

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**“GENESIS Y EVOLUCION DEL CLIMA”**

**Realizado por:**

**ATAGUA CEDEÑO, ALESSANDRO LAOREANO  
CUNES POREZA, JUAN CARLOS**

**Monografía de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como  
Requisito Parcial para optar al Título de:  
INGENIERO CIVIL**

**Barcelona, Abril de 2010**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**“GENESIS Y EVOLUCION DEL CLIMA”**

**Realizado por:**

---

ATAGUA C, ALESSANDRO L.

---

CUNES P, JUAN C.

**Revisado y aprobado por:**

---

PROF. ENRIQUE MONTEJO  
**Asesor Académico**

**Barcelona, Abril de 2010**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**“GENESIS Y EVOLUCION DEL CLIMA”**

**Jurado calificador:**

---

Prof. Luisa Torres  
**Jurado Principal**

---

Prof. José Sosa  
**Jurado Principal**

**Barcelona, Abril de 2010**

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo al artículo 57 del reglamento de trabajo de grado: “Para la aprobación definitiva de los cursos especiales de grado como modalidad de trabajo de grado, será requisito parcial la entrega a un jurado calificador, de una monografía en la cual se profundice en uno o más temas relacionados con el área de concentración”

## DEDICATORIA

A mi Dios todo Poderoso, por darme la fortaleza y perseverancia para vencer todas las adversidades, y lograr mis objetivos propuestos.

A mis padres, Rubén Darío y Nilsa Alcida, por su gran amor, dedicación, paciencia, y su apoyo incondicional que me han brindado durante todo este tiempo.

A mi esposa e hija, por ser factores fundamentales para la culminación de mi carrera.

A mi hijo Alessandro junior

A mis abuelos, por su apoyo en todo momento.

Finalmente, a todas las personas que de una u otro forma han influido en mi vida, las que siguen estando y las que ya no están.

*Alessandro Laoreano Atagua Cedeño*

## DEDICATORIA

A Dios sobre todas las cosas a quién le debo todo lo que he realizado y por estar siempre conmigo.

A mi familia, especialmente a mis Padres por darme la vida y muy especialmente a mi Madre por ser el apoyo Y pilar en todo momento.

A mi Pareja por ser paciente en todo momento.

A mis Abuelos por estar presentes en mi vida, a mis Hermanos, Tíos y primos.

A todos ellos les DEDICO ESTE TRIUNFO.

*Juan Carlos Cunes Poreza*

## **AGRADECIMIENTO**

A mi dios todo poderoso, a mis padres por darme su apoyo incondicional en este largo camino que me ha tocado recorrer.

A mis abuelas, Ovidia y Amancia, gracias por su amor, por el apoyo que siempre me han brindado y sus buenos consejos.

A mis abuelos, Antonio y Narciso, aunque ya no estén presentes, gracias por haber forjado la familia que tenemos.

A mi esposa e hija siendo mi inspiración mis dos amores.

A todos mis hermanos, tíos, primos por estar constantemente presentes, a ellos mil gracias por dedicar siempre parte de su tiempo en buscar mi bienestar y el de cada miembro de la familia.

A todos mis amigos, que han estado conmigo en las buenas y en las malas.

*Alessandro Laoreano Atagua Cedeño*

## **AGRADECIMIENTO**

Antes que todo agradezco a Dios, los santos, mis padres Nuvia Poreza y Silvio Cunes, por enseñarme a luchar en esta vida llena de adversidades, a conquistar las metas que me proponga hasta agotar los recursos que sean necesarios, a estar conmigo cuando he caído y motivarme a seguir adelante, por brindarme su confianza y sus consejos que sirvieron de ayuda para comprender y entender mejor las cosas, por brindarme la fortaleza estímulo necesario para la elaboración de mi Trabajo Especial de Grado, a mis padres por ser más que eso, mis amigos y hermanos.

A mi abuela, Olga María que siempre ha estado presente en mis mejores y peores momentos y a mis abuelos fallecidos; Luis Mariano, Pedro Ramón Y María que aunque no estén en vida, en mi corazón siempre estarán, ya que guían y cuidan de mi en cada paso que doy.

A mis tíos; por su ayuda incondicional y de manera desinteresada con conmigo, por extenderme la mano cuando más lo necesitaba, por ser grandes consejeros.

A mis Hermanos y Primos; Por los momentos compartidos y por sus palabras de aliento cuando era necesario, por ser la muralla china llena de fortaleza y de infinita alegría, dejando grabado en mi mente momentos de emoción que perduraron y fueron la catapulta en mis momentos de tristeza enseñándome que así como hay días sin brillo hay otros llenos de muchos colores, los tengo a todos presentes aunque no haga mención de algunos.

A toda mi familia, en especial a mi Pareja Neiva, por enseñarme a



enfrentar los obstáculos con alegría y por grabar en mi mente muchos detalles llenos de felicidad, y el apoyo incondicional que me ha dado a lo largo de nuestra relación, sirviéndome de guía para luchar por mis metas y concluir una de las etapas de gran importancia en mi vida, ser un profesional.

A mis compañeros de estudio y especialmente a Sandro, por ser paciente conmigo, por ayudarme a seguir adelante y darme su apoyo, además de compartir las angustias y gratificaciones durante estos años de estudios.

A Mi institución, Universidad De Oriente Anzoátegui que es nuestro hogar de estudio, y por haberme impartido la enseñanza Gracias.

A mis profesores por ser el ejemplo y guía a seguir llenándonos de optimismo en todo momento para que nunca desmayemos.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de este proyecto, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

*Juan Carlos Cunes Poreza*

## RESUMEN

La variabilidad climática es un fenómeno que esta presente en el planeta desde su formación hace 4.500 millones de años aproximadamente.

Gracias a esta variabilidad en el clima se produjeron los efectos invernaderos y se genero vida en la tierra con la aparición de la primera cianobacterias que a medida que el clima fue cambiando estas fueron evolucionando.

En la variabilidad climática tienen que ver muchos factores entre ellos los geológicos y los astronómicos, siendo los geológicos más resaltantes los siguientes: las erupciones volcánicas y la deriva continental. En los factores astronómicos se pueden resumir tres factores esenciales: excentricidad de la orbita terrestre, oblicuidad del planeta y precisión de los equinoccios

## CONTENIDO

RESOLUCIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vii
RESUMEN.....	x
CONTENIDO .....	xi
INDICE DE FIGURAS.....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	xvii
CAPÍTULO I.....	18
EL PROBLEMA.....	18
1.1 Planteamiento del Problema.....	18
1.2. Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo General .....	19
1.2.2. Objetivos Específicos .....	19
CAPÍTULO II.....	20
CLIMA, ELEMENTOS Y FACTORES .....	20
2.1 Clima .....	20
2.2 Factores geográficos del clima .....	22
2.3 Flujo de energía.....	26
2.3 zonas climáticas geodésicas .....	28
2.4 Zonas climáticas de Köppen.....	30
2.6 Análisis del clima, climatología .....	30
2.7 La atmósfera enfoque sistémico.....	33
CAPÍTULO III.....	36
FACTORES ASTRONÓMICOS Y GEOLÓGICOS DEL CLIMA.....	36
3.1 Movimiento de rotación.....	36
3.2 Movimiento de traslación .....	37

3.3	Movimiento de precesión.....	38
3.4	Movimiento de nutación.....	38
3.5	Bamboleo de Chandler .....	39
3.6	Ciclos milankovitch .....	39
3.6.1	Excentricidad de la Orbita Terrestre.....	40
3.6.2	Oblicuidad del Planeta .....	42
3.6.3	Precesión de los equinoccios.....	43
3.7	Actividad volcánica .....	45
CAPÍTULO IV.....		49
HISTORIA DEL CLIMA TERRESTRE .....		49
4.1	Precámbrico .....	49
4.2	Era Primaria.....	50
4.3	Era secundaria .....	53
4.3	Triásico: aridez y calor en Pangea .....	53
4.3.4	Jurásico y Cretácico: el clima de los dinosaurios .....	55
4.4	Era Terciaria .....	62
4.4.1	El clima muy cálido del principio del Terciario.....	62
4.4.2	Eoceno medio: comienza el enfriamiento.....	63
4.4.3	El clima cambiante del Mioceno.....	64
4.4.4	El clima cálido del Plioceno.....	66
4.4.5	Enfriamiento final y transición al Cuaternario .....	66
4.5	Pleistoceno .....	67
4.5.1	Cuaternario .....	67
4.5.2	Características del Interglacial Eemiense. ....	68
4.5.3	Cuándo y dónde comenzó el interglacial Eemiense?.....	70
4.5.4	El final del Eemiense.....	72
4.6	La ultima glaciación .....	73
4.6.1	Fases en la última glaciación .....	73
4.6.5	La Desglaciación.....	82

4.7 Holoceno y Clima Reciente .....	85
4.7.1 Humedad y calor en la primera mitad del Holoceno.....	85
4.7.2 Holoceno Medio y Final.....	88
4.7.3 El clima del último milenio .....	92
4.7.4 La complejidad de los factores .....	97
4.7.5 La lluvia y la aridez.....	101
5.2 La Aparición de la Vida en la Tierra.....	105
5.3 Dominio de los dinosaurios.....	108
5.4 La era de los mamíferos .....	109
CAPÍTULO V.....	111
EVOLUCIÓN DEL CLIMA CON LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA.....	111
5.1 Coevolución de la vida con el Clima.....	111
5.2 La Aparición de la Vida en la Tierra.....	111
5.3 Dominio de los dinosaurios.....	114
5.4 La era de los mamíferos .....	116
CAPITULO VI.....	118
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	118
6.1 Conclusiones .....	118
6.2 Recomendaciones.....	119
BIBLIOGRAFÍA.....	120

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Movimientos de la Tierra.....	23
Figura 2. Cambios de presión respecto a la altitud .....	24
Figura 3. Temperaturas en el globo terrestre, en relación a su latitud .....	25
Figura 4. Flujos verticales de energía en watios por metro cuadrado.....	27
Figura 5. zonas climaticas .....	28
Figura.6 Movimiento de rotación.....	36
Figura. 7 Esquema (sin escala) de la traslación de la Tierra alrededor del Sol. ....	38
Figura .8 En 100.000 años la órbita terrestre pasa de ser un círculo casi perfecto a tomar una forma elíptica. ....	41
Figura 9. Dos hipotéticos planetas con diferente inclinación del eje. Cuanto más inclinado está el eje más bruscos son los cambios entre las estaciones. Nótese en el primer caso, la inclinación es poca, los rayos solares llegan a los polos de forma muy oblicua. ....	42
Figura 10. Por el contrario, en el segundo caso incluso los días y las noches tienen duraciones con marcadas diferencias. ....	43
Figura 11. En un período de 26.000 años, el eje terrestre da una vuelta completa alrededor del eje de la eclíptica, que está perpendicular a la órbita.....	44
Factores Geológicos influenciados por el Clima .....	44
Figura 12. Ciclos de Milankovitch. Variaciones en los últimos 500.000 años.....	45
Figura 13. Evolución de los forzamientos radiativos entre 1880 y 2003 según el modelo del GISS (Instituto Goddard de Estudios Espaciales) de la NASA. ....	48
Figura 14. El magma contiene gases disueltos que son liberados por las	

erupciones hacia la atmósfera, estos gases normalmente tóxicos y peligrosos los cuales producen las lluvias acidas.....	48
Figura 15. Eras y periodos en que se divide el eón Fanerozoico .....	51
Figura 16. Yacimiento paleontológico de Burgess Shale, en Canadá .....	53
Figura 17. Mapa de Pangea. Triásico, principios de la Era Secundaria, hace 250 millones de años. ....	54
Figura 18. El Cretácico Medio, hace unos 100 millones de años.....	56
Figura 19. Meteorito de Chicxulub .....	61
Figura 20. Ubicación del Decán.....	62
Figura 21. Isotópos del carbono (d13C).....	65
Figura 22. Plioceno Medio .....	66
Figura 23. Representación grafica del dO <sup>18</sup> en función del tiempo.....	68
Figura 24. Diferencias de temperatura en Julio (en°C) entre el 125.000 BP y el presente preindustrial (ref.: Kaspar, 2005).....	69
Figura 25. Arriba: Curva de insolación en 65°N durante el mes de Junio en el transcurso de la penúltima glaciación Riss y durante el interglacial Eemiense. Abajo: evolución de 18O durante la penúltima glaciación y durante el Eemiense según los foraminíferos estudiados por <i>SPECMAP</i> y según la caliza de la cueva de Devil's Hole en Nevada.....	70
Figura 26. Inestabilidad climática durante la Ultima Glaciación según el sondeo GISP II de Groenlandia. Interestadiales cálidos señalados con números y episodios Heinrich (suelta masiva de icebergs en el Atlántico Norte) con barras azules. Se señala también la compartimentación temporal en estadios isotópicos marinos (mis). YD es el último período frío: el Younger Dryas (ver mapas de circulación oceánica) .....	76
Figura 27. Diferencias de temperatura (en °C) con respecto al presente de las aguas superficiales del Atlántico Norte durante el Ultimo Máximo Glacial (22 ka), en los meses de Agosto y Febrero, según el proyecto	

CLIMAP realizado en 1976.....	80
Figura 28. Mantos de hielo de Escandinavia, y de Barents y Kara hace 80.000 años (principio de la última glaciación).....	82
Figura 29. Radiación solar media de los meses del verano que incide en el tope de la atmósfera en la latitud 65°N y 65°S, durante los últimos treinta mil años. ....	83
Figura 30. Situación media en Julio en la India y en el Mar de Arabia.....	86
Figura 31. Episodio excepcional del 8.200 BP.....	88
Figura 32. Ubicación Del Mar Negro.....	91
Figura 33. Período Cálido Medieval.....	93
Figura 34. “Paisaje de invierno con trampilla para pájaros” del pintor flamenco Peeter Brueghel “el Viejo” (siglo XVI).....	94
Figura 34. Manchas y ciclos solares.....	96
Figura 35. Enfriamiento durante el Mínimo de Maunder (hacia 1680 BP) según un modelo de circulación general del Instituto Goddard-NASA (Shindell, 2001)). Se representa el cambio de temperatura (temperatura de 1680 BP menos la de 1780 BP).....	97
Figura 36. Diferencias radiativas de las nubes según su altura. ....	98
Figura 37. Precipitación global en los continentes en el período 1950-2000 (referencia: proyecto VASClimo) .....	102
Figura 38. Precipitación media mensual en el conjunto de los continentes desde 1952 hasta 2002 (referencia: proyecto VASClimo) .....	103
Figura 39. Frecuencia anual del número total de ciclones.....	105



## INTRODUCCIÓN

Con el siguiente trabajo se espera aportar un instrumento eficaz para facilitar una información sobre la evolución del clima, y con ello lograr despertar el interés de aprender sobre la historia del clima y como ha evolucionado.

Nuestro objetivo es inducir a los lectores un pensamiento con espíritu ambientalista y que pueda aplicar sus conocimientos en los diferentes ámbitos de su vida, ya que sólo así le otorgarán sentido a lo que se aprende y podrán dar respuestas satisfactorias a los fenómenos climáticos que pueden percibir en sus que hacer diario.

Las unidades desarrolladas en este tema contienen un resumen de los más importantes acontecimientos que han ocurrido en la evolución del clima, desde que se formó la tierra hasta la aparición de las industrias queriendo demostrar con eso que el clima siempre ha variado desde que se creó la tierra hace aproximadamente 4500 millones de años, y no es únicamente por la mano del hombre que están ocurriendo cambios climáticos en el planeta.

Esperamos que este texto sirva de ayuda estimable, para aclarar las confusiones que tiene la mayor parte de la población mundial, ya que cuando hablan de cambios climáticos creen que es algo demasiado peligroso y que es dado por la mano del hombre.

# **CAPÍTULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

La falta de información acerca del origen y evolución del clima a generado una gran confusión en la mayoría de la población humana, respecto al cambio climático. Actualmente hay una polémica sobre si los cambios climáticos actuales son de origen antrópico o naturales.

Ante tal situación es conveniente tener información acerca del desarrollo natural del clima y de los factores que lo determinan (astronómico y geológico).

El propósito de este trabajo es presentar una hipótesis de que siempre han ocurrido cambios climáticos de origen natural y que seguirán ocurriendo independientemente de la intervención antrópica. La intervención antrópica no se discutirá y no se tomara posición al respecto.

Al parecer hace 3800 millones de años el clima terrestre ha venido evolucionando junto con la vida, pues hay pruebas científicas de que la primera bacteria (forma de vida) data de esa época.

A partir de entonces han ocurrido muchos escenarios geo-biológicos, al extremo que los nombres de las épocas geológicas derivan de su nombre de la forma de predominante.

Esperamos con este trabajo contribuir con el lector ofreciéndole una información amena e interesante sobre el tema a desarrollar.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Presentar información del desarrollo natural del clima no antrópico.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

1. Explicar los factores astronómicos y geológicos del clima terrestre.
2. Describir la historia del clima terrestre.
3. Relacionar la evolución del clima con la evolución biológica.

## **CAPÍTULO II**

### **CLIMA, ELEMENTOS Y FACTORES**

El clima es un fenómeno físico cotidiano durante las veinticuatro horas de todos los días y sólo reparamos en él por situaciones extremas o en la medida que se afecten el desarrollo de nuestras actividades. El clima es un evento variable. Lo único constante del clima es su variabilidad que viene ocurriendo desde toda la historia del planeta. Es muy poco lo que se conoce de él, aún para los expertos en el tema. El clima lo definen y determinan muchos elementos y factores que le dan un carácter de sistema muy complejo pero no caótico. En la atmosfera, esa delgada película gaseosa que envuelve al planeta es el medio donde ocurren las principales afectaciones y variaciones que también como parte del clima tiene un funcionamiento complejo y sistémico. El propósito de este capítulo es presentar los elementos y factores que en la historia geológica han determinado la variabilidad del clima. El polémico cambio climático reciente no es del alcance de este documento.

#### **2.1 Clima**

Podemos definir como clima el efecto a largo plazo de la radiación solar sobre la superficie y la atmósfera de la Tierra en rotación. También se le define como el conjunto de condiciones atmosférica, típicas de una región específica durante un determinado periodo de tiempo (Aproximadamente 30 años). El modo más fácil de interpretarlo es en términos de medias anuales o estacionales de temperatura y precipitaciones.

Las áreas continentales y oceánicas, al tener diferente forma una de otra, reaccionan de modos muy distintos ante la atmósfera, que circula constantemente en un estado de variabilidad dinámica. Las variaciones día a día en un área dada definen su climatología, mientras que el clima es la síntesis a largo plazo de esas variaciones (ambas pueden considerarse subdisciplinas de la meteorología). El clima se define por el comportamiento de parámetros medibles y registrables por medio de termómetros, pluviómetros, barómetros y otros instrumentos, pero su estudio o análisis estadístico se hace en base a los datos medidos y registrados espacial y temporalmente para los cuales, ordenadores son una herramienta imprescindible. Para obtener ésta es necesario el análisis de los patrones diarios, mensuales y anuales. Todo lo anterior se corresponde con la actual capacidad instrumental de observación climática y meteorológica que se inició apenas hace una centuria. La investigación de los cambios climáticos o mejor aún de variabilidad climática en términos de tiempo geológico es el campo de estudio de la paleoclimatología, que requiere las herramientas y métodos de la investigación geológica, que se apoyan en paleo registros en formaciones sedimentarias rocosas o hielos glaciares. Más recientemente los árboles centenarios al cortar su tronco se visualizan anillos cuyo arreglo están en correspondencia con las variaciones climáticas.

La palabra clima viene del griego *klima*, que hace referencia a la inclinación del Sol. Además de los efectos de la radiación solar y sus variaciones, el clima siempre está bajo la influencia de la compleja estructura y composición de la atmósfera y de los mecanismos por los que ésta y los océanos transportan el calor. Así pues, para cualquier área dada de la Tierra, debe considerarse no sólo su latitud (que determina la inclinación del Sol), sino también su altitud, el tipo de suelo, la distancia del océano, su relación con sistemas montañosos y lacustres, y otras influencias similares. Otra

consideración a tener en cuenta es la escala: el término macroclima hace referencia a una región extensa; mesoclima, a una más pequeña; y microclima, a un área diminuta. Por ejemplo, puede especificarse que un buen microclima para cultivar plantas es el que hay al abrigo de grandes árboles de sombra.

El clima tiene una gran influencia en la vegetación y la vida animal, incluyendo a los humanos. Desempeña un papel significativo en muchos procesos fisiológicos, desde la concepción y el crecimiento de los seres vivos hasta la salud y la enfermedad. El ser humano, por su parte, puede influir en el clima al cambiar su medio ambiente, tanto a través de la alteración de la superficie de la Tierra como por la emisión de contaminantes y productos químicos, como el dióxido de carbono, a la atmósfera.

Las diferentes concepciones teóricas sobre el clima han conducido a la utilización de diversos tipos de variables para intentar medirlo. Por el momento no es fácil distinguir las variables que se relacionan con el clima de aquéllas que lo producen. Es decir, el tipo de hallazgos establecidos se basan más en relaciones lineales que en modelos teóricos que impliquen relaciones causales entre las variables.

## **2.2 Factores geográficos del clima**

Se denomina así al conjunto de circunstancias astronómicas y geográficas que influyen en la determinación de los distintos tipos de climas del planeta. Los factores principales son:

### •Movimiento de la tierra

Lo cual hace referencia a los movimientos de rotación y traslación.

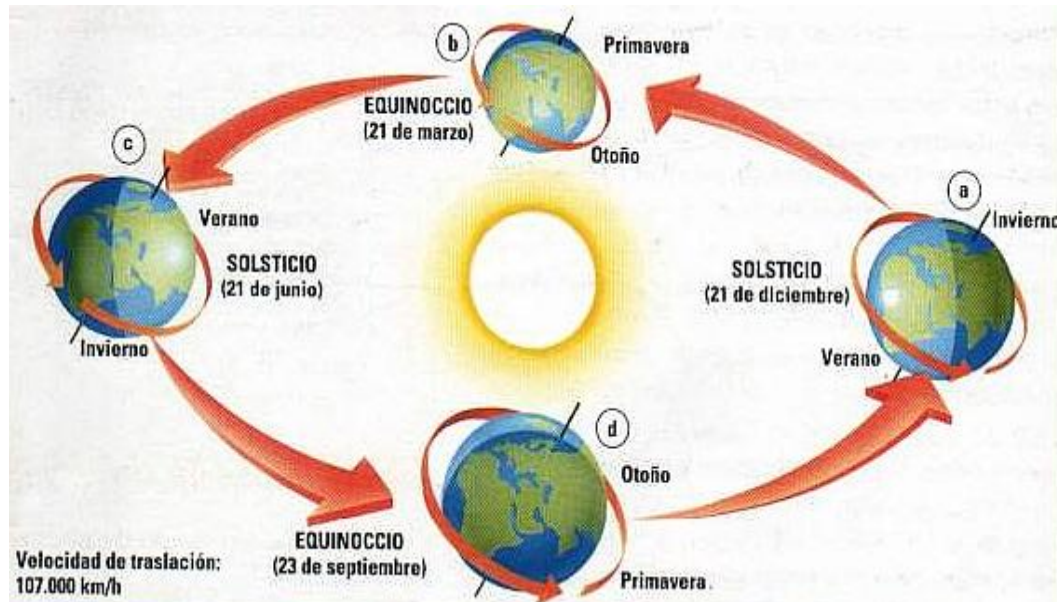
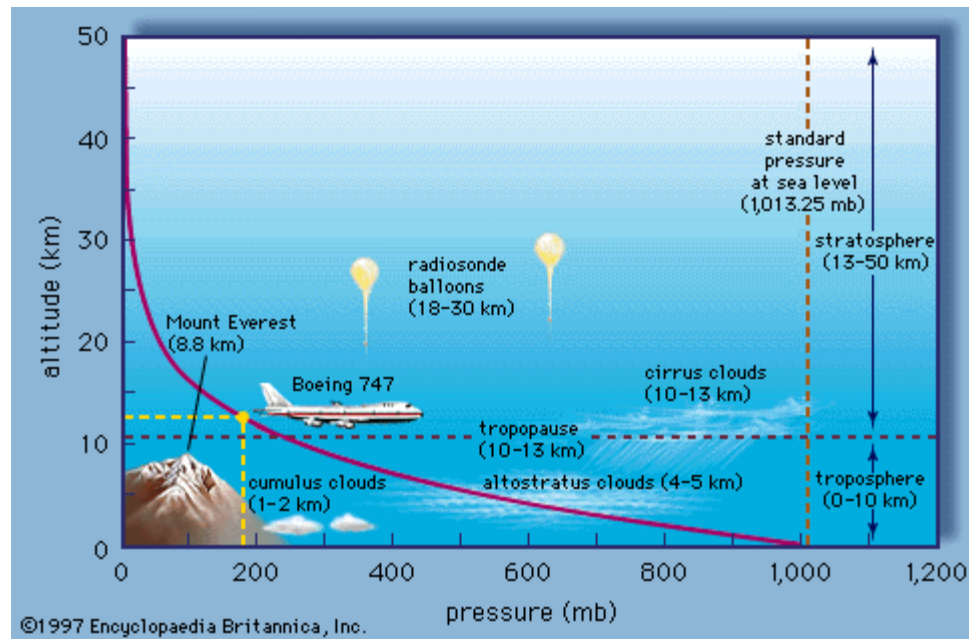


Figura 1. Movimientos de la Tierra

### •Altitud

La distancia vertical entre un punto de la superficie terrestre (por ejemplo la cumbre de una montaña) y el nivel del mar (superficie del mar). Cuanto mayor sea la altitud sobre el nivel del mar, menor es la temperatura.

