



ASTRONOMÍA PARA INGENIEROS

INQUIETOS

EL SOL Y 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. EL SOL.....	4
1.1 El extraordinario viaje del sol por la galaxia.....	5
1.2 Potencia calorífica del sol.....	8
2. LA TIERRA.....	10
2.1 La energía recibida del sol.....	10
2.2 La absorción y reflexión de los rayos solares por la atmósfera	16
2.3 La inercia térmica.	23
2.4 Cálculo de la temperatura real debido al efecto invernadero	24
2.5 Variaciones en el albedo terrestre. La importancia de las nubes	29
2.6 La atmósfera terrestre y el origen de la vida	37
2.7 Péndulo de Foucault. La demostración de que la Tierra gira alrededor del sol.....	58
2.8 El régimen general de los vientos en la tierra.....	60
2.9 Otros fenómenos astronómicos interesantes observables en la Tierra.....	71

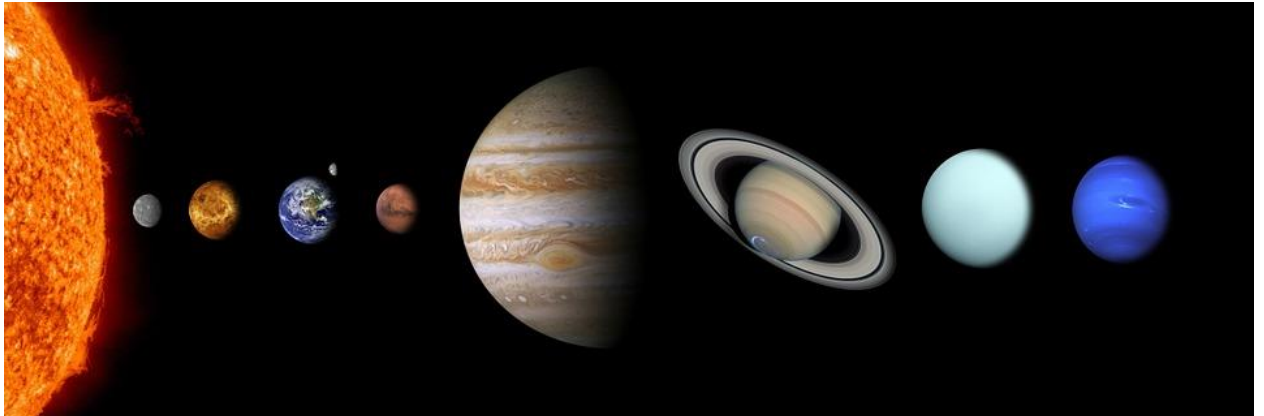


Figura 1

1. EL SOL

Ya conocemos algunas cosas del sol que hemos aprendido en el primer capítulo. Es un horno gigantesco que está quemando hidrógeno generando una ingente cantidad de energía. El resultado de este proceso es el Helio. Cuando se agote el Hidrógeno será el fin del sol.

Pero considerémoslo ahora desde el punto de vista de la Tierra. El sol es quien da la vida a todos los seres vivos del planeta. En realidad todo lo que se mueve en la Tierra se mueve por la energía del sol (los ríos, el viento, los seres vivos, la lluvia, las nubes, las olas, los coches, los aviones, incluso los coches eléctricos). La única excepción serían las mareas que se producen por el giro de la tierra y la atracción de la luna, y los terremotos y volcanes los cuáles tiene su causa en la energía térmica interna de la tierra.

En efecto, el agua se evapora por efecto del sol, se condensa, llueve y cae por el río. El viento se produce porque el sol calienta determinadas masas de aire que ascienden (por pesar menos) dejando hueco a masas de aire más frías que ocupan su lugar. Las plantas son las que hacen el milagro de transformar la energía solar en energía química (cadenas de carbono) por medio de la fotosíntesis. Los animales herbívoros se comen esas plantas (en la tierra y en el mar) y así obtienen toda su energía. Y también los animales carnívoros se comen a los animales herbívoros y así obtienen toda su energía.

Los coches y los aviones funcionan con fuentes de energía fósiles (gas y petróleo) que provienen de bosques y masas vegetales antiguos que acumulan energía solar fosilizada. La mayor parte de la energía eléctrica que conseguimos los seres humanos también proviene en última instancia del sol (solar, eólica, hidráulica, térmica, bioquímica, etc...) a excepción de la nuclear y la geotérmica (que son energías que provienen en realidad de la estrella anterior al sol que explotó dando origen al sistema solar).

1.1 El extraordinario viaje del sol por la galaxia

En este apartado vamos a tratar brevemente sobre el viaje que realiza el sol alrededor de la galaxia. Para ello debemos primero fijarnos en algunos detalles.

Llama mucho la atención ver que el punto en que la curva de la eclíptica corta al plano de la galaxia es justo el centro de la galaxia. ¿Qué puede querer decir esto?



Figura 2: Screenshot de la app “Star Walk” donde se puede apreciar muy bien como la intersección entre la eclíptica y el plano de la vía láctea coincide justo con el centro de la galaxia.

La razón es, hasta cierto punto lógica, y a la vez sorprendente. El sol viaja a velocidades absolutamente increíbles alrededor de la galaxia Vía Láctea, y en su camino, como no puede ser de otra manera, arrastra a sus planetas como si fueran guardaespaldas. El plano en el que giran los planetas es el plano de la eclíptica, y este plano es perpendicular al desplazamiento que va realizando el sol en su viaje.

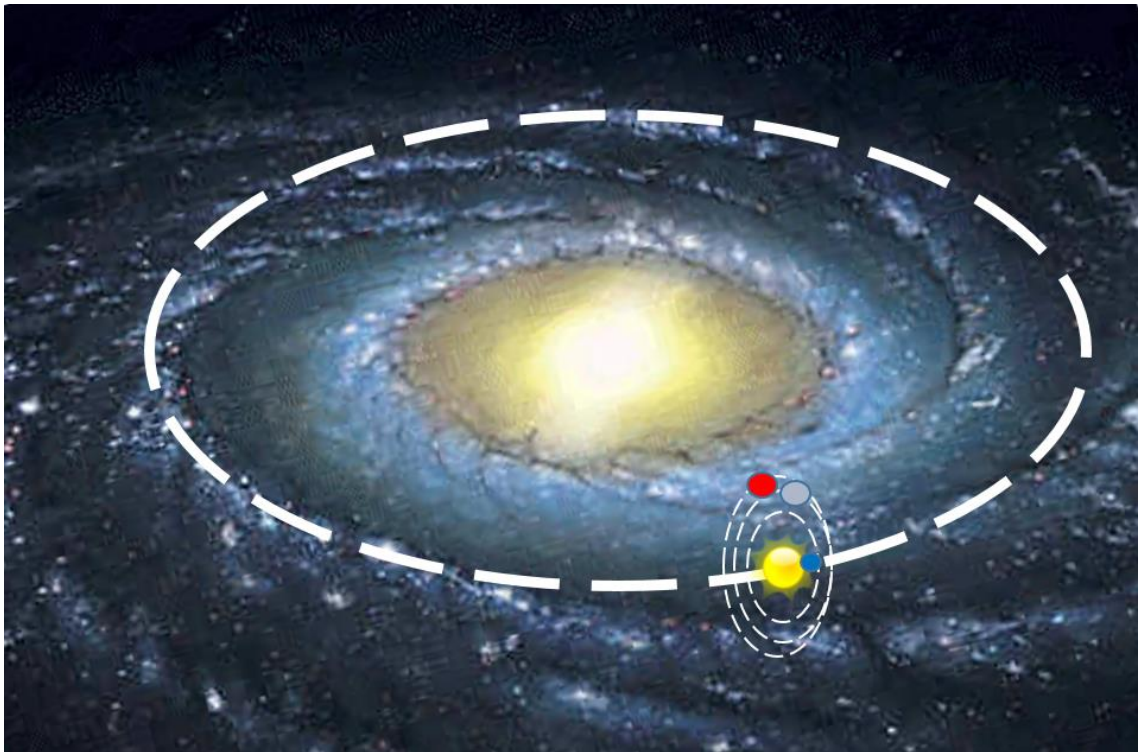


Figura 3: El sol viaja a grandes velocidades alrededor de la galaxia arrastrando a los planetas, que giran alrededor de él en un plano perpendicular a su viaje

Es por este motivo que al mirar al cielo los planetas, e incluso el propio sol, parece desplazarse día a día en dirección perpendicular al plano de la galaxia.

En el dibujo podemos ver como la línea de intersección entre el plano de los planetas y el plano de la galaxia pasa por el centro de la galaxia. Por eso desde la tierra, cuando miramos a dicha intersección vemos el centro de la galaxia.

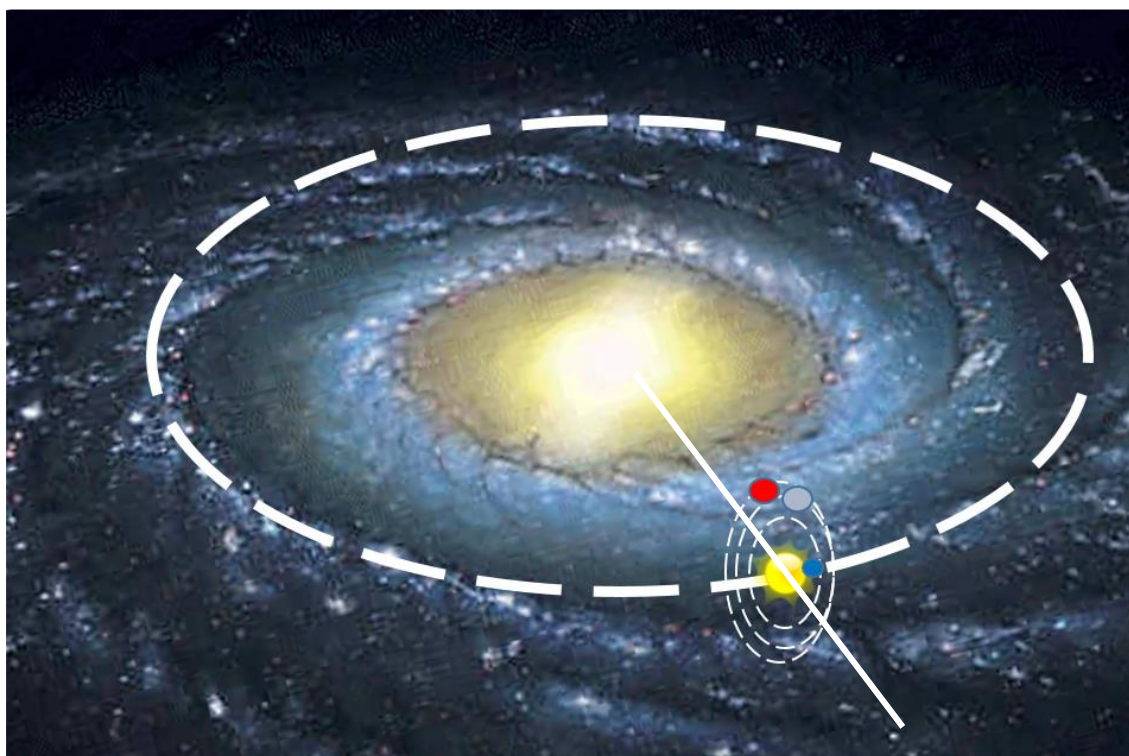


Figura 4

El movimiento de los planetas por la eclíptica lo explicaremos en otro curso.

¿Cuánto tarda el sol en completar su viaje alrededor de la galaxia?

Como vimos, la galaxia tiene un diámetro de 100,000 años luz. Se ha calculado que el sol está a una distancia de 25,000 años luz del centro de la galaxia, es decir, está más o menos en el centro de su radio. En realidad está a medio camino de uno de sus brazos de espiral, el brazo de Orión.

El sol tarda 250 Millones de años en girar alrededor de la galaxia, y por tanto, haciendo sencillos cálculos, el sol viaja a la asombrosa velocidad de 200 Km/segundo.

Con estos cálculos hemos conseguido saber cuánto dura un año galáctico (el tiempo que tarda el sol en dar la vuelta a la galaxia).

¿Cuántas vueltas ha dado el sol alrededor de la galaxia?

Dado que tiene 4.600 Millones de años aproximadamente, está dando su vuelta número 20.

El sol está dando su vuelta número 20

Hemos dado menos de 1/3 de vuelta desde la extinción de los dinosaurios. Vistas así las cosas, los dinosaurios y los seres humanos somos casi contemporáneos...

Nacimiento del Sol

4ª vuelta: Los océanos aparecen en la Tierra

5ª vuelta: Comienza la vida

7ª vuelta: Aparecen las bacterias

16ª vuelta: Aparecen los organismos pluricelulares

19.7ª vuelta: Extinción de los dinosaurios

19.999 vuelta: Aparecen los seres humanos

20ª vuelta: Presente



Figura 5

1.2 Potencia calorífica del sol

A continuación realizaremos unos sencillos cálculos que son necesarios para muchos análisis que haremos posteriormente, que serán de gran importancia.

La superficie del sol, debido a las reacciones nucleares que tienen lugar en su interior, se encuentra a una temperatura de $5.778 \text{ K} = 5.505 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Por tanto, según la conocida Ley de Stefan-Boltzmann, la energía que emite el Sol como cuerpo caliente es:

$$E = \sigma \cdot T_e^4$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T está expresado en grados kelvin

$$\sigma \approx 5.670373(21) \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

Según estos cálculos, la potencia del sol es

$$E = 5,6 \times 10^{-8} \times 5778^4 = 63.200.000 \text{ W/m}^2$$

¡63,2 millones de watos por cada m2 de su superficie! Si tenemos en cuenta que el radio del sol es de 695 millones de metros y que la superficie de la esfera del sol es $S = 4\pi r^2$, podemos calcular la potencia que emite el sol en su conjunto. El resultado es este:

$$P = 3,8079 \times 10^{26} \text{ W}$$

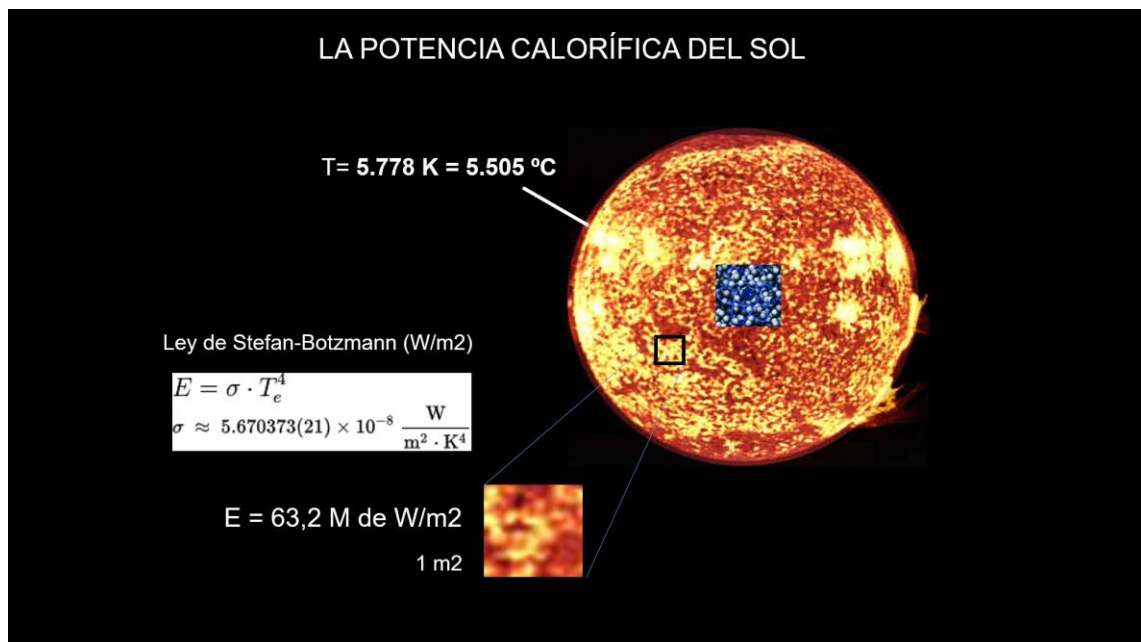


Figura 6: Potencia calorífica del Sol

2. LA TIERRA

2.1 La energía recibida del sol

La tierra es el planeta azul, así se le conoce sin duda desde quien quiera que pueda habitar el espacio, y desde luego ver la Tierra desde la Luna debe ser un auténtico espectáculo, puesto que se vería mucho más brillante y cuatro veces más grande de lo que nosotros vemos la luna desde aquí.

No es objeto de este curso analizar las condiciones de vida que se dan en la Tierra, sino intentar explicar por qué podemos llegar a disfrutar de dichas condiciones.

La Tierra, como hemos visto, se encuentra a una distancia media de 149 M de km. Pero sabemos que esta distancia no es constante porque la Tierra gira en una órbita elíptica alrededor del sol. De hecho sabemos que se encuentra en su punto más cercano el 4 de Enero a 146,7 M de km (perihelio). Mientras que el 4 de Julio se encuentra en su punto más lejano (afelio), a 151,7 M de km.

Para entender por qué disfrutamos de temperaturas habitables en la Tierra nos interesa ahora conocer cuánta es la energía solar que llega a la Tierra. Primero calculemos qué energía llega a las capas externas de la atmósfera. Esta energía que recibimos en la Tierra es conocida como la constante solar. La energía que llega del sol es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (cuanto más lejos estamos del sol disminuye muchísimo la energía que nos llega por metro cuadrado). Esto es así porque toda la energía se va repartiendo en una onda esférica gigantesca que se va expandiendo, y la superficie de esa esfera aumenta con el radio al cuadrado. Para calcularlo basta dividir la potencia solar entre la superficie de una esfera que tenga como radio la distancia entre la superficie del sol y la de la Tierra.

El resultado de la constante solar según estos cálculos sería 1.378 w/m2, como vemos a continuación:

Temperatura del sol (°K)	5.778
Constante Stephan Boltzmann	5,6704E-08
Potencia de cada m2 de la superficie solar (w/m2)	63.200.985
Radio del sol l(m)	695.000.000
Potencia del sol (w)	3,83611E+26
Distancia media del sol a la tierra (km)	149.597.871
Radio de la tierra	6.371
Distancia de la superficie del sol a la superficie de la tierra (km)	148.896.571
Potencia solar fuera de la atmósfera terrestre (según cálculos) (w/m2)	1.378
Potencia solar fuera de la atmósfera terrestre (medido con satélite) (w/m2)	1.366

Tabla 1

Los resultados de las mediciones reales para la constante solar indican un valor promedio de 1366 W/m².

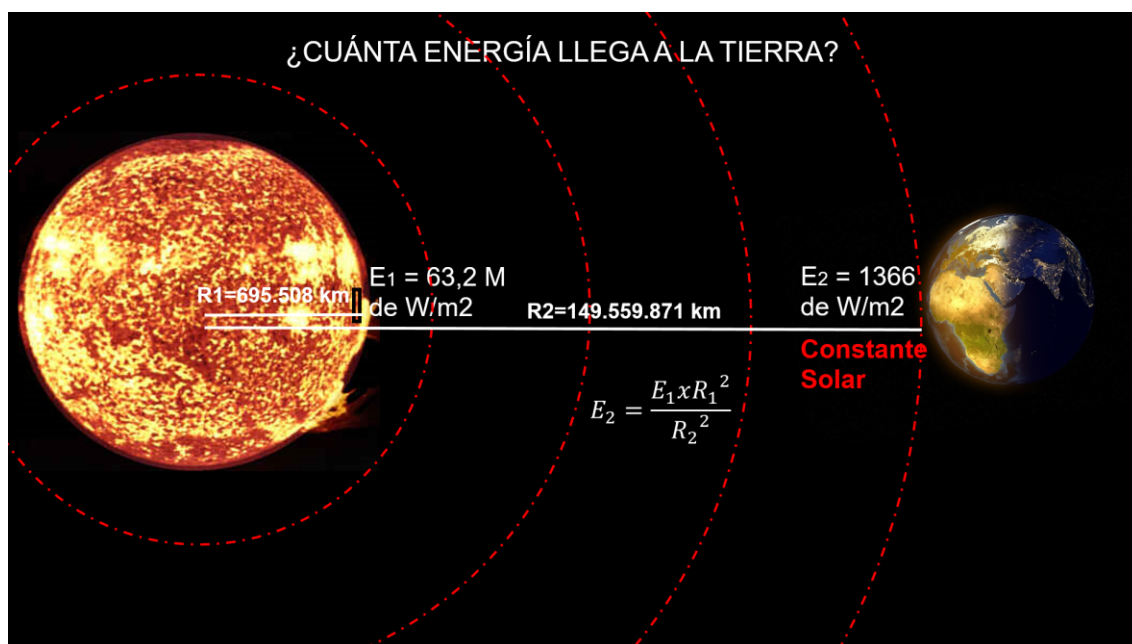


Figura 7: Energía que llega a la Tierra

Pero este valor en realidad no es tan “constante”: Al analizar este valor para los días de afelio y perihelio el resultado es este:

	Distancia Media	Dist. Mínima (4 Enero)	Dist. Máx. (4 de Jul)
Distancia de la superficie del sol a la superficie de la tierra (km)	148.896.571	146.753.000	151.747.000
Potencia solar fuera de la atmósfera terrestre (según cálculos) (w/m2)	1.378	1.418	1.326

Tabla 2

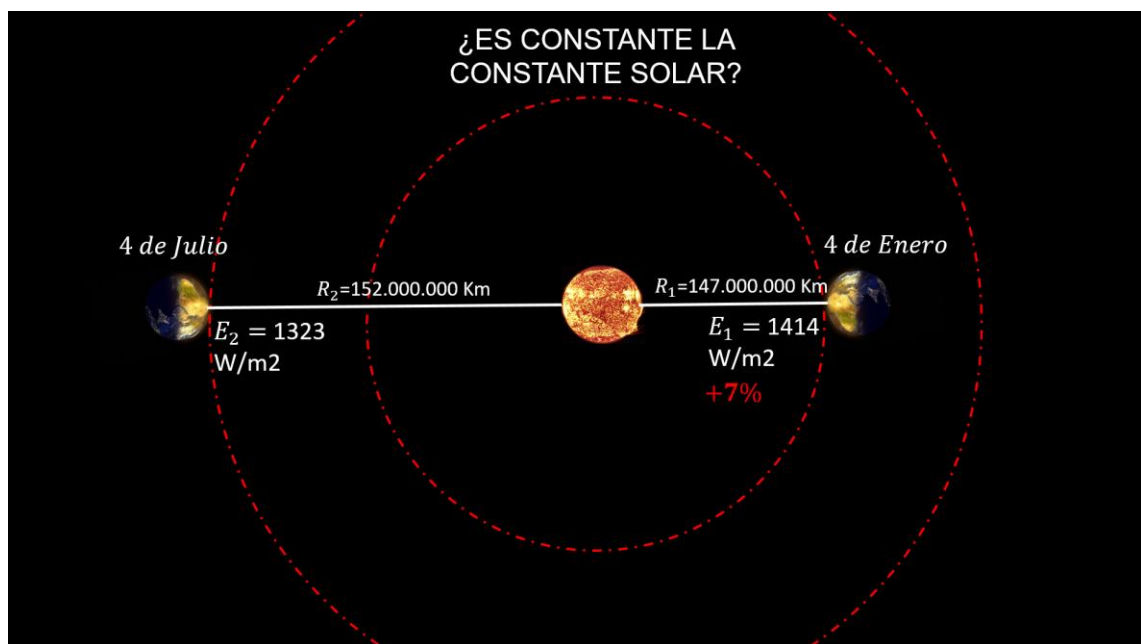


Figura 8: Constante solar

Por tanto hay una diferencia considerable en la energía que nos llega del sol en función de si estamos en Enero (1.418 w/m2) o en Julio (1.326 w/m2)

¡Recibimos entonces menos energía calorífica en Julio que en Enero! Esto a estas alturas no debe confundirnos ya que sabemos que el verano o el invierno dependen de si el eje inclinado de la tierra mira hacia el sol o no (en Diciembre mira el eje Sur hacia el sol y en Junio mira el eje Norte hacia el sol). Por tanto, en principio, los veranos del hemisferio Sur reciben más calor que en el Norte, y los inviernos en el hemisferio Sur reciben menos calor que en el Norte. ¿Es por tanto el hemisferio Sur más extremo en sus temperaturas invernales y veraniegas? En realidad no es así porque en el Sur hay mucho más océano que en el Norte y este hecho atempera muchísimo tanto el verano como el invierno.

Pero ¡ajo! Hemos calculado la energía que nos llega. Pero, sin embargo, la energía que recibimos no es esa. Porque hay que tener en cuenta que solo la parte de la Tierra que mira hacia el sol recibe sus benéficos rayos, y solo durante el día. Durante la noche no recibe nada.

Teniendo en cuenta toda su superficie ¿Cuál es el valor medio de energía que recibe el planeta?

Hemos visto que la Tierra recibe 1.366 w/m^2 de media. Pero claro, esta energía es la que recibiría un disco que es perpendicular a la tierra, como en el dibujo.

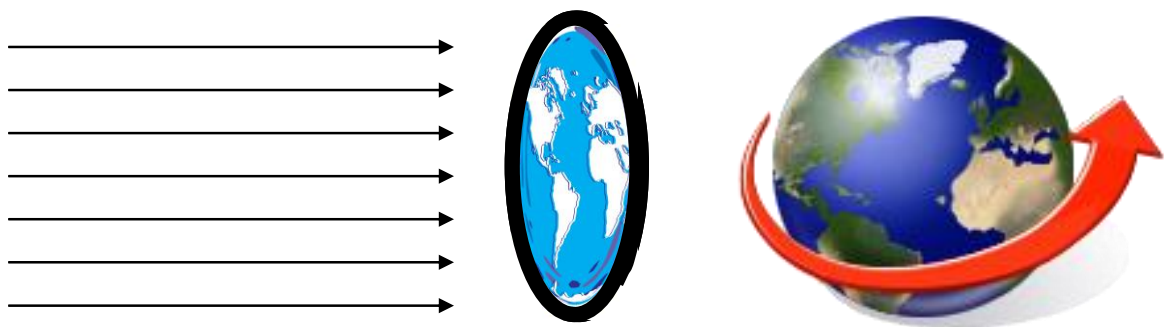


Figura 9

La superficie de un disco es $A = \pi r^2$. Y la superficie de una esfera: $A = 4\pi r^2$

Según las fórmulas anteriores la superficie de la esfera es cuatro veces la superficie del disco. Por tanto, debemos dividir por cuatro la constante solar para obtener la potencia calorífica que recibe la Tierra en lo alto de la atmósfera por metro cuadrado. El resultado es:

4 de Enero: $1418/4 = 354 \text{ w/m}^2$

4 de Julio: $1326/4 = 331 \text{ w/m}^2$

Media $1368 / 4 = 342 \text{ w/m}^2$.

Debemos tener en cuenta que este valor es sólo una media. Por supuesto los polos reciben mucho menos que el ecuador, porque en el ecuador la superficie del suelo es perpendicular a los rayos solares y en los polos es oblicua o incluso paralela. Además toda la energía se recibe durante el día (684 w/m^2) y nada durante la noche (0 w/m^2).

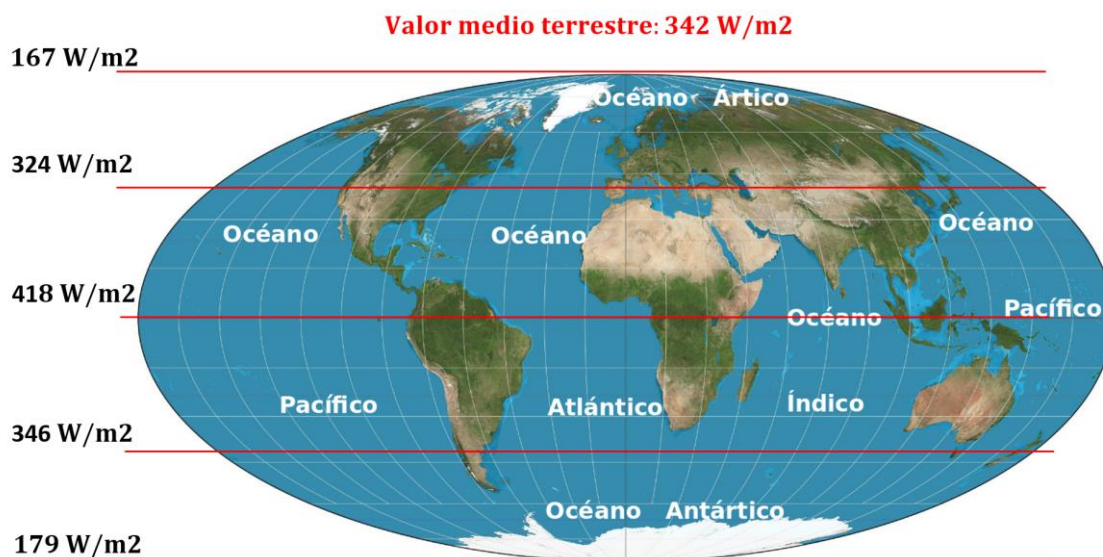


Figura 10

PENSAR:

¿Por qué hace más frío en los polos que en el ecuador?

Mucha gente culta y bien formada no sabe responder con exactitud a la pregunta de por qué hace más frío en los polos que en el ecuador.

La clave está, como hemos visto, en la inclinación de la superficie de cada parte del globo respecto a la dirección de los rayos del Sol.

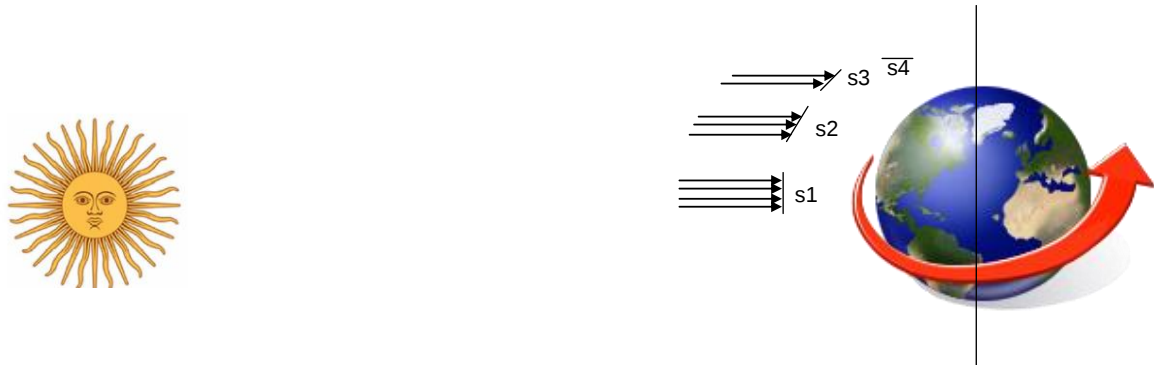


Figura 11: Explicación gráfica de la disminución en la radiación recibida por unidad de superficie al aumentar la latitud.

En el gráfico, se explica por qué en el ecuador (S1) se reciben más rayos de sol por metro cuadrado que en Norteamérica (S2) y mucho más que en Terranova (S3). El Polo Norte (S4) apenas recibe rayos solares.

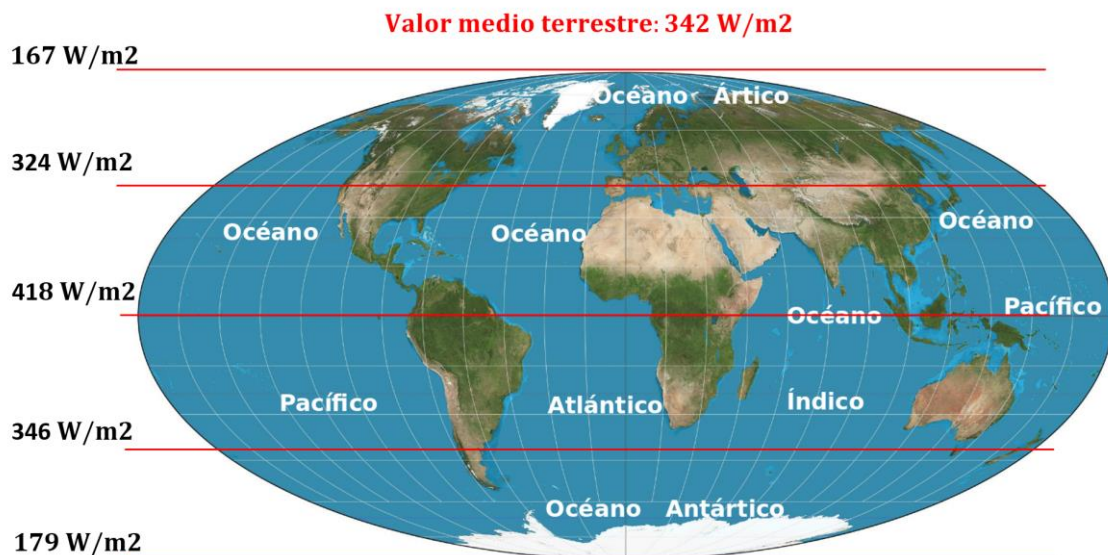


Figura 12

Pero después de la explicación anterior, enseguida surge la siguiente duda: si pongo una placa de metal (o mi mismo cuerpo) en perpendicular a los rayos del Sol en Irlanda por ejemplo, debería calentarse igual que si lo pongo en el ecuador perpendicular a los rayos del Sol. ¿Por qué no es así?

2.2 La absorción y reflexión de los rayos solares por la atmósfera

En el ecuador los rayos del Sol deben atravesar menos cantidad de atmósfera que en las latitudes altas. En la gráfica, la profundidad de atmósfera que tiene que atravesar el rayo a la altura del ecuador es menor que en latitudes más altas (línea roja).

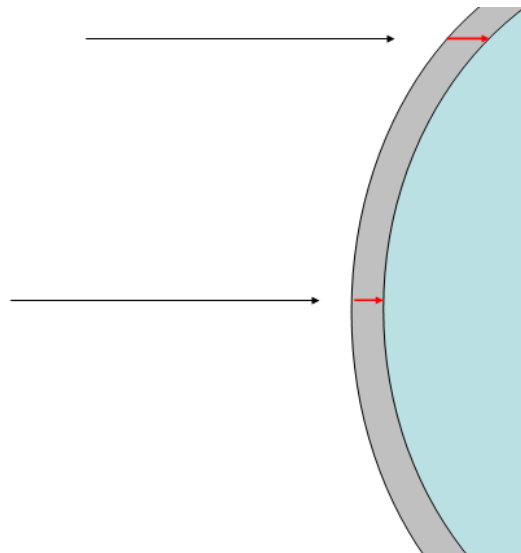


Figura 13: Explicación gráfica del aumento en la profundidad de atmósfera que es necesario atravesar según aumenta la latitud

Y además al incidir más oblicuamente el porcentaje de energía reflejada es mayor, y menor la que penetra hasta la tierra.

En efecto, parte de la energía que recibe la atmósfera procedente del Sol es devuelta de nuevo al espacio, en parte porque refleja los rayos solares¹, y en parte porque la atmósfera se calienta y se convierte en un cuerpo que emite energía hacia el espacio.

Fuera de la atmósfera, la cantidad de energía que recibimos del Sol es, como hemos visto, de 1366 w/m². Pero en la superficie terrestre esta energía se ve enormemente disminuida, porque la mitad del día no recibe energía y porque la tierra es una esfera y no un disco. Ya vimos que la media teórica recibida en la superficie de la Tierra es 342 w/m². Pero este valor debe ser también reducido porque una buena parte es reflejada por las nubes y otros fenómenos atmosféricos.² Finalmente la media real recibida en superficie (descontando los 30w/m² que la propia superficie refleja) es de tan solo 168 w/m² aproximadamente.

Y además esos 168 w/m² están mal repartidos; en el ecuador la energía media recibida es de 250 w/m² y en Europa es una media de 150 w/m² debido a los dos factores que acabamos de explicar:

La superficie de la Tierra a la latitud de Europa no es perpendicular a los rayos del Sol

Los rayos del Sol tienen que atravesar más atmósfera

Un tercer factor que influye, obviamente, es la nubosidad media en cada lugar de la Tierra.

¹ La proporción de rayos reflejados es también mayor en latitudes altas que en el ecuador, porque los rayos chocan contra la atmósfera de forma más oblicua y rebotan como una piedra en un estanque

² La energía que recibimos en superficie es muy inferior debido a que debe repartirse entre la superficie de toda la esfera (la Tierra no es un disco plano). Además una buena parte de la energía es reflejada por las nubes. Ver Apéndice II

Pero no todo llega a nosotros. Porque están las nubes y la atmósfera

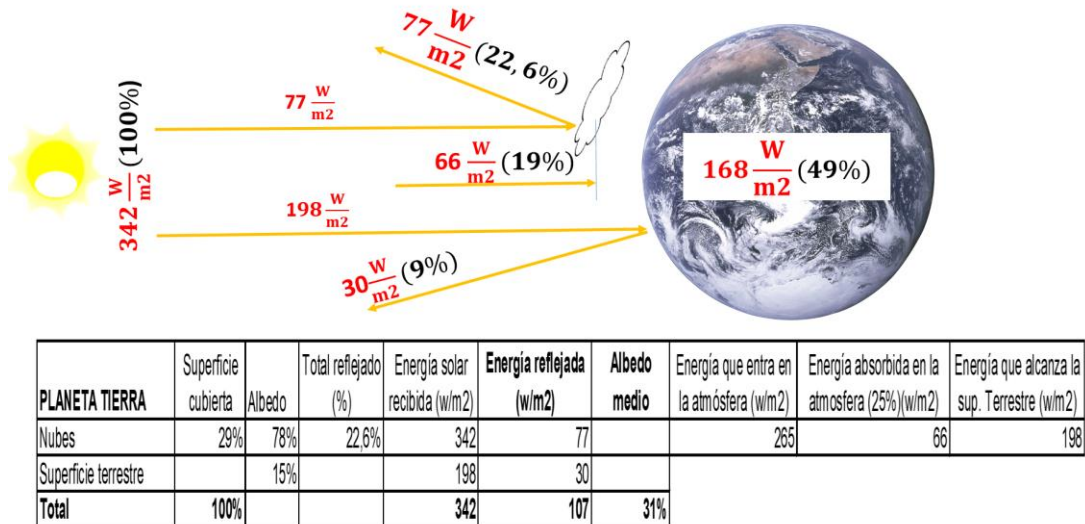


Figura 14

Como vemos en el gráfico, recibimos del espacio 342 W/m^2 de media. Sin embargo una buena parte la reflejan las nubes al espacio (77 W/m^2), otra parte la refleja la superficie terrestre (30 W/m^2), 66 W/m^2 los absorbe la atmósfera. Y solo 168 W/m^2 sirven para calentar la tierra. Esto es una media. En el Norte recibe 75 W/m^2 y en el Sahara se llegan a recibir 275 W/m^2 de media.

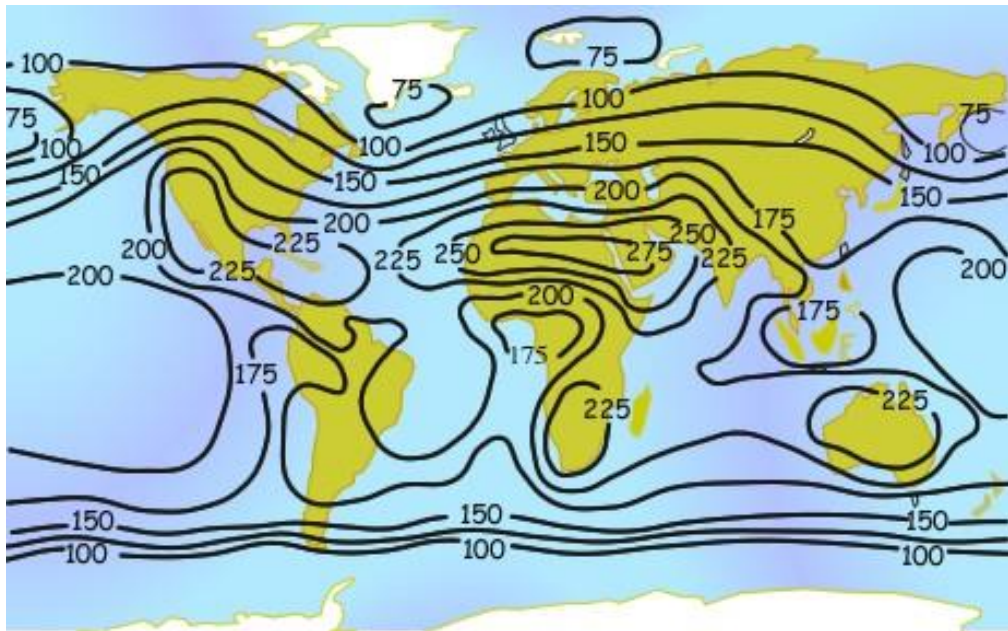


Figura 15: Radiación solar media recibida en superficie, expresada en W/m²

<http://homepage.mac.com/uriarte/maprad.html>

Los valores indicados en este último mapa son los que realmente podemos aprovechar si ponemos un panel solar. Obviamente habrá que restarle las ineficiencias de la instalación.

Estos fenómenos que hemos comentado explican también por qué a las 12:00 de la mañana (hora solar) la energía del Sol nos llega más potente que a las 19:00 h, ya que a esta última hora de la tarde los rayos del Sol entran más oblicuos y por este motivo deben atravesar más atmósfera y además rebotan hacia el espacio al entrar en contacto con la atmósfera (como una piedra en un estanque).

EJERCICIO:

¿Cuánta es la máxima energía solar que podemos obtener con un panel solar de 1 m² en Madrid el 21 de Junio a las 12:00 (hora solar) en lo alto de la atmósfera?

Para hallar esto, debemos tener en cuenta que los rayos de sol no llegan perpendiculares en Madrid. ¿Con qué ángulo llega ese día a esa hora?

Altura del sol a medio día = $90^\circ - \text{Latitud} + \text{Declinación} = 90^\circ - 40,5^\circ + 23,4^\circ = 72,9^\circ$

Calculemos la energía solar que recibimos en Madrid:

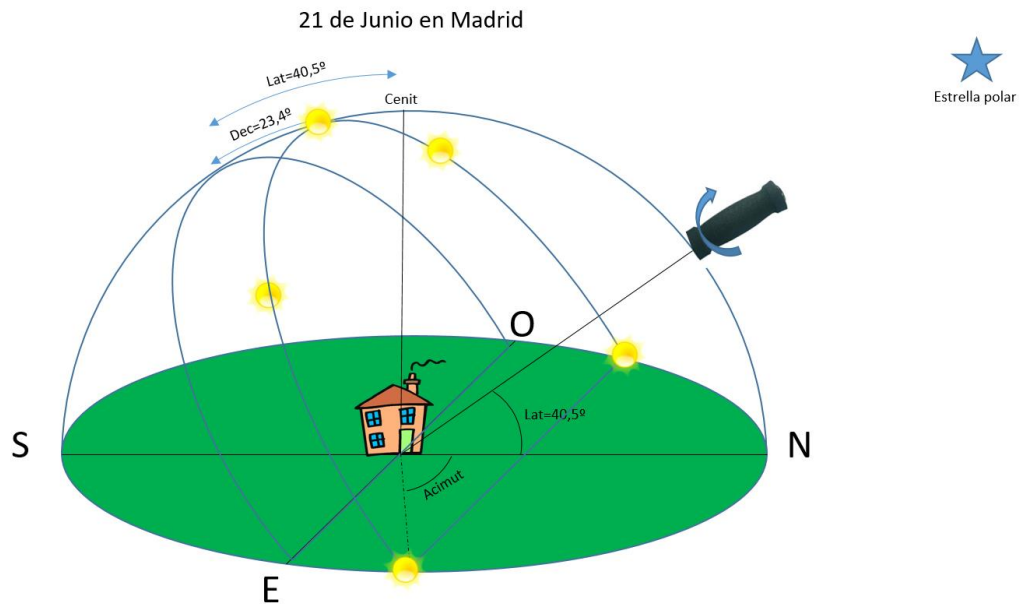


Figura 16

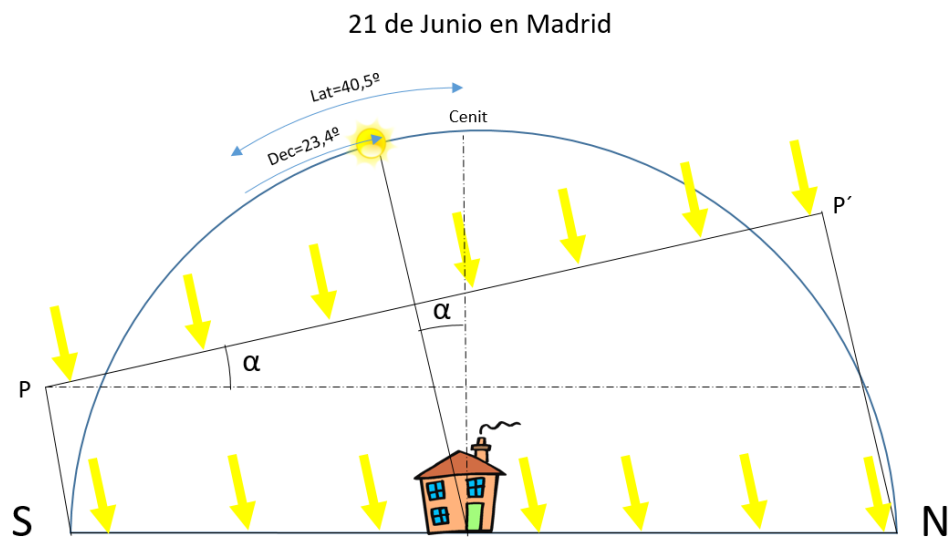


Figura 17

Si colocamos la placa solar en sentido perpendicular a los rayos de sol en lo alto de la atmósfera obviamente recibiremos siempre esos 1326 w/m2. Si lo ponemos en lo alto de la atmósfera pero paralelo al suelo de Madrid recibiríamos $1326 \text{ w/m}^2 \times \cos(\alpha)$. Se ve en el dibujo que recibimos los mismos rayos de sol pero en más superficie (por tanto menos w/m2).

El ángulo α es, como hemos visto en el dibujo, $90^\circ - 72,9^\circ = 17,1^\circ$

$\cos(17,1^\circ) = 0,956$. Luego la energía que recibe lo alto del cielo de Madrid ese día a esa hora es:

$$0,956 \times 1326 = 1.267,6 \text{ w/m}^2$$

EJERCICIO 1: ¿Cuánta es la máxima energía solar que podemos obtener con un panel solar de **1 m2** en lo alto del cielo de Madrid el **21 de Junio**, a medio día, si lo colocamos horizontal?

$$\alpha = 40,5 - 23,4 = 19,1^\circ$$

Energía en lo alto: 1323 W/m2

Energía en lo alto, en un panel horizontal: $1323 \text{ W/m}^2 \times \cos \alpha$

Energía en lo alto, en un panel horizontal: **1264 W/m2**

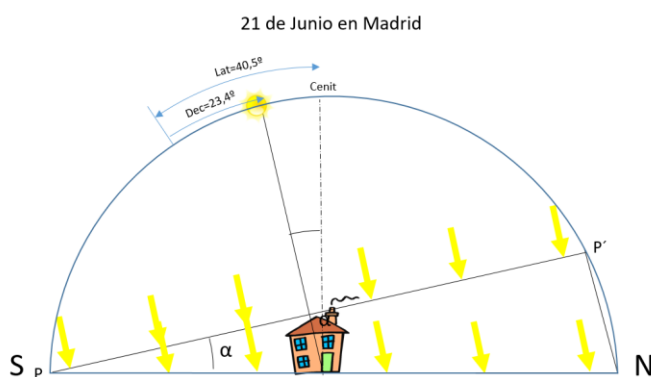


Figura 18

¿Y el 21 de Diciembre a esa misma hora?

En ese caso $\alpha = 40,5^\circ + 23,4^\circ = 63,9^\circ$

$$\cos 63,9^\circ = 0,44$$

La energía que recibe lo alto del cielo de Madrid el 21 de Diciembre a medio día es $1.418 \times 0,44 = 624 \text{ w/m}^2$, es decir la mitad, a pesar de que en ese momento se encuentra la tierra más cerca del sol y recibe más energía.

EJERCICIO 2: ¿Cuánta es la máxima energía solar que podemos obtener con un panel solar de **1 m²** en lo alto del cielo de Madrid el **21 de Diciembre**, a medio día, si lo colocamos horizontal?

$$\alpha = 40,5 + 23,4 = 63,9^\circ$$

Energía en lo alto: 1414 W/m²

Energía en lo alto, en un panel horizontal: $1414 \text{ W/m}^2 \times \cos \alpha$

Energía en lo alto, en un panel horizontal: **623 W/m²**

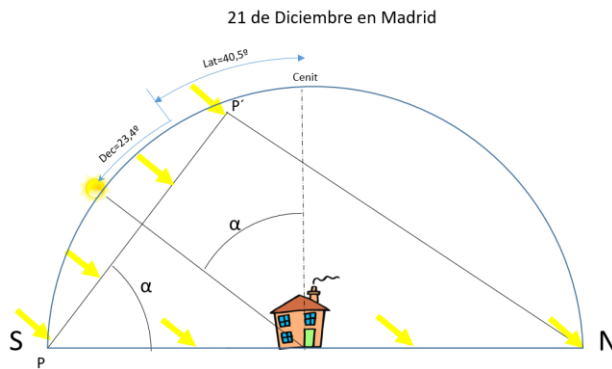


Figura 19

¿Y cuánta energía reciben a lo largo del día en ambos casos?

Ya vimos que la noche en Madrid el día 21 de Junio dura 9,18 horas y el día 14,82 horas. Calculamos el valor medio de la energía que recibimos durante las horas de sol:

$$\text{Valor medio en una curva cosenoidal} = 1264 \times \frac{2}{\pi} = 805$$

Y el valor medio durante las 24 h del día sería por tanto

$$\text{Valor medio diario} = 805 \times 14,82h / 24h = 497 \text{ W/m}^2$$

De la misma manera podríamos calcularlo para el día 21 de Diciembre donde ocurre justo lo contrario, el día dura 9,18 y la noche dura 14,82 horas.

EJERCICIO 3: ¿Cuánta energía recibe un m² horizontal en el cielo de Madrid a lo largo de todo el día, el **21 de Junio**? ¿y el 21 de Diciembre?

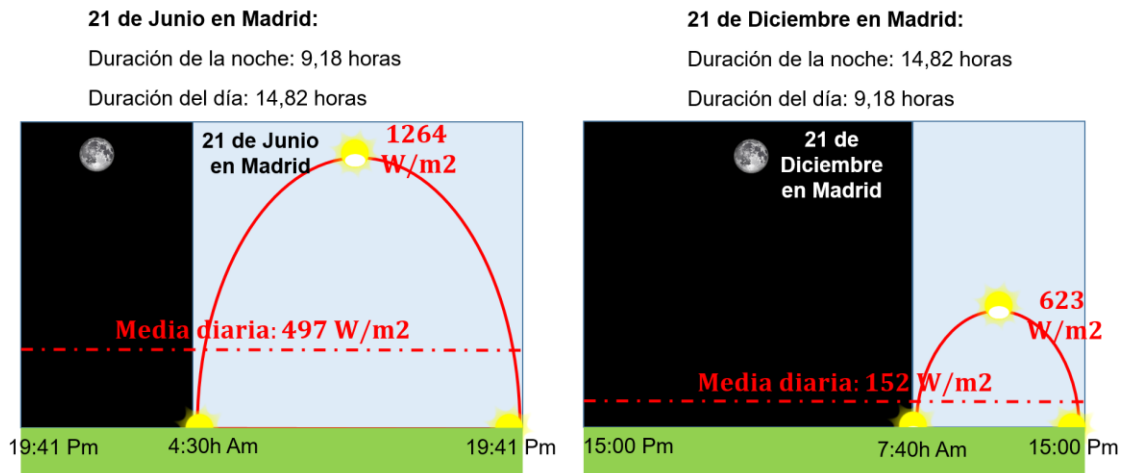


Figura 20

La media anual en Madrid será de 324 W/m². Pero ¡recuerda!, esta es solo la energía teórica. Debemos reducirla mucho teniendo en cuenta los siguientes factores:

- La cantidad de energía que es reflejada por las nubes.
- La cantidad de energía que es absorbida por la atmósfera.

Y si queremos calcular la energía que podremos captar con una instalación de energía solar, tendremos además que tener en cuenta el rendimiento de nuestra instalación.

2.3 La inercia térmica.

PENSAR:

¿Por qué en un sitio determinado hace más frío a las 8:00 h que a las 16:00 h (horas solares) si los rayos entran con la misma oblicuidad y recorren la misma cantidad de atmósfera? Y ¿por qué el verano empieza cuando los rayos están más perpendiculares y el día es más largo (solsticio de verano)? ¿No debería quedar ese día en el centro del verano?

Como vemos, los efectos razonados en los apartados anteriores no explican aún todo el fenómeno. Hay que tener en cuenta también la inercia térmica. Si la superficie del planeta se calienta, tardará en enfriarse. Y si se enfría, tardará en calentarse. Y la hora de más calor del día no coincide con la hora de radiación solar más potente (las 12:00 hora solar) sino un poco más tarde, cuando el planeta lleva ya más horas calentándose. Y la hora del día que más frío hace es justo al amanecer, porque durante toda la noche esa porción del globo ha estado enfriándose cada vez más.

Lo mismo ocurre con el verano y el invierno. Solo es verano cuando el sol ya lleva un tiempo calentando a lo largo de los meses de Mayo y Junio. Y cuando la Tierra está ya más caliente es cuando empieza el verano, a pesar de que justo a partir de ese día el sol nos va a llegar cada vez menos potente y menos tiempo al día.

2.4 Cálculo de la temperatura real debido al efecto invernadero

Recordemos la radiación media anual que recibe la superficie de la Tierra en cada lugar del globo:

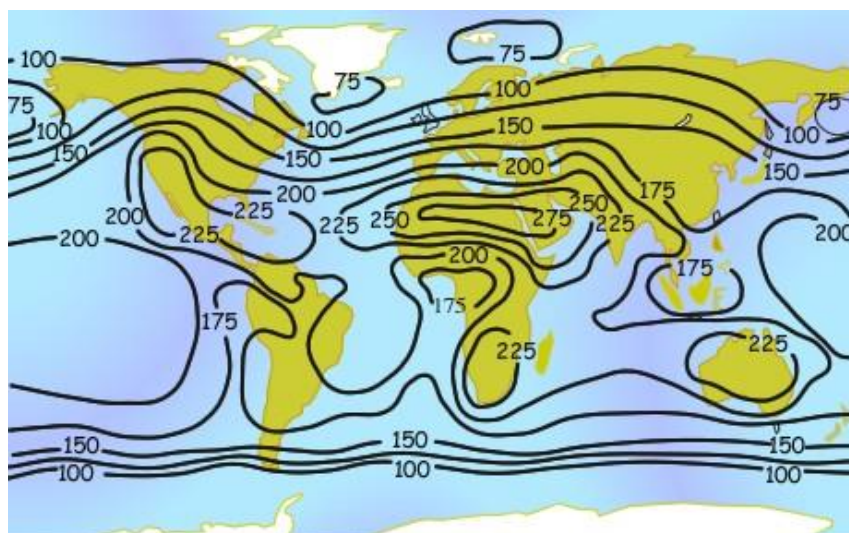


Figura 21: Radiación solar media recibida en superficie, expresada en W/m^2

<http://homepage.mac.com/uriarte/maprad.html>

Por tanto, hemos visto que la superficie del planeta está caliente gracias a los 168 w/m² que recibe de media anualmente. Pero al ser un cuerpo caliente, también emite energía.

De acuerdo con la Ley de Stefan-Boltzmann, la energía que emite un cuerpo³ es la siguiente:

$$E = \sigma \cdot T_e^4.$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

Es decir, cuanto más temperatura tenga un cuerpo, más energía emite. La temperatura media de la superficie terrestre es de 15° C. De acuerdo con la ley anterior la cantidad de energía emitida por la superficie terrestre es de 390 w/m², es decir, mucho más que los 168 w/m² que recibe útiles del Sol. Aclaremos que los 168 w/m² los recibe en forma de luz y los 390 w/m² que emite son en forma de rayos infrarrojos invisibles (calor).

Si no fuera por el efecto invernadero, que explicamos a continuación, la superficie terrestre se iría enfriando paulatinamente, porque emitiría mucho más energía de la que recibe, hasta alcanzar el equilibrio en una temperatura media de -39 °C. A esta temperatura la Tierra emite, según la Ley de Stefan-Boltzmann, también 168 w/m² por lo que estaría en equilibrio (recibe 168 w/m² del sol y emitiría 168 w/m² por ser un cuerpo a una temperatura media de -39°C)⁴.

