

RESEARCH ADVANCE

**MÁS DE 100 AÑOS ININTERRUMPIDOS DE REGISTRO
GEOMAGNÉTICO EN MÉXICO: IMPLICACIONES
EN LA DATACIÓN ABSOLUTA DE ALGUNOS
EDIFICIOS HISTÓRICOS**

*More than 100 Uninterrupted Years of Geomagnetic Record
in Mexico: Implications in the Absolute Dating
of Some Historic Buildings*

*Esteban Hernández-Quintero,¹ Avto Goguitchaichvili,²
Rafael García-Ruiz,² Miguel Cervantes-Solano,³
Gerardo Cifuentes-Nava¹*

¹ Servicio Magnético, Instituto de Geofísica, UNAM

² Servicio Arqueomagnético Nacional, Instituto de Geofísica, UNAM

³ Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, ENES, Campus Morelia, UNAM
(avto@geofisica.unam.mx)



Figura 1. El primer observatorio magnético formalmente instalado en México se situó en la azotea del Palacio Nacional, en funcionamiento desde septiembre de 1879 (Comisión Nacional del Agua 2012).

RESUMEN. *En México funciona con regularidad, desde el año 1914, el Observatorio Geomagnético de Teoloyucan, proporcionando un registro casi continuo de la variación secular del campo magnético terrestre. En el presente trabajo*

Recibido: 16-7-2018. Aceptado: 23-7-2018. Publicado: 30-7-2018.

Edited & Published by Pascual Izquierdo-Egea. Arqueol. Iberoam. Open Access Journal.
License CC BY 3.0 ES. <http://laiesken.net/arqueologia/archivo/2018/3904>.

se presenta una síntesis del registro geomagnético obtenido en México desde hace más de cien años. Con estos datos se ofrece una curva de variación secular regional la cual, dada su calidad técnica, se propone como herramienta de datación arqueomagnética para este intervalo de tiempo.

PALABRAS CLAVE. Registro geomagnético; variación secular; datación arqueomagnética; México.

ABSTRACT. In Mexico, the Teoloyucan Geomagnetic Observatory has been operating regularly since 1914, providing an almost continuous record of the secular variation of the Earth's magnetic field. This work offers a synthesis of the geomagnetic record obtained in Mexico for more than one hundred years. With these data, we propose a regional secular variation curve which, given its technical quality, is proposed as an archaeomagnetic dating tool for this time interval.

KEYWORDS. Geomagnetic record; secular variation; archaeomagnetic dating; Mexico.

INTRODUCCIÓN

En el actual territorio mexicano se tienen referencias desde el siglo XVI (1576), cuando Cavendish efectuó mediciones magnéticas en La Paz, Cabo Corrientes y Manzanillo. Dudley hizo mediciones en el puerto de Veracruz (1630). En el centro de la actual República, las mediciones más antiguas fueron efectuadas en 1769 y 1775 por José Antonio Alzate y Joaquín Velázquez de León en Ciudad de México, así como por Alexander von Humboldt a principios del siglo XIX. En 1856 se actualizan los instrumentos de medición y se comienza a medir la componente horizontal del campo magnético terrestre (Sonntag 1860).

En 1879 se instaló el Observatorio Meteorológico y Magnético Central de México en el Palacio Nacional (fig. 1), año en el que fungía como presidente Porfirio Díaz. El observatorio dependía de la Secretaría de Fomento. Para la instalación de los instrumentos, se cons-

truyó, en la azotea del palacio, una caseta de madera y herrajes de bronce. Se instaló un magnetómetro unifilar *Thompson* para determinar H y D, una brújula de inclinación *Negrette-Zambra* y se nombró como jefe al ingeniero Vicente Reyes (Reyes 1884).

Es importante mencionar la obra de Rosendo Sandoval (1950) como responsable del entonces departamento magnético; en su trabajo organizó todo el acervo de datos geomagnéticos acumulados hasta aquella época, dando sentido a las descripciones reportadas en algunas publicaciones de la época (fig. 2).

Durante las primeras dos décadas del siglo XX, y gracias al gran impulso global de la ciencia del geomagnetismo, se instala en Teoloyucan ($19^{\circ} 44' 47.49''$ N y $99^{\circ} 10' 53.4''$ W, a 2200 metros de altura). Medir las variaciones del campo magnético a alturas significativas fue de gran importancia para los estudios de aquella época, dada la inexistente tecnología satelital; asimismo, se aseguraba una permanencia prolongada en este sitio, dada la distancia que lo separaba de la ciudad de México (más de 50 kilómetros). La estabilidad ha sido, en un observatorio magnético, un requisito imprescindible para medir de manera adecuada los elementos magnéticos.

El Observatorio Magnético de Teoloyucan queda formalmente a cargo del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México en 1949, año de su fundación. Tras la Secretaría de Fomento, el gobierno central designa a esta universidad como responsable de su operación (1929) a través del Instituto de Geología, la cual pasa al Instituto de Geofísica a partir de 1949. Durante 104 años ha mantenido su posición geográfica, con tan solo un cambio menor en 1978 al ser reubicado a unos metros de la Presidencia Municipal del pueblo de Teoloyucan. Esta etapa marcó la pauta para dar una consolidación al observatorio como tal.

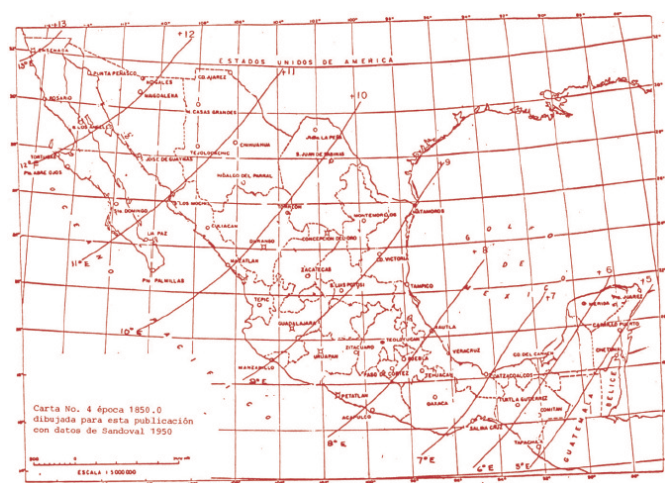


Figura 2. Ejemplo de variación espacial de la declinación magnética en 1850, construida con los datos de R. Sandoval (1950) para la República Mexicana.

Tabla 1a. Elementos del CMT registrados en el observatorio de Teoloyucan. La cursiva se refiere a los datos derivados de la onceava generación del campo internacional de referencia geomagnético IGRF11 para la localidad de Teoloyucan.

COLATITUDE	ANNUAL		MEAN		VALUES				
	Teoloyucan		Teo		México				
	70.254		260.807		Elevation 2280				
	Longitude		Longitude		H	X	Y	Z	F
	D[°]		I[°]		nT	nT	nT	nT	nT
YEAR	Deg	min	Deg	min	nT	nT	nT	nT	nT
1914.5	8	49.6	46.06	0	32275	31927	4722	33499	46517
1915.5	8.49037	0	46.1571285	0	32196.3898	31843.5397	4753.57751	33523.8365	46480.6963
1916.5	8	59.7	46.2249336	0	32121.2181	31763.9013	4777.78504	33524.8883	46429.4173
1917.5	9	5	46.292853	0	32046.0864	31684.2629	4801.99258	33525.9402	46378.2311
1918.5	9	6.6	46.3608864	0	31970.9947	31604.6246	4826.20011	33526.9921	46327.1378
1919.5	9	7.7	46.4290336	0	31895.9435	31524.9862	4850.40765	33528.044	46276.1379
1920.5	9	9.6	46.4972946	0	31820.933	31445.3479	4874.61518	33529.0959	46225.2317
1921.5	9	11.9	46.5479323	0	31753.4106	31375.3829	4885.12368	33517.2249	46170.1575
1922.5	9	11.2	46.5986782	0	31685.9023	31305.4179	4895.63218	33505.3539	46115.1292
1923.5	9	13.4	46	29	31727	31317	5085	33413	46076
1924.5	9	14	46	39.9	31562	31153	5064	33452	45991
1925.5	9	14.7	46	30.4	31601	31191	5077	33308	45913
1926.5	9	18.2	46	44.7	31590	31174	5107	33576	46101
1927.5	9	19.9	46	40.5	31379	30964	5088	33270	45733
1928.5	9	20.8	46	43.6	31340	30924	5090	33289	45720
1929.5	9	23.5	46	45.3	31303	30883	5108	33281	45689
1930.5	9	25.5	46	52.5	31202	30781	5110	33314	45644
1931.5	9	29.2	47	1.8	31122	30696	5129	33410	45660
1932.5	9	30.6	47	2.6	31106	30679	5139	33407	45647
1933.5	9	33.8	47	5.6	31041	30610	5157	33396	45594
1934.5	9	36.1	47	7.3	31017	30582	5174	33404	45584
1935.5	9	37.5	47	9	31007	30571	5184	33425	45592
1936.5	9	39	47	8.5	30932	30494	5185	33336	45476
1937.5	9	39.4	47	10.9	30883	30445	5180	33330	45438
1938.5	9	40	47	12.3	30847	30409	5180	33318	45405
1939.5	9	40.7	47	10.2	30832	30393	5183	33261	45353
1940.5	9	41.8	47	9.3	30825	30385	5192	33235	45329
1941.5	9	40.9	47	10.7	30781	30343	5177	33216	45285
1942.5	9	41.5	47	10.5	30736	30297	5174	33162	45215
1943.5	9	39.5	47	9.1	30722	30287	5154	33121	45176
1944.5	9	38.5	47	8.2	30709	30275	5143	33090	45144
1945.5	9	39.1	47	5.4	30672	30238	5142	32995	45049
1946.5	9	37	47	1.6	30622	30192	5116	32869	44923
1947.5	9	37.2	47	0.7	30594	30164	5113	32822	44870
1948.5	9	28.4	47.1893221	0	30609.0694	30191.3126	5039.81909	32929	45041.2873
1949.5	9	25	47	5.2	30566	30154	5001	32878	44891
1950.5	9	21.6	47	4.2	30506	30100	4961	32794	44789
1951.5	9	18.7	47	3.1	30487	30085	4933	32752	44745
1952.5	9	15.7	47	2.6	30467	30070	4903	32722	44710
1953.5	9	14.6	47	3.7	30487	30091	4897	32763	44753
1954.5	9	14.3	47	4	30475	30080	4893	32757	44741
1955.5	9	10.7	47	9.6	30339	29951	4839	32717	44619
1956.5	9	10.6	47	5.8	30312	29924	4834	32616	44527
1957.5	9	7	47	11.2	30254	29872	4794	32656	44517
1958.5	9	6.1	47	10.4	30232	29851	4782	32617	44473
1959.5	9	5.2	47	11.7	30189	29810	4768	32595	44428
1960.5	9	2.5	47	10.3	30156	29781	4739	32534	44360
1961.5	8	59.5	47	10	30122	29752	4708	32491	44306
1962.5	8	53.5	47	9.9	30074	29713	4648	32438	44234
1963.5	8	45.8	47	10.3	30032	29681	4575	32400	44178
1964.5	8	47.5	47	8.6	30007	29654	4586	32341	44118
1965.5	8	43.6	47	9	29971	29624	4547	32309	44070
1966.5	8	37.6	47	13.3	29933	29594	4490	32350	44074
1967.5	8	32.4	47	11.6	29934	29602	4445	32318	44051
1968.5	8	30	47	14.7	29901	29573	4420	32341	44046
1969.5	8	24.9	47	16.4	29872	29550	4372	32342	44027
1970.5	8	18.6	47	21	29845	29532	4313	32399	44050
1971.5	8	13.2	47	2.3	29816	29510	4263	32016	43749
1972.5	8	9.6	47	3.4	29777	29476	4226	31995	43708
1973.5	8	7.2	47	3.3	29769	29471	4205	31984	43694
1974.5	8	0.3	47	5.6	29675	29386	4133	31926	43588
1975.5	7	55.4	47	3.7	29632	29349	4085	31846	43500
1976.5	7	47.5	47	3.4	29566	29293	4008	31769	43398
1977.5	7	39.1	47	1.2	29568	29305	3937	31730	43371
1978.125	7	33	47	2.9	29506	29250	3877	31694	43303

Tabla 1b. Elementos del CMT registrados en el observatorio de Teoloyucan. La cursiva se refiere a los datos derivados de la onceava generación del campo internacional de referencia geomagnético IGRF11 para la localidad de Teoloyucan.

COLATITUDE	ANNUAL		MEAN	VALUES					
	70.254	Teoloyucan	Teo	México		Elevation	2280		
YEAR	D[°]	I[°]	H	X	Y	Z	F	D[°]	
	Deg	min	Deg	min	nT	nT	nT	nT	nT
1978.5	7.791843	0	47.2385734	0	29524.2747	29251.6815	4002.7393	31926.4044	43485.3779
1979.5	7	36.4	47	25.3	29320	29062	3881	31909	43334
1980.5	7	41.4	47	15.1	29342	29078	3926	31744	43228
1981.5	7	43	47	18.9	29283	29018	3932	31750	43192
1982.5	7	35	47	22.3	29230	28974	3857	31755	43160
1983.5	7	32.4	47	23.7	29169	28917	3828	31715	43089
1984.5	7	30.3	47	22.9	29147	28897	3807	31676	43046
1985.5	7	27.1	47	23.8	29075	28829	3771	31615	42952
1986.5	7	25.8	47	25.7	29014	28770	3752	31583	42887
1987.5	7	22.9	47	26.8	28966	28726	3722	31552	42832
1988.5	7	19.9	47	31.1	28896	28660	3687	31555	42787
1989.5	7	20	47	31.7	28869	28633	3685	31537	42755
1990.5	7	15.7	47	33.7	28831	28600	3644	31531	42725
1991.5	7	11.7	47	33.7	28775	28548	3604	31470	42642
1992.5	7	7	47	35.3	28732	28511	3560	31452	42600
1993.5	7	3.4	47	36.6	28692	28475	3525	31433	42559
1994.5	6	59.5	47	42.5	28601	28388	3481	31442	42504
1995.5	6	53.4	47	45	28541	28335	3423	31421	42449
1996.5	6	51.6	47	43.6	28541	28337	3409	31395	42430
1997.5	6	49.7	47	44	28463	28261	3384	31316	42318
1998.5	6	44.8	47	45.1	28394	28197	3336	31260	42230
1999.5	6	39.4	47	44.6	28336	28145	3285	31188	42138
2000.5	6	34.6	47	44.2	28279	28093	3239	31118	42048
2001.5	6	26.4	47	43.4	28200	28022	3163	31016	41920
2002.292	6	24.9	47	41.4	28192	28015	3150	30971	41880
2002.792	6	23.9	47	42.5	28145	27970	3137	30941	41827
2003.5	6	20	47	42.8	28100	27928	3100	30895	41762
2004.5	6	14.1	47	40.8	28064	27898	3048	30821	41683
2005.5	6	8.4	47	40	28020	27860	2997	30759	41608
2006.5	6	3.1	47	37.3	27987	27831	2950	30672	41521
2007.5	5	56.6	47	36.2	27933	27783	2892	30595	41428
2008.5	5	50.1	47	35	27881	27737	2834	30515	41334

Actualmente, opera con instrumentos de última tecnología, como variógrafos *Fluxgate* de 3 componentes, magnetómetros *Overhauser* de intensidad total y magnetómetros de declinación e inclinación magnética. Por otro lado, reporta sus datos en tiempo real a la red mundial de observatorios magnéticos.

Además del análisis histórico de la evolución de las mediciones del campo geomagnético en México, un resultado que se desprende de este volumen de información es la curva de más de 100 años de variación secular para el vector geomagnético con respecto al centro de la República Mexicana (tabla 1, fig. 3). En esta curva se pueden observar rasgos de variación muy interesantes: a) la declinación muestra aumento de 1900 a 1945, con un leve descenso casi continuo hasta hoy en día, apreciándose un pequeño punto de inflexión hacia 1977; b) la inclinación para los últimos 100 años tiene una variación aproximada de 2 grados, en donde se observa un aumento casi continuo de principios de 1900 hasta 2010; c) la intensidad, por otro lado, es un

parámetro que decae en una línea recta uniforme y continua, como cabe esperar para hoy en día.

IMPLICACIONES PARA LA DATACIÓN

Dentro del presente trabajo se desarrolla la curva geomagnética de la declinación, la inclinación y la intensidad haciendo uso de los datos recopilados para los últimos 100 años, la mayor parte de los cuales pertenece al observatorio de Teoloyucan.

Se complementó la información del vector geomagnético haciendo uso de la onceava generación del campo internacional de referencia geomagnético IGRF11 (*International Geomagnetic Reference Field* según sus siglas en inglés) para la localidad de Teoloyucan. Los datos sintéticos que se incorporaron por medio del IGRF11 para la inclinación y la intensidad son aproximadamente el 11 % del total de los mismos, y los de la declinación representan el ~2 %.

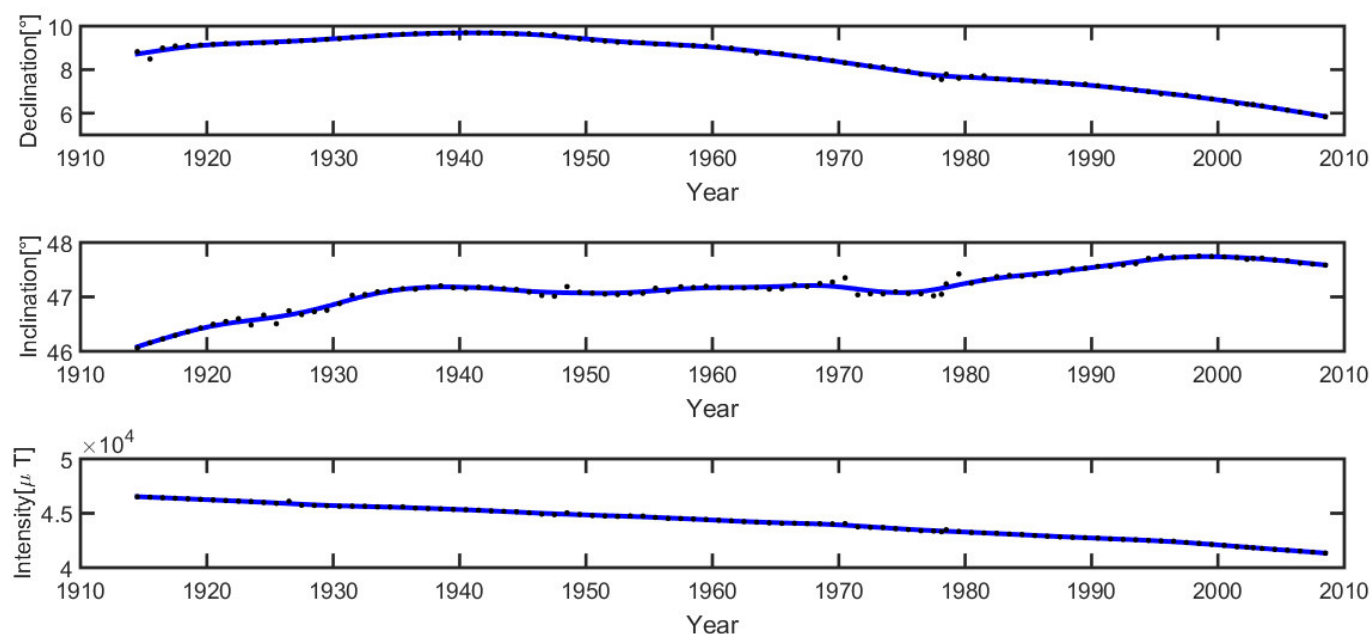


Figura 3. Curvas representativas de los componentes del campo geomagnético para Teoloyucan.

Para poder obtener una curva de ajuste del conjunto de datos, se hace uso del método llamado *splines* cúbicos penalizados, el cual es un método que junta dos enfoques como son los *splines* de suavizado (*smoothing splines*) y los *splines* de regresión, donde dicho método hace uso de menos parámetros en comparación con los *splines* de suavizado y la selección de los nodos no es tan determinante como en los *splines* de regresión. Esto es sumamente importante, ya que evita tener que hacer uso de grandes dimensiones de datos, lo que elevaría el costo computacional debido al empleo de matrices que, al ser muy grandes, pueden hacer ineficiente el método.

El método de *P-splines* se caracteriza por hacer uso de penalizaciones, lo cual ayuda a que la elección del número y de la localización de nodos no sea de vital importancia.

$$\vec{f} = (\vec{B}^T \vec{C}^{-1} \vec{B} + \Lambda \Phi)^{-1} \vec{B}^T \vec{C}^{-1} Y \quad (1)$$

Uno de los factores importantes dentro del presente método es la matriz de diferenciación de segundo orden, con la cual se realiza la penalización Φ . El segundo factor significativo es el parámetro de suavizado Λ para poder controlar la suavidad de la curva y penalizar los coeficientes que estén muy separados entre sí, lo cual es sumamente importante en la presencia de brechas o espacios sin información (*gaps*). C es la matriz de covarianza del error, pero este es despreciable debido a que los datos utilizados provienen de un observatorio, por

lo cual esta matriz se aproxima a la la matriz base \vec{B} de los *B-splines* cúbicos. Los datos de entrada, que pueden ser la declinación, la inclinación o la intensidad, entran como vector Y .

El algoritmo de interpolación sigue la metodología establecida por Carrancho *et al.* (2013) para poder obtener la curva representativa para la declinación y la inclinación, así como el algoritmo para el ajuste de los datos de la intensidad establecido por Goguitchaichvili *et al.* (2018).

Haciendo uso del método de los *splines* cúbicos penalizados, se obtiene la curva representativa para cada uno de los componentes del campo geomagnético de México para los últimos 100 años; dicha curva (fig. 4) puede ser de gran utilidad para realizar el ejercicio de datación de objetos quemados tales como ladrillos, tejas y hornos mediante la herramienta de datación arqueomagnética soportada por *MATLAB* (Pavón-Carrasco *et al.* 2011).

OBTENCIÓN DE LA EDAD

Gracias al *software* desarrollado por Pavón-Carrasco *et al.* (2011) es posible obtener una edad dentro del rango de tiempo de los últimos 100 años con el método arqueomagnético si se cuenta con la declinación, la inclinación y la intensidad. Cabe destacar que esta plataforma de datación fue empleada exitosamente en Mesoamérica para los últimos 2 milenios (Punzo Díaz *et*

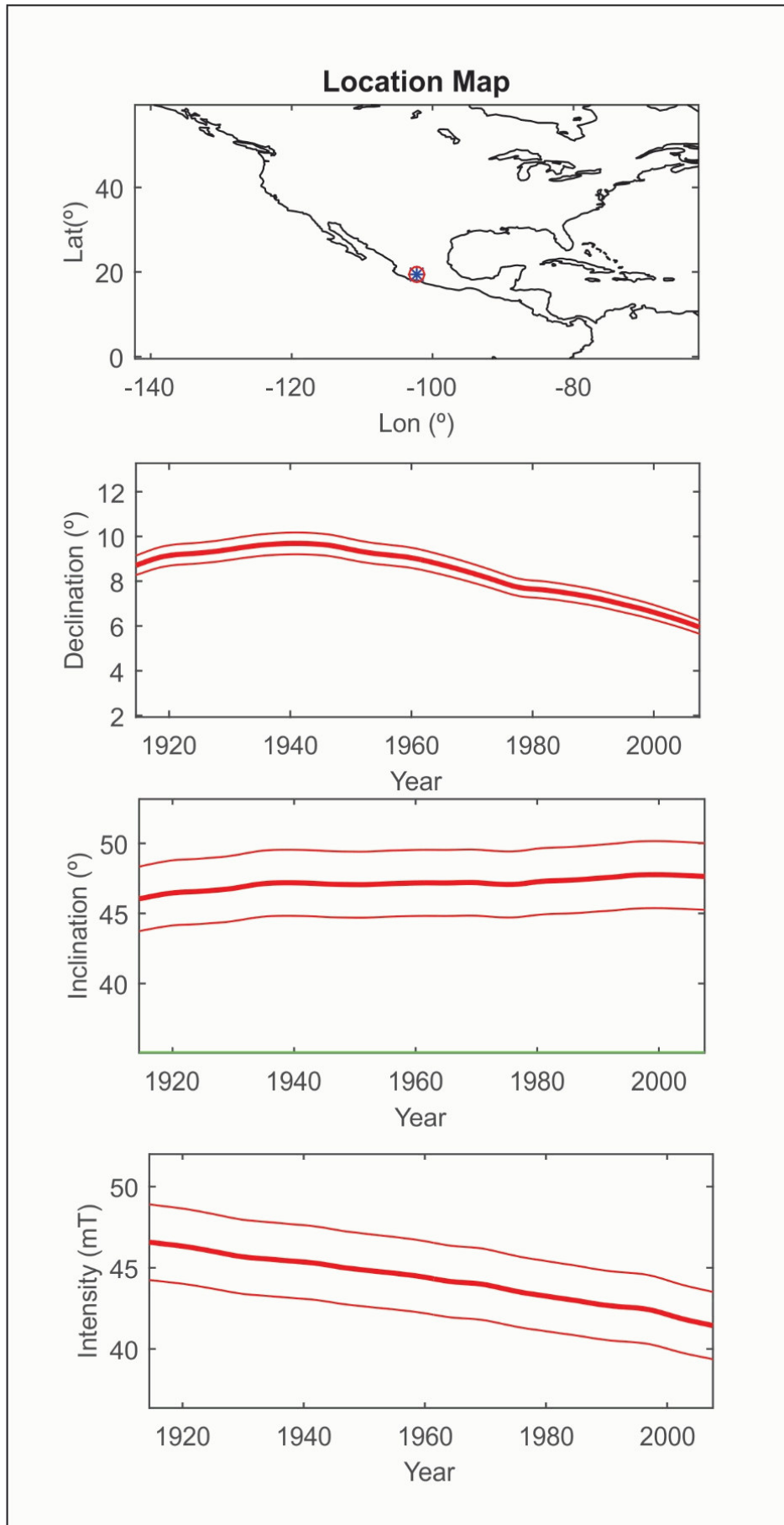


Figura 4. Curvas de variación del campo geomagnético desde 1914 bajo la plataforma de datación de Pavón-Carrasco *et al.* (2011).

al. 2015; Goguitchaichvili *et al.* 2016; Hernández Álvarez *et al.* 2017). Dentro del presente trabajo se describe de manera breve la manera de utilizar la curva dentro del *software* denominado *Archaeomagnetic Dating by Paleosecular Variation Curves*:

- Es fundamental que la computadora o el ordenador que se utilice tenga el *software* *MATLAB*.

- Es necesario descargar el *software* *archaeo_dating* de la página http://pc213fis.fis.ucm.es/archaeo_dating/download.html.

- El tener el archivo *.dat*, donde está contenida la información de la curva desarrollada en el presente trabajo, dentro de la carpeta del *software* *archaeo_dating*.

- Al ejecutar *MATLAB*, es necesario ir a la carpeta donde está el *software* *archaeo_dating* y ejecutar la orden: `> archaeo_dating`.

- La ventana que se abre nos ofrece tres subventanas: *Archaeomagnetic Data*, *Choose your master PSVC* y *Parameters*, además del botón *Dating*.

- Dentro de *Archaeomagnetic Data* es donde hay que poner la información magnética junto con los parámetros de incertidumbre (α_{95} y σ_I) y las coordenadas del sitio de interés.

- En *Parameters* se debe seleccionar *Entire Interval* y la probabilidad a la cual se desea hacer el ejercicio de datación.

- Por último, en *Choose your master PSVC*, la única opción a la cual se debe poner atención dentro del presente ejercicio de datación es a la pestaña *New PSVC*,

en donde se escoge si se desea hacer datación con los parámetros magnéticos por separado o con el vector completo *Full Vector*.

- Al seleccionar cualquiera de las cuatro opciones anteriores, es importante poner de nuevo las coordenadas geográficas del sitio de interés y seleccionar el archivo *.dat*.

- Finalmente, para terminar, se debe presionar el botón *Dating*, el cual proporciona la edad más probable.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de los proyectos CONACyT n.º 252149 y UNAM-DGAPA-PAPIIT IN101717.

CONCLUSIÓN

Luego de la selección y de los tratamientos estadísticos antes descritos, el registro del CMT obtenido en México por el Observatorio Geomagnético permite lograr las curvas de variación secular de cada uno de sus componentes —declinación, inclinación e intensidad— para los últimos 100 años. Estas curvas cuentan con la resolución y calidad adecuadas para ser utilizadas como herramienta de datación arqueomagnética.

REFERENCIAS

- CAMPOS-ENRÍQUEZ, J. O., E. HERNÁNDEZ-QUINTERO, H. NOLASCO-CHÁVEZ, A. OROZCO-TORRES, C. CAÑÓN-AMARO, G. ÁLVAREZ-GARCÍA, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI. 1994. A Preliminary Assessment of IGRF-1990 for Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 82/2: 105-111.
- CAÑÓN, A., J. E. HERNÁNDEZ, H. NOLASCO, A. OROZCO. 1993. Cartas magnéticas de la República Mexicana para la época 1990.0. Instituto de Geofísica (UNAM), Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). México.
- CARRANCHO, A., J. J. VILLALAIN, F. J. PAVÓN-CARRASCO, M. L. OSETE, L. G. STRAUS, J. M. VERGÉS, J. M. CARRETERO, D. E. ANGELUCCI, M. R. GONZÁLEZ-MORALES, J. L. ARSUAGA, J. M. BERMÚDEZ DE CASTRO, E. CARBONELL. 2013. First directional European palaeosecular variation curve for the Neolithic based on archaeomagnetic data. *Earth and Planetary Science Letters* 380: 124-137.
- CIFUENTES, G., E. HERNÁNDEZ-QUINTERO, E. CABRAL, R. CHÁVEZ-SEGURA, J. URRUTIA FUCUGAUCHI, A. L. MARTÍN DEL POZZO, C. ARANGO. 1998. Simultaneous Magnetic Observations at Teoloyucan Magnetic Observatory and Popocatepetl Volcano. *Revista Geofísica* 48: 149-159. Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. 2012. *Servicio Meteorológico Nacional: 135 años de historia en México*. ISBN: 978-607-7908-63-0. 76 pp.
- FIGUIER, L. 1878. *L'année scientifique et industrielle*. Hachette.
- FLORES-RUIZ, J. H., R. MARINES-CAMPOS, J. E. HERNÁNDEZ-QUINTERO, J. O. CAMPOS-ENRÍQUEZ, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI. 2000. Evaluación Geo-Estadística de la Red de Estaciones Magnéticas de la República Mexicana. *Revista Geofísica* 52-53: 107-122. Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

- FUKUSHIMA, N. 1994. Some topics and historical episodes in geomagnetism and aeronomy. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 99/A10: 19113-19142.
- GOGUITCHAICHVILI, A., R. GARCÍA-RUIZ, F. J. PAVÓN-CARRASCO, J. J. MORALES-CONTRERAS, A. M. SOLER-ARECHALDE, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI. 2018. Last three millennia Earth's magnetic field strength in Mesoamerica and southern United States: Implications in geomagnetism and archaeology. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 279: 79-91.
- GOGUITCHAICHVILI, A., J. MORALES, R. ESPARZA LÓPEZ, A. M. SOLER, J. URRUTIA FUCUGAUCHI, M. CERVANTES SOLANO. 2016. Primer intento de datación de pinturas murales mesoamericanas. *Arqueología Iberoamericana* 29: 3-8.
- HENRY, R. 1878. Report of the Kew Committee for the year ending October 31, 1878. *Proceedings of the Royal Society of London* 28: 80-97.
- HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, H., S. ORTIZ-RUIZ, A. GOGUITCHAICHVILI, J. MORALES, M. CERVANTES-SOLANO. 2017. Intervención arqueomagnética del horno de la hacienda San Pedro Cholul (Mérida, Yucatán). *Arqueología Iberoamericana* 36: 3-9.
- HERNÁNDEZ-QUINTERO, E., O. CAMPOS-ENRÍQUEZ, G. CIFUENTES-NAVA. 2001. A comparison between satellite data and geomagnetic stations over Mexico. *Contributions to Geophysics and Geodesy* 31/1: 217.
- HERNÁNDEZ-QUINTERO, E., H. NOLASCO-CHÁVEZ, J. O. CAMPOS-ENRÍQUEZ, C. CAÑÓN-AMARO, A. OROZCO-TORRES, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, G. ÁLVAREZ-GARCÍA. 1994. Evaluación preliminar del campo geomagnético de referencia internacional IGRF-1990 para México y anomalías magnéticas corticales. *Geofísica Internacional* 33/2: 235-241.
- HERNÁNDEZ, E., A. OROZCO. 1997. Magnetic field work and IGRF models for Mexico, three examples for the 20th Century. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* 49/2-3: 387-392.
- HUMBOLDT, A. VON. 1867. *Cosmos*, tomo IV, pág. 67. París.
- OROZCO Y BERRA, M.
- 1864. *Memoria para la carta hidrográfica del Valle de México*. Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, México. 185 pp.
- 1867. *Memoria para el plano de la ciudad de México*. Ministerio de Fomento, México. 231 pp.
- PAVÓN-CARRASCO, F. J., J. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, M. L. OSETE, J. M. TORTA. 2011. A Matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science* 38/2: 408-419.
- PUNZO DÍAZ, J. L., J. MORALES, A. GOGUITCHAICHVILI. 2015. Evidencia de escorias de cobre prehispánicas en el área de Santa Clara del Cobre, Michoacán, Occidente de México. *Arqueología Iberoamericana* 28: 46-51.
- REYES, V. 1884. *Memoria sobre el departamento magnético del observatorio meteorológico central de México*. 111 pp.
- SANDOVAL, O. R. 1950. *Elementos magnéticos en la República Mexicana*. Servicio Geomagnético, Instituto de Geofísica, UNAM. México. 182 pp.
- SONNTAG, A. 1860. *Smithsonian Contributions to Knowledge. Observations on terrestrial magnetism in Mexico, conducted under the direction of Baron Von Muller, with notes and illustrations of an examination of the Volcano Popocatepetl and its vicinity*. Washington. 60 pp.