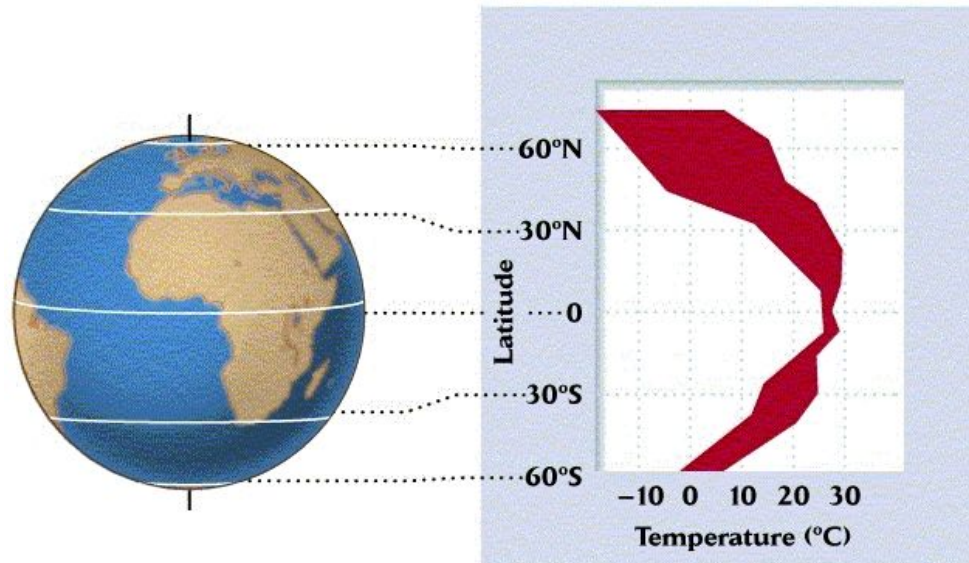


**Figura 2. Cambios de presión respecto a la altitud**

### •Latitud

Es el arco de meridiano comprendido entre un punto cualquiera de la superficie terrestre y el Ecuador. Se emplea para localizar un punto específico en el globo terrestre y se determina midiendo en el sentido de los meridianos, el arco del ángulo (grado de latitud) que forma el lugar con el Ecuador. El Ecuador es una línea imaginaria que divide al globo en hemisferio norte y hemisferio sur.





**Figura 3. Temperaturas en el globo terrestre, en relación a su latitud**

A mayor distancia de los polos, mayor temperatura. Es por ella que en los extremos del planeta (polos) se encuentran las zonas frías que se van transformando en templadas hasta llegar a cálidas en la zona media.

#### •Corrientes marinas

Las corrientes son movimientos, o desplazamientos, de agua en una dirección dentro de los mares y océanos. Sus temperaturas se elevan o disminuyen de acuerdo a la temperatura del agua que desplazan.

Las corrientes oceánicas trasladan agua templada desde el ecuador hacia los polos, mientras que el agua fría, por su parte, se mueve hacia el ecuador. De esta forma la Tierra distribuye el calor de su superficie, lo que constituye un importante factor climático. Hace unos 4.000 millones de años, el planeta estaba cubierto por océanos sin tierra que interrumpiera el movimiento de las corrientes, las cuales debían moverse en línea recta por la influencia de la rotación terrestre.

### •Disposición del relieve

La disposición del relieve influye en la circulación del aire. La topografía de la Tierra puede modificar de forma importante el modelo del flujo del aire sobre áreas muy amplias e incluso generar sistemas de circulación local completamente independiente.

A menor relieve mayor circulación de los vientos, tanto fríos como cálidos, dependiendo las variaciones térmicas del predominio que ejerce un viento sobre otro. Cuando el pico de una montaña se alza aislado, el flujo de aire puede bifurcarse y fluir a su alrededor, más que subir por aquélla. Por lo tanto, las localidades situadas a los lados de las montañas, y especialmente en los desfiladeros, entre las cimas pueden experimentar vientos más fuertes que en las propias cimas. Los vientos cálidos aumentan la temperatura y los fríos la disminuyen

### •Distancias de tierras y mares

Las grandes masas continentales tienen gran influencia en el clima produciendo un efecto conocido con el nombre de continentalidad. Este efecto se refleja en las variaciones anuales de la temperatura y en las oscilaciones diarias entre la temperatura diurna y nocturna. También determina que las precipitaciones disminuyan hacia las zonas interiores del continente. Cuanto más alejada del mar está la zona, mayor es la amplitud térmica.

## 2.3 Flujo de energía

Los flujos de energía que atraviesan verticalmente la atmósfera, hacia abajo y hacia arriba, son un factor esencial del clima. Sus variaciones, que

pueden ser debidas a alteraciones en la composición química y física del aire, pueden estar en el origen de muchos de los cambios climáticos. Existen tres tipos de flujos de energía:

1) la radiación solar, que penetra y atraviesa la atmósfera de arriba hacia abajo.

2) la energía terrestre, que es transmitida en sentido opuesto, de abajo hacia arriba; y

3) la radiación atmosférica, que el propio aire emite en ambas direcciones, hacia abajo y hacia arriba, y que está en el origen del “efecto invernadero”.

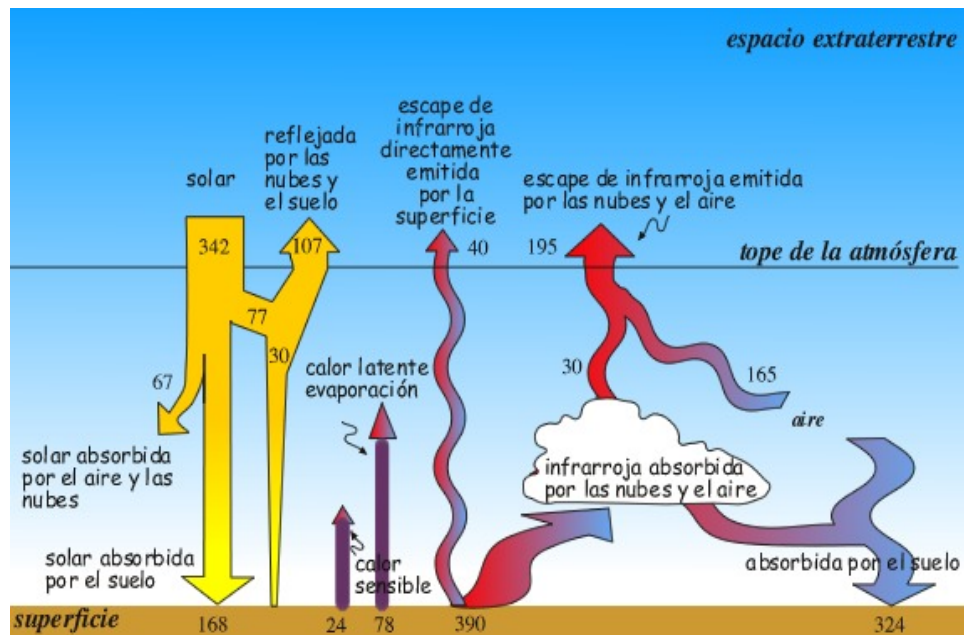
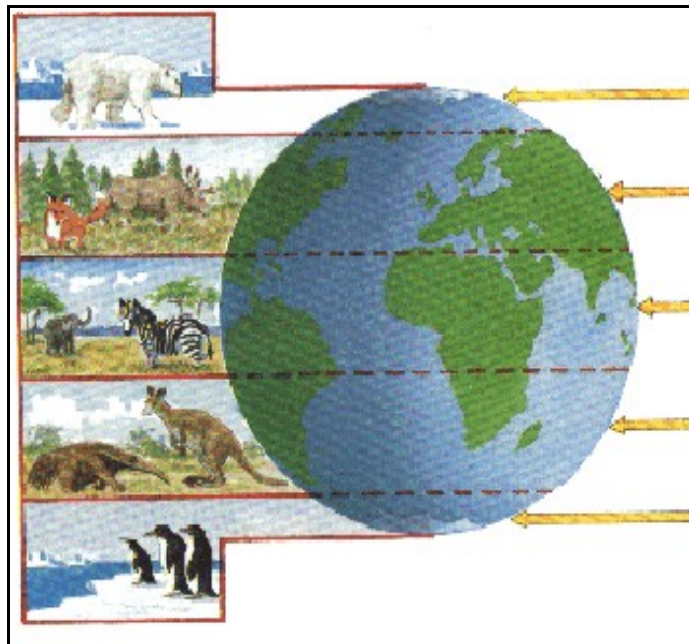


Figura 4. Flujos verticales de energía en vatios por metro cuadrado

## 2.3 zonas climáticas geodésicas

### Zonas Climáticas

Teniendo en cuenta la circulación atmosférica y otros factores, en el mundo se diferencian cuatro grandes zonas climáticas:



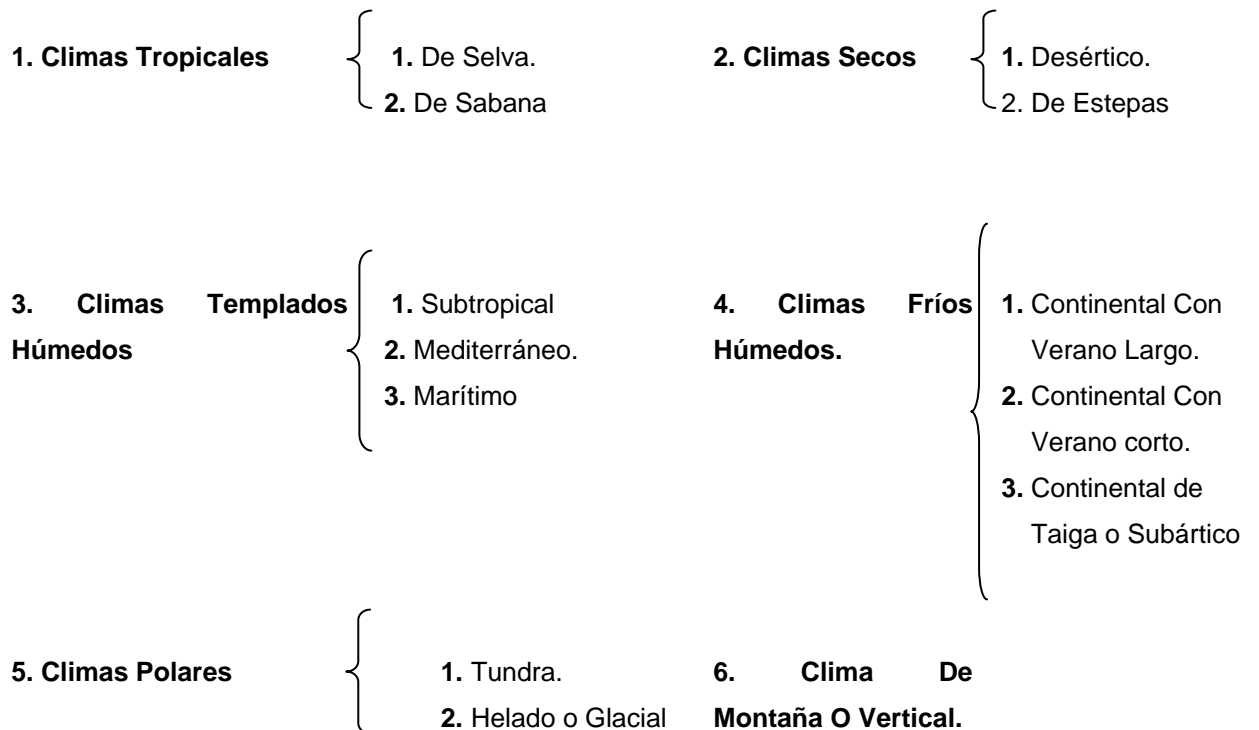
**Figura 5. zonas climáticas**

Fuente Internet: [hjallaskoli.kopavogur.is/.../loftslag.htm](http://hjallaskoli.kopavogur.is/.../loftslag.htm)

### Zonas Climáticas

<b>Latitudes</b>	<b>Zona Climática</b>	<b>Localización</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Precipitación</b>
Bajas	Intertropical	Entre los Trópicos.	Alta. Superior a 18°C.	Abundante y constante. Abundante o moderada y estacional.
Medias	Templada: Norte o Sur.	Entre los Trópicos y los Círculos Polares.	Variable, de acuerdo con las estaciones.	Variable de acuerdo con las estaciones.
Altas	Fría O Glacial: Ártica o Antártica.	Entre los Círculos Polares.	Baja. Inferior a 10°C.	Escasa. En forma sólida (nieve)

## 2.4 Zonas climáticas de Köppen

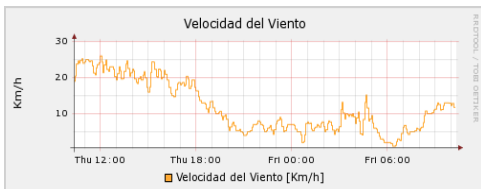


## 2.6 Análisis del clima, climatología

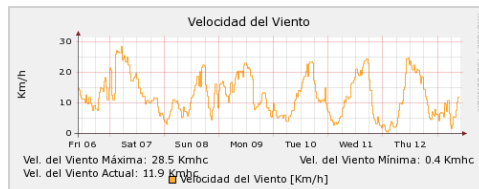
Consiste en el manejo estadístico y probabilístico de los registros de datos climatológicos que mediante inferencia se interpreta su comportamiento en el clima actual. Las siguientes están representados los estudios climatológicos de los factores climáticos.

## Estadísticas del clima

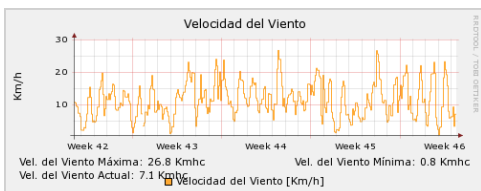
### Velocidad del viento



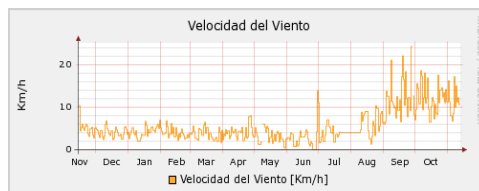
Viento del día



Viento de la semana

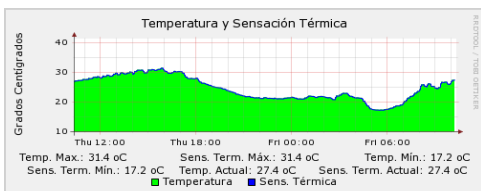


Viento del mes

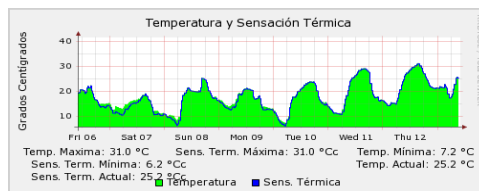


Viento del Año

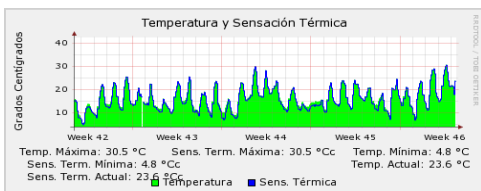
### Temperatura y Sensación Térmica



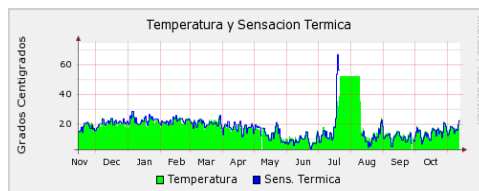
Temperatura y Sensación térmica del día



Temperatura y Sensación térmica de la semana

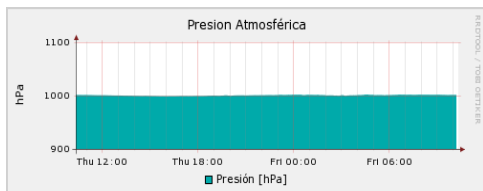


Temperatura y Sensación térmica del mes

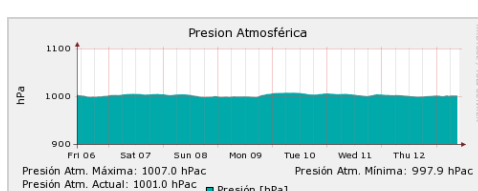


Temperatura y Sensación térmica del año

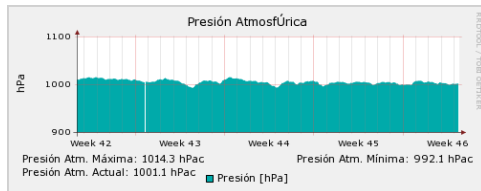
### Presión atmosférica



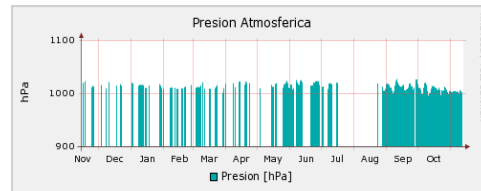
Presión del día



Presión de la semana

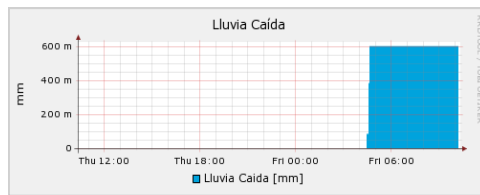


Presión del mes

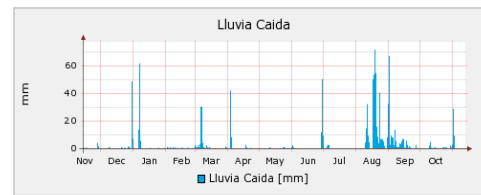


Presión del año

Lluvia

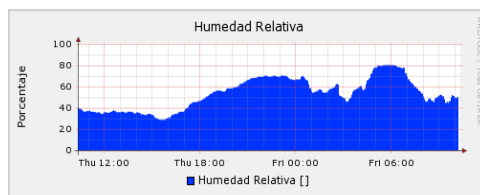


lluvia del día

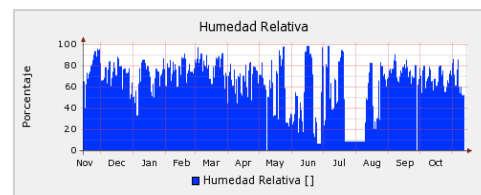


lluvia del año

Humedad Relativa

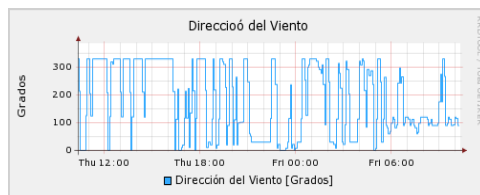


Humedad del día

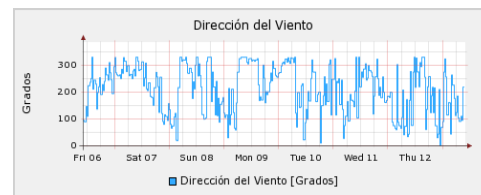


Humedad del año

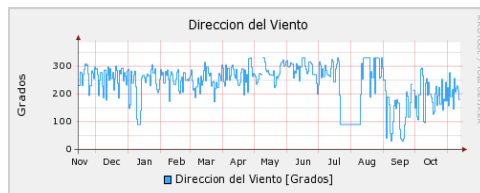
Dirección del viento



Dirección del viento del día



Dirección del viento de la semana



Dirección del viento anual



## 2.7 La atmósfera enfoque sistémico

Para estudiar la atmósfera, es imprescindible emplear un enfoque sistémico. Chorley y Kennedy (1971) definieron sistema como un conjunto estructurado de elementos, objetos y atributos constituidos por componentes o variables que presentan relaciones unas con otras y operan de forma conjunta como un todo complejo, de acuerdo con ciertas pautas observadas.

Los sistemas se dividen en función con el tipo de relaciones que mantengan con su entorno en:

- **abiertos** (intercambian materia y energía con el entorno)
- **cerrados** (intercambian energía pero no materia)
- **aislados** (no intercambian ni materia ni energía)

Los sistemas naturales suelen ser excesivamente complejos para poder estudiarlos en detalle, por ello se suele hacer uso de modelos. Un modelo puede definirse como *una representación simplificada de un sistema que captura lo esencial del mismo, eliminando elementos que resultan innecesarios debido a su escasa relevancia en el comportamiento global del sistema, a la escala de trabajo o a los objetivos.*

La Teoría General de Sistemas aporta un vocabulario propio que resulta útil para el estudio del sistema climático:

- Componentes
- Flujos (entradas o salidas)
- Estructura
- Función
- Entorno (fuentes y sumideros)

- Equilibrio
- Tiempo de residencia

Los componentes almacenan una determinada cantidad de materia (expresada en unidades de masa o volumen) o energía (expresada normalmente como temperatura). Los flujos reflejan las transferencias de materia o energía entre diferentes componentes y se expresan como tasas, es decir en unidades de materia o energía por unidad de tiempo y/o espacio. Las transferencias de energía se expresan en unidades de energía (Julios) por unidad de espacio y/o tiempo. Cuando dos componentes aparecen interconectados las salidas de uno se convierten en las entradas del otro.

La estructura se refiere al esquema que el sistema adopta tal como puede ser dibujado (componentes y transferencias) mientras que función se refiere a la cantidad de materia o energía que se almacena en los diferentes componentes y a las transferencias de materia y energía que se producen entre ellos.

Finalmente, por entorno se entiende todo lo que esta alrededor del sistema y que no forma parte del sistema. En el caso de los sistemas abiertos el entorno se relaciona con el sistema mediante transferencias de materia y energía, en los sistemas cerrados solo a través de transferencias de materia y en los sistemas aislados no hay relación. Se denomina fuente a los elementos del entorno desde los que el sistema recibe entradas, y sumidero a los elementos del entorno hacia los que el sistema emite salidas.

Cuando en un sistema las transferencias (entradas y salidas) entre los diferentes componentes permanecen constantes a lo largo del tiempo, se dice que el sistema está en equilibrio. Este equilibrio conlleva que la cantidad

de materia o energía en cada uno de los componentes permanece constante ya que el conjunto de las entradas es igual al conjunto de las salidas.

Tiempo de residencia es el tiempo promedio que una partícula de materia permanece en un determinado componente y, en el caso de que el sistema este en equilibrio es igual a la cantidad de materia presente en el componente partido por la suma de las entradas. Un tiempo de residencia corto implica que cualquier alteración en las entradas o las salidas se va a hacer patente rápidamente, mientras que si el tiempo de residencia es corto tardará más en reflejarse.

## CAPÍTULO III

### FACTORES ASTRONÓMICOS Y GEOLÓGICOS DEL CLIMA

#### 3.1 Movimiento de rotación

Es un movimiento que efectúa la Tierra girando sobre sí misma a lo largo de un eje ideal denominado Eje terrestre que pasa por sus polos. Una vuelta completa, tomando como referencia a las estrellas, dura 23 horas con 56 minutos y 4 segundos y se denomina día sidéreo. Si tomamos como referencia al Sol, el mismo meridiano pasa frente a nuestra estrella cada 24 horas, llamado día solar. Los 3 minutos y 56 segundos de diferencia se deben a que en ese plazo de tiempo la Tierra ha avanzado en su órbita y debe de girar algo más que un día sideral para completar un día solar.

La primera referencia tomada por el hombre fue el Sol, cuyo movimiento aparente, originado en la rotación de la Tierra, determina el día y la noche, dando la impresión que el cielo gira alrededor del planeta. En el uso coloquial del lenguaje se utiliza la palabra día para designar este fenómeno, que en astronomía se refiere como día solar y se corresponde con el tiempo solar.

