido adelantando de manera que antes se producía cuando el sol estaba en las Pléyades y, ahora el equinoccio de primavera se produce 40 días antes.

Como vemos hemos podido calcular la fecha sin tener que entrar en la problemática de los calendarios, ajustes, etc....

Nos damos ahora cuenta de la importancia que tenía para los agricultores seguir a las estrellas. Así dice el griego Arato (310.240 a.d.c) en su obra fenómenos: *“El (Zeus), bondadoso con los hombres, les envía señales favorables (...), les dice cuando el labrantío está en condiciones favorables para el arado, y cuando es el momento propicio para plantar las plantas, etc....”*

EJERCICIO PRÁCTICO:

Estamos en 2018 y se ha perdido todo el conocimiento científico y antiguo. Nadie sabe cuánto dura el ciclo de la precesión de los equinoccios. Ni siquiera saben qué es. Sin embargo has encontrado un documento antiguo de tiempos de Julio Cesar, en donde se asegura que el equinoccio de Primavera se da justo en el momento en que el sol está entrando en Aries.

¿Cuánto dura el ciclo de la precesión de los equinoccios? (utiliza la App Star Walk)

Es fácil ver con la App Star Walk que en 2018 el sol entra en Aries 29 días más tarde del equinoccio de otoño. Es decir, hay un retraso de 29 días respecto al equinoccio.

El número de años que han pasado desde los estudios astronómicos promovidos por Julio César (45 a.d.C.) es 2063 años.

Por tanto el ciclo completo de la Precesión de los Equinoccios es de $2063 \times 365 / 29 = 25.965$ años. Esta es una cifra muy similar a la real.

5. COMO AJUSTAR LOS ACONTECIMIENTOS ASTRONÓMICOS DE RELATOS HISTÓRICOS ANTIGUOS

En la monumental obra de Tucídides “La Guerra del Peloponeso” hay continuas referencias a acontecimientos astronómicos para explicar o fechar exactamente determinados momentos históricos.

En concreto, cuando está explicando el asedio de Platea, indica “Todos los demás partieron para sus ciudades, en la época en que se muestra la estrella llamada Arturo”. ¿A qué época del año se está refiriendo?

Utilizando la App de Star Walk podemos ver que hoy la estrella Arturo, después de estar 40 días sin poder verse por estar cerca de la posición del sol, comienza a volver a aparecer en el amanecer del 6 de Noviembre. A partir de esta fecha la estrella se va alejando de la posición del sol hasta que el 26 de Septiembre del año siguiente vuelve a dejar de verse por estar excesivamente cerca del sol en el atardecer.

Es decir, el acontecimiento astronómico al que se refiere Tucídides ocurre hoy 45 días después del equinoccio de otoño que ocurre el 22 de Septiembre. Sin embargo, debido a la precesión de los equinoccios, el equinoccio se producía por entonces más tarde. ¿Cuánto más tarde?

Teniendo en cuenta que Tucídides se refiere a un acontecimiento que ocurrió en el 430 adC, han pasado 2.447 años. Dado que el ciclo de la precesión de los equinoccios es de 25.776 años, se han retrasado desde entonces $(2.447/25.776) \times 365 = 35$ días.

Es decir, los lacedemonios partieron para sus ciudades 10 días después del equinoccio de otoño, cuando ya finalizaba el verano y se acercaba el mal tiempo².

² El comentario a pie de página de la traducción en español de la obra dice que Tucídides se refiere al 6 de Julio. Debe referirse al mes que en época griega equivalía al mes de Julio romano. Pero despista porque en realidad la época es ya pasado el equinoccio de Otoño.

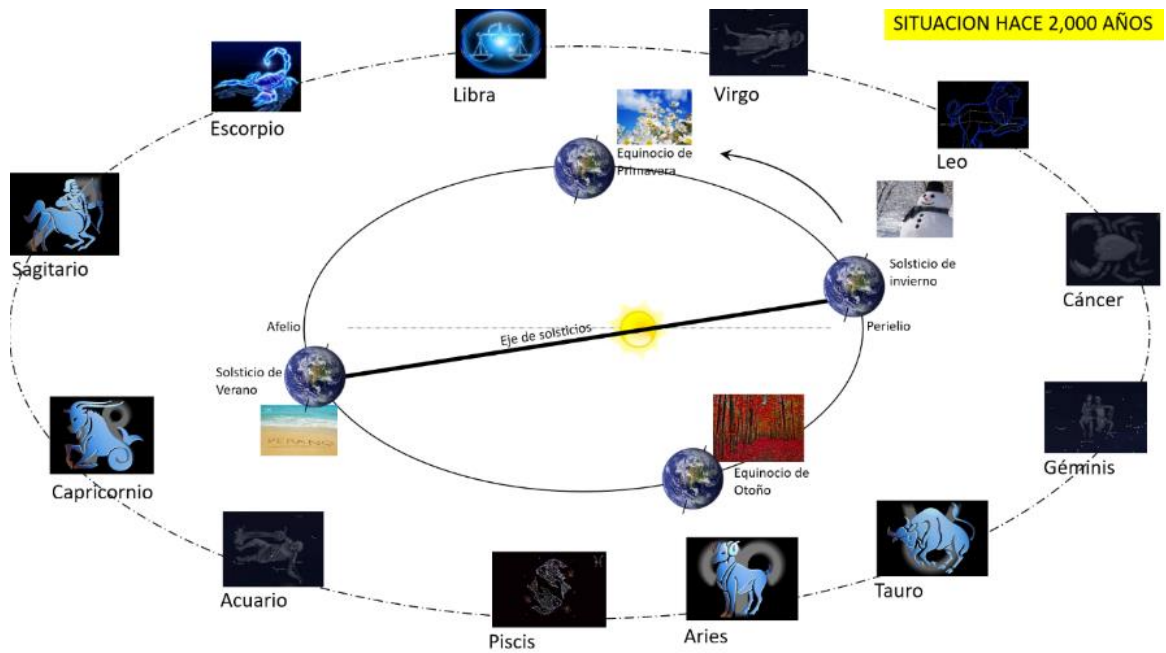


Figura 12

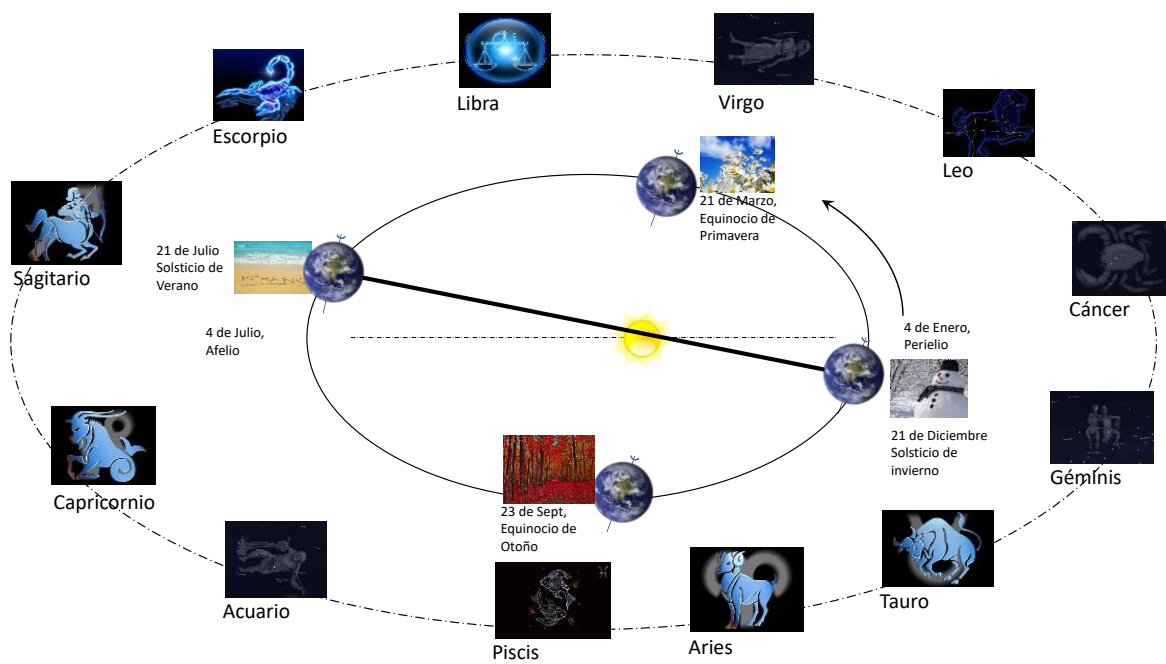


Figura 13: Situación hoy, evolucionado debido a la precesión de los equinoccios.