Por tanto es gracias al efecto invernadero que no estemos congelados.

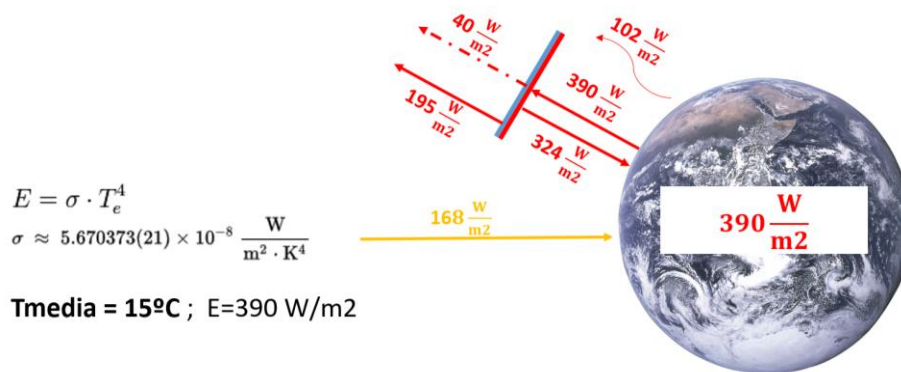
Por suerte, de los 390 w/m² que emite la superficie terrestre en forma de rayos infrarrojos, sólo 40 w/m² escapan al espacio (ventana atmosférica). El resto se emplean en calentar las nubes y los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera.

La atmósfera se calienta tanto en las capas altas como en las bajas. En las capas altas la atmósfera alcanza menos temperatura y emite hacia el espacio 195 w/m² de rayos infrarrojos. En las capas bajas la atmósfera emite hacia la superficie terrestre 324 w/m². De estos últimos, 30 w/m² son emitidos por el CO₂ atmosférico y el resto (294 w/m²) son emitidos casi en su totalidad por las nubes y el vapor de agua.

³ En realidad la ley se refiere a las emisiones de cuerpos negros, pero es muy válido como aproximación al problema

⁴ Veremos más adelante que, en realidad, si no hubiera atmósfera que absorbiera los rayos solares, la energía que recibiría su superficie sería de 224 w/m², y con un albedo del 31% su temperatura teórica sería de -20°C

Los gases de efecto invernadero abrigan la Tierra



El siguiente gráfico explica todo lo indicado anteriormente. Los rayos de la izquierda son radiación solar (luz básicamente) y los rayos de la derecha son radiación infrarroja (calor).

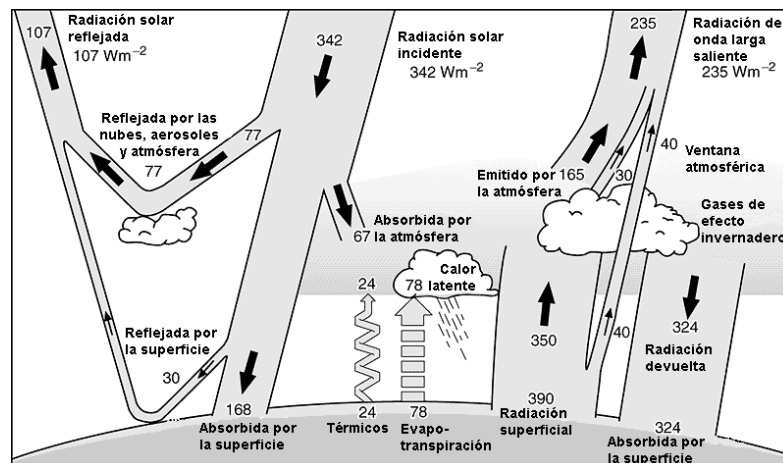


Figura 22

Fijémonos a continuación en las cantidades de energía reflejadas ya que es un aspecto importante.

- De la radiación solar que recibimos en lo alto de la atmósfera (342 w/m²), 77 w/m² son reflejadas por las nubes.
- De la radiación solar que consigue alcanzar la superficie terrestre (198 w/m²) la mayor parte es absorbida y sólo una pequeña parte (30w/m²) es reflejada al espacio (15%).

En total el planeta refleja $77+30=107 \text{ w/m}^2$, es decir el 31% de la radiación solar que recibe. Por eso la Tierra se ve como un punto brillante desde el espacio como si fuera un cuerpo emisor de luz, igual que la Luna e igual que Marte, Venus y el resto de planetas. Esto lo veremos más adelante cuando hablemos del brillo de los planetas.

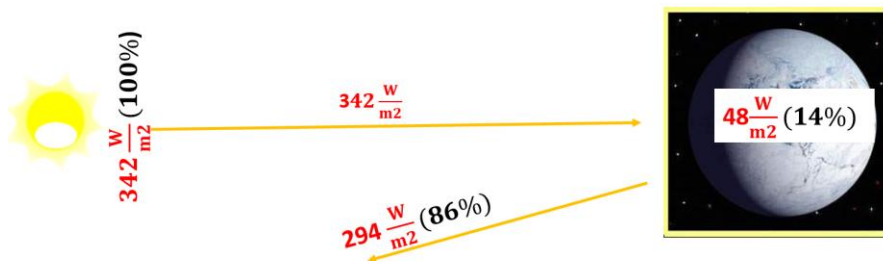
De la radiación infrarroja que emite la atmósfera hacia la superficie terrestre, nada se refleja, todo se absorbe y se emplea en calentar el suelo.

Conclusión de todo lo dicho:

Una nave espacial cercana a la Tierra recibe $1,360 \text{ w/m}^2$ de energía solar. Pero la Tierra recibe solo la 4ª parte (342 w/m^2) porque esa energía debe dividirla entre toda la superficie del globo (que es cuatro veces superior a la sección de superficie perpendicular a los rayos del sol). De estos 342 w/m^2 el 31% se reflejan al espacio porque la Tierra tiene un albedo medio del 31%. Y otra parte queda absorbida en la atmósfera. Y por tanto solo alcanzan el suelo de la Tierra 168 w/m^2 .

Si no hubiera atmósfera y no hubiera nubes, la Tierra no tendría efecto invernadero y el globo terráqueo sería una bola de nieve con un albedo medio del 86% (la nieve es prácticamente de un blanco puro y refleja el 86% de la energía que recibe). Por tanto solo el 14% de los 342 w/m^2 calentarían la superficie terrestre (48 w/m^2) y 294 w/m^2 serían reflejados y desperdiciados al espacio. En el equilibrio la Tierra alcanzaría la temperatura que le permita emitir 48 w/m^2 , es decir, ¡una temperatura de $-102 \text{ }^\circ\text{C}$!!

Sin Atmósfera el planeta estaría congelado.
Por tanto el albedo sería del 86%



$$E = \sigma \cdot T_e^4$$

$$\sigma \approx 5.670373(21) \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

Figura 23

Como vemos, no es solo la escasa distancia al sol la que nos mantiene a buenas temperaturas, es también y sobre todo, el efecto invernadero y un albedo adecuado lo que permite que no se refleje la energía que recibimos.



Figura 24

¿Cuáles son los gases atmosféricos que más contribuyen al efecto invernadero en la tierra?

Los gases que tienen mayor capacidad de efecto invernadero son el metano y el vapor de agua. Pero el metano está presente en muy poca concentración, de manera que el gas que contribuye más al efecto invernadero en la tierra es, con mucha diferencia, el vapor de agua, siendo el responsable de entre el 65% y el 95% del efecto.

Gases de efecto invernadero en el planeta Tierra

- 📌 VAPOR DE AGUA. Es con diferencia el gas de efecto invernadero más eficaz. Es responsable de el 65-95% del efecto invernadero



- 📌 CO₂. En la presente era geológica, su concentración en la atmósfera es muy baja. Es responsable del 20-5% del efecto invernadero
- 📌 OTROS. Metano, óxido de nitrógeno, ozono, etc... Su contribución al efecto invernadero es menor por ser muy baja su concentración

Figura 25

2.5 Variaciones en el albedo terrestre. La importancia de las nubes

El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo medio de la Tierra, como hemos visto, es del 31% de la radiación que proviene del Sol.

La presencia de agua en la Tierra crea una interesante realimentación positiva para el albedo, ya que las bajas temperaturas incrementan la cantidad de hielo sobre su superficie, lo que hace más blanco al planeta y aumenta su albedo, lo que a su vez enfría más el planeta, lo que crea nuevas cantidades de hielo; de esta manera, hemos visto que, aun con el sol en plena forma y emitiendo la misma cantidad de energía que hoy, podría llegarse al punto en que la Tierra entera se convertiría en una bola de nieve.

Veamos los distintos albedos de las diferentes tipos de superficies de la tierra:

Albedos	% de luz reflejada
Nieve reciente	86
Nubes brillantes	78
Nubes (promedio)	50
Desiertos terrestres	21
Suelo terrestre sin vegetación	18
Bosques (promedio)	8
Ceniza volcánica	7
Océanos	5

Tabla 3: % Albedo

El albedo es uno de los factores fundamentales que afectan a la temperatura media global y a las variaciones que ésta experimenta anualmente⁵.

Se define como la capacidad para reflejar la radiación recibida. La parte de radiación que un cuerpo no es capaz de reflejar la absorbe o la deja pasar a través de él (refracción). Cuando la absorbe se calienta.

Las superficies claras presentan mayor albedo que las oscuras, es decir reflejan la energía solar. Así, las nubes, el hielo y la nieve son las superficies con mayor albedo. Todos hemos experimentado cómo la nieve y el hielo reflejan la luz solar hacia nuestros ojos.

El suelo no helado con mayor albedo es el desierto, es decir, el desierto aunque parezca paradójico, enfría el planeta. Las superficies con menor albedo son los bosques y los océanos (son las más oscuras) y contribuyen con su albedo al calentamiento del planeta.

Todo esto es fácil de entender cuando vemos una foto del planeta Tierra tomada desde el espacio. Vemos los océanos de un color oscuro (reflejan poca luz) y los continentes de un color más claro (reflejan más luz). Los bosques del ecuador aparecerán oscuros. Las nubes las veremos muy claras y los hielos de los polos también. El desierto del Sahara lo vemos realmente claro (está reflejando mucha energía solar al espacio).

⁵ Earth's Changing Albedo. Dr. Timothy Ball. http://www.friendsofscience.org/assets/documents/FOS_Albedo.pdf



Figura 26: El planeta Tierra visto desde el espacio. Se observa como el hielo de la Antártida se ve muy claro, al igual que las nubes. También se ve claro el desierto del Sahara. Se ven oscuros los océanos y los bosques de África Ecuatorial. Todo ello es debido a los diferentes albedos.

Si la superficie de los glaciares se reduce, el planeta Tierra se calienta porque se reduce la cantidad de energía que la Tierra refleja al espacio. Si aumentamos la superficie de los bosques se reduce el albedo.

Como hemos visto, el planeta Tierra tiene un albedo medio del 31%. De la radiación solar media que recibimos (342 w/m^2) en lo alto de la atmósfera, el 31% se refleja (107 w/m^2).

La mayor parte de la luz solar es reflejada por las nubes (77 w/m^2) que tienen un albedo del 78% pero sólo cubren de media el 29% de la superficie terrestre.

PLANETA TIERRA	Superficie cubierta	Albedo	Total reflejado (%)	Energía solar recibida (w/m^2)	Energía reflejada (w/m^2)	Albedo medio	Energía que entra en la atmósfera (w/m^2)	Energía absorbida en la atmósfera (25%) (w/m^2)	Energía que alcanza la sup. Terrestre (w/m^2)
Nubes	29%	78%	22.6%	342	77		265	66	199
Superficie terrestre		15%		198	30				
Total	100%			342	107	31%			

Tabla 4

Aún así la nubosidad global media varía de un año a otro y este es un factor que afecta de forma importante a la temperatura media anual de cada año. Una disminución del 10% en la nubosidad supondría una reducción de más de 7 w/m² en la radiación solar reflejada produciendo un calentamiento importante del planeta.

Planeta con un 10% menos de nubes	Superficie cubierta	Albedo	Total reflejado (%)	Energía solar recibida (w/m ²)	Energía reflejada (w/m ²)	Albedo medio	Energía que entra en la atmósfera (w/m ²)	Energía absorbida en la atmósfera (25%)(w/m ²)	Energía que alcanza la sup. Terrestre (w/m ²)
Nubes	26%	78%	20.3%	342	69		273	68	204
Superficie terrestre		15%		342	31				
Total	100%			342	100	29%			

Tabla 5

Un aumento en la cobertura nubosa produciría un gran enfriamiento. Imaginemos que la cobertura nubosa fuese del 39%:

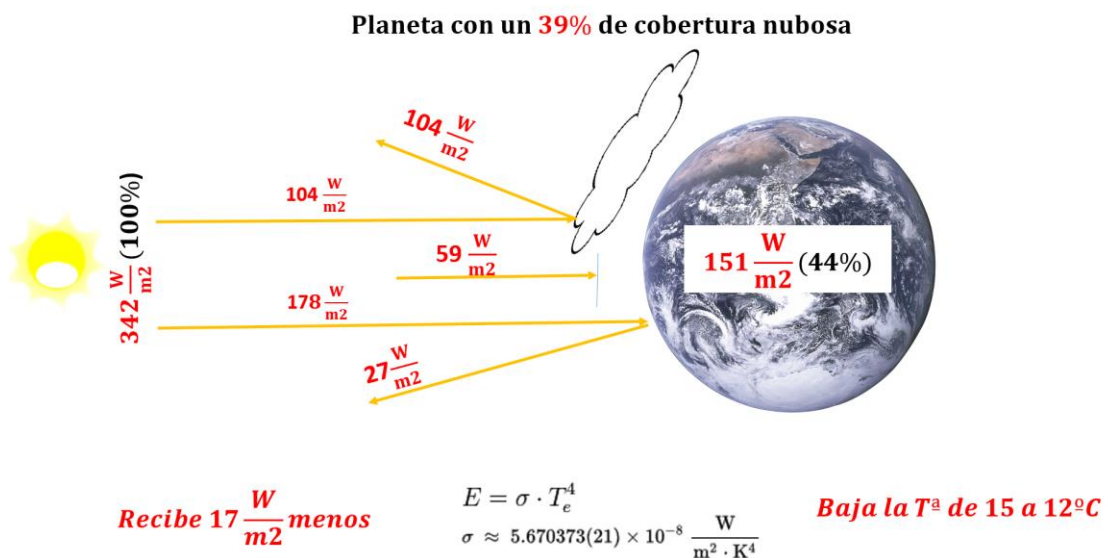


Figura 27

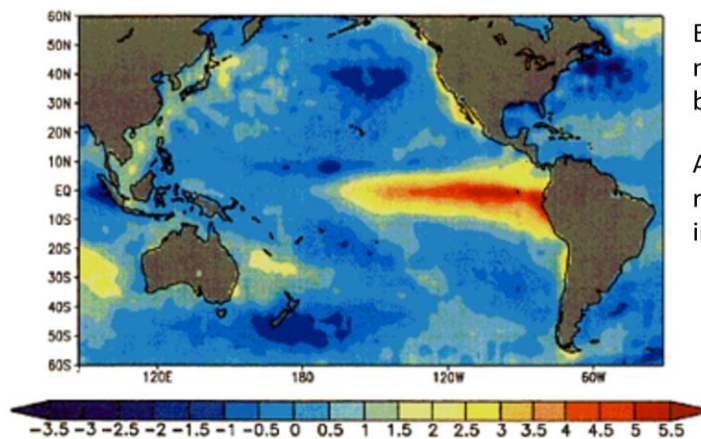
Un planeta sin nubes tendría un albedo medio del 11% (en lugar del 31%) y reflejaría 70w/m² menos, incrementando la temperatura global media en más de 12° C. Vemos por tanto que el grado de nubosidad a nivel planetario es un factor importantísimo a tener en cuenta.

PLANETA SIN NUBES	Superficie cubierta	Albedo	Total reflejado (%)	Energía solar recibida (w/m2)	Energía reflejada (w/m2)	Albedo medio	Energía que entra en la atmósfera (w/m2)	Energía absorbida en la atmósfera (25%) (w/m2)	Energía que alcanza la sup. Terrestre (w/m2)
Nubes	0%	78%	0,0%	342	0		342	86	257
Superficie terrestre		15%		257	38				
Total	100%			342	38	11%			

Tabla 6

Algunos años se produce en Diciembre el fenómeno de El Niño. Por razones aún desconocidas se calienta en extremo el océano en la costa de Perú. Esto produce fortísimas lluvias en ese lugar, si bien a nivel planetario en realidad reduce la cobertura nubosa general del planeta, lo cual produce un calentamiento global puntual.

El fenómeno del Niño



Mapa de temperaturas anómalas en Diciembre de 1997

El Niño provoca fuerte cobertura nubosa en América del Sur, pero baja nubosidad y sequías en Asia

A nivel global la nubosidad se reduce y la Temperatura Global se incrementa

NIÑOS HISTÓRICOS MÁS FUERTES

- Niño de 1578
- Niño de 1728
- Niño de 1790-93
- Niño de 1828
- Niño de 1876-78
- Niño de 1891,
- Niño de 1925-26
- Niño de 1982-83
- Niño de 1997-98
- Niño de 2014-16

Figura 28

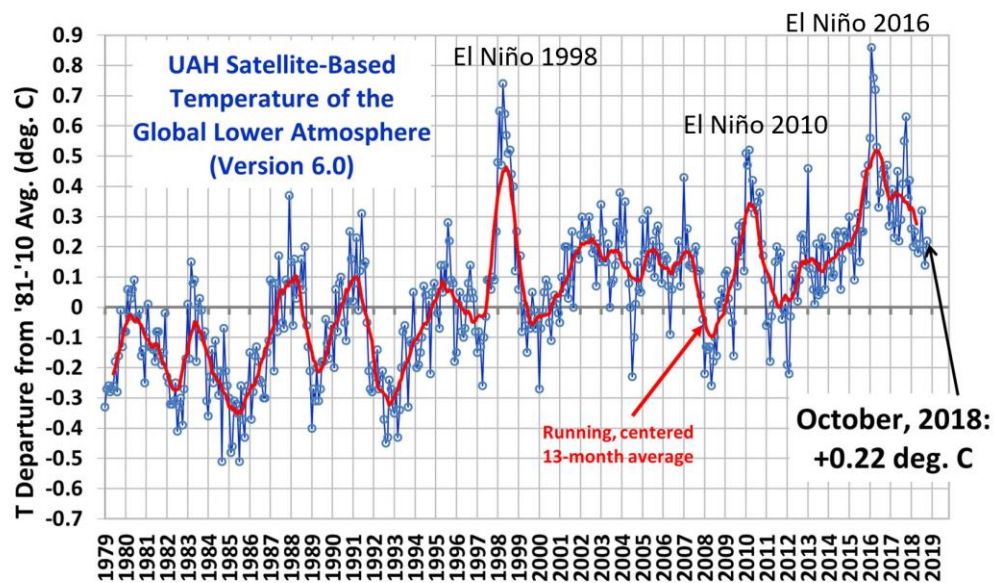


Figura 29

Vemos en el gráfico anterior como los años en que aconteció el fenómeno de El Niño (1998, 2010 y 2016), se produjo un fuerte calentamiento global, debido a la reducción en la cobertura nubosa global del planeta.