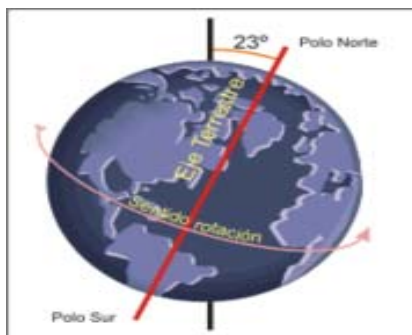


Figura.6 Movimiento de rotación.

Como se observa en el gráfico, el eje terrestre forma un ángulo de  $23,5^{\circ}$  respecto a la normal de la eclíptica, fenómeno denominado oblicuidad de la eclíptica. Esta inclinación produce largos meses de luz y oscuridad en los polos geográficos, además de ser la causa de las estaciones del año, causadas por el cambio del ángulo de incidencia de la radiación solar.

### **3.2 Movimiento de traslación**

Es un movimiento por el cual la Tierra se mueve alrededor del Sol. La causa de este movimiento es la acción de la gravedad, originándose cambios que, al igual que el día, permiten la medición del tiempo. Tomando como referencia el Sol, resulta lo que se denomina año tropical, lapso necesario para que se repitan las estaciones del año. Dura 365 días, 5 horas y 47 minutos. El movimiento que describe es una trayectoria elíptica de 930 millones de kilómetros, a una distancia media del Sol de prácticamente 150 millones de kilómetros ó 1 U.A. (Unidad Astronómica: 149 675 000 km). De esto se deduce que la Tierra se desplaza con una rapidez media de 106 200 km/h (29,5 km/s).

La trayectoria u órbita terrestre es elíptica. El Sol ocupa uno de los focos de la elipse y, debido a la excentricidad de la órbita, la distancia entre el Sol y la Tierra varía a lo largo del año. A primeros días de enero se alcanza la máxima proximidad al Sol, produciéndose el perihelio, donde la distancia es de 147,5 millones de km; mientras que en los primeros días de julio se alcanza la máxima lejanía, denominado afelio, donde la distancia es de 152,6 millones de km.

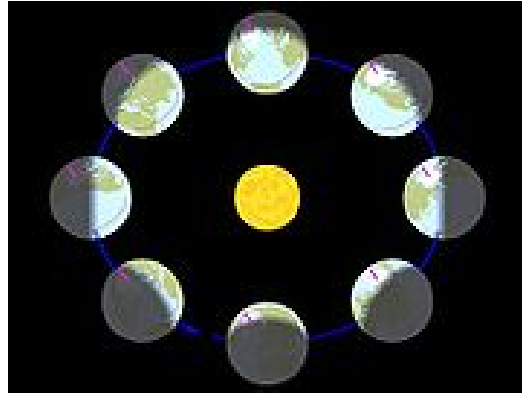


Figura. 7 Esquema (sin escala) de la traslación de la Tierra alrededor del Sol.

### 3.3 Movimiento de precesión

El movimiento de precesión, también denominado precesión de los equinoccios, es debido a que la Tierra no es esférica, sino un elipsoide achatado por los polos. Si la Tierra fuera totalmente esférica, sólo realizaría los movimientos anteriormente descritos.

Una vuelta completa de precesión dura 25 767 años, ciclo que se denomina año platónico, cuya duración había sido estimada por los antiguos mayas.

### 3.4 Movimiento de nutación

Este movimiento también es debido al achatamiento de los polos y a la atracción de la Luna sobre el eje ecuatorial. También en un movimiento de vaivén y se produce durante el movimiento de precesión, este recorre a su vez una pequeña elipse (como si fuese una pequeña vibración). Una vuelta completa a la elipse supone 18,6 años, lo que supone que en una vuelta completa de precesión la Tierra habrá realizado 1385 bucles.

### **3.5 Bamboleo de Chandler**

Se trata de una pequeña oscilación del eje de rotación de la tierra que añade 0,7 segundos de arco en un período de 433 días a la precesión de los equinoccios. Fue descubierto por el astrónomo norteamericano Seth Carlo Chandler en 1891, y actualmente no se conocen las causas que lo producen, aunque se han propuesto varias teorías (fluctuaciones climáticas causantes de cambios en la distribución de la masa atmosférica, posibles movimientos geofísicos bajo la corteza terrestre, etc.)

### **3.6 Ciclos milankovitch**

Debido a las influencias gravitatorias de los otros planetas del Sistema Solar, a lo largo de los milenios se van modificando cíclicamente diversos parámetros astronómicos del movimiento de la Tierra, como son: a) la relación del momento de los equinoccios y de los solsticios con respecto al momento de mayor o menor lejanía de la Tierra al Sol (precesión de los equinoccios), b) la forma ligeramente elíptica de la órbita terrestre (excentricidad de la órbita), y c) la inclinación del eje de rotación de la Tierra (oblicuidad del eje). Al combinarse los tres ciclos de variación, con sus diferentes periodicidades e intensidades, se producen variaciones complejas en la cantidad de radiación solar interceptada en cada latitud y en cada estación del año.

En la teoría de Milankovitch se asume que la energía solar incidente en la Tierra en su globalidad y durante un año completo es siempre la misma (excepto en los cambios de excentricidad, en donde se admite un ligero cambio). La variación relevante radica en el diferente reparto de la energía en cada estación del año y en cada hemisferio, según van variando a lo largo de

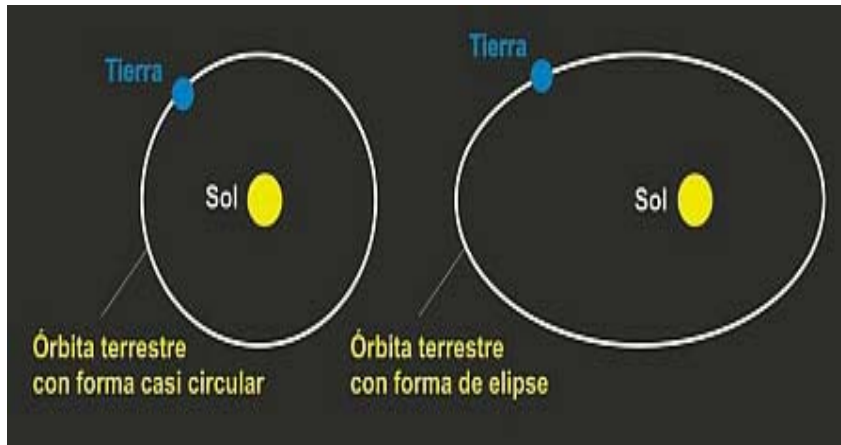
los años las características de la órbita

También es interesante anotar que cada uno de los tres ciclos de Milankovitch puede producir efectos climáticos que son diferentes en cada latitud.

### **3.6.1 Excentricidad de la Órbita Terrestre**

Estamos acostumbrados a escuchar que nos movemos eternamente en una elipse o en muchos casos, en una circunferencia, y que así será siempre. Pero tanto los geólogos trabajando en conjunto con los astrónomos sobre la evolución del clima en el tiempo, y en particular sobre el comportamiento de las glaciaciones, han encontrado que cada 100000 años la órbita terrestre, pasa de tener una forma casi circular, hacia una forma con más pronunciamiento elíptico, por lo que cambia su excentricidad. Las consecuencias de este cambio orbital se traducen en la variación de la cantidad de luz recibida del Sol debido a la variación más pronunciada de la distancia entre la Tierra y el Sol. Al variar significativamente la radiación solar se produce un enfriamiento severo, generándose un periodo nuevo de glaciación.





**Figura .8 En 100.000 años la órbita terrestre pasa de ser un círculo casi perfecto a tomar una forma elíptica.**

Se estima que el último periodo glacial afectó severamente el hemisferio norte hace por lo menos 20000 años. En esa ocasión el casquete polar llegaba hasta Nueva York y Ámsterdam. El del mar se encontraba 120 metros inferior al nivel medido hoy. Con esas condiciones se podía atravesar sin dificultad el Canal de la Mancha.

El modelo sobre los períodos glaciales, con periodos de recalentamiento del orden de los 15000 años fue desarrollado por el astrónomo Milutin Milankovitch, de origen serbio, en el año 1920. Analizando y calculando la variación de la luz solar recibida en un determinado lugar de la Tierra en el pasado, y correlacionando los avances y retrocesos de los hielos, concluye que los dos aspectos están ligados. Este resultado le permitió demostrar que las variaciones de la forma de la órbita terrestre, son las causantes de la variabilidad de las glaciaciones en el tiempo.

### 3.6.2 Oblicuidad del Planeta

Otro factor desencadenante es, que el eje terrestre no se mantiene fijo en el tiempo. Como un péndulo que se mueve de un extremo a otro, el eje terrestre varia entre 22,1 a 24,5 grados donde hoy forma, con la eclíptica, un ángulo de aproximadamente 23 grados. El tiempo que dura un ciclo en este caso es de 41000 años. Este movimiento oscilante del eje polar produce que la radiación recibida en los polos, varíe en forma significativa. Cuanto mayor es el ángulo, en el verano recibirá mayor radiación y en el invierno será mucho menor que el actual, produciéndose una variación mas pronunciada en la temperatura, contribuyendo de esa forma, al origen de las glaciaciones en el extremo del mayor ángulo.



Figura 9. Dos hipotéticos planetas con diferente inclinación del eje. Cuanto más inclinado está el eje más bruscos son los cambios entre las estaciones. Nótese en el primer caso, la inclinación es poca, los rayos solares llegan a los polos de forma muy oblicua.



**Figura 10. Por el contrario, en el segundo caso incluso los días y las noches tienen duraciones con marcadas diferencias.**

Si el ángulo fuese de 0 grados, cualquier observador, en cualquier lugar de la Tierra, medirá que la duración del día, para cualquier época del año, es de 12 horas; pero a medida que el ángulo crece, los días en el verano serán mas largos y mas cortos en el invierno, para cualquier observador, según sea el Hemisferio norte o sur.

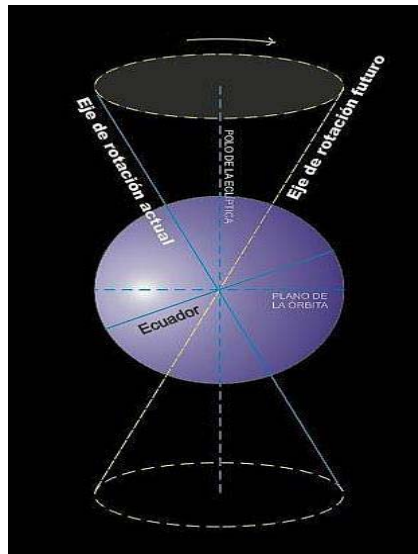
### **3.6.3 Precesión de los equinoccios.**

Una de las consecuencias de esta interacción planetaria, solar y fundamentalmente lunar, es el movimiento de precesión de los equinoccios. En este caso el eje polar describe un doble cono con vértice en el centro de la Tierra, generando que los equinoccios y los solsticios, vayan modificándose gradualmente en el tiempo.

Hace aproximadamente 2000 años, el punto del equinoccio no estaba

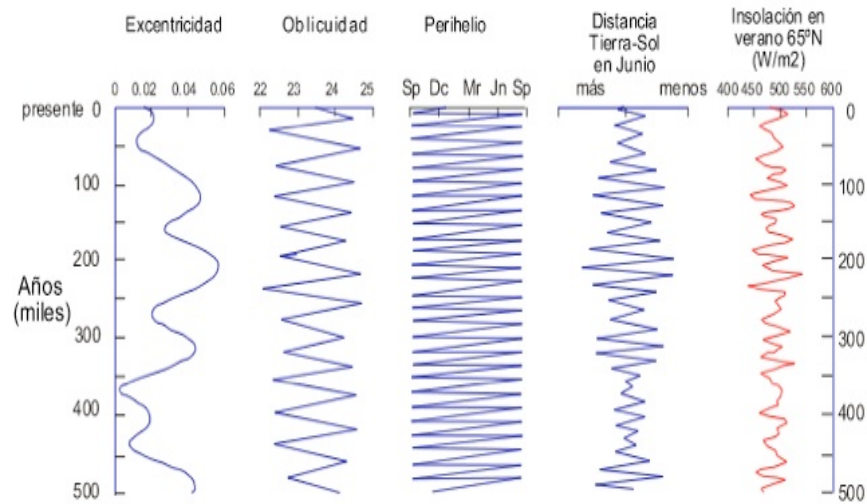
en Piscis como en la actualidad, sino en Aries. Pasado otros 2000 años, el punto equinoccial o vernal, intersección de la eclíptica con el ecuador, estará en acuario y así sucesivamente tardando 26000 años en completar un ciclo. Pero debido a la interacción Tierra - Luna, la órbita terrestre sufre pequeñas modificaciones en torno al Sol, generándose la precesión climática con una duración de 21000 años.

Una consecuencia de ello es que las constelaciones zodiacales australes, primavera y verano para el Hemisferio Sur, pasarán a pertenecer al Hemisferio Norte, por lo que las constelaciones zodiacales que ahora son invernales pasarán a ser veraniegas, como por ejemplo, la constelación de Leo. Otra consecuencia es que el verano austral, en el futuro, estará más lejos respecto al Sol.



**Figura 11. En un período de 26.000 años, el eje terrestre da una vuelta completa alrededor del eje de la eclíptica, que está perpendicular a la órbita.**

**Factores Geológicos influenciados por el Clima**



**Figura 12. Ciclos de Milankovitch. Variaciones en los últimos 500.000 años.**

### 3.7 Actividad volcánica

La actividad volcánica es una fuente natural de contaminación, la cual aporta una cantidad considerable de contaminantes, principalmente a la atmósfera.

Las erupciones volcánicas fuertes, explosivas, expulsan el vapor de agua ( $H_2O$ ), el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el dióxido de sulfuro ( $SO_2$ ), el cloruro de hidrógeno ( $HCl$ ), el fluoruro del hidrógeno ( $HF$ ) y la ceniza (roca y piedra pómez pulverizadas) que llegan a la estratosfera a alturas de 16-40 kilómetros sobre la superficie de la Tierra. Los impactos más significativos de estas inyecciones vienen de la conversión del dióxido de sulfuro a ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), que condensa rápidamente en la estratosfera para formar los aerosoles finos de sulfato. Los aerosoles aumentan el albedo (porcentaje de la radiación solar reflejada al espacio) y refrescan así la atmósfera más baja o la troposfera de la Tierra; sin embargo, también absorben el calor

irradiado por la Tierra, de modo que calientan la estratosfera.

Los aerosoles de sulfato también provocan reacciones químicas complejas en sus superficies que alteran la clorina y el nitrógeno en la estratosfera. Este efecto, junto con la clorina estratosférica creciente nivela la contaminación por CFC, genera monóxido de clorina, que destruye el ozono ( $O_3$ ). Mientras que los aerosoles crecen y coagulan, se colocan en la troposfera superior donde sirven de núcleos para los cirros y modifican el equilibrio de la radiación de la Tierra.

La mayor parte del cloruro de hidrógeno (HCl) y el fluoruro del hidrógeno (HF) se disuelven en las gotitas de agua de la nube generada por la erupción y bajan rápidamente a la Tierra como lluvia ácida. La ceniza inyectada también cae rápidamente de la estratosfera; la mayor parte desaparece de la atmósfera en varios días a algunas semanas. Finalmente, las erupciones volcánicas explosivas lanzan el dióxido de carbono del gas del invernadero y proporcionan así una fuente profunda de carbón para los ciclos biogeoquímicos. Las emisiones de gas de los volcanes son un contribuidor natural a la lluvia ácida. La actividad volcánica lanza cerca de 130 a 230 teragramos de dióxido de carbono al año.

Las erupciones volcánicas pueden inyectar los aerosoles en la atmósfera de la tierra. Las inyecciones grandes pueden causar efectos visuales tales como puestas del sol inusualmente rojas y afectar clima global principalmente refrescándolo. Las erupciones volcánicas también proporcionan la ventaja de agregar fertilizantes al suelo. Estos suelos fértiles facilitan el crecimiento de plantas y de varias cosechas. Las erupciones volcánicas pueden también crear las islas nuevas, pues el magma se solidifica en el agua.

Los componentes principales de gases volcánicos son el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sulfuro como el dióxido de sulfuro ( $\text{SO}_2$ ) (gases volcánicos de alta temperatura) o sulfuro del hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (gases volcánicos a baja temperatura), nitrógeno, argón, helio, neón, metano, monóxido de carbono e hidrógeno. Otros compuestos detectados en gases volcánicos son oxígeno (meteórico), HCl, HF, HBr,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SF}_6$  y compuestos orgánicos. Hay también rastro de compuestos exóticos del incluyen el mercurio, CFCs, y radicales metílicos del óxido del halógeno.

- **Consecuencias de las erupciones**

En la siguiente gráfica se puede apreciar las consecuencias de la actividad volcánica. La siguiente gráfica muestra la temperatura de la superficie de troposfera. Los gases responsables del efecto invernadero hacen que la troposfera se caliente. En cambio los aerosoles derivados de SO hacen que la luz solar se refleje al espacio, provocando la disminución de temperatura de troposfera y de la Tierra. Se puede decir que durante los años con grandes erupciones la temperatura media se disminuye debido a que los gases que expulsa el volcán contienen  $\text{SO}_2$  que provoca el enfriamiento.

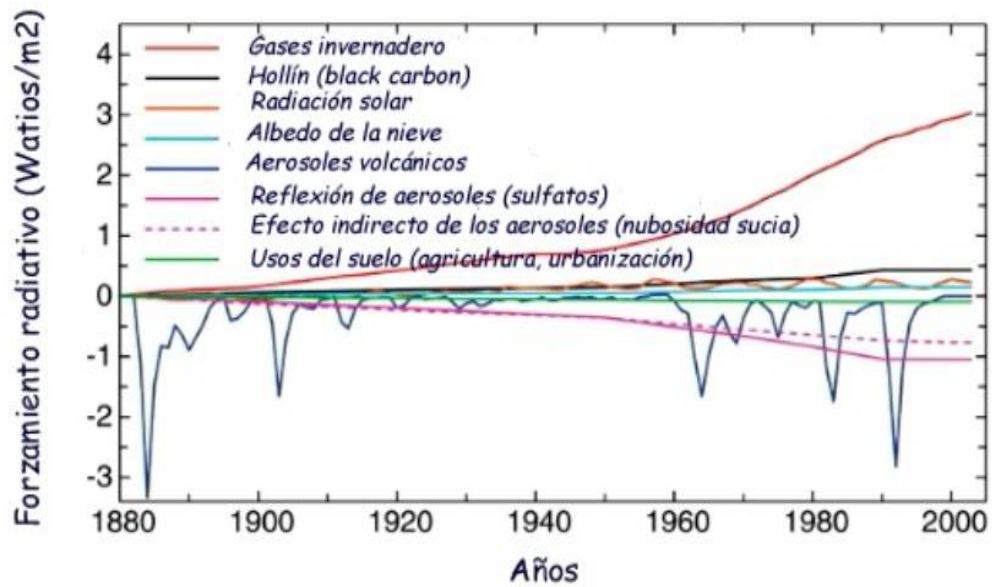


Figura 13. Evolución de los forzamientos radiativos entre 1880 y 2003 según el modelo del GISS (Instituto Goddard de Estudios Espaciales) de la NASA.

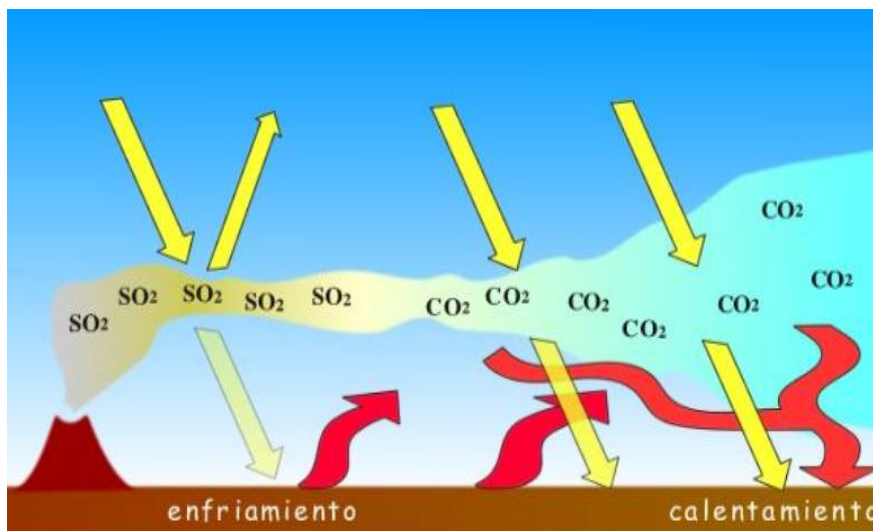


Figura 14. El magma contiene gases disueltos que son liberados por las erupciones hacia la atmósfera, estos gases normalmente tóxicos y peligrosos los cuales producen las lluvias ácidas.



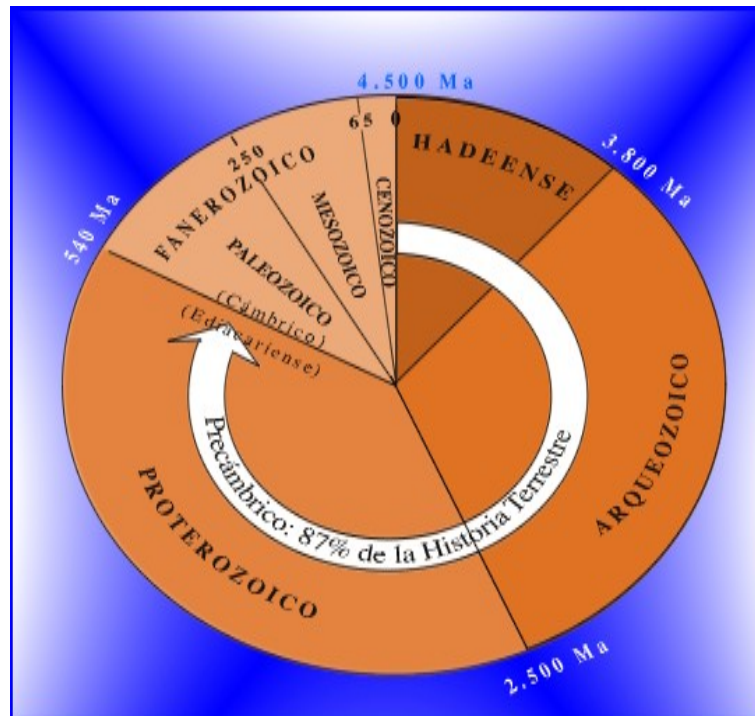
## CAPÍTULO IV

### HISTORIA DEL CLIMA TERRESTRE

#### 4.1 Precámbrico

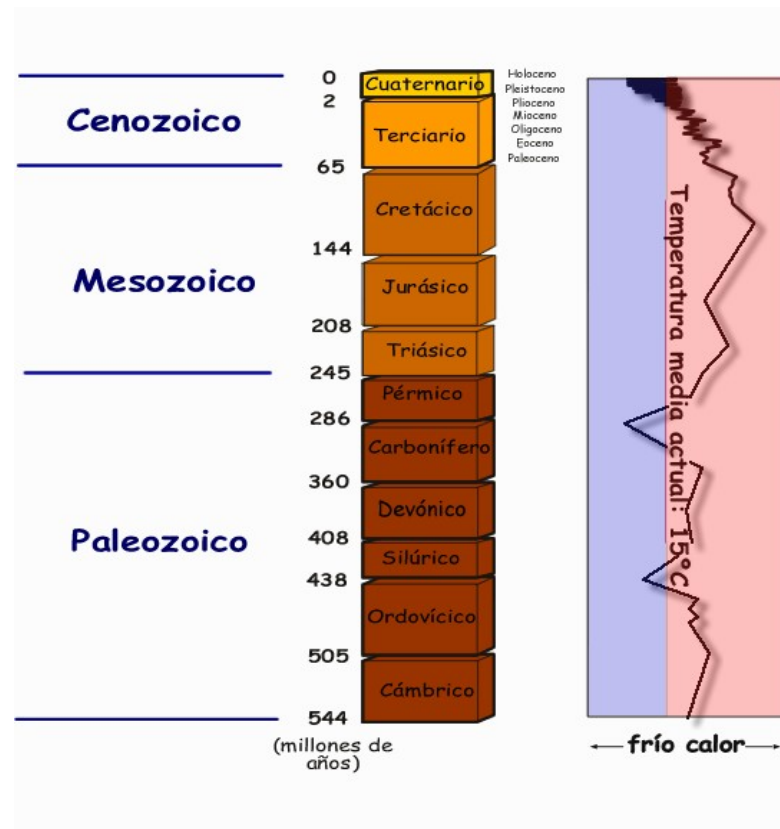
Durante los primeros setecientos millones de años de su existencia desde su formación, hace 4.500 Ma (millones de años), hasta hace unos 3.800 Ma, la superficie terrestre bullía de calor y de energía. En aquel primer eón de nombre mítico, Hadeense, el clima debió ser (si alguien lo vio) pavoroso. El planeta giraba más deprisa: los días y las noches eran más cortos. La superficie, entre sólida y viscosa, burbujeante e incandescente, estaba plagada de cráteres y de chimeneas volcánicas de las que emanaban desde el interior de la Tierra sustancias volátiles. Algunos de los gases arrojados, como el hidrógeno, demasiado ligeros, se escapaban para siempre al espacio extraterrestre; otros, como el amoníaco, eran descompuestos por la radiación solar. A partir de los gases resultantes más pesados, que la gravedad mantuvo pegados al planeta, se fue formando la atmósfera primitiva: la envoltura gaseosa de la Tierra. Una atmósfera que era bastante diferente a la actual.