6. OTRAS VARIACIONES ORBITALES. INCLINACIÓN Y EXCENTRICIDAD

Se da la circunstancia además, de que el eje de giro de la Tierra no ha tenido siempre una inclinación de $23,4^\circ$ (inclinación actual). Hubo un tiempo en que tuvo una inclinación de $24,5^\circ$ y un tiempo en que fue de $22,5^\circ$, de modo que cada 41.000 años se repite el ciclo. En la actualidad estamos en una situación más o menos intermedia. Hace 10.000 años alcanzó su máximo y dentro de unos 11.000 años alcanzará su mínimo.

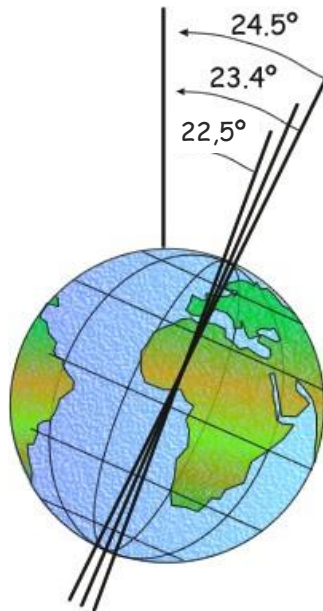


Figura 14: Variación en la inclinación del eje de la Tierra en un ciclo de 41.000 años.

Veremos más adelante como todos estos movimientos tienen consecuencias importantes en el clima global de la tierra.

Pero además de todo lo dicho es necesario finalmente mencionar que también la forma de la órbita cambia con el tiempo. Como sabemos, la Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica, al igual que el resto de planetas. Pero esa forma elíptica puede ser más ovalada o menos. Lo menos ovalada posible sería una circunferencia (excentricidad cero). En este caso particular, la Tierra estaría siempre a la misma distancia del Sol a lo largo de todo el año.

Se da la circunstancia de que la forma de la órbita de la Tierra también se modifica con el paso de los años, influenciada por la atracción gravitatoria del resto de planetas. En la actualidad la forma es casi una circunferencia pero hace cien mil años la excentricidad llegó a ser más de cuatro veces la actual, es decir, la órbita era mucho más ovalada.

El cálculo de las variaciones de la excentricidad es complicado y no se trata de un ciclo perfecto como en los anteriores casos. Las variaciones en la excentricidad son debidas a las influencias de los planetas. Basta con conocer la gráfica de su variación en el pasado y su evolución prevista en el futuro. Vemos más adelante la importancia de todos estos movimientos y como afectan de manera muy importante en los cambios climáticos que se han producido en la historia de la tierra.

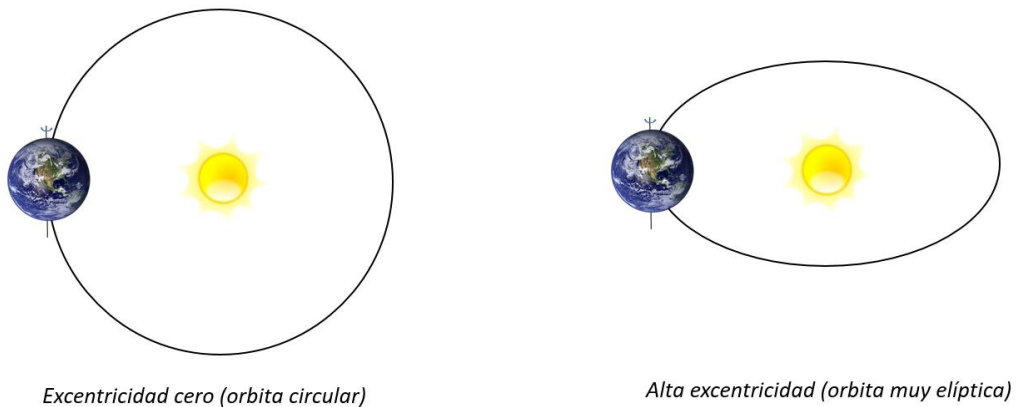
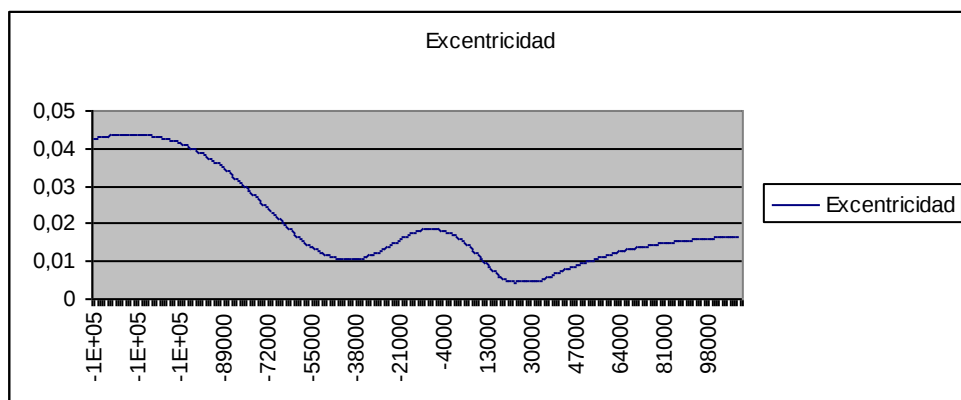


Figura 15



7. CÓMO FECHAR LA CONSTRUCCIÓN DE UN MONUMENTO QUE TIENE ALINEACIONES ASTRONÓMICAS. PRÁCTICA

PRACTICA:

Eres un afamado arqueólogo y has podido comprobar que STONEHENGE está alineado en la dirección de la salida del sol en el solsticio de verano. Sin embargo hay un ligero desajuste. El sol sale un grado más hacia el Este que la alineación. Partiendo de la hipótesis de que STONEHENGE estaba perfectamente alineado en el momento de su construcción, y considerando que las excavaciones en principio han datado su construcción en el 3,000 a.d.C. ¿Podrías confirmar la fecha en que se construyó el monumento?



Figura 16: Stonehenge en el momento de la salida del sol en el solsticio de verano.

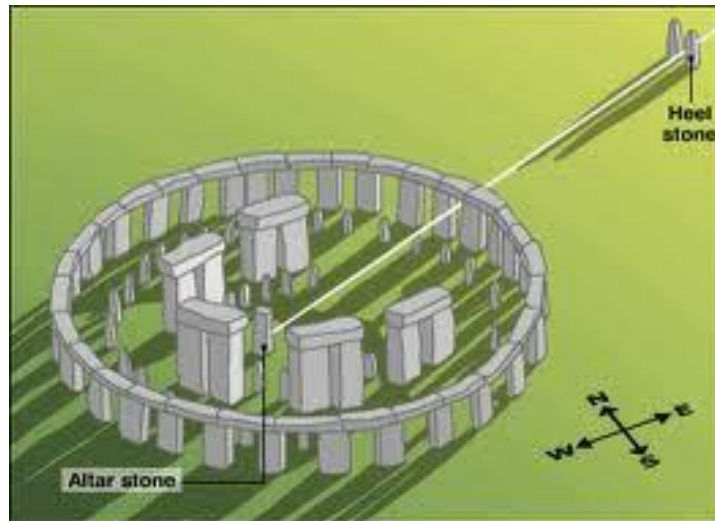


Figura 17: Alineación con el punto de salida del sol el día del solsticio de verano.

¿A qué puede ser debido ese desajuste en el alineamiento? ¿Podría ser debido a la precesión de los equinoccios? Recordemos que la precesión lo que provoca es que el eje de la Tierra mire cada vez a una estrella diferente. Sin duda el solsticio de verano se producía en otra constelación del zodiaco en el momento de su construcción. Y desde luego, hace 5,000 años el Norte no lo marcaba la estrella polar en absoluto, sino la estrella Ed Asich de la constelación de El Dragón.