Como conclusión de este apéndice, vemos que el factor de la nubosidad afecta de manera determinante a los cambios a corto plazo en la temperatura global, pero lamentablemente es el más complejo e impredecible.

A continuación hacemos un análisis de la temperatura de equilibrio que tendría cada uno de los planetas sin considerar el efecto invernadero de su atmósfera, pero considerando su distancia al sol y su albedo. Para ello únicamente necesitamos conocer la energía recibida del sol (inversamente proporcional al cuadrado de la distancia) y la ley de Stephan Boltzmann.

	Energía recibida del sol (w/m2)	Albedo	Temperatura (°K)	Temperatura °C
Mercurio	9040	0,058	442	168,85
Venus	2610	71,00%	244	-29
Tierra	1360	31,00%	253	-20
Marte	590	17,00%	216	-57
Júpiter	50	52,00%	103	-170
Saturno	15	47,00%	77	-196
Urano	4	51,00%	53	-220
Neptuno	2	41,00%	45	-228

Tabla 7: Temperaturas teóricas que no tienen en cuenta el efecto invernadero.

Llama la atención ver que la temperatura teórica de Venus es menor que la de la Tierra, a pesar de encontrarse más cerca del sol. Esto es debido a tener un albedo tan alto. Sin embargo la temperatura real de Venus es muchísimo mayor que la de la Tierra debido al potente efecto invernadero de su atmósfera, como veremos en próximos cursos.

En esta tabla vemos como la temperatura de los planetas exteriores se aproximaría al cero absoluto si no fuera por el efecto invernadero de su atmósfera. Saturno de hecho alcanzaría la temperatura del nitrógeno líquido (-196°C)

Llama la atención también el albedo de Mercurio 5,8%. Se trata de un planeta realmente oscuro debido a su alto porcentaje de carbono en su superficie. También nuestro satélite, la luna, tiene un albedo realmente bajo (7%). Si la luna tuviera un albedo como el de nuestro planeta (31%) iluminaría entre 4 y 5 veces más y nuestras noches serían realmente claras.



Figura 30: En la foto se puede observar que el suelo de la luna es, en realidad, de un material bastante oscuro. El polvo lunar tiene un fuerte componente de hierro que proviene del impacto de meteoritos al que ha estado expuesto siempre la luna.

2.6 La atmósfera terrestre y el origen de la vida

La vida, tal y como la conocemos, es posible en la Tierra debido a la coincidencia de muchos factores. La existencia de agua y una distancia adecuada a su estrella es lo que los astrónomos analizan cuando buscan planetas que potencialmente puedan albergar vida extraterrestre.

Lo que aprenderemos en este apartado es algo sorprendente. La actual biodiversidad en la tierra no debe su causa a una determinada y específica composición de elementos en la atmósfera, es justo al contrario. La vida ha ido preparando y modificando la atmósfera terrestre a su gusto.

En efecto, la tierra y la vida se han venido influyendo mutuamente desde hace 4.000 millones de años, de manera que el planeta que hoy disfrutamos, en cuanto a clima, atmósfera, humedad, etc... ¡es un planeta que la propia vida se ha ido fabricando a medida!

Para poder entender esto debemos explicar brevemente los mecanismos básicos de la vida. Es decir, el ciclo del carbono y el oxígeno.

Los mecanismos de la vida. El ciclo del carbono y el oxígeno

La fórmula básica es la siguiente:



Esta fórmula se cumple en ambos sentidos.

En el primer sentido (oxidación) la fórmula quiere decir que el Carbono al oxidarse (quemarse), produce como residuo dióxido de carbono y energía. Esta fórmula se cumple en los animales, cuando digieren un plátano o un trozo de carne, están incorporando cadenas de carbono, que posteriormente oxidarán (con el oxígeno que incorporan en la respiración) y generarán energía que les permite moverse, mantener sus células vivas, regular su temperatura, etc... Esto mismo lo hacen los coches exactamente igual, queman el carbono (petróleo) de manera que consiguen energía para moverse y expulsan CO₂.

En el sentido opuesto (reducción), esta fórmula significa que por medio de energía es posible extraer el carbono que se encuentra en el CO₂, de manera que conseguimos carbono por un lado y dos moléculas de oxígeno por otro lado. Esto que así parece tan sencillo, la realidad es que solo son capaces de hacerlo las plantas en un proceso que todos conocemos como fotosíntesis. Captan el CO₂ atmosférico y por medio de la luz solar logran separar el carbono (que se lo quedan) y expulsar a la atmósfera el oxígeno (como residuo). Es decir, las plantas son las únicas y verdaderas cocineras que se conocen en el universo. Las únicas capaces de crear cadenas de materia orgánica que servirán como alimento para todo el resto de seres vivos. Sin CO₂ no hay plantas. Sin plantas no hay vida.

Veamos ahora todo el ciclo:

Las plantas captan el carbono del CO₂ atmosférico con ayuda de la luz solar (fotosíntesis), despreciando el oxígeno que lo emiten a la atmósfera.

El ciervo se come la planta y bebe agua. Todo su cuerpo está formado de “plantas y agua”, o sea de carbono + agua. Somos lo que comemos. En su actividad diaria respira el oxígeno atmosférico que había despreciado la planta, que le sirve para quemar el carbono, consiguiendo energía y expulsando el CO₂ que luego volverá a utilizar la planta.

El león se come al ciervo y bebe agua. De nuevo, todo su cuerpo está formado de “ciervos y agua”, o sea de carbono + agua. En su actividad diaria el león también respira el oxígeno atmosférico que había despreciado la planta, que le sirve para quemar el carbono, consiguiendo energía y expulsando el CO₂ que luego volverá a utilizar la planta.

Por último, cuando la planta, el ciervo y el león se mueren, se descomponen. Esto quiere decir que el agua y el carbón que les forma se convierten en CO₂ y agua.

CICLO DEL CARBONO. El CO₂ es esencial para la vida

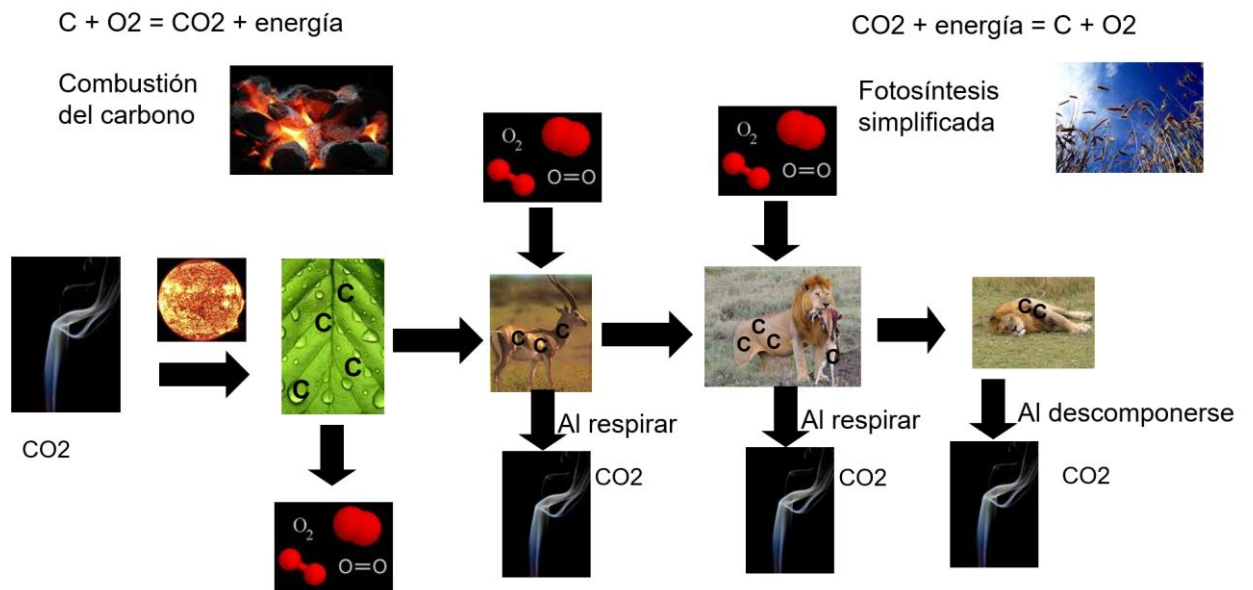


Figura 31

¿Por qué la atmósfera de la Tierra es cómo es?

Originalmente la tierra era una gran bola de materiales incandescentes con una atmósfera formada por Dióxido de Carbono y vapor de agua.

Cuando estos materiales se fueron enfriando, dado que el sol aún no tenía tanta potencia calorífica (era una estrella joven), el vapor de agua tuvo oportunidad de condensarse formando los océanos. En este momento la tierra estuvo en peligro de convertirse en una inmensa bola de hielo para siempre. Al reducirse el efecto invernadero como consecuencia de la condensación del vapor de agua, podría haberse congelado todo el agua formando un planeta blanco que además reflejara casi toda la energía del sol, haciendo ya casi imposible su recuperación. Pero se mantuvo en el equilibrio justo para evitar tanto la congelación global como el infierno que hoy se vive en Venus (atmósfera de CO₂).⁶

Afortunadamente la atmósfera también contenía dióxido de carbono (que es capaz de permanecer en estado gaseoso aunque la tierra se enfríe), que estaba presente en cantidades mucho más grandes que hoy, lo cual permitió que, gracias al efecto invernadero, y a pesar de contar aún con un sol débil, no se congelara todo el planeta. Es decir los océanos permanecieron en forma líquida.

Con el paso de millones de años la potencia del sol fue incrementándose, y estábamos en riesgo de que la tierra se convirtiera en un horno de 500°C (como Venus), sin embargo, progresivamente las lluvias fueron disolviendo parte del dióxido de carbono presente en la atmósfera y éste se iba disolviendo en los océanos hasta quedar saturados. Lo más lógico habría sido que el proceso de disolución del CO₂ hubiera finalizado una vez que los océanos se saturaron y por tanto aún la atmósfera debería haber sido asfixiante en CO₂ y haber provocado temperaturas abrasadoras. Pero algo extraordinario sucedió. ¡Surgió la vida, y salvó al planeta!

⁶ Tiempos de la glaciación huroniana (hace 2,300 M años). La expulsión masiva de oxígeno por las células fotosintéticas provocó además un desequilibrio químico entre los gases de efecto invernadero reduciendo su presencia en la atmósfera.

Hace 4. 500 M de años



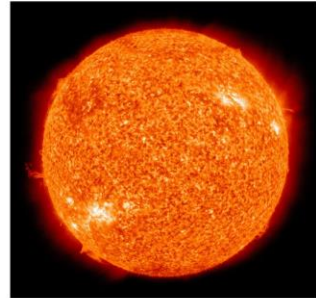
Atmósfera incandescente de Vapor de agua y CO2

Hace 3. 700 M de años



La Tierra se va enfriando y el vapor de agua se condensa. Se forman los océanos. Sol débil aún. Riesgo de congelación por retroalimentación del albedo. Atmósfera de CO2 que mantiene caliente el planeta

Hace 3. 500 M de años



El sol gana potencia. La Tierra con una atmósfera de CO2 (como Venus) va camino de convertirse en **un infierno**. Riesgo de volver a evaporar el agua de los océanos e incrementar el efecto invernadero aún más.

Figura 32

Surge la vida. Interacción VIDA-PLANETA-VIDA

Las primeras formas de vida fueron sencillas bacterias que aparecen en el mar. Pero hace 3,500 Millones de años sucede algo que cambiará la historia del planeta para siempre. También en el mar aparecen las primeras cianobacterias, capaces de capturar el CO2, disociarlo con la ayuda de la energía solar (fotosíntesis), expulsar el oxígeno y retener el carbono. Estos organismos, que vivían casi en la superficie del agua, al retener el carbono, iban formando estructuras carbonatadas (estromatolitos) y comenzaron a expulsar un gas oxidante y reactivo (el oxígeno) que provocó una extinción en masa de todas las anteriores formas de vida. De esta manera, un gas como el oxígeno, que originalmente no estaba presente en la atmósfera (y que no lo está en ningún planeta), comienza a aumentar su concentración.



Figura 33: Estromatolitos modernos formados en Australia



Figura 34: Estromatolitos antiguos fosilizados. Los causantes de que el planeta actual exista tal y como lo conocemos.

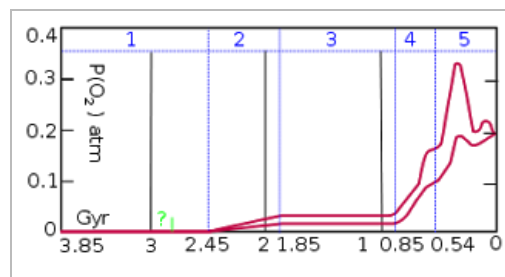


Figura 35: Evolución de la concentración de oxígeno en la atmósfera. Se percibe como hace 2,450 Millones de años, el hierro y el azufre de la corteza terrestre ya quedaron oxidados totalmente y dejó de haber nada capaz de acumular el oxígeno que las cianobacterias estaban produciendo. De manera que comenzó a acumularse en la atmósfera mientras las cianobacterias continuaban emitiéndolo a gran escala, aumentando su concentración atmosférica de manera progresiva, alcanzando su máximo hace 500 Millones de años.

A la vez que las bacterias iban consiguiendo reducir progresivamente la concentración de CO₂ atmosférica, iban expulsando el oxígeno a la atmósfera aumentando su concentración. Los océanos encontraron en las cianobacterias y otras formas de vida vegetales (similares a las algas) la manera de librarse del CO₂ que los saturaba. Estas formas de vida retienen el carbono y al sedimentarse en el fondo de los mares, producen rocas calcáreas carbonatadas como las calizas y otros tipos. De esta manera la atmósfera continúa perdiendo CO₂ que va siendo absorbido en los océanos y acaba en el fondo en forma de calizas. Gracias a la aparición de la vida, ¡el planeta va cubriéndose de rocas carbonatadas formadas con el carbono que originalmente se encontraba en la atmósfera en forma de CO₂!



Figura 36: Paisaje de acantilados de roca caliza en la ciudad de Ronda. España. Las rocas calizas son rocas sedimentarias formadas en el fondo de antiguos océanos. Son la mayor acumulación de carbono del planeta, y todo él proviene del antiguo CO₂ que existía en la primitiva atmósfera terrestre.

Se reducen así los gases de efecto invernadero de manera progresiva (vapor de agua y CO₂), si bien el sol seguía creciendo en potencia calorífica compensando la temperatura del planeta.

Aún así, hay muchas pruebas de periodos de glaciación intensa entre 2,500-2,000 Millones de años debido a la reducción de gases de efecto invernadero.

Hace 3.500 M de años



Aparece la vida. Las cianobacterias en el mar comienzan a absorber el CO₂ disuelto. Forman estructuras carbonatadas que se depositan en el fondo. Expulsan oxígeno

PRIMER MISTERIO



Se acumula el carbono en forma de rocas carbonatadas de origen biológico (calizas). Disminuye rápidamente la concentración de CO₂ en la atmósfera. Disminuye el efecto invernadero rápidamente. Además el oxígeno descompone el metano

Hace 2.500 M de años



Nuevo peligro!! Peligro de congelación del planeta!
GLACIACION INTENSA
"Dropstone en rocas sedimentarias de hace 2,500 M de años en Canadá"

Figura 37

Los primeros seres multicelulares aparecen hace 1.700 millones de años (asociación de células) y después, hace 650 millones de años, aparecen las primeras esponjas y medusas.



Figura 38: Las medusas. Los habitantes más antiguos y los dueños originales de los mares.

En el período Criogénico, entre 720-635 Millones de años, algunos autores sostienen que el planeta pudo convertirse en una inmensa bola de nieve por un efecto de retroalimentación. El supercontinente Gondwana había ido derivando hacia el Sur por la tectónica de placas hasta localizarse en el Polo Sur. Esto provocó que todo el continente se cubriera por kms de hielo y nieve. El albedo del planeta fue aumentando al cubrirse el continente de nieve (gran parte de la energía del sol era reflejada al espacio) y entra así en un círculo vicioso, quedando cada vez más blanco, aumentando su albedo, enfriándose cada vez más, y cada vez más blanco, hasta probablemente congelarse los océanos.

Ya vimos que con la potencia solar actual, y la distancia actual de la tierra al sol, es perfectamente posible que la tierra se convierta en una bola gigante de nieve que tendría un albedo global del 86%, de manera que solo 48 w/m² de los 342 que recibimos servirían para calentarla y 294 w/m² serían emitidos al espacio. La temperatura de equilibrio sería de -102°C.



¿La tierra en el período criogénico de hace 700 M de años?

Si la tierra alguna vez alcanzó esta condición ¿el qué la pudo descongelar?

PENSAR:

Si la tierra alguna vez se convirtió en una inmensa bola de nieve. ¿Qué fue lo que la descongeló?, ¿cómo pudo salir del fenómeno de retroalimentación y enfriamiento?

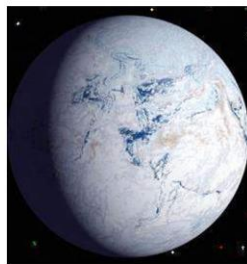
La Tierra parecía perdida esta vez para siempre, convertida en una inmensa bola de nieve donde la vida acabaría extinguiéndose irremisiblemente. Pero aún se guardaba el planeta un as en la manga... Los volcanes seguían su actividad sísmica indiferente a lo que en superficie estaba ocurriendo. Seguían emitiendo, de vez en cuando, grandes erupciones, lanzando inmensas cantidades de CO₂ a la atmósfera que, esta vez nadie era capaz de absorber, ni los microorganismos (que apenas existían), ni el océano (que estaba congelado). La concentración de CO₂ comenzó a crecer de manera acelerada hasta calentar el planeta e iniciar el fenómeno de descongelación.

Hace 900 M de años



Comienza la deriva continental. El supercontinente deriva hacia el Sur hasta colocarse justo en el Polo Sur. El continente entero se congela. Al congelarse aumenta el albedo fuertemente. Y entonces se congela el planeta entero

Hace 750 M de años



Periodo criogénico. Glaciación Varangiense. El periodo más frío de la historia de la tierra. La vida está prácticamente congelada

¿Cómo salió la Tierra de este atolladero?

Hace 650 M de años



La energía interna del planeta nos salvó. Los volcanes iban expulsando CO₂ a la atmósfera, que con océanos y vida congelada, se iba acumulando rápidamente.

Figura 39



Figura 40: Volcanes descongelando el planeta al emitir CO₂ a la atmósfera

Para cuando la vida comenzó a proliferar de nuevo, las circunstancias ya eran distintas. La gran concentración de oxígeno tanto en la atmósfera, como sobre todo diluido en los océanos, permitirá la gran explosión de vida del período cámbrico y aparecen seres pluricelulares más complejos, que aprovechan el oxígeno diluido más como una ventaja que como un enemigo. En efecto, el oxígeno permite quemar el carbono, liberando una gran cantidad de energía que podría ser muy bien aprovechada por el organismo. Aparecen así los primeros peces que respiran oxígeno diluido con branquias primitivas, si bien el nuevo rey en esta época es ahora el trilobite.



Figura 41: Trilobite fósil. El rey del cámbrico

Incremento del CO2



Se alcanzan concentraciones de CO2 de 7.500 ppm (hoy son de 380 ppm)

Hace 550 M años. Explosión de vida del Cámbrico



CUARTO MISTERIO

Estos animales serán el cimiento de todos los que existirán después.

Figura 42

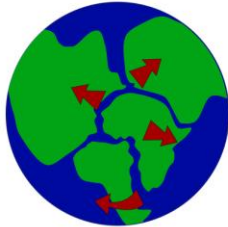
Después llega la colonización de las plantas de tierra firme, y por supuesto, la vida en la tierra seguirá influyendo al propio planeta cambiando el albedo con la existencia de bosques, y desde luego modificando la concentración de CO₂ atmosférico. En pleno período carbonífero los bosques se han extendido por todo el planeta sin ningún enemigo (no existe aún ningún herbívoro) y además la concentración de CO₂ es tan alta que los árboles son gigantesco y casi infinitos.



Figura 43: Los bosques del carbonífero invadieron la tierra firme hace 300 M de años.

Los restos de los grandes bosques del carbonífero acumularían una enorme cantidad de carbono debajo de la tierra (con el paso de los años transformado en carbón) reduciendo de manera importante la cantidad de CO₂ atmosférica, de manera que al terminar el período carbonífero la concentración de CO₂ en la atmósfera ha quedado bajo mínimos. Por cierto parte de este carbono que quedó sepultado lo estamos devolviendo ahora a la atmósfera los humanos al quemar los combustibles fósiles.

Hace 450 M años.
SILURICO



El supercontinente ha vuelto a derivar hacia el Norte. Y comienza a disgregarse. Altísimas concentraciones de CO2 atmosférico son las condiciones ideales para que la vida vegetal se abra paso en tierra firme

Primeros bosques



Los bosques comienzan a absorber el CO2 atmosférico a gran velocidad y acumulan el carbono bajo la Tierra.

Hace 400 M años



DEVONICO
Primeros anfibios
Primeros insectos

Figura 44

Hace 250 Millones de años se produce la catástrofe Permo-Trias, muy probablemente debida al impacto de un gran meteorito. Esto provocó una gran extinción en masa de la mayoría de las especies que habitaban la tierra.

Esta reducción de vida provocó que volviera a ascender el nivel de CO2 atmosférico.

Hace 300 M años



Carbonífero. Restos vegetales enterrados. El carbón es energía solar acumulada bajo tierra hace 300 M años

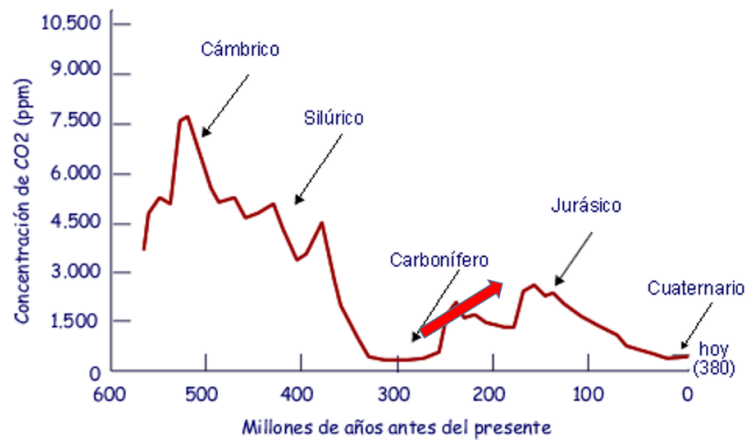
Hace 250 M años



Catástrofe PERMO-TRIAS
Se extinguen el 85% de las especies (trilobites)

Figura 45

Hace 250 M años



Al extinguirse tanta vida, vuelve a subir el nivel de CO2 atmosférico que había quedado en mínimos tras el carbonífero

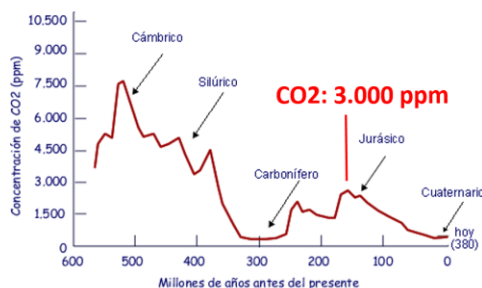
Figura 46

Finalmente en el triásico, jurásico y cretácico los animales se harían inmensos, disfrutando de altas concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono, y de inmensos bosques. Y por supuesto tras los grandes herbívoros aparecen los grandes carnívoros.

TRIASICO-JURASICO-CRETÁCICO (250-65 M años)

Altas concentraciones de CO2 y altas temperaturas hacen posible una nueva explosión de vida.
 Las plantas se hacen enormes
 Los insectos se hacen enormes
 Los herbívoros se hacen enormes
 Los carnívoros se hacen enormes

Temperatura media terrestre: 25º



En sedimentos de Groenlandia se han encontrado fósiles de esta época de árboles tropicales
 Reptiles de climas cálidos vivían en el ártico

Figura 47

Hace 65 millones de años un nuevo cataclismo provocado por un meteorito provocó la extinción de los dinosaurios.

Desde entonces, las concentraciones de CO₂ y las temperaturas han ido disminuyendo progresivamente, hasta congelarse de nuevo la Antártida (hace 34 millones de años), Groenlandia, etc...

TERCIARIO (Desde hace 65 M años)

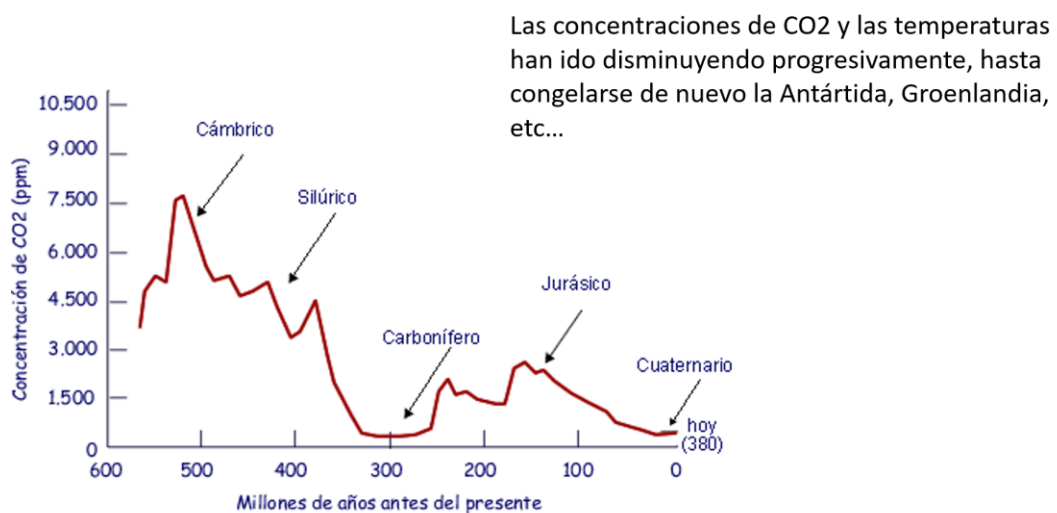


Figura 48

Así la historia del clima terrestre es, desde entonces, inseparable de la historia de la vida.

¡Y viceversa! por supuesto la historia del clima influye de manera radical en la evolución de la vida.

Haciendo zoom en el último millón de años, vemos que también se han producido grandes variaciones en la temperatura global. En concreto ha habido cuatro grandes glaciaciones (Günz, Mindel Riss y Wurm) con sus correspondientes interglaciaciones. Ya vimos como esto estaba directamente relacionado con los ciclos de Milankovitch.

ULTIMO MILLÓN DE AÑOS

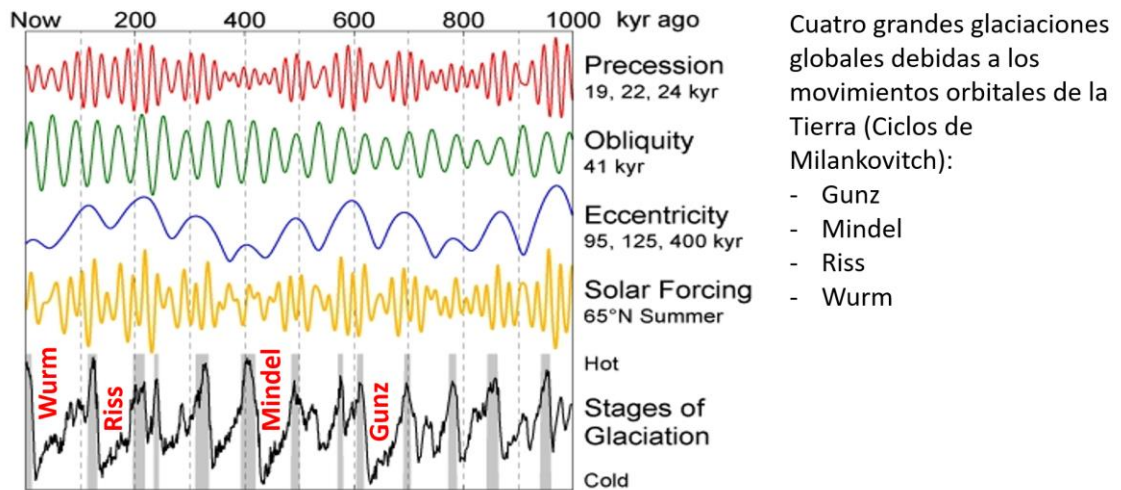


Figura 49

En los últimos 30.000 años también se han producido cambios bruscos en la temperatura. Estos sí los hemos disfrutado o sufrido nosotros, los homo sapiens, que hemos pasado de vivir en un infierno de hielo (hace 30.000 años) a vivir en un clima más benigno desde hace 10.000 años.

ULTIMO 30.000 años



Figura 50

Este calentamiento producido por la interglaciación desde hace 10.000 años ha tenido como consecuencia una elevación de 120 metros del nivel del mar, obviamente todo debido a causas naturales.

ULTIMO 30.000 años. Aumento del nivel del mar

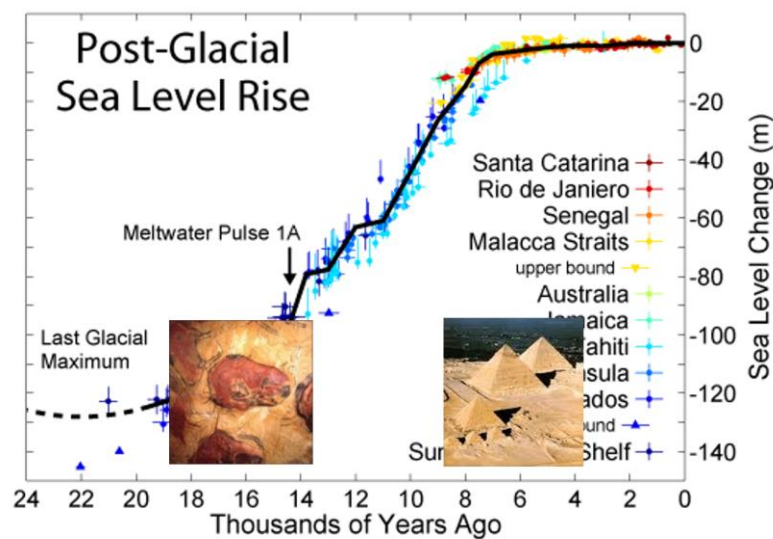


Figura 51

Haciendo zoom en los últimos 2,500 años vemos que también se han producido cambios importantes en el clima global, o al menos en Europa. De un clima benigno que favoreció el crecimiento y consolidación del imperio romano, se pasó a un descenso importante de la temperatura que obligó a los pueblos germanos a emigrar hacia el sur, acabando así con el imperio.

Posteriormente Europa entra de nuevo en un clima benigno que favorece el crecimiento económico medieval, para posteriormente volver a entrar en una “pequeña edad del hielo” que tuvo sus peores momentos en el siglo XIV (peste) y el siglo XVII y XVIII provocando muchos años de malas cosechas en Europa, todas ellas registradas históricamente. Desde entonces la temperatura global parece haberse recuperado y disfrutamos en estos momentos de un clima benigno en Europa.



Figura 52

Aun así, en los últimos 100 años también hubo importantes cambios. Merece la pena detenerse en ellos. Desde 1940 a 1970 la temperatura global se mantuvo en descenso, tanto que la mayor parte de los principales periódicos a nivel mundial alertaron de una posible Edad de Hielo

Primera parte del siglo XX

1970. Kenneth Watt (Universidad de California) "Si continúan las tendencias actuales, el mundo estará unos cuatro grados más frío en 1990, llegando a once grados menos para el año 2000. Es más del doble de lo que nos situaría en una edad de hielo"

SCIENCE DIGEST

International WILDLIFE

"Debemos prepararnos para la próxima edad de hielo"

"Debe ahora considerarse una nueva edad de hielo"

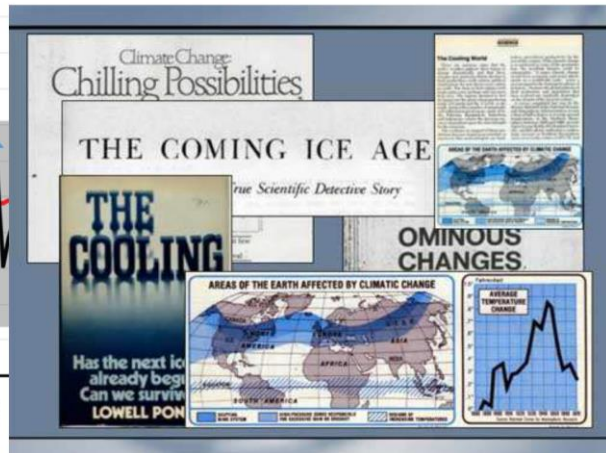
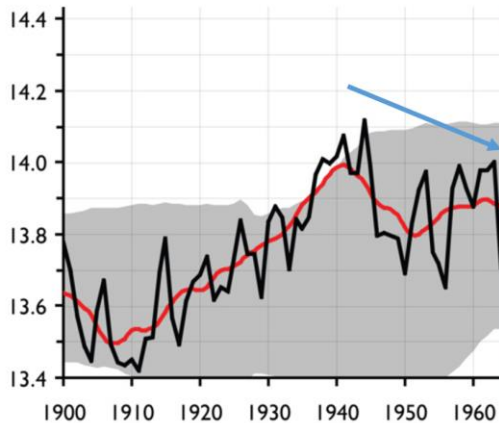


Figura 53

Si finalmente nos centramos en los últimos 40 años, donde contamos con medidas tomadas vía satélite (UAH Satellite-Based), estos son los resultados.

Ultimos 40 años

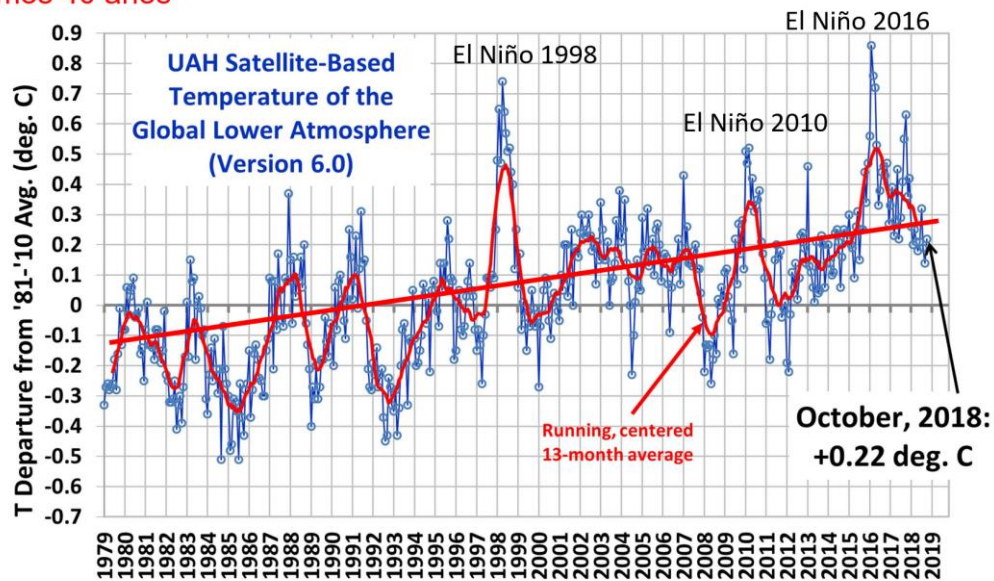


Figura 54

Se observa un calentamiento general de 0.3°C en los últimos 40 años y tres picos importantes debidos a los fenómenos de El Niño en 1998, 2010 y 2016.

La temperatura está ascendiendo, si bien manteniéndose en el entorno de los 15° de media global. Ya vimos que esto es gracias a los gases de efecto invernadero que aún permanecen en la atmósfera (en su mayor parte vapor de agua), que contribuyen a que la temperatura media de la tierra no esté en -20°C , que es lo que le correspondería dado el albedo de la tierra y su distancia al sol.

En el video del curso ofrezco mis impresiones en relación con el cambio climático actual, el uso de recursos fósiles y las concentraciones de CO_2 atmosférico.

Por último indicar que el resto de la atmósfera está principalmente formado por nitrógeno (N_2), ¡cuya existencia es también debida a la presencia de la vida! El nitrógeno del aire proviene de bacterias capaces de extraer el oxígeno de las rocas de nitratos, un proceso que libera nitrógeno.

¿Dónde están ahora los componentes de la atmósfera original del planeta tierra?

Como dijimos la atmósfera original era, como en Venus, dióxido de carbono y vapor de agua. El vapor de agua todos sabemos en qué se ha convertido (los grandes océanos de la Tierra se formaron en parte con el vapor de agua atmosférico condensado).

¿Y dónde quedó todo el CO_2 ?

Una buena parte está hoy disuelto en los océanos, que contienen 38.000 Gt de carbono, la mayor parte en forma de carbonatos disueltos;

La tierra firme solo contiene 2.000 Gt de carbono, en forma de materia orgánica y animales vivos

La atmósfera solo 760 Gt de carbono en forma de CO_2 atmosférico.

La cantidad de carbono existente en las reservas de carbón e hidrocarburos es de unos 5.000 – 10.000 Gt.

Pero la mayor reserva de carbono existente se encuentra en la caliza. Su origen, como hemos visto, son los sedimentos de los esqueletos calcáreos de los organismos de los mares de antiguas eras geológicas (20 M de Gt de carbono). En el origen, todo este carbono se encontraba en la atmósfera terrestre en forma de CO_2 . Fueron los cambios biológicos los que fueron modificando su composición.

2.7 Péndulo de Foucault. La demostración de que la Tierra gira alrededor del sol

Hubo que esperar hasta 1851 para lograr demostrar fehacientemente que la Tierra estaba en movimiento y giraba alrededor de sí misma. Hasta entonces era solo una hipótesis que no había logrado demostrarse. Lo logró Foucault en París.



Figura 55: Foucault 1819-1868. Además de su famosa demostración con el péndulo, logró fotografiar el sol, midió la velocidad de la luz y descubrió las corrientes eléctricas que llevan su nombre.

El péndulo de Foucault no hace más que utilizar el principio de inercia para demostrar el giro de la Tierra sobre sí misma.

Para que sea más intuitivo y fácil de entender, imaginemos que estamos justo en el polo Norte. Y ponemos en movimiento un pesado péndulo. El péndulo va a tender a moverse siempre en la misma dirección. Sin embargo la Tierra va a seguir moviéndose alrededor de sí misma, de manera que quedará en evidencia.



Figura 56: Péndulo de Foucault en el polo Norte. Es fácil ver como al girar la Tierra el péndulo de Foucault va a seguir moviéndose en la misma dirección siempre. Sin embargo, si eres un esquimal en el polo Norte (que no es consciente de que la tierra gira) lo que percibirás es que el péndulo va girando poco a poco hasta dar una vuelta completa a lo largo del día. En el dibujo se ve que cuando van pasando las horas la Tierra va girando pero el péndulo no, por eso cada vez el péndulo apunta a un lugar distinto de la Tierra.

Esta fue la primera demostración experimental del giro de la Tierra, dado que, hasta ese momento, cualquier experiencia podría llegar a explicarse bien por el movimiento de las bóvedas de Ptolomeo (o incluso con bóvedas más complejas que llegaran a encajar perfectamente con los datos astronómicos), o bien por el movimiento de la Tierra del modelo de Copérnico y Galileo, perfeccionado por Newton. Evidentemente, aunque no existiera aún demostración fehaciente, en época de Foucault ningún hombre de ciencia dudaba de que la Tierra se movía, pero aún estaba pendiente su demostración.

2.8 El régimen general de los vientos en la tierra

¿Qué es el viento? El aire en movimiento. Esto es de lo primero que aprendemos en clase. Todos lo sabemos. Pero ¿por qué se mueve? Esta pregunta es mucho más interesante.

El hecho es que para que algo se mueva debe tomar su energía de algún sitio. De hecho el viento al moverse puede producir energía (aerogeneradores). ¿De dónde obtiene el viento su energía?



Figura 57: Los aerogeneradores captan la energía del viento y la convierten en energía eléctrica. ¿Pero de dónde obtiene el viento la energía?

Ya vimos que todo lo que se mueve en este planeta y todo lo que tiene vida obtiene su energía en última instancia del sol. Y el viento no es una excepción. Pero no basta con calentar el aire para que el aire se mueva. Cuando estamos en una habitación bien calentitos el aire no se mueve. ¿Entonces por qué se mueve el aire en la tierra?

Todo lo que fluye se mueve desde puntos de más energía a menos energía. El agua de un río va desde las montañas (altas) al mar (bajo), y el viento va desde un lugar de alta presión a un lugar de baja presión.

¿Pero por qué hay lugares en la tierra con más presión y otros con menos presión atmosférica? La clave para esta respuesta es tener en cuenta que el sol no incide de manera igual en cada punto del globo. En el ecuador calienta de manera directa la superficie, mientras que en los polos los rayos inciden de manera casi tangencial y apenas calientan. El aire caliente del ecuador tiende a ascender (el aire caliente pesa menos) y deja un hueco (es decir crea una especie de vacío que llamamos baja presión) y el aire frío que viene del norte ocupa su lugar, empujado por una acumulación de aire que se produce en los polos (alta presión). Es decir la circulación general de la atmósfera va de los polos (altas presiones) al ecuador (baja presión).

Es por tanto la diferencia de incidencia solar entre el polo y el ecuador la que pone en movimiento el régimen general de los vientos.

Por tanto, como norma general, los vientos provienen de los polos y por tanto son fríos.

LA FUERZA DEL VIENTO



Figura 58: Esquema simplificado del régimen general de vientos

Es decir, la energía que mueve el aire es consecuencia de que la tierra es redonda, que es lo que hace que en los polos se reciba menos calor que en el ecuador.

¿Pero influirá de alguna manera el hecho de que la tierra gire alrededor de sí misma?

La fuerza de Coriolis

Tengamos en cuenta el hecho de que la Tierra gira alrededor de sí misma. Lo hace de manera que, obviamente, tanto en el Norte como en el ecuador tarda 24 h en dar la vuelta completa. Sin embargo en el ecuador el radio de giro es mucho mayor (6,370 km de radio) que en el polo Norte (donde tan solo son unos metros). El perímetro del ecuador es $P = 2\pi r = 40,000$ km. Por tanto en el ecuador giramos a una velocidad de $40,000/24 = 1.666$ Km/h.

¿Cómo influye el giro de la tierra en los vientos?

El efecto CORIOLIS

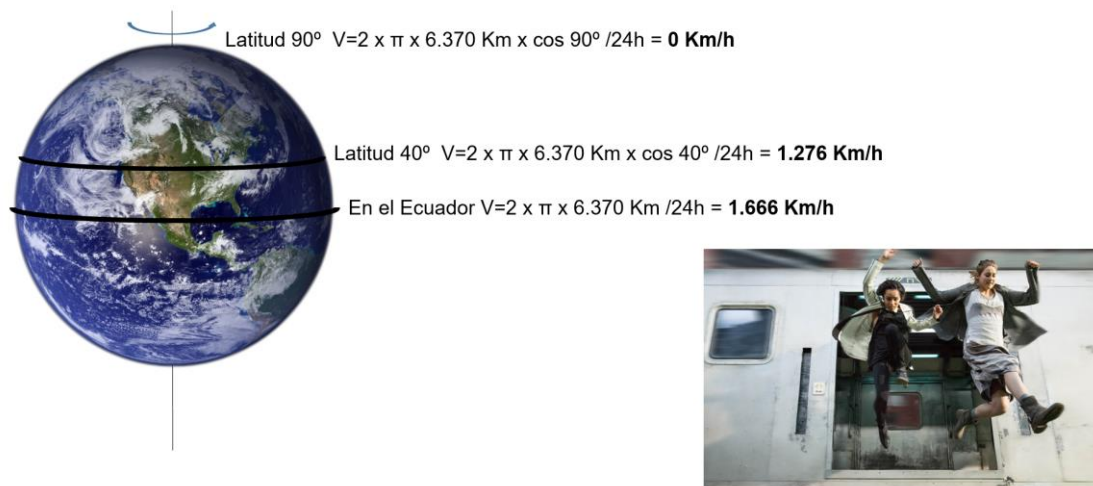


Figura 59

Según avanzamos del ecuador al polo por un meridiano, la velocidad a la que giramos se va reduciendo. Cuando llegamos al polo, la velocidad a la que giramos es casi nula. Esto provoca que cuando nos alejamos del ecuador hacia el polo tenemos una cierta tendencia a desviarnos hacia el Este (por la inercia que traemos del movimiento que teníamos). Y cuando nos movemos hacia el ecuador desde los polos nos vamos quedando retrasados y nos vamos desviando hacia el Oeste (porque en el Sur la tierra se mueve más rápido hacia el Este que la velocidad de giro que llevábamos nosotros que venimos del polo).

Es el mismo efecto que si nos tiráramos de un tren en marcha. Al caer al suelo seguiríamos rodando un buen tramo en la dirección en que se movía el tren.

Por tanto el efecto general es el siguiente:

Los vientos vienen del polo hacia el ecuador, debido a que la tierra es redonda y se desvían hacia el Oeste debido a que la tierra gira.

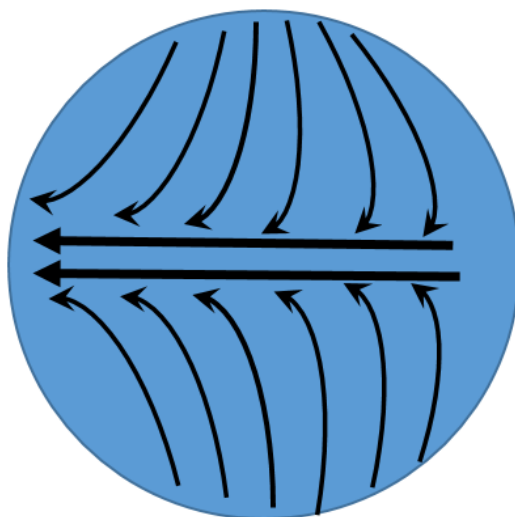


Figura 60: Formación de los vientos alisios debido a la fuerza de Coriolis

Por tanto en el entorno del ecuador veremos un viento generalizado del Este al Oeste. Estos vientos son los vientos alisios. Y son precisamente los que utilizó Cristobal Colón para, saliendo desde las islas Canarias, dirigirse hacia el Oeste. El ya conocía la existencia de estos vientos debido a su experiencia en los viajes a las islas, y a sus conversaciones con los marinos portugueses que en aquella época se aventuraban a intentar buscar un camino bordeando África.

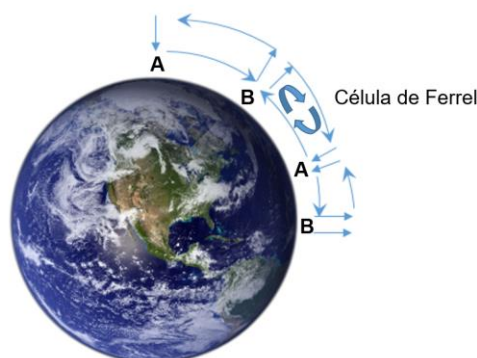


Figura 61: Cristobal Colón conocía la existencia de los vientos alisios y por eso partió desde las Canarias para dirigirse hacia el Oeste.

Pero queda pendiente explicar una singularidad importante que se da aproximadamente a la latitud de 60° . La célula de Ferrel.

En efecto, lo que hemos visto hasta ahora es un modelo simplificado del régimen general. Se da la circunstancia de que existe una interrupción del esquema general en esa latitud. Parece como si la enorme distancia que separa el polo del ecuador provocara una especie de intervalo.

La singularidad de la CELULA DE FERREL



A. Alta Presión (anticiclón). El aire desciende y genera "alta presión" contra la superficie de la tierra. Al descender se calienta y genera buen tiempo

B. Baja Presión (borrasca). El aire asciende y genera "baja presión" en la superficie de la tierra. Al ascender se enfría y se producen lluvias y/o tormentas

Figura 62: Se aprecian las tres células de viento. Baja presión en el Ecuador (el aire asciende), alta presión a 30° de latitud, baja presión a 60° y Alta presión en el polo.

En efecto, entre la latitud de 30° y 60° se dan alteraciones de bajas y altas presiones. El aire asciende en los 60° (baja presión) y desciende a los 30° (alta presión). Se da así una circulación anómala de vientos que vienen en dirección a los polos entre los 30° y los 60° . Pero ya conocemos qué sucede con los vientos que vienen del ecuador hacia los polos, ¿qué les sucede? Que se desvían hacia el Este debido a la fuerza de Coriolis.

Por tanto en esas latitudes serán típicos los vientos del SurOeste.

Ahora ya podemos dibujar un esquema general de vientos del globo:



Figura 63

Por tanto, el globo terrestre tiene altas presiones (borrascas) y bajas presiones (anticiclones) en cada uno de los hemisferios. En el ecuador tendremos borrascas (el aire asciende hacia las capas altas de la atmósfera), a 30° de latitud tendremos anticiclones (el aire desciende), a 60° tendremos de nuevo borrascas (el aire asciende) y finalmente en el polo tendremos anticiclones (el aire desciende).

Cuando el aire asciende hacia las capas altas de la atmósfera, se enfría (asciende a alturas superiores). Y el aire al enfriarse tiene una capacidad inferior para disolver el vapor de agua (presente en el aire de manera transparente), de manera que si la temperatura desciende por debajo de la temperatura de rocío, el vapor de agua se condensa y se convierte en líquido (microgotas líquidas en suspensión que forman las nubes). Cuando estas microgotas se juntan con otras, forman gotas de una mayor dimensión, no siendo ya capaces de seguir en suspensión, y entonces caen al suelo (lluvia).

Por tanto, siempre que el aire se enfríe tendremos la posibilidad de lluvias y tormentas. Esto se da en el ecuador y en la latitud de 60° aproximadamente. Es en estas latitudes donde se dan las principales borrascas del planeta (son estas latitudes las más húmedas) (descartando efectos locales debidos a montañas).

Pero sabemos todos que en las borrascas y los anticiclones el aire tiene un movimiento casi circular. Veamos ahora como se forman:

A la latitud de 60° nos encontramos con un choque de aire caliente que viaja hacia el polo, y otro de aire frío que viene del polo. El que viene del polo tiende a desviarse hacia el Oeste, y el otro se desvía hacia el Este. Este choque de aire produce un “remolino” que gira en el hemisferio Norte en el sentido de las agujas del reloj y en el hemisferio Sur en el sentido contrario.

A la latitud de 30° el aire desciende desde alturas superiores de la atmósfera y una parte viaja hacia el polo (desviándose hacia el Este) y otra parte viaja hacia el Ecuador (desviándose hacia el Oeste). Esto forma un remolino que gira en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio Norte, y en el sentido contrario en el hemisferio Sur.

La singularidad de la CELULA DE FERREL

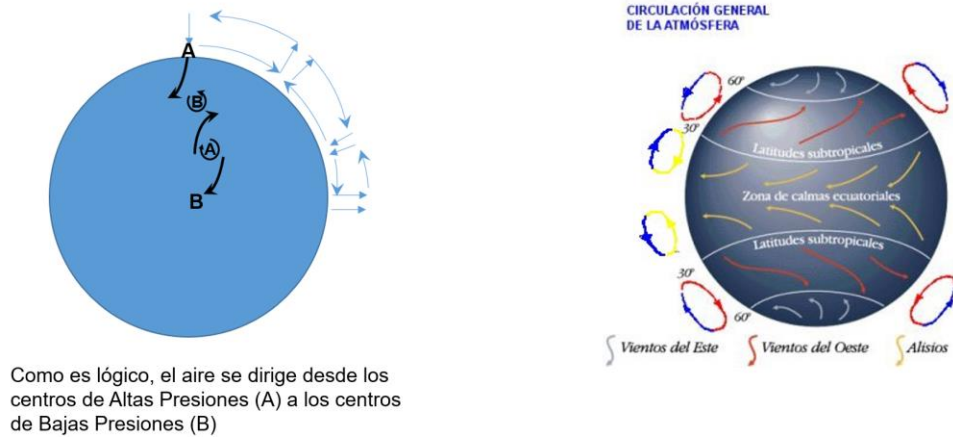


Figura 64: Formación de los anticiclones y los ciclones (borrascas)

Únicamente queda ahora entender que, debido a la inclinación del eje de la tierra y el giro de la tierra alrededor del sol, en Diciembre tenemos al sol dando de lleno en el Polo Sur, y en Junio dando al Polo Norte. Es decir, “el polo climático” y el “ecuador climático” van variando su posición.

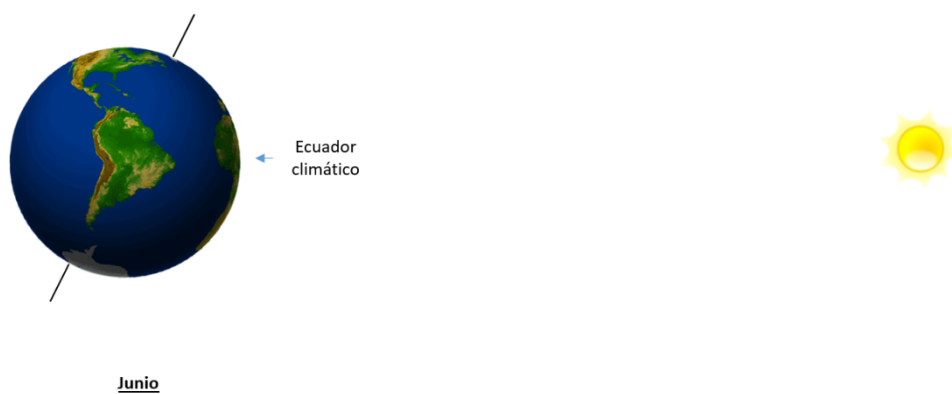


Figura 65: En junio el Ecuador climático se encuentra en el Hemisferio Norte

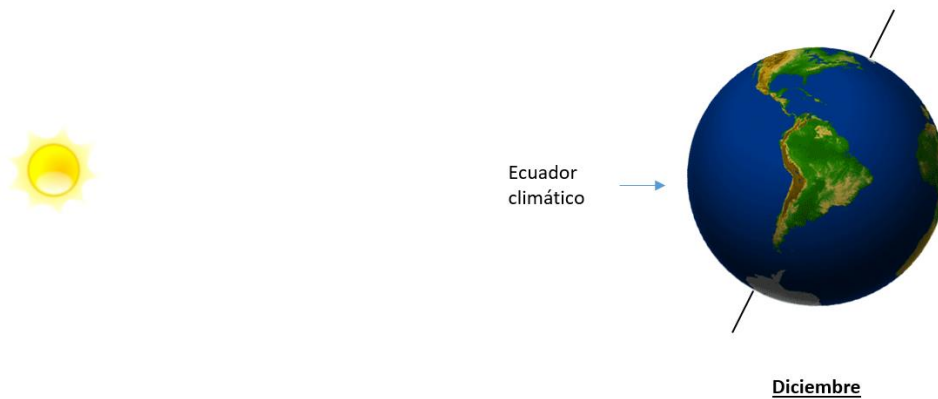


Figura 66: En diciembre el Ecuador climático se encuentra en el Hemisferio Sur

Es decir, todo el sistema general de vientos que hemos descrito va rotando hacia el Sur cuando nos acercamos a Diciembre y va rotando hacia el Norte cuando nos acercamos a Junio.

Por tanto, las borrascas de latitud 60° pueden alcanzar latitudes más bajas en torno a Diciembre. Y los anticiclones de latitud 30° pueden alcanzar latitudes mucho más altas a finales de Junio.

RECUERDA:

Los vientos que van hacia los polos se desvían hacia el Este (son vientos del Oeste).

Los vientos que van hacia el Ecuador se desvían hacia el Oeste (son vientos del Este) (Alisios)

En el Hemisferio Norte los anticiclones giran en el sentido de las agujas del reloj y las borrascas giran en el sentido anti-horario. En el Hemisferio Sur se da al revés.

PRACTICA:

Eres Cristobal Colón. Has descendido hasta las islas Canarias para tomar los vientos alisios que sabes que siempre soplan hacia el Oeste y que te llevarán hasta la China. Has alcanzado unas islas que estás convencido de que son parte del archipiélago de Japón. Ahora tienes que volver ¿Cómo vuelves si el viento que te ha traído sopla siempre hacia el Oeste y tú quieres volver al Este?

Que el viaje de Cristobal Colón saliera bien es absolutamente sorprendente. Primero consiguió convencer a los reyes católicos que, finalmente, le dijeron que no le dedicarían recursos hasta conquistar Granada. Una vez conquistada Granada en 1492 le ceden tres barcos. A los problemas de la disciplina de los marineros había que sumarle el innegable hecho de que la Tierra se empeñaba en ser mucho más grande de lo que él había calculado, ¡muchísimo más! De hecho, si no hubiera existido el continente americano con toda seguridad se los habría tragado el Atlántico.

Pero lo realmente sorprendente es que al volver, tuvieron la habilidad de volver por la ruta del Norte, donde en efecto encontraron vientos generalizados del Oeste que les llevaban rumbo a casa, pero.... Ya hemos visto que en esas latitudes se dan las borrascas...

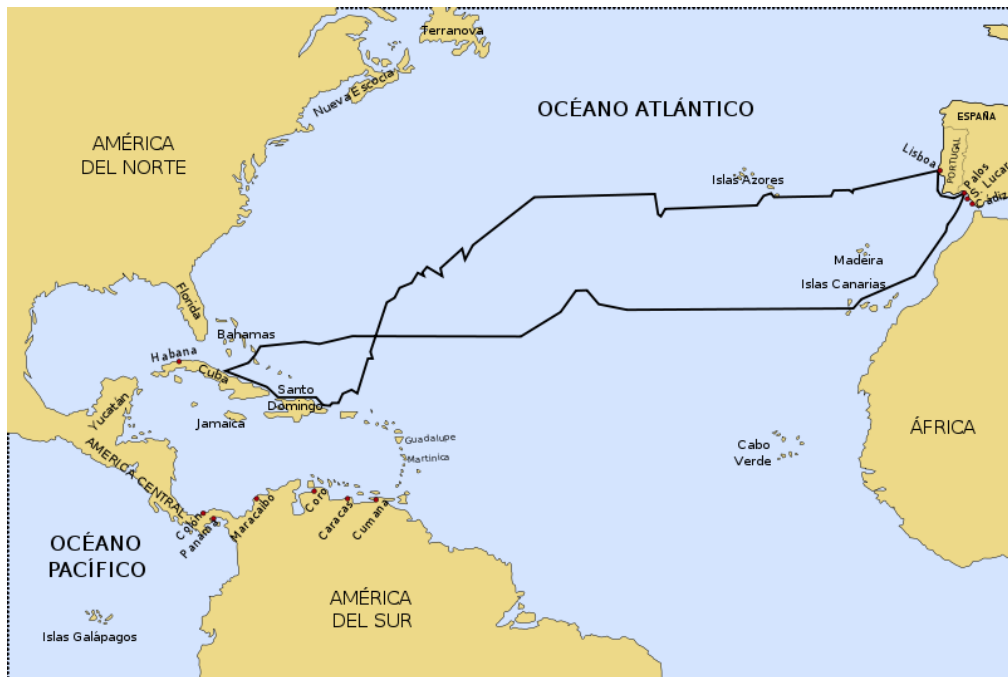


Figura 67: Primera ruta de Cristóbal Colón. Vemos como nada más abandonar la isla de Santo Domingo se dirige radicalmente hacia el Norte para buscar vientos dominantes del Oeste

En efecto, Cristobal Colón, después de pasar las navidades abandona la isla e inicia el viaje de vuelta el 15 de Enero. Mala época para viajar si te diriges hacia el Norte en la búsqueda de vientos del Oeste que te devuelvan a casa. Como hemos visto en Enero las borrascas descienden a latitudes más bajas y Colón se encontró de lleno con ellas en pleno Atlántico.

El 14 de Febrero se ven envueltos en una peligrosa tempestad que a punto estuvo de hundir los dos barcos. De hecho les separó para todo el viaje. Pinzón llegó a Galicia y Colón alcanzó Lisboa.

2.9 Otros fenómenos astronómicos interesantes observables en la Tierra

Arcoíris.

El arcoíris significa literalmente “arco de luz”. Es lógico pensar que algo tan maravilloso se hubiera relacionado desde antiguo con los dioses.

(Génesis 9, 12-17) Esta es la señal del pacto que hago entre yo y vosotros y todo ser viviente que está con vosotros, por todas las generaciones



Figura 68: Arcoíris primario. Se ve también el arcoíris secundario en la esquina derecha de la imagen

Fue la mente privilegiada de Newton quien logró demostrar la transformación de la luz blanca en el espectro de colores. Pero ¿por qué es un arco?

La luz que proviene del sol entra en la gota, que está en suspensión en el aire, y al refractarse (entrar en la gota), reflejarse (en la segunda pantalla de la gota) y volver a refractarse (al salir de la gota) cambia su dirección, de manera que vuelve con un giro de 42° hasta nuestros ojos.

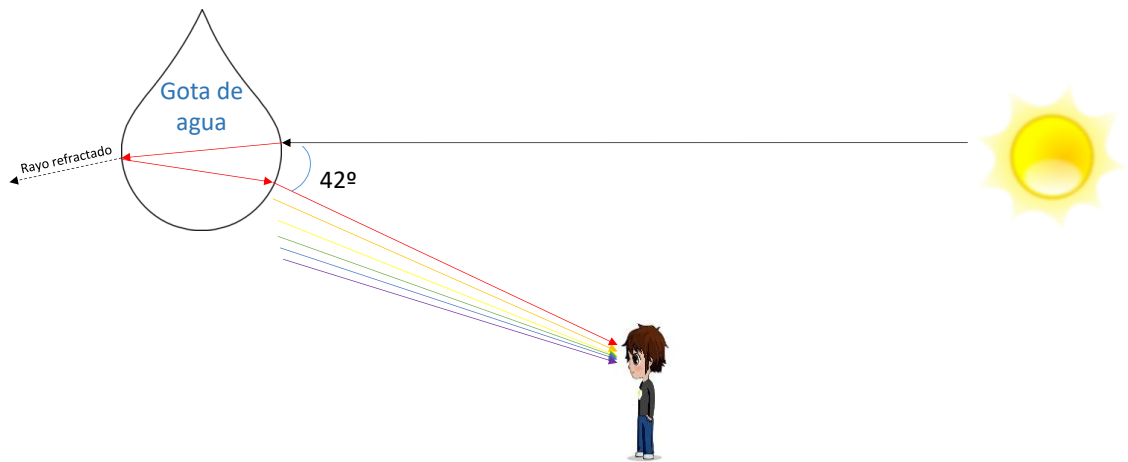


Figura 69

En realidad el rojo se refracta con un ángulo un poquito mayor que 42° y el violeta con un ángulo un poco menor (y cada color con un ángulo un poco distinto). Por este motivo se produce el espectro de color.



Figura 70

Se comprende ahora fácilmente porque siempre que veamos el arcoíris tendremos el sol a nuestra espalda. También se comprende así que será mucho más fácil que veamos el arco iris al amanecer o al atardecer, cuando el sol está bajo cerca del horizonte (además el arco iris se verá más completo y más alto).

Seguro que muchas veces habéis visto además un segundo arcoíris que se ve un poco menos nítido. Fijándonos bien se puede ver que tiene los colores invertidos. ¿Cómo se produce este segundo arcoíris y por qué tiene los colores invertidos?

Como hemos visto, para la formación del arcoíris primario la luz solar entra en la gota de agua (que está en suspensión en el aire o en caída) al atravesar la primera pared de agua se refracta (aquí se produce la primera división de la luz porque los distintos colores se refractan con distintos ángulos), luego se refleja en la pared opuesta, por último se refracta una vez más al salir de la gota. Téngase en cuenta que en la reflexión se ha perdido parte de la intensidad de la luz (porque parte de la luz atraviesa la gota y sigue su camino como rayo refractado)

En el caso del arcoíris secundario se producen tres reflexiones internas en la gota. En cada reflexión se produce un rayo refractado y por eso el arcoíris secundario es más débil. El arco que sale finalmente hacia nuestros ojos tiene una desviación respecto al rayo original de 52° , por eso es más externo que el primario.

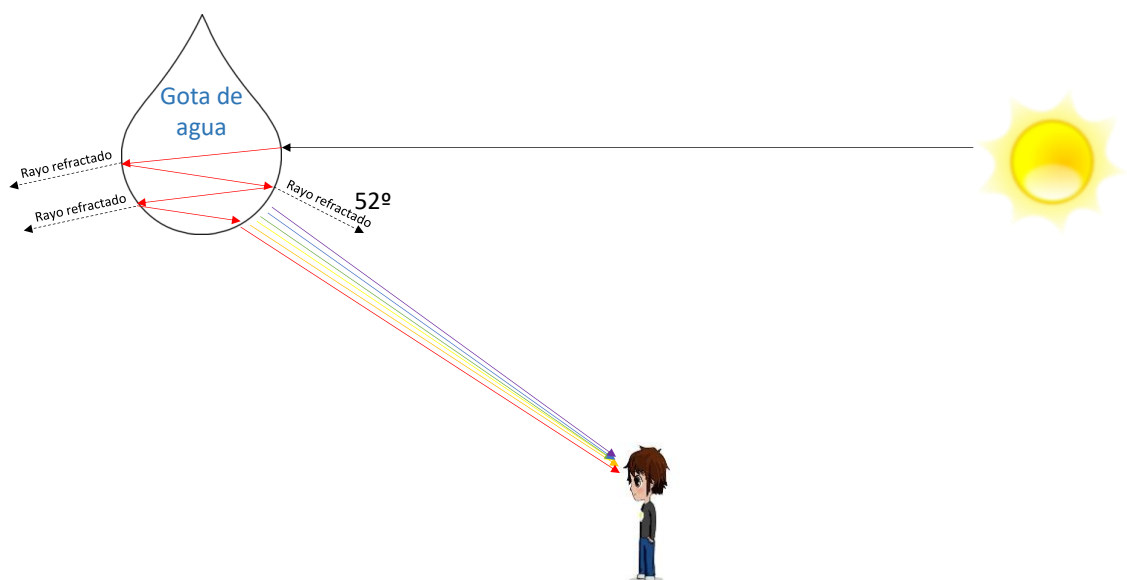


Figura 71: Explicación del arcoíris secundario

Estrellas fugaces y meteoritos.

Las estrellas fugaces no son en realidad estrellas, ni muchísimo menos. Son partículas de polvo espacial que son atraídas por la gravedad terrestre que, al entrar en contacto con la atmósfera, entran en incandescencia debido al rozamiento.

Cuando estos materiales son suficientemente grandes como para no desintegrarse en su entrada atmosférica, se llaman meteoritos.

Las fechas más interesantes para observar lluvias de estrellas, todos saben que es el 12 de agosto (Perseidas) y el 13 de diciembre (Gemínidas), pero pocos saben por qué.

En realidad estas partículas siguen las órbitas de los cometas de que formaban parte. El 12 de agosto la Tierra pasa muy cercana a la órbita del cometa Swift-Tuttle.

¿Pero por qué hay en ese punto siempre partículas si el cometa se encuentra a muchos millones de kilómetros de distancia?

Esto se debe a que el “tubo” por el que viajan estas partículas siguiendo la órbita del cometa es ancho. Todas ellas provienen del cometa, pero unas han quedado en una órbita un poco más externa y otras un poco más interna. La velocidad a la que giran por dicha órbita no depende de su tamaño pero sí depende de su distancia al sol (esto lo veremos en próximos cursos). De manera que las que están un poco más cerca del sol van más rápidas. Al final unas han adelantado a otras después de dar un buen número de vueltas, y ahora toda la órbita del cometa se encuentra plagada de este tipo de partículas de polvo.

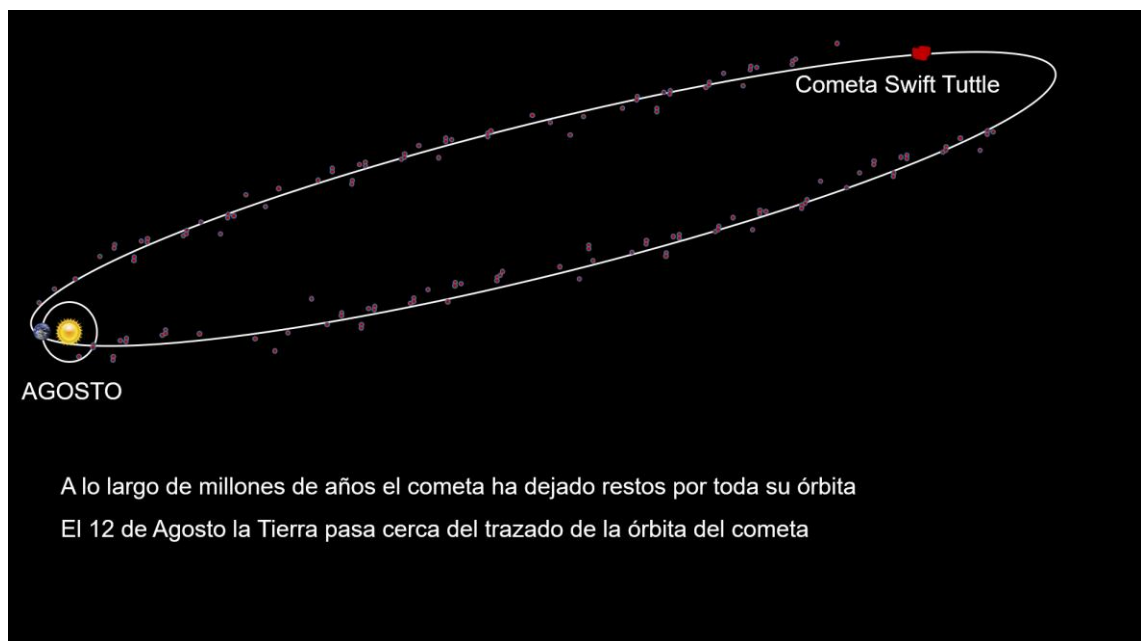


Figura 72

¿Pero por qué se llaman Perseidas?

Como sabemos el 12 de Agosto el sol no se encuentra en Perseo (que ni siquiera está en la eclíptica). La lluvia de estrellas de ese día se llama “Perseidas” porque las estrellas fugaces parecen salir en todas direcciones desde la constelación de Perseo.

En realidad lo que ocurre es que el día 12 de Agosto, el punto más cercano de la órbita del cometa se encuentra mirando a Perseo. Y por tanto de esa dirección provienen todas estas partículas que son atraídas por la gravedad terrestre. El efecto de que las estrellas parezcan separarse en todas direcciones de la constelación de Perseo es debido a un efecto de perspectiva (semejante al efecto de las aceras de una calle larga y recta), en realidad vienen todas paralelas contra nosotros.



Figura 73



Figura 74: Perseidas: Parecen salir disparadas en todas direcciones desde la constelación de Perseo

Debo reconocer que el efecto pictórico de las estrellas fugaces siempre me ha maravillado. En una noche despejada en el campo, cuando vemos todo el firmamento de estrellas, las estrellas fugaces parecen ¡realmente eso! ¡Estrellas que se mueven como bólidos! Sin embargo, la naturaleza de las estrellas fugaces y de las estrellas del firmamento no puede ser más distinta (unas son granitos de polvo, las otras son inmensas bolas de millones de kilómetros de gas ardiendo en un horno nuclear a una distancia de millones de años luz). Es una increíble casualidad que se produzca ese efecto pictórico tan bello ¿no creéis?

Obviamente no todos los meteoros son tan inofensivos. Ya sabemos de alguno que provocó la extinción de los dinosaurios hace 65 Millones de años. Pero no hace falta irse tan lejos en el tiempo. Hace solo 50,000 años, cuando estábamos en Europa en plena batalla por la supervivencia con el hombre de Neanderthal, se estrelló en la actual Arizona un meteorito de hierro compacto del tamaño de un edificio de 17 pisos. La velocidad a la que se estrelló fue de 12 km/s según los científicos. Pronto sabremos demostrar en el siguiente curso que en efecto esa es la velocidad más probable con la que impactó.

Aunque el meteorito tenía solo 50 m de diámetro, el cráter que formó tiene ¡1,200 metros de diámetro y 170 metros de profundidad!



Figura 75: Cráter Barringer. Arizona

Pero este cráter es de juguete si lo comparamos con el cráter de Chicxulub, en la península del Yucatán. ¡Este cráter tiene 180 Km de diámetro! y 65 Millones de años de antigüedad. Es la huella del asteroide que impactó contra nuestro planeta y causó la extinción de los dinosaurios.



Figura 76

Se calcula que el meteorito que formó este cráter tenía ¡10 km de diámetro! Si el meteorito que formó el cráter de Arizona tenía 50 m de diámetro podemos hacernos una idea de su capacidad destructiva. Como consecuencia del impacto, ingentes cantidades de materiales se propagaron por la atmósfera oscureciendo el cielo y enfriando el planeta.

Pero incluso el meteorito que provocó la extinción de los dinosaurios queda ridículo en tamaño en comparación con el cometa Swift Tuttle (el que antes comentábamos que provocaba la lluvia de estrellas de las Perseidas).

El tamaño de este cometa es de 26 km de diámetro y, dado que su trayectoria pasa realmente cerca de la Tierra, se le considera el objeto más peligroso del universo. Téngase en cuenta que la extinción de los dinosaurios la provocó un asteroide de “solo” 10 km de diámetro.

A continuación mostramos unos sencillos cálculos de la energía destructiva de cada uno de los meteoros mencionados y su equivalente en bombas atómicas.

CRATER BARRINGUER. ARIZONA			
Densidad del hierro	7.800	kg/m ³	
Radio del asteroide	25	m	
Volumen del asteroide	65.417	m ³	
Masa del asteroide	510.250.000	kg	
Velocidad del asteroide	12.000	m/s	
Diámetro del cráter	1.200	m	
Energía cinética del asteroide	4,E+16	julios	
Hiroshima	6,27E+13	julios	
Energía del asteroide	586	bombas de Hiroshima	
CRATER YUCATAN. MEXICO			
Densidad del hierro	7.800	kg/m ³	
Radio del asteroide	5.000	m	
Volumen del asteroide	523.333.333.333	m ³	
Masa del asteroide	4.082.000.000.000.000	kg	
Velocidad del asteroide	12.000	m/s	
Diámetro del cráter	180.000	m	
Energía cinética del asteroide	3,E+23	julios	
Hiroshima	6,27E+13	julios	
Energía del asteroide	4.687.464.115	bombas de Hiroshima	
SWIFT TUTTLE			
Densidad del hierro	7.800	kg/m ³	
Radio del asteroide	13.000	m	
Volumen del asteroide	9.198.106.666.667	m ³	
Masa del asteroide	71.745.232.000.000.000	kg	
Velocidad del asteroide	60.000	m/s	
Diámetro del cráter	1.176.928	m	
Energía cinética del asteroide	1,E+26	julios	
Hiroshima	6,27E+13	julios	
Energía del asteroide	2.059.671.732.057	bombas de Hiroshima	

Figura 77