Cargada de electricidad y afectada por continuas tormentas. Muy húmeda y con un cielo permanentemente sucio. Oscurecida por las nubes sulfurosas que emitían los volcanes y por el polvo levantado tras la colisión incesante de meteoritos. Con temperaturas muy altas en las capas bajas del aire, debido a la abundancia de gases de efecto invernadero.



## 4.2. Era Primaria

Hace unos 540 Ma la evolución de la vida se aceleró en los océanos. Casi abruptamente se multiplicó el número de especies y se modificaron los tamaños y las formas corporales de los animales marinos.



**Figura 15. Eras y periodos en que se divide el eón Fanerozoico**

(Del griego faneros "lo que aparece" y zoe "vida". La abundancia de fósiles permite construir una escala geológica detallada de los últimos 544 millones de años. A la derecha, evolución estimada de la temperatura media superficial. En la zona rosa la temperatura ha sido superior a la actual (15°C) y en la zona azul ha sido menor. Solamente hubo glaciaciones al final del período Ordovícico, al final del Carbonífero y durante el reciente período Cuaternario.

A diferencia de los cadáveres de los animales anteriores, pequeños y de cuerpos blandos, rápidamente descompuestos por las bacterias y desaparecidos sin dejar rastro; las nuevas especies desarrollaron caparazones y esqueletos calcáreos, duros, que han permitido en muchas partes su conservación fosilizada, al quedar insertos en los estratos de rocas sedimentarias. La abundancia de estos fósiles aporta muchas claves sobre los cambios ocurridos desde entonces en la geología y en el clima. Por eso al último eón, que comienza entonces, se le ha dado el nombre de Fanerozoico, del griego "phanero" (visible o evidente) y "zoe" (vida).

Las razones de este estallido de vida oceánica, la "explosión cámbrica", recogida en unos pocos yacimientos ricos en fósiles, como el de Burgess Shale, en Canadá, permanecen aún oscuras. Algunos paleontólogos creen que esta aceleración evolutiva de la vida terrestre fue provocada por fuertes y rápidos cambios en la geografía de mares y continentes, lo que motivó variaciones drásticas en las

corrientes oceánicas y en la temperatura y salinidad de las aguas (Kirschvink, 1977). Los cambios medioambientales marinos, quizás un aumento de los nutrientes por un aumento del upwelling, podrían haberse añadido a la mutación de algún gen (un “hox” gen) en algún ser multicelular primitivo, lo que podría haber iniciado un extenso cambio morfológico en la vida animal (von Bloh, 2003).

También se especula con la idea de que, debido a cambios tectónicos que afectan a los ritmos de erosión y a la salida de aguas termales internas portadoras de elementos químicos en solución, se registrase por aquel entonces una modificación de la ratio magnesio/calcio en el agua marina. Según esta teoría, a comienzos del Cámbrico esta ratio disminuyó y el agua marina llegó a tener una concentración de calcio suficientemente grande para facilitar la eclosión de los animales calcáreos (Dickson, 2002).

Otros investigadores creen que la aparición entonces de seres vivos más grandes y celularmente más complejos, se debió a que pudieron aprovecharse de un volumen adecuado de oxígeno, comparable al de la atmósfera contemporánea (Lenton & Watson, 2004). Este aumento del oxígeno se habría producido al final del Precámbrico, en el período Ediacariense, y quizás fuese debido a un aumento del enterramiento de carbono orgánico, propiciado a su vez por suelos más arcillosos, que adhieren el carbono, que los que había antes. Este incremento de las arcillas en detrimento de las arenas y otros elementos más gruesos sería el resultante de la aparición de los hongos del suelo y de su actividad descomponedora. De nuevo la vida favorecería así el incremento de oxígeno del aire (Kennedy, 2006)

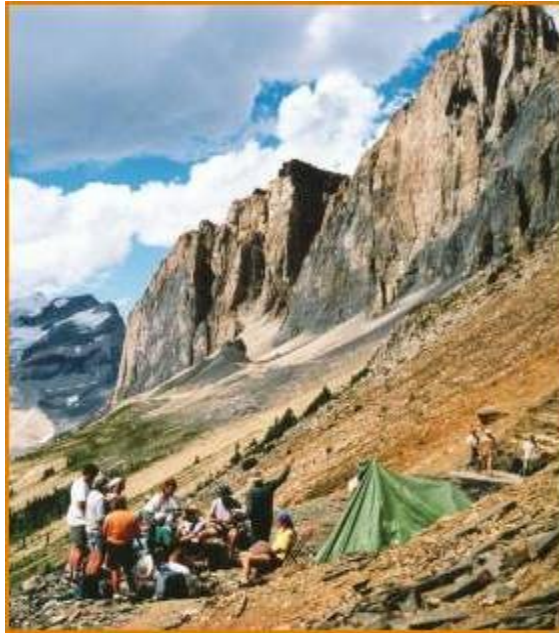


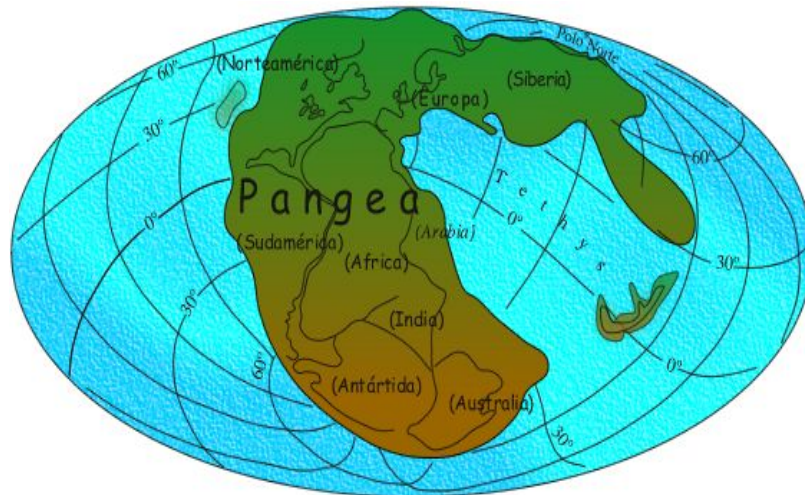
Figura 16. Yacimiento paleontológico de Burgess Shale, en Canadá

### 4.3 Era secundaria

#### 4.3 Triásico: aridez y calor en Pangea

Durante el Triásico (245 Ma- 208 Ma), primer período del Mesozoico, la existencia de un continente único y compacto, Pangea, rodeado de un único océano, Panthalasa, produjo un clima árido en vastas extensiones del interior de los continentes. Allí la lejanía del mar creaba condiciones de extrema aridez y las oscilaciones térmicas estacionales eran muy fuertes. La probable ausencia de grandes cordilleras y un relieve erosionado y plano no favorecía tampoco la lluvia. Quizás, algunas cuencas endorreicas que almacenaban agua en lagos aislados amortiguaran la sequía y dulcificaran algo las temperaturas extremas, propias de los climas continentales. Aún así, los modelos que simulan el clima de Pangea indican una oscilación térmica extrema en el sur y en el interior del continente, con veranos muy cálidos e

inviernos muy rigurosos.



**Figura 17. Mapa de Pangea. Triásico, principios de la Era Secundaria, hace 250 millones de años.**

Casi todas las tierras emergidas se reúnen en un sólo continente, Pangea, que al poco tiempo comenzará de nuevo a partirse hasta formar los continentes actuales. El estrechamiento y cierre del gran mar tropical de Tethys dará lugar al Mediterráneo.

Por el contrario, algunas zonas tropicales y medias de Pangea más próximas al mar debieron estar sometidas a un clima de tipo monzónico, con lluvias estivales (Loope, 2001). En verano, el contraste térmico que se originaba entre el océano y el continente masivo, extenso, de Pangea, favorecía un gradiente de presión que atraía vientos húmedos del mar al interior. Pero la ausencia de relieves importantes restaba fuerza al monzón y no facilitaba la formación de nubes. Por eso, en Pangea fueron más extensas las regiones ocupadas por desiertos tropicales que las regiones de selva monzónica.

El clima cálido y árido también propició la formación de series sedimentarias de areniscas eólicas y de arcillas rojas, que a veces aparecen

en alternancia con horizontes yesosos y salinos tanto en Europa como en Norteamérica. Su intenso color escarlata es debido a la alta concentración superficial de hematites ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que las rocas sedimentarias fueron adquiriendo, en ausencia de vegetación, bajo aquel clima.

#### **4.1.4 Jurásico y Cretácico: el clima de los dinosaurios**

- **El Jurásico**

La progresiva ruptura de Pangea, que comenzó a final del Triásico, provocó un clima global más húmedo durante todo el Jurásico (208-146 millones de años). El nivel del mar comenzó a ascender y el agua oceánica al adentrarse en tierra inundaba grandes regiones continentales, creando nuevos mares.

La mayor extensión de las tierras inundadas hizo disminuir el albedo planetario, aumentando la absorción de la energía solar, y la mayor humedad del aire, por su efecto invernadero, hizo que el clima global fuese también más cálido.

La causa de la elevación de los mares pudo ser un cambio en la topografía de las cubetas oceánicas, ligado a un mayor ritmo de separación de las placas tectónicas y a la extrusión intensa de lavas por las fracturas del suelo oceánico.

- **El Cretácico**

El Cretácico, que comenzó hace 145 millones de años y duró hasta la extinción de los dinosaurios, hace 65 millones de años, tuvo también en su mayor parte un clima húmedo y cálido. Los espesos estratos de creta, roca caliza porosa formada por conchas calcáreas de cocolitos y foraminíferos,

que proliferaron por todos los mares, han dado el nombre al período. Hasta entonces la sedimentación calcárea había solido quedar restringida a las aguas poco profundas de las plataformas continentales.



**Figura 18. El Cretácico Medio, hace unos 100 millones de años.**

El área cubierta por las aguas era muy extensa. Norteamérica quedaba cortada en dos por un mar de aguas someras que unía el Ártico con el Atlántico, y Europa era un archipiélago más que un continente. El clima en las latitudes altas era mucho más templado que el actual. La circulación oceánica era también muy diferente.

A mediados del período, hace unos 100 millones de años, la temperatura media de la superficie del planeta era entre 6°C y 12°C mayor que la de hoy. La franja tropical de arrecifes de coral era latitudinalmente bastante más ancha que en el presente. Los dinosaurios, animales probablemente de sangre fría, más afines a climas cálidos que fríos, poblaban casi todas las regiones emergidas de la Tierra y se acercaban hasta los círculos polares. Algunos sugieren que el enorme tamaño de muchos de ellos era sólo posible gracias a la existencia de una mayor abundancia de biomasa vegetal, favorecida por el calor, la humedad y la alta concentración de CO<sub>2</sub>.



### **Abundante CO<sub>2</sub> y vapor de agua**

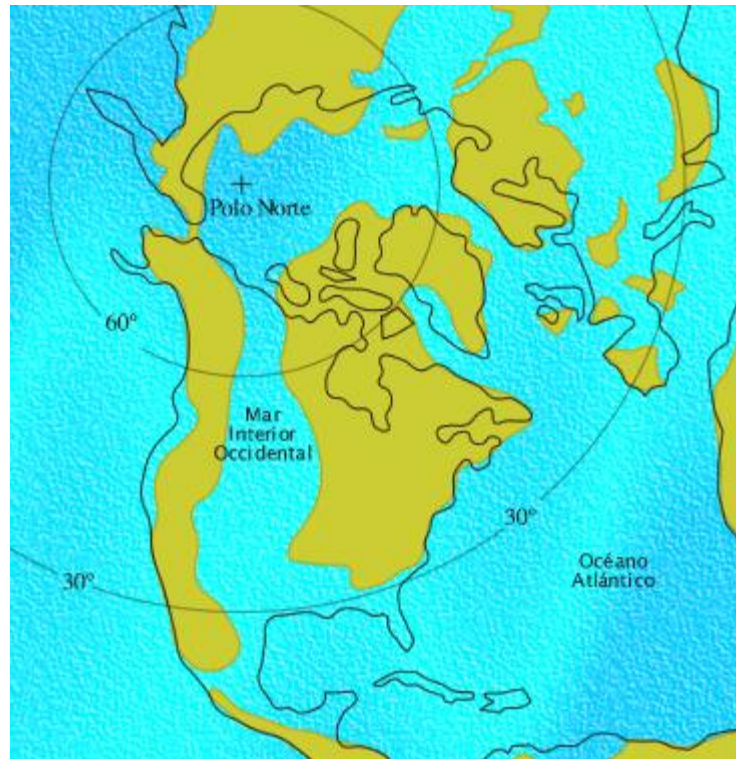
La concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera era probablemente varias veces superior a la actual (370 ppm), entre 900 ppm y 3.300 ppm, según cálculos que todavía son muy laxos y bastante inciertos.

Los cálculos de los niveles de CO<sub>2</sub> se basan en datos diversos. Uno de estos es el estudio isotópico del carbono orgánico de los paleosuelos, cuya mayor o menor riqueza en carbono-13 está en parte ligada a la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

Esta alta concentración de CO<sub>2</sub> se produciría por la intensa desgasificación volcánica, que ocurría en las fracturas tectónicas de la corteza oceánica (ridges), en donde se separaban a buen ritmo los trozos continentales, en los que había comenzado a escindirse Pangea desde comienzos del Jurásico. Extensas plataformas basálticas oceánicas en el Atlántico (Caribe), Índico (Kerguelen) y Pacífico (Ontong Java) datan precisamente de mediados del Cretácico.

### **Un clima más oceánico**

Además de la mayor concentración de gases invernadero, otro factor climático importante pudo ser la configuración de los mares y continentes, permitiendo un favorable sistema de corrientes oceánicas, que hacía llegar más calor tropical a los Polos. Por otra parte, la desmembración de los continentes, como Europa, divididos en grandes y pequeñas islas, moderaba las oscilaciones estacionales, evitando los rigores climáticos invernales.



El nivel del mar, que ya había ascendido anteriormente en el Jurásico, inundaba con aguas someras el 20 % de los continentes actuales. Llegó a su cota máxima poco después de mediado el período, en la transgresión del piso Cenomaniense. El amplio y abierto Mar de Tethys (precursor del Mediterráneo) anegaba vastas extensiones de Europa y del norte de Africa, y por su lado oriental llegaba a conectarse con el Artico a través de un mar de aguas someras.

La diversa configuración de mares y continentes repercutía no sólo en el sistema de corrientes marinas superficiales, sino también en las corrientes profundas termohalinas. Se cree que a mediados del Cretácico las aguas profundas de los océanos tenían una temperatura media de 15°C, mucho más alta que los fríos 2°C de la actualidad.

### **Intensa sedimentación de carbono**

El evento anoxico mas intenso ocurrió en la transición Cenomaniense/Turoniense, hace 94 millones de años.

Estos eventos anóxicos podrían deberse alternativamente:

1) a un crecimiento excesivo de la productividad biológica en superficie, que agotaría el oxígeno, y que sería debida tanto a la gran abundancia de nutrientes provenientes de las zonas costeras que se inundaban en las transgresiones, como al afloramiento (upwelling) de aguas frías y fértiles de los fondos costeros, tal y como ahora ocurre en el propio Marruecos, y en otras costas del mundo (Wilson, 2001).

2) a una estratificación de las aguas debido al recalentamiento del nivel superficial, lo que impediría la ventilación física de las aguas profundas y la descomposición orgánica. Las fuertes lluvias ayudarían a disminuir la salinidad de la capa superficial y a aumentar la estratificación. Además, la circulación termohalina debía ser mucho más débil y al situarse los lugares de hundimiento en el Trópico debían producir unas masas de agua profunda, a la vez que menos frías, también menos oxigenadas.

- **Catástrofe K/T**

Durante el transcurso de la última parte del Cretácico, desde hace unos 80 millones de años hasta hace unos 65 millones de años, la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico disminuyó de nuevo considerablemente, proceso que transcurrió a la vez que el mar se retiraba de los continentes.

En efecto, al final del Cretácico, en el episodio K/T de transición del Cretácico al Terciario, hace 65 millones de años, se produjo la extinción de diferentes especies que habían dominado la vida de mares y continentes. En el mar desaparecieron los amotines y una gran cantidad de plancton, y en los continentes se extinguieron los dinosaurios más o menos súbitamente, según diferentes y controvertidas teorías. La vegetación, especialmente en Norteamérica, sufrió un drástico cambio. Allí desaparecieron los bosques que existían antes del evento y, tras la catástrofe, las tierras fueron colonizadas por una espesa cobertera de helechos.

Para algunos el desastre ocurrió rápidamente, como máximo unos pocos miles de años, pero para otros la desaparición de las especies fue progresiva; varios millones de años, e incluso comenzó a fraguarse varios millones de años antes del final del Cretácico (Smith, 1998).

La relación de la extinción de los dinosaurios con un brusco cambio climático es la hipótesis más probable. Sin embargo, las causas que originaron este cambio climático no están nada claras: el choque de un gran meteorito o la actividad volcánica.

#### **a. El meteorito de Chicxulub**

Los que creen en una extinción rápida se decantan por la caída de un bólido extraterrestre. Frente a las costas de la península de Yucatán, en el sitio de Chicxulub, en lo que era entonces un tranquilo mar tropical de aguas someras, cayó un enorme asteroide, de unos 10 km de diámetro, que formó un cráter; hoy enterrado bajo dos kilómetros de sedimentos, de unos 180 kilómetros de diámetro. La trayectoria del bólido, que no cayó perpendicular sino oblicuamente, lo que causó mayores estragos; fue del sureste, y por eso los materiales eyectados arrasaron con particular fuerza la costa del sur de

Estados Unidos, en donde existen señales de tsunamis gigantescos.

Tras el choque se depositó probablemente por toda la superficie de la Tierra una fina capa de iridio extraterrestre perteneciente al propio asteroide desintegrado. El iridio aparece en concentraciones altas entre los estratos arcillosos del piso Maastrichtense, que señala el final del Cretácico. Para los Álvarez, padre e hijo, autores de la teoría, que por primera vez descubrieron el iridio en Gubbio (Italia), este acontecimiento estuvo directamente relacionado con la extinción de los dinosaurios (Álvarez, 1980).

Se ha especulado con la posibilidad de que el enorme impacto lanzara a la estratosfera gigantescas cantidades de polvo que causaron varios meses, incluso años, de oscuridad y frío, lo que afectó a la actividad fotosintética de mares y continentes y, posteriormente, a otros elementos de la cadena trófica, como los amotines en el mar y los dinosaurios en la tierra.



**Figura 19. Meteorito de Chicxulub**

## b. Erupciones del Decán

La otra hipótesis es que fueron las erupciones volcánicas la causa principal de la catástrofe K/T. Las extensas plataformas basálticas del Deccan, en la India, se formaron más o menos entonces, e indican que fue una época de fuerte actividad volcánica. Según algunos los dinosaurios no aguantaron el enfriamiento de la superficie de la Tierra que produjo el velo formado en la atmósfera por el polvo y los aerosoles sulfurosos de los volcanes.

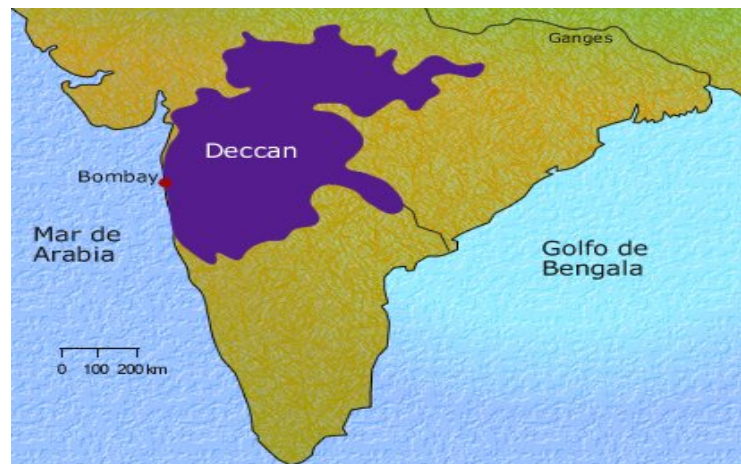


Figura 20. Ubicación del Decán

## 4.4 Era Terciaria

### 4.4.1 El clima muy cálido del principio del Terciario

En la frontera con el Eoceno, hace unos 55 millones de años, la temperatura aún subió más y se produjo un corto pico de calor.

Fue un abrupto evento de calentamiento, que apenas duró unos 80.000 años, pero que influyó enormemente en la evolución de la vida animal

Las temperaturas continentales subieron entre 5°C y 7°C sobre unos niveles térmicos anteriores que ya eran altos. En los mares las aguas superficiales costeras en la Antártida pasaron de tener una temperatura de 13°C a otra de 20°C, y en el Artico se llegaron a alcanzar los 24°C. Aunque las aguas de las regiones subtropicales también se recalentaron, el efecto se notó más en las latitudes altas.

#### **4.4.2 Eoceno medio: comienza el enfriamiento**

Hace 50 Ma, después del Máximo Térmico del Eoceno Inicial (*IETM*), la tendencia térmica se invierte y las temperaturas comienzan a bajar. Durante todo lo que resta del Eoceno, en casi toda Europa y Asia, el clima pasa a ser más frío y seco. Empieza a fraguarse la que va a ser, en una escala geológica larga y a partir del Oligoceno, un período nevera (ice-house period), en el que todavía estamos metidos. Es decir, un período en el que en cualquier estación del año va a haber hielo en los polos. Uno de los datos más significativos de esta tendencia es la evolución de la temperatura del fondo del mar, que de unos 12°C hace 50 millones de años pasa a solamente 6°C al final del Eoceno, hace unos 35 millones de años( en la actualidad apenas supera los 2°C).

#### **4.4.3 El clima cambiante del Mioceno**

- **Mioceno inicial, episodio Mi-1**

Toda la primera parte del Mioceno conserva el alto nivel de temperaturas alcanzado justo al final del Oligoceno.

Probablemente un enfriamiento y un aumento de la acumulación de hielo en la Antártida especialmente en la Antártida Occidental provocó una brusca bajada del nivel del mar, dejando las plataformas costeras en seco y expuestas a la erosión. Todavía no existían mantos de hielo permanentes en el hemisferio norte, por lo que la fuerte bajada del nivel del mar debió deberse exclusivamente a la expansión del manto austral. Recientes investigaciones en sedimentos del mar de Ross indican que en esa transición entre el Oligoceno y el Mioceno se produjeron una serie de variaciones cíclicas en el volumen de hielo de la Antártida, ligadas a ciclos orbitales semejantes a los descritos por Milankovitch para el Cuaternario.

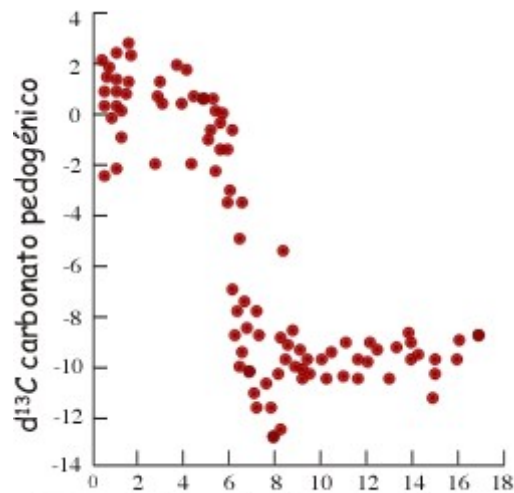
- **Óptimo climático del Mioceno medio**

Después de este corto pico inicial de frío las temperaturas se recuperan y se mantienen más altas que las del Oligoceno durante toda la primera mitad del Mioceno. El volumen de los hielos de la Antártida vuelve a disminuir y el mar se eleva. Las latitudes altas del hemisferio norte se calientan gradualmente y el paisaje de tundra de nuevo es sustituido por un paisaje de coníferas. El nuevo máximo de calor se alcanza en el Mioceno medio, entre hace 17 Ma y 14,5 Ma.