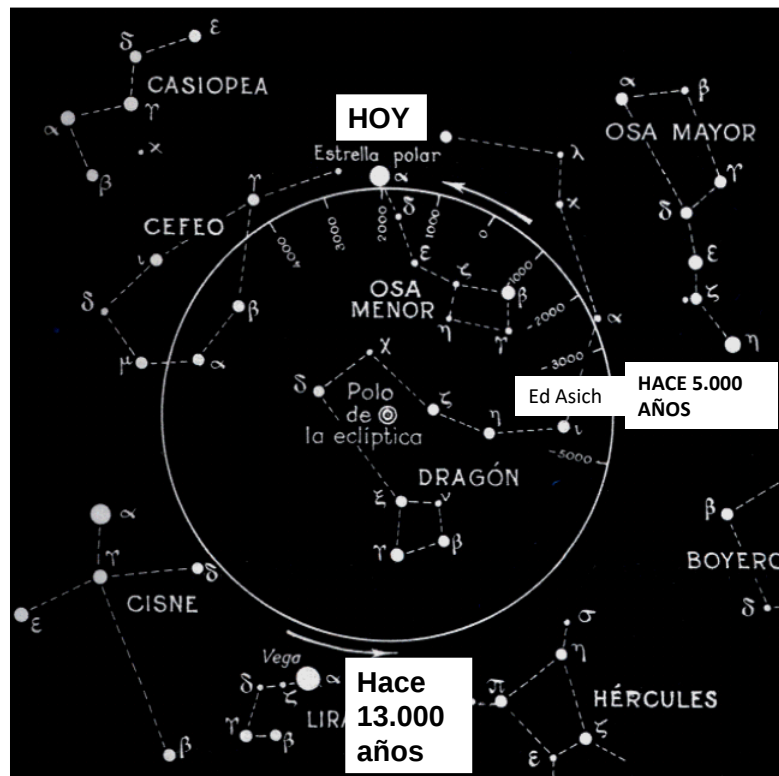


Figura 18: Variación del Norte celeste debido a la precesión de los equinoccios. Hoy el eje de la tierra apunta a la estrella polar, pero hace 5,000 años apuntaba a Ed Asich y hace 13,000 años apuntaba a Vega.

Pero la precesión no modifica el lugar por donde sale o se pone el sol en el horizonte. Aunque el eje de la Tierra apunte a un sitio distinto, el sol sigue saliendo por el mismo sitio en cada día del año.

¿Qué lo ha podido modificar?

Recordemos que la inclinación del eje de la Tierra si se modifica.

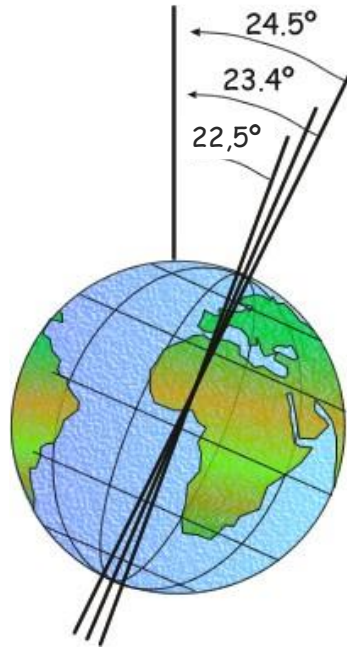


Figura 19: Hace 10.000 años alcanzó su máximo de inclinación ($24,5^\circ$) y dentro de unos 11.000 años alcanzará su mínimo ($22,5^\circ$). Hoy está en $23,4^\circ$.

El eje de la Tierra hace 5,000 años estaba medio grado más inclinado. Ya vimos que hace 10,000 años estaba inclinado $24,5^\circ$ y desde entonces cada vez está menos inclinada. Por tanto la inclinación del eje de la Tierra en ese momento debía ser de 24° . Es decir, en el solsticio de verano, la declinación del sol en vez de ser $23,4^\circ$ será de 24° .

Calculemos cuánto se ha desviado la posición de la salida del sol en el solsticio de verano desde hace 5,000 años. Veamos por dónde salía el sol exactamente. Para ello construyamos el gráfico del horizonte que hacíamos en los temas anteriores pero teniendo en cuenta que la declinación es de 24° en lugar de $23,4^\circ$.

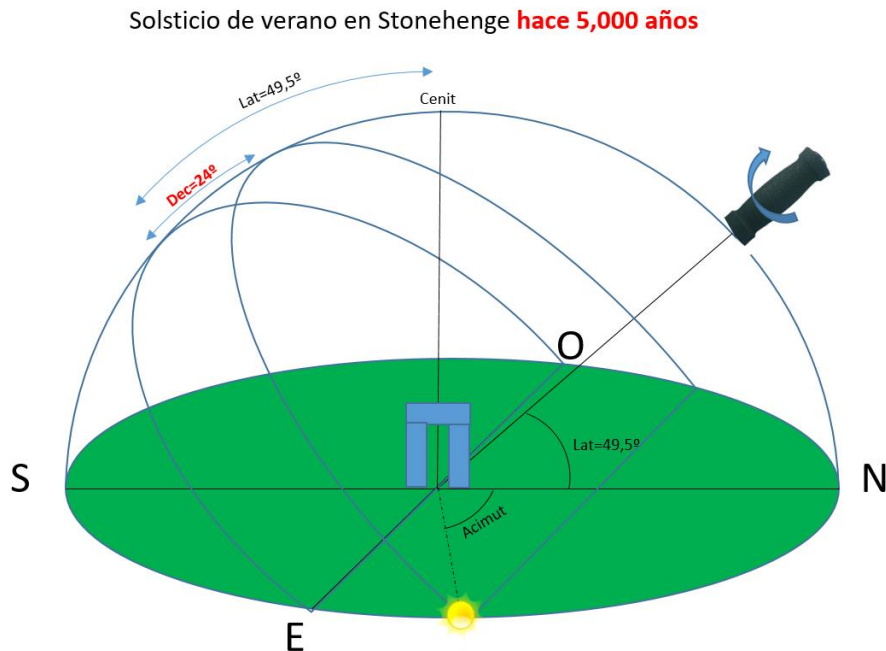


Figura 20

Ya vimos como podíamos calcular el Azimut del sol en el momento de su salida. En concreto, el Azimut del sol en el momento del amanecer del solsticio de verano en Stonehenge, hace 5,000 años era:

STONEHENDGE. Solsticio de verano (amanecer)	Hace 5.000 años	
Dec	24	0,41888
Lat	51,18	0,8932616
Sen(dec)	0,406737538	
cos(dec)	0,913545059	
cos(lat)	0,626874186	
tg(lat)	1,242865823	
$h = \text{sen}(\text{dec}) / \text{cos}(\text{lat})$	0,648834402	
$x = \text{tg}(\text{lat}) * \text{sen}(\text{dec})$	0,505520185	
$\text{Hipot} = \text{raiz}(\text{cosdec} * \text{cosdec} - x * x)$	0,760929641	
$\text{Az} = \text{arctg}(\text{hipot} / h)$	0,8647447	50,2342461

Es decir, el sol salía justo a $50,23^\circ$ E, que es la orientación de Stonehenge.

Veamos ahora cuál es la orientación de STONEHENGE.

