



Environmental | Physics | Laboratory

EPhysLab

UniversidadeVigo

Avances en Ciencias de la Tierra Volumen 14- Diciembre 2024

Avances en Ciencias de la Tierra

ISSN: 2172-9328

Avances en Ciencias de la Tierra

Volumen 14, diciembre 2024

ISSN 2172-9328

Editado por EPHYSLAB en colaboración con la Asociación
Ambiental ESCLIMA

Equipo Editorial (responsable de este volumen)

Editores en Jefe:

M. Des
EPhysLab, CIM-UVIGO
Universidade de Vigo
mdes@uvigo.es

I. Martínez-Estévez
EPhysLab, CIM-UVIGO
Universidade de Vigo
ivan.martinez.estevez@uvigo.es

Editores

D. Fernández-Nóvoa
EPhysLab, CIM-UVIGO
Universidade de Vigo
diefernandez@uvigo.es

O. García-Feal
EPhysLab, CIM-UVIGO
Universidade de Vigo
orlando@uvigo.es

X. Costoya
EPhysLab, CIM-UVIGO
Universidade de Vigo
xurxocostoya@uvigo.es

J. González Cao
EPhysLab, CIM-UVIGO
Universidade de Vigo
jgcao@uvigo.es

A.J.C. Crespo
EPhysLab, CIM-UVIGO
Universidade de Vigo
alexbexe@uvigo.es

M.C. Sousa
CESAM/Physics Department
Universidade de Aveiro
mcsousa@ua.pt

M. Gómez-Gesteira
EPhysLab, CIM-UVIGO
Universidade de Vigo
mggesteira@uvigo.es

M. de Castro
EPhysLab, CIM-UVIGO
Universidade de Vigo
mdecastro@uvigo.es

Introducción

La revista *Avances en Ciencias de la Tierra* (ACT) es una publicación científica centrada en los distintos ámbitos de conocimiento relacionados con las Ciencias de la Tierra. A diferencia de otras publicaciones científicas centradas en el mismo ámbito, muchas de las cuales se encuentran indexadas dentro del *Science Citation Index* (SCI), ACT tiene una doble vertiente. Por un lado, como muchas de las anteriormente citadas publicaciones, mantiene una vertiente científica y, por otro lado, pretende añadir un cierto carácter docente a los trabajos que en ella se publican. Esto último, claro está, sin perder un ápice de su rigor científico. Esto hace que la revista ACT sea, primero, un banco de pruebas donde alumnos de diversos grados y másteres aprendan las técnicas de publicación científica y, segundo, una publicación científica al uso donde el rigor científico en los contenidos alcance los mismos niveles que en la mayoría de las publicaciones científicas “tradicionales”.

Uno de los objetivos principales de la investigación científica es la publicación de sus resultados con el fin de que éstos puedan ser compartidos con el resto de la comunidad científica con el fin de difundirlos, validarlos y corroborarlos o rebatirlos. La publicación de una investigación científica, usualmente en forma de un artículo científico, requiere de una labor de escritura que no resulta sencilla ya que hay una serie de principios y técnicas que deben conocerse y respetarse con el fin de comunicar lo más claramente posible el resultado de dicha investigación a una audiencia experta y profesional. Estos principios fundamentales que deben regir la escritura de un buen artículo científico son tres: brevedad, claridad y precisión. Partiendo de estos tres principios fundamentales, nuestra labor como docentes tiene como objetivo enseñar a los alumnos las normas metodológicas generales que les permitan escribir un buen artículo.

Las características principales de un buen artículo científico, las cuales los alumnos que pretendan sumergirse en la escritura de estos deben conocer, son:

- Un artículo científico es un informe sobre los resultados de una investigación relativa a un problema de carácter científico.
- Los resultados de dicha investigación deben ser válidos, fidedignos y reproducibles, a fin de que puedan ser contrastados por el resto de la comunidad científica.
- Los resultados presentados deben ser originales, por lo tanto, un artículo no debe

Avances en Ciencias de la Tierra

comunicar unos hallazgos que ya hayan sido previamente descritos por los miembros de la comunidad científica. Existe la excepción de los llamados artículos de revisión, donde los autores revisan el estado del conocimiento sobre un cierto tema, compilando los resultados presentados en artículos previamente publicados.

La estructuración del artículo científico es uno de los aspectos a los que se debe prestar también mucha atención. Usualmente los artículos científicos se estructuran de la siguiente forma: primero, además del título, el cual debe ser claro, exacto y conciso, y de la lista de autores, el artículo debe contener un breve resumen donde se describan de forma somera los principales logros de la investigación; a continuación, se debe escribir una introducción de carácter general, para posteriormente detallar los datos y la metodología empleada; posteriormente deben presentarse los resultados, así como una discusión en la que se relacionen los avances mostrados en el manuscrito con el conocimiento previo contenido en la bibliografía. Para ello es necesario que el alumno haya realizado con anterioridad una completa búsqueda bibliográfica que también debe incluirse en el manuscrito. Finalmente, y con carácter opcional, se puede incluir una conclusión, en la que se enumeren y resuman los principales hallazgos de la investigación. Además de lo anterior, no se pueden dejar de lado aspectos formales como, por ejemplo, el empleo de un lenguaje correcto y conciso.

Para asegurar que los artículos publicados supongan un avance significativo en el área de conocimiento se han diseñado los mecanismos de control de la calidad necesarios. Por un lado, se involucrará en la elaboración de los artículos a los supervisores del trabajo, de tal forma que aporten su experiencia en la escritura y estructuración de artículos científicos y, por otro lado, la calidad científica de los artículos será evaluada por dos revisores miembros del equipo editorial y/u otros externos que éstos consideren.

El idioma empleado será, preferiblemente, el español, aunque también existe la posibilidad de presentar los trabajos en gallego, portugués o inglés.

El Equipo Editorial.

Diciembre de 2024.