- **Mioceno final**

La segunda parte del Mioceno, que comienza hace unos 14 Ma, es muy diferente a la primera. Las temperaturas se desploman y, sobre todo, el hielo continental aumenta en la Antártida. Esta baja oblicuidad provocaba menor intensidad en la insolación veraniega y además aumentaba el gradiente entre los polos y los trópicos, lo que motivaba una mayor transferencia meridiana de calor y de humedad hacia la Antártida. Se produjo también una disminución del CO<sub>2</sub>, según se aprecia en el análisis isotópico del carbono (ratio <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C) de sedimentos marinos. Al final del Mioceno, entre hace unos 7 Ma y 5 Ma, un manto glacial acaba por cubrir, no sólo el continente austral, sino también toda Groenlandia. Otro hecho climático importante, que acompaña este enfriamiento final, es el aumento de la aridez en vastas regiones de Asia y Africa, fenómeno que se agudizará en el Plioceno.



Tiempo (millones de años antes del presente) 4.4.

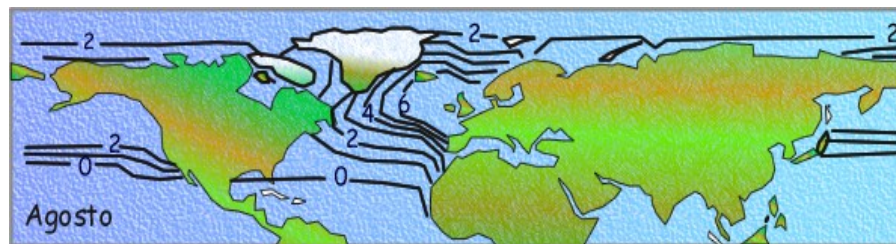
**Figura 21. Isótopos del carbono (d<sup>13</sup>C)**

Isótopos del carbono (d<sup>13</sup>C) de los suelos de los montes Siwalik (sur de Nepal) cuya evolución indica un cambio brusco hace 7,4 Ma, cambio brusco hace 7.4ma en el enfriamiento final del Mioceno, que provocó la sustitución de las plantaasas arbóreas de tipo C<sub>3</sub> por hierbas esteparias de tipo C<sub>4</sub>, más ricas en carbono 13 (fuente: Quade, 1995)

#### 4.4.4 El clima cálido del Plioceno

Al inicio del Plioceno, entre hace 5 Ma y 4 Ma, se frenó el enfriamiento que había venido ocurriendo en la segunda parte del Mioceno. Se invirtió la tendencia térmica y ya en el Plioceno Medio, durante el intervalo comprendido entre hace 4 Ma y 3 Ma, la temperatura global media era posiblemente unos 3°C superior a la actual (Dowsett, 1999). Se ha denominado "Óptimo Climático del Plioceno Medio" al intervalo específico de 300.000 años que va desde hace 3,3 Ma hasta hace 3 Ma.

El clima en el Mediterráneo era más cálido, con 5°C de temperatura invernal por encima de la actual, y con una precipitación media anual entre 400 y 1000 mm mayor que la de hoy (Haywood, 2000).



**Figura 22. Plioceno Medio**

Plioceno Medio, hace 3 millones de años, poco antes del enfriamiento que daría entrada al Cuaternario. En los mapas se indican las probables diferencias de temperatura del agua de la superficie marina con respecto al presente (°C) en los meses de Agosto y Febrero (fuente Dossett).

#### 4.4.5 Enfriamiento final y transición al Cuaternario

Tras este intervalo muy cálido del Plioceno Medio se produjo el último empuje del frío.

La variabilidad del clima se agudizó, propiciada por los ciclos

astronómicos de Milankovitch, y en especial por el ciclo de variación de la oblicuidad del eje, de 41.000 años de duración.

Una teoría oceanográfica alternativa explica que la acumulación de hielo continental en Norteamérica fue posible gracias a que las aguas subárticas del Pacífico atravesaron entonces períodos de marcada diferencia estacional de temperaturas, muy frías en invierno y muy cálidas en verano. enfriamiento global comenzó cuando empezó a fallar la situación permanente de El Niño que había dominado durante la época anterior en el Pacífico Tropical.

## **4.5 Pleistoceno**

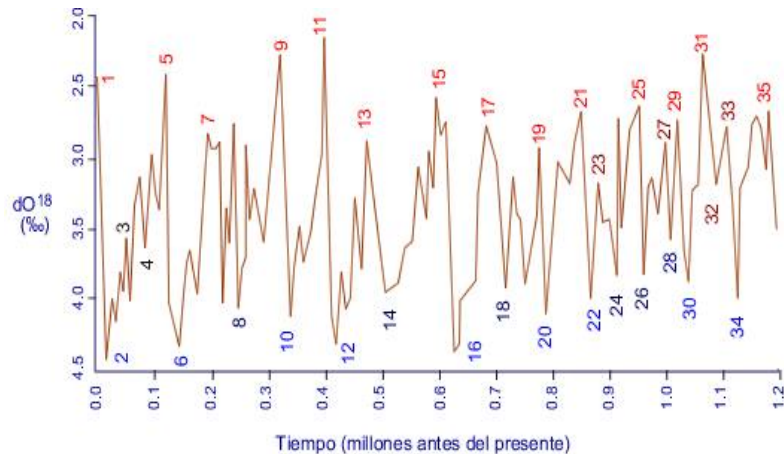
### **4.5.1 Cuaternario**

El Cuaternario abarca dos períodos de duración muy desigual: el Pleistoceno (desde hace 2,7 millones de años (2,7 Ma) hasta hace 11.500 años (11,5 ka) y el Holoceno (desde hace 11,5 ka hasta hoy).

Al principio del Pleistoceno, hace unos 2,7 Ma, las oscilaciones climáticas seguían ciclos periódicos de más o menos unos 40.000 años (40 ka), que parecían obedecer al ciclo de variación de la inclinación del eje terrestre. Las masas de hielo que se formaban en los continentes no eran todavía muy voluminosas.

Después, entre hace 1,5 Ma y 0,6 Ma, la amplitud de los ciclos tendió a aumentar, y a partir de 0,6 Ma los ciclos glaciales se han sucedido en intervalos de una duración entre 80 ka y 120 ka (Rutherford, 2000). Esta duración de los ciclos recientes resulta parecida al del período de variación

de la excentricidad de la órbita terrestre, que es de unos 100 ka. Las diferencias de duración que existe entre ellos (80 k y 120 ka) pueden ser debidas a una modulación de la frecuencia de 100 ka provocada por otra componente secundaria de la excentricidad, que es de 413 ka (Rial, 1999).



**Figura 23. Representación grafica del  $\delta O^{18}$  en función del tiempo**

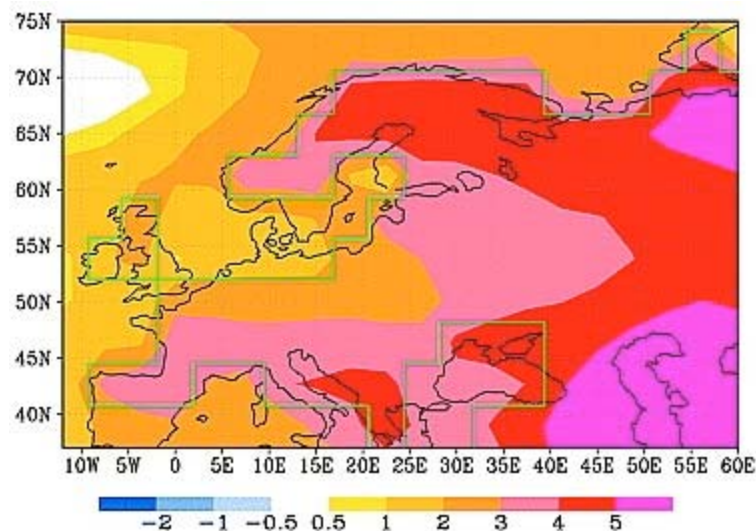
#### 4.5.2. Características del Interglacial Eemiense.

- **Calor**

El interglacial Eemiense fue el penúltimo período cálido que la Tierra ha conocido durante el Cuaternario (el último es el actual: el Holoceno).

Según la datación más utilizada, hacia el 127 ka (hace 127.000 años) acabó la penúltima glaciación y comenzó un período de clima interglacial que duró varios milenios: el Eemiense. El interglacial abarca el estadio isotópico marino 5e (127 ka-118 ka), con una prolongación en Europa hasta el 106 ka (estadio isotópico 5d), pero es posible que haya que adelantar en unos cuantos milenios su fecha de comienzo.

Se cree que en los momentos álgidos de aquel interglacial las temperaturas a escala global eran entre 1°C y 2°C superiores a las actuales. Los modelos que tienen en cuenta las diferencias de insolación en aquella época con respecto a la actual, así como los análisis polínicos, indican que en partes de Asia las temperaturas de Julio eran hasta 4°C superiores a las actuales (Kaspar, 2005).



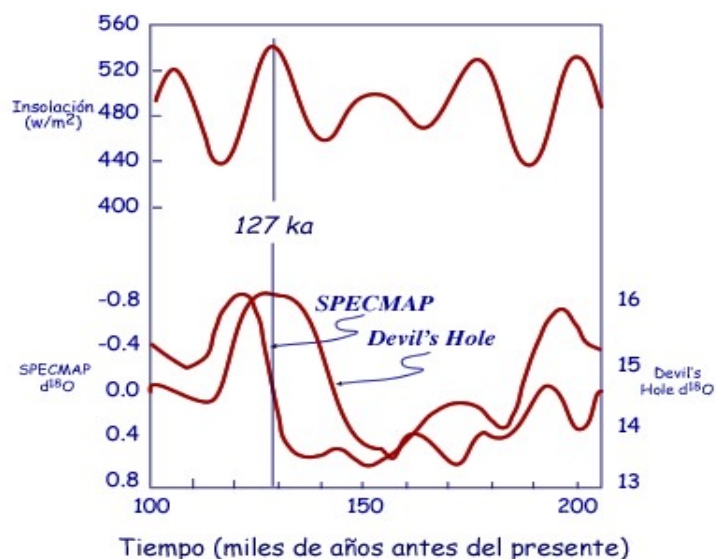
**Figura 24. Diferencias de temperatura en Julio (en°C) entre el 125.000 BP y el presente preindustrial (ref.: Kaspar, 2005)**

En Inglaterra, en donde al período se le ha denominado Ipswichian, son abundantes los fósiles de hipopótamos y de otros animales que hoy sólo se encuentran en regiones tropicales y subtropicales. El reciente sondeo en el hielo de Groenlandia indica unas temperaturas hace 123.000 años, unos 5°C superiores a las actuales (North Greenland Ice Core Project members, 2004).

### 4.5.3 Cuándo y dónde comenzó el interglacial Eemiense?

- **Primera hipótesis: en el Polo Norte**

La teoría “canónica”, se ha considerado que la entrada en los interglaciares siempre ocurría cuando los mantos de hielo del hemisferio norte se deshacían debido a que la radiación veraniega en esas latitudes aumentaba. Esta teoría pareció confirmarse cuando Imbrie y otros colegas derivaron la escala SPECMAP (spectral mapping time scale) de datación de los últimos ciclos glaciares mediante la sincronización de la curva de evolución de los isótopos de oxígeno de los foraminíferos con la curva de insolación de 65°N, derivada de la teoría de Milankovitch (Imbrie, 1984).



**Figura 25.** Arriba: Curva de insolación en 65°N durante el mes de Junio en el transcurso de la penúltima glaciación Riss y durante el interglacial Eemiense. Abajo: evolución de 18O durante la penúltima glaciación y durante el Eemiense según los foraminíferos estudiados por *SPECMAP* y según la caliza de la cueva de Devil's Hole en Nevada.

- **Segunda hipótesis: en el Polo Sur**

Algunos análisis de los sedimentos oceánicos adelantan el comienzo del Eemiense al 135 ka, o incluso antes (Henderson, 2000). También dataciones radiométricas de terrazas coralinas en las Bahamas, en Barbados y en Huon indican que el nivel del mar subió antes del 130 ka, pues ya hacia el 135 ka estaba sólo unos 20 metros por debajo del nivel actual (Gallup, 2002).

También los isotopos del oxígeno de la caliza de la cueva de Devil's Hole, en Nevada, parecen indicar que el Eemiense comenzó en el 135 ka o incluso antes (Karner, 2000). Los cambios de  $d_{18}O$  de la caliza de la cueva dependen de la temperatura del agua de la lluvia local. Se sospecha, sin embargo, que los datos de Devil's Hole representan variaciones del clima específico de Nevada y California y no del clima global. Según esto, el adelanto de la desglaciación (Terminación II) en este lugar se debería al debilitamiento de la corriente fría de California que ocurre, paradójicamente, cuando la glaciación es más intensa y cuando el domo de hielo que recubre Norteamérica es mayor. Ocurre que el cambio topográfico causado por el gran domo de hielo origina un cambio en el sistema de presiones y de vientos, que a su vez causa el colapso de la corriente fría de California. De esta forma las precipitaciones que caen en Devil's Hole, en Nevada, señalan más calor, cuando en realidad, a escala global, la Tierra se encuentra aún sumida en el máximo glacial de la penúltima glaciación (Herbert, 2001).

- **Tercera hipótesis: en el Trópico**

Una tercera hipótesis explica la Terminación II y el origen del interglacial Eemiense no en el norte ni el sur, sino en el Trópico, debido más

específicamente al calentamiento de las aguas del Pacífico. En este sentido, algunos sondeos en el Pacífico Tropical indican, a partir de la evolución Mg/Ca de los foraminíferos, que la datación de los cambios térmicos de la superficie del mar coinciden más con la datación de Devil's Hole que con la datación tradicional derivada de Milankovitch (Lea, 2000; Kerr, 2003). También en un sondeo realizado en la cálida región oceánica de Indonesia, al sur del Borneo, parece claro que el calentamiento de la temperatura del mar antecedió en unos 2.000 o 3.000 años al deshielo en los polos (Visser, 2002).

#### **4.5.4 El final del Eemiense**

Según la hipótesis hasta ahora más aceptada es que el fin del Eemiense y comienzo de la Última Glaciación se inició hacia el 115 ka (hace 115.000 años), cuando las nieves que caían durante el invierno en el norte de Canadá comenzaron a resistir el verano, sin licuarse del todo. En las regiones de Labrador y de la Tierra de Baffin, una pequeña bajada de las temperaturas veraniegas sería suficiente, aún hoy, para que la nieve sobre el suelo persistiese de un año a otro sin derretirse. Hacia el 115 ka se daban unas condiciones de insolación idóneas para que tal cosa ocurriera. Debido a los ciclos de Milankovitch; especialmente al referido a la excentricidad de la órbita terrestre, durante el transcurso del interglacial (entre el 125 ka y el 115 ka) se produjo en esas latitudes altas del hemisferio norte una transición rápida desde una insolación veraniega fuerte a otra mucho más débil. En poco más de diez milenios hubo una disminución de más de 100 Wm<sup>-2</sup> en la intensidad de radiación solar recibida en 65°N (de 550 Wm<sup>-2</sup> a unos 440 Wm<sup>-2</sup>).



En el 115 ka, el perihelio de la órbita anual de la Tierra alrededor del Sol, es decir la época del año de máxima proximidad al Sol, ocurría en el invierno del hemisferio norte, igual que acontece en el presente. Y el afelio, el momento de mayor lejanía de la Tierra al Sol, se producía en el verano del hemisferio norte. Por otra parte, la excentricidad de la órbita era mayor que la actual y la inclinación del eje era menor.

- **Gases Invernadero**

Un posible mecanismo de transmisión del frío al hemisferio austral fue la disminución a escala global de los gases invernadero (dióxido de carbono, metano y vapor de agua). Según Shackleton, la disminución en unas 80 ppm de la concentración de CO<sub>2</sub> tuvo más importancia a escala global que el feedback producido por el aumento del albedo en las regiones árticas (Shackleton, 2000). Gracias a una mejora en los nutrientes marinos, especialmente del hierro (acarreado por los vientos desde los continentes), se intensificó la fotosíntesis planctónica, aumentó la captación oceánica de CO<sub>2</sub> y disminuyó su concentración atmosférica.

## **4.6 La última glaciación**

### **4.6.1 Fases en la última glaciación**

- **Primera fase 115.000 ka – 85/75 ka.**

Después, según este registro de polen de Grand Pile, durante los primeros treinta milenios de la glaciación, entre el 115 ka y el 85 ka, el tiempo se enfrió en el norte de Europa, pero no lo suficiente como para acabar con la vegetación arbórea. Según algunos métodos de análisis, basados en los

isótopos de oxígeno de los foraminíferos béticos y en la evolución de la ratio Mg/Ca; incluso el nivel del mar se recuperó de la bajada inicial, aunque las terrazas coralinas no parecen corroborarlo.

Más al sur, en el Mediterráneo central, un yacimiento muy completo de polen, el del lago Grande de Monticchio, en el sur de Italia, indica también una primera parte de la glaciación, del 115 ka hasta el 75 ka aproximadamente, bastante más cálida que la segunda (Allen, 1999). Aquí apenas parece notarse el enfriamiento inicial del 115 ka y el clima se mantiene cálido casi hasta el 75 ka, cuando se entra definitivamente en la glaciación. De todas formas, en el transcurso de los primeros cuarenta milenios de clima templado, existió un estadal muy frío, coincidente con el frío septentrional, ocurrido hacia el 85 ka, que apenas duró unos siglos, pero que rompió en Monticchio, y probablemente en todo el Mediterráneo, el clima benigno de la primera parte de la glaciación.

- **Segunda fase, 85/75ka-30 ka**

Hubo una segunda gran acumulación de hielo en los continentes entre el 85 ka y el 75 ka, con una bajada del nivel del mar que lo situó unos 70 metros por debajo del actual. Se entró entonces en una segunda fase, que dura hasta el 30 ka, con períodos fríos mucho más largos y agudos. Esta fase abarca los estadios isotópicos marinos mis4 y casi todo el mis3. En la Grand Pile los árboles fueron sustituidos por una vegetación de tundra, con hierbas y arbustos exclusivamente. En Ioannina, en Grecia, el polen arbóreo casi desaparece en los milenios que ocupan el mis4, del 70 ka al 60 ka (Tzedakis, 2002). También los análisis isotópicos de una estalactita de una cueva en el suroeste de Francia, en Villars, indica un enfriamiento medio

superior a los 10°C durante aproximadamente esos milenios (Genty et al., 2003).

- **Tercera fase, 30 ka-19 ka**

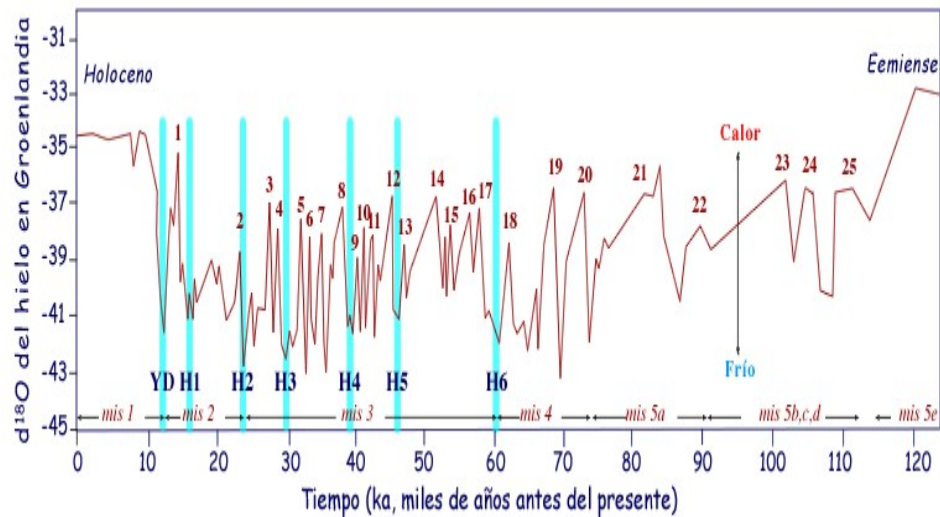
Hacia el 30 ka comenzó a nivel global, pero probablemente no en todas partes, la fase más fría de la glaciación, con su fase más aguda en el llamado Último Máximo Glacial, entre el 23 ka y el 19 ka. Corresponde al final del estadio isotópico mis3 y primera parte del mis2. El nivel del mar bajó hasta una cota situada unos 120 metros por debajo del actual. Aparte de Beringia, entre Siberia y Alaska, emergieron otras muchas regiones que estaban antes cubiertas por aguas someras.

Finalmente hacia el 19 ka el nivel del mar comienza a ascender y comienza la Desglaciación que termina en el 11,5 ka con la definitiva entrada en el actual interglacial Holoceno.

### **Variabilidad térmica durante la Última Glaciación**

A lo largo de la glaciación, el enfriamiento no se produjo de forma uniforme, sino que existieron episodios milenarios de agudización del frío, denominados estadiales. Al final de los estadiales se producían a veces en el Atlántico Norte grandes derrumbes hacia el mar de flotillas de icebergs procedentes de los mantos continentales, llamados eventos Heinrich. El frío de los estadiales era interrumpido luego por períodos de brusco calentamiento, llamados tradicionalmente interestadiales, o bien, en terminología más moderna, eventos de calentamiento Dansgaard-Oeschger. En estos interestadiales las temperaturas continentales y marinas eran muy superiores a las de los estadiales y, a veces, en períodos cortos seculares,

casi alcanzaban las de los interglaciales. Al parecer se sucedían, con intermitencias, en ciclos de unos 1.470 años (Rahmstorf, 2003) que algunos investigadores relacionan con los ciclos solares de Gleissberg y de DeVries (Braun, 2005).



**Figura 26. Inestabilidad climática durante la Última Glaciación según el sondeo GISP II de Groenlandia. Interestadales cálidos señalados con números y episodios Heinrich (suelta masiva de icebergs en el Atlántico Norte) con barras azules. Se señala también la compartimentación temporal en estadios isotópicos marinos (mis). YD es el último período frío: el Younger Dryas (ver mapas de circulación oceánica)**

### **Eventos Heinrich, icebergs y circulación oceánica**

Normalmente los eventos Heinrich coincidían, pero no siempre, con el final de fases de progresivo enfriamiento de unos 10 ka de duración (Bond, 1992). Coincidían también con la proliferación en las aguas del Atlántico Norte del foraminífero planctónico *Neogloboquadrina Pachyderma* (de cola levógira), típico de las aguas polares. La teoría más apoyada es que los mantos de hielo americanos, al crecer demasiado, se desequilibraban y se producían enormes derrumbes de hielo (surges), que en el Atlántico formaban grandes flotillas de témpanos a la deriva. Estos colapsos podían

estar también provocados por la fusión en la base del hielo, causada por el calor del subsuelo rocoso, el cual iba quedando atrapado debajo del domo de hielo a medida que este iba creciendo. Se ha indicado también la posibilidad de que la propia masa de hielo del manto Laurentino, al aumentar de peso, acabase provocando pequeños seísmos que hacían derrumbarse al hielo.

La influencia de los eventos Heinrich en el clima global, o al menos en el del hemisferio norte, se hacía sentir porque al derretirse los icebergs de agua dulce disminuía la salinidad de las aguas superficiales del Atlántico Norte. Disminuía, por lo tanto, la densidad del agua y se debilitaba el movimiento convectivo de hundimiento en los Mares Nórdicos. La menor producción de agua profunda en el Atlántico (NADW), se compensaba con una mayor producción de agua profunda en la Antártida (AABW), que desde allí se movía con rumbo norte, cruzaba el Ecuador y avanzaba por el fondo hasta latitudes muy altas del hemisferio septentrional.

Los eventos Heinrich daban paso posteriormente a una salinización de las aguas del Atlántico Norte, que era clave en la reanudación de la circulación termohalina. Ocurría que, tras las descargas de icebergs, menguaba en muchas partes la masa de hielo de las lenguas glaciares que desaguaban en la costa. Disminuía el aporte de agua dulce al mar y, en consecuencia, aumentaba de nuevo la salinidad del Atlántico Norte. Entonces se reanudaba con rapidez la circulación de la cinta transportadora oceánica (el conveyor belt) y se intensificaba la Corriente del Golfo. Se producía una brusca subida de las temperaturas en las latitudes medias altas y se entraba en un cálido interestadial.