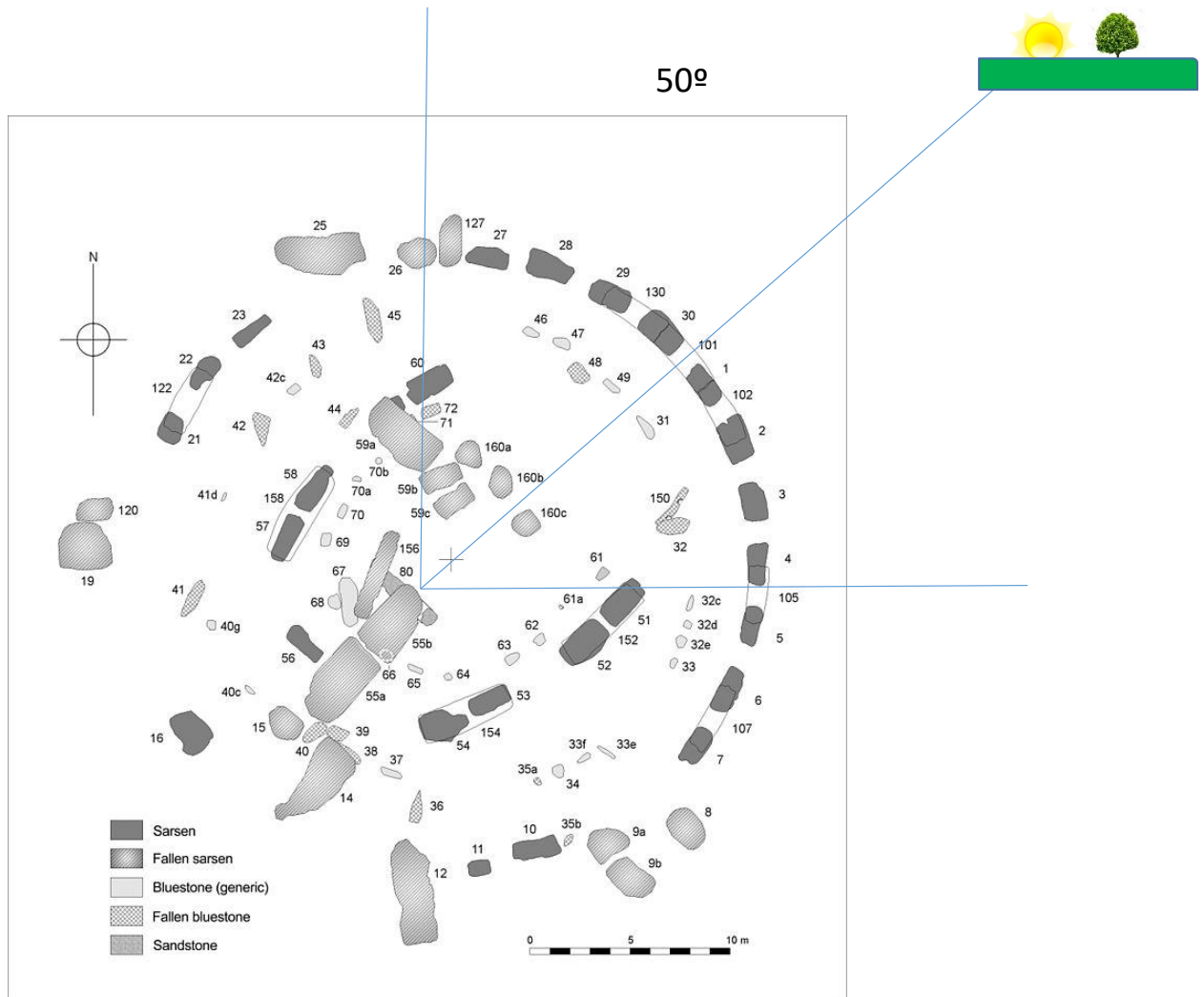


Figura 21

Ya que no tenemos la oportunidad de medirlo allí (ojalá), calculemos cuál es la posición del sol **actualmente** en el amanecer del solsticio de verano, calculándolo para una declinación de $23,4^\circ$:

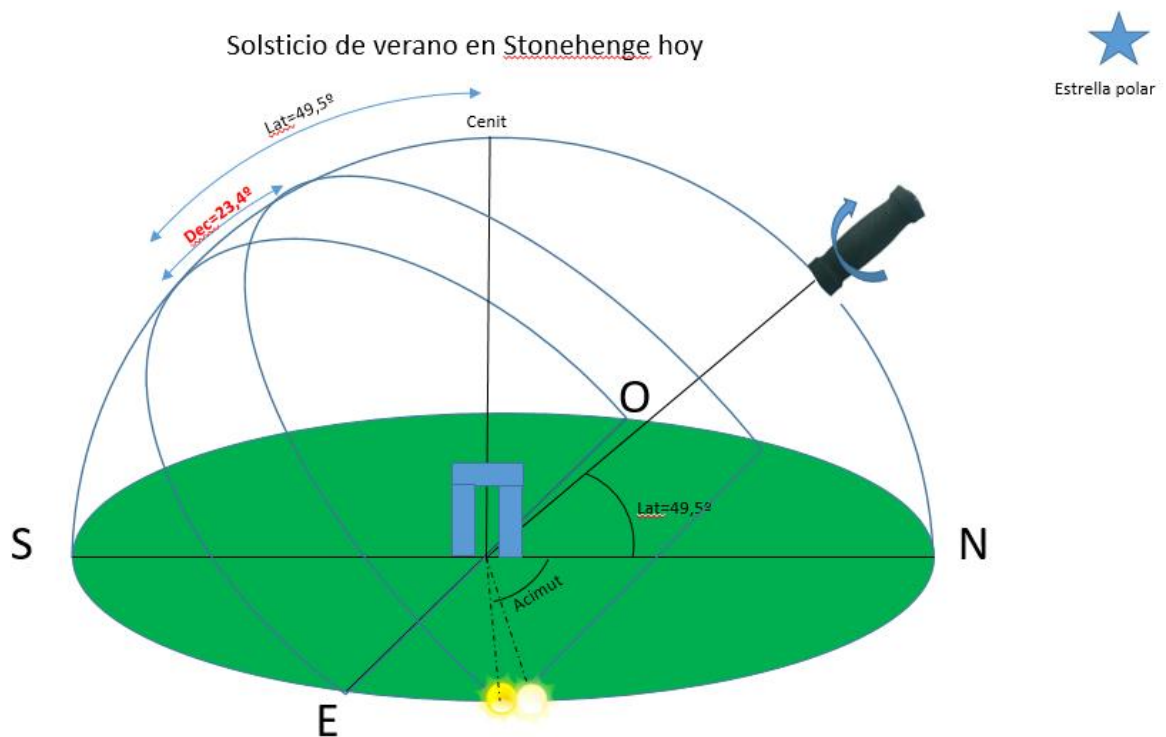


Figura 22

Vemos que, debido a que la declinación del sol es ahora un poco menor, el sol sale ligeramente más hacia el Este (menos hacia el Norte) de lo que lo hacía hace 5,000 años.

Haciendo los mismos cálculos obtenemos un $Az=51,32^\circ$.

STONEHENDGE. Solsticio de verano (amanecer)	HOY	
Dec	23,43	0,40898972
Lat	51,18	0,8932616
Sen(dec)	0,397682576	
cos(dec)	0,917523062	
cos(lat)	0,626874186	
tg(lat)	1,242865823	
$h=\text{sen}(\text{dec})/\text{cos}(\text{lat})$	0,634389778	
$x=\text{tg}(\text{lat})*\text{sen}(\text{dec})$	0,494266081	
$\text{Hipot}=\text{raiz}(\text{cosdec}*\text{cosdec}-x*x)$	0,773013331	
$Az=\text{arctg}(\text{hipot}/h)$	0,88357747	51,3282685

Es decir, hay una diferencia de poco más de un grado. El sol amanece un poquito más en el Este que antes.

Vemos por tanto, que el desajuste de un grado que observamos actualmente en el alineamiento de Stonehenge encaja perfectamente con la antigüedad del monumento (5.000 años).

También hemos demostrado que, hace 5,000 años, el eje del monumento estaba perfectamente orientado a la salida del sol en el solsticio de verano. Actualmente el sol sale ligeramente más al Este, como se ve en la siguiente figura:

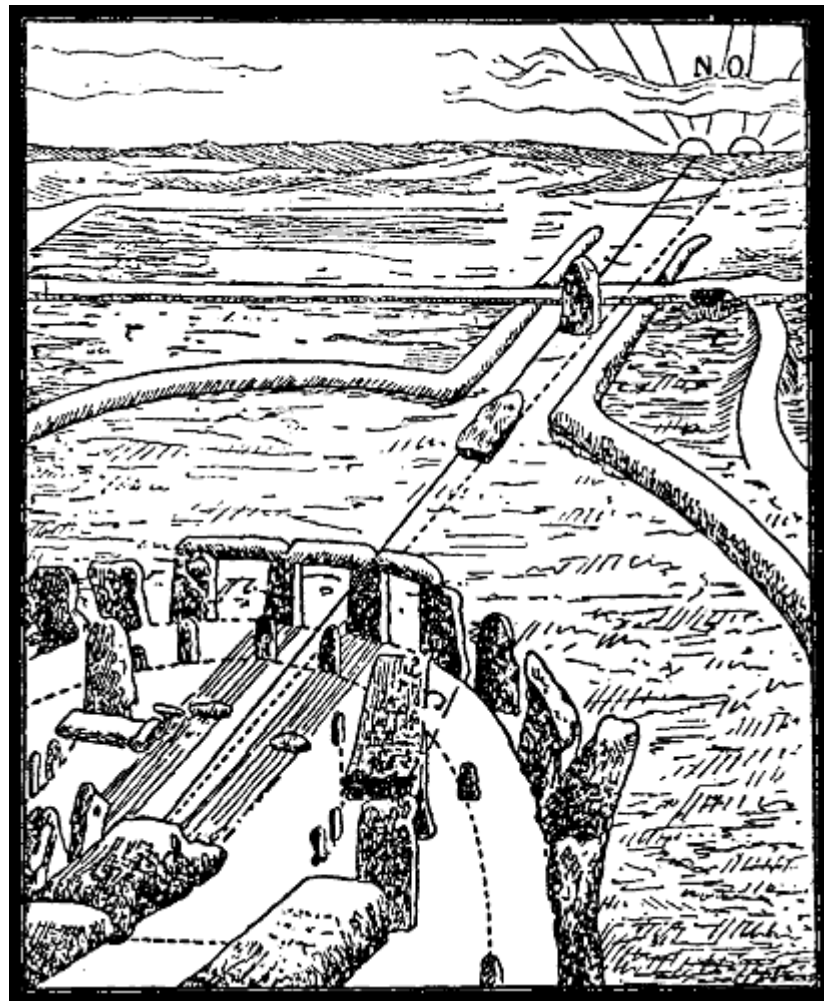


Figura 23

El reloj de Stonehenge ha quedado ligeramente desajustado con el tiempo. Recordemos que este desajuste no se debe a la precesión de los equinoccios, sino a la variación paulatina en la inclinación del eje de la Tierra.

8. LAS GLACIACIONES E INTERGLACIACIONES. LOS CICLOS DE MILANKOVITCH

En el último millón de años se produjeron 4 grandes glaciaciones con sus correspondientes interglaciaciones (Gunz, Mindel, Riss y Würm). Cada uno de estos fenómenos modificó drásticamente el clima terrestre. ¿Por qué se produjeron? Es evidente que el hombre no tuvo nada que ver porque el Homo Sapiens existe solo desde hace 150.000 años.

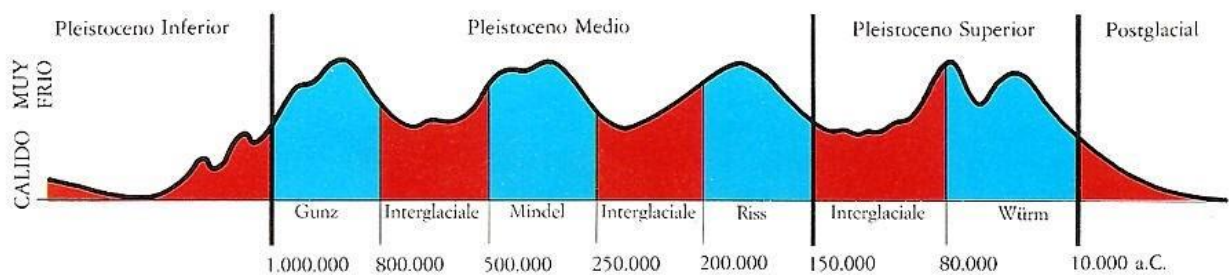


Figura 24

Milankovitch predijo en las primeras décadas del Siglo XX que los fenómenos de glaciario debían depender de condiciones externas a la Tierra. Debían depender de fenómenos astronómicos que afectaran a la forma en que el Sol calienta a la Tierra, lo cual tiene toda la lógica del mundo puesto que es el Sol el que proporciona toda la energía calorífica en la Tierra.

Los tres fenómenos astronómicos que él identificó como factores causantes del glaciario son los siguientes:

- Dónde apunta el eje de giro de la Tierra (precesión de los equinoccios)
- El grado de inclinación del eje de giro de la Tierra
- La forma de la elipse que traza la Tierra alrededor del Sol (excentricidad)

Ya vimos que el extremo norte del eje de giro de la Tierra apunta a la estrella Polar. Pero eso es sólo en la actualidad. Anteriormente apuntaba a Alfa del Dragón y hace 13.000 años apuntaba a Vega. En realidad el eje de la Tierra gira en un ciclo de 25.776 años de forma que pasado este tiempo apuntará de nuevo hacia la estrella Polar. Se bambolea como una peonza.

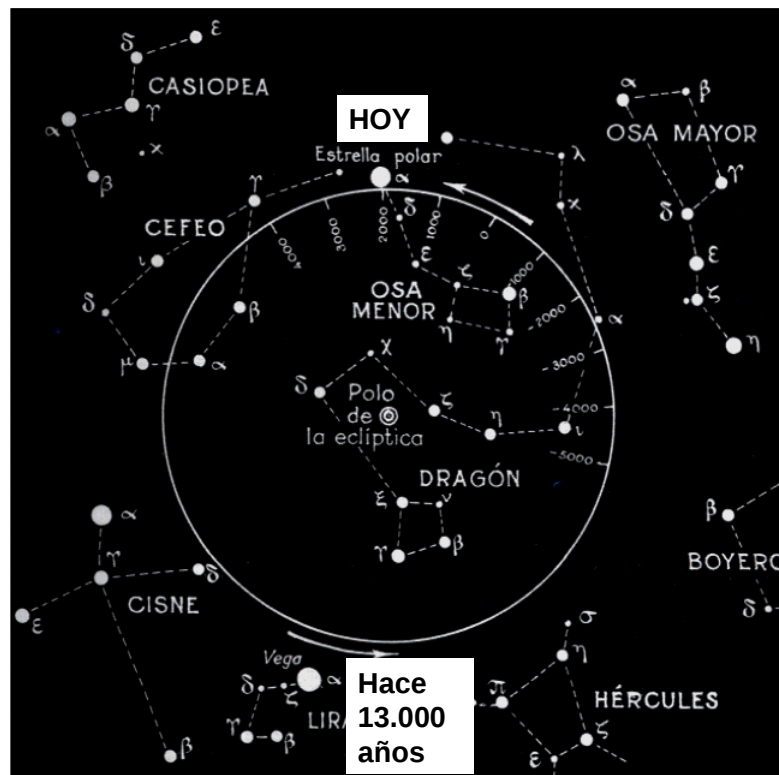


Figura 25: El eje de la Tierra gira en un ciclo de 25.776 años de forma que pasado este tiempo apuntará de nuevo hacia la estrella Polar. Se bambolea como una peonza.

¿Qué consecuencia importante puede tener esto?

Reflexionemos que hace 12,500 años sucedía que el verano en el hemisferio Norte se daba cuando la Tierra estaba más cerca del Sol, como se ve en la siguiente gráfica.

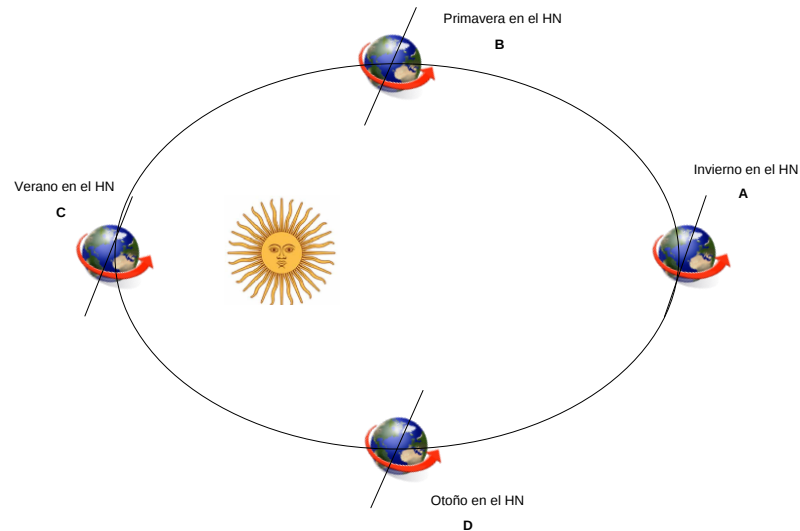


Figura 26: Explicación gráfica. Fenómeno anual hace 12,500 años. El eje de giro apuntaba hacia el lado opuesto al actual. El verano en el hemisferio norte se daba en la posición más cercana al Sol.

Por tanto, hace 12.500 años³ los veranos en el hemisferio Norte debieron de recibir más energía solar que ahora porque la Tierra estaba más cerca del Sol que en el verano actual. ¡Pero ojo!, también los inviernos del hemisferio Norte debieron recibir menos energía porque la Tierra estaba más lejos del Sol de lo que está en el invierno actual. La energía media anual que debía recibir por tanto debía ser la misma.

Lo contrario ocurre en el hemisferio Sur. Por tanto, en realidad al final, la suma de energía que recibe la Tierra a lo largo de todo el año en la actualidad es prácticamente la misma que la que recibía hace 12.500 años. ¿Cómo es que entonces este factor puede influir en los fenómenos de glaciación global? En seguida lo vemos.

³ En realidad esto sucedió hace 10.500 años ya que también se mueve el eje de la elipse de la órbita terrestre. Esto se explica en el Apéndice I

Analicemos ahora el grado de inclinación del eje de la Tierra. Ya vimos que se da la circunstancia además, de que el eje de giro de la Tierra no ha tenido siempre una inclinación de $23,4^\circ$ (inclinación actual). Hubo un tiempo en que tuvo una inclinación de $24,5^\circ$ y un tiempo en que fue de $22,5^\circ$, de modo que cada 41.000 años se repite el ciclo. En la actualidad estamos en una situación más o menos intermedia. Hace 10.000 años alcanzó su máximo y dentro de unos 11.000 años alcanzará su mínimo.

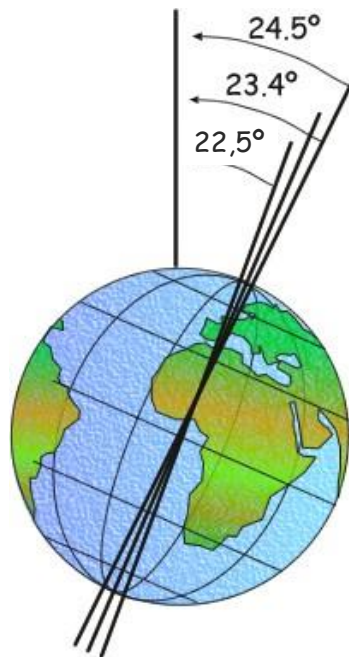


Figura 27: Variación en la inclinación del eje de la Tierra en un ciclo de 41.000 años.

Estos cambios en la inclinación del eje de la tierra son debidos a que la atracción solar hacia la masa del ecuador (más masivo que los meridianos que pasan por los polos por estar achatada) hacen variar la inclinación del eje.

Como hemos visto, la inclinación del eje de la Tierra es fundamental para explicar la existencia del verano y del invierno. Hemos visto también que este factor es aún más determinante que el de la cercanía o lejanía del Sol.

Hace 10.000 años se daba la circunstancia de que el verano del hemisferio norte recibía más energía solar debido a los siguientes factores:

- La Tierra estaba más cerca del Sol que en el verano actual (como ya hemos dicho)
- El eje de giro estaba más inclinado y los rayos incidían aún más verticalmente que en el verano actual

¡Pero ojo!, también en invierno el hemisferio Norte recibía menos energía solar hace 10.000 años que en el invierno actual debido a los mismos factores:

- La Tierra estaba más lejos del Sol que en el invierno actual (como ya hemos dicho)
- El eje de giro estaba más inclinado y los rayos incidían aún menos verticalmente que en el invierno actual

Por tanto, la suma de energía que recibe la Tierra a lo largo de todo el año en la actualidad sigue siendo prácticamente la misma que la que recibía hace 10.000 años. ¿Cómo es que entonces el grado de inclinación del eje puede influir en los fenómenos de glaciación global? De nuevo, enseguida lo vemos.

Analicemos, por último, la forma de la órbita elipsoidal (la excentricidad de la órbita). Como sabemos, la Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica, al igual que el resto de planetas. Pero esa forma elíptica puede ser más ovalada o menos. Lo menos ovalada posible sería una circunferencia (excentricidad cero). En este caso particular, la Tierra estaría siempre a la misma distancia del Sol a lo largo de todo el año. Se da la circunstancia de que la forma de la órbita de la Tierra también se modifica con el paso de los años. En la actualidad la forma es casi una circunferencia y por tanto, en la actualidad esta variable está prácticamente anulando el factor de la precesión de los equinoccios. Pero en el pasado la excentricidad llegó a ser más de cuatro veces la actual, es decir, la órbita era mucho más ovalada.

En realidad este factor es sólo un atenuante del factor de la precesión de los equinoccios de forma que cuando la excentricidad sea muy alta, dicho factor será más decisivo y cuando la excentricidad sea muy baja, dicho factor tendrá efectos casi nulos.

Por tanto, de nuevo se da la circunstancia de que este factor tampoco modificará la cantidad de energía recibida por la Tierra a lo largo de todo un año.

Entonces ¿cómo se pueden explicar las glaciaciones?

La gran intuición de Milankovitch fue deducir que para la formación de los glaciares en los continentes, no era tan determinante que hiciera mucho frío en invierno. **Lo importante era que no hiciera el suficiente calor en verano como para comenzar a derretirlos.** Efectivamente, un glaciar se caracteriza por tener nieves perpetuas (en verano y en invierno), si nieva en verano el glaciar crecerá. Si en verano llega a derretirse más de lo que nieva en invierno, el glaciar entra en recesión.

Por tanto, nos interesa volver a analizar los 3 factores vistos anteriormente para ver cuándo producen veranos calurosos y cuándo producen veranos más templados.

La pregunta es ¿veranos dónde? ¿En el hemisferio norte o en el hemisferio sur? Resulta que los tres factores analizados efectivamente son causantes de que los veranos puedan ser más calurosos o menos. ¡Pero ojo! cuando en el hemisferio norte sea un verano caluroso, coincidirá que en el hemisferio sur será un verano muy suave, y viceversa. Parece que estamos dando vueltas en círculo pero estamos más cerca que nunca de la solución.

La siguiente intuición de Milankovitch, la decisiva, es que son las variaciones en la intensidad de calor de **los veranos del hemisferio norte los que provocan los fenómenos de glaciación o interglaciación global.**

¿Por qué?

En el hemisferio sur apenas hay tierras emergidas, es casi todo océano. El hemisferio norte, sin embargo, es mucho más continental y es en los continentes donde mayoritariamente se forman los glaciares⁴.

Estos glaciares del hemisferio norte afectan de forma determinante a la temperatura global de la Tierra por los siguientes dos motivos:

1. La nieve refleja la radiación del Sol mucho más que la tierra. Esto lo podemos comprobar cuando vamos a esquiar y se nos olvida echarnos crema o las gafas de sol. Por tanto, los glaciares reflejarían una parte importante de la radiación solar hacia el espacio y esto provocaría un enfriamiento global de la Tierra.

⁴ A excepción del Artico, que son hielos flotando sobre el mar

2. Pero además, es evidente que la temperatura del aire atmosférico es distinta si el suelo tiene nieve (que está a una temperatura por debajo de 0°C) que si tiene tierra seca. En época de glaciación gran parte del norte de Europa y Asia estaba congelado y debió influir mucho este efecto en la temperatura atmosférica y en la temperatura oceánica. El océano fue quién debió transmitir estas condiciones de frío al hemisferio sur, donde también se dieron los fenómenos de glaciación de forma simultánea⁵.

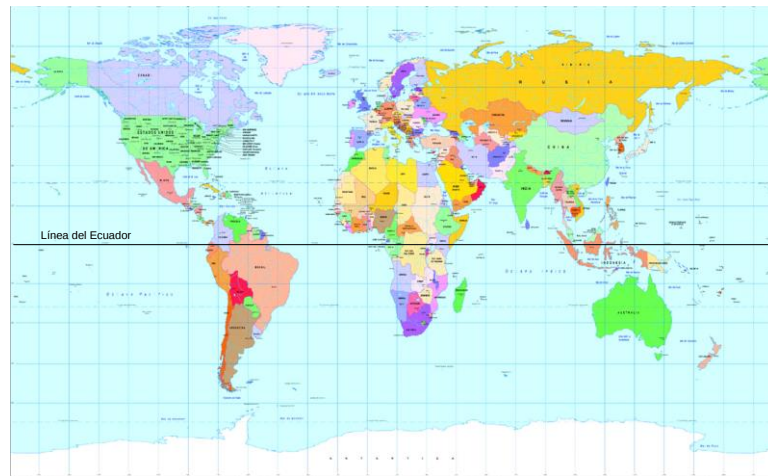


Figura 28: En un mapamundi se observa como la mayor parte de las tierras continentales se encuentran en el hemisferio norte (por encima del ecuador)

En el Anexo I explicamos en detalle cómo podemos calcular la energía que recibe **el hemisferio norte en verano** a lo largo de los últimos cientos de miles de años, lo cual nos permite obtener los ciclos de Milankovitch, lo cual nos ayudará a comprender cómo las variables astronómicas originaron las distintas glaciaciones e interglaciaciones que la Tierra ha experimentado en el último millón de años.

⁵ En cualquier caso, aún no está claro cómo es el mecanismo que provoca una transferencia tan eficaz entre los dos hemisferios como para provocar que los fenómenos de glaciación e interglaciación de ambos se den de forma sincronizada.

Como vimos, los tres factores que Milankovitch analizó como causa posible de las glaciaciones fueron: la precesión de los equinoccios, la inclinación del eje de la Tierra y la excentricidad de la órbita terrestre. La evolución en el tiempo de estas tres variables se conoce con exactitud, se conoce el pasado, el presente y el futuro porque cumplen precisas leyes físicas. De hecho la física astronómica es la ciencia que tradicionalmente ha cosechado más éxitos a la hora de contrastar con la experiencia sus teorías.

Las causas de evolución de estas variables son físicas y se deben a la interacción gravitatoria entre los planetas, la luna, la tierra y el sol.

El resultado de nuestros cálculos, que podéis ver en detalle en el documento Excel que se entrega con este curso, es este:

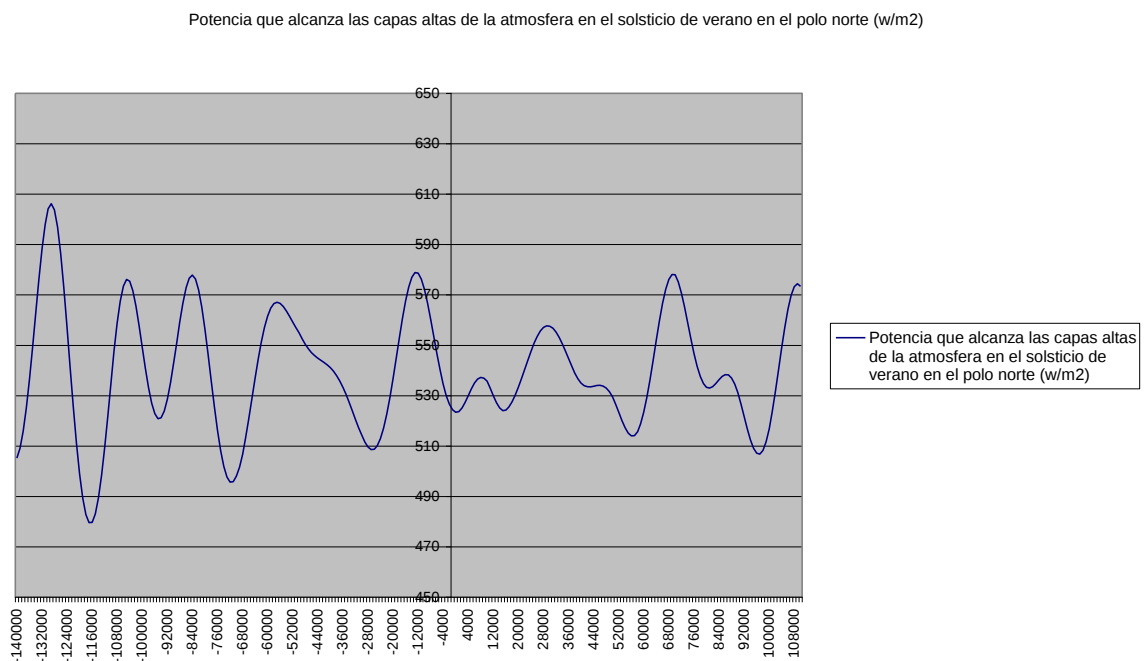


Figura 29

Este gráfico de la evolución de la potencia calorífica que alcanza las capas altas de la atmósfera en el solsticio de verano en el polo norte (w/m2) es la famosa gráfica que representa los ciclos de Milankovitch. Coloquemos ahora esta gráfica junto a la evolución de la temperatura global en la Tierra.

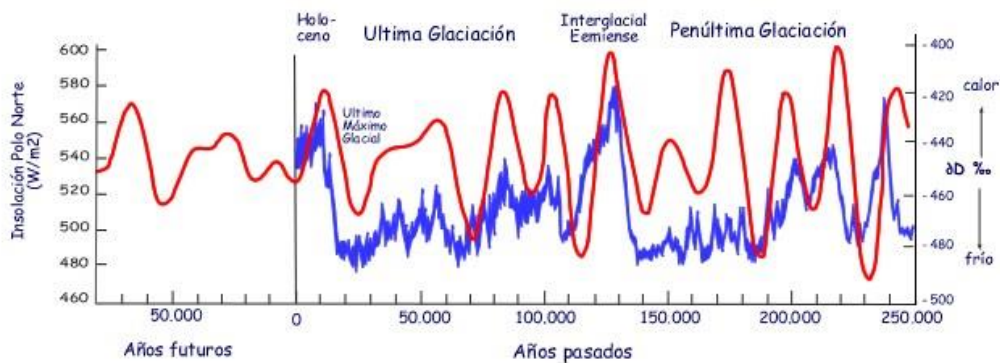


Figura 30: Correlación entre la insolación en el Polo Norte en el equinoccio de verano debida a los ciclos de Milankovitch y la evolución de la temperatura media global calculada a partir de la proporción de deuterio en los hielos de la Antártida. Fuente: Petit et al., 1999, *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, Nature*, 399, 429-436.

La correlación a lo largo de los últimos 150.000 años es asombrosa.

Tengo que reconocer que esta gráfica me maravilla. Hemos calculado, por un lado, la evolución de la temperatura global a partir de registros geológicos o por sondeos en los hielos perpetuos de la Antártida. Y por otro lado hemos calculado la variación en la energía calorífica que nos llega del Sol con métodos matemáticos y astronómicos, y la correlación entre ambas gráficas ¡es casi impecable!, al menos para los últimos 150.000 años. Como vemos, cuando la línea roja (potencia calorífica del sol en el verano del hemisferio norte) sube por encima de su valor medio, se observa siempre en el mismo momento una subida de la temperatura global de la Tierra evidenciada en el registro geológico.

Por tanto, parece que es muy plausible que sean las condiciones astronómicas las que determinan los cambios en la temperatura global de la Tierra, al menos cuando manejamos tiempos de miles o decenas de miles de años.

8.1 ¿Qué nos espera en el futuro considerando los ciclos de Milankovitch?

En la actualidad, según el gráfico, estamos justo en un mínimo de la energía recibida⁶. Sin embargo, recordemos que la Tierra tiene una inmensa inercia térmica. Las temperaturas van a descender en los próximos milenios, igual que descienden las temperaturas desde el 21 de Diciembre en adelante (a pesar de que aumenta la radiación solar desde esa fecha). Todo ello con el agravante de que hasta el año 20.000 la insolación estival en el hemisferio norte se va a mantener prácticamente tan baja como hasta ahora.

En la siguiente gráfica podemos ver la evolución climática que esperamos en los próximos años teniendo en cuenta los ciclos de Milankovitch:

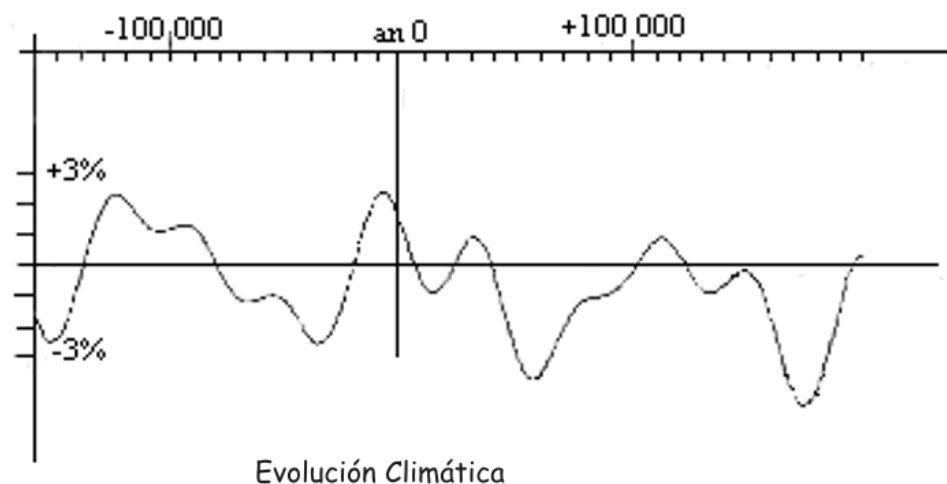


Figura 31: <http://www.astrosafor.net/Huygens/2003/41/Glaciaciones.htm>

Se prevé por tanto una glaciación que alcanzará su máximo en unos 17.000 años. Una glaciación mucho más severa nos alcanzará dentro de 55.000 años.

⁶ Me refiero, como siempre, a la energía recibida en el hemisferio Norte en el solsticio de verano.

8.2 Análisis de los cambios climáticos a largo plazo

Si analizamos la evolución de la temperatura global en el último millón de años y estudiamos su correlación con los factores climáticos de Milankovitch, veremos que es en realidad la excentricidad de la elipse la que marca la llegada de glaciaciones e interglaciaciones.

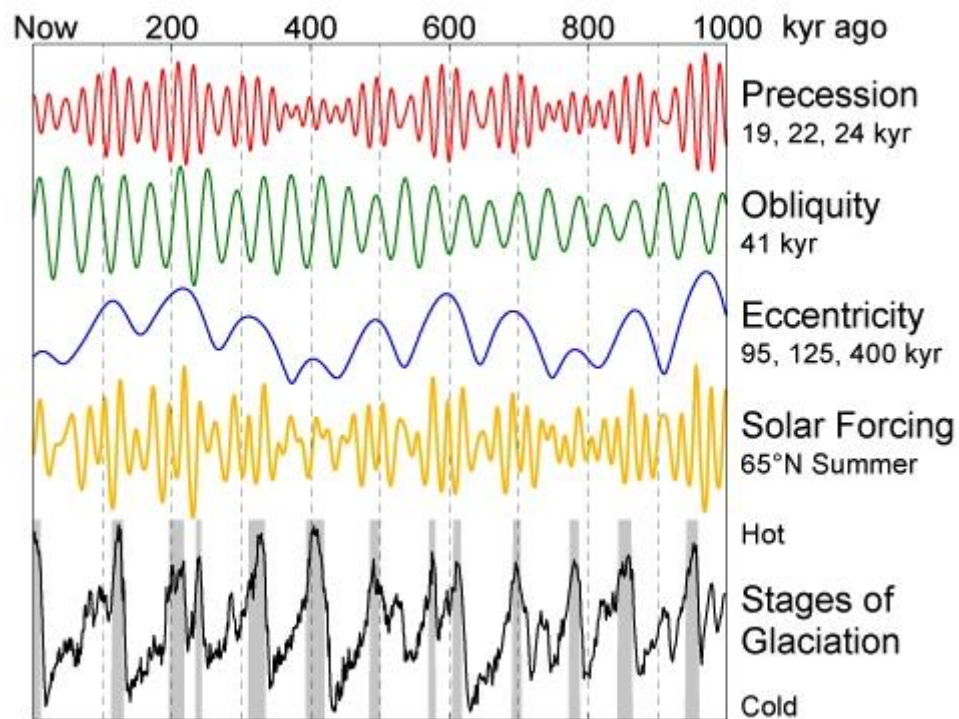


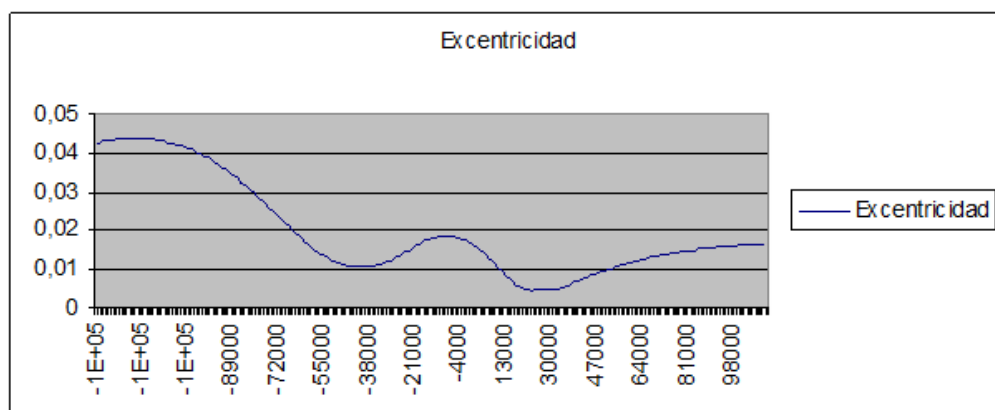
Figura 32: This image is an original work created for Global Warming Art. Permission is granted to copy, distribute and/or.

Observemos la gráfica anterior (stages of glaciation) teniendo en cuenta que el pasado está a la derecha y el presente a la izquierda. Vemos que el hielo tarda mucho en acumularse, y por tanto se enfría lentamente, pero tarda muy poco en derretirse cuando llegan veranos muy cálidos (se calienta muy rápidamente). La acumulación de hielo se debe a la no existencia de veranos excesivamente cálidos (excentricidades bajas), pero además, se debe en gran parte al efecto de retroalimentación que provoca el albedo, la tierra al estar cubierta de nieve refleja mucha más luz y se va enfriando progresivamente.

Sorprende la correlación casi exacta que se observa entre los ciclos de la excentricidad y los ciclos de glaciaciones e interglaciaciones. Cuando la órbita es muy elíptica (alta excentricidad) se producen en el hemisferio Norte veranos muy cálidos seguidos de una etapa de veranos muy fríos. Y cuando la excentricidad es pequeña los veranos son más moderados (ni muy cálidos ni muy fríos). La etapa larga (100,000 años) de veranos moderados (ni muy cálidos ni muy fríos) acumula nieve. La etapa larga (otros 100,000 años) de veranos muy cálidos o muy fríos no acumula nieve porque cuando llegan los veranos cálidos todo se funde. Es la existencia de veranos muy cálidos en el Hemisferio Norte la clave para que haya interglaciaciones. Cuando la órbita es muy circular (poca excentricidad) los veranos no son suficientemente calurosos para derretir la nieve.

Por esta razón vemos que los periodos de interglaciación se corresponden exactamente con momentos en que la excentricidad es máxima, y los periodos de glaciación con periodos en que la excentricidad es mínima.

Como dato curioso es interesante saber que hace solo 4,000 años tuvimos un máximo de excentricidad (por eso estamos en un periodo de interglaciación) y hace 40,000 años tuvimos un mínimo en la excentricidad que provocó la glaciación Wurm, provocando la extinción del Neandertal y casi la nuestra. Y dentro de 30,000 años tendremos un mínimo de excentricidad... Las consecuencias que una glaciación podría tener para la vida humana en la Tierra son mejor no pensarlas, desde los Pirineos hacia el Norte tendríamos acumulaciones de nieve de varios Km de altura por todo el continente europeo.



La teoría de los ciclos de Milankovitch prevé que el planeta se vaya enfriando progresivamente.