Contenido:

Glaciaciones: causas, consecuencias y predicciones. D. González Méndez, Á. Tajuelo
Valbuena..... 1

Glaciaciones: causas, consecuencias y predicciones

D. GONZÁLEZ MÉNDEZ*, Á. TAJUELO VALBUENA

**dgonzaleqt@alumnos.unex.es*
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Universidad de Extremadura,
Avda. de Elvas s/n, 06006 Badajoz, España

RESUMEN

Los ciclos glaciales de la Tierra a lo largo de la historia tienen una gran relevancia para los estudios de nuestro planeta. Mostramos brevemente las ideas clave que explican la transición climática de la Tierra entre períodos glaciales e interglaciares. Los ciclos de Milankovitch, los cambios atmosféricos y el vulcanismo, las variaciones de la radiación solar y la deriva continental son los principales factores que contribuyen a los ciclos glaciales. Todos estos factores están interconectados y son complejos. Estos ciclos provocan cambios geográficos, la extinción de especies, las migraciones y los cambios en el nivel del mar. En este trabajo, se analizan los datos de simulaciones de mecánica celeste para contrastar y predecir los ciclos glaciales pasados y futuros, respectivamente. Estimamos que faltan unos 134 000 años para la próxima glaciación, pero el impacto del clima humano en el medio ambiente es un factor que debería ser tenido en cuenta.

Palabras clave: Glaciaciones, ciclos de Milankovitch, simulación.

1. Introducción

A lo largo de su historia, el clima terrestre ha alternado entre dos estados fundamentales (Summerhayes, 2020): edades de invernadero, caracterizadas por la inexistencia de glaciares continentales y altas concentraciones de gases de efecto invernadero; y edades de hielo, que abarcan apenas el 15 % de la vida del planeta y durante las que este cuenta con extensos casquetes helados (Shankar, 2021). Desde hace unos 34 millones de años, la Tierra se encuentra en la Edad de Hielo Cenozoica Tardía (Montañez, 2011).

Además, durante una edad de hielo pueden distinguirse periodos glaciales (marcados por la expansión de las masas de hielo y el enfriamiento global) y

periodos interglaciales (definidos por el calentamiento del planeta y la recesión de glaciares y casquetes). Ambos periodos se alternan, aproximadamente, cada 100 000 años. Por antonomasia, es común reservar la palabra glaciación para referir a los periodos glaciales (Ruddiman, 2000).

El problema central de este trabajo es la comprensión de las dinámicas de los antedichos ciclos y sus distintas implicaciones a nivel planetario, para lo que se toma el respaldo de los múltiples estudios que la literatura recoge al respecto.

En esta línea de entendimiento, el impacto de la actividad humana se enfatiza como un desafío significativo adicional, ya que el aumento (de origen

antropogénico) de las concentraciones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera podría alterar los patrones glaciales naturales. Desde el reconocimiento de esta influencia y de otros factores terrestres, decidimos centrarnos, exclusivamente, en el análisis de datos proporcionados por simulaciones de mecánica celeste para contrastar la ubicación, en el tiempo, de las últimas glaciaciones, así como para tratar de predecir el inicio de los próximos periodos glaciales.

1.1. Evidencias de los ciclos glaciales

La teoría de las edades de hielo (término acuñado en 1837 por el botánico alemán Karl F. Schimper) no fue totalmente aceptada hasta 1875, con la publicación, por parte de James Croll, de “Climate and Time, in Their Geolocal Relations”.

Son tres los tipos de evidencias que constatan las edades de hielo: geológicas (Boulton *et al.*, 2004), químicas (Hendriks *et al.*, 2000) y paleontológicas (Sommer *et al.*, 2006).

Las evidencias geológicas incluyen variadas geoformas, tales como morrenas y cortes y roturas en las rocas. Los sucesivos periodos glaciares tienden a borrar las evidencias geológicas de sus predecesores. Las evidencias químicas consisten en variaciones en los ratios de isótopos en los fósiles presentes en los elementos sedimentarios. Las variaciones isotópicas en muestras de hielo constituyen un indicador climático importante. Esto permite construir un registro de paleotemperaturas. Las evidencias paleontológicas aluden a los cambios anómalos en la distribución de los fósiles. Durante un periodo glacial, los organismos propios de ecosistemas fríos se expanden hacia latitudes inferiores, mientras que los propios de ecosistemas cálidos se retiran a zonas ecuatoriales.

1.2. Causas de los ciclos glaciales

Pese a que las causas de las alternancias entre edades y periodos no son del todo conocidas, existe consenso en cuanto a la relevancia de ciertos factores, entre los que destacan: los ciclos de Milankovitch, los cambios atmosféricos y el vulcanismo, las variaciones radiativas solares y la deriva continental y los cambios en las corrientes oceánicas (Wolff, 2010). Como se verá más adelante, es importante resaltar que estos factores se relacionan de forma directa.

Los ciclos de Milankovitch son un conjunto de variaciones de carácter periódico en las características de la órbita terrestre. Los ciclos más importantes son: los cambios en la excentricidad orbital ($TT_{ee} = 100\ 000$ años); las precesiones axial y apsidal ($TT_{pppp} = 26\ 000$ años y $TT_{pppp} = 112\ 000$ años); y la nutación ($TT_{nn} = 41\ 000$ años), que representa el ciclo más determinante (Maslin, 2020). Milankovitch argumentó que las glaciaciones ocurren cuando la intensidad de la insolación es débil en las altas latitudes del hemisferio norte (que contiene más tierra emergida, donde es más fácil la acumulación de hielo) durante el verano (Milankovitch, 1969). Esto sucede cuando el eje de giro de la Tierra está menos inclinado con respecto al plano orbital y el afelio coincide con el solsticio de verano en el mencionado hemisferio (la menor insolación permite la acumulación de hielo y nieve).