### **Oscilaciones cálidas de Dansgaard-Oeschger**

Aparte de los picos de máximo frío en los que sucedían los eventos

Heinrich, se produjeron durante la Última Glaciación una veintena de picos de calor, denominados eventos Dansgaard-Oeschger (DO), durante los cuales se producían fuertes subidas de temperatura en espacios de tiempo muy cortos, de tan sólo una decena de años. Las subidas de temperatura en los eventos Dansgaard-Oeschger eran de entre 5°C y 8°C, si bien en un estudio detallado y reciente del episodio DO 19, ocurrido hace unos 70 ka, el estudio isotópico del nitrógeno atrapado en el hielo indica una subida térmica mucho mayor, de hasta 16°C (Lang, 1999).

Algunos autores relacionan directamente estas subidas con el efecto invernadero provocado por los escapes de metano a la atmósfera provenientes del subsuelo marino y costero (Kennet, 2002; Hinrichs, 2003). Otros estudios isotópicos niegan tal posibilidad y muestran que las subidas bruscas de la concentración de metano no proceden del subsuelo sino que son consecuencia del aumento de humedad y biomasa en los continentes, consecuencia a su vez del calentamiento (Sowers, 2006).

Lo que está mejor comprobado es que, al menos en el Atlántico, la influencia de las oscilaciones térmicas llegaba hasta las regiones subtropicales (Sachs, 1999). Incluso, para algunos autores, el origen de estos calentamientos estaba en el Trópico.

### **El Último Máximo Glacial.**

#### **Magnitud del frío y del hielo**

La magnitud del enfriamiento fue muy diferente según la latitud. La bajada térmica fue mucho mayor en las latitudes altas que en las bajas, y fue también mayor en el interior de los continentes que en las costas. Así, en muchas partes del planeta, la temperatura media pudo descender más de

15°C. De recientes sondeos en Groenlandia se deduce que la temperatura en el Último Máximo Glacial era allí, en Summit, 23°C inferior a la actual, una diferencia que es el doble, de la deducida, unos 10°C, a partir de los estudios isotópicos del oxígeno y del deuterio del hielo (Dahl-Jensen, 1998). Se calcula que la bajada de la temperatura media en el conjunto de las tierras del hemisferio norte fue entre 5,7°C y 8,7°C.

En las tierras tropicales la bajada de temperatura media fue menor, de unos 5°C, aunque el cambio hidrológico y paisajístico fue también considerable. En los períodos fríos disminuyeron las precipitaciones y vastas extensiones de selva fueron sustituidas por otras de sabana.

Con respecto al mar, la superficie oceánica se enfrió por término medio entre 4°C y 5°C, y las aguas profundas se enfriaron entre 1°C y 2°C. En las latitudes altas del Atlántico Norte el enfriamiento del agua superficial pudo superar los 10°C.



**Figura 27. Diferencias de temperatura (en °C) con respecto al presente de las aguas superficiales del Atlántico Norte durante el Último Máximo Glacial (22 ka), en los meses de Agosto y Febrero, según el proyecto CLIMAP realizado en 1976.**

### **Los mantos de hielo Laurentino y Finoescandinavo.**

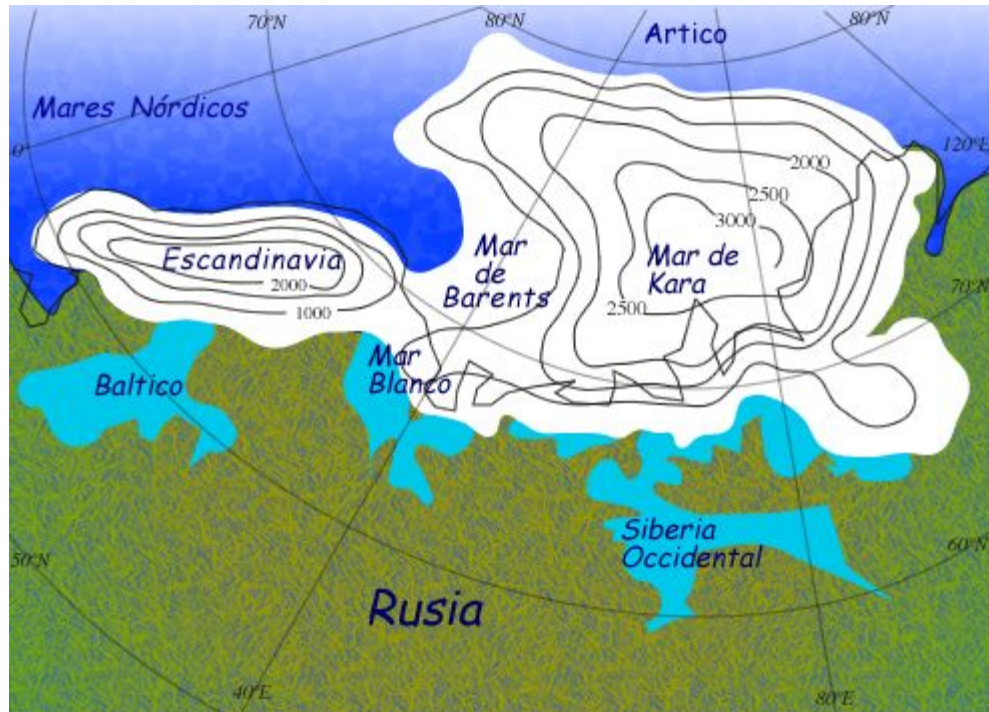
El manto Laurentino, ocupaba durante el Último Máximo Glacial una extensión de 16 millones de km<sup>2</sup> (32 veces la superficie de España) y su volumen era de unos 30 millones de km<sup>3</sup>, mayor que el del manto de hielo que cubre en la actualidad la Antártida. De esta forma, los hielos de Norteamérica acaparaban en volumen nada menos que un tercio del total del hielo continental terrestre. El manto Laurentino, extendiéndose hacia el sur, llegaba por la costa este de Norteamérica hasta una latitud de 36°N, en donde hoy se localiza Nueva York (ese avance meridional, de haberse producido de forma semejante en Europa, hubiese supuesto que el manto Finoescandinavo llegase hasta el Mediterráneo).



Gracias a los aportes de la humedad proveniente del Atlántico, la acumulación de hielo en el manto Laurentino era más importante en su mitad oriental. La máxima altura del domo se situaba por encima de lo que es hoy la hundida Bahía de Hudson. Allí el espesor del hielo alcanzaba entre los 3.000 y los 4.000 metros.

Del manto Finoescandinavo alcanzaron en el Último Máximo Glacial un volumen de unos 7 millones de km<sup>3</sup>, unas cuatro veces menos que el volumen del manto Laurentino. El manto Finoescandinavo cubría esencialmente lo que es hoy Escandinavia y Finlandia. La máxima altura del domo, de unos 2.000 metros de espesor, se centraba en el norte del actual mar Báltico. Hacia el sur, los hielos cubrían todo el Báltico hasta Dinamarca y las llanuras del norte de Alemania y de Polonia, hasta lo que es hoy Berlín, en donde dejó unas claras huellas de relieve glaciar.

Hacia el oeste, a través de una llanura de tundra que hoy está inundada por las aguas poco profundas del Mar del Norte, se pasaba del manto de hielo Finoescandinavo al manto de hielo Británico, que cubría casi toda Gran Bretaña y casi toda Irlanda. El Canal de la Mancha también se encontraba emergido y probablemente el Rin, torciéndose hacia el oeste con respecto a su trayectoria actual, lo recorría hasta desembocar en el Atlántico a la altura de Bretaña. El descenso del nivel del mar hacía que una vasta extensión de la plataforma continental atlántica del noroeste de Francia y suroeste de Cornualles estuviese emergida.



**Figura 28. Mantos de hielo de Escandinavia, y de Barents y Kara hace 80.000 años (principio de la última glaciación).**

Es probable que al comienzo de la última glaciación se formase sobre lo que son hoy los mares árticos de Barents y de Kara, de aguas poco profundas, un gran domo de hielo de más de 3.000 metros de altitud, con su cúspide sobre las islas de Novaya Zemlya. Este manto luego menguó debido probablemente al crecimiento del domo finoescandinavo que le hizo sombra pluviométrica. En el último máximo glacial, hace 22.000 años, no parece ya existir. En los márgenes meridionales de este manto de hielo se formaron grandes lagos resultantes del caudal que los ríos siberianos ya no podían transportar hasta el Ártico.

#### **4.2.5 La Desglaciación**

La teoría preferida es que la desglaciación comenzó en el hemisferio

norte y que los cambios ocurridos en el Atlántico Norte antecedieron en unas cuantas décadas al calentamiento global (Jouzel, 1999). Si así fue, una sucesión de causas y efectos de la desglaciación pudo ser la siguiente:

- **Veranos más cálidos.**

Durante los veranos, la radiación solar en las latitudes altas del hemisferio norte que, según los ciclos de Milankovitch, comenzó a aumentar en el 22 ka, incrementó la fusión estival de los hielos. Y durante los inviernos, al permanecer todavía frío el Atlántico Norte, empezó a producirse un suministro insuficiente de agua evaporada, con lo que la acumulación de nieve invernal en los mantos continentales Laurentino y Fino escandinavo comenzó a ser menor que la ablación veraniega

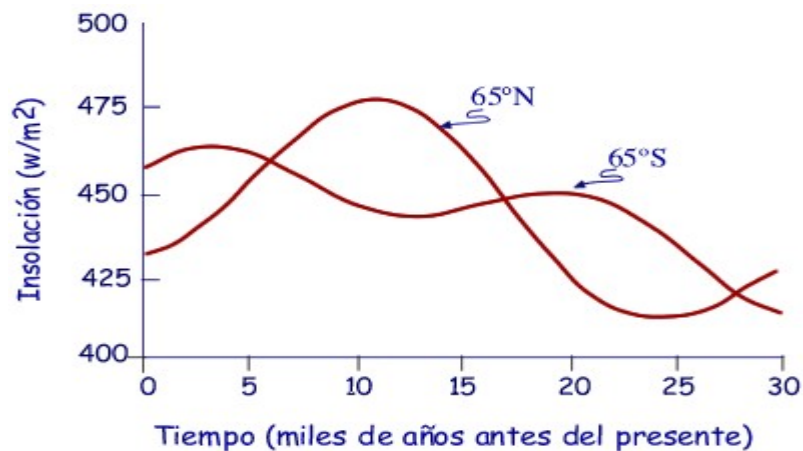


Figura 29. Radiación solar media de los meses del verano que incide en el tope de la atmósfera en la latitud 65°N y 65°S, durante los últimos treinta mil años.

- **Disminución del albedo**

Una vez iniciado el retroceso de los hielos en los bordes meridionales de los mantos, se produjo un feedback decisivo: en las altas latitudes de Norteamérica y de Eurasia, el bosque boreal, que iba recuperando terreno a

la tundra, hizo disminuir el albedo del paisaje, sobre todo durante la primavera y el verano, por lo que aumentó la temperatura de la mitad iluminada del año.

- **Disminución de la banquisa marina**

El aumento de calor estival en las regiones subárticas hizo que disminuyese la extensión de la banquisa ártica, que durante la glaciación actuaba como un aislante térmico entre el mar y el aire. Además, aumentaba el albedo allí donde desaparecía el hielo.

- **Cambios en la circulación de vientos**

La pérdida de altura del enorme manto Laurentino modificó las corrientes de vientos, especialmente los de las latitudes medias. El flujo que desde el Pacífico entra en Norteamérica, al topar con un obstáculo menor, aumentó su componente zonal oeste-este. También en el norte de Europa, la disminución durante el invierno de los anticiclones de bloqueo que antes provocaba el manto Fino escandinavo contribuyó a una penetración más fácil y profunda en el continente de las masas de aire templadas llegadas del Atlántico.

En definitiva, la mayor zonalidad oeste-este de los westerlies ayudó a que tanto Norteamérica como Eurasia tuviesen unos inviernos menos crudos gracias a una mayor influencia oceánica.

### **Aumento de los gases invernadero**

Otro factor que aceleró la desglaciación y que quizás contribuyó a que fuese global y que no se ciñese solamente al hemisferio norte, fue el incremento de los gases invernadero.

## **4.7 Holoceno y Clima Reciente**

### **4.7.1 Humedad y calor en la primera mitad del Holoceno**

- **África**

Al comienzo del Holoceno, en unos pocos milenios, la selva ecuatorial africana se extendió de tal forma hacia el norte y hacia el sur que llegó a ocupar un terreno quince veces más amplio que el que tenía durante la época glacial. La selva ensanchaba sus límites hacia el norte y hacia el sur en varios cientos de kilómetros, ocupando paisajes que hoy son de sabana, la cual a su vez ganaba terreno al desierto del Sahara. Las precipitaciones y la humedad en la selva del Congo alcanzaron un máximo hace unos 9.000 años (Schefuß, 2005). Y durante todo la primera parte del Holoceno, hasta el 6.000 BP, el clima de la selva fue mucho más húmedo que el actual.

El Sahara y su franja meridional, el Sahel, no eran las tierras de arena que hoy conocemos, sino zonas que gozaban de períodos prolongados de bastante humedad, con numerosos lagos y zonas marismáticas que hoy aparecen completamente desecadas.

De acuerdo con este clima más húmedo, durante la primera parte del Holoceno, en contraste con las épocas frías anteriores, la intensidad de las tormentas de polvo y la concentración de aerosoles minerales en el aire era mucho menor. Los estudios de las zonas áridas prueban que entonces las dunas se encontraban generalmente en un estado durmiente, mucho más fijas que antes y, en consecuencia, la erosión eólica era mucho menor.

- **Asia**

En Asia, los desiertos de Arabia y de Rajasthan conocieron también períodos más húmedos durante la primera mitad del Holoceno. Lo atestiguan lechos sedimentarios de paleolagos y paleosuelos que contienen polen fósil indicativo de una vegetación de sabana. También los sondeos en el fondo del Océano Indico, frente a las costas de Arabia, indican períodos con un mayor afloramiento de agua profunda, motivado probablemente por unos vientos monzónicos veraniegos más intensos. Las modelizaciones climáticas del 6 ka indican que las temperaturas en el centro de Asia durante el verano boreal fueron entre 2°C y 3,5°C superiores a las actuales. Las precipitaciones también serían mayores.

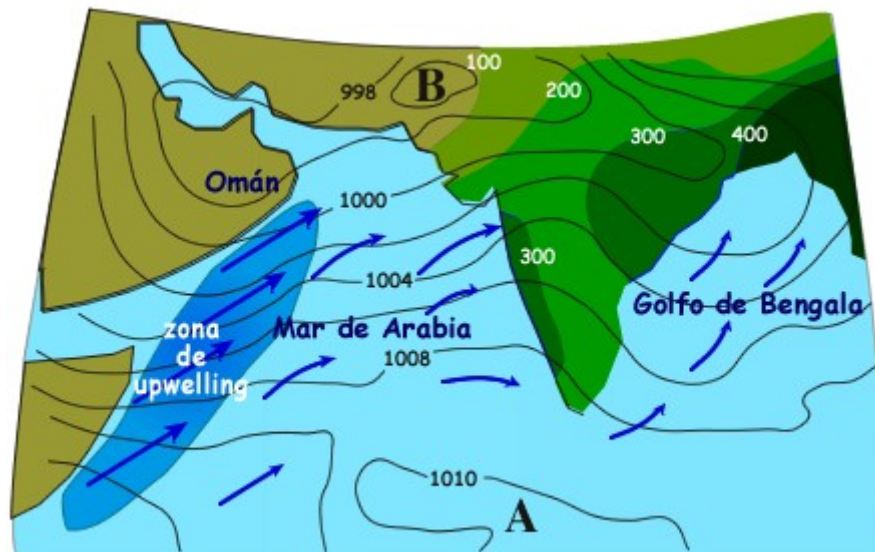


Figura 30. Situación media en Julio en la India y en el Mar de Arabia.

Se representa con diferentes colores la pluviometría del mes de Julio (las isoyetas en blanco). Las bajas presiones se centran al noroeste de la India y las altas presiones en el Indico. Los vientos del sureste (flechas azules) soplan fuertes frente a las costas de Omán, provocando resaca, un intenso afloramiento de aguas profundas y el enfriamiento de las aguas superficiales. Como resultado, el foraminífero planctónico *Globigerina Bulloides* se hace entonces abundante. El estudio de sus variaciones en los sedimentos frente a la costa de

**Omán da una clave de la evolución histórica de la fuerza de los monzones.**  
referencia: Gupta A. et al., 2003, Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean, Nature, 421, 354-357

- **América**

En América, análisis realizados sobre la variación de la sedimentación terrígena en la cuenca marina de Cariaco, en Venezuela, indican una primera parte del Holoceno, con su momento álgido hacia el 8 ka, en la cual el caudal de los ríos que desembocaban en ella era mucho más abundante, por lo que se supone que las precipitaciones también lo eran (Haug, 2001). Aunque parezca paradójico, análisis sedimentológicos en la región ecuatorial americana indican que esta primera mitad del Holoceno, más cálida y húmeda a nivel global que la segunda mitad, registró una actividad menor del Niño (Rodbell, 1999).

- **Episodio excepcional del 8.200 BP**

Excepcionalmente, en esta primera mitad del Holoceno, existieron algunos períodos de aridez, en los que se produjo una bajada drástica del nivel de los lagos africanos y probablemente también de las temperaturas globales. Lo que nos recuerda que la historia del clima está siempre puntuada por acontecimientos raros.

El más anormal de estos episodios se registró entre el 8.400 BP y el 8.000 BP, con un pico de enfriamiento hacia el 8.200 BP (Barber, 1999). Afectó especialmente a Groenlandia y a Europa, pero hay indicios de ese enfriamiento en otras regiones lejanas, como China o Africa tropical, en donde provocó también episodios secos y ventosos (Rohling, 2005; Morrill, 2005). Por el contrario, los sondeos en el hielo de la estación Vostok, en la

Antártida, señalan que allí el episodio fue de calentamiento (Petit, 1999).

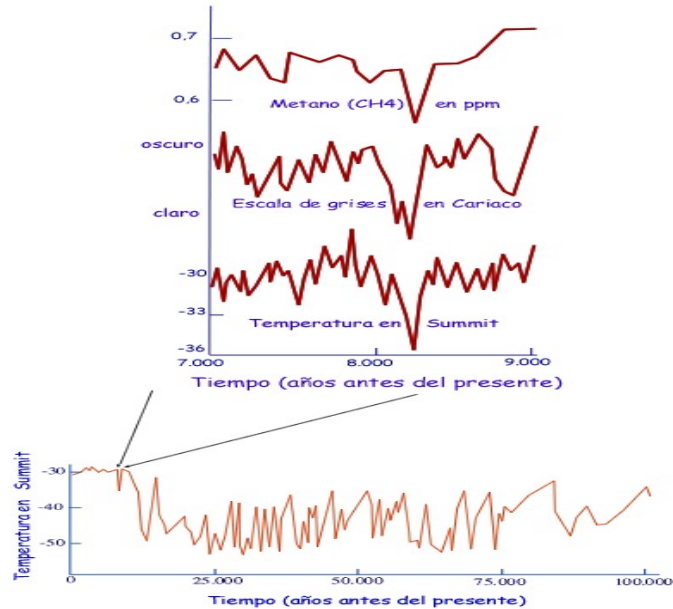


Figura 31. Episodio excepcional del 8.200 BP

#### 4.7.2 Holoceno Medio y Final

- **Enfriamiento y avance del desierto**

Es probable que la agudización de la aridez del Sahara tuviera como causa principal la progresiva reducción de la insolación veraniega en el hemisferio norte. Todavía en el 6.000 BP existían diferencias orbitales importantes con respecto al presente: mayor excentricidad de la órbita (0,0187 frente a 0,0167), mayor inclinación del eje terrestre ( $24,1^\circ$  frente a  $23,4^\circ$ ) y, sobre todo, diferente fecha del perihelio (a mediados de Septiembre en vez de, como ahora, a principios de Enero).

Pero con la reducción de la insolación veraniega, las bajas presiones térmicas del continente, producidas por el calentamiento estival, se fueron haciendo menos profundas, con lo que disminuyó la succión de humedad



desde el Golfo de Guinea. Las lluvias que traían desde el sur los monzones de verano se debilitaron.

Sin embargo, los modelos climáticos indican que la disminución de la insolación en el Sahara, con su efecto de aumento barométrico, no puede explicar por sí sola el brusco aumento de la aridez. Se cree que la progresiva pérdida de la vegetación de sabana, que cubría lo que ahora es un desierto, provocó un potente feedback en el proceso de aridificación (Claussen, 1999). Por debajo de un umbral de precipitaciones, la pérdida de la vegetación estropeó el proceso de reciclaje de la humedad atlántica que penetraba en el continente y las lluvias estivales dejaron de adentrarse en el interior del Sahara (Braconnot, 1999).

- **Declive y surgimiento de civilizaciones**

Hacia el 4.000 BP el cambio climático provocó probablemente el fin de algunas civilizaciones como la de Harappa y la Acadia, y fue el estímulo que llevó a la fundación de otras nuevas que se desarrollaron a lo largo de las orillas del Nilo, del Eúfrates y del Tigris. También la desecación del Sahara pudo estar en el origen de la emigración de algunos pueblos del norte de Africa hacia la más húmeda Europa (Arnaiz, 1998).

Pero la repercusión precisa de los cambios climáticos del Holoceno Medio en el establecimiento y desaparición de antiguas civilizaciones es materia de discusión.

Para algunos, la humedad favorece el desarrollo económico y social. Para otros, por el contrario, es la aridez la que fuerza a los pueblos nómadas a crear poblaciones densas y sedentarias a orilla de los ríos. Por ejemplo, se

ha solido considerar que antes del 4.000 BP, la humedad permitió el desarrollo de una importante civilización urbana en el Indo, la Civilización Harappea, basada en una agricultura de regadío. Harappa y Mohenjo Daro fueron sus principales ciudades. Duró más de cinco siglos y luego desapareció, hacia el 4.200 BP, debido a la salinización de los campos, o a que, al debilitarse los monzones, se llegó ya al umbral mínimo de aridez soportable (Staubwasser, 2004). No deja de haber investigadores que opinan más bien lo contrario: que esta civilización del Indo, se desarrolló a orillas de este río bastante después de que se hubiesen desecado los lagos de aquella región (Enzel, 1999).

Algunos investigadores atribuyen también la desaparición del Imperio Acadio, que se extendía por el actual Irak, a un agudo y largo episodio de aridez que destruyó su agricultura hace 4.000 años. La hipótesis ha ganado fuerza tras el descubrimiento en sondeos submarinos frente a las costas de Omán de estratos con gran cantidad de polvo llegado del desierto y datado de aquella época. Deben corresponder a un período muy seco de una duración de unos 300 años al que los acadios no pudieron sobrevivir (Kerr, 1998).

- **La inundación del Mar Negro**

Los cambios en Europa en el transcurso del Holoceno medio son mucho menos espectaculares que los de las regiones tropicales. Quizás el fenómeno más importante fue la brusca inundación del Mar Negro, ocurrida hacia el 5.500 BP.



**Figura 32. Ubicación Del Mar Negro**

Quizás fue así ... Durante los siglos anteriores al 5.500 antes del presente se produjo un período de enfriamiento y de aridificación del clima en el sur de Europa, de tal forma que el nivel de las aguas del Mar Negro bajó, y además perdió el contacto con el Mar Mediterráneo, convirtiéndose en un gran lago hundido de agua dulce.

Después, una ligera subida del nivel del Mediterráneo hizo que de nuevo se abriese por el Bósforo una grieta de contacto entre los dos mares. Al estar la superficie del Mediterráneo muy por encima del nivel del Mar Negro, la erosión hizo que la grieta se convirtiese pronto en una enorme cascada de agua salada.

Esto explicaría la aparición súbita de moluscos halófilos en los sedimentos del Mar Negro correspondientes a esa fecha. Un torrente de agua, semejante a 200 veces las cataratas del Niágara, se vertió durante

1000 días sobre aquel lago, haciendo que su nivel se elevase 150 metros.

Durante el episodio el ritmo de subida fue de 15 centímetros por día e hizo que la línea de costa se retrasase en algunos lugares centenares de metros al día.

Se ha especulado que el mito del diluvio universal radique en aquella catástrofe natural y que aquella gran inundación impulsase la expansión de la agricultura hacia Europa Central, motivada por la emigración de los pueblos que habitaban las riberas del lago.

