

Análisis de las condiciones climáticas holocénicas, mediante los resultados de estudios paleoclimáticos, paleoceanográficos y paleolimnológicos, y su relación con el cambio climático en México.

Informe final



Derechos Reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)
Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CP. 14210, Ciudad de México.

Todos los derechos están reservados. Ni esta publicación ni partes de ella (informes, mapas, bases de datos) pueden ser reproducidas, almacenadas mediante cualquier sistema o transmitidas, en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, de fotocopiado, de grabado o de otro tipo, sin el permiso previo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

El análisis y las conclusiones aquí expresadas no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, de su Junta Ejecutiva, de sus Estados Miembros, o del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Documento generado a partir de los resultados de la consultoría realizada por [Alejandra Tenorio Peña](#). Número de contrato IC-2016-142

Para mayor información sobre este estudio, consultar con la Coordinación General de Adaptación al Cambio Climático del INECC.

Citar como:

INECC-PNUD México. 2017. Consultoría para el “Análisis de las condiciones climáticas holocénicas, mediante los resultados de estudios paleoclimáticos, paleoceanográficos y paleolimnológicos, y su relación con el cambio climático en México”. Proyecto 85488 “Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, Alejandra Tenorio Peña, 83 pp, México

Contenido

Resumen ejecutivo	4
Introducción	12
1. Primeros trabajos en México sobre Paleoclimatología	14
2. Tipos de registros paleoclimáticos utilizados en México.....	15
2.1 Sedimentos marinos y lacustres.....	15
2.2 Anillos de árboles.....	17
2.3 Núcleos de hielo (glaciares)	18
2.4 Arrecifes coralinos.....	20
2.5 Suelos	21
2.6 Espeleotemas.....	23
2.7 Depósitos de neotomas.....	23
3. Análisis de <i>proxies</i> en estudios paleoclimáticos.....	25
4. Métodos de datación durante el Holoceno en estudios Paleoclimáticos.....	29
4.1 Principios de datación por el método de 14C.....	29
4.2 Principios de datación por el método de 210 Pb (isótopo plomo).....	30
4.3 Inferencias cronológicas a partir del 137Cs en estudios paleoclimáticos	32
5. La variabilidad climática durante el Cuaternario Tardío.....	34
5.1 Los eventos Dansgaard-Oeschger (DO).....	35
5.2 Los eventos Heinrich.	35
5.3 El Último Máximo Glacial (UMG).....	36
5.4 El Bølling-Allerød.....	38
5.5 Younger Dryas.....	39
6. Cambios importantes durante el Holoceno	41
7. La variabilidad climática de los últimos 2,000 años	43
7.1 La Anomalía Climática del Medievo (ACM) en México.	43
7.2 La Pequeña Edad de Hielo (PEH) en México.....	45

8. Encuentro de Paleoclimatología en México (avances, retos y perspectivas) en el marco de la Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC).....	51
8.1 Objetivo general:	51
8.2 Objetivos particulares:	51
8.3 Minuta del 13 de marzo del 2017	51
8.4 Evaluación del Encuentro	60
9. Resultado de la encuesta de la disciplina de Paleoclimatología en México con enfoque de género para investigadores	61
10. Conclusiones	69
11. Referencias.....	73
12. Glosario	81

Lista de Figuras

Figura 1. Mapas de los registros paleoclimáticos durante el Holoceno de sedimentos lacustres en México..	16
Figura 2. Mapa de los registros paleoclimáticos durante el Holoceno en sedimentos marinos en México. ...	16
Figura 3. Mapa de los registros paleoclimáticos durante el Holoceno con anillos de árboles y dendrocronologías en México	18
Figura 4 Mapa de los registros paleoclimáticos durante el Holoceno con glaciares y morrenas en México. ...	20
Figura 5. Mapa de los registros paleoclimáticos durante el Holoceno con corales en México.	21
Figura 6. Mapa de los registros paleoclimáticos durante el Holoceno con suelos y sedimentos en México. ...	22
Figura 7. Diagrama de flujo de la clasificación de los proxies que se utilizan en las reconstrucciones paleoclimáticas (Tenorio, 2011).	26
Figura 8. El ^{14}C en la naturaleza. Su formación en las altas capas de la atmósfera, oxidación para formar CO_2 e incorporación a la biosfera. Finalmente, su decaimiento por emisión de partículas β^- (Modificado de Bernal et al., 2010).....	30
Figura 9. Esquema simplificado del decaimiento radiactivo del ^{238}U que muestra la acumulación en sedimentos subacuáticos de ^{210}Pb exceso (no soportado) transportado por vía atmosférica y de ^{210}Pb formado in situ (soportado) Modificado de Bernal et al., 2010.	32
Figura 10. Diagrama de la desintegración radiactiva del ^{137}Cs . Tomada de https://es.wikipedia.org/wiki/Cesio-137#/media/File:Cs-137-decay.svg	33
Figura 11. Escala del tiempo geológico para el Periodo Cuaternario. Tomada y modificada de la Sociedad Geológica Americana de 2009.....	34

Figura 12. La gráfica del $\delta^{18}O$ obtenida de los núcleos de hielo GISP2 de Groenlandia, indicando 20 eventos Dansgaard–Oeschger ocurridos durante el Máximo Glacial. En la gráfica de abajo indicando los eventos Heinrich obtenidos de los núcleos de sedimento marino obtenidos en el océano profundo del Atlántico Norte Tomada de Bond y Lotti, 1995..... 35

Figura 13. La cronología de los eventos Heinrich deducida a partir de registros geoquímicos de los núcleos de hielo de Vostok, EPICA Domec, NGRIP, GRIP. Tomada de Obrochta et al., 2014..... 36

Figura 14. Comparación de la cobertura de hielo durante el Último Máximo Glacial con periodo actual en el Hemisferio Norte y Sur. Tomada de Peltier, 1994..... 37

Figura 15. La gráfica indica la temperatura del promedio de la temperatura superficial del océano para el Atlántico Norte en donde coincide un incremento de la temperatura y queda registrado el Bølling-Allerød. Tomada de Liu, et al., 2009. 39

Figura 16. La gráfica indica un descenso en la temperatura, así como un decremento en la acumulación de Nieve en Groenlandia, un enfriamiento en la Cuenca de Cariaco, también se observa un calentamiento en la Antártica. Tomada de <https://www.ncdc.noaa.gov/abrupt-climate-change/The%20Younger%20Dryas> 40

Figura 17. Temperaturas medias de superficie para el Hemisferio Norte durante del Holoceno, en ella se muestra el ACM y la PEH. Tomado y modificado de Dansgaard, 1964. 41

Figura 18. Mapa de los registros paleoclimáticos en México durante el Holoceno 42

Figura 19. Mínimos de manchas solares reportados para últimos 1100 años. Tomada de <http://pubs.usgs.gov/fs/fs-0095-00/>..... 45

Figura 20. Inauguración del Encuentro de Paleoclimatología en México durante el Pleistoceno-Holoceno conocer los retos y las perspectivas. 52

Figura 21. Conferencia magistral de la Dra. María del Socorro Lozano García del Instituto de Geología de la UNAM. 53

Figura 22. Ponencia de la Dra. Laura Eugenia Beramendi Orosco del Instituto de Geología, UNAM. 54

Figura 23. Ponencia de la Dra. Ana Carolina Ruíz Fernández Instituto de Ciencias de Mar y Limnología, UNAM. 54

Figura 24. Ponencia de la Dra. Elsa Arellano Torres de la Facultad de Ciencias, UNAM. 55

Figura 25. Ponencia de la Dra. Aída Martínez López del Instituto Politécnico Nacional del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Sede La Paz. 55

Figura 26. Ponencia de la Dra. Karla Gabriela Mejía Piña del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California. 56

Figura 27. Ponencia de la Dra. María del Carmen Álvarez García de la Universidad de Colima. 56

Figura 28. Modelos retrospectivos de la vegetación para la Península de Yucatán para los últimos 1000 años. Cortesía de la Dra. Torrescano durante el Encuentro de Paleoclimatología, 58

Figura 29 Clausura del Encuentro de Paleoclimatología en México (avances, retos y perspectivas) en el marco de la Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC)..... 59

Lista de Tablas

Tabla 1 Resumen de los principales proxies utilizados en Paleoclimatología	27
Tabla 2. Los estudios paleoclimáticos más relevantes para México durante el Holoceno.....	47

Resumen ejecutivo

El clima del planeta Tierra ha ido cambiado a lo largo del tiempo desde su origen. No obstante, el estudio del Holoceno ha sido una de las principales preocupaciones de la comunidad científica dentro del contexto de cambio climático, ya que uno de los principales objetivos es el de poder diferenciar entre la variabilidad inherente al sistema climático durante los últimos 11,500 años y la variabilidad introducida por la actividad antropogénica durante los últimos siglos, desde el comienzo de la Revolución Industrial.

Para poder obtener esta información recurrimos a la Paleoclimatología, la cual es una disciplina multidisciplinaria enfocada a conocer cómo eran las condiciones climáticas en el pasado antes de que se utilizaran los registros instrumentales. El origen de la palabra se deriva de la raíz griega “*paleo*” que significa “*antiguo*”, y del término clima. Es una disciplina reciente que comenzó en la segunda mitad del siglo XX, a partir de la realización de diversos trabajos fundantes de metodologías y técnicas para reconstrucciones paleoclimáticas.

En México, los primeros estudios paleoclimáticos se remontan a la década de los años 70, con las investigaciones de Toledo (1976) sobre los posibles cambios durante el Pleistoceno y sus efectos en la vegetación tropical cálida húmeda de México; y la de Sarukhán (1977), que analiza el efecto de los paleoclimas del Cuaternario en las planicies costeras del Golfo de México y en las selvas (Islebe, 2016). Durante las últimas décadas se han realizado avances significativos en el país en esta disciplina, aportando valiosa información sobre los cambios climáticos (precipitación, temperatura, cambios en la vegetación, productividad primaria, etc.) en regiones tropicales y subtropicales.

La información de los cambios del clima se encuentra en los registros naturales e instrumentales. Sin embargo, estos últimos son limitados porque son escasos y carecen de continuidad en los datos observados, además de que esta información se remite a los últimos 150 años.

Por tal razón, el análisis de los registros naturales en diversas escalas geológicas constituye la principal fuente de información climática. En esta disciplina los registros naturales (sedimentos marinos, lacustres, núcleos de hielo, espeleotemas, arrecifes coralinos, depósitos de neotomas, anillos de árboles, etc.) brindan evidencias de las condiciones climáticas en el pasado, y proveen información sobre cambios en la atmósfera, océanos, criósfera, biosfera, y en la dinámica de la interacción entre ellos.

A partir del estudio de diversos registros se ha concluido que es evidente que algunas civilizaciones fueron afectadas por cambios en el clima. Actualmente dentro de estas regiones habita aproximadamente tres cuartas partes de la población mundial. Por tal motivo es importante entender cómo operan los mecanismos de forzamiento climático y cómo ha sido su evolución.

En México, la mayoría de los estudios paleoclimáticos durante el Holoceno, la época más reciente, se ha realizado en sedimentos lacustres y marinos. Esta información fue obtenida a partir de la revisión bibliográfica y del mapeo de los trabajos realizados durante esta consultoría. En particular, en los últimos años ha crecido el interés por utilizar anillos de árboles para realizar reconstrucciones

de precipitación en el norte del país. No obstante, fue posible identificar que existe una necesidad importante de impulsar trabajos paleoclimáticos en donde se utilicen registros naturales, como por ejemplo: corales, núcleos de hielo y espeleotemas, ya que estos trabajos son más escasos comparados con los trabajos realizados con sedimentos marinos, lacustres, y anillos de árboles y anillos de árboles. Cabe resaltar que hasta el momento no existía una base de datos para México sobre estudios paleoclimáticos realizados durante el Holoceno, y esta consultoría la generó, integrando la siguiente información: nombre del estudio, autores y año de publicación, tipo de registro, alcance geológico, tipos de *proxies* empleados. El único trabajo previo en donde se georeferencia información sobre Paleoclimatología y en donde se muestran las publicaciones realizadas sobre esta disciplina es el “Reporte Mexicano de Cambio Climático del Grupo I”. Si bien este trabajo sienta las bases para el reconocimiento de las zonas con más publicaciones de artículos en México, se requería identificar con más detalle las áreas en donde se han obtenido registros paleoclimáticos para continuar con el desarrollo de esta disciplina.

Con esta consultoría, desarrollada para la Sexta Comunicación Nacional de Cambio Climático, se logró identificar cuáles han sido las regiones prioritarias de investigación en el país hasta el momento con base en el tipo de registro utilizado; adicionalmente se elaboró un mapa clasificando por tipo de registro empleado (sedimentos marinos y lacustres, anillos de árboles, corales, etc.) en estudios paleoclimáticos en el Holoceno, el cual permite visualmente tener más claro en donde se han realizado investigaciones de esta naturaleza. La base de datos como se mencionó previamente contiene la siguiente información: tipo de registro, alcance geológico, tipo de *proxy*, año de la publicación y autores.

Con base en los resultados de esta consultoría se identificó que la mayoría de los estudios paleoclimáticos con sedimentos lacustres se han realizado en el centro del país; no obstante, en los últimos años se ha observado una tendencia por conocer cómo han sido los cambios climáticos en el sureste y en el norte de país. Por otro lado, los trabajos realizados con sedimentos marinos, la mayoría se han obtenido del Golfo de California; sin embargo, existe un amplio conocimiento en el Golfo de Tehuantepec pero mucha de la información no ha sido publicada debido a que continúa desarrollándose.

Los trabajos paleoclimáticos con corales se han realizado en el Océano Pacífico; no obstante, para el Golfo de México y Caribe existen trabajos de cronologías con corales, pero no estrictamente trabajos paleoclimáticos, por lo que se requiere fortalecer el estudio de este tipo de registros, los cuales brindan información de alta resolución.

Los registros con anillos de árboles se han distribuido ampliamente a lo largo de país en los últimos años, tanto en norte como en el centro de México; no obstante, algunos autores sugieren que es importante desarrollar estudios paleoclimáticos con especies de árboles tropicales, en selvas tropicales, ya que estos trabajos son casi nulos; la mayoría se han realizado en los bosques templados y coníferas en el país.

Para nuestro país, como en otras zonas tropicales y subtropicales, los climas fríos se localizan fundamentalmente en las altas montañas. Es ahí donde hoy se encuentran los glaciares, campos de

nieve y suelos congelados, así como las evidencias de una expansión de la criósfera en el pasado, en particular las evidencias de glaciares más extensos. Los estudios paleoclimáticos en México con este tipo de registros se han realizado para el Pleistoceno y el Holoceno con éxito, y ha sido posible caracterizar el evento de la Pequeña Edad de Hielo.

En México se tiene información sobre los cambios en el avance y retroceso de los glaciares durante el Cuaternario y se ha caracterizado el evento de la Pequeña Edad de Hielo. Cabe mencionar que gran parte de los estudios paleoclimáticos realizados en el país tienen diferentes escalas temporales, resolución y requieren fortalecer sus cronologías, lo cual dificulta realizar comparaciones regionales. Asimismo, se requiere realizar los modelos paleoclimáticos usando modelos Generales de Circulación Atmosférica (GCA) para simular el clima del pasado. En los últimos años se ha hecho un esfuerzo importante por realizar estudios *multi-proxy*, en donde se utilizan más de dos indicadores paleoclimáticos y emplean fechamientos radiométricos con más de un método (método ^{14}C , ^{210}Pb y ^{137}Cs) para que las reconstrucciones paleoclimáticas tengan menor incertidumbre y puedan ser comparadas.

En contexto de cambio climático, los últimos 2000 años son de vital importancia, debido a que se han caracterizado dos principales anomalías en la temperatura: una positiva nombrada Anomalía Climática del Medievo (ACM) y, una negativa llamada Pequeña Edad Hielo (PEH) (Mann *et al.*, 2009). Estas anomalías aportan información importante sobre cambios abruptos ocurridos en periodos cortos. En México estas dos anomalías han sido identificadas y brindan información relevante sobre estos cambios en regiones tropicales y subtropicales. En este informe se presentan los trabajos paleoclimáticos realizados en México durante estos dos episodios.

En particular, durante la ACM en el Golfo de California se ha identificado esta señal climática utilizando diferentes indicadores biológicos como, por ejemplo: silicoflagelados, diatomeas y radiolarios (Barron *et al.*, 2003; Pérez-Cruz, 2006; Barron y Bukry, 2007) y se ha reportado la intrusión de aguas tropicales, cambios en precipitación y en la productividad en la región sur y centro del Golfo de California (Pérez-Cruz, 2006).

El final del periodo Clásico ~ 800 a 950 años A.P., coincide con la llamada sequía Maya. A partir de diversos registros lacustres se ha caracterizado un intervalo seco en la cuenca alta del Lerma (Caballero *et al.*, 2002) y en Los Tuxtlas (Goman y Byrne, 1998; Lozano-García *et al.*, 2007). En el centro-occidente del país, el registro polínico de hoyos de acumulación de sedimento en el bosque (*forest hollow*) de la Sierra de Manantlán muestra que el inicio de la ACM fue seco y finalizó con ambientes más húmedos inferidos por la presencia de polen de bosque de niebla (Figuroa-Rangel *et al.*, 2008, 2010).

En los sedimentos lacustres obtenidos en Juanacatlán, Jalisco, los registros geoquímicos sugieren que la ACM se caracterizó por ser un periodo húmedo (Metcalf *et al.*, 2010), mientras en Juxtlahuaca, Guerrero, la parte final de esta oscilación fue seca culminado con una megasequía (Lachniet *et al.*, 2013).

Durante la PEH se ha asociado con decrementos en la temperatura de 1.5 - 2°C y con avances de los glaciares de montaña en el rango de 250 m. Los registros históricos de México documentan a la PEH

como una serie de eventos recurrentes entre los siglos XIV y el siglo XIX sin embargo, en nuestro país hay pocos registros con buena resolución temporal para el periodo completo de la PEH que permitan tener una perspectiva clara del efecto que tuvo esta anomalía climática en el centro de México. Las condiciones climáticas secas en México durante la PEH han sido explicadas por la prevalencia de condiciones tipo El Niño.

A partir del análisis de varios registros naturales e históricos a lo largo del país se ha concluido que es evidente que varias civilizaciones han sido afectadas por cambios climáticos. Por ejemplo, se menciona que se han presentado diversas sequías entre 1760 y 1910, hacia el final de la PEH y correlacionan con reportes de baja precipitación en invierno y con temporadas de lluvias cortas; estas son las condiciones que precedieron a la Independencia de México (1810- 1821) y la Revolución Mexicana (1910-1924) (Cuna *et al.*, 2015).

Por otro lado, como parte de los objetivos de esta consultoría se realizó un Encuentro de Paleoclimatología en México, el cual tuvo como propósito general analizar los avances y el desarrollo actual de la Paleoclimatología en el país durante el Pleistoceno-Holoceno, conocer los retos y las perspectivas. En este Encuentro participaron investigadores de diversas universidades del país, así como distintos institutos que se mencionan a continuación: Instituto de Geología, Instituto de Geografía, Instituto de Geofísica, las tres sedes del Instituto de Ciencias de Mar y Limnología (Mazatlán, Puerto Morelos y Ciudad Universitaria), Centro Ciencias de la Atmósfera, Facultad de Ciencias, Centro de Geociencias, todos de la UNAM; Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (Sede La Paz), Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Universidad de Colima, El Colegio de la Frontera Sur (Sede Chetumal), Universidad de Guadalajara y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Sede Gómez Palacio, Durango.

En este encuentro se compartieron los trabajos más relevantes a nivel nacional, mismos que han sido incluidos en esta consultoría y se estrecharon y fortalecieron los lazos de comunicación y colaboración entre los participantes.

También durante este evento se aplicó una encuesta con enfoque de género para obtener información sobre el perfil de las y los investigadores y para conocer las problemáticas de género que viven quienes desarrollan estudios de paleoclimatología en el país, así como para conocer sus percepciones con relación a la presencia de mujeres en esta ciencia. Entre los resultados más relevantes se destaca que la proporción de mujeres y hombres que trabajan esta disciplina a nivel nacional es la siguiente: **47%** son mujeres y **53%** son hombres. Estos datos muestran que en esta disciplina las mujeres han tenido un gran avance y presencia. Una característica que presenta esta disciplina es que prácticamente no se han incorporado talentos jóvenes (30/35 años). Esto sumado a que la edad promedio de las y los investigadores encuestados es de 49 años, lleva a pensar que es necesario promocionar más a los jóvenes, ya que pudieran tener más expectativas de permanecer y hacer que la disciplina crezca y se nutra de nuevos conocimientos.

En cuanto a las fuentes de financiamiento, el 80.76% de los investigadores trabaja con financiamiento nacional. Solo el 19.23% no cuenta con este tipo de apoyo. La mayoría de las

personas que no acceden a estos financiamientos lo deben a que son técnicos y esta tarea está destinada y limitada únicamente a los investigadores titulares. No se muestran datos significativos en cuanto a diferenciación por género, debido a que el elemento para solicitar financiamiento es el nivel jerárquico en que se encuentre el sujeto.

La gran mayoría de estos recursos proviene del CONACyT o de la universidad en la cual trabajan.

Introducción

En el marco del cambio climático, los estudios paleoclimáticos son fundamentales, ya que brindan información relevante para conocer la variabilidad climática a lo largo del tiempo, permitiendo conocer sus diversos impactos en aspectos sociales, económicos, de disponibilidad de recursos hídricos, fluctuaciones climáticas de alta y baja frecuencia ocurridas en el pasado, y sirven para analizar el presente e inferir posibles tendencias futuras. La información que brindan estos trabajos ofrece datos para probar modelos climáticos. Adicionalmente este tipo de investigaciones contribuyen a diferenciar entre la variabilidad inherente al sistema climático y la variabilidad introducida por la actividad antropogénica.

Diversos organismos internacionales se han preocupado por ampliar el conocimiento sobre la variabilidad climática; en particular, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) en varios de sus informes (por ejemplo: en los de 2007 y 2013), enfatiza sobre la importancia de conocer e investigar sobre la variabilidad climática de la Tierra en el pasado para proyectar con precisión escenarios futuros (Islebe, 2016). En este sentido, para el IPCC el clima del pasado es la clave y la llave para entender el futuro: “*the past is the key to the future*” (Islebe, 2016).

En México, durante las últimas décadas se han realizado avances significativos en esta disciplina, aportando valiosa información sobre los cambios climáticos en regiones tropicales y subtropicales. La relevancia del estudio del clima en los trópicos radica en que estas zonas son las que reciben la mayor cantidad de calor y generan la mayor cantidad de humedad, la cual es transferida a la atmósfera del planeta., debido a que una parte importante de la energía absorbida en los trópicos se redistribuye hacia latitudes medias y altas a través de teleconexiones atmosféricas y oceánicas que, aunque relativamente consistentes durante las últimas décadas, parecen haber cambiado sustancialmente durante el último siglo.

Cabe mencionar que existen dos tipos de aproximaciones para realizar estudios paleoclimáticos: los modelos paleoclimáticos que usan modelos Generales de Circulación Atmosférica (GCA) para simular el pasado, y las reconstrucciones paleoecológicas, paleogeográficas, paleolimnológicas, paleoceanográficas utilizando diversos *proxies*¹.

Como parte de los resultados de la consultoría *Análisis de las condiciones climáticas holocénicas, mediante los resultados de estudios paleoclimáticos, paleoceanográficos y paleolimnológicos, y su relación con el cambio climático en México*, en este documento se plasman las contribuciones en Paleoclimatología para México, las cuales han sido muy diversas, en cuanto a alcance geológico y tipo de registros empleados.

¹ Un *proxy* (singular), *proxies* (plural), es un indicador indirecto (extraído de un archivo o registro climático) cuantificable que por su naturaleza física, química o biológica está relacionado con diferentes variables paleoclimáticas (paleotemperatura, paleoproductividad, etc.) y sus oscilaciones reflejan los cambios temporales acontecidos en estas variables a través del tiempo (Cronin, 2010).

Este documento incluye la recopilación de los trabajos realizados en el tema durante el Holoceno, lo cual se representa con un mapa general de estudios paleoclimáticos en México, identificando cuales han sido las zonas prioritarias para realización de estas investigaciones. Adicionalmente, con la finalidad de analizar los avances y el desarrollo actual de esta disciplina se llevó a cabo un Encuentro de Paleoclimatología en México, en donde se presentaron los trabajos más relevantes, los cuales se reportan en esta consultoría.

1. Primeros trabajos en México sobre paleoclimatología

Los primeros estudios paleoclimáticos en el país se remontan a la década de los años 70, con las investigaciones de Toledo (1976) sobre los posibles cambios durante el Pleistoceno y sus efectos en la vegetación tropical cálida húmeda de México; y la de Sarukhán (1977), que analiza el efecto de los paleoclimas del Cuaternario en las planicies costeras del Golfo de México y en las selvas (Islebe, 2016).

En el país los primeros trabajos paleolimnológicos tuvieron como objetivo reconstruir el clima principalmente en la cuenca de México. Estos trabajos se realizaron con sedimentos lacustres. No obstante, en las últimas décadas estos estudios se han ampliado geográficamente abarcando la mayoría del territorio nacional y utilizando diversos registros naturales.

En México, la paleoceanografía se inició en la década de los 80, de modo paralelo a la adquisición de los buques oceanográficos El Puma y Justo Sierra por la Universidad Nacional Autónoma de México (Pérez- Cruz, 2012). Esto facilitó la obtención de secuencias sedimentarias por parte de investigadores de instituciones nacionales, con equipos que permiten recuperar núcleos que tienen desde unos cuantos centímetros hasta varios metros de longitud (Islebe, 2016).

2. Tipos de registros paleoclimáticos utilizados en México

2.1 Sedimentos marinos y lacustres

Debido a las características geográficas del país los sedimentos marinos y lacustres son de los registros paleoclimáticos más utilizados, debido a que cada año se acumulan billones de toneladas de sedimentos en las cuencas de los lagos y los océanos, los cuales muestran los cambios tanto en el continente como en la atmósfera.

En algunos casos estos registros contienen las variaciones estacionales en las capas sedimentarias que los conforman, los cuales son clasificados como registros de alta resolución ya que este tipo de registros permiten conocer y diferenciar cambios climáticos estacionales en una región.

La relevancia del estudio de los sedimentos marinos y lacustres dentro del contexto de cambio climático reside en que las características observadas en los diferentes componentes de los sedimentos son una respuesta a la variabilidad climática, la cual a su vez está controlada por mecanismos de forzamiento que pueden ser externos, como la radiación solar y el flujo de rayos cósmicos, o bien, mecanismos internos, como es la circulación oceánica y el vulcanismo, sin dejar a un lado los múltiples procesos de retroalimentación entre los subsistemas que conforman el sistema climático (Pérez-Cruz, 2012; Islede, 2016).

En México una de las zonas más estudiadas en estudios paleoceanográficos es el Golfo de California considerado un laboratorio natural; su posición geográfica tiene la cualidad de monitorear cambios a escala de cuenca del Océano Pacífico Nororiental (Pérez-Cruz *et al.*, 2009), seguido del Golfo de Tehuantepec y el Golfo de México (Figura 1).

En las zonas continentales, los sistemas lacustres actúan como trampas donde se depositan, de manera más o menos continua: a) los materiales provenientes de los procesos de erosión de la cuenca como son arenas, arcillas, limos y restos de organismos (bioclastos); y en zonas volcánicas se depositan los productos de emisiones cercanas; b) granos de polen y esporas provenientes de la vegetación circundante al lago; c) restos de organismos que viven en el cuerpo de agua; d) detritos derivados de los procesos biogeoquímicos dentro del propio lago. El conjunto de sedimentos que se acumulan año con año en el fondo de un lago se convierte en un archivo de las condiciones climáticas, geológicas, limnológicas y ecológicas que dominaron durante el proceso de depósito. El análisis detallado de estos sedimentos y sus variaciones proveen información valiosa sobre condiciones pasadas aportando datos sobre procesos de erosión de la cuenca, cambios climáticos, historia de la vegetación (deforestación, agricultura), cambios limnológicos (profundidad del cuerpo de agua composición iónica) y cambios en el uso del suelo (deforestación, agricultura) (Lozano-García *et al.*, 2007).

2.2 Anillos de árboles

En las regiones templadas en donde existe una marcada estacionalidad, algunas especies de árboles generalmente producen un anillo anual de crecimiento. De esta manera, se pueden observar algunos patrones fisiológicos, por ejemplo: el ancho y la densidad y la composición isotópica reflejan cambios en el clima ocurrido hasta en miles de años. La dendroclimatología es la disciplina encargada de analizar esta información, la cual determina los eventos climáticos en el pasado (Díaz, 2002).

En México, la mayoría de estos trabajos se han generado en los bosques templados y subtropicales de las sierras Madre Occidental y Oriental (Figura 3). A pesar de la abundancia, distribución y diversidad de los bosques tropicales en México, se ha desarrollado poca investigación en este tipo de ecosistemas. El problema radica en que no se ha explorado a detalle el potencial dendrocronológico de especies tropicales y se tiene la idea errónea de que las especies arbóreas de estos ecosistemas no producen verdaderos anillos de crecimiento anual (Stahle, 1999).

En la última década se ha observado un interés creciente en utilizar especies mexicanas con potencial para estudios dendrocronológicos, entre ellas el oyamel, especie climáticamente sensitiva tanto a precipitación como a la temperatura (Huante *et al.*, 1991; Bernal, 2004). Dada la abundancia de oyamel en los bosques templados de México es factible desarrollar cronologías más extensas que permitan inferir condiciones climáticas pasadas en las regiones donde prospera esta especie. Caso específico son los bosques templados de coníferas en el estado de Michoacán, hábitat de la mariposa monarca y que en los últimos años han sufrido un deterioro importante a causa de las actividades antropogénicas.

Dentro de las primeras reconstrucciones dendroclimáticas para México se encuentran estimaciones de precipitación para el área fronteriza del norte de Sonora, México y suroeste de Arizona (Villanueva, 1996).

Adicionalmente, las cronologías de anillos de árboles del país resultan particularmente importantes debido a que la mayoría de ellas están bien correlacionadas con la precipitación y con los índices El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés). La precipitación invernal en el norte de México con frecuencia es modulada por dicho fenómeno, con inviernos húmedos, típicos de eventos cálidos (El Niño), e inviernos secos dominantes eventos fríos (La Niña) (Ropelewski y Halpert 1986; Cavazos y Hasterath, 1990; Magaña *et al.*, 1999, Villanueva *et al.*, 2011).



Figura 3. Mapa de los registros paleoclimáticos durante el Holoceno con anillos de árboles y dendrocronologías en México

2.3 Núcleos de hielo (glaciares)

Los núcleos de hielo se obtienen mediante la perforación de un sustrato (de capa de hielo) a diferentes profundidades. Estas muestras generalmente se obtienen perforando regiones polares y glaciares ubicadas en las altas montañas que permiten conocer la variabilidad climática. Al analizar las propiedades de los núcleos de hielo podemos inferir las variaciones de temperatura desde hace miles hasta millones de años. (Guerrero y Jiménez, 2007). Cabe mencionar, que las actividades humanas pueden causar cambios en las condiciones naturales de la criósfera; a pesar de que no existen muchos datos que relacionen directamente el estado de la criósfera con la actividad humana, el aumento en el efecto invernadero es la prueba más evidente de que la criósfera se ha visto alterada por la vida humana (Lorius *et al.*, 1990).

Para nuestro país como en otras zonas tropicales y subtropicales, los climas fríos se localizan fundamentalmente en las altas montañas. Es ahí donde hoy se encuentran los glaciares, campos de nieve y suelos congelados, así como las evidencias de una expansión de la criósfera en el pasado, en particular las evidencias de glaciares más extensos.

Los avances glaciares en México han ocurrido más o menos sincrónicamente en una misma región bajo control climático regional, hemisférico y planetario (Figura 4). La máxima extensión glacial en

el centro de México ocurrió entre 21,000 y 18,000 años A.P.² en las montañas con una altura mayor a los 3,800 m, lo cual coincide con el Último Máximo Glacial (UMG). La mayoría de los estudios paleoclimáticos en México se han hecho en glaciares y morrenas; son muy escasos los trabajos con núcleos de hielo, debido a su difícil muestreo y elevado costo de análisis.

La cronología glacial mexicana es similar a la de Norteamérica. En las últimas décadas, los glaciares mexicanos habían permanecido en las cimas del Iztaccíhuatl, Popocatepetl y Pico de Orizaba. Los glaciares del Popocatepetl aceleraron su desaparición debido a la actividad eruptiva. La cobertura glacial del Iztaccíhuatl representa sólo el 4 % de la que había al final de la Pequeña Edad de Hielo. En el Pico de Orizaba, el área glacial en 2010 era un 30 % del área total de 1958 (Delgado-Granados, 2015).

Durante la última glaciación pleistocénica planetaria (Wisconsin de Norteamérica, Würm de Europa) y durante algunas fases del Holoceno se formaron glaciares en varias montañas, sobre todo del centro de México. La actividad eruptiva de los últimos milenios del Popocatepetl y Pico de Orizaba ha destruido o cubierto buena parte de las evidencias de glaciación del Pleistoceno.

En cambio, volcanes como el Iztaccíhuatl, Cofre de Perote, Ajusco y otros más, inactivos durante el Pleistoceno Tardío, muestran un registro más completo de las glaciaciones (Vázquez-Selem y Heine, 2011).

² Antes del Presente (abreviado a menudo con las siglas A.P. y, en ocasiones, B.P., del inglés Before Present) es una escala de tiempo usada en arqueología, geología y otras disciplinas científicas como estándar para especificar cuándo ocurrió un evento en el pasado. Se adoptó debido a la multiplicidad de calendarios y de fechas usadas en el presente. A principios de 1954, los metrologos establecieron el año 1950 del calendario gregoriano como el año de origen arbitrario de la escala temporal para su uso en la datación por radiocarbono, usando muestras de referencia de 1950 de ácido oxálico. Por ejemplo 1500 A.P. significa 1500 años menos que 1950, es decir, el año 450 DC. En inglés, B.P. puede ser también considerado como una sigla de Before Physics.

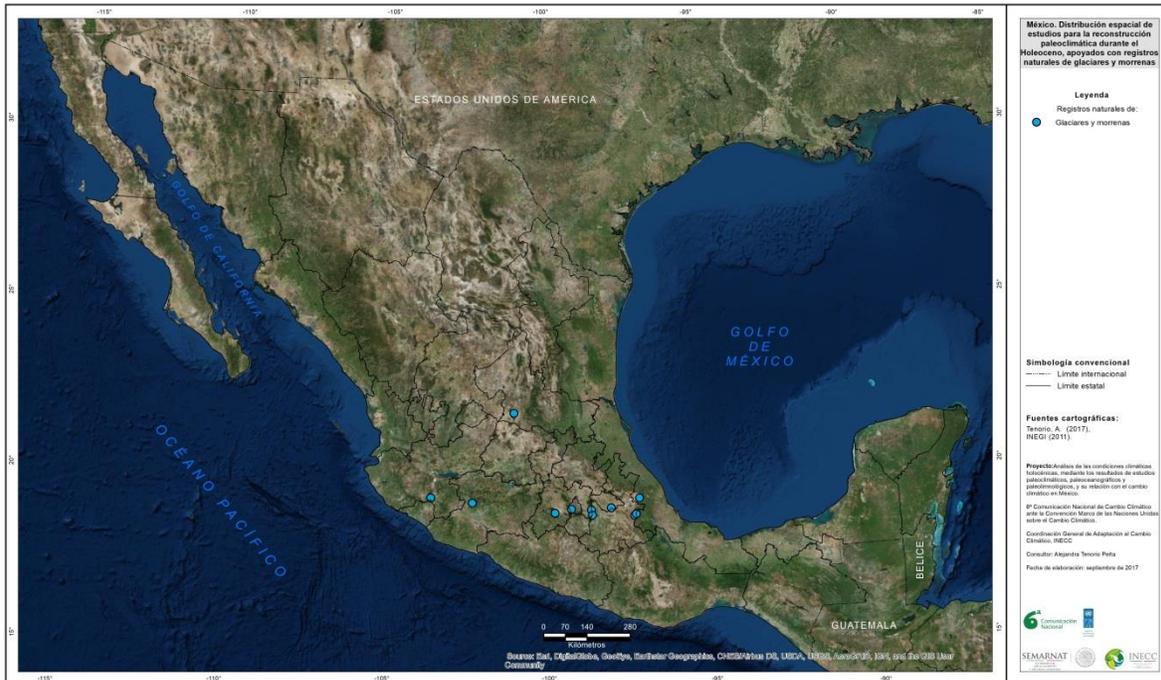


Figura 4 Mapa de los registros paleoclimáticos durante el Holoceno con glaciares y morrenas en México.

2.4 Arrecifes coralinos

Los corales tienen un esqueleto de carbonato de calcio en forma de aragonita, el cual crece en tasas de milímetros a centímetros por año. Durante su crecimiento, en el esqueleto se forman bandas anuales. Conforme crecen, los corales incorporan isótopos y elementos traza, los cuales dejan un sello de las condiciones ambientales presentes en el ambiente marino durante la precipitación del esqueleto, por ejemplo: temperatura del agua, evaporación, precipitación, escorrentía y circulación oceánica (Felis y Pätzold 2004).

Los corales masivos son registros paleoclimáticos únicos, capaces de brindar información de las condiciones climáticas en escalas de tiempo desde estacionales hasta de varios siglos. Debido a que los arrecifes de coral se desarrollan en las regiones tropicales, el estudio de la geoquímica de corales nos da la oportunidad de analizar la variabilidad climática en los trópicos, donde la información obtenida directamente con instrumentos es muy escasa.

Debido a que los arrecifes de coral se desarrollan en las regiones tropicales, el estudio de la geoquímica de corales nos brinda la oportunidad de estudiar la variabilidad climática en los trópicos, donde la información obtenida directamente con instrumentos es muy escasa.

Las reconstrucciones paleoclimáticas usando corales nos ofrece la oportunidad única de obtener información sobre los cambios de largo plazo en la variabilidad tropical y sus teleconexiones, las cuales derivan en mayor utilidad al alimentar modelos de simulación numérica con estos datos

paleoclimáticos que nos permitan mejorar nuestras predicciones del clima (Carriquiry- Villaescusa, 2013).

Como actualmente no existen registros climáticos confiables que vayan más atrás del último medio siglo, el estudio de la geoquímica de los esqueletos coralinos ha cobrado recientemente una gran importancia para:

- Documentar y entender el comportamiento de las interacciones océano-atmósfera y sus teleconexiones, con resolución estacional a anual, durante los últimos siglos, y
- Determinar la estabilidad de los sistemas climáticos tropicales y sus teleconexiones a medida que el clima y los fenómenos que influyen en éste cambian a través de largos periodos. La mayoría de los trabajos en México se han realizado en el Golfo de México, el Caribe y el Pacífico Central (Figura 5) (Carriquiry- Villaescusa, 2013).



Figura 5. Mapa de los registros paleoclimáticos durante el Holoceno con corales en México.

2.5 Suelos

Los suelos, al igual que los sedimentos marinos y lacustres, son utilizados como herramientas de reconstrucción paleoclimática, ya que su origen es el resultado de la acción conjunta de cinco factores formadores (clima, organismos, material parental, relieve y tiempo) directamente relacionados con el ambiente; estos registros comúnmente son nombrados paleosuelos.

El conjunto de propiedades pedagénicas que contienen información sobre las condiciones paleoambientales bajo las cuales se ha formado el suelo, corresponde al concepto de memoria del

suelo (Targulian y Goryachikin, 2004), y desempeña un papel fundamental en el entendimiento de la historia de los geosistemas desde el Paleozoico (Retallack, 1990).

Los paleosuelos son un registro paleoclimático valioso por ser independientes y complementarios a otros. Una ventaja que ofrece el análisis paleopedológico en relación con otros registros radica en su alta distribución espacial, ya que los suelos dentro de los sistemas terrestres se desarrollan en diferentes superficies geomorfas. Sin embargo, actualmente la resolución temporal de estos es menor al de otras secuencias sedimentarias (lacustres, marinas y glaciares) (Solleiro y Sedov, 2011).

En México, a partir del año 2000 se han intensificado este tipo de estudios, las secuencias más estudiadas se encuentran alrededor de la cuenca de México, en el Cinturón Volcánico Transmexicano (CTVM) (Figura 6), intercaladas con materiales volcánicos que cubren un intervalo de formación desde el Pleistoceno medio hasta el reciente (Holoceno). Este tipo de estudios son una opción viable para definir las condiciones paleoclimáticas del último periodo glacial, que pueden ser correlacionadas con los datos de los sedimentos lacustres y glaciares de México. Sin embargo, su interpretación no está libre de contradicciones en comparación con los registros lacustres, debido a la diferencia en condiciones locales, variabilidad meso y microclimática (Sedov *et al.*, 2001) y al vulcanismo, el cual enmascara la señal climática (Metcalf, 1997) impidiendo hacer una reconstrucción de alta precisión (Solleiro y Sedov, 2011).

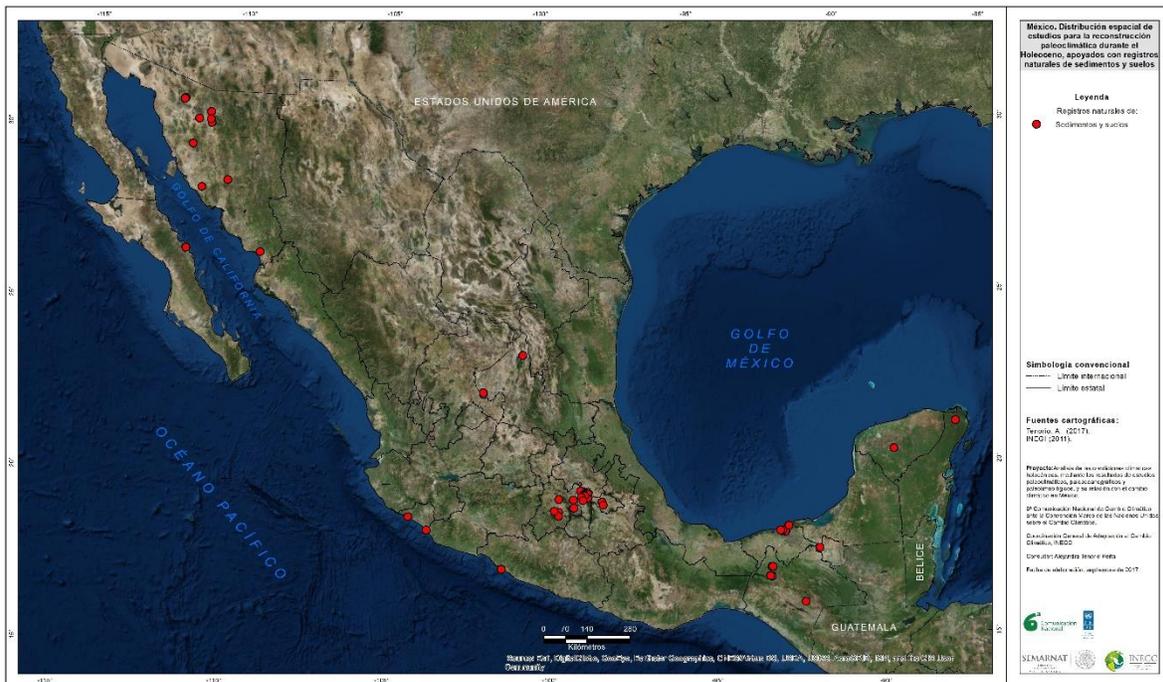


Figura 6. Mapa de los registros paleoclimáticos durante el Holoceno con suelos y sedimentos en México.

2.6 Espeleotemas

Las espeleotemas son depósitos de minerales que se forman en cuevas. La palabra, procede del griego 'depósito de las cavidades', se refiere generalmente a depósitos minerales secundarios formados en cuevas tras la génesis de éstas.

El agua se filtra a través de grietas y disuelve algunos compuestos como la calcita. Cuando esta disolución penetra en una cueva, los minerales disueltos reaccionan químicamente y se transforman de nuevo en caliza. A este proceso se le conoce con el nombre de precipitación, y al sólido formado, como precipitado (Bernal y Priyadarsi, 2010).

A lo largo de decenas de miles de años la acumulación de precipitados puede dar origen a diversos tipos de espeleotemas, que variarán según el clima exterior de la cueva, la cantidad de lluvia, la vegetación y las corrientes de aire, entre otros factores. Los más conocidos son las estalactitas y las estalagmitas (Pujul, 2008).

Este tipo de estudios paleoclimáticos ha sido revolucionario en México y ha permitido establecer los archivos climáticos de mayor resolución espacio-temporal del Holoceno en el país.

En la actualidad, su investigación se realiza en dos vertientes: el desarrollo de indicadores geoquímicos novedosos de condiciones paleoambientales y paleohidrológicas, y la reconstrucción paleoclimática de alta resolución; ambas con la finalidad de estudiar la dinámica de las principales oscilaciones climáticas que modulan el arribo de humedad a México y Centroamérica, durante periodos climáticos análogos al cambio climático contemporáneo (Bernal y Priyadarsi, 2010). No obstante, son escasos los trabajos publicados en revistas científicas indexadas y estos trabajos comprenden reconstrucciones del Pleistoceno. Por lo que no fueron incluidos en el mapa; ya que el mapa es de los estudios paleoclimáticos en el Holoceno.

2.7 Depósitos de neotomas

En regiones áridas, una especie de mamífero que pertenece al género *Neotoma* construye sus madrigueras en lugares muy seguros y protegidos. Como parte de su comportamiento, estos roedores van depositando capas de materiales (hojas, talos, polen, huesos de otros animales, etc.) que van colectado de sus alrededores. Estos materiales se pueden preservar debido a que hay poca humedad y la orina de estos roedores crea una capa cristalizada y endurecida.

Estos depósitos revelan cambios ambientales y climáticos; para la datación se recurre a la utilización de isótopos de carbono para tener un registro de cambios de vegetación y del clima a través de tiempo. La mayoría de estos trabajos se han realizado en el norte del país pero el alcance geológico es la época del Pleistoceno, no incluyen el Holoceno por eso no fueron incluidos en el mapa de registros paleoclimáticos.

Registros paleoclimáticos más utilizados en México

Sedimentos marinos	Sedimentos lacustres	Anillos de árboles	Corales	Suelos	Glaciares y morrenas	Espeleotemas
<p>Estos se acumulan en las cuencas los océanos.</p> <p>Las características observadas en los diferentes componentes de los sedimentos son una respuesta a la variabilidad climática, la cual a su vez está controlada por mecanismos de forzamiento que pueden ser externos, como la radiación solar y el flujo de rayos cósmicos, o bien, mecanismos internos, como es la circulación oceánica y el vulcanismo.</p>	<p>Los sedimentos lacustres se acumulan en las cuencas.</p> <p>Las cuales reflejan los cambios tanto en el continente como en la atmósfera.</p> <p>El análisis detallado de estos sedimentos proveen información valiosa sobre condiciones pasadas aportando datos sobre procesos de erosión de la cuenca, cambios climáticos, historia de la vegetación (deforestación, agricultura), cambios limnológicos (profundidad del cuerpo de agua composición iónica) y cambios en el uso del suelo</p>	<p>En las regiones templadas en donde existe una marcada estacionalidad, algunas especies de árboles generalmente producen un anillo anual de crecimiento. De esta manera, se pueden observar algunos patrones fisiológicos por ejemplo: el ancho y la densidad y la composición isotópica reflejan cambios en el clima ocurrido hasta en miles de años.</p>	<p>Los corales durante su crecimiento, en su esqueleto incorporan isótopos y elementos traza, los cuales dejan un sello de las condiciones ambientales presentes en el ambiente marino durante la precipitación del esqueleto por ejemplo: temperatura del agua, evaporación, precipitación, escorrentía y circulación oceánica.</p>	<p>Los suelos debido a su origen y propiedades a partir de su análisis de estos, se obtienen información relacionada con el ambiente. Los paleosuelos son un registro paleoclimático valioso por ser independientes y complementarios a otros y por tener una amplia distribución geográfica.</p>	<p>Los núcleos de hielo muestras generalmente se obtienen perforando regiones polares y glaciares ubicados en las altas montañas y nos permiten conocer la variabilidad climática. Al analizar las propiedades de los núcleos de hielo podemos inferir las variaciones de temperatura desde hace miles hasta millones de años.</p>	<p>Las espeleotemas son depósitos de minerales que se forman en cuevas.</p> <p>Constituyen una valiosa fuente de información sobre las condiciones paleoambientales en general y paleoclimáticas en particular de los entornos donde se localizan las cuevas. Estos registros pueden dar información sobre la precipitación y temperatura.</p>

3. Análisis de *proxies* en estudios paleoclimáticos

Los registros naturales en diversas escalas geológicas se constituyen como la principal fuente de información climática. En esta disciplina los registros naturales (sedimentos marinos, lacustres, núcleos de hielo, espeleotemas, arrecifes coralinos, depósitos de neotomas y anillos de árboles) nos brindan evidencias de las condiciones climáticas en el pasado, y proveen información sobre cambios en la atmósfera, océano, criósfera, biosfera, y en la dinámica de la interacción entre ellos como se mencionó en la sección anterior.

Estos registros contienen diversos *proxies*; un *proxy* (singular), *proxies* (plural), es un indicador indirecto (extraído de un archivo o registro climático) cuantificable que por su naturaleza física, química o biológica está relacionado con diferentes variables paleoclimáticas (paleotemperatura, paleoproduktividad, etc.) y sus oscilaciones reflejan los cambios temporales acontecidos en estas variables a través del tiempo (Cronin, 2010).

Cabe mencionar que la señal climática que queda en los registros naturales puede ser relativamente débil, embebida por mucho “ruido” provocada por el efecto de otras influencias no climáticas (por ejemplo: terremotos, erupciones, avalanchas, o biológicas como edad, competencia, enfermedades, etc.).

Por tal razón, es necesario calibrar los registros para extraer la señal climática y ésta sea más confiable. Generalmente, la calibración involucra la utilización de registros climáticos modernos, es decir, se utilizan *proxies* cuyo alcance geológico sea reciente y se correlacionan con los datos de los registros climáticos modernos (pluviómetro, termómetro, etc.) con la finalidad de verificar la señal climática (Díaz, 2002).

El análisis de los registros naturales a través de los *proxies* se basa en el uniformitarismo atribuido a Lyell, en donde se asume que las relaciones modernas observadas han operado de la misma forma a través del tiempo como se mencionó previamente (Bradley, 1999). En algunas reconstrucciones paleoclimáticas se utiliza más de un *proxy*, a este tipo de estudios se les denomina estudios “multi-*proxies*” y el nivel de confianza de la reconstrucción incrementa cuando se realizan este tipo de estudios (Fischer y Wefer, 1999).

Es importante mencionar que los *proxies* se dividen en dos grandes grupos: los biológicos y no biológicos, lo cual se observa en la figura 5.

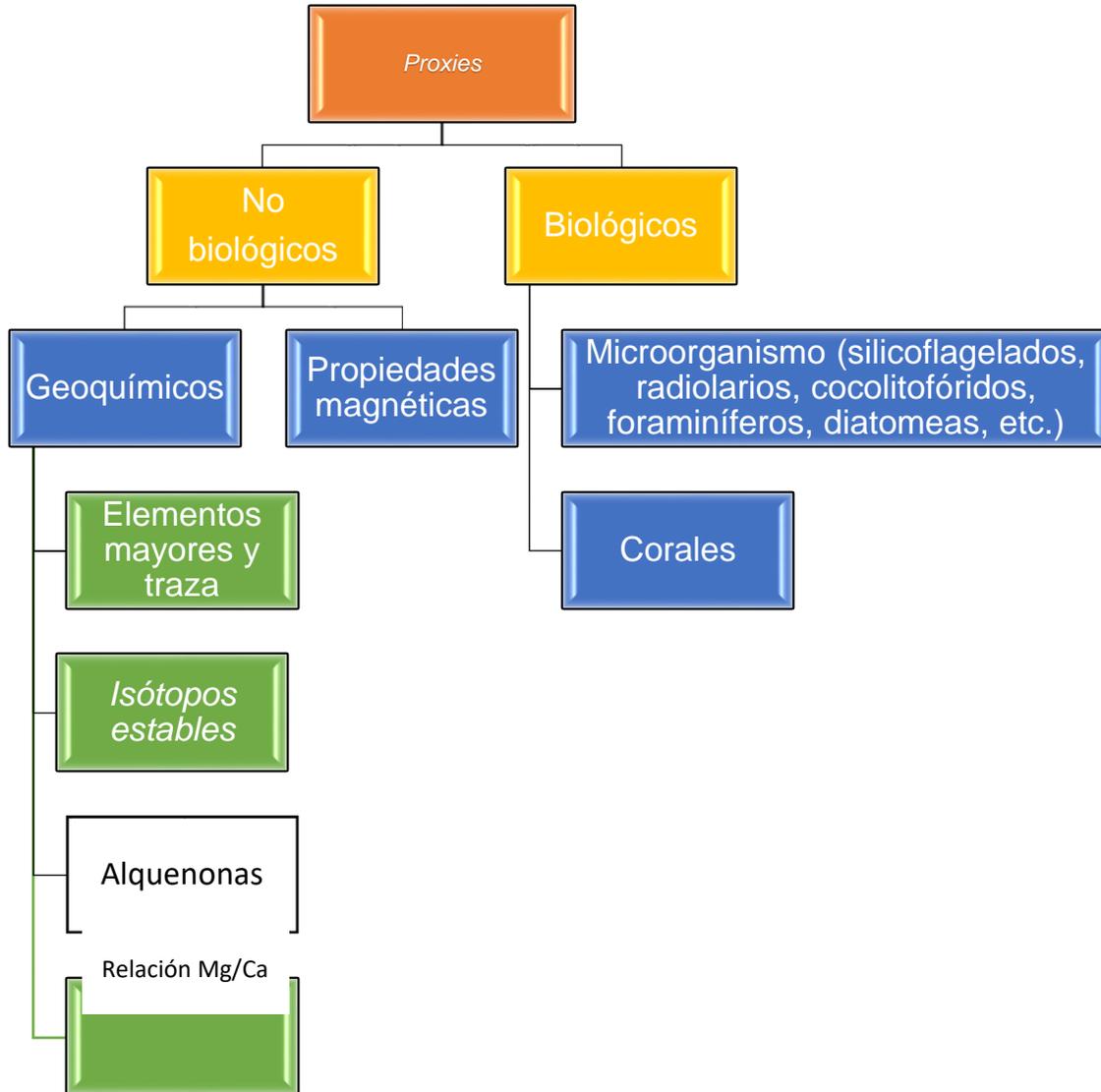


Figura 7. Diagrama de flujo de la clasificación de los proxies que se utilizan en las reconstrucciones paleoclimáticas (Tenorio, 2011).

Tabla 1 Resumen de los principales proxies utilizados en Paleoclimatología

Proxy	Fundamento científico	Alcance geológico	Limitaciones
Elementos mayores y traza	Se cuantifican por el método de fluorescencia de rayos X en sedimentos marinos y lacustres	0 a 100 millones de años	Algunos elementos pueden sufrir alteraciones químicas con el oxígeno modificando su comportamiento y como su resultado
Materia orgánica	La cantidad de materia orgánica que se deposita en una muestra se puede realizar la cuantificación del Carbono Orgánico Total (COT). La concentración de COT en sedimentos marinos y lacustres es proporcional a la cantidad de biomasa que se depositó en el océano después de su degradación en el proceso de enterramiento.	Millones de años (dependiendo de la muestra)	Cambios en la oxigenación puede afectar en la preservación de la materia orgánica.
Alquenonas	Se realizan mediciones de Índices de isótopos de carbono de sedimentos marinos, lo cual permite determinación de la fraccionamiento isotópico	0 a 100 millones de años	Únicamente puede ser utilizado en sedimentos marinos; no obstante, su precisión es alta. Es una técnica cara comparada con la cuantificación de elementos mayores y traza Se puede distinguir de los factores fisiológicos relacionados con los nutrientes, tales como la velocidad de crecimiento de las algas, el tamaño de las células, la geometría celular y el crecimiento ligeramente limitado en este caso la precisión es media. La precisión del cálculo de temperatura de la superficie del mar es muy alta. Los efectos diagenéticos son mínimos o pueden ser cuantificados.

<p>Relación Mg/Ca en testas de organismos carbonatados</p>	<p>La calibración de la temperatura se basa en análisis de laboratorio, ya que las concentraciones de Mg, se pueden cuantificar de esta manera poder tener una estimación de la temperatura con los cambios en las proporciones de la calcita.</p>	<p>0 a 65 millones de años</p>	<p>La relación Mg/Ca es ligeramente sensible al agua de mar pH. Las reconstrucciones de más 10 Ma, debe ser corroboradas a través de modelos. Los procesos de recristalización por diagénesis puede sesgar los resultados</p>
<p>Parámetros magnéticos</p>	<p>Los sedimentos marinos y lacustres contienen propiedades que son sensibles a los cambios climáticos que ocurrieron en el pasado por lo que se hacer inferencias climáticas.</p>	<p>Millones de años (dependiendo de la muestra)</p>	<p>Es un <i>proxy</i> complementario en una reconstrucción paleoclimática es necesario utilizar más <i>proxies</i> no se puede utilizar únicamente este <i>proxy</i></p>
<p>Cuantificación de microfósiles (foraminíferos bentónicos y planctónicos), ostrácodos, coccolitofóridos, radiolarios, silicoflagelados, etc.</p>	<p>Se utiliza una correlación estadística o cuantificación de cada una de las especies encontradas, y a partir de sus afinidades ecológicas se pueden hacer inferencias paleoclimáticas</p>	<p>0 a 5 millones de años</p>	<p>La calidad depende de la calidad, cobertura, tamaño Y representatividad del núcleo Las especies existentes se reducen con el aumento de la edad.</p>

En México, la mayoría de los estudios paleoclimáticos se han realizado con *proxies* biológicos; seguido de *proxies* de propiedades magnéticas; no obstante, en las últimas dos décadas se han incrementado los estudios paleoclimáticos *multi-proxy* que incluyen *proxies* biológicos, geoquímicos y propiedades magnéticas. Esto ha permitido darle mayor robustez a los estudios.

4. Métodos de datación durante el Holoceno en estudios paleoclimáticos.

El establecimiento de una cronología en registros paleoclimáticos se puede llevar a cabo de distintas maneras. Por ejemplo, debido a su naturaleza, el estudio de esqueletos de corales y anillos de árbol permite establecer la cronología a partir del conteo de bandas anuales (Baker *et al.*, 1993; McCulloch *et al.*, 2003).

La necesidad de contar con series de tiempo con estricto control cronológico independiente ha llevado al desarrollo de distintos métodos de datación basados, principalmente, en el decaimiento radioactivo de isótopos de origen natural (Bernal *et al.*, 2010).

De éstos, posiblemente el más comúnmente referido es el $^{14}\text{C}^3$. No obstante, el reciente desarrollo de instrumental de alta sensibilidad ha permitido medir con alta precisión la abundancia de distintos isótopos cuyas vidas medias cortas y su baja abundancia dificultó en el pasado la cuantificación confiable y, por lo tanto, su uso como geocronómetros. Esta sección tiene como objetivo presentar los fundamentos de algunos de los métodos de datación utilizados con mayor frecuencia en estudios paleoclimáticos, de manera que se brinde una base para la comprensión de documentos técnicos más avanzados, así como para comprender los criterios de selección y recolección de muestras. A continuación se explicarán los principios de datación de ^{14}C y $^{210}\text{Pb}^4$, así como la explicación de la utilización del $^{137}\text{Cs}^5$ como referencia cronológica en estudios paleoclimáticos recientes.

4.1 Principios de datación por el método de ^{14}C

En la naturaleza existen tres isótopos del carbono que ocurren naturalmente, el carbono 12 (^{12}C), el carbono 13 (^{13}C) y el carbono 14 (^{14}C), los primeros son estables y el último es inestable.

El método de datación por radiocarbono es una técnica que utiliza el isótopo ^{14}C , el cual se forma en la atmósfera superior por efecto de neutrones de rayos cósmicos que interactúan con átomos ^{14}N .

El isótopo de ^{14}C formado reacciona con el oxígeno para formar CO_2 , los seres vivos incorporan el ^{14}C durante toda su vida al momento en que mueren dejan de incorporar átomos de ^{14}C , así que ya no existe una renovación del carbono y el isótopo radiactivo decae de manera espontánea emitiendo una partícula beta negativa y va transformándose en ^{14}N por decaimiento radiactivo (Oliver, 2005).

³ El ^{14}C o radiocarbono, es un isótopo radiactivo del carbono, descubierto el 27 de febrero de 1940 por Martin Kamen y Sam Ruben. Su núcleo contiene 6 protones y 8 neutrones.

⁴ El ^{210}Pb es un isótopo radioactivo y un precursor del ^{210}Po en la serie de decaimiento del ^{238}U .

⁵ El Cesio-137 es un isótopo radiactivo del cesio que se produce principalmente por fisión nuclear.

En la figura 8 se puede observar el esquema del decaimiento radioactivo del ^{14}C .

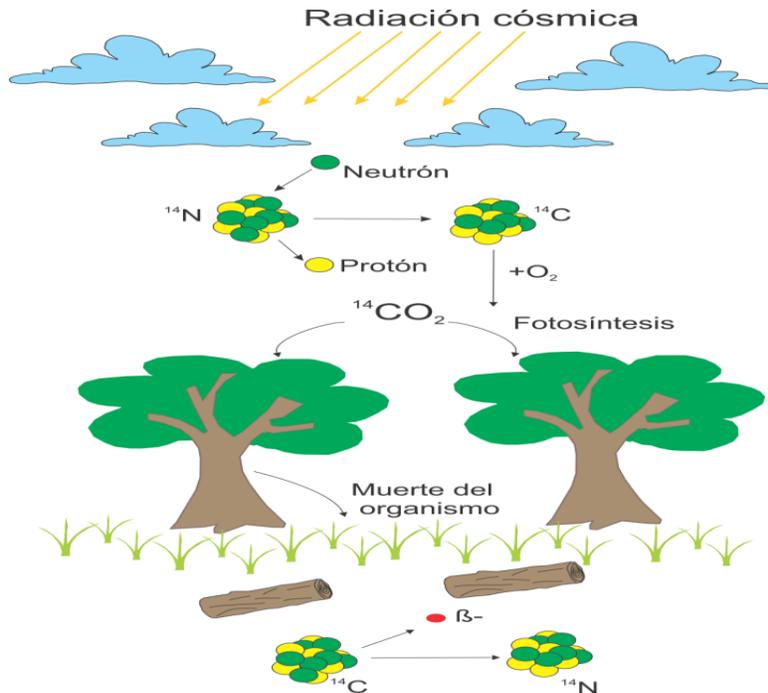


Figura 8. El ^{14}C en la naturaleza. Su formación en las altas capas de la atmósfera, oxidación para formar CO_2 e incorporación a la biosfera. Finalmente, su decaimiento por emisión de partículas β^- (Modificado de Bernal et al., 2010).

4.2 Principios de datación por el método de ^{210}Pb (isótopo plomo)

El ^{210}Pb es un trazador de procesos ambientales que se ha empleado con éxito en el estudio de procesos biogeoquímicos en los océanos, depósito atmosférico y contaminación antropogénica, procesos sedimentarios y geocronología de sedimentos (Sánchez- Cabeza *et al.*, 2012).

En particular, la técnica de datación del ^{210}Pb es la más utilizada para establecer un marco cronológico en sedimentos recientes marinos y lacustres de hasta ~200 años. Sin embargo, se sugiere que las dataciones en sedimentos se realicen para periodos de ~100 años para obtener mayor precisión analítica (Sánchez- Cabeza *et al.*, 2012).

El ^{210}Pb juega un papel importante en el estudio del medio ambiente ya que está presente tanto en la atmósfera, la litosfera y la hidrosfera. El ^{210}Pb es un radionúclido de origen natural perteneciente a la cadena radiactiva del ^{238}U . La vida media de este radioisótopo es de 22.26 años. Esta técnica permite estudiar procesos biológicos en la columna de agua, flujos atmosféricos y procesos de sedimentación.

Es importante conocer que dentro de la serie de desintegración del ^{238}U se encuentra el ^{226}Ra (vida media = 1602 años) que se desintegra para generar el gas inerte ^{222}Rn (vida media= 3.83 días), debido a que está en estado gaseoso puede escapar de las rocas y suelos de la corteza terrestre,

éste se difunde a la atmósfera con una tasa constante de aproximadamente $42 \text{ átomos min}^{-1}\text{cm}^{-2}$ (Sánchez- Cabeza *et al.*, 2012).

Una vez que se encuentra en la atmósfera el ^{222}Rn decae y se desintegra a través de varios productos de vida media muy corta hasta dar origen al ^{210}Pb . Este isótopo puede precipitarse por vía seca, por vía húmeda a los suelos o bien en los sedimentos marinos y lacustres. Una vez que el ^{210}Pb llega a los sedimentos comienza a desintegrarse (Figura 9).

La actividad del ^{210}Pb que está presente en los sedimentos marinos puede tener dos orígenes diferentes los cuales se explicarán a continuación. El primero está relacionado con los valores de fondo de la litosfera, es decir, el ^{210}Pb que se forma *in situ* este se considera que está en equilibrio con la desintegración del ^{226}Ra recibiendo el nombre de ^{210}Pb base. Su actividad en el sedimento está controlada principalmente por la mineralogía del substrato rocoso (Sánchez- Cabeza *et al.*, 2012).

El segundo origen del ^{210}Pb es el atmosférico esto es el resultado de la desintegración del gas ^{222}Rn . Este ^{210}Pb no está en equilibrio con el ^{226}Ra , por lo que recibe el nombre de ^{210}Pb exceso. Después de la incorporación del ^{210}Pb al sedimento provoca un “exceso” de este radioisótopo en relación a los valores constantes del ^{210}Pb *in situ* (Soto *et al.*, 1999; Luque- Marín, 2003; Bernal *et al.*, 2010). En la figura 9 se presenta el esquema del decaimiento radioactivo del ^{210}Pb .

El método de datación del ^{210}Pb se establece a partir de los valores de la actividad del ^{210}Pb exceso en función de la profundidad. La actividad presenta valores decrecientes conforme aumenta la profundidad de acuerdo con la desintegración radiactiva del radioisótopo (Luque- Marín, 2003).

En particular en las zonas costeras someras (<100 m), el flujo principal de ^{210}Pb a los sedimentos es el procedente de la atmósfera, aunque los ríos y la escorrentía pueden ser fuentes adicionales de ^{210}Pb a la columna de agua.

En aguas más profundas se debe tener en cuenta que una fracción del ^{210}Pb , más importante cuanto mayor sea la profundidad, procede del ^{226}Ra disuelto en el agua de mar. Una vez el ^{210}Pb se encuentra en el medio marino, se desintegra o se asocia a la materia en suspensión, la cual arrastra al ^{210}Pb hacia el sedimento del fondo. Así, los sedimentos contienen ^{210}Pb producido *in situ* por la desintegración del ^{226}Ra (^{210}Pb de base) y el que procede de columna de agua (^{210}Pb en exceso) que se deposita con las partículas que finalmente forman parte del sedimento consolidado (Sánchez- Cabeza *et al.*, 2012) (Figura 9).

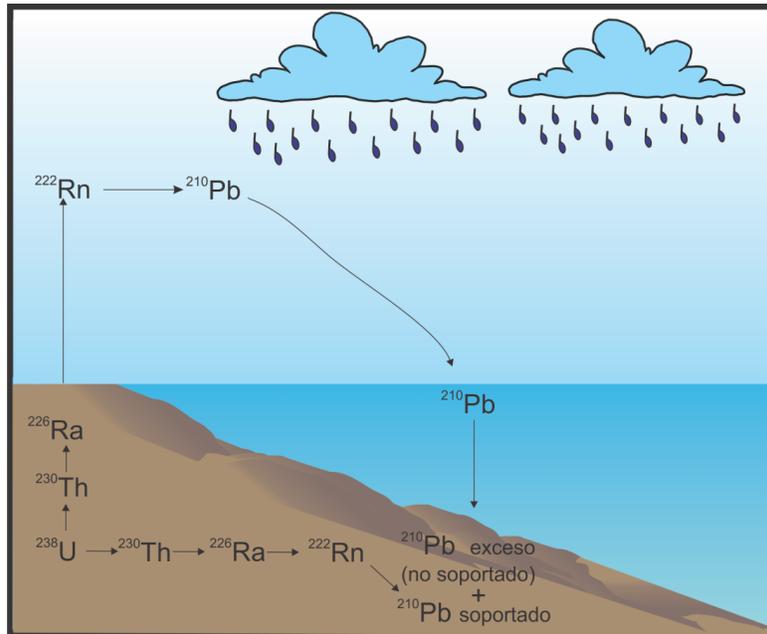


Figura 9. Esquema simplificado del decaimiento radiactivo del ^{238}U que muestra la acumulación en sedimentos subacuáticos de ^{210}Pb exceso (no soportado) transportado por vía atmosférica y de ^{210}Pb formado in situ (soportado). Modificado de Bernal *et al.*, 2010.

4.3 Inferencias cronológicas a partir del ^{137}Cs en estudios paleoclimáticos

El ^{137}Cs es un isótopo radiactivo del Cesio que se produce principalmente por fisión nuclear. Tiene un periodo de semidesintegración de ($t_{1/2} = 30.23$ años), y decae emitiendo partículas beta a un isómero nuclear metaestable de $^{137}\text{Bario}$. Este isótopo es un radionúclido artificial difundido en la atmósfera a través de ensayos nucleares. En la figura 10 se observa el diagrama del decaimiento radioactivo del ^{137}Cs .

El ^{137}Cs es soluble en agua y sumamente tóxico en cantidades ínfimas. Una vez liberado al medio ambiente, sigue estando presente durante muchos años, dada su vida media (Luque- Marín, 2003).

Los picos de actividad existentes en un perfil sedimentario representan niveles de guía artificiales, asociados al periodo de máxima liberación atmosférica de ^{137}Cs durante estos ensayos. Los ensayos comenzaron a realizarse a mediados de la década de los años 40, y presentan un máximo de actividad nuclear en el año 1963. Varios autores han estudiado este aspecto en diversos sistemas lacustres (Pennington *et al.*, 1973; Robbins *et al.*, 1977; Robbins, 1978; Luque- Marín, 2003).

Durante el accidente de Chernobyl, ocurrido en 1986, se produjo una segunda liberación atmosférica de ^{137}Cs detectable en muestras ambientales (Pourchet *et al.*, 1986; Pourchet *et al.*, 1988; Appleby *et al.*, 1993).

Los picos de máxima actividad de ^{137}Cs , en el registro sedimentario, están asociados a estos periodos de la historia de gran introducción de ^{137}Cs al sistema natural; su presencia indica una edad posterior a la década de los 40.

Su localización en el registro sedimentario permite deducir la tasa de sedimentación existente e inferir cronologías. Cabe resaltar que como tal no es un método de datación radiométrica natural, ya que como se mencionó previamente se produce por la fusión nuclear. Por lo que comúnmente, la medición de ^{137}Cs en sedimentos marinos y lacustres para obtener un marco cronológico es una herramienta complementaria del método de datación de ^{210}Pb (Pourchet y Pinglot, 1989).

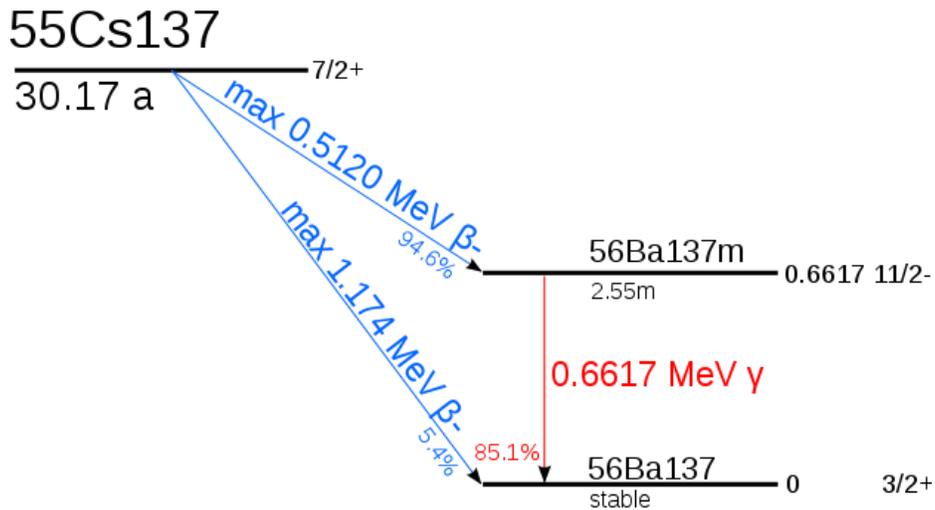


Figura 10. Diagrama de la desintegración radiactiva del ^{137}Cs . Tomada de <https://es.wikipedia.org/wiki/Cesio-137#/media/File:Cs-137-decay.svg>

5. La variabilidad climática durante el Cuaternario Tardío

El Cuaternario es el periodo del Cenozoico que empezó hace 2.6 millones de años y es el más reciente (Geological Society of America, 2009). Su límite superior es la actualidad y su límite inferior es comienzo de las glaciaciones (Figura 11).

El Cuaternario incluye dos épocas: el Pleistoceno (2.6 millones- 11,500 años), es la primera y más larga parte del periodo, que incluye las glaciaciones y el Holoceno (últimos 11,500 años) (Cronin, 2010).

		Período	Época	Edad	Picos (Millones de años)
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno		
					0.01
			Pleistoceno	Calabriense	1.8
				Gelasiense	2.6

Figura 11. Escala del tiempo geológico para el Periodo Cuaternario. Tomada y modificada de la Sociedad Geológica Americana de 2009.

Durante el Pleistoceno, a partir de diversos registros se ha concluido que la temperatura en los casquetes polares era inferior a la de la congelación, en esta época hubo varias glaciaciones alternadas con estadios interglaciales. Se considera que se produjeron cuatro glaciaciones con sus consiguientes estadios interglaciales, denominándose Günz, Mindel, Riss y Würm según la clasificación europea (Cronin, 2010).

Estos cambios climáticos fueron intensos cuando existieron grandes casquetes de hielo (los periodos glaciales), y fueron más débiles durante climas interglaciales (como el actual) (Paillard, 2001, Schmitter A. M. Y., y A. J. Weaver, 2002).

Los eventos climáticos más importantes que ocurrieron durante el Pleistoceno Tardío y el Holoceno se describen a continuación.

5.1 Los eventos Dansgaard-Oeschger (DO)

Los eventos (DO) se caracterizaron por ser sucesos cálidos repentinos y de corta duración que ocurrieron cuando las condiciones eran generalmente frías, entre los 110,000 y 10,000 años (Lowe y Walker, 1984).

La caracterización de estos eventos se dio a partir de la información obtenida de los núcleos de hielo de Groenlandia y fue posible determinar 24 eventos DO, a través del estudio de los isótopos de oxígeno $\delta^{18}\text{O}$ (Figura 12) (Bond *et al.*, 1993; Bond y Lotti, 1995).

Las evidencias indican que el mecanismo generador de estas fluctuaciones son los cambios en la circulación oceánica del Atlántico del Norte, debido a la descarga masiva de agua dulce procedente del casquete polar cuando hay un incremento en la temperatura alternando la circulación profunda.

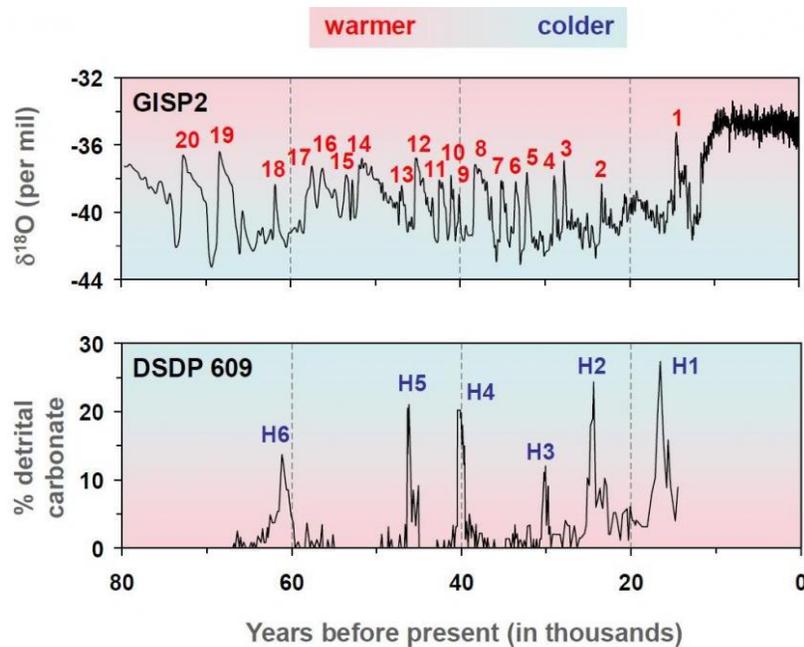


Figura 12. La gráfica del $\delta^{18}\text{O}$ obtenida de los núcleos de hielo GISP2 de Groenlandia, indicando 20 eventos Dansgaard-Oeschger ocurridos durante el Máximo Glacial. En la gráfica de abajo indicando los eventos Heinrich obtenidos de los núcleos de sedimento marino obtenidos en el océano profundo del Atlántico Norte Tomada de Bond y Lotti, 1995.

5.2 Los eventos Heinrich

A lo largo de la última glaciación se han documentado seis episodios, que fueron denominados “Eventos Heinrich” (Heinrich, 1988). Durante estos eventos se depositaron grandes cantidades de detritos rocosos transportados por icebergs en los fondos del Océano Atlántico (Figura 13) (Grousset *et al.*, 2000). Estos eventos se caracterizaron por presentar condiciones frías y por coincidir, por lo general, con el final de fases de enfriamiento progresivo, de aprox. 10,000 años de duración (Bond *et al.*, 1993).

La influencia de los eventos *Heinrich* en el clima global, o al menos en el Hemisferio Norte, se manifiesta porque al derretirse los icebergs del agua dulce disminuye la salinidad de las aguas superficiales del Atlántico Norte, por lo que la Corriente del Golfo no alcanza a llegar a las latitudes altas y se produce en la superficie un avance hacia el sur de las masas de agua polares (Bard y Oise, 2000).

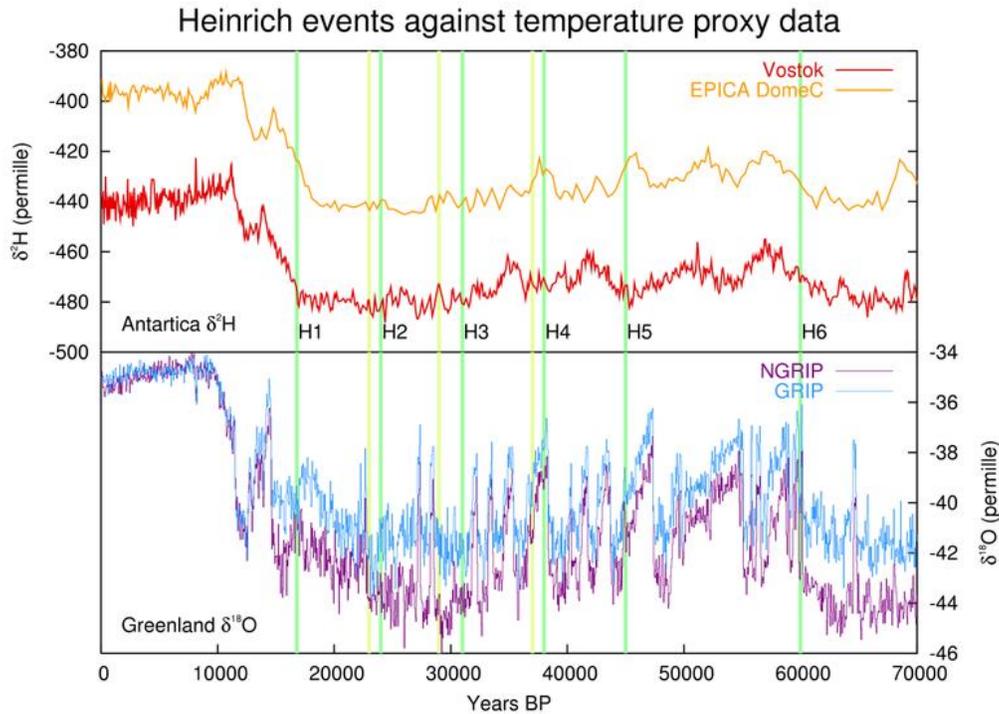


Figura 13. La cronología de los eventos Heinrich deducida a partir de registros geoquímicos de los núcleos de hielo de Vostok, EPICA Domec, NGRIP, GRIP. Tomada de Obrochta et al., 2014.

5.3 El Último Máximo Glacial (UMG)

Durante el transcurso de esta última glaciación, llamada Würm en Europa, y Wisconsin, en América, que comenzó hace aproximadamente 115,000 años, el aire se fue enfriando progresivamente, aunque no de forma lineal. El punto más frío ocurrió hace 18 ka (18,000 años), en el llamado Último Máximo Glacial (LGM por sus siglas en inglés). Durante este intervalo la temperatura media global de la superficie del planeta llegó a ser unos 7°C inferior a la del comienzo de la glaciación (Allen et al., 1999).

La magnitud del enfriamiento fue muy diferente según la latitud. El descenso térmico 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. En muchas partes del planeta, la temperatura media pudo descender más de 15°C. En la figura 14, se muestran modelos de la cobertura de hielo en el Hemisferio Norte y Sur, comparada con la actual.

Las perforaciones en los núcleos de hielo en Groenlandia sugieren que la temperatura en el UMG en ese lugar, fue 23°C menor a la actual (Dahl-Jensen et al., 1998). En las latitudes tropicales el

descenso de la temperatura media fue menor, aproximadamente de 5°C, aunque el cambio hidrológico y paisajístico fue también considerable. La superficie oceánica se enfrió en promedio 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. En este intervalo (UMG), los hielos acumulados en los glaciares en los mantos continentales alcanzaron el mayor volumen. A medida que se acumulaba hielo en los continentes, se sustruía agua de los océanos, y en consecuencia descendía el nivel de los mares (Allen *et al.*, 1999). Cuando la acumulación de hielo continental fue máxima, el nivel de los mares quedó entre 120 y 140 m por debajo de la cota actual.

De este modo, vastas extensiones de las plataformas continentales, hoy emergidas, quedaron al descubierto. Asimismo, los cursos bajos de varios ríos seguían una trayectoria muy diferente a la actual, y pudieron haber tenido una desembocadura muy alejada de la que tiene hoy en día (Allen *et al.*, 1999; Genty *et al.*, 2003).

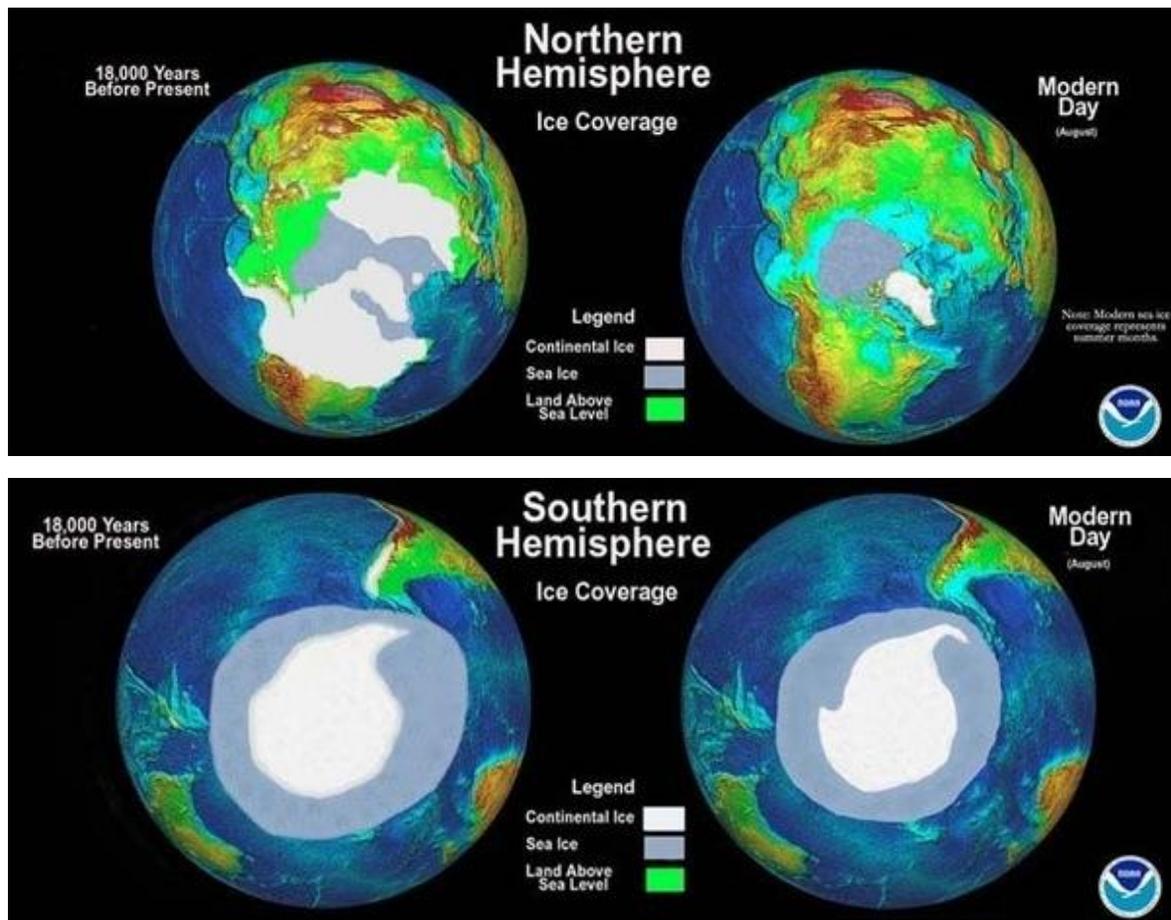


Figura 14. Comparación de la cobertura de hielo durante el Último Máximo Glacial con periodo actual en el Hemisferio Norte y Sur. Tomada de Peltier, 1994.

En el Golfo de México nororiental se han realizado diversos trabajos con la finalidad de conocer cómo han sido los cambios en el nivel medio del mar durante este periodo (UMG) y se observó un

incremento de ~100 m relacionado con eventos de deshielo en Norteamérica y la Antártida (Anderson *et al.*, 2014).

En el Golfo de Tehuantepec, a partir del estudio de foraminíferos planctónicos se ha caracterizado que durante el UMG hubo cambios en la posición de las masas de agua en el golfo. En particular, durante el periodo de 25,000 a 18,000 años, se observó una asociación de dos especies de foraminíferos (*G. menardii*-*N. dutertrei*) que fueron predominantes en el área de estudio. Estas especies predominan en masas de agua cálida con la termoclina estable y, por lo tanto, estratificadas. La abundancia de estas especies indica que durante este periodo prevalecieron en la incursión de aguas cálidas al golfo de Tehuantepec y hubo una disminución de las surgencias (Arrellano *et al.*, 2011).

Estas disminuciones en los procesos de surgencias han sido reportadas en otras áreas del Pacífico Tropical, como en la cuenca de Mazatlán (Ganeshram y Pedersen, 1998). Esta señal en el Golfo de Tehuantepec indica que en latitudes tropicales existe una diferenciación importante con los registros obtenidos en latitudes altas.

5.4 El Bølling-Allerød.

Entre los 14,700 y los 12,000 años, se produjo un brusco calentamiento, denominado Bølling-Allerød, durante el cual las temperaturas se mantuvieron altas.

Las fluctuaciones térmicas han quedado registradas por los desplazamientos de la vegetación de tundra en las regiones polares de América del Norte, entre los 14,000 y 12,000 años A.P., cuando el proceso de deshielo fue irregular en el Hemisferio Norte (Cronin, 2010).

Las temperaturas aumentaron del orden de 10°C en menos de cincuenta años. Numerosos yacimientos de polen en Europa indican que la flora glacial de hierbas y arbustos fueron sustituidas por una vegetación de árboles que necesitan un clima templado. Si bien aquello parecía marcar el final de la glaciación, el clima templado no resistió mucho y fue declinando de nuevo hacia un periodo frío. De tal manera que, hace aproximadamente unos 12,000 años, el clima europeo recayó en un periodo de nuevo muy frío denominado el *Younger Dryas*.

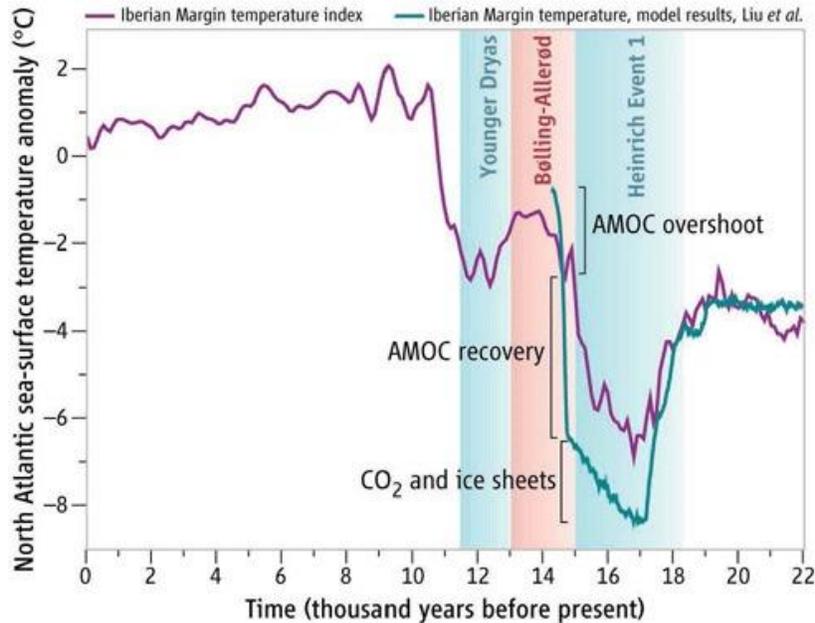


Figura 15. La gráfica indica la temperatura del promedio de la temperatura superficial del océano para el Atlántico Norte en donde coincide un incremento de la temperatura y queda registrado el Bølling-Allerød. Tomada de Liu, et al., 2009.

5.5 Younger Dryas

El comienzo del Holoceno estuvo precedido por un periodo frío denominado *Younger Dryas*, entre 12,000 y 11,500, que marcó el fin de la transición entre el último periodo glacial y el interglacial cálido que denominamos Holoceno (Figura 16). Durante el *Younger Dryas* el Hemisferio Norte mostró un retorno parcial a las condiciones climáticas frías similares a las del UMG (Genty *et al.*, 2003).

En esta fase los hielos no sólo dejaron su tendencia al retroceso propiciada por el calentamiento global, sino que volvieron a avanzar a lo largo de Europa y Norte América. Esta breve, pero intensa fase de enfriamiento (descenso de hasta 6°C en pocas décadas en el aire de Groenlandia), se produjo precisamente en un momento de máxima insolación del Hemisferio Norte, la cual acabó súbitamente hacia el 11,500 A.P., cuando se produjo un ascenso térmico definitivo que dio entrada en el Hemisferio Norte al interglacial actual: El Holoceno (Alley *et al.*, 2003).

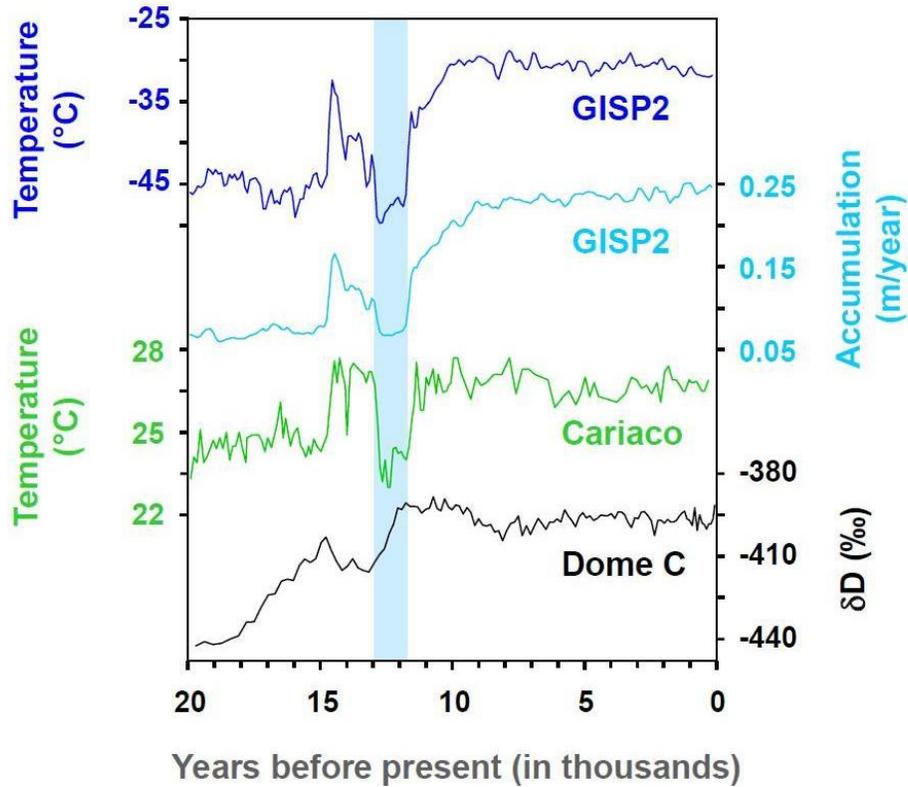


Figura 16. La gráfica indica un descenso en la temperatura, así como un decremento en la acumulación de Nieve en Groenlandia, un enfriamiento en la Cuenca de Cariaco, también se observa un calentamiento en la Antártica. Tomada de <https://www.ncdc.noaa.gov/abrupt-climate-change/The%20Younger%20Dryas>

6. Cambios importantes durante el Holoceno

Es la época geológica que comenzó hace aproximadamente 11,500 años antes del presente para las dataciones de radiocarbono (^{14}C).

Actualmente, se reconoce que las variaciones del clima a través del Holoceno han sido considerables y más frecuentes de lo que inicialmente se pensaba, aunque no tenga carácter dramático de las interrupciones climáticas que caracterizan el último periodo glacial. Cada vez hay más evidencias de la variabilidad del clima del Holoceno en la escala milenaria, lo cual ha sido asociado con los cambios en el flujo solar (O' Brien *et al.*, 1995), y a una oscilación interna del sistema climático (Bond *et al.*, 1993). En la literatura se ha sugerido que los cambios en la insolación, debido tanto a las variaciones orbitales de la Tierra como la variabilidad solar, jugaron un papel central en los cambios climáticos globales de los últimos 11,500 años (Figura 17).

La revisión de aproximadamente 50 registros paleoclimáticos distribuidos globalmente ha revelado la existencia de seis periodos significativos de rápido cambio climático durante el Holoceno: entre 9000 y 8000, 6000 y 5000, 4200 y 3800, 3500 y 2500, 1200 y 1000, y 600 y 150 AP. También se han reconocido eventos fríos los cuales muestran ciclos de $\sim 1470 \pm 532$ años. La mayoría de los registros reconstruidos hasta la fecha muestran cómo estos cambios climáticos rápidos están asociados a eventos de enfriamiento, aridez tropical y a cambios importantes en la circulación atmosférica a escala global.

Durante el Holoceno Medio, se ha reconocido un periodo en donde el clima fue sensiblemente más cálido y hubo alteración de la precipitación en muchas regiones. Frecuentemente este periodo es referido con diferentes nombres como: Altitermal (*Altihermal*) en el Atlántico, el "pequeño óptimo climático" (*Little climatic optimum*) en Europa, el hipstermal (*Hypsithermal*) postglacial, El Máximo del Holoceno y, en la literatura arqueológica es referido como la "Edad de Oro" (*"Golden age"*).

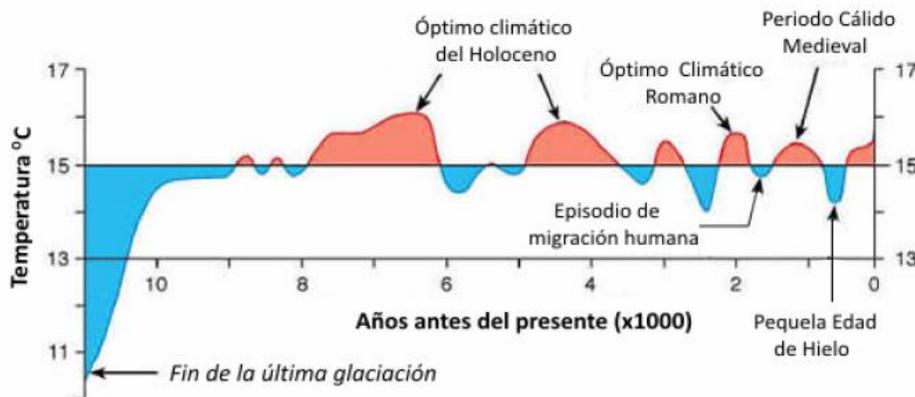


Figura 17. Temperaturas medias de superficie para el Hemisferio Norte durante el Holoceno, en ella se muestra el ACM y la PEH. Tomado y modificado de Dansgaard, 1964.

El periodo ha sido señalado entre 9,000 y 5,000 años, dependiendo de la región, en donde la temperatura promedio ascendió más de 3°C (Cronin, 2010). También, ha sido referido como el Óptimo Climático del Holoceno el cual fue más evidente alrededor de los 6,000 años, en latitudes medias del Hemisferio Norte y, entre 800 y 5000 años en regiones tropicales (Burroughs, 2001).

Aunque las temperaturas regionales durante el Máximo del Holoceno fueron del orden de 1°C más cálidas que las actuales, el calentamiento no ocurrió al mismo tiempo en todos los lugares, por lo que la temperatura promedio global pudo no haber sido significativamente diferente que la actual. A continuación se muestran los trabajos paleoclimáticos realizados en México durante el Holoceno, en donde se indica el tipo de registro natural empleado (Figura 18).

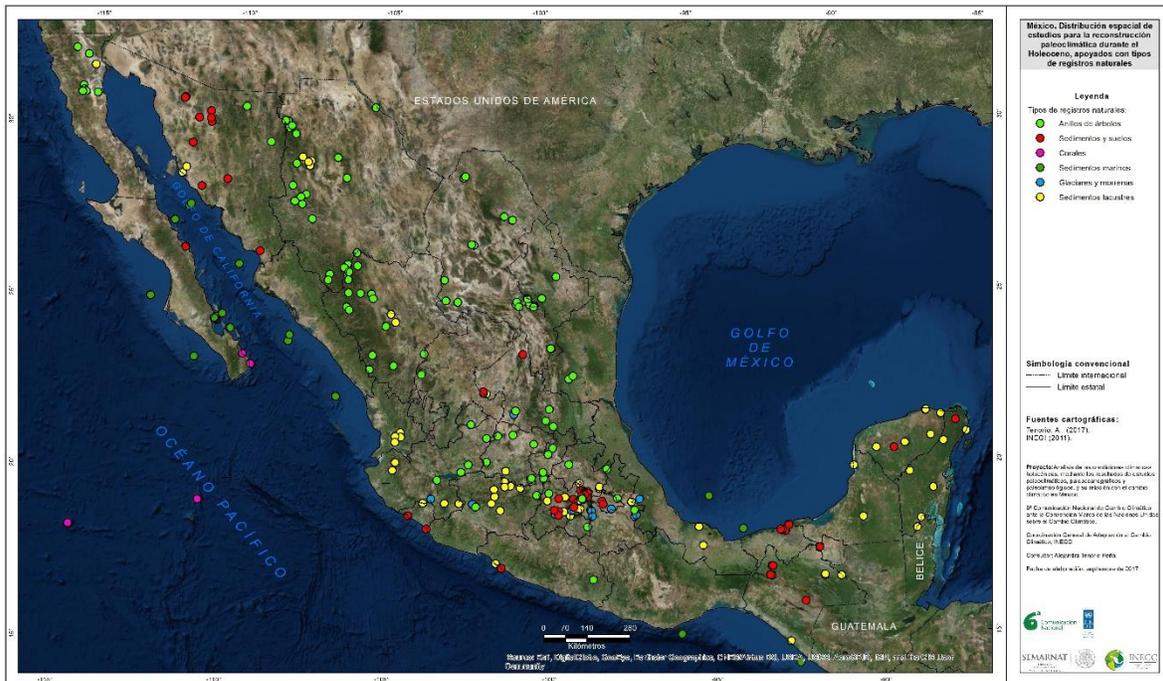


Figura 18. Mapa de los registros paleoclimáticos en México durante el Holoceno

7. La variabilidad climática de los últimos 2,000 años

Desde inicios del siglo XX, diversos autores se han enfocado en investigar la variabilidad climática de los últimos dos milenios con la finalidad de comprender mejor los mecanismos que participan en el actual calentamiento y entender las interacciones entre el océano, la atmósfera y la biosfera dentro del contexto de la variabilidad climática, para poder realizar en un futuro una comparación entre la variabilidad inherente al sistema climático y la variabilidad introducida por la actividad antropogénica (Viau *et al.*, 2002; Ledru *et al.*, 2013).

Durante este período, se han caracterizado dos principales anomalías en la temperatura: una positiva nombrada Anomalía Climática del Medioevo (ACM) y, una negativa llamada Pequeña Edad Hielo (PEH) (Mann *et al.*, 2009).

Cabe destacar que, a finales del milenio, específicamente a partir de la Revolución Industrial, se ha observado un incremento acelerado de la temperatura promedio del planeta. Desde 1980, se presentó un calentamiento que no ha tenido precedentes comparado con las temperaturas medidas de los últimos 280 años. En particular, el verano del 2003 fue el más cálido de los últimos 500 años. Esto se obtuvo a partir del análisis en datos obtenidos del registro instrumental, así como de registros naturales, centrándonos específicamente con datos de temperaturas promedio europeas (IPCC, 2013).

En los últimos milenios, los principales mecanismos de forzamiento climático que afectaron al clima en una escala global, así como regional, son la variabilidad solar, la actividad volcánica, el incremento de aerosoles y gases efecto invernadero en la atmósfera (Wanner y Bütikofer., 2008; Cronin, 2010).

7.1 La Anomalía Climática del Medioevo (ACM) en México.

Se ha documentado en ambos hemisferios. Sin embargo, la mayoría de los registros se localizan en Norte América, Escandinavia y al este de Europa. Desde principios del siglo XX, se percataron que algunas áreas de Islandia se utilizaban para el cultivo en el siglo X, simultáneamente algunos colonos nórdicos habitaban Groenlandia, gracias a la ausencia de hielos pudieron realizar viajes a regiones muy al norte durante el siglo XIV (Cronin, 2010).

Esta anomalía ha sido nombrada de diferentes maneras; en un comienzo fue llamada como la “Época Cálida Medieval” o “Pequeño Óptimo”, con la finalidad de agrupar las múltiples evidencias procedentes de Europa Occidental de temperaturas más cálidas entre ~1000 a ~1200 A.D⁶.; más

⁶ Anno Dóminota (en latín, ‘en el año del Señor’), abreviado A. D. es un indicador calendario que señala que la cifra antecedente está contada a partir del año cristiano del nacimiento de Jesucristo (Jesús de Nazaret), considerado el inicio de la era cristiana.

adelante, se amplió el intervalo, ya que se observaron diversas situaciones de temperaturas extremas, en diferentes tiempos y en diferentes regiones: ~950 a ~1200 A.D. en Rusia y Groenlandia. No obstante, con el transcurso del tiempo la base de datos de los registros aumentó y se extendió el intervalo hasta ~1300 A.D (Cronin, 2010).

La mayoría de estos registros se localizan en Europa (aunque el mayor calentamiento se ha registrado después de ~900 A.D.). Actualmente, el término de “Época Cálida Medieval” o “Pequeño Óptimo” está en desuso, ahora es nombrada la “Anomalía Climática del Medievo”. Esta anomalía positiva en la temperatura coincide con el Máximo Solar Medieval el cual se caracteriza por presentar un incremento relativo en la actividad solar (Bradley *et al.*, 2003).

Los registros de la ACM en diferentes regiones del planeta se han vuelto más abundantes en las últimas décadas. Se ha podido observar que estos registros son diversos en cuanto a su resolución, calibración e interpretación. Sin embargo, se ha logrado tener un conocimiento sobre estos cambios climáticos en una escala más grande (hemisferios) (Graham, *et al.*, 2010) y, en la cual la mayoría de los datos se obtuvieron a partir de diferentes registros como por ejemplo: históricos, dendrocronología, cambios en la vegetación, núcleos de hielos, y registros de cultivos de cereales y vides.

Con el propósito de obtener una base de datos más precisa sobre los cambios de temperatura se analizaron diversas evidencias cuantitativas las cuales contaban con un mayor control en el marco cronológico.

A partir de este análisis, se llegó a la conclusión de que la señal de la ACM es muy heterogénea y que sólo en algunas regiones del planeta y en ciertas épocas del año, las condiciones cálidas pudieron haber prevalecido. En algunas regiones de Europa y Norte América la anomalía de temperatura fue positiva de 1° a 2° C más altas que a principios del siglo XX (Ruddiman, 2000).

Las principales causas de que haya ocurrido esto aún no están muy claras; es probable que el clima no haya cambiado en la misma dirección y magnitud, y que algunas regiones pudieron estar influenciadas por procesos internos resultado de la distribución de calor en la localidad (Mann y Jones, 2004).

En particular, en México, en el Golfo de California se ha identificado esta señal climática utilizando diferentes indicadores biológicos como silicoflagelados, diatomeas y radiolarios (Barron *et al.*, 2003; Pérez-Cruz, 2006; Barron y Bukry, 2007). Durante este periodo (ACM), se ha reportado la intrusión de aguas tropicales, cambios en precipitación y en la productividad en la región sur y centro del Golfo de California (Pérez-Cruz, 2006).

El final del periodo Clásico ~ 800 a 950 años AP, coincide con la llamada sequía Maya. A partir de diversos registros lacustres se ha caracterizado un intervalo seco en la cuenca alta del Lerma (Caballero *et al.*, 2002) y en Los Tuxtlas (Goman y Byrne, 1998; Lozano-García *et al.*, 2007). En el centro-occidente, el registro polínico de hoyos de acumulación de sedimento en el bosque (*forest hollow*) de la Sierra de Manantlán muestra que el inicio de la ACM fue seco y finalizó con ambientes más húmedos inferidos por la presencia de polen de bosque de niebla (Figueroa-Rangel *et al.*, 2008, 2010).

En los sedimentos lacustres obtenidos en Juanacatlán, Jalisco, los registros geoquímicos sugieren que la ACM se caracterizó por ser un periodo húmedo (Metcalf *et al.*, 2010), mientras en Juxtlahuaca, Guerrero, la parte final de esta oscilación fue seca culminado con una megasequía (Lachniet *et al.*, 2013).

7.2 La Pequeña Edad de Hielo (PEH) en México

En algunas regiones de Europa se ha registrado una anomalía en la temperatura negativa (~1400 y ~1800 años AP) nombrada la Pequeña Edad de Hielo (PEH), con base en diversos registros naturales e instrumentales. Durante ese periodo se ha estimado que la temperatura anual fue de 1-1.5°C más fría que la reportada para el siglo XX. También, se ha observado que en dicho intervalo ocurrió un mínimo de insolación solar en verano en el Hemisferio Norte, así como un incremento en la actividad volcánica (Wanner y Bütikofer, 2008).

Este período coincide con el mínimo de manchas solares nombrado el Mínimo de Maunder entre 1647-1715 A.D. y, se ha documentado que el clima del planeta se vio influenciado por una disminución en el número de manchas solares, ocasionando una disminución en la temperatura superficial. Estos eventos generalmente coinciden con los inviernos fríos. Los mínimos de manchas solares reportados para el último milenio además del Mínimo de Maunder son el Mínimo de Wolf (1290-1350 A.D.), Mínimo de Spörer (1460-1550 A.D.) y Mínimo de Dalton (1790-1830 A.D.) (McCracken, 2007) (Figura 8).

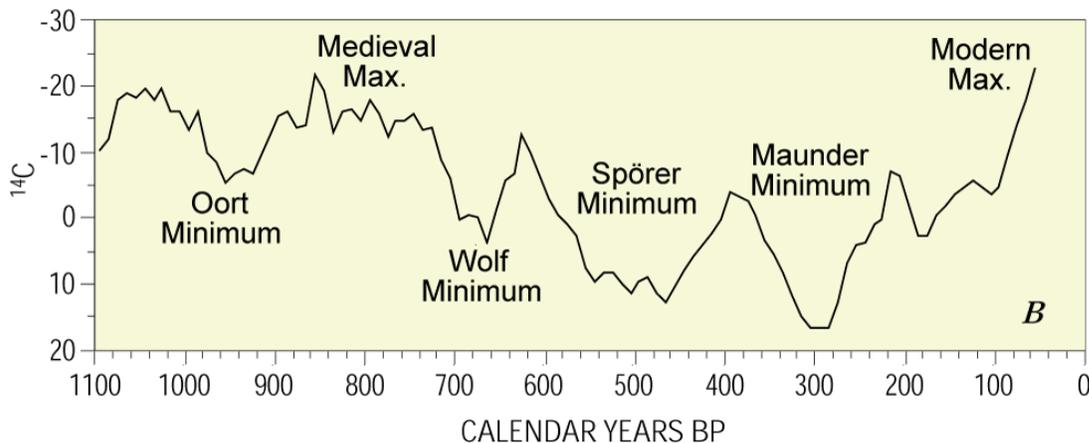


Figura 19. Mínimos de manchas solares reportados para últimos 1100 años. Tomada de <http://pubs.usgs.gov/fs/fs-0095-00/>

En México, la PEH se ha asociado con decrementos en la temperatura de 1.5 - 2°C y con avances de los glaciares de montaña en el rango de 250 m. Los registros históricos de México documentan a la PEH como una serie de eventos recurrentes entre los siglos XIV y el siglo XIX sin embargo, en nuestro país hay pocos registros buena resolución temporal el periodo completo de la PEH y que permitan tener una perspectiva clara del efecto que tuvo esta anomalía climática en el centro de México. Las condiciones climáticas secas en México durante la PEH han sido explicadas por una posición más

austral de la zona y por la prevalencia de condiciones tipo El Niño. Ambos mecanismos climáticos reducen la precipitación de verano sobre la mayor parte de México.

A partir del análisis de varios registros naturales e históricos a lo largo del país se ha concluido que es evidente que varias civilizaciones han sido afectadas por cambios climáticos. Por ejemplo se menciona que se han presentado diversas sequías entre 1760 y 1910, hacia el final de la PEH y correlacionan con reportes de baja precipitación en invierno y con temporadas de lluvias cortas; estas son las condiciones que precedieron a la Independencia de México (1810- 1821) y la Revolución Mexicana (1910-1924) (Cuna *et al.*, 2015).

Por tal razón es de vital importancia entender y analizar tanto los registros naturales como los instrumentales para tener una mejor interpretación de los cambios que están ocurriendo actualmente y poder hacer proyecciones más precisas.

Tabla 2. Los estudios paleoclimáticos más relevantes para México durante el Holoceno

Nombre del artículo	Tipo de registro	Alcance Estratigráfico	Proxies	Modelo de edad	Objetivos
1. Variabilidad hidrolimática reconstruida... (Villanueva-Díaz <i>et al.</i> , 2012)	Anillos de árboles	Los últimos 240 años (1770 a 2010 A.D.)	Bandas de crecimiento de los árboles y registro instrumental	Dendrocronología	Desarrollar una reconstrucción estacional de precipitación invierno-primavera (enero-mayo) del periodo 1770-2007 para la región centro-sur de Guanajuato; mientras que para el noroeste del estado, se generaron dos reconstrucciones de precipitación estacional, una para el periodo marzo-septiembre y la otra anual (enero-diciembre), con una extensión de 208 años (1790-2007) y 158 años (1850-2007), respectivamente.
2. Sierra San Pedro Mártir, Baja California, cool-season ... (Meko <i>et al.</i> , 2013)	Anillos de árboles	Los últimos 353 años (1658 al 2010 A.D.)	Bandas de crecimiento de los árboles y registro instrumental	Dendrocronología	Desarrollar una reconstrucción de la precipitación estacional para región norte del país y se enfatizará en la sequía que se presentó en 1950, así como el año más seco del siglo XXI.
3. Reconstrucción de precipitación invierno-primavera... (Cerano <i>et al.</i> , 2014)	Anillos de árboles	Los últimos 127 años (1884-2010 A.D.)	Bandas de crecimiento de los árboles y registro instrumental	Dendrocronología	Reconstruir los cambios en la precipitación para el Pico de Tancitaro con base en los anillos de crecimiento de <i>Abies religiosa</i> y determinar frecuencias importantes en la variabilidad climática de la región.
4. Cinco Siglos De Historia Dendrocronológica De Los Ahuehuetes... (Villanueva-Díaz <i>et al.</i> , 2014)	Anillos de árboles	Los últimos 500 años (1500-2000 A.D.)	Bandas de crecimiento de los árboles y registro instrumental	Dendrocronología	En el parque El Contador, San Salvador Atenco, Estado de México, se analizaron restos de árboles de ahuehuate (<i>Taxodium mucronatum Ten.</i>) del siglo XV con la finalidad de identificar eventos extremos en común de los parques Chapultepec, ciudad de México y Amealco, Querétaro.
5. Climatic variability and human impact during the last 2000 years (Rodríguez-Ramírez, 2015)	Sedimentos lacustres	Los últimos 2000 años (1-2000 A.D.)	Diatomeas, ostrácodos y geoquímica (elementos mayores y	Se realizó con ¹⁴ C con la técnica AMS	Se realizó una reconstrucción paleoclimática de los últimos 2,000 años, en donde se evidenció dos eventos de sequía que corresponde con los mínimos solares de Spörer y Maunder.

Nombre del artículo	Tipo de registro	Alcance Estratégico	Proxies	Modelo de edad	Objetivos
6. History of Late Holocene vegetation ... (Islebe- Sánchez, 2002)	Sedimentos lacustres	De 2500 a 1000 años A.P. (2500 A 1000 A.P.)	Polen	Se realizó con ¹⁴ C con la técnica AMS	Realizar una de la reconstrucción vegetación y clima de un ecosistema de manglares durante Holoceno y compararlo con otros estudios paleoecológicos de la zona.
7. Evidencia del impacto humano y cambio climático... (Lozano <i>et al.</i> , 2007 en Caballero y Ortega, 2011)	Sedimentos lacustres	Los últimos 2000 años. (400 a.C. – 1950 A.D.)	Polen, susceptibilidad magnética, carbono orgánico total y diatomeas	Se realizó con ¹⁴ C con la técnica AMS	Presentan y compara los conjuntos de indicadores de cambio ambiental e impacto humano como son el polen, diatomeas, partículas de carbón y propiedades magnéticas de una secuencia lacustre en la zona tropical de Los Tuxtlas, Veracruz y se discute el impacto en tiempos prehispanicos y modernos.
8. Climate Variability on the Yucatan Peninsula (Mexico)... (Curtis y Hodell, 1996 en Caballero y Ortega, 2011)	Sedimentos lacustres	Los últimos 3500 años A.P. (~3310 a ~1785 A.P.)	Isótopos de oxígeno	Se realizó con ¹⁴ C mediante AMS	Evidenciar los cambios decadales y multidecadales en la Península de Yucatán los cambios climáticos, en particular los eventos de sequía.
9. A 2000-yr-long ... (Barron <i>et al.</i> , 2003)	Sedimentos marinos	Los últimos 2,000 años (0 a 2000 A.D.)	Diatomeas, silicoflagelados y geoquímica (elementos mayores y menores, TOC y Si/Al).	Se realizó con ¹⁴ C mediante AMS en foraminíferos bentónicos en Guaymas.	Este estudio de alta resolución pretende dar información entre las relaciones de diferentes <i>proxies</i> (diatomeas, silicoflagelados y geoquímica). Al mismo tiempo dar una síntesis de la paleoceanografía de los últimos 2000 años.
10. High resolution paeoceanography of the Guaymas ... (Barron <i>et al.</i> , 2004)	Sedimentos marinos	15, 000 años (15000 a 0 A.P.)	Relación Si/Al, porcentaje de CaCO ₃ , Al, Ti y Fe, silicoflagelados y diatomeas	Se realizó con ¹⁴ C mediante AMS, correlacionó con silicoflagelados de BAM80 E-17 y con propiedades magnéticas.	Sugerir un estudio de alta resolución para el Pleistoceno tardío y para el Holoceno usando geoquímica, diatomeas y silicoflagelados, los cuales podrían revelar información sobre la paleoceanografía y paleoclimatología para la parte central del Golfo de California.

Nombre del artículo	Tipo de registro	Alcance Estratégico	Proxies	Modelo de edad	Objetivos
<p>11. Paleocceanographic History of the Guaymas Basin... (Barron <i>et al.</i>, 2005 en Caballero y Ortega, 2011).</p>	Sedimentos marinos	15,000 años (15000 a 0 A.P.)	Sílice biogénico, CaCO ₃ , diatomeas, silicoflagelados	Se realizó con ¹⁴ C mediante AMS en foraminíferos bentónicos en Guaymas.	Comparar el lado oriental con el occidental de Cuenca de Guaymas en los últimos 15, 000 años utilizando diatomeas, silicoflagelados y geoquímica.
<p>12. Solar forcing of Gulf of California ... (Barron y Bukry, 2007)</p>	Sedimentos marinos	2,000 años (0 a 2000 A.D.)	Diatomeas y silicoflagelados	Se realizó con ¹⁴ C mediante AMS en foraminíferos bentónicos en Guaymas. Mientras que en Carmen y en Pescadero se hizo ¹⁴ C mediante AMS en foraminíferos planctónicos	Documentar las condiciones del agua superficial del Golfo de California mediante el uso de diatomeas y silicoflagelados durante los últimos 2,000 años. Estos datos serán comparados para sugerir posibles mecanismos de forzamientos de clima. Observaron datos de actividad solar correlacionaron con la producción de radiocarbono y el sílice biogénico.
<p>13. Late Quaternary climate change ... (Cheshire <i>et al.</i>, 2005)</p>	Sedimentos marinos	8,000 a 40,000 años. (40, 000 A 8000 A.P.)	K, Ca, Ti, Fe, susceptibilidad magnética y densidad del sedimento (los espectros)	Correlación, conteo de láminas y con isótopos de oxígeno	Documentar la variabilidad atmosférica en la Cuenca de Guaymas desde el Último Máximo Glacial hasta el Holoceno Temprano
<p>14. Geochemical cycles in sediments deposited ... (Dean <i>et al.</i>, 2004 en Caballero y Ortega, 2011)</p>	Sedimentos marinos	180 años (1830 a 1990 A.D.)	Elementos mayores y traza (Al, Ti, P, Mo, Li) utilizando ICP-AES Sílice biogénico y carbono orgánico	²¹⁰ Pb	Su principal objetivo es conocer las diferentes fuentes de sedimentación mediante el uso de señales geoquímicas y si estas han cambiado en los últimos 200 años por la construcción de presas. Su segundo objetivo es ver cambios en la oxigenación y en la productividad. Y su tercer objetivo por ser una cuenca con una marcada estacionalidad reportar la variabilidad interanual y decadal.

Nombre del artículo	Tipo de registro	Alcance Estratégico	Proxies	Modelo de edad	Objetivos
15. The geochemical record of ... (Dean, 2006 en Caballero y Ortega, 2011)	Sedimentos marinos	17, 000 años (16800 a 2800 A.P)	Al, Cd y Mo. Carbono orgánico, sílice biogénico y CaCO ₃	Se realizó con ¹⁴ C mediante AMS en planctónicos en Guaymas.	Se llevó a cabo la reconstrucción climática de los pasados 17,000 años cal. A.P. utilizando señales de productividad y de oxigenación en las aguas de fondo.
16. Nitrogen isotopic variations ... (Pride <i>et al.</i> , 1999)	Sedimentos marinos.	16,000 años (16000 a 2000 A.P)	Ópalo biogénico e isótopos de nitrógeno	Se realizó con ¹⁴ C mediante AMS en foraminíferos planctónicos en Guaymas.	Documentar la variabilidad en la productividad mediante el uso de isótopos de nitrógeno durante el Holoceno Temprano hasta el último periodo glacial.
17. Diatoms in the Gulf ... (Sancetta, 1995)	Sedimentos marinos	Uso los datos de trampas de sedimentos durante dos años para interpretar los últimos 15,000 años.	Diatomeas (flujos estacionales de diatomeas) trabajo en Guaymas y Carmen	Se realizó con ¹⁴ C mediante AMS en foraminíferos planctónicos en Guaymas pero del núcleo JPC-56.	Este trabajo documentó las variaciones en la producción de diatomeas y su flujo en trampas de sedimento. Los datos de las trampas se utilizaron para definir los cambios en la producción según la estación y compararlos con el registro sedimentario.

Con el propósito de fortalecer y enriquecer esta consultoría se llevó a cabo el Encuentro de Paleoclimatología en México (avances, retos y perspectivas) en donde los principales investigadores del país expusieron los trabajos más relevantes que ha realizado en los últimos años en esta área. Con base en la información obtenida en dicho evento, se pudieron identificar con mayor facilidad los temas prioritarios en los que las universidades nacionales se encuentran investigando en este momento. Dicha información fue incluida en este trabajo. Se identificó que la mayoría de los trabajos se ha realizado con sedimentos lacustres en centro del país; no obstante, es relevante mencionar que existe una fuerte colaboración entre universidades extranjeras para la elaboración de trabajos paleoclimáticos con anillos de árboles. A continuación se presenta la minuta de dicho encuentro, así como los resultados obtenidos de la encuesta que se realizó durante el encuentro.

8. Encuentro de paleoclimatología en México (avances, retos y perspectivas) en el marco de la Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC).

8.1 Objetivo general:

Analizar los avances y el desarrollo actual de la Paleoclimatología en México durante el Pleistoceno-Holoceno conocer los retos y las perspectivas.

8.2 Objetivos particulares:

1. Conocer, difundir e intercambiar técnicas, tipos de muestreos y hallazgos en los trabajos realizados en los últimos diez años a nivel nacional en Paleoclimatología, en particular de los eventos climáticos con cambios abruptos durante el Pleistoceno y Holoceno.
2. Identificar las instituciones y universidades que participen en el desarrollo e investigación de la Paleoclimatología en México, así como promover la vinculación entre ellas.
3. Identificar las fuentes de financiamiento de los proyectos de investigación sobre Paleoclimatología en México, a través de aplicación de la encuesta.
4. Fortalecer las capacidades de recursos humanos (estudiantes de licenciatura, maestría y doctorado), a partir de los insumos que brinden los ponentes y de su participación en el encuentro.

8.3 Minuta del 13 de marzo del 2017

El encuentro se realizó en el hotel Fiesta Inn Gran Sur, y asistieron al encuentro asistieron un total de 70 participantes entre investigadoras e investigadores, estudiantes, personal del INECC y PNUD). Poner cuántos de cada sector de investigadores, estudiantes, personal del INECC, etc.

La dinámica que se utilizó fue la que generalmente se emplea en congresos nacionales e internacionales de esta disciplina⁷ y, consistió en agrupar exposiciones por subtemas, (métodos de datación radiométrica, Paleooceanografía, Paleolimnología, Paleomagnetismo, etc.) para presentar un desarrollo congruente y una visión general sobre el estado del arte de esta ciencia en México. El tiempo empleado para realizar las exposiciones fue de 15 minutos por bloque temático. Al concluir éste se destinó un espacio para preguntas de 5 minutos.

El evento comenzó a las 9:00 am con el registro de los participantes; mismo que terminó a las 9:40 am. Durante el registro, a todos y todas los participantes se les entregó en un folder que contenía la agenda del encuentro, el cuestionario de evaluación del taller y a los investigadores e investigadoras se les entregó el cuestionario con enfoque de género. Posteriormente, la Dra. María Amparo Martínez Arroyo, Directora General, INECC; la Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez, Coordinadora General de Adaptación al Cambio Climático, INECC, y la Dra. María Del Socorro Lozano García, Instituto de Geología, UNAM inauguraron el evento



Figura 20. Inauguración del Encuentro de Paleoclimatología en México durante el Pleistoceno-Holoceno conocer los retos y las perspectivas.

A las 10:00 comenzó la conferencia magistral a cargo de la Dra. Lozano, en donde se dio una explicación sobre importancia de la Paleoclimatología en México (Figura 21). También, explicó temas vinculados con los tipos *proxies* y archivos; los paradigmas de los cincuentas, sesentas, setentas, ochentas y los desafíos actuales que enfrentan esta disciplina, así como los trabajos realizados en México sobre el tema.

⁷ Como por ejemplo: en la American Geophysical Union (AGU), European Geophysical Union (EGU) y la Unión Geofísica Mexicana (UGM).



Figura 21. Conferencia magistral de la Dra. María del Socorro Lozano García del Instituto de Geología de la UNAM.

Durante esta conferencia magistral, se recalcó la importancia de contar con más datos y de buena calidad; se sugirió que es fundamental contar con una base de datos nacional, ya que hoy en día se carece de base de datos, lo cual a largo plazo puede ser un problema muy serio, ya que la información nacional que se está creando no cuenta con un lugar específico para su resguardo. Sobre todo, porque diversas revistas científicas solicitan el resguardo de los datos en alguna base. Cabe resaltar que, para lograr conformar esta base, es necesario establecer algunas políticas de seguridad y ética en la utilización de la información y, se requiere que las investigaciones pasen de ser descriptivas a más cuantitativas.

Otra de las propuestas fundamentales que realizó la Dra. Lozano para fortalecer los trabajos que realiza esta disciplina, fue la de mantener y crear espacios de discusión más frecuentes para lograr y fortalecer una mayor colaboración entre las y los investigadores que realizan estudios Paleoceanográficos y Paleolinológicos. También, señaló que se requiere priorizar periodos, regiones geográficas, así como los efectos de vulcanismo, el impacto humano y las respuestas orbitales.

Durante esta ponencia, se recalcó que es muy importante hacer modelaciones retrospectivas y se instó a lograr una mayor colaboración multidisciplinaria.

Al concluir esta conferencia magistral, se continuó con la sección de “Métodos de datación radiométrica” a cargo de las Dra. Laura Eugenia Beramendi Orosco, del Instituto de Geología, UNAM (Figura 20) y siguió la participación de la Dra. Ana Carolina Ruíz Fernández Instituto de Ciencias de Mar y Limnología, UNAM (Figura 22). La primera con la ponencia de “Construcción de cronologías para el Cuaternario Tardío: Principios, ventajas y limitaciones del Radiocarbono” y la segunda con “Geocronología reciente en núcleos de sedimentos por el método ^{210}Pb ”.

Ambas ponencias resaltaron la importancia de tener y contar en los estudios de paleoclima con un marco cronológico sólido, ya que sin ello la calidad de la información se ve afectada.

También, se explicó a detalle los métodos de datación de ^{14}C , ^{210}Pb y ^{137}Cs , indicando las limitaciones y las ventajas del uso de cada uno de estos métodos.

En la sesión de preguntas y respuestas, se destacó la importancia de fortalecer las colaboraciones entre las y los investigadores y se señaló que, en el caso particular de ^{14}C , es un poco complicado su uso, debido a la carga de trabajo y, el tipo de equipo que se cuenta en el Instituto de Geología. No obstante, se mencionó la cooperación de dicho laboratorio, para apoyar en asesorías y, en la preparación de muestras para reducir costos que representan estos análisis.

Asimismo, se mencionó que el Instituto de Física de la UNAM, cuenta con equipo para realizar dataciones de ^{14}C .

Por otro lado, el Instituto de Ciencias de Mar y Limnología encargado de hacer dataciones cronológicas recientes, comentó que, ha desarrollado una amplia colaboración entre diversos institutos y ofreció apoyo para nuevos institutos que requieran este servicio (Figura 23).

Ambos laboratorios, solicitan una cuota de recuperación para continuar con el mantenimiento de sus equipos y manifestaron la importancia de incrementar el personal para el procesamiento de las muestras.



Figura 22. Ponencia de la Dra. Laura Eugenia Beramendi Orosco del Instituto de Geología, UNAM.

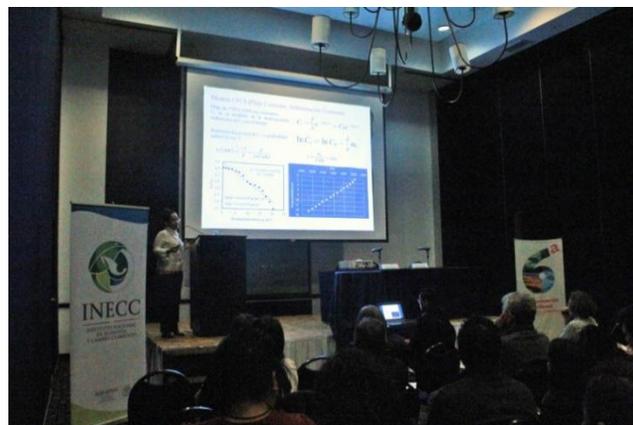


Figura 23. Ponencia de la Dra. Ana Carolina Ruíz Fernández Instituto de Ciencias de Mar y Limnología, UNAM.

Posteriormente, se continuó la sesión de “Reconstrucciones Paleoceanográficas en México”.

La primera ponencia con el título de “Paleoceanografía del Pacífico Tropical oriental durante los últimos 40 mil años a través de registros de ópalo biogénico, nitrógeno y carbono orgánico” estuvo a cargo de la Dra. Elsa Arellano Torres de Facultad de Ciencias, UNAM (Figura 24)

Esta presentación brindó un panorama amplio sobre los trabajos realizados en el Pacífico Oriental, con registro de escala milenaria en donde se indican cambios en los patrones de productividad y nitrificación que coinciden con diversos registros a escala global.



Figura 24. Ponencia de la Dra. Elsa Arellano Torres de la Facultad de Ciencias, UNAM.

La segunda ponencia con el título de “Holoceno tardío en la región sur del Golfo de California: estrategias para su estudio”, estuvo a cargo de la Dra. Aída Martínez López del Instituto Politécnico Nacional del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Sede La Paz, Baja California Sur (Figura 25).

Esta ponencia mostró los trabajos realizados en el Golfo de California. En particular, respecto a la paleoproduktividad como los *proxies* biológicos, los silicoflagelados y, la técnica que están utilizando para validar estos *proxies*. Señaló que, están empleando trampas de sedimento en donde se puede observar cuántos organismos se depositan a lo largo de la columna de agua a diferentes profundidades.



Figura 25. Ponencia de la Dra. Aída Martínez López del Instituto Politécnico Nacional del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Sede La Paz.

Posteriormente, la Dra. Karla Gabriela Mejía Piña, del Instituto de Investigaciones Oceanológicas, de la Universidad Autónoma de Baja California presentó la ponencia de “Reconstrucción de las condiciones paleoredox en la región sur del Golfo de California”. Durante su ponencia, se mostraron nuevas técnicas para establecer las condiciones paleoredox durante el Holoceno (~11 ka AP), de los sedimentos acumulados en dos cuencas modernas localizadas en la región sur del Golfo de California (Figura 26).

En esta investigación, se propone la utilización de diversos *proxies* geoquímicos para determinar los cambios en el contenido de oxígeno en el fondo de las cuencas Pescadero y Carmen y, para poder discernir si estas coinciden con los cambios en la productividad primaria o si están relacionados con la advección lenta de masas de agua profundas.



Figura 26. Ponencia de la Dra. Karla Gabriela Mejía Piña del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California.

La siguiente ponencia fue sobre “Cocolitóforos como indicadores de un clima cambiante” y, estuvo a cargo de la Dra. María del Carmen Álvarez García, de la Universidad de Colima, quien explicó la importancia de estos *proxies* biológicos con las abundancias de estos organismos permiten identificar cambios en la paleoproduktividad y en las masas de aguas (Figura 27). Los trabajos realizados por esta investigadora se centran en la región sur del Golfo de California.



Figura 27. Ponencia de la Dra. María del Carmen Álvarez García de la Universidad de Colima.

La última ponencia de esta sección estuvo a cargo del Dr. Juan Pablo Carricart-Ganivet del Instituto de Ciencias de Mar y Limnología, UNAM. Sede Puerto Morelos, quién presentó “La Esclerocronología, registros ambientales en corales y cambio climático”. Esta ponencia resaltó la importancia de conocer el sexo de los corales al momento de realizar reconstrucciones paleoclimáticas debido a que su sexo determina las condiciones de crecimiento, así como, las características ambientales en las cuales se desarrollan.

El siguiente bloque de ponencias fue sobre “Reconstrucción de ambientes continentales y Paleoclimatología”.

La primera ponencia estuvo a cargo de la Dra. María Socorro Lozano García Instituto de Geología, UNAM, quién presentó “Análisis de los cambios en las comunidades vegetales del centro de México durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno”. La Dra. Lozano enfatizó en los cambios de la vegetación en el centro del país y, resaltó la importancia de estudiar el centro de México, ya que ofrece gran variedad de hábitats para las numerosas especies de bosques montaños.

También, enfatizó que en México, el descenso de las franjas de vegetación de hasta 1000 m, causaron desplazamientos altitudinales, fragmentando y/o ampliando los rangos de distribución contribuyendo así a la diversificación de géneros como *Pinus* y *Quercus* en México.

Por su parte, la Dra. Margarita Caballero Miranda del Instituto de Geofísica, UNAM, abordó el tema de los "Registros lacustres del centro de México como indicadores paleoclimáticos".

La Dra. Caballero comentó que a partir de información obtenida con diatomeas se identificaron cambios en la biodiversidad, las cuales esta relacionadas con desplazamiento de poblaciones humanas.

El Dr. Priyadarsi Debajyoti Roy, del Instituto de Geología, UNAM presentó una ponencia sobre “Paleoclimatología del México subtropical: estado del arte”. A lo largo de esta presentación, se mostró cómo los estudios en norte del país se han incrementado en los últimos años y, destacó la importancia de conocer la respuesta de vegetación a la variabilidad climática abrupta (escala milenaria) mediante el empleo de biomarcadores por ejemplo: Isótopo de carbono en materia orgánica, para tener reconstrucciones de temperatura y precipitación cuantitativa, contar con un control cronológico robusto y utilizar *proxies* de escala centenaria-decadal.

La Dra. Nuria Torrescano Valle, El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, abordó el tema de “Recostrucciones paleoambientales de la Península de Yucatán” y, presentó las reconstrucciones más relevantes realizadas para la Península de Yucatán. Al igual, que el Dr. Roy, la Dra. Torrescano resaltó la importancia de utilizar *proxies* de alta resolución y, enfatizó en la relevancia de hacer modelos retrospectivos confiables e incrementar las bases de datos a nivel nacional (Figura 28).

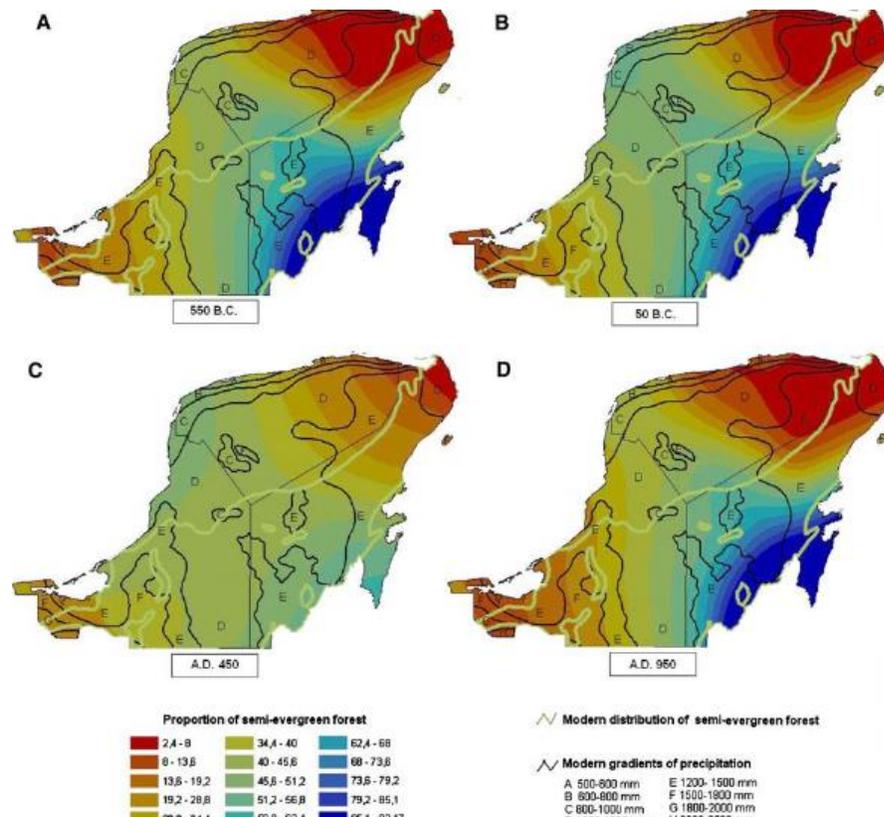


Figura 28. Modelos retrospectivos de la vegetación para la Península de Yucatán para los últimos 1000 años. Cortesía de la Dra. Torrescano durante el Encuentro de Paleoclimatología,

La Dra. Blanca Figueroa Rangel, de la Universidad de Guadalajara, presentó la ponencia: “15 siglos de reconstrucción ecológica en bosques subtropicales del centro-occidente de México”. Una de las conclusiones más relevantes que transmitió sobre su investigación fue que los bosques subtropicales del centro-occidente de México, por su heterogeneidad ambiental (cambios en altitud y catenas en distancias cortas) poseen micro-hábitats con una mirada de factores climáticos y fisiográficos cuya interacción ha permitido su prevalencia a lo largo de los últimos 1500 años.

El Dr. Lorenzo Vázquez Selem, del Instituto de Geografía, UNAM, comentó los avances de su investigación sobre “Ambientes de montaña en el centro de México durante el Holoceno”. Durante esta ponencia, se señaló que el registro glacial de México indica fuerte conexión con las fluctuaciones de temperatura del Hemisferio Norte.

La séptima presentación de este bloque fue sobre “Sequías en México: evidencias dendrocronológicas” y, estuvo a cargo del Dr. José Villanueva Díaz del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Sede Gómez Palacio, Durango, quien explicó claramente los principios de dendrocronología e indicó cuáles especies de árboles son

las más adecuadas para hacer reconstrucciones. También, resaltó la importancia de ampliar red dendrocronológica en México y comentó que las sequías son un fenómeno común en el norte y centro de México e históricamente se ha repetido en frecuencias de 50 a 60 años.

Por su parte, la Dra. Beatriz Ortega Guerrero, del Instituto de Geofísica, UNAM abordó en su ponencia nombrada "El Magnetismo de rocas como indicador de cambio climático: el registro lacustre de Chalco, México". En su ponencia explicó qué es el magnetismo, cuáles son las fuentes de magnetismo y se explicó la aplicación de estos temas en reconstrucciones paleoclimáticas.

La última presentación fue sobre "Reconstrucción histórica de entrada a tierra de huracanes en el Pacífico Oriental" y, estuvo a cargo de la Dra. Graciela Binimelis de Raga, del Centro Ciencias de la Atmósfera, UNAM. La Dra. Binimelis mostró la importancia de conocer el registro histórico para poder hacer calibraciones con los registros naturales. En particular, explicó un estudio sobre paleohuranes en donde a partir de investigar la información que brinda los artículos de periódicos, boletines oficiales, diarios, etc. pudo dar seguimiento, sistematizar datos y realizar una reconstrucción histórica muy importante sobre la entrada de huracanes en el Pacífico Oriental.

Las conclusiones del encuentro estuvieron a cargo de la Dra. Conde y Dra. Lozano. Esta última enfatizó en la importancia de hacer este tipo de reuniones de intercambio de intercambio de información y de actualización académica de una manera más periódica, ya que son un estímulo muy importante para compartir los avances de cada disciplina y agradeció al INECC el haber generado este espacio tan productivo. Además, insistió en la importancia de contar con base de datos paleoclimáticos para poder aportar información a nivel mundial y, resaltó la importancia de solicitar nuevos financiamientos para que en México esta disciplina pueda avanzar y brindar soluciones a los retos que afronta el país en materia de cambio climático (Figura 29).



Figura 29 Clausura del Encuentro de Paleoclimatología en México (avances, retos y perspectivas) en el marco de la Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC).

8.4 Evaluación del Encuentro

Durante el encuentro se entregó a los participantes una hoja en la cual se solicitó una evaluación de la reunión, se aplicó para todos los participantes del evento.

El objetivo de esta evaluación fue conocer su opinión sobre: cómo les pareció el encuentro; si las presentaciones fueron adecuadas (contenido y tiempo); si la sede fue la adecuada⁸.

En general, los participantes indicaron que el contenido de las presentaciones fueron muy complementas y, que los temas tratados fueron muy interesantes para poder continuar estrechando lazos entre diferentes instituciones.

No obstante, algunos sugirieron que las presentaciones fueran de más de 15 minutos, debido a que sentían que las ponencias tenían mucha información y que se necesitaba explicar más en detalle los hallazgos presentados.

La mayoría de los asistentes consideró que la agenda fue muy larga y sugirieron que si se realizaban futuros encuentros estos deberían ser dos días para poder tener más espacios de discusión.

En cuanto la sede, la mayoría de los asistentes consideraron que fue muy buena elección, que el Hotel fue bastante cómodo y que los alimentos fueron de excelente calidad.

Adicionalmente, sugirieron realizar con mayor frecuencia este tipo de eventos, ya que fortalece y da una visión más completa sobre el conocimiento del cambio climático.

⁸ Las evaluaciones se anexan a este producto en los archivos correspondientes del producto 2.

9. Resultado de la encuesta de la disciplina de paleoclimatología en México con enfoque de género para investigadores

A principios de marzo el INECC coordinó el Encuentro de Paleoclimatología en México (avances, retos y perspectivas En el marco del Encuentro de Paleoclima organizado por el INECC se solicitó a los y las investigadoras participantes que contestaran una encuesta con enfoque de género para obtener información sobre el perfil y conocer las problemáticas de género que viven las y los investigadores que desarrollan estudios de Paleoclimatología en el país. Así como, conocer cuáles son los cambios que perciben las y los investigadores que trabajan este tema con relación a la presencia de mujeres en esta ciencia.

La encuesta solo se aplicó a investigadoras e investigadores a las y los investigadores que no pudieron responder a esta encuesta se les envió este cuestionario por correo electrónico con la finalidad de obtener el mayor número de encuestas.

Cabe resaltar que, en el país sólo contamos con 45 investigadores a nivel nacional que trabaja el tema. En total 26 personas contestaron la encuesta de los cuales 15 fueron mujeres y 11 hombres.

Sin embargo, aún no hemos recibido el total de las encuestas, en caso de recibir más respuestas estas se anexarán al informe final de esta consultoría⁹.

Los resultados de esta encuesta se describen a continuación.

Proporción de mujeres y hombres que trabajan esta disciplina a nivel nacional.

A partir de una búsqueda, se realizó un directorio.

La información obtenida indica que el **47%** son mujeres y **53%** son hombres. Estos datos muestran que en esta disciplina las mujeres han tenido un gran avance y presencia (Gráfico1).

⁹ La base de datos se encuentra en archivo separado en formato Excel, el cual se anexa en los archivos entregables de este producto.



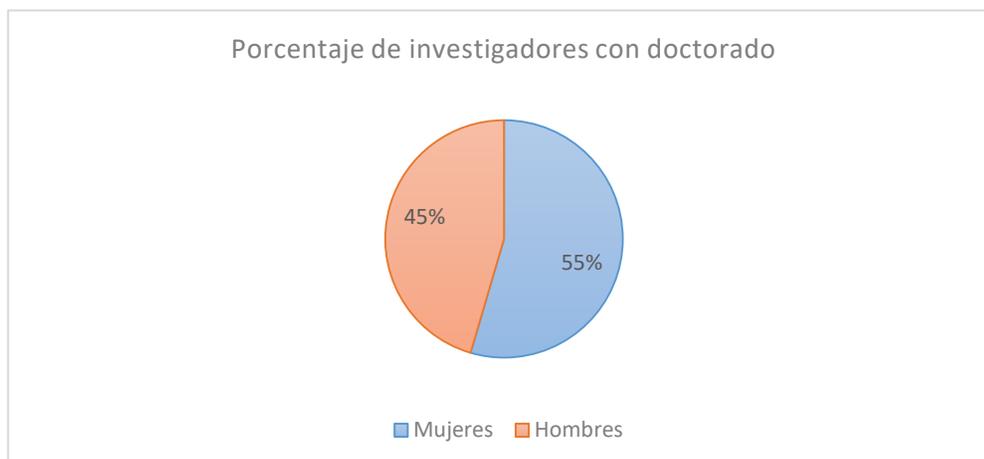
Gráfica 1. Porcentaje de mujeres y hombres que trabajan el tema de Paleoclimatología en México

Una característica que presenta esta disciplina es que prácticamente no se han incorporado talentos jóvenes (30/35 años). Esto sumado a que la edad promedio de las y los investigadores que es de 49 años, nos lleva a pensar que esta es una disciplina de mayores, que requiere que se promocióne más a los jóvenes quienes pueden tener más expectativas de permanecer y hacer que la disciplina crezca y se nutra de nuevos conocimientos.

- Grado académico de las y los investigadores

Doctorado:

Los datos indican que el porcentaje de hombres que logran obtener un doctorado son mayores que las mujeres que realizan estos estudios. Las mujeres representan **45.45%** y los hombres **54.55 %** (Gráfico 2).



Gráfica 2. Porcentaje de investigadores con doctorado en esta disciplina.

- Estudios de Posdoctorado

Esta situación se invierte ya que son el **62%** de las investigadoras las que han obtenido este grado y **38%** de los investigadores han cursado este grado académico. Estos datos muestran la tendencia nacional de que hoy son las mujeres las que más incursionan en estudios de grado y concluyen estos estudios (Gráfico 3).



Gráfica 3. Porcentaje de investigadores con postdoctorado en esta disciplina.

- Lugar de estudio

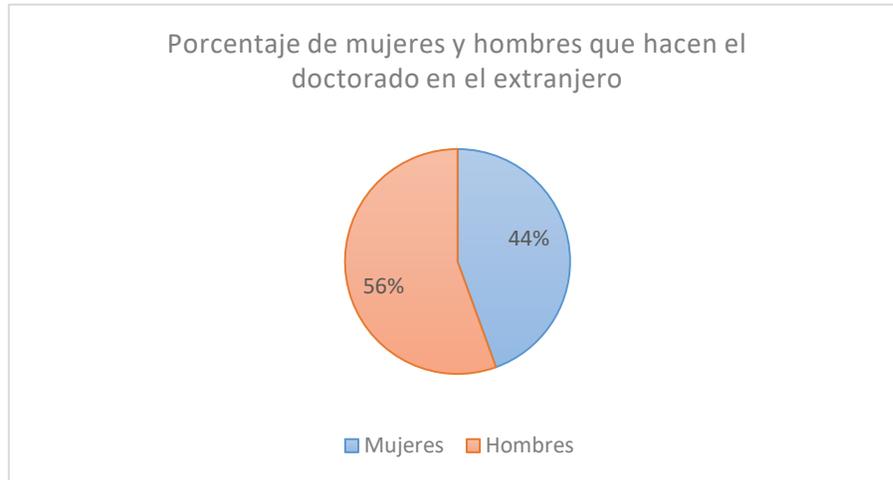
La mayoría de los investigadores obtienen su grado académico en el extranjero (**69.23%**), y únicamente el **30.76%** que lo obtienen en el país (Gráfico 4).



Gráfica 4. Porcentaje de investigadores que estudiaron algún posgrado en el extranjero.

- Estudios de doctorado en el extranjero

44.4 % son mujeres y **155% hombres** (Gráfico 5).



Gráfica 5. Porcentaje de hombres y mujeres que obtienen su doctorado en el extranjero.

- Postdoctorado

Hay más mujeres obtienen el postdoctorado en el extranjero (**71.42%**); mientras que los hombres representan el **28.57%** (Gráfico 6).



Gráfica 6. Porcentaje de hombres y mujeres que obtienen su doctorado en el extranjero.

- Fuentes de financiamiento

El 80.76% de los investigadores trabaja con financiamiento nacional. Solo el 19.23% no cuenta con este tipo de apoyo. La mayoría de las personas que no acceden a estos financiamientos

es debido a que son técnicos y esta tarea está destinada y limitada únicamente a los investigadores titulares. No se muestran datos significativos en cuanto a diferenciación por género, debido a que factor para solicitar un financiamiento es nivel jerárquico en que se encuentre el sujeto.

La gran mayoría de estos recursos proviene del CONACyT o de la universidad en la cual trabajan. El proyecto reportado que más recursos recibió fue de 21 millones de pesos. El 42.3% de las y los investigadores ha recibido financiamiento y, estos recursos se obtuvieron cuando llevaban a cabo los estudios de posgrado.

El **80.76%** han accedido a financiamiento nacional (México) para realizar proyectos y únicamente **19.23%** no recibido este tipo de apoyo (Gráfico 7). Cabe mencionar que, la mayoría de los financiamientos provienen del CONACyT y de recursos propios de sus universidades. Solamente, se reportó un caso, de fondos que provenían de otra dependencia gubernamental (PEMEX). Este proyecto fue el que recibió más recursos (21 millones de pesos) destinados para investigación en esta disciplina.



Gráfica 7. Porcentaje de obtención de financiamiento nacional.

- Financiamiento internacional

La gran mayoría de los investigadores (42.3%), no han recibido fondos internacionales **para financiar sus investigaciones** (Gráfico 8). Por otra, parte los montos recibidos son bajos en comparación con los recursos que obtienen a nivel nacional.

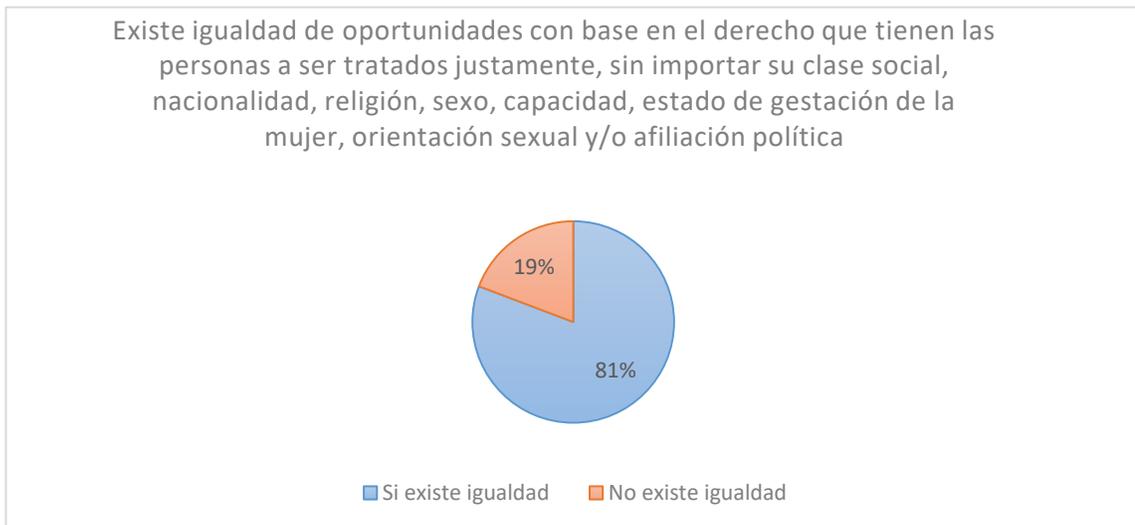
Estos financiamientos los obtuvieron sobre todo para realizar estudios de posgrado. Por lo que, se sugiere identificar posibles proyectos de cooperación internacional en donde se puedan insertar programas de investigación para reforzar e impulsar el desarrollo de esta disciplina.



Gráfica 8. Porcentaje de obtención de financiamiento nacional.

- Igualdad de oportunidades

El **80.76 %** de los encuestados piensa que existe igualdad de oportunidades con base en el derecho que tienen las personas a ser tratados justamente, sin importar su clase social, nacionalidad, religión, sexo, capacidad, estado de gestación de la mujer, orientación sexual y/o afiliación política (Gráfico 9).

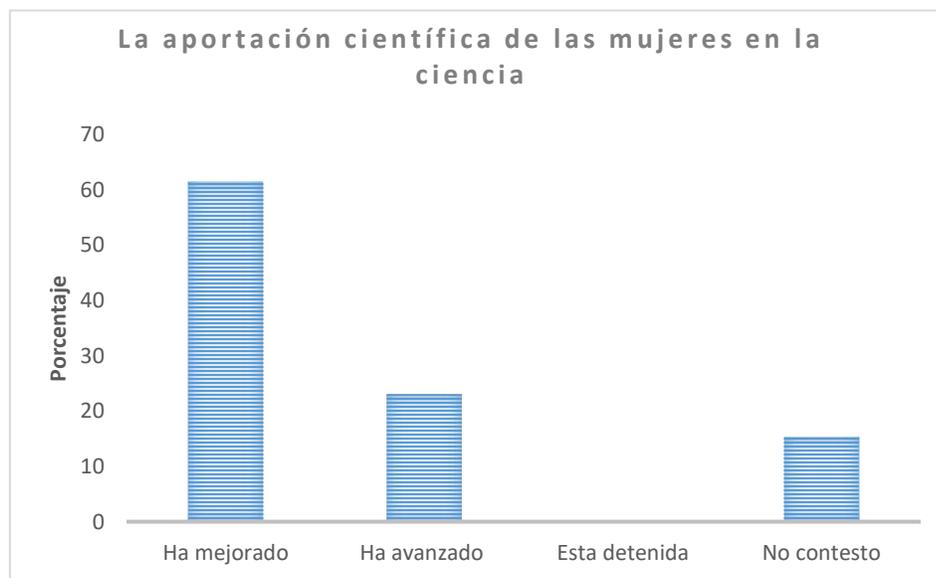


Gráfica 9. Porcentaje de sobre la estimación de igualdad de oportunidades.

- Aportaciones científicas de las mujeres en la ciencia.

El **61.53%** piensa que ha mejorado la presencia y las aportaciones de las mujeres en el campo científico., Esta respuesta señala que existe un reconocimiento importante a las aportaciones que las mujeres hacen cotidianamente a la ciencia y que éstos siguen generándose y son sustanciales.

Mientras que, el **23%** piensa que solo han avanzado. Ningún investigador considera que las aportaciones de las mujeres están detenidas y **15.38%** no contestó esta pregunta. (Gráfico 10).



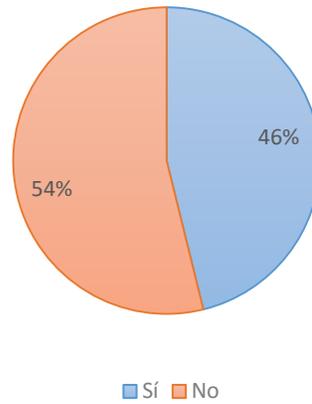
Gráfica 10. Porcentajes de la aportación científica de las mujeres en la ciencia.

- Discriminación de género.

El **46%** de las y los encuestados considera que las científicas sufren algún tipo de discriminación por género (Gráfico 11). Las y los que contestaron que si se viven situaciones de discriminación señalaron que estas discriminaciones hacia las mujeres se observan en la toma de decisiones y en la imposibilidad de ocupar puestos de alta dirección (Gráfico 12). Otros temas reportados sobre discriminación fueron en los ascensos laborales y en la selección de publicaciones.

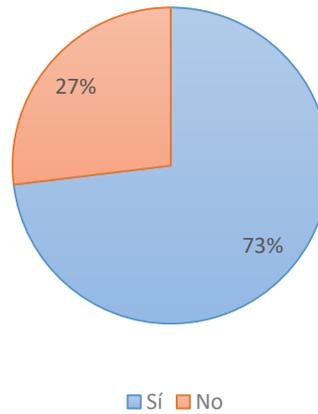
Estos temas discriminación coinciden con los reportados por investigadoras del SNI.

Consideran que las científicas sufren algún tipo de discriminación por género



Gráfica 11. Porcentajes de situación de discriminación.

Consideran que son tomada/o en cuenta en las decisiones que se toman, en su universidad/centro de investigación



Gráfica 12. Porcentajes de la aportación científica de las mujeres en la ciencia.

10. Conclusiones

Los estudios paleoclimáticos durante el Holoceno en México se han incrementado e impulsado en las últimas dos décadas, lo que se corrobora con el número de artículos publicados para este periodo. Con esta consultoría se georreferenciaron más de 200 investigaciones sobre el tema.

En particular, se identificó que una de las regiones más estudiadas es el norte del país, en esta zona predominan los estudios paleoclimáticos realizados con registros naturales con anillos de árboles. Los estudios paleoclimáticos con registros con anillos de árboles en México son los estudios que generalmente presentan correlaciones con la información obtenida de los registros instrumentales (estaciones meteorológicas), lo cual los convierte en registros de alta resolución, constantemente este tipo de registros son calibrados y validados. La mayoría de estos trabajos se localizan en el norte del país: en los últimos años se han desarrollado más trabajos en centro del país; no obstante, es fundamental comenzar a realizar reconstrucciones paleoclimáticas en bosques y selvas tropicales.

En el centro del país y en la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) la mayoría de los trabajos se han realizado con sedimentos lacustres y con suelos. En el sureste mexicano la mayoría de los trabajos se han hecho con sedimentos lacustres, pero estos se han desarrollado en su mayoría durante la última década. Con los registros naturales de corales existe una gran necesidad de impulsar y fortalecer su investigación, a pesar de México cuenta con un gran extensión de arrecifes coralinos en ambas costas, el desarrollo con estos registros no ha sido tan extendido como con otros tipos de registros (sedimentos marinos, lacustres y anillos de árboles), lo cual es desafortunado por el gran potencial que tienen este tipo de registros para indicar cambios en la temperatura superficial del océano. En México, los trabajos que se han realizado se encuentran en el Pacífico Central, existen cronologías realizadas con estos organismos en el Caribe Mexicano pero estos estudios no estrictamente reconstrucciones paleoclimáticas.

Por otro lado, las reconstrucciones paleoclimáticas con secuencias marinas se han realizado en su mayoría en el Golfo de California y Golfo de Tehuantepec; este último ha tenido un importante impulso por conocer su dinámica en los últimos años. Los estudios el Golfo de México son escasos debido a que principal de línea de investigación en esta zona es la exploración y explotación de hidrocarburos. Es importante mencionar que estas investigaciones comenzaron a desarrollarse intensamente a principios de la década de los 80's con adquisición de los buques oceanográficos de la UNAM.

Esta información fue obtenida a partir del análisis de la información bibliográfica que se realizó durante esta consultoría, con base en esta revisión se pudo elaborar una base de datos para México de los trabajos paleoclimáticos realizados durante el Holoceno, la base de datos contiene información sobre el tipo de registro empleado, tipo de *proxy*, alcance geológico, nombre de la investigación, año de la publicación y autor. En esta consultoría se integró por primera vez esta información, adicionalmente se elaboraron mapas individuales (por tipo de

registro) en donde se muestran en donde se han sido las zonas prioritarias de investigación en el país.

Cabe mencionar que la mayoría de los trabajos paleoclimáticos en México se han realizado con *proxies* biológicos. Actualmente se realizan con mayor frecuencia estudios multi-*proxy*, debido a que se ha incrementado la colaboración interinstitucional y el crecimiento de esta disciplina en diversas universidades a lo largo de país. Pero estos trabajos *multi-proxy* en donde converjan al mismo tiempo los tres tipos de *proxies* (biológicos, geoquímicos y propiedades magnética) aún son escasos porque se utilizan en su mayoría sólo dos tipos y un solo método de fechamiento radiométrico.

En México sólo se cuenta con tres laboratorios para realizar radiocronologías, existen dos para ^{14}C y uno para ^{210}Pb . Esta situación limita las investigaciones paleoclimáticas debido a que la mayoría de los investigadores recurren a laboratorios extranjeros, lo cual encarece este tipo de estudios. En esta consultoría se recalcó la importancia de establecer una cronología robusta desde inicio de las investigaciones y de promover la creación de más laboratorios nacionales enfocados en realizar este tipo de estudios.

La integración de la información paleoclimática de este informe permite identificar que dada la diversidad de ecosistemas y zonas climáticas en el país y los registros climáticos disponibles no son suficientes para caracterizar los cambios climáticos de manera general y precisa. Existen regiones claves en donde faltan realizar estudios con diferentes tipos de registros para poder regionalizar los cambios climáticos.

Cabe resaltar, que los estudios paleoclimáticos para los últimos 2,000 años en México con diferentes tipos de registros son escasos de vital importancia debido a que brindan información sobre regiones subtropicales, la mayoría de los trabajos que cuentan con este alcance y buena resolución se han realizado con anillos de árboles en donde se han documentado cambios en los patrones de precipitación y con sedimentos marinos en donde se observan cambios en la productividad primaria y en la precipitación.

Dentro del contexto de cambio climático, los últimos 2000 años son de vital importancia, debido a que se han caracterizado dos principales anomalías en la temperatura: una positiva nombrada Anomalía Climática del Medievo (ACM) y, una negativa llamada Pequeña Edad Hielo (PEH) (Mann *et al.*, 2009). Estas anomalías aportan información importante sobre cambios abruptos ocurridos en periodos cortos. En México estas dos anomalías han sido identificadas y brindan información relevante sobre estos cambios en regiones tropicales y subtropicales. En este informe se presentan los trabajos paleoclimáticos realizados en México durante estos dos episodios.

En particular, durante la ACM en el Golfo de California se ha identificado esta señal climática utilizando diferentes indicadores biológicos como por ejemplo: silicoflagelados, diatomeas y radiolarios (Barron *et al.*, 2003; Pérez-Cruz, 2006; Barron y Bukry, 2007) y se ha reportado la intrusión de aguas tropicales, cambios en precipitación y en la productividad en la región sur y centro del Golfo de California (Pérez-Cruz, 2006).

El final del periodo Clásico ~ 800 a 950 años A.P., coincide con la llamada sequía Maya. A partir de diversos registros lacustres se ha caracterizado un intervalo seco en la cuenca alta del Lerma (Caballero *et al.*, 2002) y en Los Tuxtlas (Goman y Byrne, 1998; Lozano-García *et al.*, 2007). En el centro-occidente del país, el registro polínico de hoyos de acumulación de sedimento en el bosque (*forest hollow*) de la Sierra de Manantlán muestra que el inicio de la ACM fue seco y finalizó con ambientes más húmedos inferidos por la presencia de polen de bosque de niebla (Figueroa-Rangel *et al.*, 2008, 2010).

En los sedimentos lacustres obtenidos en Juanacatlán, Jalisco, los registros geoquímicos sugieren que la ACM se caracterizó por ser un periodo húmedo (Metcalf *et al.*, 2010), mientras en Juxtlahuaca, Guerrero, la parte final de esta oscilación fue seca culminado con una megasequía (Lachniet *et al.*, 2013).

Durante la PEH se ha asociado con decrementos en la temperatura de 1.5 - 2°C y con avances de los glaciares de montaña en el rango de 250 m. Los registros históricos de México documentan a la PEH como una serie de eventos recurrentes entre los siglos XIV y el siglo XIX sin embargo, en nuestro país hay pocos registros buena resolución temporal el periodo completo de la PEH y que permitan tener una perspectiva clara del efecto que tuvo esta anomalía climática en el centro de México. Las condiciones climáticas secas en México durante la PEH ha sido explicada por la prevalencia de condiciones tipo El Niño.

A partir del análisis de varios registros naturales e históricos a lo largo del país se ha concluido que es evidente que varias civilizaciones han sido afectadas por cambios climáticos. Por ejemplo se menciona que se han presentado diversas sequías entre 1760 y 1910, hacia el final de la PEH y correlacionan con reportes de baja precipitación en invierno y con temporadas de lluvias cortas; estas son las condiciones que precedieron a la Independencia de México (1810-1821) y la Revolución Mexicana (1910-1924) (Cuna *et al.*, 2015).

Con esta información se podrán realizar enriquecer las bases de datos y realizar modelos climáticos retrospectivos para que en un futuro se realice una comparación entre la variabilidad inherente al sistema climático y la variabilidad introducida por la actividad antropogénica, específicamente para México, debido a que en los informes de IPCC 2007 y 2013 se reporta que México no tiene muchos avances en esta disciplina; de ahí la importancia de mostrar que el país ha realizado avances significativos en esta disciplina en las últimas décadas.

Del mismo modo en el Reporte Mexicano de Cambio Climático del Grupo I, están georreferenciadas únicamente los artículos publicados en revistas indexadas. Con los resultados de esta consultoría se tiene un estudio más detallado de los avances y contribuciones realizados para conocer la variabilidad durante el Holoceno.

Los trabajos paleoclimáticos en el país son fundamentales para conocer su impacto en aspectos económicos-sociales, disponibilidad de agua, determinar las fluctuaciones climáticas de alta y baja frecuencia ocurridas en el pasado, causas, así como analizar el presente e inferir

posibles tendencias futuras. Actualmente el país contribuye de manera importante a conocer la variabilidad climática durante el Holoceno.

Por otro lado, como parte de los objetivos de esta consultoría se realizó un Encuentro de Paleoclimatología en México, el cual tuvo como propósito general analizar los avances y el desarrollo actual de la Paleoclimatología en México durante el Pleistoceno-Holoceno conocer los retos y las perspectivas participaron investigadores de diversas universidades del país, así como distintos institutos.

Durante el evento se logró una gran participación de diversas universidades e institutos las cuales se mencionan a continuación: Instituto de Geología, Instituto de Geografía, Instituto de Geofísica, las tres sedes del Instituto de Ciencias de Mar y Limnología (Mazatlán, Puerto Morelos y Ciudad Universitaria), Centro Ciencias de la Atmósfera, Facultad de Ciencias, Centro de Geociencias de la UNAM, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (Sede La Paz), Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Universidad de Colima, El Colegio de la Frontera Sur (Sede Chetumal), Universidad de Guadalajara y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Sede Gómez Palacio, Durango.

Con este encuentro se estrecharon se compartieron los trabajos más relevantes a nivel nacional los cuales fueron incluidos como parte de esta consultoría y se fortalecieron los lazos comunicación y colaboración entre los participantes.

Durante este evento se realizó una encuesta con enfoque de género para obtener información sobre el perfil y conocer las problemáticas de género que viven las y los investigadores que desarrollan estudios de Paleoclimatología en el país. Así como, conocer cuáles son los cambios que perciben las y los investigadores que trabajan este tema con relación a la presencia de mujeres en esta ciencia. Entre los resultados más relevantes se destaca que la proporción de mujeres y hombres que trabajan esta disciplina a nivel nacional el **47%** son mujeres y **53%** son hombres. Estos datos muestran que en esta disciplina las mujeres han tenido un gran avance y presencia. Una característica que presenta esta disciplina es que prácticamente no se han incorporado talentos jóvenes (30/35 años). Esto sumado a que la edad promedio de las y los investigadores que es de 49 años, nos lleva a pensar que esta es una disciplina de mayores, que requiere que se promocióne más a los jóvenes quienes pueden tener más expectativas de permanecer y hacer que la disciplina crezca y se nutra de nuevos conocimientos.

En cuanto a las fuentes de financiamiento, el 80.76% de los investigadores trabaja con financiamiento nacional. Solo el 19.23% no cuenta con este tipo de apoyo. La mayoría de las personas que no acceden a estos financiamientos es debido a que son técnicos y esta tarea está destinada y limitada únicamente a los investigadores titulares. No se muestran datos significativos en cuanto a diferenciación por género, debido a que factor para solicitar un financiamiento es nivel jerárquico en que se encuentre el sujeto. La gran mayoría de estos recursos proviene del CONACyT o de la universidad en la cual trabajan.

11. Referencias

Allen U. B., A. Brauer, H. Hubberten, B. Huntley, J. Keller, M. Kraml, A. Mackensen, J. Mingram, J. F. W. Negendank, N. R. Nowaczyk, H. Oberhänsli, W. A. Watts, S. Wulf, y Bernd Zolitsch. 1999: Rapid environmental changes in southern Europe during the last glacial period. *Nature*. 400(6746):740-743.

Alley, R. B., J. Marotzke, W.D. Nordhaus, J.T. Overpeck, D.M. Peteet, R. A. Pietke, J.M., y Wallace, J. M. 2003. Abrupt climate change. *Science*. 299(5615): 2005-2010.

Anderson, L., G. Roe, and R. Anderson. (2014): The effects of interannual climate variability on the marine record. *Geology* 42(1): 55-58.

Appleby, P.G., Richardson, N. and Smith, J.T. 1993. The use of radionuclides from Chernobyl and weapons test fallout for assessing the reliability of ²¹⁰Pb in dating very recent sediments. *Verh. int. Ver. Limnol.* 25: 266-269.

Arellano-Torres, E., L. E. Pichevin y R. S. Ganeshram. 2011. High-resolution opal records from the eastern tropical Pacific provide evidence for silicic acid leakage from HNLC regions during glacial periods. *Quaternary Science Reviews* 30: 1112-1121.

Baker, A., Smart, P.L., Edwards, R.L. y D.A. Richards. 1993. Annual Growth Banding in a Cave Stalagmite. *Nature*. 364:518-520.

Bard, E. G., F. Raisbeck, Y. Oise y J. Jouzel. 2000. Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides. *Tellus*. 52B, 985–992.

Barron, J. A., D. Bukry, y J. L. Bischoff. 2003. High resolution paleoceanography of the Guaymas Basin, Gulf of California, during the past 15 000 years. *Marine Micropaleontology* 50:185-207.

Barron, J. A., D. Bukry y J.L. Bischoff. 2004. High resolution paeloceanography of the Guaymas Basin, Gulf of California, during the last 15000 years. *Marine Micropaleontology*. 50:185-207.

Barron, J. A y D. Bukry. 2007. Solar forcing of Gulf of California climate during the past 2000 yr. suggested by diatoms and silicoflagellates. *Marine Micropaleontology*. 62:115-139.

Bernal, J.P., L.E. Beramendi Orosco, K. C. Lugo-Ibarra y L. W. Daesslé. 2010. Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 62(3):305-323.

Bernal, I.S. 2004. El papel de las variables ambientales y contaminantes atmosféricas en la actividad cupial. Tesis doctoral. Colegio de Posgraduados de Chapingo, Departamento de Botánica, Texcoco, Estado de México.

Bernal J. C. y Priyadarsi D. Roy. 2010. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 62:3:1-3.

Bond, G., W. Broecker, S. Johnsen, J. McManus, L. Labeyrie, J. Jouzel, y G. Bonani. 1993. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*. 365: 143-147.

Bond, G. C., y R. Lotti. 1995. Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science*. 267:1005-1010.

Bradley R.S. 1999. *Paleoclimatology. Reconstruction climates in the Quaternary*. Second Edition. Academic Press. USA. Pág. 651-660.

Bradley, R.S., M.K. Hughes, y H.F. Diaz. 2003. Climate in Medieval time. *Science*. 302: 404-405.

Burroughs, W. J. 2001. *Climate Change. A Multidisciplinary Approach*. Cambridge University Press. New YORK, USA. Pág. 275.

Caballero, M., B. Ortega, F. Valadez, S. E. Metcalfe, J. L. Macias, y Y. Sugiura. 2002. Sta. Cruz Atizapán: a 22-ka lake level record and climatic implications for the late Holocene human occupation in the Upper Lerma Basin, Central Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 186:217-235.

Caballero, M. M. y B. Ortega- Guerrero. 2011. Escenarios del cambio climático: registros del Cuaternario en América Latina I. Instituto de Geofísica. Dirección General de Publicaciones y fomento editorial. Universidad Nacional Autónoma de México. Pág. 406.

Caballero, M. M. y B. Ortega- Guerrero. 2011. Escenarios del cambio climático: registros del Cuaternario en América Latina II. Instituto de Geofísica. Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial. Universidad Nacional Autónoma de México. Pág. 380.

Carriquiry J.D. y J. A. Vilaescusa. 2013. Paleooceanography corals records of the Niño Variability in the Gulf of California. Nova Science Publishers Inc. Pág. 22-32

Cavazos, T. y S. Hasterath. 1990. Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*. 10:377-386.

Cerano Paredes, J., J. Villanueva Díaz, R. Cervantes Martínez, L. Vázquez Selem, R. Trucios Caciono y Vidal Guerra de la Cruz. 2014. Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 83:41-54.

Cheshire, H., J. Thurow y A. Nederbragt. 2005. Late Quaternary climate change record from two long sediment cores from Guaymas basin, Gulf of California. *Journal of Quaternary Science*. 20:457-469.

Cuna E., M. Caballero, E. Zawisza y C. Ruiz. 2015. Historia Ambiental De Un Lago Alpino En El Centro De México (1230-2010). *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. 18(2):97-106.

Cronin, T.M. 2010. Paleoclimates: understanding Climate Change Past and Present. Columbia University Press. New York. United States of America. Pág. 448-450.

Delgado-Granados, H. 2015. La Criósfera en México. Pág.79-91. En: C. Gay y García y J. Clemente Rueda Abad Reporte Mexicano de Cambio Climático. Grupo I Bases Científicas. Modelos y Modelación. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Investigación en Cambio Climático.

Dahl-Jensen, D.; K. Mosegaard, N.S. Gundestrup, G. D. Clow, J. Sigfus, A. Hansen, y N. Balling. 1998. Past temperatures directly from the Greenland Ice Sheet. Science. 282(5387): 268-271.

Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. Tellus. 16(4):436-468.

Díaz- Castro S. C. 2002. Paleoclimatología en Noroeste de México. Centro de Investigaciones.

Felis T. y J. Pätzold. 2004. Climate reconstructions from annually banded corals. Global environmental change in the ocean and on land. TERRAPUB. Tokyo. Pág. 489.

Figueroa-Rangel, B. L., K. J. Willis, y M. Olvera-Vargas. 2008. 4200 years of pine-dominated upland forest dynamics in west-central Mexico: human or natural legacy? Ecology. 87:1893-1907.

Figueroa-Rangel, B. L., K. J. Willis, y M. Olvera-Vargas. 2010. Cloud forest dynamics in the Mexican Neotropics during the last 1300 years. Global Change Biology. 16:1689-1704.

Fischer, G y G. Wefer. 1999. Use of *proxies* in Paleoceanography. Examples from the South Atlantic. Springer. Germany. Pág. 42-54.

Ganeshram, R.S., y T.F. Pedersen. 1998. Glacial-interglacial variability in upwelling and bioproductivity off NW Mexico: Implications for Quaternary paleoclimate. Paleoceanography. 13(6):634-645.

Genty, D., D. Blamart, R. Ouahdi, M. Gilmour, A. Baker, J. Jouzel, y S. Van-Exter. 2003. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in Western Europe from stalagmite data. Nature. 421:833-837.

Goman, M., y R. Byrne. 1998. A 5000-year record of agriculture and tropical forest clearance in the Tuxtlas, Veracruz, Mexico. The Holocene. 8:83-89.

Graham, N.E., C. M. Ammann, D. Fleitmann, K. M. Cobb y J. Luterbacher. 2010. Support for global climate reorganization during the "Medieval Climate Anomaly". Climate Dynamics. 37:1217-1245.

Grousset, F.E., C. Pujol, L. Labeyrie, G. Auffret, y A. Boelaert. 2000. Were the North Atlantic Heinrich events triggered by the behaviour of the European ice sheets? Geology 2(2): 123-12.

Guerrero Arenas R. y Jiménez-Hidalgo E. 2007. Climas del Pasado. ¿Cómo véis? Pág. 22-24.

Huante, P.E.Rincón y T.W. Swetnam. 1991. Dencronology of *Abies religiosa* in Michoacan, Mexico. *Tree-Ring Bulletin*. 51:15-27.

Islebe, G. A. 2016. Cambio climático: contexto histórico, paleoecológico y paleoclimático. Tendencias actuales y perspectivas En: Balvanera, Patricia, Ernesto Arias-González, Ricardo Rodríguez-Estrella, Lucía Almeida-Leñero, Juan J. Schmitt-Soto. 2016. *Ecosistemas de México: una mirada a su conocimiento*. Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México.

Islebe G. y O. Sánchez. 2002. History of Late Holocene vegetation at Quintana Roo, Caribbean coast of Mexico. *Plant Ecology* 160: 187–192.

IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Lachniet, M. S., Y. Asmerom, J. P. Bernal, V. J. Polyak, y L. Vazquez-Selem. 2013. Orbital pacing and ocean circulation-induced collapses of the Mesoamerican monsoon over the past 22,000 yr. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 110:9255-9260.

Ledru, M.P., V. Jomelli, P. Samaniego, M. Vuille, S. Hidalgo, M. Herrera, y C. Ceron. 2013. The Medieval Climate Anomaly and the Little Ice Age in the eastern Ecuadorian Andes. *Climate of the Past*. 9:307–332.

Liu Z., B.L. Otto-Bliesner, F. He, E.C. Brady, R. Tomas, C. PU, A.E. Carlson, J. Lynch-Stieglitz, W. Cury, E. Brook, D. Erickson, R. Jacob, J. Kutzbach, y J. Cheng. 2009. Transient simulation of last deglaciation with a new mechanism for Bolling-Allerod warming. *Science*. 325(5938):310-4.

Lorius, C., Jouzel, J., Raynaud, D., Hansen, J. y Le Treut, H. 1990. The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming. *Nature*. 347(6289):139-145.

Lowe J. J., y Walker M. J. C. 1984. *Reconstructing quaternary environments*. London: Longman. Pág. 165.

Lozano-García, M. S., M. Caballero-Miranda, B. Ortega-Guerrero, 2007. Evidencia Del Impacto Humano Y Cambio Climático natural En La Región De Los Tuxtlas, Ver. Un Enfoque Multidisciplinario. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. 10(2):49-55.

Lozano-García, M. S., M. Caballero-Miranda, B. Ortega-Guerrero, A. Rodríguez, and M. S. Sosa-Najera. 2007. Tracing the effects of the Little Ice Age in the tropical lowlands of eastern Mesoamerica. *PNAS*. 104:16200-16203.

Lozano García, Debajyoti Roy y Correa Metrio. 2015. REGISTROS PALEOCLIMÁTICOS. En el Reporte Cambio Climático. Grupo I Universidad Nacional Autónoma de México/ Programa de Investigación en Cambio Climático.

Luque-Marin, J.A. 2003. El Lago de Sanabria: un sensor de las oscilaciones climáticas del Atlántico Norte durante los últimos 6.000 años. Tesis de doctorado. Universidad de Barcelona. Pág. 199-207.

Magaña, V., J.L. Pérez, J.L. Vázquez, E. Carrizos y J. Pérez. 1999. El Niño y el clima, En V. Magaña (comp.). Los impactos del El Niño en México. SEP-CONACYT, México. Pág. 23-68.

Mann, M.E., Z. Zhang, S. Rutherford, R.S. Bradley, M.K. Hughes, D. Shindell, C. Ammann, G. Faluvegi, y F. Ni. 2009. Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*: 326:1256-1260.

Mann, M.E. y P.D. Jones. 2004. Global surface temperatures over the past two millennia. *Review Geophysics*. 42: 1-42.

McCracken, K. G. 2007. High frequency of occurrence of large solar energetic particle events prior to 1958 and a possible repetition in the near future. *Space Weather*. doi:10.1029/2006SW00029.

McCulloch, M., Fallon, S., Wyndham, T., Hendy, E., Lough, J., y Barnes, D. 2003. Coral record of increased sediment flux to the inner Great Barrier Reef since European settlement. *Nature*. 421:727-730.

Meko, D.M., R. Touchan, J. Villanueva Díaz, D. Griffin, C. A. Woodhouse, C. L. Castro, C. Carillo, y S. W. Leavitt. 2013. Sierra San Pedro Mártir, Baja California, cool-season precipitation reconstructed from earlywood width of *Abies concolor* tree rings. *Journal Of Geophysical Research: Biogeosciences*. 118:1660–1673.

Metcalf, S.E. 1997. Paleolimnological records of climate change in México-Frustrating past, promising future? *Quaternary International*. 44: 111-116.

Metcalf, S. E., M. D. Jones, S. J. Davies, A. Noren, y A. B. MacKenzie. 2010. Climate variability over the last two millennia in the North American Monsoon region, recorded in laminated lake sediments from Laguna de Juanacatlán, Mexico. *The Holocene*. 20:1195-1206.

O'Brien S.R., P.A. Mayewski, L.D. Meeker. (1995). Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core. *Science*. 270: 1962–1964

Obrochta S., T. J. Crowley, J. E.T. Channell, D.A. Hodell, P.A. Baker, A. Sekia, Yusuke Yokoyama. 2014. Climate variability and ice-sheet dynamics during the last three glaciations. *Earth and Planetary Science Letters*. 406: 198-212.

Oliver, J. E. 2005. *Encyclopedia of World Climatology*. Pág. 370-371.

Paillard, D. 2001. Glacial cycles: towards a new paradigm. *Review of geophysics*. 39:325-346.

Peltier R. W. 1994. Ice Age Paleotopography. *Science*. Vol. 265, Issue 5169. Pág. 195-201.

Pennington, W., Cambray, R.S. y Fisher, E.M. 1973. Observations on lake sediments using fallout ¹³⁷Cs as a tracer. *Nature*. 242: 324-326.

Pérez-Cruz, L. 2006. Climate and ocean variability during the middle and late Holocene recorded in laminated sediments from Alfonso Basin, Gulf of California, Mexico. *Quaternary Research*. 65:401-410.

Pérez-Cruz, L. 2012. Paleooceanografía del Golfo de California. En <http://ugm.org.mx/wordpress/page/9/?cat> Consultado en julio del 2017.

Pérez-Cruz, L., G.E. Villagran de la Cruz, L. E. Gómez-Lizarraga. 2009. Radiolarios en los sedimentos marinos del Cuaternario del Golfo de California. *Paleooceanografía y Paleoclimatología*. En *Monografías del Instituto de Geofísica*. Ed. UNAM. Pág. 15-72.

Pourchet, M., Pinglot, J.F., y Gascard, J.C. 1986. The northly extent of Chernobyl contamination. *Nature*. 323: 676-677.

Pourchet, M., Pinglot, J.F., Reynaud, L., y Holdsworth, G. 1988. Identification of Chernobyl fallout as a new reference level in northern hemisphere glaciers. *J. Glaciol*. 34: 183-188.

Pourchet, M., y Pinglot, J.F. 1989. Cesium-137 and Lead-210 in alpine lake sediments: measurements and modeling of mixing processes. *Journal of Geophys. Res*. 12:761-770.

Pujul Martínez Elena. 2008. Espelotemas y Cambio Climática. *El Faro*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Pride C., R. Thunell, D. Sligma, L Loyd, Keigwin, M. Itabest, y E. Tappa. 1999. Nitrogen isotopic variations in the Gulf of California since the last deglaciation: Response to global climate change. *Paleoceanography*.14:397-409.

Retallack, G.C. 1990. *Soils of the past. An introduction to paleopedology*. Unwyn-Hyam, Inc. Londres. Pág. 520.

Robbins, J.A., Krezoski, J.R. y S.C. Mozley. 1977: Radioactivity in sediments of the Great Lakes: Post-depositional redistribution by deposit-feeding organisms. *Earth Planet Sci Lett*. 36:325-333.

Robbins, J.A. 1978. Geochemical and geophysical applications of radioactive lead. En: *The Biogeochemistry of Lead in the Environment*. J. Nriagu, ed. Amsterdam: Elsevier. 284-393.

Rodríguez-Ramírez A, M. Caballero, P. Roy, B. Ortega, G. Vázquez-Castro y S. Lozano-García. 2015. Climatic variability and human impact during the last 2000 years in western Mesoamerica: evidence of late Classic (AD 600–900) and Little Ice Age drought events. *Clim. Past*. 11:1239–1248.

Ropelewski, C.F. y M.S. Halpert. 1986. North American precipitation and temperatura patterns associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review*. 114:2352-2362

Ruddiman, F.W. 2000. Earth's Climate. Past and Future. University of Virginia. Pág. 355-364.

Sancetta C. 1995. Diatoms in the Gulf of California: Seasonal flux patterns and the sediment record for the last 15,000 years. *Paleoceanography*. 10: 67-84

Sánchez-Cabeza, J.A., M. Diaz-Asencio y C. Ruiz-Fernández. 2012. Radiocronología sedimentos de costeros utilizando ²¹⁰Pb: Modelos, validación y aplicaciones. *Pnuma*. Sti/Pub/1538 Isbn 978-92-0-325210-2.

Sarukhán, J. 1977. "Algunas consideraciones sobre los paleoclimas que afectaron los ecosistemas de la planicie costera del Golfo". En: Memoria de la reunión sobre fluctuaciones climáticas y su impacto en las actividades humanas-2da etapa. Serie documentos 25. México. Conacyt. Pág. 197-207.

Schmitter, A. M. Y., y A. J. Weaver. 2002. Instability of glacial climate in a model of the ocean-atmosphere.cryosphere system. *Science*. 295:1489-1493.

Sedov, S., E. Solleiro, J.E. Gama, E. Vallejo, A. González. 2001. Buried paleosols of the Nevado de Toluca: an alternative record of late Quaternary environmental change in central México. *Journal of Quaternary Science*. 16:375-389.

Solleiro, E. y S. Sedov. 2011. Secuencias tefra-paleosuelos del Cinturón Volcánico Transmexicano: memoria pedológica de los ambientes del Cuaternario. En: Escenarios de cambio climático: Registros del Cuaternario en América Latina I. Pág. 255-286.

Soto-Mardones, L., S. G. Marione y A. Parres- Sierra. 1999. Time and Spatial Variability Of The Sea Surface Temperature In The Gulf Of California. *Ciencias Marinas*. 25: 1-30.

Stahle D.W. 1999. Useful strategies for the development of tropical tree-ring chronologies. *IAWA. Journal*. 20:248-253.

Targulian, V.O. y S.V. Goryachkin. 2004. Soil memory types of record, carriers, hierarchy and diversity. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 21:1-8.

Tenorio P. A. 2011. Paleocianografía Holócenica de la Cuenca Farrallón (Golfo de California): integración de datos geoquímicos y biológicos. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Toledo, V. M. 1976. Los cambios climáticos del Pleistoceno y sus efectos sobre la vegetación tropical cálida y húmeda de México. Tesis de maestría. México, Facultad de Ciencias, UNAM.

Vázquez-Selem, L. y Heine, K. 2011. Late Quaternary Glaciation in Mexico. En: Ehlers, J., Gibbard, P. L. y Hughes, P. D. (eds.), *Quaternary Glaciations. Extent and Chronology, A closer look, Volume Developments in Quaternary Science*, Elsevier, Amsterdam. 15: 849-861.

Viau, A.E., K. Gajewski, P. Fines, D.E. Atkinson, y M.C. Sawada. 2002. Widespread evidence of 1500 yr climate variability in North America during the past 14 000 yr. *Geology*. 30: 455-458.

Villanueva, J. 1996. Influence of land-use and climate on soils and forest structure in mountains of the southwestern United States and northern México. Tesis Doctoral. University of Arizona, Tucson.

Villanueva, J. D., J. Cerano-Paredes, D.W. Stahle, B.H. Luckman, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, P.Z. Fulé. 2011 La dendrocronología y reconstrucciones paleoclimáticas en norte-centro de México. En Caballero, M. M. y B. Ortega- Guerrero. 2011. Escenarios del cambio climático: registros del Cuaternario en América Latina I. Instituto de Geofísica. Dirección General de Publicaciones y fomento editorial. Universidad Nacional Autónoma de México. Pág. 51-61.

Villanueva-Díaz, J., J. Cerano-Paredes, J. Estrada-Ávalos, V. Constante-García y E. N. Cortés-Barrera. 2012. Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca Lerma Chapala en Guanajuato, México. *Ciencias del Agua*. 3:5-23.

Villanueva- Díaz, J., J. Cerano-Paredes, A. Gómez Guerrero, A. Correa-Díaz, L. U. Castruita-Esparza, R. Cervantes-Martínez, D. W. Stahle, A. R. Martínez-Sifuentes, J. Estrada-Ávalos, V. Constante-García y E. N. Cortés-Barrera. 2014. Cinco Siglos De Historia Dendrocronológica De Los Ahuehetes (*Taxodium Mucronatum* Ten.) Del Parque El Contador, San Salvador Atenco, Estado De México. *Agrociencia*. 48: 725-737.

Wanner, H. y Bütikofer, J. 2008. Holocene Bond Cycles e real or imaginary? *Geografie* 4/113, 338e349

12. Glosario

Anomalía Climática Medieval: Es una anomalía positiva de temperatura ha sido nombrada de diferentes maneras; en un comienzo fue llamada como la “Época Cálida Medieval” o “Pequeño Óptimo”, con la finalidad de agrupar las múltiples evidencias procedentes de Europa Occidental de temperaturas más cálidas entre ~1000 a ~1200 A.D; más adelante, se amplió el intervalo, ya que se observaron diversas situaciones de temperaturas extremas, en diferentes tiempos y en diferentes regiones: ~950 a ~1200 A.D. en Rusia y Groenlandia. No obstante, con el transcurso del tiempo la base de datos de los registros aumentó y se extendió el intervalo hasta ~1300 A.D (Cronin, 2010).

Anno Dóminota: (en latín, ‘en el año del Señor’), abreviado A. D. es un indicador calendario que señala que la cifra antecedente está contada a partir del año cristiano del nacimiento de Jesucristo (Jesús de Nazaret), considerado el inicio de la era cristiana.

Antes del Presente: (abreviado a menudo con las siglas A.P. y, en ocasiones, B.P., del inglés Before Present) es una escala de tiempo usada en arqueología, geología y otras disciplinas científicas como estándar para especificar cuándo ocurrió un evento en el pasado. Se adoptó debido a la multiplicidad de calendarios y de fechas usadas en el presente. A principios de 1954, los metrólogos establecieron el año 1950 del calendario gregoriano como el año de origen arbitrario de la escala temporal para su uso en la datación por radiocarbono, usando muestras de referencia de 1950 de ácido oxálico. Por ejemplo 1500 A.P. significa 1500 años menos que 1950, es decir, el año 450 DC. En inglés, B.P. puede ser también considerado como una sigla de Before Physics.

Carbono 14: El ^{14}C o radiocarbono, es un isótopo radiactivo del carbono, descubierto el 27 de febrero de 1940 por Martin Kamen y Sam Ruben. Su núcleo contiene 6 protones y 8 neutrones.

Cesio 137: El Cesio-137 es un isótopo radiactivo del cesio que se produce principalmente por fisión nuclear.

Holoceno: Es una época geológica que comprende de los últimos 11,500 años al presente.

Ma: millones de años

Paleoclimatología: disciplina multidisciplinaria enfocada a conocer cómo eran las condiciones climáticas en el pasado antes de que se utilizaran registros instrumentales. El origen de la palabra se deriva de la raíz griega “paleo” que significa “antiguo”, y del término clima.

Pequeña Edad de Hielo: En algunas regiones de Europa se ha registrado una anomalía en la temperatura negativa (~1400 y ~1800 años AP) nombrada la Pequeña Edad de Hielo (PEH), con base en diversos registros naturales e instrumentales. Durante ese periodo se ha estimado que la temperatura anual fue de 1-1.5°C más fría que la reportada para el siglo XX.

Pleistoceno: La Época Pleistocena es la más reciente de las dos épocas en el Sistema Cuaternario, la cual se extiende desde 2.6 Ma (millones de años) hasta el principio del Holoceno a 11.5 ka.

Plomo 210: El ^{210}Pb es un isótopo radioactivo y un precursor del ^{210}Po en la serie de decaimiento del ^{238}U .

Proxy/proxies: Un *proxy* (singular), *proxies* (plural), es un indicador indirecto (extraído de un archivo o registro climático) cuantificable que por su naturaleza física, química o biológica está relacionado con diferentes variables paleoclimáticas (paleotemperatura, paleoproduktividad, etc.) y sus oscilaciones reflejan los cambios temporales acontecidos en estas variables a través del tiempo (Cronin, 2010).

Último Máximo Glacial. Periodo durante la última era de hielo cuando los glaciares y las capas de hielo alcanzaron su máxima extensión, hace aproximadamente 21 ka.

Derechos Reservados © 2018

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña,
Delegación Tlalpan, CP. 14210, Ciudad de México.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec,
Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Este trabajo se realizó con financiamiento del Fondo para el Medio Ambiente Mundial a través del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo para la Sexta comunicación Nacional ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