Por su parte, existen evidencias de que los niveles de gases de efecto invernadero caen al inicio de los periodos glaciales y ascienden al final de los mismos (Royer *et al.*, 2007). Entre las razones que explican tales cambios de concentración, se encuentran la formación de masas boscosas en las tierras que emergen con el crecimiento de las masas de hielo (motivado por los ciclos de Milankovitch) o la fertilización

de los océanos debida a la deposición de los minerales de las rocas pulverizadas por los glaciares (Hausfather, 2021). Cuando el crecimiento de las capas heladas sobre la superficie oceánica es tal que limita el CO₂ que el océano devuelve a la atmósfera (ciclo de carbono inorgánico), el vulcanismo juega un papel esencial en la reversión de dicha situación (Watt, 2013).

En cuanto a las variaciones en la actividad solar, los ciclos regulares de manchas solares no pueden ser responsables de los ciclos glaciales. Sin embargo, el Sol atraviesa, cada cierto tiempo, episodios de actividad anómalamente baja como el mínimo de Maunder (Usoskin *et al.*, 2015), que podrían dar lugar a las llamadas pequeñas edades del hielo (Owens *et al.*, 2017).

Finalmente, se sugiere que las edades de hielo comienzan cuando los continentes se posicionan reduciendo el flujo de aguas cálidas del ecuador a los polos, favoreciendo la formación de hielo (Hannah, 2014). Estas capas heladas incrementan el albedo planetario, lo que a su vez favorece el crecimiento de dichas masas heladas y da pie a un proceso de retroalimentación positivo. Algunos de los movimientos continentales más influyentes han sido el choque entre las placas indoaustraliana y euroasiática, dando lugar al Himalaya y a una variación del albedo local de en torno al 70 % (Kuhle, 1988), o el cierre del istmo de Panamá (hace 3 millones de años), facilitando la expansión del casquete polar norteamericano (Svital, 1996).

1.3. Procesos de retroalimentación

Cada periodo glacial está sujeto a una serie de procesos de retroalimentación positivos, que lo agravan, y un conjunto de efectos de retroalimentación negativos, que lo mitigan.

Una forma importante de retroalimentación positiva es la asociada al albedo planetario, incrementado por el hielo y la nieve (de mayor reflectancia). Cuando los glaciares se forman, el hielo pulveriza las rocas y el terreno se vuelve árido y seco. Esto permite que los vientos transporten minerales al océano abierto, fertilizándolo e induciendo el crecimiento de algas, que retiran grandes cantidades de CO₂ de la atmósfera. Como consecuencia, el clima se enfría y los glaciares crecen, pulverizando mayor cantidad de rocas de nuevo (Underwood, 2020). Durante la desglaciación, los movimientos tectónicos, que habían estado “retenidos” por el peso del hielo, se reanudan. El número de terremotos aumenta, lo que acelera los desprendimientos de hielo (Hunt *et al.*, 1998).

Igualmente relevantes son los procesos de retroalimentación negativos. Por ejemplo, los glaciares erosionan la tierra que bajo ellos se encuentra. Al cabo de decenas de miles de años, dicha tierra queda por debajo del nivel del mar y el glaciar recula, dejando paso al océano. Ello provoca una disminución del albedo (Huddart *et al.*, 2013). Por otro lado, el aumento en la aridez durante los periodos glaciales reduce, además, la precipitación disponible para mantener la glaciación.

1.4. Consecuencias de los ciclos glaciales

Pese a que el último periodo glacial finalizó hace unos 12 000 años, algunos de sus efectos siguen presentes.

Las masas de hielo en movimiento tallan el paisaje geográfico, por ejemplo, creando fiordos por abrasión del suelo subyacente, como los que existen en Noruega.

Por su parte, los periodos glaciales provocan la extinción a gran escala de los organismos adaptados a climas cálidos,

induciendo las migraciones de los animales mejor adaptados a las condiciones del momento.

Además, durante las glaciaciones, el nivel del mar desciende en pos de la formación de las masas de hielo, pudiendo llegar a los -130 m, formándose puentes terrestres (Farmer *et al.*, 2023). Cuando el periodo glacial cesa y las aguas ascienden, ciertas poblaciones quedan aisladas y evolucionan independientemente, aumentando la biodiversidad.

Además, el peso de las capas de hielo deforma la corteza y el manto terrestre (Ekman *et al.*, 2007). Cuando el hielo se derrite, se produce un fenómeno llamado “rebote postglacial”, en el que las tierras hundidas se elevan (y las que habían ascendido, se aplanan).

Finalmente, la redistribución de hielo – agua en la superficie terrestre y el flujo rocoso en el manto terrestre crea cambios en el gradiente del campo gravitacional terrestre y en el momento de inercia de la Tierra, alterando la velocidad angular con que rota (Nakada, 2002).

2. Próximo periodo glacial e impacto humano

Según las predicciones que se pueden extraer del estudio de las distintas causas que motivan los ciclos glaciales (especialmente, los ciclos de Milankovitch), se estima que la próxima glaciación debería comenzar en, aproximadamente, unos 50 000 años; al menos si no se tiene en cuenta el impacto humano en el clima global (Ganopolski *et al.*, 2016).

En efecto, recientes estudios llevados a cabo por la NASA sugieren que los ciclos de Milankovitch no explican (ya actualmente) el periodo de calentamiento global que la Tierra viene sufriendo desde el comienzo de la era

preindustrial (1850 - 1900) y, más en particular, desde mediados del siglo XX. Atendiendo a dichos estudios, el mencionado calentamiento se debe a la actividad humana (en especial, debido a la inyección de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre).

En lo que respecta a las evidencias que sustentan tales afirmaciones, los científicos resaltan el hecho de que los ciclos de Milankovitch operan a grandes escalas de tiempo (desde decenas de miles a centenas de miles de años), mientras que el actual calentamiento se asienta sobre una escala del orden de las décadas - centurias. Así pues, los ciclos de Milankovitch no han podido ser responsables de ningún hipotético ascenso en la insolación recibida en los últimos 150 años.

Por otro lado, los cambios en la composición atmosférica no se ajustan a los ritmos marcados por los procesos de retroalimentación oceánicos y terrestres de los que se habló en secciones anteriores, sino que se relacionan con las tasas de emisión de gases de efecto invernadero asociadas a la quema de combustibles fósiles. En esta línea, se estima que, en ciclos glaciales pasados, la concentración de dióxido de carbono fluctuó desde las 180 ppm hasta las 280 ppm. Esto contrasta con el incremento del 50 % experimentado en el intervalo de tiempo comprendido entre el inicio de la era industrial y nuestros días, variando la concentración de CO₂ atmosférico de las 280 ppm hasta las 412 ppm (año 2021). Como consecuencia, desde 1850, la temperatura media global ha aumentado en torno a 1 °C, y se espera que aumente otro medio grado para 2030 (Maslin, 2020).

Desde el año 1750, el calentamiento asociado a los gases de efecto invernadero liberados por la actividad humana es 50 veces superior al sutil

calentamiento natural derivado de los cambios en la actividad solar durante ese periodo (como se dice, la irradiancia solar se ha mantenido constante, habiendo ascendido ligeramente en los últimos tres siglos y descendido ligeramente en las últimas décadas). Según los modelos climáticos, si el calentamiento al que la Tierra está hoy sometida se debiera a este último motivo, tanto la temperatura troposférica como la estratosférica deberían aumentar. Sin embargo, se observa que, mientras que la superficie terrestre y la troposfera se están calentando, la estratosfera se enfría.

En vista de todo lo anterior, los científicos concluyen que el enfriamiento natural iniciado hace unos 6 000 años como consecuencia de los ciclos naturales se ha visto interrumpido por la acción del hombre. Algunos expertos sugieren que, si a los ciclos naturales añadimos la cantidad de gases de efecto invernadero liberados a raíz de actividades antropogénicas, el inicio del próximo periodo glacial podría retrasarse incluso varias decenas de miles de años (Ganopolski *et al.*, 2016).

3. Modelización, resultados y discusión

Laskar *et al.* (2011) desarrollaron una nueva solución para la computación astronómica denominada La2010. Esta solución numérica permite obtener datos del movimiento orbital de la Tierra desde hace 250 Maños y hasta 50 Maños en el futuro.

Para este trabajo, haremos uso de los datos proporcionados por Laskar *et al.*

(2011). El modelo no incluye directamente la influencia humana en sus resultados futuros, ya que se centra en describir los ciclos orbitales naturales de la Tierra a lo largo del tiempo geológico. Pese a ello, cabe volver a recalcar que, tal y como se ha mencionado y respalda la literatura científica, dicho impacto antropogénico podría posponer el inicio de los próximos periodos glaciales en al menos varias decenas de miles de años. Existe pues, una gran componente de incertidumbre que, pese a no ser considerada de forma explícita en el análisis de los datos, ha de tenerse en mente a la hora de extraer conclusiones.

En esta sección, hacemos uso de dichos datos para analizar y estudiar la excentricidad, la oblicuidad y la longitud del perihelio durante las épocas glaciares pasadas; así como tratar de predecir nuevas glaciaciones en los próximos 400 mil años. Aunque el modelo nos permite estudiar hasta varios millones de años, nos centraremos en órdenes en que podamos garantizar mejores predicciones.

Así, en las figuras 1, 2 y 3, respectivamente, representamos la excentricidad, la oblicuidad y la longitud del perihelio (expresadas en radianes) para los tiempos (expresados en miles de años) asociados a la glaciación de Würm, referida popularmente como la Edad de Hielo. Se trata del último periodo glacial acontecido en la Tierra, que comenzó hace unos 115 mil años y finalizó hace unos 12 mil años.

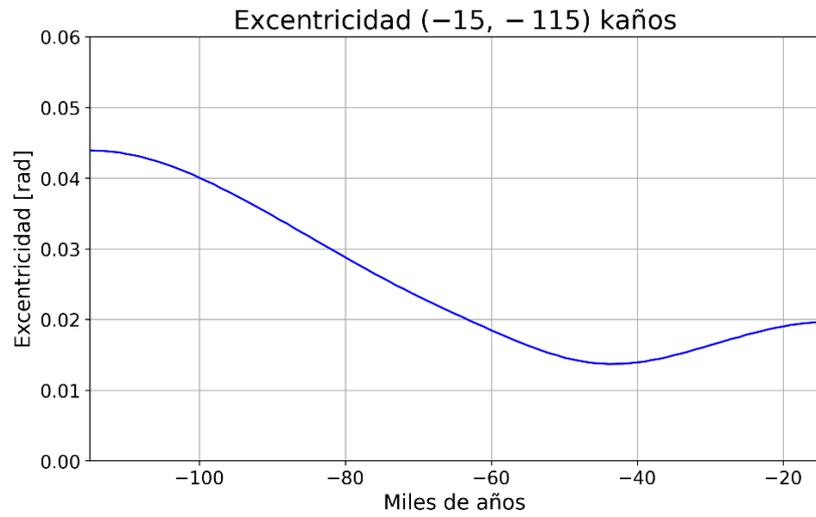


Fig. 1. Simulación a pasado: excentricidad.

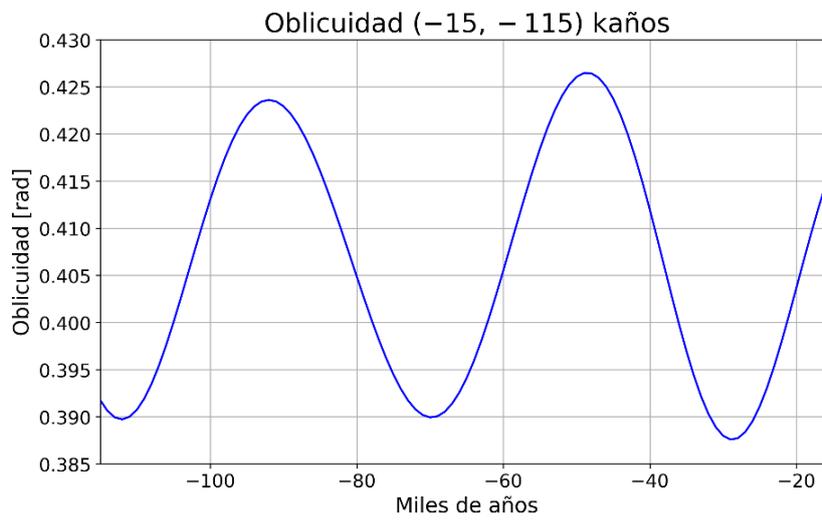


Fig. 2. Simulación a pasado: oblicuidad.

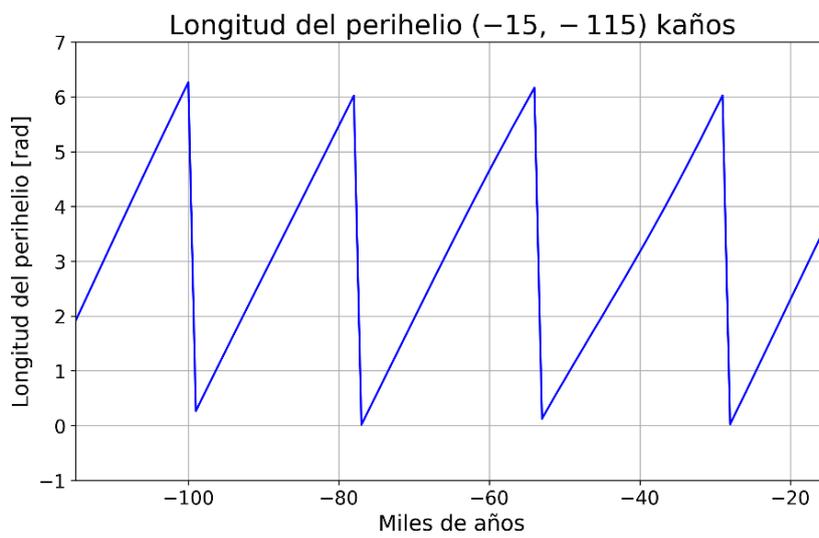


Fig. 3. Simulación a pasado: longitud del perihelio.

Como se puede apreciar, según el modelo y de forma aproximada, para hace en torno a 107 mil años, existe una coincidencia entre los efectos que dan pie a los periodos glaciales.

En primer lugar, la longitud del perihelio (medida en sentido antihorario desde el punto vernal) no toma valores extremos (una longitud del perihelio de 0° o 360° se correspondería con la coincidencia del afelio con el equinoccio de primavera o de otoño, respectivamente). En particular, dicha longitud está entre los 180° , valor que se corresponde con el inicio del acercamiento entre el afelio y el solsticio de verano del hemisferio norte (mitigándose el impacto de tal estación) y los 270° . Precisamente, esta situación mitigadora es tanto más acentuada cuanto más próxima sea la longitud del perihelio a los 270° (caso en que el afelio coincide con el solsticio de verano del hemisferio norte). Por otro lado, la excentricidad está próxima a un máximo relativo, por lo que la irradiancia recibida durante dicho verano mitigado será aún menor, pues el afelio estará más alejado del Sol. Finalmente, esa fecha corresponde, en buena medida, con un mínimo relativo en la oblicuidad del eje terrestre (factor más determinante para favorecer las glaciaciones). Así pues, podemos decir que los resultados del modelo son compatibles, en el caso de la glaciación de Würm, con las fechas que se recogen para la misma en la bibliografía.

A continuación, realizamos una representación de la oblicuidad y de la

excentricidad desde hace un millón de años. Nuestro objetivo será identificar el resto de las últimas épocas glaciales principales. Las fechas estimadas en la bibliografía se recogen en la tabla 1.

Glaciación	Inicio [kaños]
Würm	115
Riss	200
Mindel	580
Günz	850

Tabla 1. Fechas estimadas recogidas en la bibliografía para los últimos periodos glaciales.

En la figura 4 se representan, conjuntamente, los datos pertinentes (relativos a la excentricidad y la oblicuidad). En dicha figura, se señalan con líneas verdes discontinuas las fechas en que se producen coincidencias (aproximadas) entre máximos de excentricidad y mínimos de oblicuidad. Podemos concluir que el modelo predice correctamente estas glaciaciones con bastante fiabilidad, ya que las fechas señaladas se corresponden en buen grado con las estimaciones recogidas en el cuadro anterior. No obstante, se observa que existen ciertas discrepancias temporales a tener en cuenta (con desacuerdos del orden de los 10 000 años), especialmente de cara a la utilización del modelo para la predicción de glaciaciones futuras.

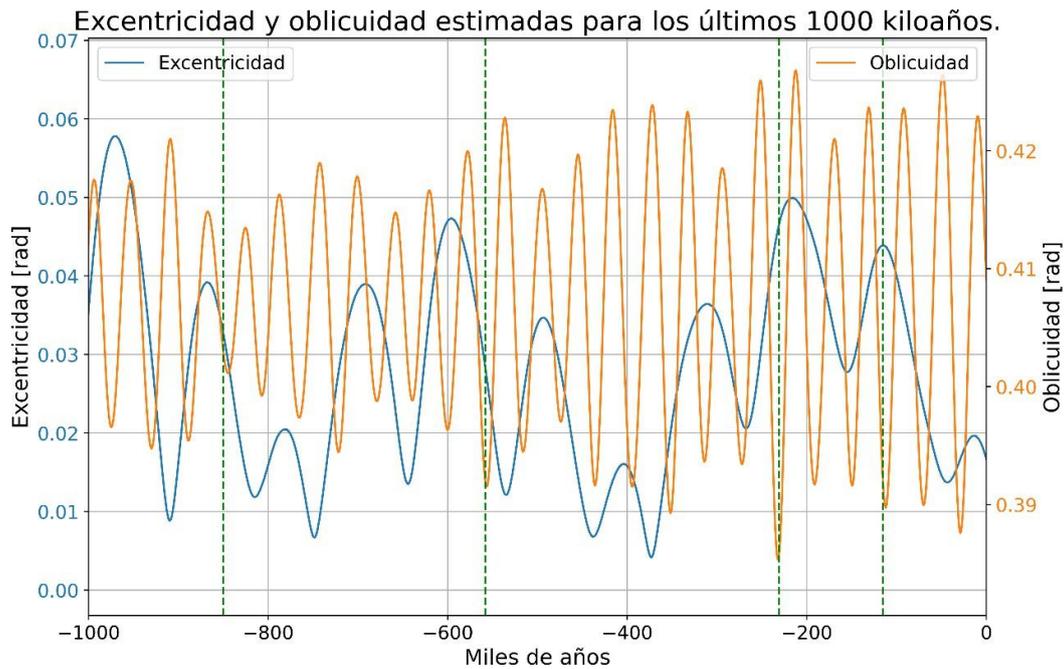


Fig. 4. Excentricidad y oblicuidad estimadas para los últimos 1000 kaños.

Precisamente, pasamos ahora a tratar de predecir las próximas glaciaciones. Para esto, hay que tener en cuenta la periodicidad aproximada de 100 000 años que los ciclos glaciares-interglaciares parecen seguir. Actualmente nos encontramos en un periodo interglacial de aproximadamente 12 mil años, que se sugiere que habría de finalizar en unos 50 mil años (Berger *et al.*, 2002). Sin embargo, la predicción exacta de cuándo ocurrirá la próxima glaciación es difícil debido a la complejidad de los sistemas climáticos y a la influencia de diversos factores, como cambios orbitales de la

Tierra, variaciones en la actividad solar y otros fenómenos naturales. Buscaremos entonces el mínimo de la oblicuidad y el máximo de la excentricidad siguiendo la teoría de Milankovitch y el periodo aproximado de 100 000 años. Los datos obtenidos con el modelo para la excentricidad, oblicuidad y longitud del perihelio se recogen en las figuras 5, 6 y 7.

Además, para poder analizar mejor los resultados, se ha realizado la figura 8 combinando las figuras 5 y 6.

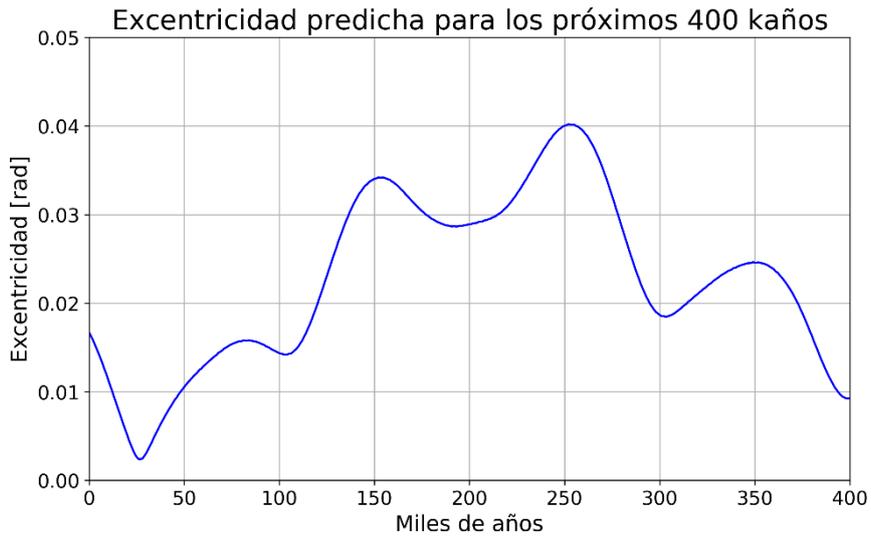


Fig 5. Simulación a futuro: excentricidad en el rango (0, 400) kaños..

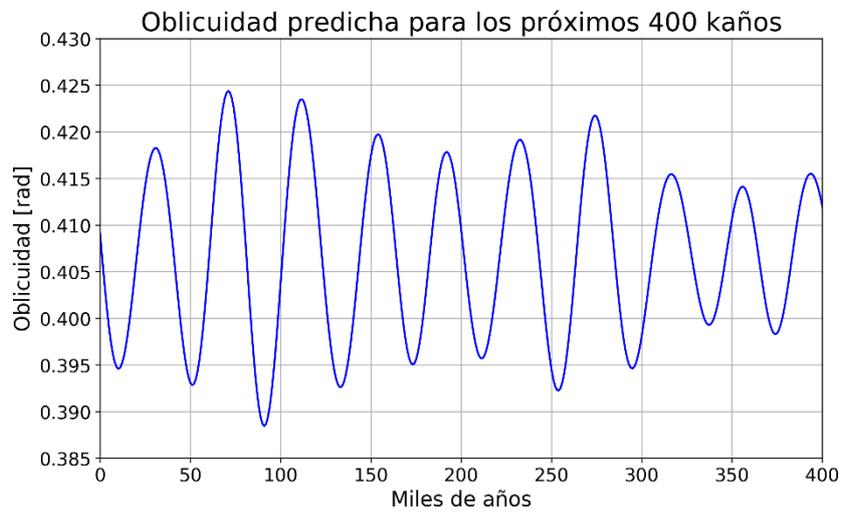


Fig 6. Simulación a futuro: oblicuidad en el rango (0, 400) kaños..

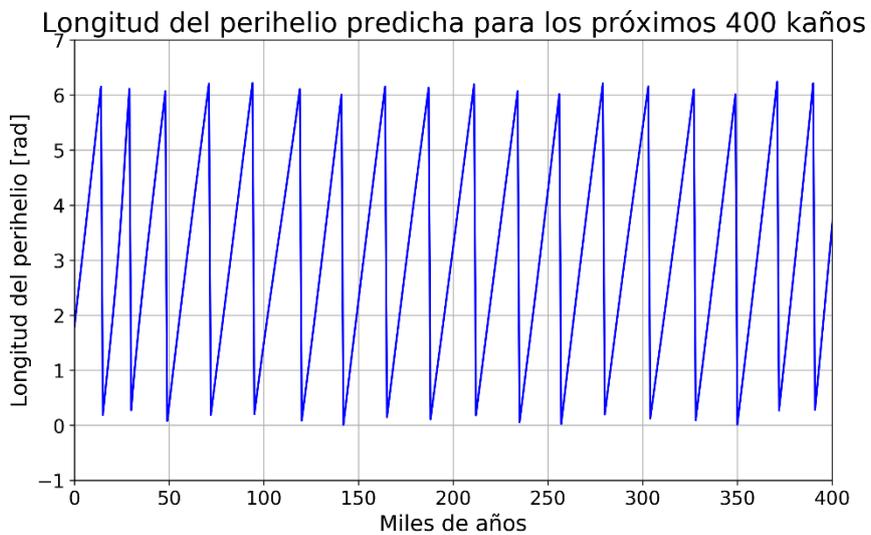


Fig 7. Simulación a futuro: longitud del perihelio en el rango (0, 400) kaños.

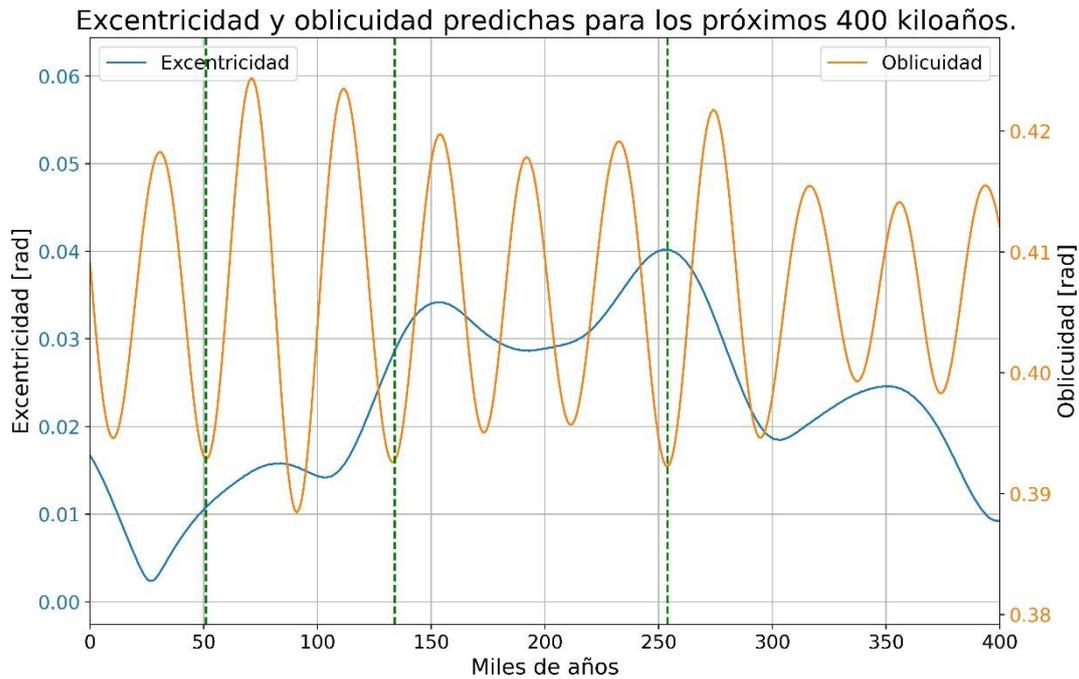


Fig 8. Excentricidad y oblicuidad predichas para los próximos 400 mil años.

En esta figura 8, se han señalado algunas fechas. En primer lugar, vemos que el modelo no respalda del todo la existencia de una glaciación en unos 50 mil años (ya que, pese a que dicha fecha se corresponde con un mínimo de oblicuidad, la excentricidad no parece resultar suficientemente elevada). Además, el valor correspondiente a la longitud del perihelio de entonces está lejos de ser el idóneo, como revela la figura 7. No es descartable, sin embargo, que los efectos recogidos en la figura 8 sean suficientes para influenciar cierto descenso en la temperatura terrestre (o, cuando menos, para mitigar temporalmente las injerencias climáticas humanas, ya que cabe volver a recordar que la oblicuidad del eje terrestre es el factor orbital más determinante). Este hecho parece discrepar, en parte, con los distintos estudios que han asegurado un nuevo periodo glacial para dicho entonces (Ganopolski *et al.*, 2016). En cualquier caso, los ciclos periódicos de 100 000 años parecen cumplirse y podemos ver una posible glaciación en torno a los 134 mil años (donde excentricidad, oblicuidad y longitud del

perihelio son las adecuadas, al estar también esta última por encima de los 180° y relativamente cerca a los 270°). No obstante, la más clara de entre todas las posibilidades la encontramos en torno a los 250 mil años, donde el máximo de la excentricidad coincide claramente con el mínimo de la oblicuidad. Además, la longitud del perihelio es, para entonces, muy próxima al valor idóneo de los 270° , mitigándose el impacto del verano en virtud de la coincidencia del afelio con el solsticio de verano del hemisferio norte.

Con todo esto, podemos concluir que el modelo utilizado aporta bastantes indicios sobre el inicio de una glaciación dentro de 250 mil años (probablemente la más intensa) y, en menor medida, otra más, dentro de en torno a 134 mil años. Cabe recalcar que estas predicciones siempre están sujetas a cambios sobre todo debido a la acción humana que, como ya se comentó, no influye en los datos que aporta el modelo utilizado. Además, las discrepancias observadas en la figura 4 reafirman el carácter estimativo del modelo, siendo posible que las glaciaciones predichas puedan

verse desplazadas en el tiempo en hasta 10 mil años (con respecto a las fechas marcadas en la figura 8).

4. Conclusiones

Concluimos que el modelo usado aporta indicios sobre el inicio de una glaciación en 250 mil años (probablemente la más intensa) y, en menor medida, otra en torno a 134 mil años. No es descartable que pudiera iniciarse, además, un ciclo glacial dentro de 50 000 años (como sugiere la bibliografía), si bien su magnitud no sería, en base a las predicciones del modelo, especialmente relevante. Cabe volver a recalcar que estas predicciones siempre están sujetas a cambios, sobre todo debido a la acción humana que, como ya hemos comentado, no se tiene en cuenta en el modelo empleado.

Referencias

- Berger, A., & Loutre, M. F. (2002). "Climate: An exceptionally long interglacial ahead?". *Science*, 297(5585), 1287–1288.
- Boulton, G. S., Dongelmans, P., Punkari, M., Broadgate, M. (2004). Evidence of European ice sheet fluctuation during the last glacial cycle. In: Ehlers, J., Gibbard, P. L. (Eds.), *Developments in Quaternary Sciences, Volume 2, Part 1*, Elsevier, 441-460.
- Ekman, M., Mäkinen, J. (2007). Recent postglacial rebound, gravity change and mantle flow in Fennoscandia. *Geophysical Journal International*, 126(1), 229–234.
- Farmer, J.R., Pico, T., Underwood, O.M., Stout, R.C., Granger, J., Cronin, T.M., Fripiat, F., Martínez-García, A., Haug, G.H., Sigman, D.M. (2023). The Bering Strait was flooded 10,000 years before the Last Glacial Maximum. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 120(1), e2206742119.
- Ganopolski, A., Winkelmann, R., Schellnhuber, H. (2016). Critical insolation–CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature*, 529, 200–203.
- Hausfather, Z. 2021. Explainer: How the rise and fall of CO₂ levels influenced the Ice Ages, *Carbon Brief*.
- Hannah, L. (2014). *Climate Change Biology*. 2nd ed. Academic Press, Amsterdam, 23-28.
- Hendricks, M., Depaolo, D., Cohen, R. (2000). Space and time variation of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation: Can paleotemperature be estimated from ice cores? *Global Biogeochemical Cycles*, 14, 851-861.
- Hunt, A.G., Malin, P.E. (1998). Possible triggering of Heinrich events by ice-load-induced earthquakes. *Nature*, 393(6681).
- Huddart, D., Stott, T.A. (2013). *Earth Environments: Past, Present and Future*. John Wiley & Sons.
- Kuhle, M. (1988). The Pleistocene glaciation of Tibet and the onset of ice ages. *GeoJournal*, 17(4), 581–595.
- Laskar, J., et al. (2011). La2010: A new orbital solution for the long-term motion of the Earth. *Astronomy Astrophysics - ASTRON ASTROPHYS*, 532.
- Maslin, M. (2020). Tying celestial mechanics to Earth's ice ages. *Physics Today*, 73, 48–53.

- Milankovitch, M. (1969). Canon of Insolation and the Ice-Age Problem. English translation by the Israel Program for Scientific Translations, published for the U.S. Department of Commerce and National Science Foundation, Washington, D.C., 633 pp.
- Montañez, I et al. 2011. Understanding Earth's Deep Past: Lessons for our Climate. Future.
- Nakada, M. 2002. Polar wander caused by the Quaternary glacial cycles and fluid Love number. *Earth and Planetary Science Letters*, 200(1–2), 159–166.
- Owens M.J., M. Lockwood, E. Hawkins, I. Usoskin, G.S. Jones, L. Barnard, A. Schurer, J. Fasullo, 2017. The Maunder minimum and the Little Ice Age: an update from recent reconstructions and climate simulations, *J. Space Weather Space Clim*, 7.
- Raymo, M. E., & Huybers, P. (2008). Unlocking the mysteries of the ice ages. *Nature*, 451.7176, 284-285.
- Royer, D.L., Berner, R.A., Park, J. (2007). Climate sensitivity constrained by CO₂ concentrations over the past 420 million years. *Nature*, 446, 530–532.
- Ruddiman, W.F. *Earth's Climate. Past and future.* New York, Freeman and Company.
- Shankar, U. 2021. Cave 'Krem Mawmluh' of Meghalaya plateau – The base of the 'Meghalayan Age' and '4.2 ka BP Event' in Holocene (Anthropocene). *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 47, 49-59.
- Sommer, R., Nadachowski, A. 2006. Glacial refugia of mammals in Europe: Evidence from fossil records. *Mammal Review*, 36, 251-265.
- Summerhayes, C. P. 2020. *Paleoclimatology: From Snowball Earth to the Anthropocene.* John Wiley & Sons.
- Svitol, K.A. 1996. We are all Panamians *Discover*, April.
- Usoskin, I.G., R. Arlt, E. Asvestari et al. 2015. The Maunder minimum (1645-1715) was indeed a grand minimum: A reassessment of multiple datasets, *Astron. Astrophys.*, 581.
- Underwood, E. 2020. The Complicated Role of Iron in Ocean Health and Climate Change. *Knowable Magazine*, 3 January.
- Watt, S.F.L., Pyle, D.M., Mather, T.A. 2013. The volcanic response to deglaciation: Evidence from glaciated arcs and a reassessment of global eruption records. *Earth-Science Reviews*, 122, 77–102.
- Wolff, E.W., Chappellaz, J., Blunier, T., Rasmussen, S.O., Svensson, A. 2010. Millennial-scale variability during the last glacial: The ice core record. *Quaternary Science Reviews*, 29(21–22), 2828–2838.