Recientemente, el oceanógrafo Robert Ballard, utilizando robots submarinos, ha encontrado indicios de anteriores habitaciones humanas en aquellas zonas recubiertas hoy por las aguas del Mar Negro.

### **4.7.3 El clima del último milenio**

#### **1. Tendencias**

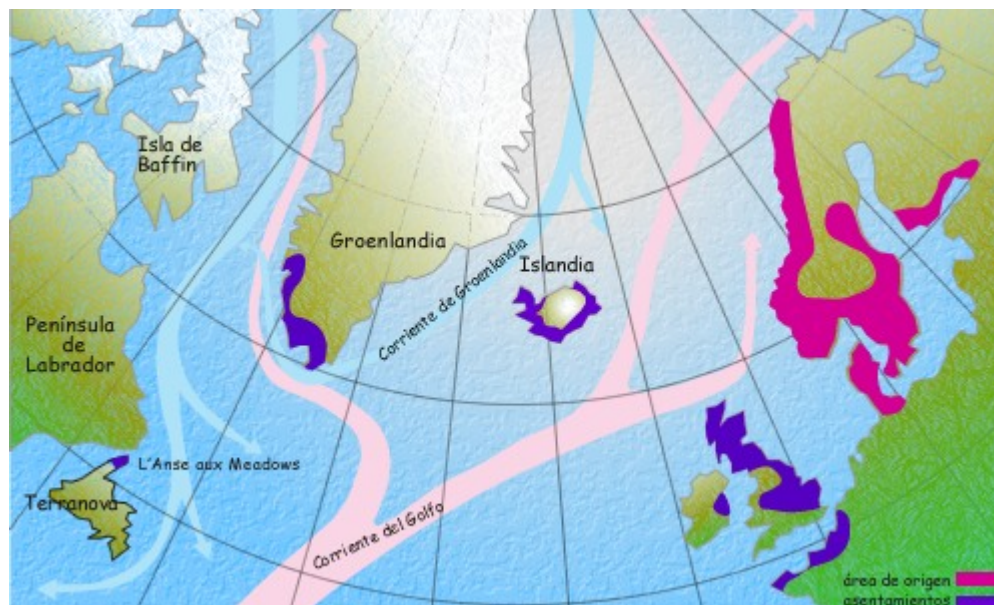
Es muy probable que en el último milenio, especialmente en Europa, hayan existido dos períodos con diferencias térmicas apreciables: un Período Cálido Medieval y una Pequeña Edad de Hielo posterior, a los que ha seguido, probablemente, un calentamiento reciente.

#### **2. Período Cálido Medieval**

En el Período Cálido Medieval, entre el año 700 y el 1300, el clima en Europa fue por lo general más cálido que el actual. El apogeo del período debió alcanzarse hacia el año 1100. Fue una época de clima tan suave que el cultivo de la vid se extendió por el sur de Inglaterra. El Mediterráneo debió sufrir sequías más agudas y al parecer, más al este, el nivel del Mar Caspio

descendió de nivel. Los glaciares suizos se retiraron a cotas más altas (Broecker, 2001). Sin embargo, en el Pacífico al parecer fue un período más bien frío.

Creían los historiadores medievales que entre el año 1000 y el 1300 la población de Europa se multiplicó por tres o cuatro. Coincidió probablemente con un clima óptimo que favoreció la actividad agrícola.



**Figura 33. Período Cálido Medieval**

### 3. Pequeña Edad de Hielo

Hacia el año 1350 el clima de Europa se deterioró y se entró en la llamada Pequeña Edad de Hielo, de la cual no se salió hasta la segunda mitad del siglo XIX, hacia 1850. Probablemente durante este período de cinco siglos las bajas temperaturas no fueron constantes. Parece que hubo en especial dos pulsiones de frío separadas en el tiempo, una al principio, en el nefasto siglo XIV, y otra al final del período, en la primera mitad del siglo XIX. Los datos que lo avalan se basan, por ejemplo, en el estudio de alta

resolución temporal en los hielos de Groenlandia y en los espesos sedimentos de foraminíferos que se pueden encontrar en las Bermudas y en las costas de Mauritania (deMenocal, 2000).

Durante la Pequeña Edad de Hielo desaparecieron los viñedos de Inglaterra, que se habían cultivado desde el anterior Período Cálido Medieval, y el cultivo de cereal en Islandia. La congelación invernal de los ríos de todo el norte de Europa era frecuente. Recogen los grabados de la época escenas en las que incluso en Londres llegaron a organizarse ferias y mercados sobre las aguas heladas del Támesis. Más al sur, en los períodos más crudos, se produjeron espectaculares avances de los glaciares de los Alpes, que periódicamente amenazaban con cubrir los valles habitados de esa región. También en Escandinavia se producían avances que ocupaban zonas anteriormente cultivadas. Así por ejemplo un documento indica que el glaciar Nigardsbreen avanzó 3 km entre 1710 y 1743 y destruyó una granja llamada Nigard. Una petición de compensación económica fue enviada al rey Federico V de Dinamarca.

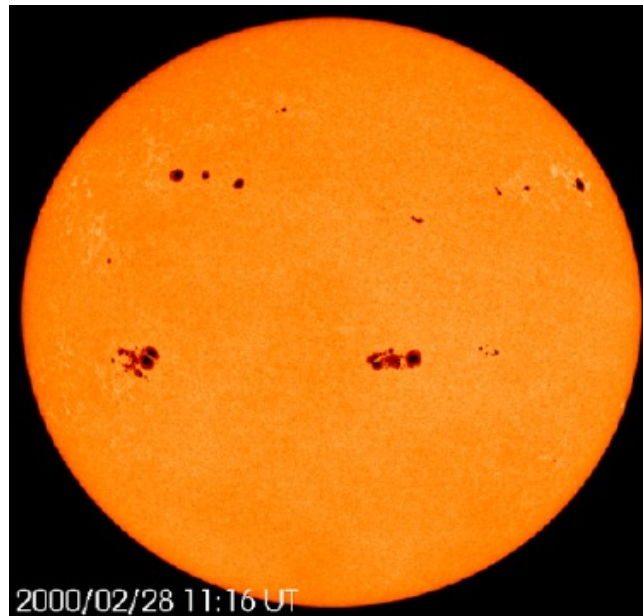


**Figura 34. “Paisaje de invierno con trampilla para pájaros” del pintor flamenco Peeter Brueghel “el Viejo” (siglo XVI).**

### **Manchas y ciclos solares**

Las manchas solares, que se pueden ver fácilmente con cualquier telescopio o, incluso, a simple vista con métodos más rudimentarios, son zonas oscuras y relativamente más frías de la fotosfera solar. La fotosfera es la superficie visible del Sol. Su temperatura media es de 5.800 °K. Las manchas solares se encuentran a temperaturas varios cientos de grados más frías que el conjunto de su superficie. Esa zonas, al ser oscuras, emiten menos energía de la normal, pero las áreas que las rodean, las fáculas solares, aparecen, por el contrario, más brillantes. De esta forma, resulta que, en su conjunto, el Sol emite más energía cuantas más manchas solares haya en un momento determinado.

Algunas manchas solares alcanzan gran tamaño y duran varios meses. Otras no pasan de algunos centenares de kilómetros y desaparecen a los pocos días. Las manchas corresponden a zonas en que fuertes campos magnéticos retienen temporalmente el calor que fluye del interior del Sol hacia la fotosfera. Las primeras manchas de un nuevo ciclo aparecen junto a los polos. En los años siguientes surgen otras, cada vez más cercanas al ecuador solar, hasta completar el denominado "máximo solar". Desde mediados del siglo XIX se sabe que el número anual varía aproximadamente en ciclos de 11 años.



**Figura 34.** Manchas y ciclos solares

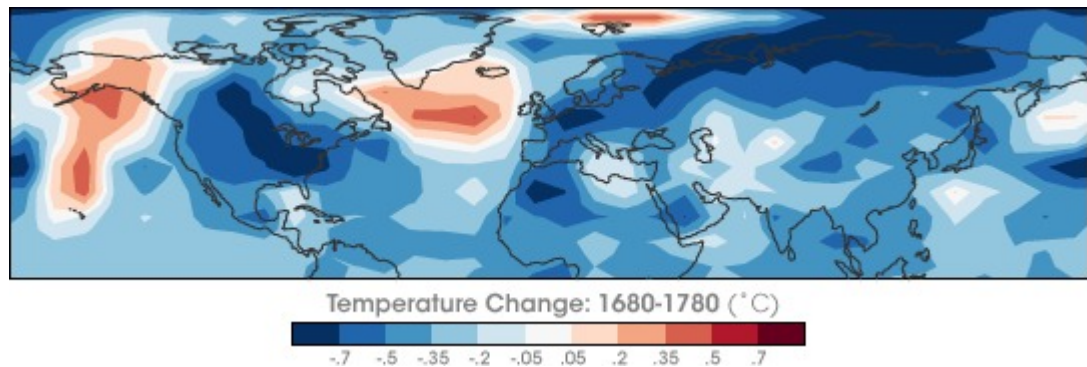
### **Mínimo de Maunder**

De los períodos citados, el más anómalo y mejor conocido es el ocurrido entre 1645 y 1715 llamado Mínimo de Maunder (de su codescubridor, Walter Maunder, 1894). Durante su transcurso las manchas casi desaparecieron por completo. En aquellos años se dieron, por lo menos en Europa, inviernos muy crudos, como el de 1694-1695, durante el cual, según tres diferentes escritores de diarios particulares, el Támesis permaneció helado durante varias semanas (Kington, 1995). Picard, del Observatorio de París, escribía un día de 1671 que le hacía feliz haber descubierto una mancha ya que llevaba diez años auscultando el Sol cuidadosamente sin haber visto ninguna.

Se ha calculado que la “constante solar” durante el Mínimo de Maunder era unos 3,5 W/m<sup>2</sup> menor que la actual, es decir, un 0,24 % más baja. Esto es perfectamente posible ya que en el estudio de estrellas semejantes al Sol



se han observado variaciones de luminosidad aún mayores, de hasta el 0,4 % (Baliunas, 1990). Se calcula que el enfriamiento global provocado por esta disminución de insolación, sería en la superficie terrestre de entre 0,2 y 0,6 °C (Lean, 1995). Pero en algunas regiones como el norte de América y el norte de Europa el enfriamiento parece que fue mayor: entre 1°C y 2°C.



**Figura 35. Enfriamiento durante el Mínimo de Maunder (hacia 1680 BP) según un modelo de circulación general del Instituto Goddard-NASA (Shindell, 2001)). Se representa el cambio de temperatura (temperatura de 1680 BP menos la de 1780 BP).**

#### 4.7.4 La complejidad de los factores

- **Humedad atmosférica**

Los posibles cambios ocurridos a escala global en la humedad de la atmósfera terrestre durante el transcurso del siglo XX son muy mal conocidos, pues existen poquísimas series de mediciones. Además, el vapor de agua es el único gas del aire que no se reparte espacialmente de forma homogénea, lo que hace aún más difícil cuantificar empíricamente su posible evolución global.

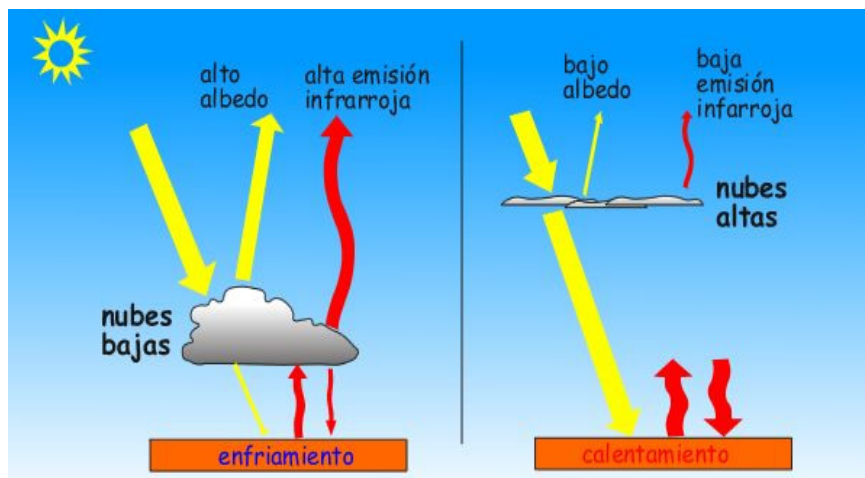
El máximo de humedad se registra en las zonas ecuatoriales y el mínimo en las latitudes altas. Si en un instante toda la humedad de una

columna de aire se condensase y precipitase en forma líquida, el espesor de la cantidad recogida sobre los océanos tropicales sería de unos 60 mm y sobre los círculos polares de tan sólo 5 mm (tan baja, o más, que en los desiertos más áridos).

- **Las nubes**

### 1. Efectos radiativos y térmicos de las nubes

Las nubes afectan a los flujos de energía solar y terrestre de diversas maneras y con efectos a veces opuestos. El resultado del efecto reflectante con respecto a la radiación solar (es decir, pérdida de energía) y del efecto invernadero con respecto a la radiación terrestre (es decir, retención de energía) depende de factores diversos: del tamaño de las gotas, de la densidad de las nubes, de su espesor; de su altitud, de su temperatura, etc.



**Figura 36. Diferencias radiativas de las nubes según su altura.**

**Izquierda:** nubes bajas espesas y de temperaturas cálidas reflejan mucha luz solar (flechas amarillas) y además emiten desde su tope abundante radiación infrarroja (flechas rojas) hacia el exterior. Por lo tanto, enfrían la superficie. **Derecha:** nubes altas finas (cirros), de cristalitas de hielo, son transparentes a la radiación solar y su emisión infrarroja hacia el espacio es pequeña pues su superficie está muy fría. Por lo tanto, calientan la superficie

### **Los cirros**

Se cree que, en general, los altos y delgados cirros, muy fríos, formados por cristalitas de hielo translúcido, dejan pasar mucha radiación solar entrante (bajo albedo), pero atrapan gran parte de la energía terrestre que llega hasta ellos, ya que, debido a las frías temperaturas, la energía que emiten y dejan escapar al espacio es pequeña. Por lo tanto añaden energía a la troposfera, ya que su efecto albedo es inferior a su efecto invernadero. Pero no todos los cirros son iguales.

Según Ramanathan, basándose en investigaciones sobre lo que ocurre en el Pacífico cuando se produce allí el fenómeno del Niño, las nubes en los trópicos juegan un papel de termostato, que podría oponerse al calentamiento (Ramanathan, 1991). Según esta teoría, rechazada por otros modelistas (Mitchell, 1991), el incremento de las temperaturas superficiales del océano no puede exceder nunca de un cierto límite porque las altas temperaturas provocan un incremento de la convección y un aumento del espesor de los cirros de hielo, que dejan de ser translúcidos y se convierten en altamente reflectivos.

### **Los estratos bajos**

Los blancos estratos bajos que suelen cubrir vastas extensiones marinas, reflejan hacia arriba gran cantidad de energía solar y además retienen poca radiación infrarroja terrestre, ya que, al estar su tope a baja altura, la temperatura de la superficie de emisión saliente hacia el espacio es alta y es también elevado el valor de la energía que emiten hacia arriba. Su efecto es un enfriamiento de la superficie, que algunos calculan en unos 15 W/m<sup>2</sup>.

### **Los cúmulos**

Más incertidumbre, en cuanto al signo de sus efectos, presentan las nubes de tipo cumuliforme, de las que no se conoce muy bien sus porcentajes de absorción, reflexión y emisión de energía, muy dependientes de las características físicas, como el espesor, densidad y temperatura de los diferentes niveles.

### **Por regiones**

Por todo lo anterior, el efecto radiativo de las nubes es muy desigual en unas regiones y otras del planeta. El reparto de los porcentajes de energía solar absorbida y reflejada varía mucho según el tipo de nube, la latitud y la estación del año (Li, 1995). Por ejemplo, en las regiones oceánicas tropicales del oeste de Africa y de Sudamérica, cubiertas con frecuencia por capas bajas de estratocúmulos, las nubes pueden provocar una disminución neta en superficie de  $100 \text{ W/m}^2$ . Por el contrario, los altos cirros finos que a veces cubren los desiertos tropicales suelen producir un aumento neto de hasta  $25 \text{ W/m}^2$ . En las latitudes medias, las depresiones profundas con frentes de nubes asociados tienen un efecto de enfriamiento debido a que el albedo es muy alto. Por el contrario, en las regiones polares la cubierta de nubes tiene un efecto de calentamiento, ya que, aparte del efecto invernadero, las nubes tienen menor albedo que las superficies subyacentes, despejadas de nubes pero cubiertas de nieve.

En el balance de radiación que llega a la superficie, los cálculos efectuados a partir de mediciones satelitarias indican que las nubes producen un pequeño calentamiento en los trópicos, un enfriamiento muy notable en las latitudes medias y, de nuevo, un calentamiento pequeño en las latitudes altas (Sohn & Smith, 1992).

Finalmente, es oportuno señalar que, aunque globalmente las nubes enfrían, su efecto térmico en superficie es diferente durante el día que durante la noche. Por ejemplo, las nubes bajas y medias tienden a enfriar los días pero tienden a templar las noches. Por lo tanto, hacen que disminuyan las oscilaciones térmicas entre los días y las noches. Globalmente la nubosidad provoca una reducción de las oscilaciones térmicas diarias y de las diferencias entre las máximas diurnas y las mínimas nocturnas.

## **2. Nubosidad y radiación cósmica**

Los rayos cósmicos galácticos consisten en partículas muy energéticas (fundamentalmente protones) que se originan en supernovas de nuestra galaxia, fuera del Sistema Solar. Es posible que la radiación cósmica que entra en la atmósfera terrestre ayude, por procesos ionizantes, a que aumente la concentración de núcleos de condensación en el aire y, en consecuencia, a la formación de más nubosidad (Carslaw et al. 2002). Un reciente experimento dirigido por Henrik Svensmark en el Centro Nacional del Espacio de Dinamarca, ha logrado simular este proceso.

Se sabe que el incremento de la intensidad del viento solar que es también un flujo de partículas ionizadas pero de menor energía hace que disminuya la entrada de radiación cósmica en todo el Sistema Solar, incluida la atmósfera terrestre.

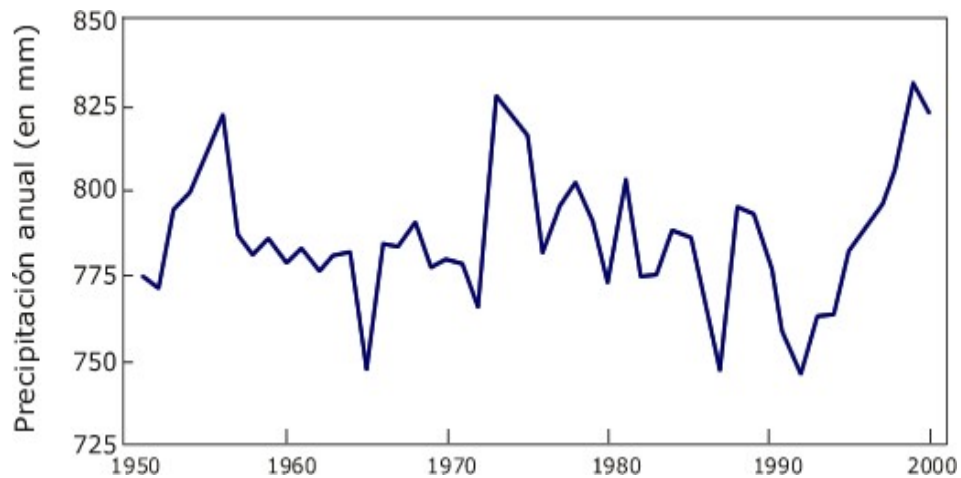
### **4.7.5 La lluvia y la aridez**

- **La lluvia**

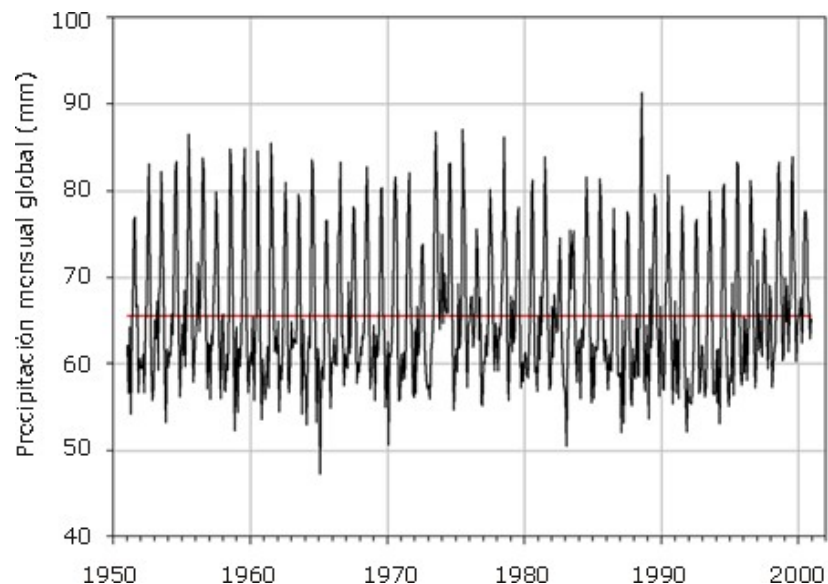
La variabilidad espacial de la precipitación es muy grande y en muchas regiones del mundo escasean las mediciones. De todas formas algunos

análisis indican que en la segunda mitad del siglo XX, entre 1950 y el 2000, la media anual de la precipitación global en los continentes ha rondado los 800 mm.

Teóricamente los modelos calculan que debería haber un aumento porcentual de las precipitaciones de un 3% aproximadamente por cada grado de aumento de la temperatura global media (Hulme,1995), ya que con más calor se intensifica el ciclo hidrológico evaporación-precipitación. Sin embargo, la precipitación global no indica hasta ahora ninguna tendencia definida.



**Figura 37. Precipitación global en los continentes en el período 1950-2000 (referencia: proyecto VASCLimo)**



**Figura 38. Precipitación media mensual en el conjunto de los continentes desde 1952 hasta 2002 (referencia: proyecto VASCLIMO)**

En Estados Unidos, la media anual de precipitación, según el National Climatic Data Center ha mostrado una tendencia al alza estadísticamente significativa y de un valor de 58 mm por siglo.

En la India, por el contrario, la precipitación de los monzones, no parece haber mostrado ninguna tendencia definida (Vinnikov, 2002). Un índice general para toda la región monzónica tampoco muestra ninguna tendencia desde 1980 al 2005, y sí una ligera disminución en las décadas anteriores (Wang, 2006).

- **La aridez**

En el balance actual del ciclo hidrológico hay un transporte aéreo neto de vapor de agua de 45.000 km<sup>3</sup>/año desde los océanos hacia los continentes (que los ríos devuelven al mar) (Oki, 2006). De confirmarse un

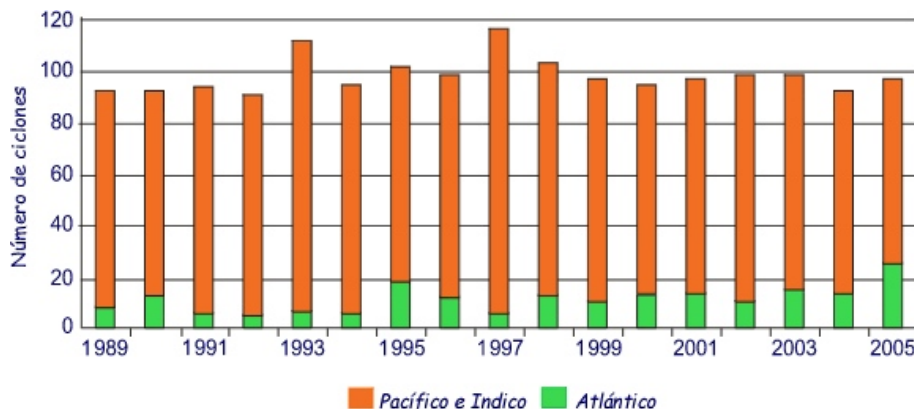
calentamiento global, el ciclo hidrológico se intensificaría. Debido a la mayor evaporación oceánica, el incremento de los aportes de humedad hacia los continentes superaría al incremento de la evapotranspiración de los territorios continentales. Por lo tanto, la aridez de los continentes a escala global disminuiría. La historia del clima corrobora que un clima más cálido es un clima menos árido.

### **Ciclones tropicales**

Es muy difícil también determinar si ha habido cambios en la frecuencia anual de los huracanes de mayor intensidad, que se agrupan en la categoría 3-5 en la escala de Saffir-Simpson, con presión inferior a 965 mb, vientos sostenidos superiores en velocidad a los 50 m/s, y olas de más de 3 m (Landsea, 2006).

Parece que la década más agitada en el Atlántico fue la de los 50, con 39 huracanes fuertes, pero es difícil, o imposible, saber si anteriormente no se batió este record ya que los huracanes no eran evaluados de la misma manera. El problema es aún mayor si nos referimos a otros océanos. Por ejemplo, el ciclón tropical más catastrófico que se conoce ocurrió en Bangla Desh en Noviembre de 1970, causando entre 300.000 y 500.000 muertes humanas. Sin embargo, no se hizo ninguna estimación de su potencia. En los últimos años, a excepción de 1997 y 2002, años del Niño, los huracanes fuertes del Atlántico han sido más frecuentes de lo normal, especialmente en el 2005. No así en el Pacífico ni en el Índico. Incluso un estudio de la frecuencia de tifones que han afectado a China desde 1957 hasta el 2004 indica una tendencia a la disminución (Ren, 2006)





**Figura 39. Frecuencia anual del número total de ciclones.**

Prehistoriadores llegaron a imaginar. El desarrollo de la genética, por ejemplo, ha permitido que algunas teorías existentes hayan sido confirmadas o descartadas y, en un futuro no muy lejano, probablemente, la tecnología dará respuesta a aquellas preguntas sobre la evolución humana que permanecen sin contestar. La investigación, mientras tanto, continúa.

## 5.2 La Aparición de la Vida en la Tierra

El ser humano es un recién llegado a la Tierra. Según el calendario cósmico creado por el científico estadounidense Carl Sagan, si comparáramos la historia del universo con un año de nuestra existencia, podríamos establecer que la aparición y desarrollo del género Homo en el planeta se correspondería sólo a la última hora y media del 31 de diciembre, y que, un hecho tan ancestral como hoy nos parece la invención de la escritura, se habría producido en realidad a únicamente 9 segundos del fin de año.

En este sentido, tomando como referencia los estudios radiométricos realizados en los minerales más antiguos del planeta, hoy puede

determinarse que la Tierra se formó hace  $4550 \pm 70$  millones de años. Nuestro planeta, según afirman los geólogos, habría sido inicialmente un globo incandescente que, tras un proceso de acreción de meteoritos, aumentó de tamaño y, con el paso del tiempo, acabó enfriándose y solidificándose.

Durante este proceso, que duró unos mil millones de años, la influencia de la gravedad provocó que los materiales pesados se fueran depositando en el interior del globo, mientras que los más ligeros permanecieron en la superficie. Así se formó la corteza terrestre. Al mismo tiempo, las erupciones volcánicas generaron la salida de vapores y gases, y la consiguiente aparición de una atmósfera primitiva, compuesta de hidrógeno, helio, anhídrido carbónico y vapor de agua.

Cuando la temperatura de la superficie fue inferior a la de la ebullición del agua, el vapor se condensó en grandes cantidades y provocó fuertes precipitaciones que, además de erosionar las rocas de la corteza terrestre, determinaron la aparición de los océanos. Fue en este contexto, hace unos 3.500 millones de años, cuando, en el agua, aparecieron las bacterias más primitivas es decir, los primeros organismos vivos.

Tuvieron que pasar unos 700 millones de años más, no obstante, para que estas primigenias formas de vida evolucionaran hasta convertirse en algas unicelulares capaces de realizar la fotosíntesis y expulsar oxígeno. Con la incorporación de este último elemento a la atmósfera, hace unos 1500 millones de años, aparecieron las primeras células eucariotas con núcleo diferenciado y, unos 500 millones de años más tarde, la evolución de éstas permitiría el desarrollo de seres capaces de intercambiar información genética entre sí, es decir, de reproducirse sexualmente.

En el siguiente período, el Ordovicio, fueron muy abundantes los trilobites y los corales y, al mismo tiempo que aparecían las primeras formas de vertebrados marinos los peces sin mandíbulas, como las lampreas, algunas plantas e invertebrados iniciaron la colonización de tierra firme. Por su parte, la tercera división de la Era Primaria, el Silúrico, estuvo marcada por la abundancia de algas marinas y de peces algunos ya con mandíbulas-, así como por la existencia de miriápodos y de plantas vasculares con conductos internos para la circulación de agua y nutrientes, en el medio terrestre.

La aparición de nuevas tierras. Altas cordilleras y grandes lagos inauguró el período que siguió al Silúrico, el Devónico, conocido también como la “era de los peces”. Junto a la floreciente fauna marina y lacustre, en este tiempo se multiplicaron las formas de vida en las tierras emergidas, mostrándose, por ejemplo, los más primitivos insectos y anfibios; estos últimos, como una evolución de los peces pulmonados y con aletas pedunculadas, es decir, capaces de respirar y de desplazarse fuera del agua.

En el Carbonífero, las especies vegetales, como los helechos y los gigantes. Fue en este momento, además, cuando crecieron las primeras coníferas, dando lugar a espesas selvas que, enterradas bajo los aluviones en épocas posteriores, serían responsables de la formación del carbón mineral. La existencia de un clima pantanoso, húmedo y cálido, por otra parte, favoreció la multiplicación de familias y especies de insectos tanto terrestres como voladores y de anfibios. De un grupo de éstos, precisamente, evolucionarían los reptiles, los primeros seres que pusieron sus huevos fuera del agua y que, gracias a desarrollar una articulación occipital, pudieran mover la cabeza.

Durante el Pérmico, el período que pone fin al Paleozoico, los desiertos y las montañas sustituyeron progresivamente a los húmedos bosques y pantanos del hemisferio Norte. Este cambio climático y ambiental provocó el retroceso de los animales que dependían del agua, como los anfibios, y benefició a aquellos que, por su evolución fisiológica y reproductiva, mejor se habían adaptado a la vida terrestre: los insectos y los reptiles.

De entre los grupos de reptiles surgidos a finales de la Era Primaria destacan los terápsidos, los antepasados de los mamíferos. Se trataba en su mayoría de animales terrestres, con grupos tanto de carnívoros como de herbívoros, que, a diferencia del resto de reptiles, desarrollaron poco a poco la capacidad de regular la temperatura interna de su cuerpo. A finales del Pérmico, no obstante, algún tipo de catástrofe acabó con numerosas especies vegetales y animales del planeta, y, junto a éstas, se extinguieron la mayor parte de terápsidos.

### **5.3 Dominio de los dinosaurios**

El Paleozoico dio paso al Mesozoico o Era Secundaria, que se inició hace unos 250 millones de años. El primero de los tres períodos geológicos en que se divide éste, el Triásico, estuvo caracterizado en sus últimos momentos por una nueva extinción masiva de especies y por la aparición de los saurios, que pronto se diversificaron y, gracias a su capacidad de adaptación, comenzaron a dominar el planeta.

Los únicos descendientes de los terápsidos del Paleozoico que sobrevivieron al Triásico fueron los cinodontes, que, tras millones de años de evolución, darían origen a los mamíferos. En este sentido, muchos expertos

apuntan al Thrínaxodon como posible ancestro directo. Los mamíferos aparecieron en la Tierra hace unos 230 millones de años, es decir, a finales del Triásico. Una de las especies más primitivas que se conocen fue el Morganucodon, cuyo fósil ha sido encontrado en cuevas de Gran Bretaña y de China. Según se cree, este diminuto insectívoro, con aspecto de zarigüeya y costumbres nocturnas -lo que se deduce por el gran tamaño de sus ojos empezó a caminar por el planeta hace unos 200 millones de años. Establecer exactamente la frontera que existió entre los primeros mamíferos y los reptiles cinodontes con quienes llegaron a convivir largo tiempo resulta muy difícil, puesto que órganos como el pelo o las mamas, que son los que definen a los mamíferos, no se conservan fosilizados.

Mientras los dinosaurios fueron amos y señores de la Tierra, lo que ocurrió durante el Jurásico y el Cretácico hasta hace unos 65 millones de años, los mamíferos fueron pequeños e insignificantes. A la sombra de los gigantescos reptiles, no obstante, los descendientes de los terápsidos lograron diversificarse y evolucionaron lentamente. En este período, por ejemplo, aparecieron los primeros monotremas parientes lejanos del ornitorrinco, así como los ancestros de los marsupiales y de los placentarios. Sin embargo, de todos los grupos de mamíferos del Mesozoico, el más destacado fue el de los multituberculados, diminutos animales de aspecto parecido a los roedores que se extinguieron hace 30 millones de años. En el Jurásico, por su parte, también aparecieron las aves, evolucionando a partir de un grupo de reptiles voladores.

#### **5.4 La era de los mamíferos**

Al final del período Cretácico, se produjo la extinción masiva de los dinosaurios y otras especies vivientes. Las causas de esta catástrofe son aún

desconocidas, aunque la teoría más aceptada es la que señala el impacto de un meteorito de gigantescas dimensiones como detonante de un cambio climático con nefastas consecuencias para la flora y la fauna del planeta.

La desaparición de los grandes reptiles dio paso a la Era Terciaria que, junto con la Cuaternaria, forman el llamado Cenozoico.

Durante ésta, los mamíferos, aprovechando el vacío dejado por los saurios, se multiplicaron y diversificaron, imponiendo su dominio sobre el resto de vertebrados. De las 10 familias que existían al iniciarse el primer periodo de la Era Terciaria, el Paleoceno, se pasó a casi 80 en el Eoceno tras sólo 10 millones de años de evolución. Muchas familias de mamíferos modernos, por su parte, datan del Oligoceno, es decir, de hace entre 35 y 24 millones de años, y fue en el Mioceno hace entre 24 y 5 millones de años cuando se registró la mayor diversidad de especies. En este último período aparecieron los primeros y más primitivos homínidos, como los *Proconsul*, *Dryopithecus* y *Ramapithecus*.

A partir del Mioceno, el número de mamíferos empezó a declinar y, como consecuencia de los profundos cambios climáticos que se produjeron durante el Plioceno, hace unos 2 millones de años muchas especies desaparecieron.

Estaba a punto de iniciarse la Edad del Hielo, la Era Cuaternaria o Neoceno, en la que un primate muy avanzado iba a imponer su dominio: el *Homo*.

## **CAPÍTULO V**

### **EVOLUCIÓN DEL CLIMA CON LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA**

#### **5.1 Coevolución de la vida con el Clima**

Trazar el camino que siguió la humanidad durante este prolongado lapso de tiempo es el reto al que se enfrentan los paleoantropólogos, los científicos que estudian nuestros orígenes. Su desafío, no obstante, es tan apasionante como quijotesco, puesto que, de un proceso tan dilatado y complejo como es el de la hominización, hoy sólo se conservan unos cuantos restos de herramientas y huesos fosilizados que, pese a su innegable valor documental, resultan insuficientes para completar el árbol de la evolución humana.

Pero lo que hoy sabemos sobre nuestros antepasados es mucho más de lo que hace sólo unas décadas los prehistoriadores llegaron a imaginar. El desarrollo de la genética, por ejemplo, ha permitido que algunas teorías existentes hayan sido confirmadas o descartadas y, en un futuro no muy lejano, probablemente, la tecnología dará respuesta a aquellas preguntas sobre la evolución humana que permanecen sin contestar. La investigación, mientras tanto, continúa.

#### **5.2 La Aparición de la Vida en la Tierra**

El ser humano es un recién llegado a la Tierra. Según el calendario cósmico creado por el científico estadounidense Carl Sagan, si comparáramos la historia del universo con un año de nuestra existencia,

podríamos establecer que la aparición y desarrollo del género Homo en el planeta se correspondería sólo a la última hora y media del 31 de diciembre, y que, un hecho tan ancestral como hoy nos parece la invención de la escritura, se habría producido en realidad a únicamente 9 segundos del fin de año.

En este sentido, tomando como referencia los estudios radiométricos realizados en los minerales más antiguos del planeta, hoy puede determinarse que la Tierra se formó hace  $4550 \pm 70$  millones de años. Nuestro planeta, según afirman los geólogos, habría sido inicialmente un globo incandescente que, tras un proceso de acreción de meteoritos, aumentó de tamaño y, con el paso del tiempo, acabó enfriándose y solidificándose.

Durante este proceso, que duró unos mil millones de años, la influencia de la gravedad provocó que los materiales pesados se fueran depositando en el interior del globo, mientras que los más ligeros permanecieron en la superficie. Así se formó la corteza terrestre. Al mismo tiempo, las erupciones volcánicas generaron la salida de vapores y gases, y la consiguiente aparición de una atmósfera primitiva, compuesta de hidrógeno, helio, anhídrido carbónico y vapor de agua.

Cuando la temperatura de la superficie fue inferior a la de la ebullición del agua, el vapor se condensó en grandes cantidades y provocó fuertes precipitaciones que, además de erosionar las rocas de la corteza terrestre, determinaron la aparición de los océanos. Fue en este contexto, hace unos 3.500 millones de años, cuando, en el agua, aparecieron las bacterias más primitivas es decir, los primeros organismos vivos.



Tuvieron que pasar unos 700 millones de años más, no obstante, para que estas primigenias formas de vida evolucionaran hasta convertirse en algas unicelulares capaces de realizar la fotosíntesis y expulsar oxígeno. Con la incorporación de este último elemento a la atmósfera, hace unos 1500 millones de años, aparecieron las primeras células eucariotas con núcleo diferenciado y, unos 500 millones de años más tarde, la evolución de éstas permitiría el desarrollo de seres capaces de intercambiar información genética entre sí, es decir, de reproducirse sexualmente.

En el siguiente período, el Ordovicio, fueron muy abundantes los trilobites y los corales y, al mismo tiempo que aparecían las primeras formas de vertebrados marinos los peces sin mandíbulas, como las lampreas, algunas plantas e invertebrados iniciaron la colonización de tierra firme. Por su parte, la tercera división de la Era Primaria, el Silúrico, estuvo marcada por la abundancia de algas marinas y de peces algunos ya con mandíbulas-, así como por la existencia de miriápodos y de plantas vasculares con conductos internos para la circulación de agua y nutrientes, en el medio terrestre.

La aparición de nuevas tierras. Altas cordilleras y grandes lagos inauguró el período que siguió a] Silúrico, el Devónico, conocido también como la “era de los peces”. Junto a la floreciente fauna marina y lacustre, en este tiempo se multiplicaron las formas de vida en las tierras emergidas, mostrándose, por ejemplo, los más primitivos insectos y anfibios; estos últimos, como una evolución de los peces pulmonados y con aletas pedunculadas, es decir, capaces de respirar y de desplazarse fuera del agua.

En el Carbonífero, las especies vegetales, como los helechos y los gigantescas. Fue en este momento, además, cuando crecieron las primeras

coníferas, dando lugar a espesas selvas que, enterradas bajo los aluviones en épocas posteriores, serían responsables de la formación del carbón mineral. La existencia de un clima pantanoso, húmedo y cálido, por otra parte, favoreció la multiplicación de familias y especies de insectos tanto terrestres como voladores y de anfibios. De un grupo de éstos, precisamente, evolucionarían los reptiles, los primeros seres que pusieron sus huevos fuera del agua y que, gracias a desarrollar una articulación occipital, pudieran mover la cabeza.

Durante el Pérmico, el período que pone fin al Paleozoico, los desiertos y las montañas sustituyeron progresivamente a los húmedos bosques y pantanos del hemisferio Norte. Este cambio climático y ambiental provocó el retroceso de los animales que dependían del agua, como los anfibios, y benefició a aquellos que, por su evolución fisiológica y reproductiva, mejor se habían adaptado a la vida terrestre: los insectos y los reptiles.

De entre los grupos de reptiles surgidos a finales de la Era Primaria destacan los terápsidos, los antepasados de los mamíferos. Se trataba en su mayoría de animales terrestres, con grupos tanto de carnívoros como de herbívoros, que, a diferencia del resto de reptiles, desarrollaron poco a poco la capacidad de regular la temperatura interna de su cuerpo. A finales del Pérmico, no obstante, algún tipo de catástrofe acabó con numerosas especies vegetales y animales del planeta, y, junto a éstas, se extinguieron la mayor parte de terápsidos.

### **5.3 Dominio de los dinosaurios**

El Paleozoico dio paso al Mesozoico o Era Secundaria, que se inició

hace unos 250 millones de años. El primero de los tres períodos geológicos en que se divide éste, el Triásico, estuvo caracterizado en sus últimos momentos por una nueva extinción masiva de especies y por la aparición de los saurios, que pronto se diversificaron y, gracias a su capacidad de adaptación, comenzaron a dominar el planeta.

Los únicos descendientes de los terápsidos del Paleozoico que sobrevivieron al Triásico fueron los cinodontes, que, tras millones de años de evolución, darían origen a los mamíferos. En este sentido, muchos expertos apuntan al *Thrinaxodon* como posible ancestro directo. Los mamíferos aparecieron en la Tierra hace unos 230 millones de años, es decir, a finales del Triásico. Una de las especies más primitivas que se conocen fue el *Morganucodon*, cuyo fósil ha sido encontrado en cuevas de Gran Bretaña y de China. Según se cree, este diminuto insectívoro, con aspecto de zarigüeya y costumbres nocturnas -lo que se deduce por el gran tamaño de sus ojos empezó a caminar por el planeta hace unos 200 millones de años. Establecer exactamente la frontera que existió entre los primeros mamíferos y los reptiles cinodontes con quienes llegaron a convivir largo tiempo resulta muy difícil, puesto que órganos como el pelo o las mamas, que son los que definen a los mamíferos, no se conservan fosilizados.

Mientras los dinosaurios fueron amos y señores de la Tierra, lo que ocurrió durante el Jurásico y el Cretácico hasta hace unos 65 millones de años, los mamíferos fueron pequeños e insignificantes. A la sombra de los gigantescos reptiles, no obstante, los descendientes de los terápsidos lograron diversificarse y evolucionaron lentamente. En este período, por ejemplo, aparecieron los primeros monotremas parientes lejanos del ornitorrinco, así como los ancestros de los marsupiales y de los placentarios. Sin embargo, de todos los grupos de mamíferos del Mesozoico, el más

destacado fue el de los multituberculados, diminutos animales de aspecto parecido a los roedores que se extinguieron hace 30 millones de años. En el Jurásico, por su parte, también aparecieron las aves, evolucionando a partir de un grupo de reptiles voladores.

#### **5.4 La era de los mamíferos**

Al final del período Cretácico, se produjo la extinción masiva de los dinosaurios y otras especies vivientes. Las causas de esta catástrofe son aún desconocidas, aunque la teoría más aceptada es la que señala el impacto de un meteorito de gigantescas dimensiones como detonante de un cambio climático con nefastas consecuencias para la flora y la fauna del planeta.

La desaparición de los grandes reptiles dio paso a la Era Terciaria que, junto con la Cuaternaria, forman el llamado Cenozoico.

Durante ésta, los mamíferos, aprovechando el vacío dejado por los saurios, se multiplicaron y diversificaron, imponiendo su dominio sobre el resto de vertebrados. De las 10 familias que existían al iniciarse el primer periodo de la Era Terciaria, el Paleoceno, se pasó a casi 80 en el Eoceno tras sólo 10 millones de años de evolución. Muchas familias de mamíferos modernos, por su parte, datan del Oligoceno, es decir, de hace entre 35 y 24 millones de años, y fue en el Mioceno hace entre 24 y 5 millones de años cuando se registró la mayor diversidad de especies. En este último período aparecieron los primeros y más primitivos homínidos, como los *Proconsul*, *Dryopithecus* y *Ramapithecus*.

A partir del Mioceno, el número de mamíferos empezó a declinar y, como consecuencia de los profundos cambios climáticos que se produjeron

durante el Plioceno, hace unos 2 millones de años muchas especies desaparecieron.

Estaba a punto de iniciarse la Edad del Hielo, la Era Cuaternaria o Neoceno, en la que un primate muy avanzado iba a imponer su dominio: el Homo.

## **CAPITULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1 Conclusiones**

El clima a variado siempre desde el origen del planeta; ya que en las distintas eras se presentaba climas distintos; debido a los cambios climáticos se pudo originar la vida en la tierra con la aparición de la cianobacterias, dinosaurios, homos y muchísimos años después la aparición del hombre.

En la variabilidad climática del planeta influyeron muchos factores y elementos pero hay tres factores astronómicos que son determinante en la variación del clima, los cuales son nombrados en la teoría de milankovitch ellos son: la excentricidad de la orbita terrestre, la inclinación del eje del planeta y la precisión de los equinoccios.

Hay otros factores que también influyen en los cambios del clima, entre los cuales tenemos las erupciones volcánicas, las actividades meteorológicas y la deriva continental.

Se puede concluir que siempre existirá la variabilidad climática en el mundo debido que es algo que se da por naturaleza y que no es provocado únicamente por la mano del hombre.

## 6.2 Recomendaciones

- Realizar campañas para informar sobre el origen natural de la variabilidad del clima.
- Dictar charlas que hablen de la evolución climática.
- Concienciar a las personas de que los efectos invernaderos no son un peligro para la población.
- Tomar conciencia de que el clima es importante para todos los habitantes del planeta, sin importar raza, posición social y/o interés político.

## BIBLIOGRAFÍA

**Biografía de Uriarte Cantolla.** Disponible:  
<http://homepage.mac.com/uriarte/historia.html>

**Biografía de. Milutin Milankovitch** Disponible:  
<http://www.ahoraus.com/CyTMilank.htm>

**Biografía de la Climatología.** Disponible:  
<http://club.telepolis.com/geografo/clima/clima.htm>

**Biografía de la definición del clima** Disponible:  
<http://www.um.es/geograf/clima/tema01.html>

**Biografía de Clima: Elementos y Factores**  
Disponible: <http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Clima.htm>



## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

<b>TITULO</b>	GENESIS Y EVOLUCION DEL CLIMA
<b>SUBTITULO</b>	

### AUTOR (ES):

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CODIGO CVLAC / E MAIL</b>
Atagua C, Alessandro L.	CVLAC: 12.628.471 E_MAIL: sandroatagua@gmail.com
Cunes P, Juan C.	CVLAC: 13.698.651 E_MAIL: newmantcunes@gmail.com

### PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Variabilidad climática

Fenómeno

Planeta

Efecto invernadero

Erupciones volcánicas

Deriva continental

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO**

ÁREA	SUBÁREA
Escuela De Ingeniería Y Ciencias Aplicadas	Departamento De Ingeniería Civil

**RESUMEN (ABSTRACT):**

La variabilidad climática es un fenómeno que esta presente en el planeta desde su formación hace 4.500 millones de años aproximadamente. Gracias a esta variabilidad en el clima se produjeron los efectos invernaderos y se genero vida en la tierra con la aparición de la primera cianobacterias que a medida que el clima fue cambiando estas fueron evolucionando. En la variabilidad climática tienen que ver muchos factores entre ellos los geológicos y los astronómicos, siendo los geológicos más resaltantes los siguientes: las erupciones volcánicas y la deriva continental. En los factores astronómicos se pueden resumir tres factores esenciales: excentricidad de la orbita terrestre, oblicuidad del planeta y precisión de los equinoccios

## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

### CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMRES	ROL/CÓDIGO CVLAC/ E_MAIL				
Prof. José Sosa	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC				
	E_MAIL	josesosaalvares@hotmail.com			
	E_MAIL				
Prof. Luisa Torres	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	8.217.436			
	E_MAIL	luisatorres@gmail.com			
	E_MAIL				
Prof. Enrique Montejo	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	8.279.503			
	E_MAIL	enriquemontejo@hotmail.com			
	E_MAIL				

### FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

AÑO	MES	DIA
2010	04	30

**LENGUAJE: SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****ARCHIVO (S):**

<b>NOMBRE DE ARCHIVO</b>	<b>TIPO MIME</b>
MONOGRAFIA.Clima.doc	Aplication / msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I  
 J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v  
 w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

**ALCANCE**

ESPACIAL: \_\_\_\_\_(OPCIONAL)

TEMPORAL: \_\_\_\_\_(OPCIONAL)

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero Civil

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pre – Grado

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Departamento De Ingeniería Civil

**INSTITUCIÓN:**

Universidad de Oriente – Núcleo de Anzoátegui

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****DERECHOS:**

De acuerdo al Artículo 57 del Reglamento de Trabajo de Grado: “Para la aprobación definitiva de los cursos especiales de grado como modalidad de trabajo de grado, será requisito parcial la entrega a un jurado calificador, de una monografía en la cual se profundice en uno o más temas relacionados con el área de concentración”

Atagua C, Alessandro L.

**AUTOR**

Cunes P, Juan C.

**AUTOR**

Prof. Enrique Montejo

**TUTOR**

Prof. José Sosa

**JURADO**

Prof. Luisa Torres

**JURADO****POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS**