



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional De Estudios Superiores,
Unidad Morelia

ESTUDIO ARQUEOMAGNÉTICO INTEGRAL DE
ESTRUCTURAS QUEMADAS LOCALIZADAS EN LA
ZONA ARQUEOLÓGICA DE TEOTIHUACÁN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A :

KAREN ARREOLA ROMERO

TUTOR

DR. AVTANDIL GOGICHAISHVILI

CO-TUTOR

DR. MIGUEL ÁNGEL CERVANTES SOLANO

Morelia, Michoacán

Agosto, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 05** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **09 de marzo del 2022**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Karen Arreola Romero** adscrita a la Licenciatura en **Geociencias** con número de cuenta 418126833, quien presenta la tesis titulada: **"Estudio arqueomagnético integral de estructuras quemadas localizadas en la zona arqueológica de Teotihuacán"**, bajo la dirección como **tutor** del Dr. Avtandil Gogichaishvili y como **co-tutor** el Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. Gabriel Vázquez Castro
Vocal:	Dra. Ana María Soler Arechalde
Secretario:	Dr. Avtandil Gogichaishvili
Suplente 1:	Dr. Gerardo Cifuentes Nava
Suplente 2:	Dra. Ana Luz Caccavari Garza

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a 03 de junio del 2022.

DRA. YUNUEN TAPIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)56.23.73.00, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos académicos

A nuestra máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme la oportunidad de estudiar en la Escuela Nacional de Estudios Superiores ubicada en mi ciudad natal Morelia, Michoacán.

A la licenciatura en Geociencias, por darme las herramientas para convertirme en un profesionalista comprometido con la tierra, nuestro hogar.

A los apoyos económicos que me fueron otorgados a través de las becas “AEA” y “Excelencia Grupo BAL”.

A mis tutores, el Dr. Avto Gogichaishvili y el Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano por su apoyo y guía para realizar el presente trabajo.

A los miembros del jurado examinador, Dr. Gabriel Vázquez Castro, Dra. Ana María Soler Arechalde, Dr. Gerardo Cifuentes Nava y Dra. Ana Luz Caccavari Garza, por su revisión y observaciones del presente trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo para el proyecto N° 252149 y a la beca DGAPA-PAPIIT N ° IN101920.

Agradezco infinitamente a la Dra. Gloria Torres y al Dr. Jorge Archer (Instituto Nacional de Antropología e Historia) y a la Dra. Verónica Ortega (Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Valle de Teotihuacán) por las facilidades brindadas durante este trabajo.

Agradecimientos personales

Le doy las gracias a mis padres y hermano por su apoyo y compañía a lo largo de mi vida, por su guía y por motivarme a cumplir mis metas.

A mis amigos, por darme su apoyo y consejos a lo largo de esta etapa.

ÍNDICE

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	14
Antecedentes arqueológicos	14
Planificación de la ciudad	15
Sociedad y gobierno	17
Colapso	18
Hipótesis y Objetivos	23
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	25
El campo magnético terrestre	25
Introducción	25
Origen del campo magnético	26
Elementos del campo magnético terrestre	29
Variaciones del campo magnético terrestre	30
Inversiones de polaridad	32
Paleomagnetismo	34
Arqueomagnetismo	43
Desarrollo histórico del Arqueomagnetismo	48
CAPÍTULO 3. EL MÉTODO ARQUEOMAGNÉTICO	59
Base de datos arqueomagnética GEOMAGIA50	60
CAPÍTULO 4. ESTUDIOS ARQUEOMAGNÉTICOS EN MÉXICO	67
Trabajos realizados antes del año 2000	70
Investigaciones arqueomagnéticas recientes	76
CAPÍTULO 5. ZONA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA	83
Zona de muestreo	83
Análisis de laboratorio	84
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	86
Mineralogía magnética	86
Desmagnetización por campos alternos	87
DISCUSIÓN	90
	5

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	93
REFERENCIAS	95

Índice de figuras

<i>Figura 1.1. Vista aérea de la zona arqueológica de Teotihuacán</i>	14
<i>Figura 1.3. Escultura de Huehuetéotl, con la cara contra el piso, hallada en Teopancazco. Manzanilla, 2002</i>	20
<i>Figura 1.4. Entierro coyotlatelco en la cueva del Pirul. Manzanilla, 1996</i>	21
<i>Figura 2.4. Esquema del dinamo autoexcitable de Bullard (Bullard. 1949)</i>	28
<i>Figura 2.5. Interpretación 3D del campo magnético terrestre simulado con el modelo de geo-dinamo Glatzmaier-Roberts. Está ilustrada con un conjunto de líneas de campo magnético (Glatzmaier, 2002)</i>	29
<i>Figura 2.6. Componentes del campo magnético terrestre</i>	30
<i>Figura 2.7. Variación del norte magnético desde 1990-2020, (Nature; World Data Center of Geomagnetism)</i>	31
<i>Figura 2.8. Representación del momento de inversión del campo magnético terrestre, Glatzmaier, 2002</i>	32
<i>Figura 2.9. Escala de tiempos de polaridad geomagnética, Lowrie, 2007</i>	33
<i>Figura 2.10. Relación entre la magnetización y el campo magnético aplicado, (Villalín Santamaría, J.J, 2016)</i>	35
<i>Figura 2.11. Valores de susceptibilidades de algunas sustancias (Catalá, J.D., Abad, J., 2018).</i>	35
<i>Figura 2.13. Comportamiento de los materiales diamagnéticos en presencia de un campo magnético (Autor: Karen Arreola Romero)</i>	36
<i>Figura 2.13. Comportamiento de los materiales paramagnéticos en presencia de un campo magnético. (Autor: Karen Arreola Romero)</i>	37
<i>Figura 2.14. Comportamiento de los materiales ferromagnéticos en presencia de un campo magnético. (Autor: Karen Arreola Romero)</i>	37

<i>Figura 2.15. Diagrama del ciclo de histéresis</i>	40
<i>Figura 2.16. Diagrama ternario de óxidos de hierro y titanio (Lowrie, 2007)</i>	42
<i>Figura 2.17. Brechas composicionales de las series titanomagnetita y titanohematita (Butler, 2004)</i>	42
<i>Figura 2.18. Muestras tomadas en La Quemada. A) Diagrama de Zijderveld, B) Redes estereográficas que muestran las direcciones de las muestras (López-Delgado, V. et al., 2019)</i>	45
<i>Figura 2.19. Adquisición de magnetización termoremente en la pared de un horno (Soler-Arechalde, 2007).</i>	46
<i>Figura 2.20. Variación secular en Tepancazo (Wolfram 1990)</i>	46
<i>Figura 2.21. Ilustración del método Thellier-Therllier para determinar la paleointensidad absoluta</i>	47
<i>Figura 2.22. Ejemplos de materiales arqueológicos estudiados con técnicas arqueomagnéticas, Gómez-Paccard et. al., 2016</i>	48
<i>Figura 2.23. Distribución espacial de los datos arqueomagnéticos en los últimos 10 000 años (Carrancho, A et al., 2015)</i>	49
<i>Figura 2.24. Distribución temporal de los datos arqueomagnéticos en los últimos 10 ka, registrados en el base de datos GEOMAGIA50 (Carrancho, A et al., 2015)</i>	50
<i>Figura 2.25. A) Curva de variación secular en la Península Ibérica; B) Curva de variación secular en Francia (Gómez-Paccard et. al., 2006)</i>	51
<i>Figura 2.26 Ejemplo de datación arqueomagnética de horno en Bélgica. (Pavón-Carrasco et al., 2009)</i>	52
<i>Figura 2.27. Direcciones arqueomagnéticas en cuatro hornos de cerámica en Cologne, Alemania (Reinders et al., 1999)</i>	53
<i>Figura 2.28. Ejemplos de muestras: a) en cubos; b) en cilindros</i>	54
<i>Figura 2.29. Técnicas de muestreo, Pavón-Carrasco, F.J et. al 2015</i>	54
<i>Figura 2.30. Diagramas de Zidjerveld usando a) TH y b) AF en dos muestras de un horno romano en Toledo, España (Catanzariti et al., 2012)</i>	56
<i>Figura 3.1. Estudios arqueomagnéticos por año, en la base de datos GEOMAGIA50.v3.4</i>	60

<i>Figura 3.2. Distribución geográfica de los sitios arqueomagnéticos registrados en el GEOMAGIA50. a) datos direccionales; b) datos de intensidad</i>	61
<i>Figura 3.3. Distribución temporal de los datos arqueomagnéticos contenidos en GOMAGIA50.v3.4. a) direcciones, b) intensidad, c) hemisferio norte, d) hemisferio sur</i>	63
<i>Figura 3.4. Materiales más utilizados en la base de datos GEOMAGIA50</i>	64
<i>Figura 4.1. Portada del libro: Arqueometría. Técnicas nucleares y convencionales aplicadas a la investigación arqueológica, de los autores Esparza-López, R., y Cárdenas-García, E.</i>	67
<i>Figura 4.2. Zonas de estudios arqueomagnéticos en México (Soler-Arechalde et. al, 2019)</i>	69
<i>Figura 4.3. Localización de los sitios arqueológicos muestreados en Mesoamérica (Soler-Arechalde, 2014)</i>	71
<i>Figura 4.4. Descripciones petrográficas y propiedades magnéticas de las rocas muestreadas en México (Nagata, 1965)</i>	72
<i>Figura 4.5. Varios ejemplos de curvas termomagnéticas. (Nagata, 1965)</i>	72
<i>Figura 4.6. Fotografía de M-160, a) cara superior y seccional de M-160, b) vector del momento magnético total M y sus componentes</i>	73
<i>Figura 4.7. Edades, parámetros magnéticos y tipos de muestras de Arizona y México (Bucha et al., 1970)</i>	74
<i>Figura 4.8. a) Cabeza de tortuga de Izapa, Chiapas (Malmström, 1976); b) Fat Boys, La Democracia, Guatemala (Malmström, 1979)</i>	75
<i>Figura 4.9. Mapa de México con evidencia de magnetismo en México asociado a esculturas basálticas (Malmström, 2008)</i>	76
<i>Figura 4.10. Localización de la zona arqueológica en el centro de México (Hueda. Y, 2004)</i>	77
<i>Figura 4.11. Muestra usando la técnica de encapsulado en madera, (Hueda. Y, 2004)</i>	78
<i>Figura 4.12. Curva de PSV para Mesoamérica, con datos de sitios arqueológicos, rocas volcánicas, datos históricos y de observatorio (Hueda. Y, 2004; Wolfram, 1973, 1990)</i>	78
<i>Figura 4.13. Toma de muestras de murales (Gogutchaisvili et al., 2016)</i>	79

Figura 4.15. Ubicación de la zona de exploración (Soler-Arechalde, A.M. et al, 2006) 80

Figura 4.16. Ciclo de histéresis magnética para las muestras de Xalla y Teopancazo (Soler-Arechalde, A.M. et al, 2006) 80

Figura 4.17. Rocas y cerámicas de Puertas de Rolón, Colima; a) Reconstrucción hipotética de la cerámica recolectada; b) Resultados de la datación arqueomagnética (Morales, J et. al., en 2013) 81

Figura 5.1. Vista aérea de la zona arqueológica de Teotihuacán que muestra las localidades de muestreo 83

Figura 6.1. Curva termomagnética continua (susceptibilidad vs temperatura). La línea corresponde a la etapa de calentamiento, mientras que la línea azul a la etapa de enfriamiento 86

Figura 6.2. Diagramas ortogonales vectoriales representativos obtenidos durante los tratamientos de desmagnetización progresiva de campo alterno. NRM indica el valor inicial de la magnetización en A/m, se indica el valor pico del campo aplicado en cada paso en mT. 87

Figura 6.3. Diagramas Arai representativos obtenidos durante los experimentos de paleointensidad. NRM removido vs TRM adquirido para los pisos quemados de Teotihuacán y sus correspondientes diagramas ortogonales. 89

Figura 6.4. Datación arqueomagnética utilizando el modelo geomagnético global SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et. al 2011, 2014), para las muestras tomadas, basadas en el vector completo geomagnético a) Declinación; b) Inclinación y c) Intensidad absoluta 91

Índice de tablas

<i>Tabla 2.1 Temperatura de Curie de los minerales ferromagnéticos más comunes en la corteza terrestre.</i>	39
<i>Tabla 4.1 Sitios arqueológicos, muestras, periodo y referencias de publicaciones de estudios arqueomagnéticos en México</i>	69
<i>Tabla 4.2. Direcciones arqueomagnéticas medias de los murales estudiados (Goguitchaichvili et al, 2004)</i>	79
<i>Tabla 6.1. Paleodirecciones medias determinadas por estructura</i>	88
<i>Tabla 6.2. Datos de paleointensidad de Thellier para las muestras aceptadas</i>	90

RESUMEN

En el presente trabajo se reportan los resultados de un estudio arqueomagnético realizado a tres estructuras quemadas ubicadas en las cercanías de la Plaza de la Luna dentro de la zona arqueológica de Teotihuacán, con la finalidad de obtener sus edades mediante el método de datación arqueomagnética. Las edades obtenidas permitieron confirmar que estas tres estructuras fueron quemadas durante la última etapa constructiva de la ciudad (EDAD).

Se realizaron tratamientos magnéticos y de magnetismo de rocas en 24 muestras los cuales permitieron identificar que los minerales magnéticos presentes en ellas son principalmente titanomagnetitas con bajo contenido en titanio, así como obtener las direcciones paleomagnéticas e intensidades arqueomagnéticas absolutas promedio.

Los tratamientos magnéticos consistieron en la desmagnetización progresiva por campos alternos y experimentos de paleointensidad absoluta mediante el método de Thellier los cuales permitieron obtener las direcciones paleomagnéticas en las 24 muestras y 15 determinaciones de paleointensidad absoluta. Al comparar estos resultados con los valores esperados según las curvas sintéticas de variación paleosecular para esta región, fue posible realizar la datación arqueomagnética y obtener edades probables para cada una de las estructuras estudiadas. Los resultados mostraron que las estructuras fueron quemadas entre 327 y 441 d.C sugiriendo que Teotihuacán experimentó varios episodios de incendios posiblemente provocados y controlados para actos públicos con valor simbólico, como los rituales de cierre de ciclo o el inicio de una nueva etapa constructiva. Estas nuevas edades son congruentes con las dataciones isotópicas previas.

Palabras clave: Mesoamérica, Teotihuacán, Arqueomagnetismo, Arqueointensidad, Colapso, Episodios incendiarios, Cronología Absoluta, Geofísica

ABSTRACT

In this work, we report the results of the archaeomagnetic study carried out in order to obtain the ages of three burnt structures located near the Plaza de la Luna within the archaeological zone of Teotihuacan. The ages obtained confirmed that these three structures were burnt during the last constructive stage of the city.

Magnetic and rock magnetism treatments were carried out on 24 samples, which allowed us to identify that the magnetic minerals present in the samples studied are mainly titanomagnetite with low titanium content, as well as the palaeomagnetic directions and average absolute intensities.

The magnetic treatments consisted of progressive demagnetization by alternating fields and absolute palaeointensity experiments using the Thellier method, which allowed us to obtain the palaeomagnetic directions in 24 of the samples and 15 absolute palaeointensity determinations. With these results, it was possible to perform archaeomagnetic dating by comparing these values with those expected from synthetic palaeosecular variation curves for the same region. The results indicated that the structures were burned between 327 and 441 AD suggesting that Teotihuacan experienced several episodes of fires possibly set and controlled for public acts with symbolic value, such as closing rituals or the beginning of a new construction stage. These new ages are congruent with previous isotopic dating.

Keywords: Mesoamerica, Teotihuacán, Archaeomagnetism, Archaeointensity, Collapse, Incendiary episodes, Absolute Chronology, Geophysics.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Antecedentes arqueológicos

Teotihuacán: la ciudad de los dioses

La zona arqueológica de Teotihuacán se encuentra en el estado de México, siendo uno de los sitios prehispánicos más importantes; Teotihuacán ha sido una de las zonas más estudiadas por los arqueólogos de todo el mundo esto se debe a que fue una de las ciudades prehispánicas mejor planificadas y más extensa (Figura 1.1).

El nombre de Teotihuacán significa “el lugar donde fueron creados los dioses” este nombre se debe a los mexicas que llegaron siglos después del abandono de la ciudad, el cual tuvo lugar aproximadamente entre el 550-650 d.C. La ciudad antigua se encuentra ubicada a 2250 m sobre el nivel del mar en las tierras altas y semiáridas del centro de México, estuvo habitada muy probablemente desde el año 0 (cero) d.C con una población cercana a los 100 000 habitantes en un área de 20 km² (Cowgill, 2008).



Figura 1.1. Vista aérea de la zona arqueológica de Teotihuacán

Planificación de la ciudad

La ciudad fue planeada cuidadosamente con un trazado reticular que se encuentra regido por un eje central, la Calzada de los Muertos, con una dirección N-S el cual comienza en la pirámide de la Luna, pasando por la Pirámide del Sol y termina en la ciudadela (Figura 1.2).

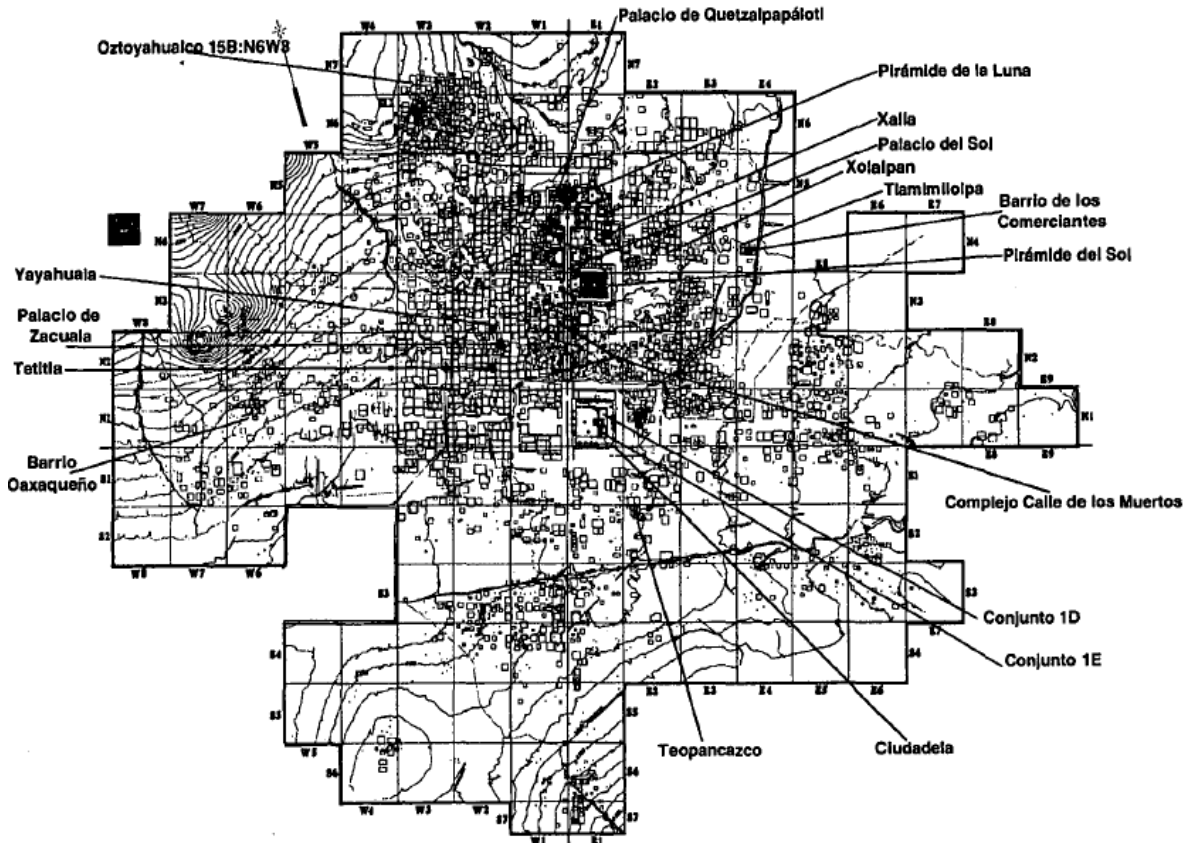


Figura 1.2. Mapa de la ciudad de Teotihuacán. (Millon, 1973)

Los edificios más importantes que se encuentran en Teotihuacán son la Pirámide del Sol, la Pirámide de la Luna, Pirámide de la Serpiente Emplumada, los cuales también deben su nombre a los mexicas.

La pirámide del Sol fue construida a los inicios de la ciudad, es la tercera pirámide más grande de la época prehispánica, y se cree que en un principio fue más alta debido a que tenía un santuario en la cima, pero actualmente

solo hay una plataforma cuadrada irregular. Está orientada al punto exacto del horizonte por donde se oculta el Sol.

La Pirámide de la Luna es la segunda pirámide más grande de Teotihuacán y consta de siete etapas de construcción. La primera etapa es una pequeña plataforma de 23.5 x 23.5 m en la base, mediante dataciones radiométricas se encontró que la edad de esta etapa se encuentra entre el 100 a.C y el 100 d.C, siendo la estructura más antigua en Teotihuacán; con el paso del tiempo se fue ampliando la pirámide en varias etapas siendo la última con edades de 350 d.C. Además, en la zona se encontraron tumbas intactas que contenían seres humanos sacrificados y animales, así como ricas ofrendas de piedras preciosas, obsidiana y otros materiales (Sugiyama y López Luján, 2006).

La pirámide de la Serpiente emplumada o también conocida como el Templo de Quetzalcóatl, está ubicada dentro de la Ciudadela, mediante excavaciones realizadas entre los años 1988 y 1989, se tiene la teoría que fue construida alrededor del 200 d.C, posterior a la Pirámide la Luna; es la tercera pirámide más grande en Teotihuacán, se destaca por el faldón y un panel de piedra tallada en la fachada de sus cuatro lados con estructuras tridimensionales de serpientes emplumadas, se encontraron cerca de 200 víctimas de sacrificios atadas en entierros masivos, donde muchos eran jóvenes con pertrechos militares, mujeres jóvenes y hombres mayores acompañados de riquezas. Se considera que los soldados eran enemigos capturados que fueron enterrados para proteger el contenido dentro de la pirámide; también se desconoce si varios monarcas fueron enterrados en este templo debido a que fue saqueado en algún momento y quedaron casi vacíos (Sugiyama, 2005).

Sociedad y gobierno

Existe escasa evidencia de cómo estaba gobernada la ciudad, a diferencia de otros centros de Mesoamérica, no se tiene representaciones que narren las diferentes dinastías en la zona así como también la ausencia de tumbas y nombres de sus reyes o gobernantes, algunos autores piensan que había un gobernante único en las primeras etapas (Cabrera *et al.*, 1990; Millon 1988), también se considera que Teotihuacán fue regido por monarcas que poseían una gran ambición y un gran poder, esto se sugiere debido al rápido crecimiento de la ciudad, así como la escala y audacia de sus pirámides y la distribución ordenada de la sociedad (Cowgill, 2008) y algunos otros se inclinan a pensar en un co-gobierno colectivo (Manzanilla 1993; Pasztory 1988; Paulinyi, 1981).

Debido a que era una ciudad sagrada y centro de peregrinación, la sociedad sacerdotal tenía un papel central en Teotihuacán, de acuerdo a diversas manifestaciones teotihuacanas el grupo que se encontraba en la cabeza de la sociedad fue el sacerdotal, se puede reconocer a personajes anónimos tirando semillas u otros símbolo de fertilidad; la hipótesis planteada por Manzanilla (2001), sugiere que el gobierno estuvo regido por colectivo sacerdotal ya que no había una distinción clara entre la función política y religiosa, pero con el paso del tiempo este tipo de gobierno empeoro y no estuvo exento de luchas por el poder entre sus gobernantes, como lo muestran el cese de las construcciones y la profanación del templo de Quetzalcóatl aproximadamente hacia el año 250 d.C.

La estratificación de la sociedad teotihuacana ha sido abordada por dos modelos, el primero fue propuesto por Millon (1976, 1981), Cowgill (1992) y otros, en este modelo hay varios niveles que se encuentran claramente separados por distinciones sociales; por otro lado, el modelo propuesto por Manzanilla (1993b) y Pasztory (1988) sugiere una gama de sutiles

diferencias socioeconómicas entre grupos, estas diferencias son tan sutiles que no creaban estratos sociales.

Millon (1976) señala que la sociedad teotihuacana estuvo formada por seis niveles socioeconómicos y culturales que se encontraban definidos, en la cabeza se encontraba la élite gobernante, se piensa que este grupo pudo haber habitado en el Palacio de Quetzalcóatl, la Pirámide del Sol o en los “palacios” que se encuentran al norte y al sur del Palacio de Quetzalcóatl; el segundo nivel era representado por personas de muy alto estatus como los sacerdotes de los complejos piramidales; el tercer; cuarto y quinto nivel pertenecía a los de estatus intermedio que se encontraba el Palacio de Zacuala, Teopancazco y Xolalpan, respectivamente; por último el sexto nivel comprendía a los de un estatus más bajo y se encontraban en Tlamimilolpa.

El proyecto del mapeo de Millon (Figura 1.2) descubrió dos distritos con cerámica importada de otras regiones o de fabricación local pero extranjera, hacia el occidente se encontraron rastros de civilizaciones de Oaxaca, mientras que en el noroeste se encontró cerámica importada de las tierras bajas del Golfo y regiones mayas (Cowgill, 2008), siendo una ciudad tan grande es razonable que Teotihuacán fuera étnicamente diversa, pero aún no se conoce el rol que tenía los extranjeros, si al llegar formaban parte de la sociedad o eran extraños en la ciudad.

Colapso

El colapso de Teotihuacán como un centro importante se debe, en parte, a los cambios que ocurriendo en Mesoamérica, Manzanilla (2003) realizó fechamientos arqueomagnéticos y radiocarbónicos que demuestran los diversos eventos que tuvieron lugar en la caída de esta civilización, distinguiendo cuatro eventos: i) el incendio sistemático de los templos y algunas zonas más, ii) abandono de la ciudad por los teotihuacanos, iii)

saqueo por los grupos coyotlatelco y iv) reocupación de sectores por los grupos coyotlatelco.

Existen evidencias de fuego en la parte central de la ciudad, Millon (1988) detectó evidencias en todas las estructuras monumentales de la Calzada de los Muertos, así como en las escalinatas y plataformas de los templos, las muestras examinadas mostraron evidencias claras de un incendio al 5%; Daniel Wolfam (1990) también muestreo pisos, columnas y hoyos quemados; estas muestras se tomaron de La Ciudadela y los fechamientos radiométricos arrojaron edades alrededor de 475 d.C.; Soler y Urruita (2001) fecharon arqueomagnéticamente los pisos quemados en Xalla y obtuvieron edades hacia 550 d.C.; Manzanilla (2003) recolectó pedazos de madera carbonizada en Teopancazco, de la cual la fecha obtenida por radiocarbón fue de 555 d.C; las muestras de morillos carbonizados recolectados pero a pesar de yacer en el piso al momento del abandono de la ciudad las fechas que se obtuvieron fueron de 210, 235 y 340 d.C.

Otra posibilidad se trata sobre rituales de terminación en los sitios de mayor importancia en la ciudad, esto se cree ya que a mediados de la historia de Teotihuacán se observa un desmantelamiento de La Ciudadela y varias escalinatas de la Calzada de los Muertos, Acosta (1964) menciona que la piedra tallada del Palacio de Quetzalcóatl fue desprendida y estas piedras fueron encontradas en la puerta del Patio de los Pilares.

Otro estudio que respalda la teoría del incendio es el trabajo realizado por Soler-Arechalde *et al.*, (2006) donde tomaron muestras de yesos llamados *estucos* los cuales fueron empleados en la cultura teotihuacana para construir pisos, estructuras, cerámicas y soportes de pinturas murales; estos yesos tanto quemados como no quemados pueden proporcionar un registro preciso y confiables del campo magnético terrestre, los resultados de este estudio arrojaron edades arqueomagnéticas entre 500-575 d.C, las cuales son consistentes con la teoría del gran incendio de Teotihuacán.

En cuanto al abandono de la ciudad, como se mencionó anteriormente hay evidencias de rituales de finalización en varias partes de la ciudad como lo reporta Manzanilla (1993), en estudios más recientes se observó que en la zona de Teopancazco se encontraron representaciones de las deidades Huehuetéotl (dios del fuego) y Tláloc (dios de la lluvia y relámpagos) tiradas en el piso, así como restos de vasijas de piedra rotas y sus fragmentos esparcidos en varios cuartos (Manzanilla, 2002). (Figura 1.3)



Figura 1.3. Escultura de Huehuetéotl, con la cara contra el piso, hallada en Teopancazco. Manzanilla, 2002

Con respecto al saqueo de la ciudad, Armillas (1994) observó que todas las ofrendas han sido extraídas en tiempo de los teotihuacanos, porque un nuevo piso había sido construido sobre otro que previamente había sido saqueado; Sugiyama (2005) menciona que hubo saqueos en la pirámide de Quetzalcóatl, dejando poca evidencia sobre los gobernantes que pudieran

estar enterrados en la pirámide. Con toda esta información se crea la teoría que no solo pudieron ser saqueadas por otras civilizaciones prehispánicas, sino que los mismos teotihuacanos se llevaron consigo sus reliquias (Manzanilla, 2003)

Los coyotlatelcos además de realizar un saqueo sistemático de la ciudad, permanecieron después del abandono de los teotihuacanos, esta teoría se propone a partir de la recopilación de información de estudios anteriores (Bernal 1936; Armillas 1950) porque se encontraron restos de cerámica típica de esta civilización en las últimas construcciones en Teotihuacán (Figura 1.4), además de que sus muertos fueron enterrados encima de los escombros. En el proyecto realizado por Manzanilla en 1996, mediante excavaciones detrás de la Pirámide del Sol y el hallazgo de cerámica tipo coyotlatelco se puede concluir que esta civilización vivió hacia el 600 d.C.



Figura 1.4. Entierro coyotlatelco en la cueva del Pirul. Manzanilla, 1996

Tabla 1.1. Posibles fechas del abandono de la ciudad mediante ritual de finalización (incendio).

Edad	Método de obtención	Referencia
550 ± 25 d.C	Mediante datación arqueomagnética realizadas a muestras de yesos en Teopancazco y Xalla.	Soler-Arechalde <i>et al.</i> , (2006)
555 d.C 575 d.C	Mediante métodos radiométricos muestras de madera carbonizada proveniente de Teopancazco. Mediante fechamientos arqueomagnéticos se obtuvieron las edades del piso que mostraba señales de incendio.	Manzanilla (2003)

Justificación y Objetivos

Justificación

Los estudios arqueomagnéticos en Mesoamérica son de suma importancia, porque con la información proporcionada se puede conocer las edades de los diferentes tipos de culturas, su auge y abandono o declive y de esta manera conocer el pasado de nuestro país. Algunos de los primeros estudios realizados en la zona son: en 2003, Linda Manzanilla realizó fechamientos arqueomagnéticos y radiocarbónicos que demuestran que hubo varios eventos que tuvieron lugar en la caída de la civilización, se distinguieron cuatro eventos: i) el incendio sistemático de los templos y algunas zonas más, ii) abandono de la ciudad por los teotihuacanos, iii) saqueo por los grupos coyotlatelco y iv) reocupación de sectores por los grupos coyotlatelco, otro estudio que respalda el incendio es el realizado por Soler-Arechalde *et. al.*, (2006) donde tomaron muestras de estucos, los cuales eran empleados en la cultura teotihuacana para pisos, estructuras, cerámicas y soportes de pinturas murales; estas muestras proporcionan un registro preciso y confiables del campo magnético terrestre y los resultados de este estudio arrojaron edades entre 500-575 d.C, por lo cual coincide con la teoría del Gran Incendio de Teotihuacán.

A lo largo de los años se ha estudiado esta zona con la intención de obtener edades sobre el periodo de existencia y particularmente su abandono, por lo tanto, los resultados de este trabajo aportan nuevas dataciones las cuales contribuyen al conocimiento y comprensión del abandono de la región aportando datos objetivos sobre las edades en las etapas de la cultura teotihuacana.

Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es, a partir de un estudio arqueomagnético integral en muestras provenientes de tres estructuras pertenecientes a la zona arqueológica, obtener nuevas edades sobre el abandono y declive de Teotihuacán.

Objetivos específicos

- Identificar los minerales magnéticos presentes en las muestras.
- Obtener las componentes direccionales arqueomagnéticas (declinación e inclinación) registradas en las muestras.
- Obtener los valores de la arqueointensidad absoluta registrada en las muestras.
- Determinar las épocas del abandono y declive de Teotihuacán.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El Campo Magnético Terrestre (CMT)

Introducción

A lo largo de la historia el estudio del magnetismo a acompañado al hombre desde la antigua Grecia, Tales de Mileto observó que había rocas que atraían elementos formados por hierro que se encontraban en la ciudad Magnesia de Meandro a las cuales llamaron *magnetitas*; durante el siglo XII en China se desarrolló la brújula (Figura 2.1), Joseph Needham en su libro *Science and Civilization in China* atribuye la invención a del artefacto a la civilización china.

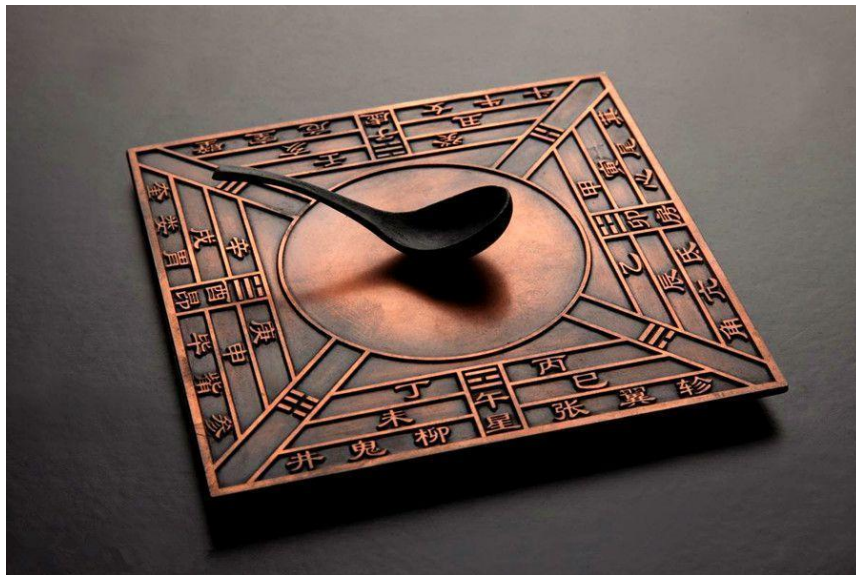


Figura 2.1. Antigua brújula china, llamada Zhi nan zhen, es una aguja al sur (debido a que el sur es la principal dirección en China)

Más adelante por el año de 1600 se publicó, el que sería el primer estudio magnético, *De Magnete* (Figura 2.2) escrito por Sir William Gilbert, médico de la reina Isabel I, en esta obra presenta experimentos y observaciones relacionadas con imanes con la finalidad de explicar la propiedad que tiene

la aguja de la brújula para apuntar siempre al norte; posteriormente Hans Christian Orsted en 1860 demostró que el magnetismo no se limitaba a los imanes, sino que tenía una conexión con la corriente eléctrica, abriendo una puerta para los estudios sobre el electromagnetismo (Villalín Santamaría, J.J, 2016).

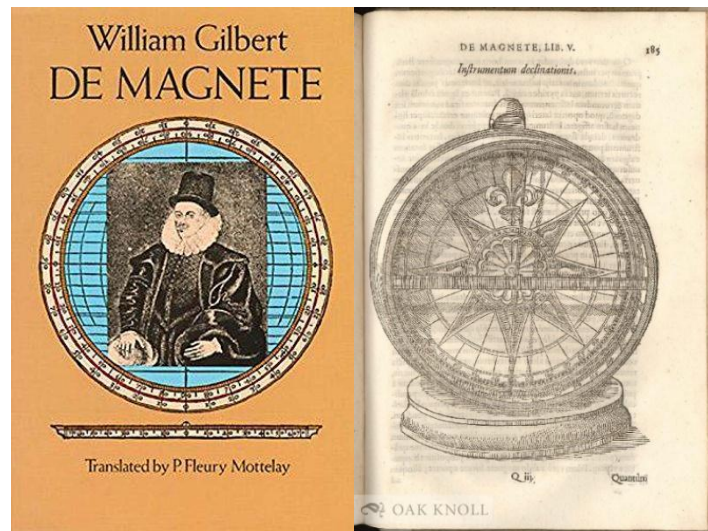


Figura 2.2. Portada del libro escrito por Sir William Gilbert, del lado derecho se encuentra una página del libro, donde se muestra la declinación en las brújulas

Origen del campo magnético

El CMT, campo magnético terrestre, (Figura 2.3) se origina en el núcleo del planeta, Elsasser (1957) propuso la teoría de corrientes parásitas en el núcleo líquido del planeta, la existencia de estas corrientes se confirmó más tarde con exploraciones que se llevaron mediante el empleo de satélites artificiales. En este mecanismo dinámico el movimiento fluido en el núcleo exterior de la Tierra mueve el material conductor (hierro líquido) a través de un campo magnético débil, el cual ya existe, generando una corriente eléctrica, el calor del decaimiento radiactivo en el núcleo induce el movimiento inductivo; y las corrientes eléctricas producen un campo magnético que interactúa con el campo magnético secundario (Elsasser, W.M., 1957).

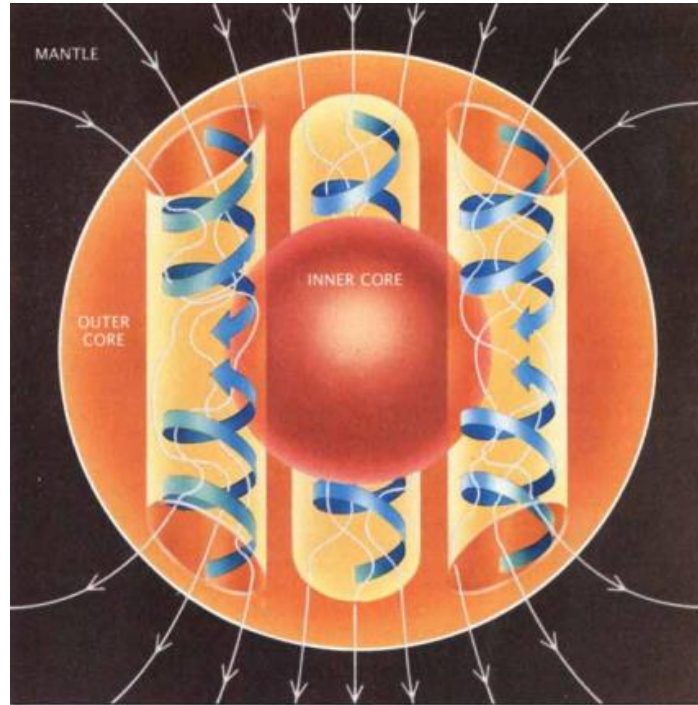


Figura 2.3. Representación de la posible configuración de flujo de fluido y campo magnético en el núcleo (Bloxham, J., Gubbins, D., 1989)

Para intentar de explicar la teoría del dinamo se utilizan cuatro leyes de la teoría electromagnética que describen el comportamiento del campo magnético y las corrientes, en términos de cálculo vectorial; primero es la ley de Ampere, la cual se escribe,

$$\nabla \times B = \mu j \quad (\text{Eq. 1})$$

Donde B es el campo magnético, j es una densidad de corriente y μ es permeabilidad del espacio vacío. La segunda ecuación es la ley de Faraday,

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E \quad (\text{Eq. 2})$$

Esta ley dice que, si un campo magnético varía en el tiempo, entonces un campo eléctrico E es creado. La tercera ecuación el resultado de la forma electromagnética de la ley de Ohm en un conductor, esta ley se escribe,

$$j = \sigma(E + u \times B) \quad (\text{Eq. 3})$$

El conductor, sea sólido o líquido, se mueve a una velocidad u , σ es la conductividad eléctrica en el núcleo, lo cual es de suma importancia para la teoría del geodínamo. Simplificando la tercera ecuación obtendremos la cuarta ley,

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

La cual nos dice que no existen los monopolos magnéticos, por ejemplo, si separas el lado positivo de un imán, este igual tendría un lado positivo y negativo.

Bullard propuso una hipótesis llamada dinamo autoexcitado (Figura 2.4) donde se puede explicar como un disco D que gira sobre su propio eje C en sentido antihorario en presencia de un campo magnético H el cual es paralelo al eje. Se induce una *fem* (fuerza electromotriz) siguiendo la ley de Faraday, la cual depende de la velocidad de giro y el campo H ; además al borde del disco está en contacto con un solenoide circular S que gira en torno al eje C , mientras el otro extremo del solenoide se encuentra conectada al eje de rotación (Bullard, 1949).

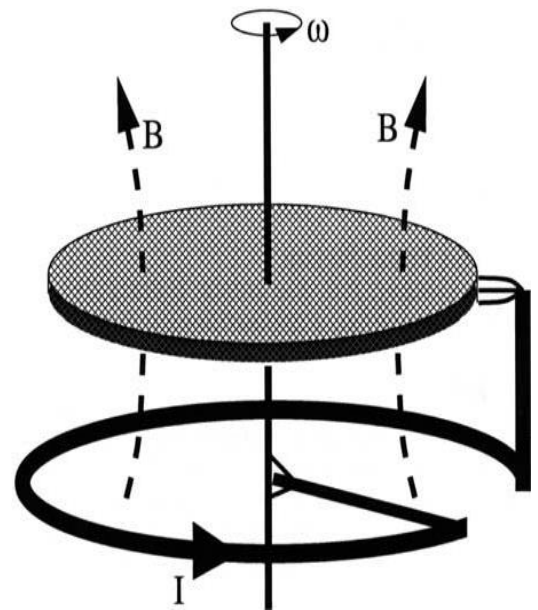


Figura 2.4. Esquema del dinamo autoexcitado de Bullard (Bullard, 1949)

Suponiendo que todo el dispositivo esté hecho de metales conductores entonces la *fem* producirá corrientes eléctricas que pasan a través de D y posteriormente S , C y D formarán un circuito cerrado. La corriente que fluye por S produce un campo magnético paralelo a H y de esta manera incrementarlo; este nuevo campo induce una fuerza mayor y el proceso se repite.

Este modelo es apoyado por los expertos en geomagnetismo debido a que, si en el núcleo terrestre existiera un mecanismo como el del dinamo

autoexcitable, entonces el campo magnético terrestre se mantendría como lo conocemos.

Desde los 90 's se ha buscado una imagen en 3D para conocer el comportamiento del geodinamo, las simulaciones muestran la bipolaridad magnética del campo y el flujo magnético del mismo. Una simulación típica de esta interpretación 3D se encuentra en la figura 2.5, donde se puede observar el campo magnético en forma de líneas, las cuales se generan en el núcleo interno (Glatzmaier, 2002).

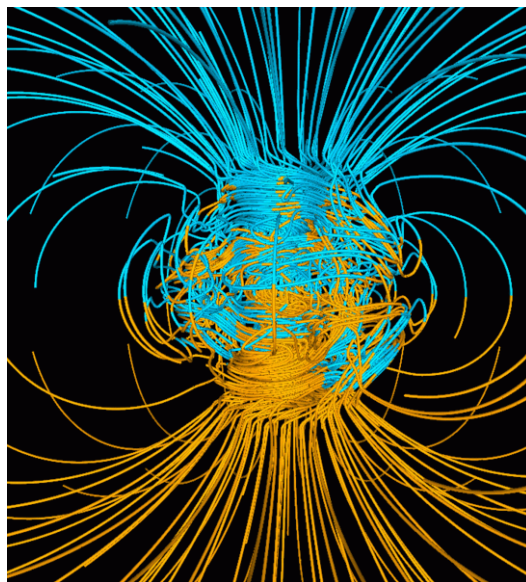


Figura 2.5. Interpretación 3D del campo magnético terrestre simulado con el modelo de geo-dinamo Glatzmaier-Roberts. Está ilustrada con un conjunto de líneas de campo magnético (Glatzmaier, 2002)

Elementos de campo magnético terrestre

Para representar las componentes del campo magnético de la Tierra se acordó de manera internacional que se utilizará un conjunto de nombres y símbolos en un 'sistema derecho', en la figura 2.6 se puede observar los diferentes componentes y su nomenclatura (Campbell, 2003).

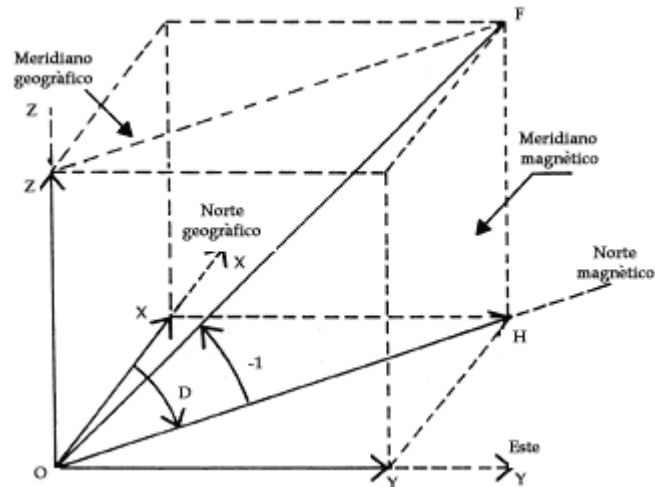


Figura 2.6. Componentes del campo magnético terrestre

La intensidad del campo geomagnético se representa de dos maneras:

- **Componentes ortogonales XYZ:** Las componentes X y Y son las direcciones de campo con valores positivos para el norte y este geográfico, respectivamente, mientras la componente Z es vertical en la Tierra, por lo cual tiene valores negativos.
- **Componentes HDI:** La componente H se considera positiva en cualquier dirección; D es la declinación magnética y se mide desde X hasta H ; por último, la componente I es el ángulo que se forma entre la intensidad total F y la componente horizontal.

Variaciones del campo magnético terrestre

El CMT también presenta variaciones que van desde milisegundos hasta millones de años, las variaciones pequeñas tienen su origen de manera externa (en la ionosfera y magnetosfera) y están fuertemente vinculada a la actividad solar; estas variaciones no son de interés para el paleomagnetismo y arqueomagnetismo.

Por otro lado, las variaciones relacionadas con el campo principal son de largo periodo y fácilmente se observan en los estudios paleomagnéticos, estos cambios son la *variación secular* y las *inversiones/excursiones de polaridad*.

Variación secular

Esta variación consiste en que el campo magnético que se observa en un punto concreto en la Tierra, el cual no es constante a lo largo del tiempo, sino que muestra variaciones en su dirección y su intensidad, estas observaciones solo pueden ser apreciables a lo largo de períodos de decenas o centenares de años (Figura 2.7).

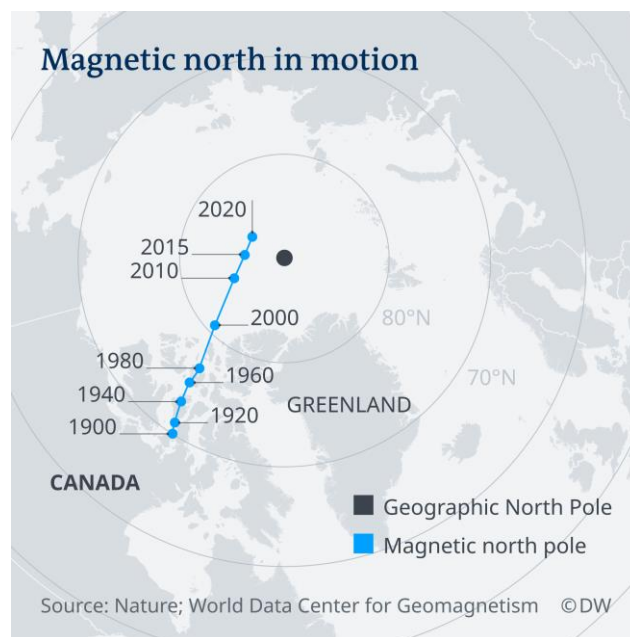


Figura 2.7. Variación del norte magnético desde 1990-2020, (Nature; World Data Center of Geomagnetism)

La importancia del estudio de este fenómeno se debe a que es fundamental para las aplicaciones del paleomagnetismo: el arqueomagnetismo; en esta técnica se utiliza como referencia para la datación de estructuras arqueológicas y se aplica en la arqueología (Gómez-Paccard *et al.*, 2016).

Inversiones de polaridad

El campo magnético terrestre experimenta inversiones de polaridad a lo largo de su historia geológica, existen dos configuraciones del CMT, *la polaridad normal*: el polo sur del dipolo se encuentra en el norte geográfico y *la polaridad inversa* es la configuración opuesta. Estas dos configuraciones han cambiado a lo largo del tiempo, alternándose (Figura 2.8).

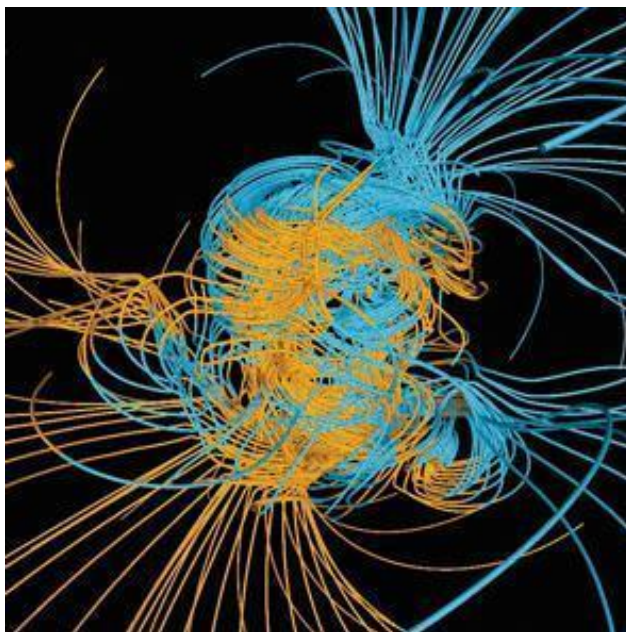


Figura 2.8. Representación del momento de inversión del campo magnético terrestre, Glatzmaier, 2002

A los intervalos de polaridad se denominan *crones*, su duración es variable, pero se encuentran entre 50 000 y 5 Ma; dentro de los *crones* hay periodos de entre 20 000 - 50 000 años que se denominan *subcrones*. La figura 2.9 corresponde al Supercrón Normal del Cretácico, donde se puede observar la polaridad magnética para los últimos 160 Ma (Lowrie, 2007).

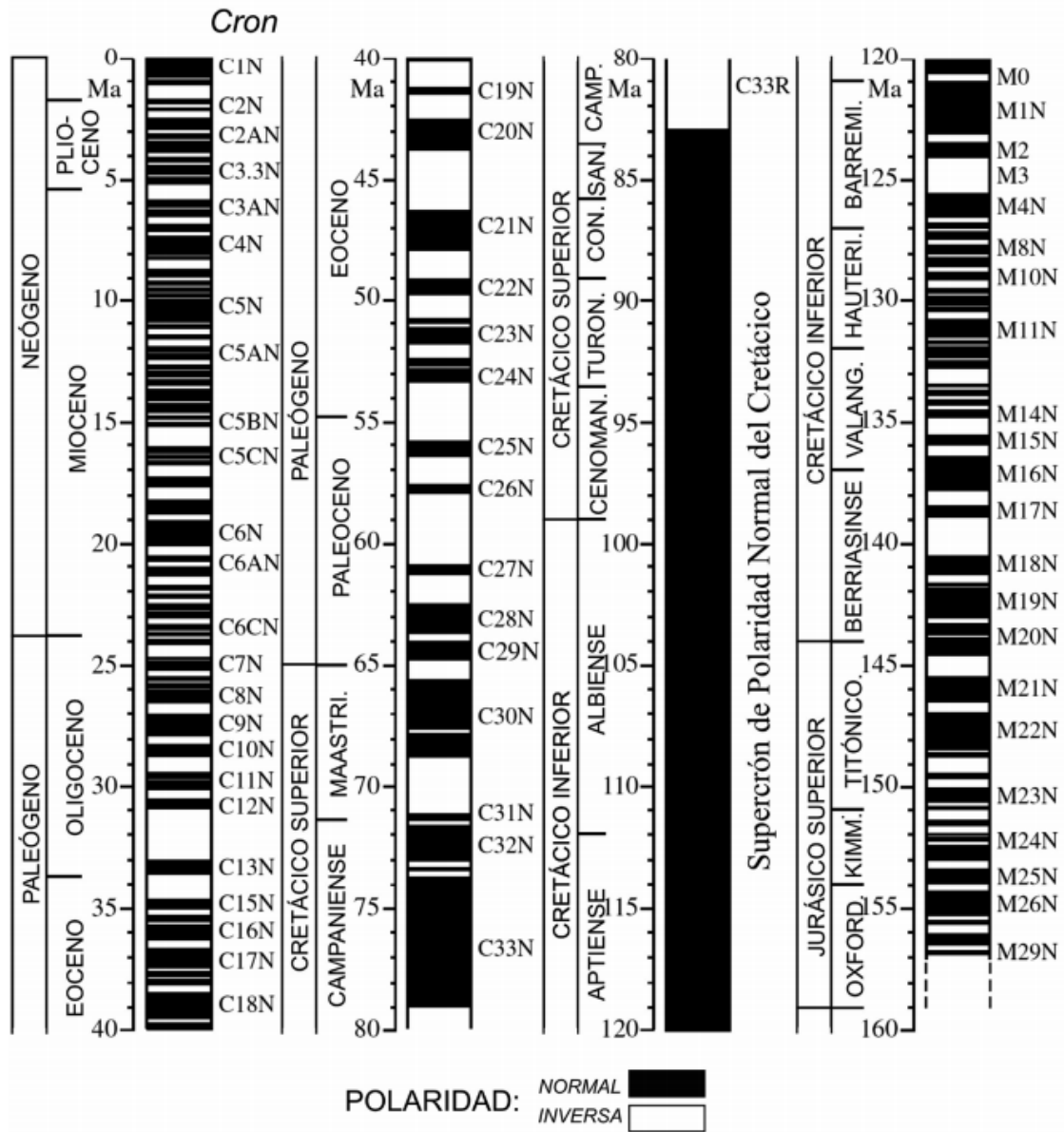


Figura 2.9. Escala de tiempos de polaridad geomagnética, Lowrie, 2007

Paleomagnetismo

El paleomagnetismo es el estudio del campo magnético que se registra en las rocas al momento de su formación o por procesos geológicos posteriores, por ejemplo, procesos metamórficos. Se basa en tres suposiciones principales (Butler, 1992):

- i) Dipolo geocéntrico axial
- ii) Registro del campo magnético primario: Los minerales que se encuentran en las rocas, las cuales registran los cambios en el CMT.
- iii) Registro invariable en el tiempo: Magnetización de la roca.

Magnetismo natural de las rocas

El magnetismo de las rocas es el estudio de las propiedades magnéticas que se encuentran en las rocas, incluyendo el estudio de los minerales magnéticos; el magnetismo de las rocas es una de las ciencias más antiguas, desde la antigua Grecia se estudiaban las rocas que atraían objetos de hierro.

Física del magnetismo

Todos los materiales son magnéticos debido a que poseen electrones que tienen momentos magnéticos y porque estos electrones dan de resultado corrientes con sus campos magnéticos asociados, la suma de todos los momentos magnéticos genera un momento magnético total del átomo \vec{m} . Cuando se aplica un campo magnético \vec{H} a un material, sus momentos magnéticos atómicos interactúan con el campo agregado modificando su alineamiento y produciendo su magnetización, la relación entre el campo aplicado y la magnetización se le conoce como susceptibilidad magnética, la cual se describe como:

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (\text{Eq. 5})$$

Donde \vec{M} es la magnetización, \vec{H} es el campo magnético y χ es la susceptibilidad del material; si χ es negativa entonces el material es diamagnético, si la χ es positiva entonces el material es paramagnético (Figura 2.10 y 2.11) (Dunlop, D., and Özdemir, Ö., 1997).

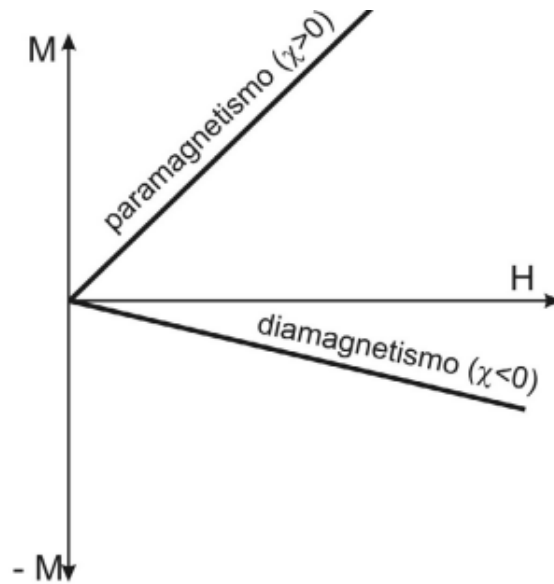


Figura 2.10. Relación entre la magnetización y el campo magnético aplicado, (Villalín Santamaría, J.J, 2016)

Sustancias diamagnéticas	$\chi_m \times 10^{-6}$	Sustancias paramagnéticas	$\chi_m \times 10^{-6}$
bismuto	-13.4	oxígeno gas	2.1
mercurio	-32	cloruro de gadolinio	2800
diamante	-22	platino	300
cobre	-10	tungsteno	68
cloruro sódico	-14	aluminio	22
grafito	-16	sodio	7.2
agua	-9.1	litio	14
silicio	-4.1	titanio	18.1
oro	-34.4	cromo	313
plata	-23.8	sulfato de manganeso	370

Figura 2.11. Valores de susceptibilidades de algunas sustancias (Catalá, J.D., Abad, J., 2018).

Tipos de materiales magnéticos

Materiales diamagnéticos

Son aquellos materiales a los cuales al agregar un campo magnético sus momentos magnéticos reaccionan de tal manera que se oponen al campo aplicado. Algunos ejemplos de este tipo de materiales es el agua, el plomo, el cuarzo, la calcita, entre otros (Figura 2.13)

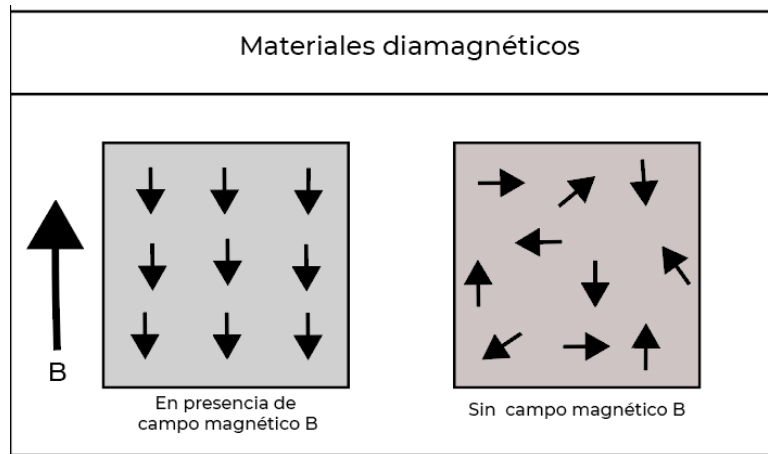


Figura 2.13. Comportamiento de los materiales diamagnéticos en presencia de un campo magnético (Autor: Karen Arreola Romero)

Materiales paramagnéticos

Aquellos donde cada átomo del material constituye a un pequeño 'ímán', que al momento de inducir un campo magnético algunos momentos se alinean al campo y otros van en contra por lo cual, la magnetización se anula (Figura 2.13). Dentro de esta categoría encontramos el aluminio, el magnesio, el titanio, el aire, entre otros.

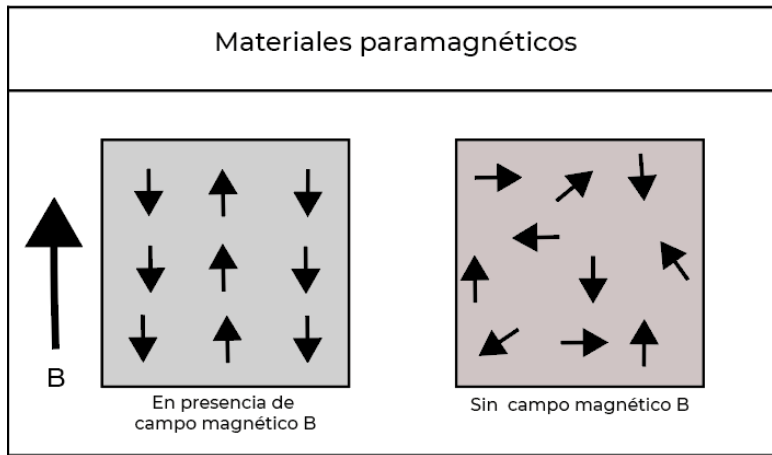


Figura 2.13. Comportamiento de los materiales paramagnéticos en presencia de un campo magnético. (Autor: Karen Arreola Romero)

Materiales ferromagnéticos

Son los materiales donde hay una alineación masiva de dipolos magnéticos que van en sentido del campo (Figura 2.14), es decir, en un mismo material hay diferentes dominios magnéticos que cuando se somete a un campo magnético intenso, todos los dominios se alinean en el mismo sentido. Entre los materiales ferromagnéticos se encuentran el hierro, níquel, cobalto, acero, entre otros.

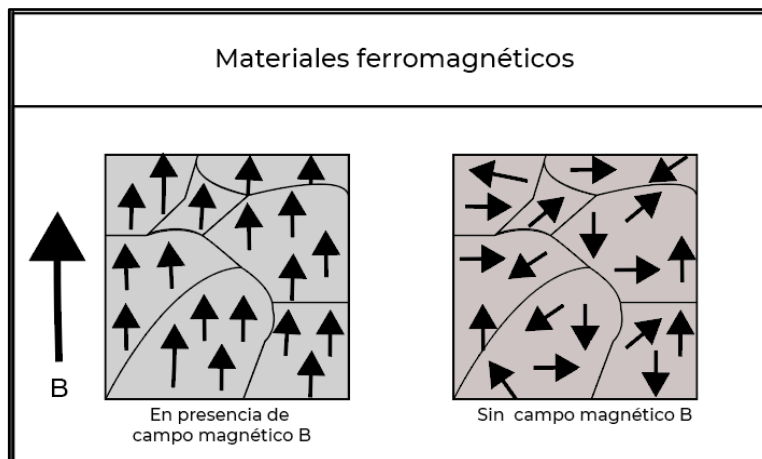


Figura 2.14. Comportamiento de los materiales ferromagnéticos en presencia de un campo magnético. (Autor: Karen Arreola Romero)

Dominios magnéticos

Como se mencionó antes los materiales ferromagnéticos están constituidos por dominios en los cuales existe un ordenamiento de los momentos magnéticos diferente en cada dominio. Existen tres tipos de dominios (Dunlop, 1995):

Dominio sencillo (DS)

Contiene un solo dominio, los cambios en la magnetización ocurren por la rotación simultánea de los spines atómicos.

Dominio pseudo-sencillo (DPS)

Se caracteriza por una magnetización que no es uniforme ya que ocurren en granos más grandes que los de dominio sencillo.

Dominio múltiple (MD)

Contiene más de un solo dominio, los cambios de magnetización ocurren por el movimiento de las paredes.

Temperatura de Curie

Se denomina temperatura de Curie (T_C) a la temperatura a partir de cual un material pierde su susceptibilidad magnética, debe su nombre a Pierre Curie quien demostró que el magnetismo se perdía a una temperatura crítica. Cada material tiene su propia temperatura de Curie, en la tabla 2.1 se pueden observar la temperatura de algunos minerales ferromagnéticos, y una vez que se haya pasado la temperatura de Curie no habrá magnetización en el material, si se disminuya la temperatura los materiales ferromagnéticos se pueden orientar en el sentido del campo que se encuentre presente.

Tabla 2.1 Temperatura de Curie de los minerales ferromagnéticos más comunes en la corteza terrestre.

Mineral	Composición	Temperatura de Curie (°C)
Magnetita	Fe ₃ O ₄	580
Titanomagnetita	TiFe ₂ O ₄	<580
Maghemita	Fe ₂ O ₃	590-675
Hematita	Fe ₂ O ₃	675
Goethita	FeOOH	70-125
Greigita	Fe ₃ S ₄	330
Pirrotina	Fe ₇ S ₈	325

Ciclo de histéresis

Las curvas de magnetización de los materiales de los materiales ferromagnéticos no son iguales cuando se aumenta o disminuye el campo magnético, a esta falta de reversibilidad se le conoce como ciclo de histéresis (Soler Arechalde, 2008). El ciclo de histéresis permite definir las características de magnetización ferromagnéticas e inferir el tipo de dominio magnético.

En la figura 2.15 se puede observar un diagrama del ciclo de histéresis, en el punto 0 empieza la magnetización del material siguiendo una curva de magnetización no lineal en M, a partir del punto 1 crece la curva hasta llegar al punto de saturación máximo en el punto 2, desde este punto empieza a

disminuir el campo aplicado H (punto 3) hasta que cae a cero de nuevo (punto 4), después del punto 4 el campo debe ser invertido y aumentado a un gran valor para conducir de nuevo la magnetización a cero.

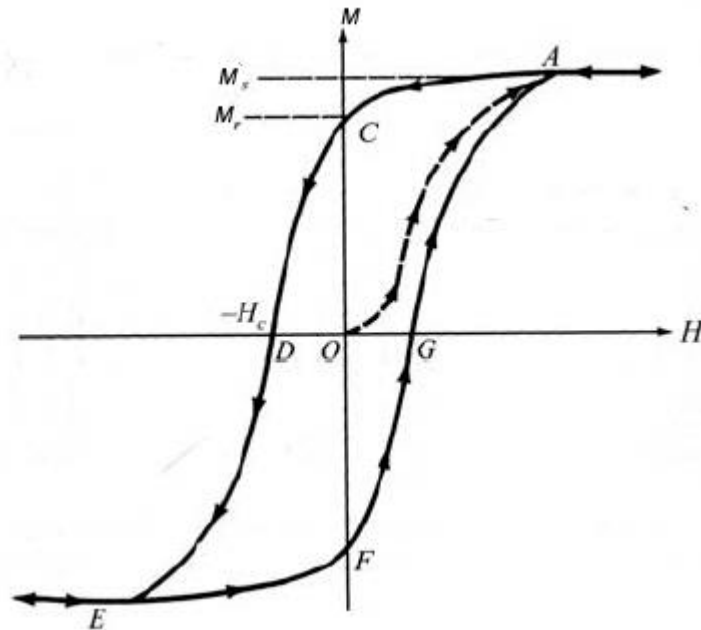


Figura 2.15. Diagrama del ciclo de histéresis.

Mecanismos de magnetización

Existen diversos procesos naturales asociados a la adquisición de magnetización en las rocas, a continuación, se describen los procesos más importantes:

Magnetización termoremanente (TRM)

Es la magnetización que se produce en las rocas ígneas al pasar por la temperatura de Curie mientras se están enfriando, los dominios ferromagnéticos se alinean con el campo magnético que se encuentra en el ambiente; mientras más baja la temperatura de las rocas el campo magnético se vuelve más permanente a menos que se caliente de nuevo a

temperaturas arriba de la temperatura de Curie o por cambios químicos que cambien sus dominios magnéticos.

Magnetización remante detrítica (DRM)

Este tipo de magnetización es típica de las rocas sedimentarias, mientras se depositan los momentos magnéticos de los granos se van alineando al campo presente, o en ocasiones los granos son movidos por las corrientes turbulentas de agua. La suma de los campos de las partículas alineadas produce un campo magnético propio en las rocas formadas.

Magnetización remanente química (CRM)

Se produce por cambios químicos que forman minerales ferromagnéticos por debajo de sus temperaturas de bloqueo, mientras estén en presencia de un campo magnético. Se puede dar de dos maneras, a) alteración de los minerales preexistentes y b) precipitación a partir de una solución.

Mineralogía magnética

Para cualquier estudio de paleomagnetismo es necesario conocer las características magnéticas de los minerales que se encuentran en las rocas, por eso es importante conocer las fases magnéticas naturales, como identificarlas, como se forman y su comportamiento.

Los minerales magnéticos más importantes son los óxidos hierro-titanio, la composición de estos minerales se muestra en la figura 2.16, en las esquinas del diagrama ternario se encuentran tres minerales: *wüstita*, *rutilo* y *hematita*, también se pueden observar dos series: a) *titanomagnetita* y b) *titanohematita* (Lowrie, 2007).

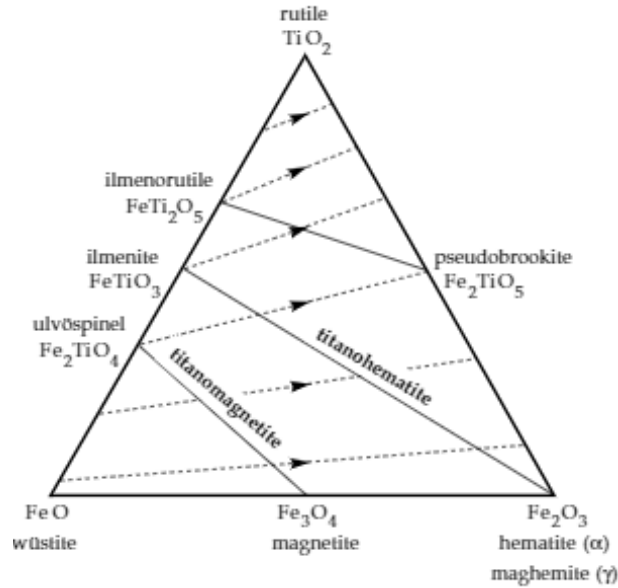


Figura 2.16. Diagrama ternario de óxidos de hierro y titanio (Lowrie, 2007)

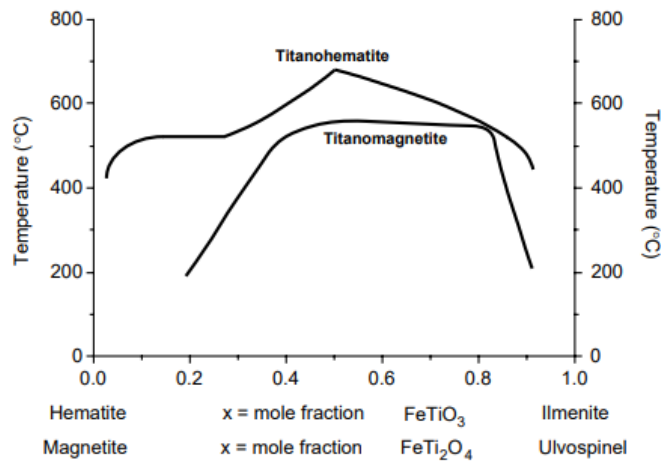


Figura 2.17. Brechas composicionales de las series titanomagnetita y titanohematita (Butler, 2004)

Titanomagnetita

Es la familia de las soluciones sólidas que generalmente se describe con la fórmula $Fe_{3-x}Ti_xO_4$, estos minerales se dan con mayor ocurrencia en rocas ígneas. La *magnetita* es el mineral más importante en esta serie, teniendo

una magnetización espontánea de $M_s = 4.8 \times 10^5 \text{ Am}^{-1}$, su $T_c = 578 \text{ °C}$; la *maghemita* es producida por bajas temperaturas de oxidación de la magnetita. Por último, la *titanomagnetita* relativamente rica en titanio es la principal responsable de las propiedades magnéticas de los basaltos oceánicos.

Titanohematita

Los minerales de esta serie también son conocidos como *hemoilmenita*, *hematita-ilmenita* o *ilmenoheimita*; tiene por fórmula general $\text{Fe}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$. La temperatura de Curie de la hematita varía entre 675 y 685°C.

La *hematita* es importante para el paleomagnetismo debido a su ocurrencia común y su alta estabilidad magnética y química, también suele presentarse con frecuencia como mineral secundario formando oxidación para formar la magnetita.

Arqueomagnetismo

Es el estudio de materiales arqueológicos que contienen minerales magnéticos, estos minerales tienen la capacidad de registrar las variaciones del campo magnético terrestre. Los objetivos de los estudios arqueomagnéticos son determinar las variaciones de espacio-tiempo que tuvo el campo geomagnético a partir de materiales arqueomagnéticos, en la arqueología se utilizan para conocer las dataciones de las estructuras, así como las etapas de construcción, procedencia, identificación y análisis de objetos arqueológicos (Soler-Arechalde, 2014).

Las investigaciones arqueomagnéticas pueden ser de varios tipos:

- i. Estudios de las variaciones espacio-temporales del campo geomagnético en las áreas de interés
- ii. Fechamientos de estructuras y eventos

- iii. Identificación de instrumentos que indicarían el conocimiento del campo geomagnético por diversas culturas
- iv. Estudio de orientaciones de construcciones
- v. Propiedades magnéticas de materiales empleados en la elaboración de objetos con el objetivo de identificar la fuente

Procedimientos

Estudios direccionales

Las muestras orientadas se seleccionan de la parte del objeto o estructura que se considera fue magnetizado al mismo tiempo; se miden sus direcciones iniciales y las muestras se someten a una desmagnetización (la magnetización se puede realizar por calentamiento, campos magnéticos alternos o microondas sintonizados). Posteriormente se analizan las componentes direccionales asociadas a la dirección del CMT presente al momento de que la muestra se enfrió originalmente. Posteriormente, estas direcciones son promediadas para determinar la dirección media del sitio. La manera de representar la tendencia de estas direcciones durante el proceso de desmagnetización es mediante el uso de los diagramas de Zijderveld en donde se muestra progresivamente mientras que las direcciones promedio a nivel muestra, se grafican en una red estereográfica para determinar si existe agrupamiento alguno.

Un ejemplo del uso de estos diagramas se observa en la figura 2.18, donde se muestran los resultados de los tratamientos magnéticos realizados en muestras de la zona arqueológica *La Quemada* ubicada en Zacatecas, México.

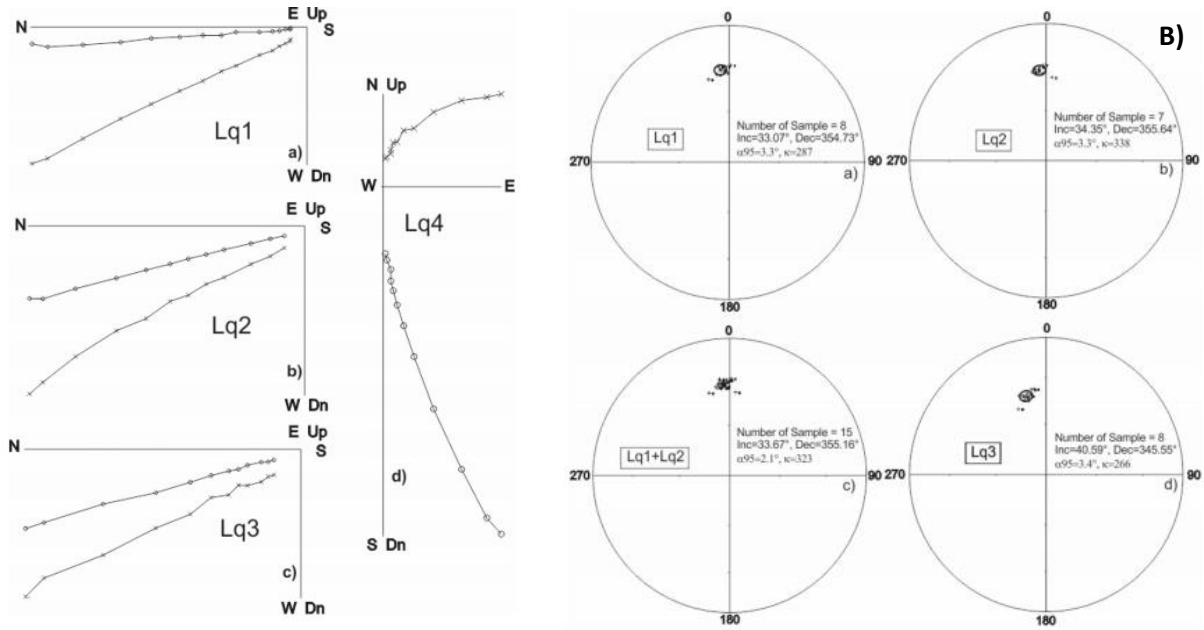


Figura 2.18. Muestras tomadas en La Quemada. A) Diagrama de Zijderveld, B) Redes estereográficas que muestran las direcciones de las muestras (López-Delgado, V. et al., 2019)

Variaciones espacio-temporales del campo geomagnético en sitios arqueológicos

Debido a su proceso de fabricación, diversos materiales arqueológicos expuestos al fuego como hornos, fogones, comales, temazcales, pisos techos y muros registran la dirección del CMT momento presente al momento de su fabricación o de su última exposición, un ejemplo es la pared del horno que se muestra en la figura 2.19. Del mismo modo y por la misma causa, la existencia de altas temperaturas al momento de su formación, las rocas de origen volcánico como lavas o flujos piroclásticos guardan la dirección del CMT y pueden emplearse como registros puntuales.



Figura 2.19. Adquisición de magnetización termoremanente en la pared de un horno (Soler-Arechalde, 2007).

En estos casos es una magnetización de tipo termoremanente y se puede recuperar experimentalmente mediante métodos paleomagnéticos, para estos estudios es necesario contar con suficientes muestras, así como contar con fechamientos de buena calidad y en número suficiente.

El estudio de variación secular nos permite establecer un marco de referencia temporal y un método de fechamientos; para ello se construye una curva de variación secular como la que se muestra en la figura 2.20.

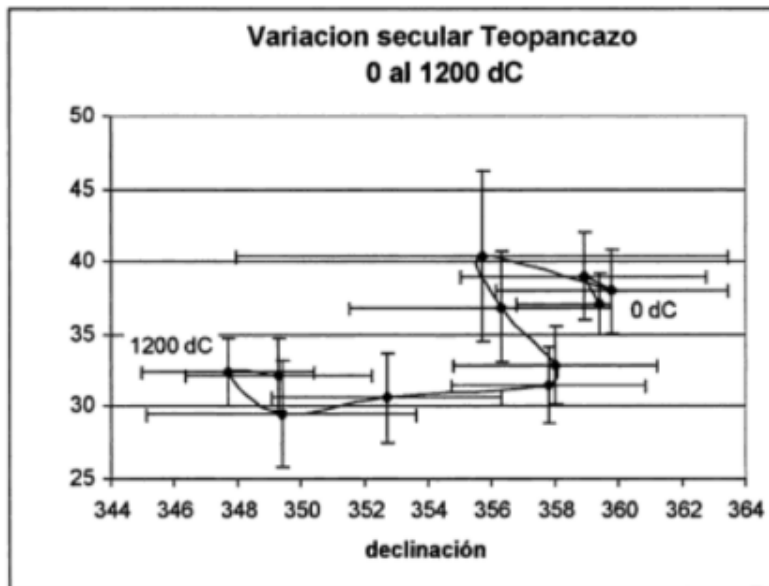


Figura 2.20. Variación secular en Teopancazo (Wolfram 1990)

El método Thellier-Therllier para determinar la intensidad absoluta geomagnética, la cual consiste en calentar la muestra a cierta temperatura T_1 y se enfría en presencia de un campo en el laboratorio B_{lab} . Después de medir la remanencia combinada (la remanencia natural M_{NRM} + la remanencia de laboratorio $pTRM$):

$$M_1 = M_{NRM} + pTRM \quad (\text{Eq. 6})$$

Luego se calienta la muestra por segunda vez y se enfría en el campo $-B_{lab}$. La segunda remanencia es:

$$M_2 = M_{NRM} - pTRM \quad (\text{Eq.7})$$

Este método asume que una magnetización adquirida por enfriar una temperatura determinada se elimina por completo mediante el recalentamiento del mismo, esto se le conoce como la Ley de reciprocidad.

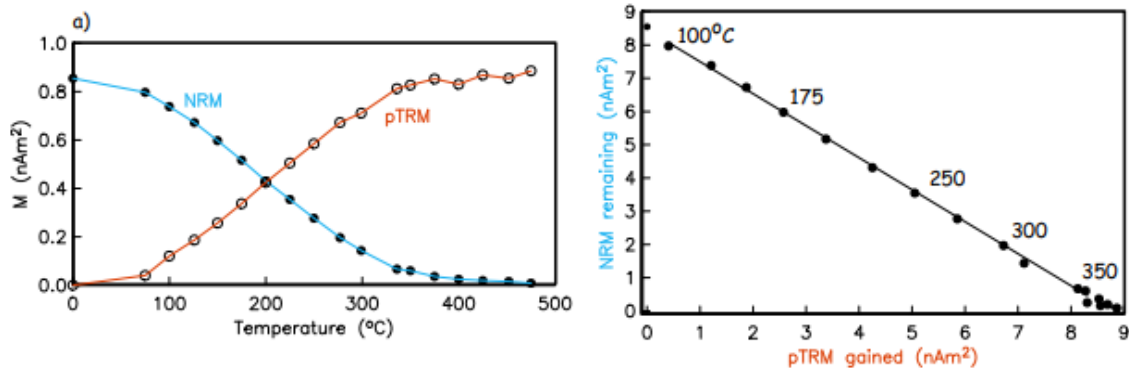


Figura 2.21. Ilustración del método Thellier-Therllier para determinar la paleointensidad absoluta

Desarrollo histórico del Arqueomagnetismo

Introducción

El Arqueomagnetismo como técnica de datación es uno de los métodos más antiguos que se conoce por los arqueólogos, debido a que se inició en el S. XIX. Consiste en dos fenómenos principales: el campo terrestre que varía en el espacio y el tiempo; y ciertos componentes de los materiales arqueológicos son capaces de registrarlos (Figura 2.22).

Sin embargo, el Arqueomagnetismo no es una técnica fácil, esto se debe a que la mayoría de los materiales tienen complejas magnetizaciones que hacen más difícil fechar de manera precisa el material; a lo largo de las últimas décadas se han dado mejoras considerables en la teoría sobre los procesos de magnetización en las rocas, así como en la instrumentación utilizada.



Figura 2.22. Ejemplos de materiales arqueológicos estudiados con técnicas arqueomagnéticas, Gómez-Paccard et. al., 2016

Variaciones temporales del campo magnético terrestre

La mayoría de las observaciones arqueomagnéticas se han basado en hornos y arcillas cocidas, las cuales son completadas en algunas áreas por flujos de lava volcánica, en la Figura 2.23 se pueden observar los sitios estudiados por Arqueomagnetismo.

Hoy en día los datos con compilados en base de datos modernas, por ejemplo, la base de datos GEOMAGIA50 (Genevey *et al.*, 2008) en la cual tiene 2 923 datos de declinación, 4 303 datos de inclinación y 3 924 datos de paleointensidades, en la Figura 2.24 se pueden observar los datos arqueomagnéticos en los últimos 10 *ka*.

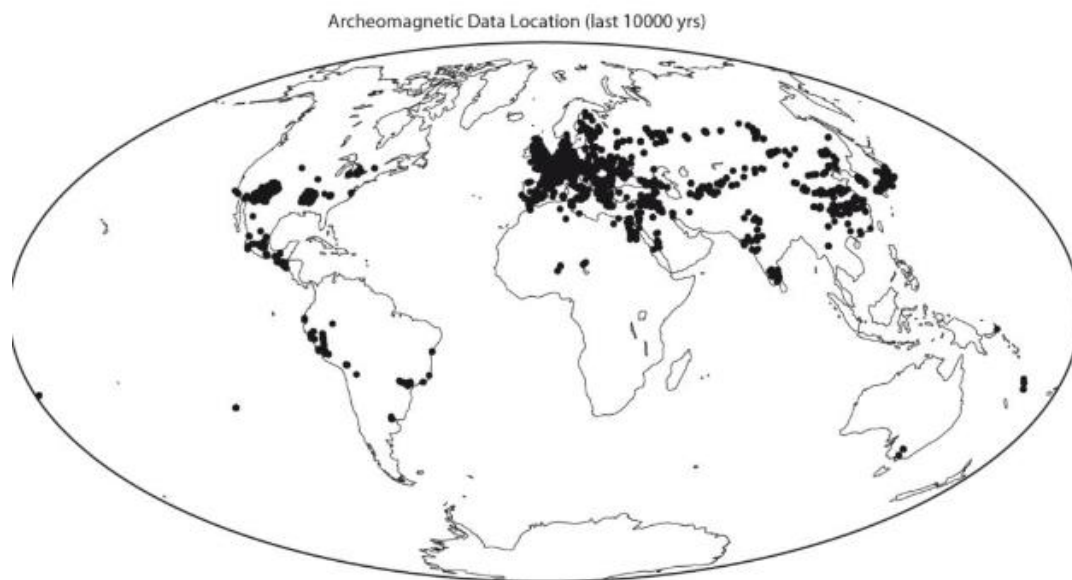


Figura 2.23. Distribución espacial de los datos arqueomagnéticos en los últimos 10 000 años (Carrancho, A et al., 2015)

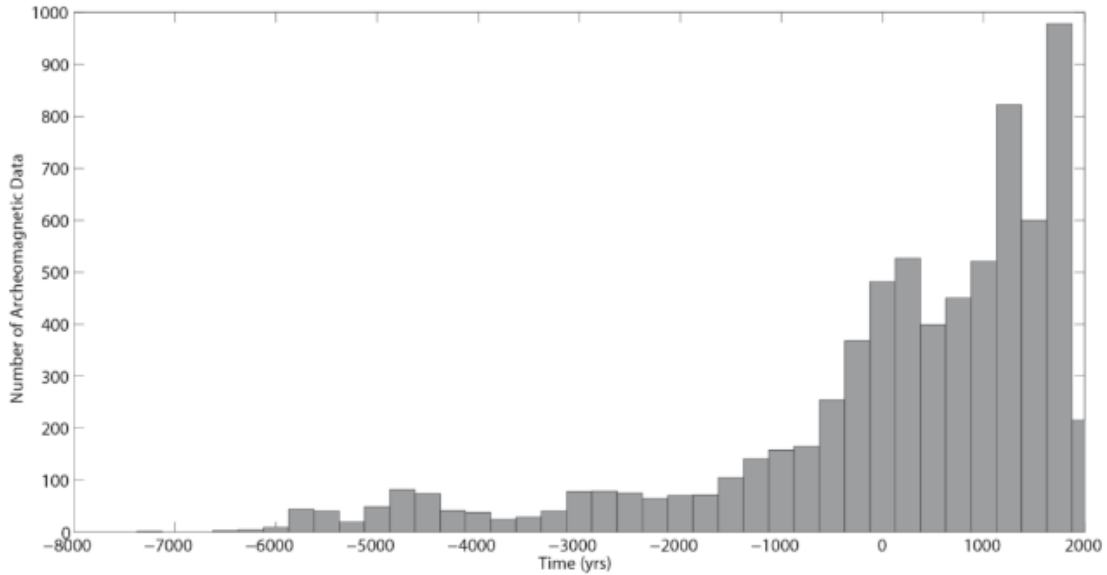


Figura 2.24. Distribución temporal de los datos arqueomagnéticos en los últimos 10 ka, registrados en el base de datos GEOMAGIA50 (Carrancho, A et al., 2015)

Con ayuda de la técnica arqueomagnética y el estudio de los materiales arqueológicos se puede observar las variaciones regionales del campo magnético terrestre a lo largo de los años. Un ejemplo es el estudio realizado por Gómez-Paccard en 2006 (Figura 2.25) en el cual, mediante el estudio de hornos arqueológicos en Península Ibérica obteniendo una variación secular direccional en la zona para los últimos 3 000 años; hicieron una comparación con estudios realizados en Francia y se pudo comprobar la evolución temporal del CMT no es idéntico, lo cual se debe a que el campo magnético no es uniforme en todas las regiones del planeta.

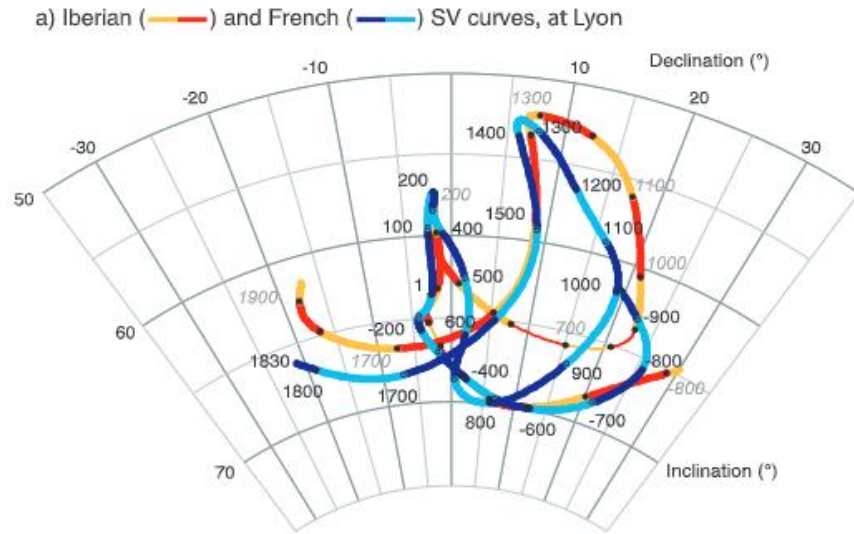


Figura 2.25. A) Curva de variación secular en la Península Ibérica; B) Curva de variación secular en Francia (Gómez-Paccard et. al., 2006)

Sin embargo, la escasez de datos limita la capacidad para describir con precisión las variaciones en espacio y tiempo del CMT, la adquisición de datos en la actualidad y en el futuro permitirá la se puedan construir nuevas curvas regionales que proporcionarán una nueva herramienta para la datación de materiales arqueológicos.

Arqueomagnetismo como técnica de datación

La técnica consiste en comparar el campo magnético terrestre impregnado en la muestra arqueológica con una edad desconocida, con la curva de variación secular de la región correspondiente, se comparan valores de declinación, inclinación e intensidad geomagnética que se obtuvieron a partir de estudio arqueomagnético de la estructura con las curvas de referencia.

En la siguiente figura (Figura 2.26) se observa un ejemplo usando los datos de un estudio realizado por Pavón-Carrasco et. al., en 2009 en un horno en

Bélgica, en la parte superior de la figura se muestran en el panel central se muestran las probabilidades de cada elemento geomagnético, por último, en la parte inferior se encuentra un mapa con la localización de la zona de estudio y el resultado final de la datación. (Gómez-Paccard, M *et. al.*, 2016)

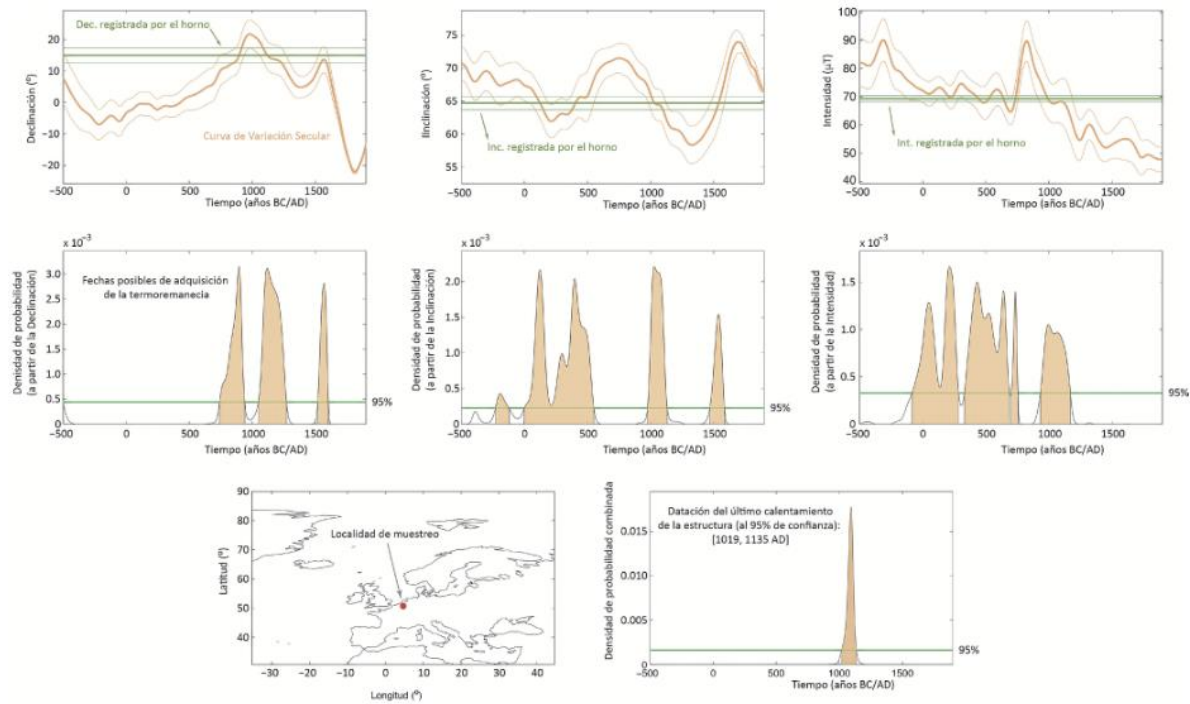


Figura 2.26 Ejemplo de datación arqueomagnética de horno en Bélgica. (Pavón-Carrasco *et al.*, 2009)

Direcciones arqueomagnéticas

Los datos arqueomagnéticos utilizan los mismos métodos que en los estudios paleomagnéticos, además los estudios arqueomagnéticos requieren una mayor precisión a estudios geológicos. La mayor fuente de errores en las direcciones magnéticas proviene de la determinación de la orientación o presencia de inclinación no detectadas en las muestras arqueológicas. En la figura 2.27 se puede observar un ejemplo de direcciones arqueomagnéticas obtenidas para hornos de cerámica en Alemania, para obtener estos datos se compararon con la curva de variación para París obtenida por Daly y Le Goff en 1966.

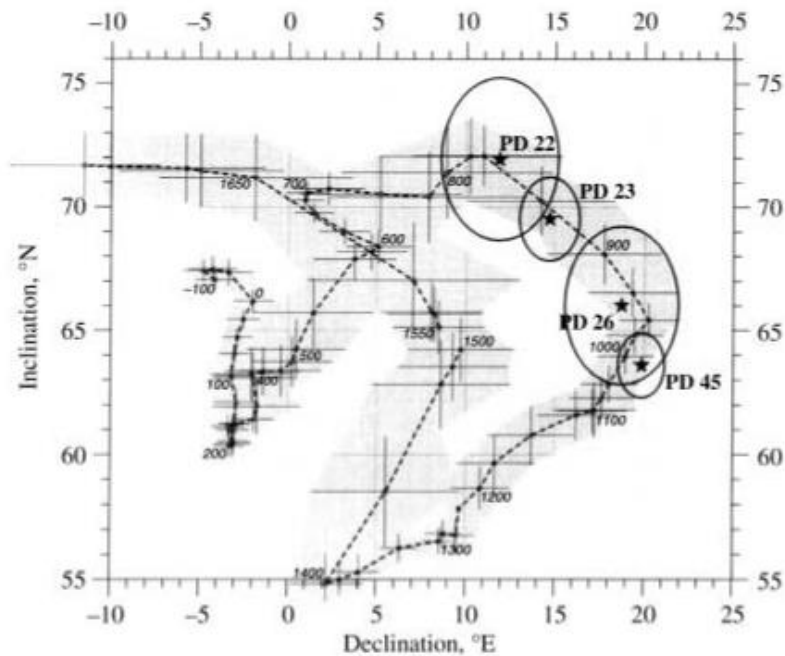


Figura 2.27. Direcciones arqueomagnéticas en cuatro hornos de cerámica en Cologne, Alemania (Reinders et al., 1999)

Muestreo

La determinación de la dirección del CMT antiguo requiere que las muestras sean tomadas de estructuras cocidas y que no fueron perturbadas en su proceso de enfriamiento y deben ser orientadas con gran precisión.

Las muestras deben orientarse respecto al plano horizontal y al norte geográfico, el buzamiento de la muestra puede evitarse creando una superficie horizontal en la parte superior, eso se realiza vertiendo yeso en la parte superior de la muestra y presionando con una placa de aluminio hasta que se endurezca; por otro lado, el acimut debe marcarse en las muestras mediante un teodolito o una brújula magnética, sin embargo si la muestra es una estructura fuertemente magnetizada se no recomienda el uso de la brújula (Pavón-Carrasco, F.J et. al., 2015).

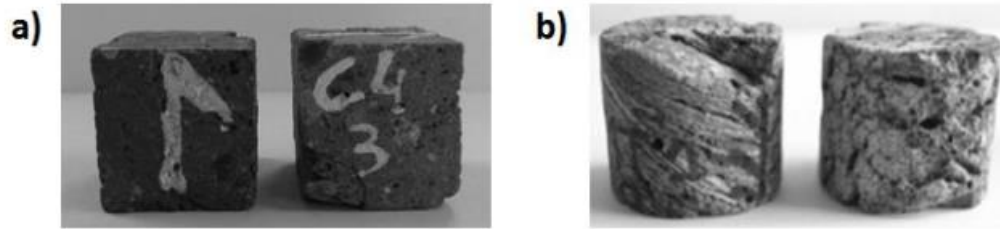


Figura 2.28. Ejemplos de muestras: a) en cubos; b) en cilindros

El procedimiento de muestreo se puede observar en la imagen a continuación, en la figura 2.29 se observan tres técnicas de muestreo diferente: a) con yeso, b) pequeñas muestras recogidas en discos y c) método de perforación. Se recomienda tomar un número representativo de muestras que se encuentren repartidas por la superficie, unas 10 – 15 muestras serían suficientes.

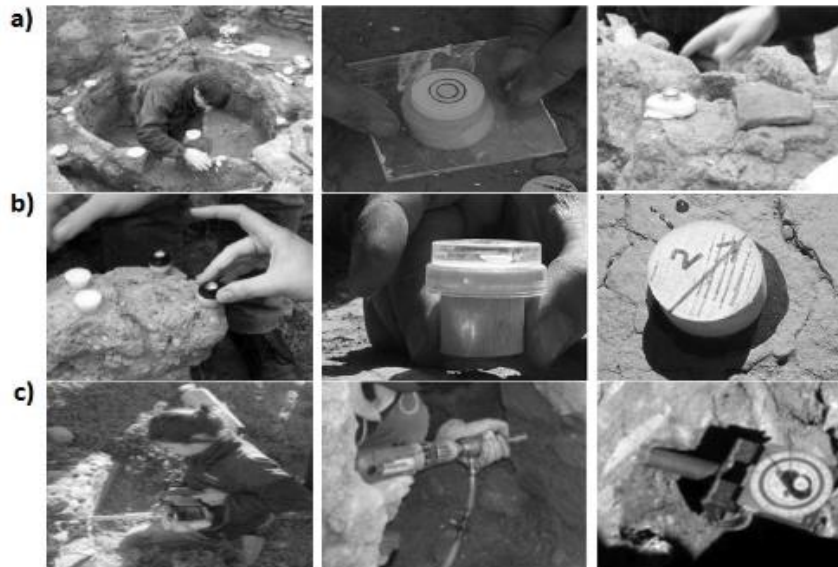


Figura 2.29. Técnicas de muestreo, Pavón-Carrasco, F.J et. al 2015

Tratamiento de laboratorio

El primer trabajo arqueomagnético ocurrió cuando los magnetómetros no estaban disponibles para medir la remanencia de las muestras Harold

(1960) diseñó un magnetómetro giratorio, años después se convertiría en el magnetómetro estándar durante un tiempo. El segundo magnetómetro se desarrolló con un súper conductor SQUID, Walton (1977) construyó este magnetómetro para utilizarlo en una versión rápida del experimento del doble calentamiento de Thellier-Thellier.

En el laboratorio se deben consolidar y preparar las muestras adquiridas, las muestras deben de tener el tamaño adecuado para poder ser medidas en los magnetómetros del laboratorio. Las pruebas realizadas deben servir para identificar y separar los diferentes componentes de la magnetización remanente, examinar su estabilidad magnética y determinar su dirección.

Desmagnetización en campos alternos crecientes (AF)

Esta técnica de desmagnetización permite desmagnetizar minerales de baja coercitividad, como lo es la magnetita o la maghemita, sin embargo, los minerales con alta coercitividad como la hematita no se pueden desmagnetizar completamente usando esta técnica.

Desmagnetización escalonada con temperaturas crecientes (TH)

En esta técnica se repite un ciclo de calentamiento, enfriamiento y medición, donde las temperaturas más en aumento con el fin de eliminar la magnetización remanente; mediante este tratamiento es posibles desmagnetizar las muestras, pero algunas muestras podrían experimentar alteraciones químicas por el calentamiento, para revisar la estabilidad química de las muestras se mide la susceptibilidad magnética después de cada paso de magnetización.

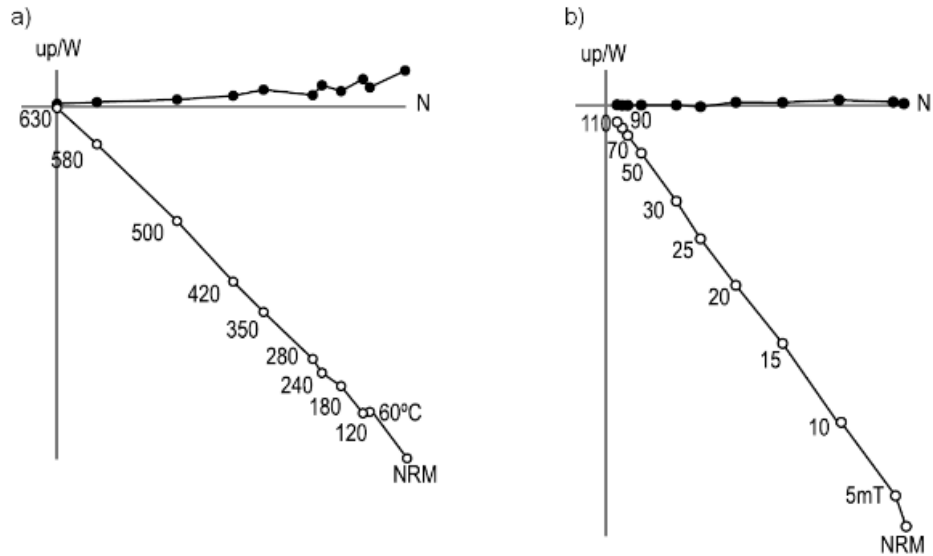


Figura 2.30. Diagramas de Zijderveld usando a) TH y b) AF en dos muestras de un horno romano en Toledo, España (Catanzariti et al., 2012)

Otras aplicaciones del Arqueomagnetismo

El Arqueomagnetismo también se puede utilizar para considerar los procesos de formación de sitios, lo cual incluye como las propiedades magnéticas de los materiales se ven incluidos por los procesos culturales y naturales.

Determinación de paleotemperaturas

Mediante esta técnica también se puede conocer la última temperatura a la cual un material arqueológico ha sido calentado, de esta manera la información arrojada ayuda a la reconstrucción de las técnicas de combustión utilizada en el pasado, el uso de esta aplicación ha sido utilizado por varios autores, por ejemplo, por Hroudá *et al.*, en 2003 y Linford y Platzman en 2004.

Estudios de cronología relativa de eventos de combustión

En yacimientos del Paleolítico medio peninsular con frecuencia se encuentran agrupaciones de neandertales, las cuales contienen material lítico y óseo entorno a hornos y hogares, estas agrupaciones se conocen como *palimpsestos*, pero al estar densamente estratificadas es difícil estimar si son temporalmente distintas; el Arqueomagnetismo permite determinar la temporalidad de los hogares expuestos en la superficie ayudando al análisis de las civilizaciones antiguas (Gómez-Paccard *et. al.*, 2016).

Fuegos paleolíticos

En yacimientos paleolíticos es más complicada la identificación de la combustión, debido a que son yacimientos muy antiguos que pueden verse afectados por el agua el aire. La técnica se basa en que los minerales ferromagnéticos son sensibles a modificar sus propiedades magnéticas al ser calentados, estas transformaciones contribuyen a crear anomalías distintivas (por ejemplo: la susceptibilidad magnética) en el área afectada; si en el estudio se encuentran valores de susceptibilidad alta en los materiales calentados generalmente se asocia a la concentración de minerales modificados por el fuego (Evans y Heller, 2003)

Conclusiones

El Arqueomagnetismo al igual que cualquier otra ciencia ha cambiado a lo largo de los años, si bien en el pasado no había tantos registros de datos arqueomagnéticos si ha existido una curiosidad por parte del hombre de conocer las edades y culturas a las que le pertenecen los materiales arqueológicos que se conservan hasta el día de hoy.

Las técnicas de datación han avanzado desde lo que se conocía en un principio hasta lo que se conoce ahora, por lo cual es necesario ampliar los

datos en las diferentes bases de datos que se conocen para sí ir avanzando y conocer el pasado gracias a los vestigios que quedaron.

CAPÍTULO III. EL MÉTODO ARQUEOMAGNÉTICO

Los datos arqueomagnéticos son fundamentales para comprender la evolución del campo magnético terrestre en escalas de tiempo de cientos a miles de años; a lo largo de los años se ha mejorado la forma de realizar estas investigaciones, así como la base de datos arqueomagnéticos ha crecido considerablemente.

De los descubrimientos y avances tecnológicos que se tengan en la actualidad, el conocimiento sobre nuestro pasado es más claro, al recolectar mayor información los datos se vuelven más precisos que en un futuro se pueden aproximarse a la verdad.

Los primeros estudios sobre el campo geomagnéticos fueron los realizados por Émile y Odette Thellier en la década de 1930, donde desarrollaron la instrumentación necesaria para obtener la dirección e intensidad del CMT en materiales arqueológicos (Thellier y Thellier, 1938, 1941). Posteriormente entre los años 1950 y 1960 el magnetismo se estableció como un campo de investigación donde se obtuvieron datos de varios materiales alrededor del mundo. Para el año de 1980 hubo un aumento en el número de estudios arqueomagnéticos cada año, siguiendo esta tendencia hasta la década del 2010, mejorando la comprensión del campo magnético de la Tierra en el espacio y tiempo, en la siguiente figura se muestran las publicaciones de estudios arqueomagnéticos a través de los años.

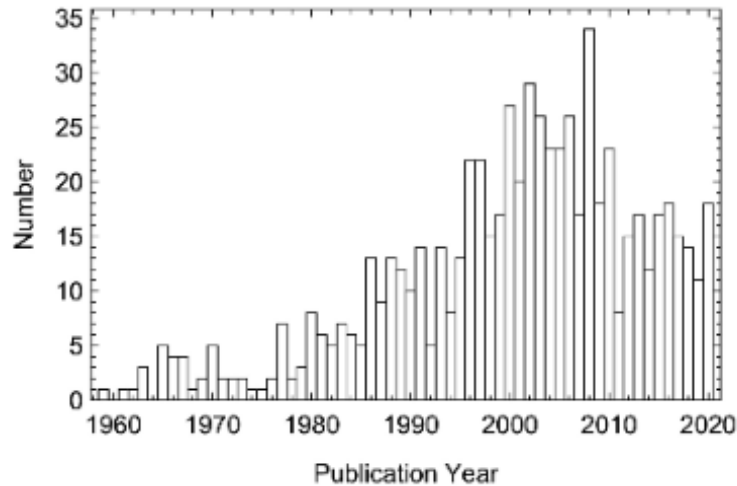


Figura 3.1. Estudios arqueomagnéticos por año, en la base de datos GEOMAGIA50.v3.4

La mayoría de estos estudios se han realizado en Europa, Oriente Medio, China, Japón y América del Norte, haciendo un conjunto de 700 estudios; desde la década de los 2000 se ha empezado a realizar estudios en el hemisferio sur y regiones ecuatoriales, como lo son África, América del Sur y Oceanía occidental, todo esto con la finalidad de expandir el conjunto de datos global.

Base de datos arqueomagnética GEOMAGIA50

GEOMAGIA50 ha tenido tres versiones desde que se creó, la primera versión se centró en la recopilación de datos de paleointensidad, los datos eran de materiales arqueológicos como flujos de lava, esta versión integró las bases de datos ArcheoInt de Genevey *et al.*, 2008 y la base de datos IAGA ARCHEO00 compilado por Tarling, además se agregaron datos de compilaciones específicas de otros países o regiones con el fin de obtener una lista de compilaciones. Se puede conocer detalles sobre la versión, por las numerosas publicaciones realizadas usando esta versión. La versión 2 no fue acompañada por publicaciones, pero se agregaron los resultados

direccionales arqueomagnéticas junto con los datos de intensidad, aumentando la cantidad de datos. La versión actual es la versión 3, en la cual se agregaron más entradas de diferentes estudios arqueomagnéticos aumentando la base de datos; en el año 2020 se lanzó la versión actualizada GEOMAGIA50 v3.4, la cual contiene un gran número de entradas arqueomagnéticas que se han recopilado a lo largo de los años en todo el mundo. En la figura 3.2 se observan los sitios arqueomagnéticos estudiados, los cuales se fueron registrando en las seis versiones de GEOMAGIA50.

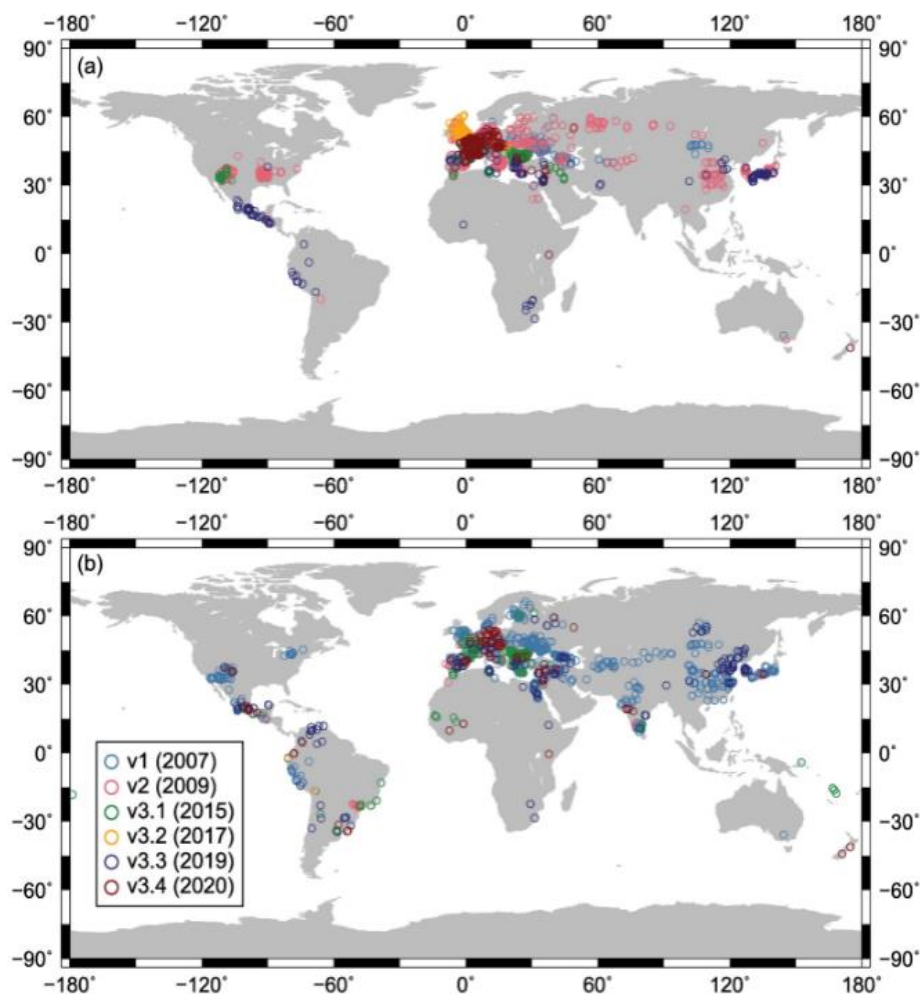


Figura 3.2. Distribución geográfica de los sitios arqueomagnéticos registrados en el GEOMAGIA50. a) datos direccionales; b) datos de intensidad

La mayoría de los datos arqueomagnéticos pertenecen a Europa, en la figura anterior se puede observar la gran cantidad de entradas para este continente; fuera de Europa, los países que aportan más datos son: Estados Unidos, China, Japón y México, aunque se ha buscado mejorar la distribución global de los datos en el hemisferio sur, por lo cual encontramos de datos pertenecientes a Sudamérica, África y Oceanía.

La distribución temporal de los datos que se encuentran en GEOMAGIA50 v3.4 varía durante los últimos 10 000 años; el número de datos para la BCE es menor que los datos recolectados para la CE, aunque esto suceda el 54% de los datos totales abarcan entre el 8 000 BCE – 1 BCE. En la Figura 3.3 se encuentran las entradas en la base de datos, podemos observar que hay notables picos en las gráficas para ciertos períodos de tiempo; en la Figura 3.3.a se puede observar un pico entre el 100 CE y 300 CE, el cual se puede atribuir a ciertos periodos culturales, en este caso se deben a datos recolectados de Imperio Romano en la zona actual de Inglaterra, Francia, Hungría, Bulgaria y España. Otros picos pueden estar relacionados a investigaciones concentradas en países específicos o por ciertos grupos de investigación los cuales tienen sus enfoques específicos.

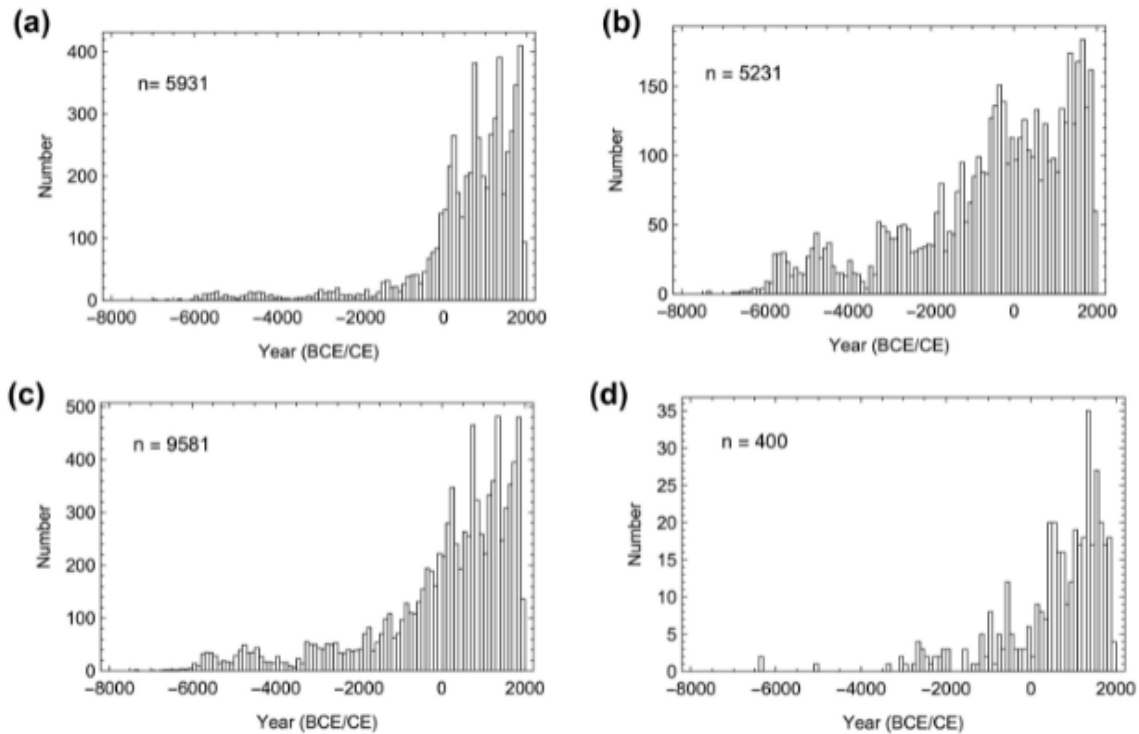


Figura 3.3. Distribución temporal de los datos arqueomagnéticos contenidos en GOMAGIA50.v3.4. a) direcciones, b) intensidad, c) hemisferio norte, d) hemisferio sur

En la Figura 3.3d encontramos que hay pocos datos en comparación al hemisferio norte, donde se encuentran 10 veces más datos por siglo.

Los materiales y estructuras arqueológicas de donde se puede obtener información principalmente es de arcillas horneadas, pero también se puede obtener información arqueomagnética de pinturas murales, por ejemplo, de los pigmentos rojos que contengan hematita pueden adquirir magnetización; también lo pueden obtener los yesos de cal, como se menciona en Hueda-Tanabe *et. al.*, 2004 y ladrillos de adobe sin quemar (Games, 1977) donde adquieren magnetización al mezclarse con agua. Existen más de cincuenta tipos de materiales y estructuras que se encuentran en la versión actual de GEOMAGIA50, en la Figura 3.4 se muestran los ocho materiales más utilizados.

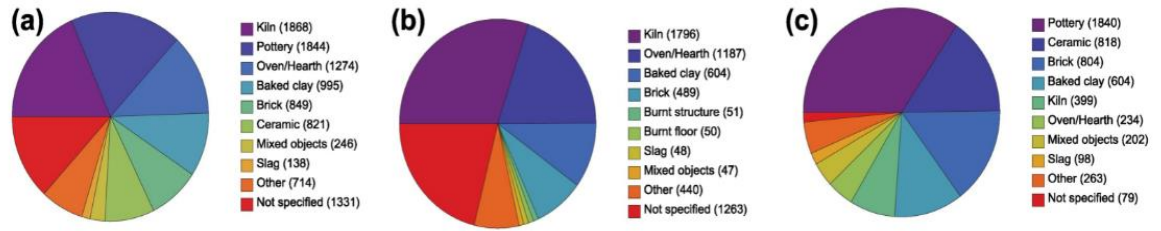


Figura 3.4. Materiales más utilizados en la base de datos GEOMAGIA50

Curvas de variación regional

En la década de 1950 se reconoció el potencial de combinar los datos arqueomagnéticos individuales de las curvas arqueomagnéticas y hasta la fecha se ha obtenido una variedad de curvas de varias partes del mundo, y esto con el fin de realizar una red global de datos y conocer el comportamiento del CMT.

Debido a que el CMT no puede considerarse dipolar, las variaciones del campo regional no son representativas de la evolución del campo en conjunto, y las contribuciones provocan desviaciones en una geometría dipolar, lo que resulta en una variación de los datos de dirección e intensidad entre regiones, al combinar todos los datos globales de las curvas compuestas no mostrará la evolución del campo en el tiempo, debido a esto se realizan las curvas arqueomagnéticas regionales, las cuales se han sufrido diferentes métodos de ajuste para lograr obtener los datos más cercanos a la realidad.

Modelos arqueomagnéticos globales

En las últimas décadas se han realizado diferentes modelos globales, de los cuales es posible generar mapas del campo magnético para la superficie de la Tierra.

A pesar que se empezó a construir los primeros modelos en la década de 1970, por Márton, 1970; Braginski y Burlatskaya, 1979, es solo hasta las últimas dos décadas que han llamado la atención para empezar a construirlos. Los primeros modelos fueron *ARCH3k.1* y *ARCH2k_cst* (Korte *et. al.*, 2009) para intervalos de tiempo de 1000 a.C a 1990 d.C; el primer modelo se basó en datos arqueomagnéticos y volcánicos disponibles; mientras el segundo modelo incluía una cantidad menor de valores (6211 en comparación a 9605 del modelo *ARCH3k.1*). Otro modelo con el objetivo principal de la datación arqueomagnética es el *SHA.DIF.14k*, el cual abarca los últimos 14 años, con alrededor de 12 779 datos arqueomagnéticos (Pavón-Carrasco *et. al.*, 2014). Para el hemisferio sur, Campuzano *et. al.* 2019, presentaron el modelo *SHAWQ2k*, con el cual mejoraron los datos en la zona y una mejor cobertura en los datos globales.

Las principales aplicaciones de estos modelos son para la datación y calibración de intensidades relativas de los sedimentos, una de las ventajas de los modelos sobre las curvas de regionales, en la datación, radica en que estos modelos pueden generar curvas direccionales y de intensidades para cualquier ubicación sin la necesidad de reubicar los datos de la zona de estudio; en el 2011 Pavón-Carrasco *et. al.* presentaron una herramienta en el programa Matlab, con la cual se puede obtener las funciones de densidad de probabilidad de edad a partir de la combinación de declinación, inclinación e intensidad de las muestras; además de la variedad de modelos publicados, curvas de referencia que se pueden implementar a la herramienta y datos adicionales proporcionados por el usuario, complementan el modelo mejorando los resultados.

Conclusiones

La base de datos GEOMAGIA50 ha sufrido cambios a lo largo de los años, mejorando la distribución temporal y espacial de los datos, además de realizar avances para modelar el CMT. Se espera que para futuros proyectos la base de datos global tenga mejoras en la distribución de los datos, de tal manera que haya un alcance global de estudios arqueomagnéticos para una mejor comprensión del campo arqueomagnético del planeta; aunque presenta un desafío realizar estudios en diversas partes del planeta, con el avance de la tecnología podría ser posible, también los modelos globales de campos geomagnéticos mejoraría para obtener una mejor resolución temporal y confiabilidad espacial global para responder las preguntas abiertas sobre el campo geomagnético y probablemente en un futuro, se puedan realizar predicciones sobre el CMT mediante modelos basados en simulaciones numéricas.

CAPÍTULO IV. ESTUDIOS ARQUEOMAGNÉTICOS EN MÉXICO

En México ha surgido un interés por obtener información de los objetos arqueológicos que se han conservado en diferentes zonas del país, al estudiar estos objetos la información obtenida hace posible explicar el origen de la pieza y comprender las culturas de Mesoamérica, las cuales son parte fundamental de la historia de México y tiene un valor cultural, histórico y tecnológico.

El término *arqueometría* remonta al siglo XIX, donde el uso de los rayos X y la radioactividad favorecieron el desarrollo de la arqueología; la aparición de este término se vincula con la aparición de la revista *Archaeometry*, fundada en 1958 por la Universidad de Oxford publicó temas relacionados y a lo largo de los siguientes años empezaron a aparecer diferentes revistas del mismo ámbito; en México estas revistas y publicación fueron un parteaguas para empezar a utilizar las diferentes técnicas descritas en la revistas, el impacto fue tan importante que en el 2005 se publica el libro: *Arqueometría: técnicas nucleares y convencionales aplicadas a la investigación arqueológica* de los

autores Rodrigo Esparza López y Efraín Cárdenas García, editado por el Colegio de Michoacán (Figura 4.1); en este libro se reúnen varios trabajos

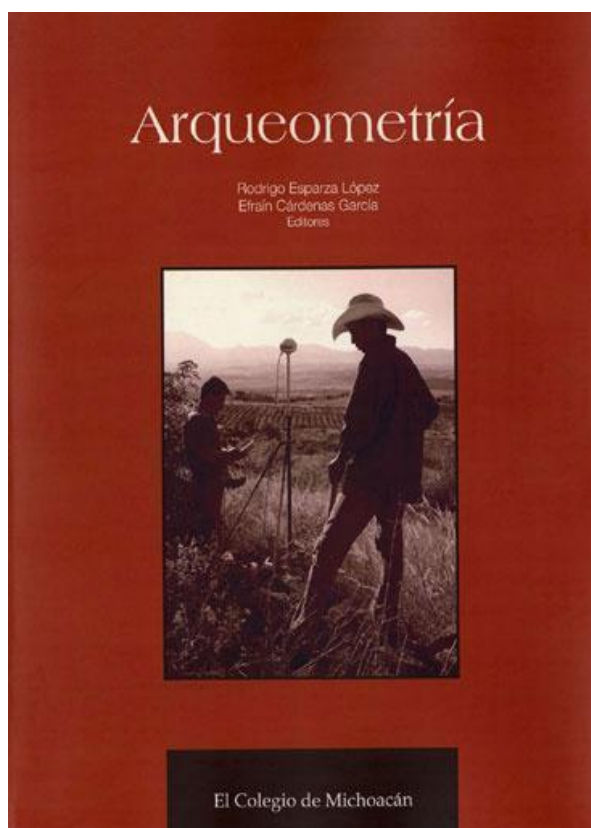


Figura 4.1. Portada del libro: *Arqueometría. Técnicas nucleares y convencionales aplicadas a la investigación arqueológica*, de los autores Esparza-López, R., y Cárdenas-García, E.

sobre la aplicación de las técnicas arqueométricas a los materiales arqueológicos, con la participación de varios químicos.

Actualmente en el país hay tres centros que desarrollan arqueometría, estos son: el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), los Institutos de Física y de Investigaciones Antropológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Laboratorio de Arqueología de Occidente.

El arqueomagnetismo es una de las ramas de la arqueometría, la cual consiste en aplicar los principios del paleomagnetismo a la arqueología; el paleomagnetismo y arqueomagnetismo estudian la capacidad de algunos materiales en registrar información magnética. Algunas de las rocas y materiales arqueológicos contienen partículas de óxido de hierro por lo cual permite registrar información del campo magnético terrestre.

Los estudios en Mesoamérica se han basado en secuencias estratigráficas ajustadas mediante cerámica y estilos arquitectónicos, así como fechamientos absolutos mediante C^{14} , en las investigaciones arqueológicas se ha estado empleando el arqueomagnetismo para proveer una precisión que no se alcanza con métodos radiométricos. En la tabla iii se pueden observar los diferentes estudios publicados sobre Mesoamérica usando arqueomagnetismo (Figura 4.2).

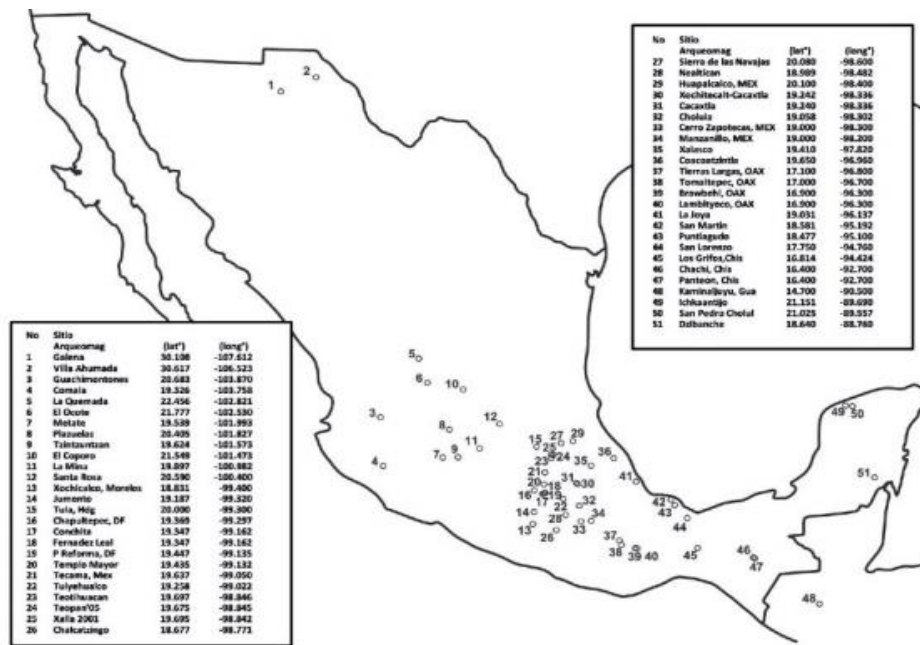


Figura 4.2. Zonas de estudios arqueomagnéticos en México (Soler-Arechalde et. al, 2019)

Tabla 4.1 Sitios arqueológicos, muestras, periodo y referencias de publicaciones de estudios arqueomagnéticos en México

Estado	Sitio Arqueológico	No. Muestras	Periodo	Referencia
Chiapas	Chachi	1	Clásico	Wolfman, 1990
	Panteón	1	Preclásico	Wolfman, 1990
	Los Grifos	2	Posclásico	Fregoso, 2010
Ciudad de México	Templo Mayor	5	Posclásico	Soler-Arechalde et al., , 2012
	Tlatelolco	2	Posclásico	Guerrero, 2003
	Chapultepec	1	Clásico	López-Delgado et al., ,2011
	Coyoacán	1	Clásico	Soler- Arechalde et al., , 2013
Estado de México	Teotihuacán	6	Clásico	Wolfman, 1990
	Teotihuacán	8	Clásico	Romero, E., 2008

	Teotihuacán	1	Clásico	Terán-Guerrero, 2013
	Tecamac	1	Posclásico	Saavedra- Cortés,2010
Hidalgo	Huapalcalco	2	Clásico	Wolfman, 1990
	Tula	7	Posclásico	Wolfman, 1990
	Tula	6	Posclásico	Martínez- Miranda, 2013
	Sierra de las Navajas	2	Clásico	Terán-Guerrero, 2016
Jalisco	Teuchitlán	12	Clásico	López-Delgado et al ., 2017
Morelos	Xochicalco	5	Posclásico	Hueda-Tanabe and Soler-Arechalde, 2001 Soler- Arechalde and Caballero-Miranda, 2008
Oaxaca	Brawbehl	1	Preclásico	Wolfman, 1990
	Lambityeco	4	Posclásico	Wolfman, 1990
	Monte Albán	2	Clásico	Wolfman, 1990
	Tierras Largas	2	Clásico	Wolfman, 1990
	Tomaltepec	2	Preclásico	Wolfman, 1990
Puebla	Cerro Zapotecas	1	Clásico	Wolfman, 1990
	Manzanillo	2	Clásico	Wolfman, 1990
Quintana Roo	Dzibanché	3	Clásico	Straulino-Mainou <i>et al.</i> , 2016
Tlaxcala	Xalasco	2	Clásico	Terán-Guerrero, 2013
Veracruz	La Joya	4	Clásico	Aguilar-Parra and Morales-Sánchez, 2011
	La Joya	13	Clásico	Aguilar-Parra and Morales-Sánchez, 2011

Trabajos realizados antes del año 2000

El primer trabajo del cual se tiene registro fue el estudio de alfarería de Cuicuilco realizado por Nagata *et. al.*, 1965 (Figura 4.3), el sitio de estudio se encuentra ubicado al sur de la Cuenca de México, no solo era un sitio interesante por su desarrollo cultural y los objetos cerámicos del lugar, sino que las rocas permitían conocer las paleointensidades de la erupción del volcán Xitle, la cual se conoce que fue entre 245-315 d.C (Siebe, 2000), en la Figura 4.4 se muestra una figura con las propiedades magnéticas de las rocas muestras en este trabajo, mientras que en la Figura 4.5 se observan las curvas termomagnéticas de las muestras, donde los círculos negros corresponde al calentamiento y los círculos blancos al enfriamiento.

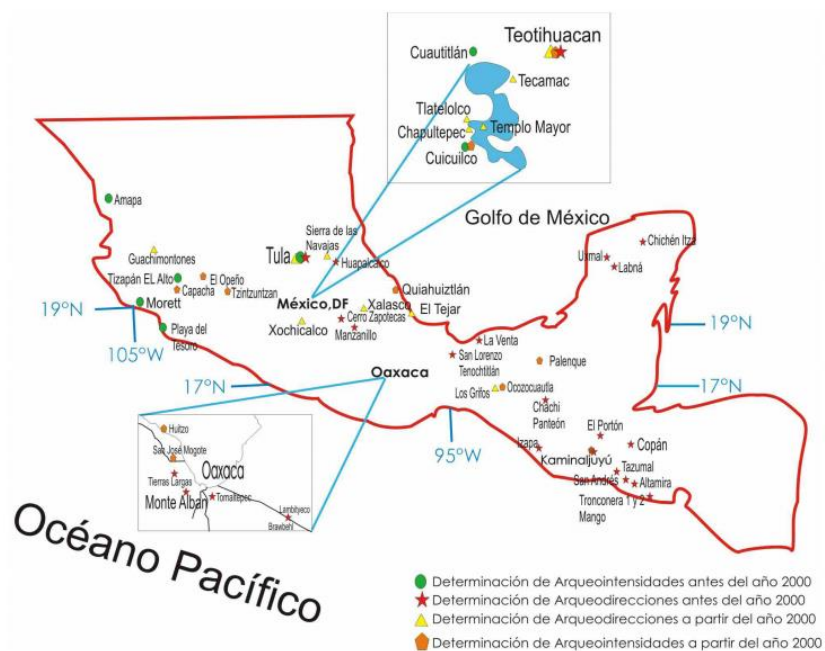


Figura 4.3. Localización de los sitios arqueológicos muestreados en Mesoamérica (Soler-Arechalde, 2014)

Specimen No.	Rock type	Occurrence	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	J_s (emu/gm)	J_s/J'_s	J_n (emu/gm)	J_n/J'_s ($\times 10^3$)
M 1	basalt lava		{300 520	1.32	1.11	3.94	2.98
M 2	" "		505	2.70	0.97	2.10	0.78
M 3	" "		500	3.63	0.88	6.63	1.83
M 4	" "					2.60	
M 5	" "		{130(?) 400(?)	0.43	1.10	4.27	9.94
M 6	" "						
M 7	pyroclastic rock		570	0.90	0.99	8.06	9.00
M 8	pyroclastic rock	contact zone with lava	540	2.70	0.98	5.54	2.05
M 9	" "	" "	530	1.31	1.00	2.87	2.19
M10	pyroclastic rock		550	1.02	0.95	3.13	3.06
M11	" "		560	0.71	1.09		
M12	basalt lava	latest flow	450(?)	0.09	1.06	1.95	21.62
M13	" "	" "	{300 570	0.15	{1.02* 1.25	2.06	13.72
M14	" "	" "	{300 530	0.39	1.58	1.30	3.34

* After heating at 300 $^{\circ}\text{C}$

Figura 4.4. Descripciones petrográficas y propiedades magnéticas de las rocas muestreadas en México (Nagata, 1965)

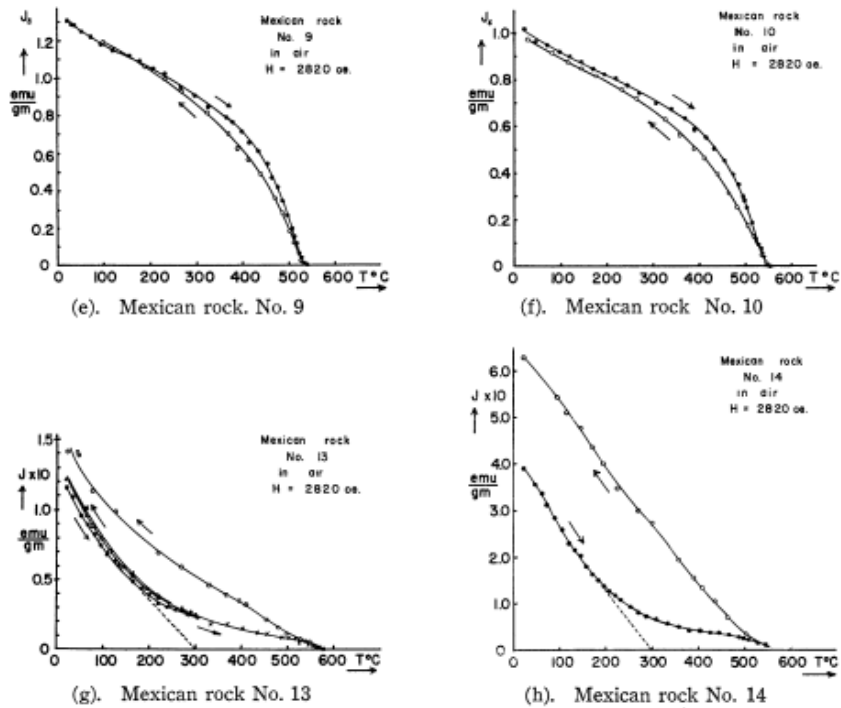


Figura 4.5. Varios ejemplos de curvas termomagnéticas. (Nagata, 1965)

En 1967 Coe reporta la existencia de una brújula flotante, la cual consistía de un fragmento de magnetita al cual le dieron el nombre de M-160, encontrado en San Lorenzo, Veracruz, un sitio olmeca que estuvo ocupado entre el 1400-1000 a.C, este artefacto es una pequeña barra rectangular de hematita la cual fue cuidadosamente tallada y pulida; posteriormente en 1975 Carlson realiza experimentos sobre este fragmento, estos experimentos permitieron inferir que la pieza mediría el doble de las dimensiones actuales y su orientación es N-S magnético (Figura 4.6).

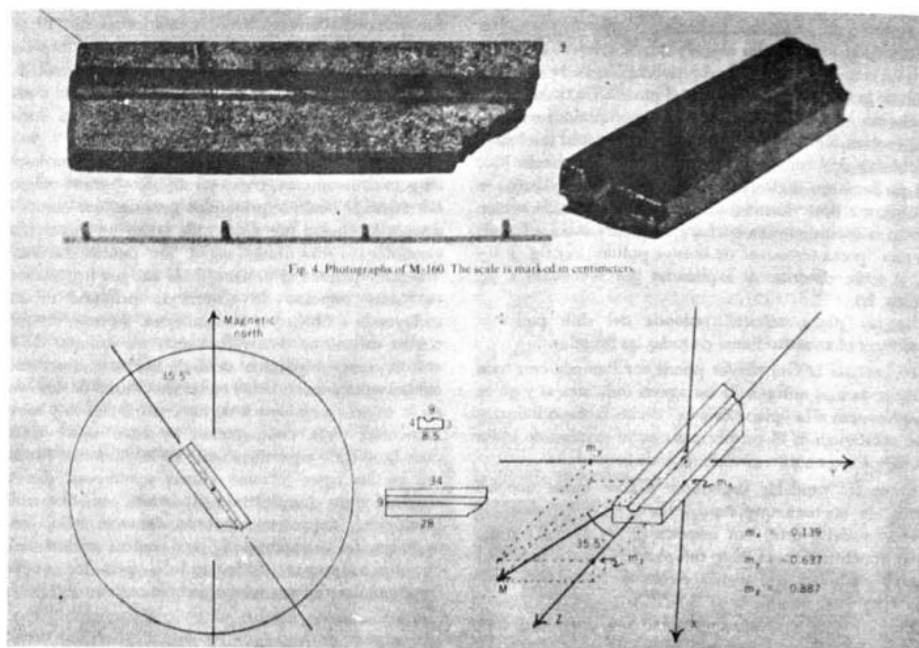


Figura 4.6. Fotografía de M-160, a) cara superior y seccional de M-160, b) vector del momento magnético total M y sus componentes

En 1970 Bucha y colaboradores estudiaron cerámicas de siete sitios arqueológicos en México, en la Figura 4.3 estos sitios de estudio están representados por los círculos verdes; para el estudio no solo tomaron cerámicas de México, sino que también cerámicas de Arizona teniendo un muestreo de 80 cerámicas (Figura 4.7), cuando se obtuvieron las edades de las cerámicas (edades entre 300 a.C hasta 1590 d.C) se hizo una comparación con las paleointensidades obtenidas en Europa y Asia

demostrando que hay una desviación hacia el oeste de la intensidad geomagnética de 0.24° por año (Bucha *et al.*, 1970)

En la figura 4.3, las estrellas rojas representan los 22 sitios arqueológicos (16 en México y 6 en Guatemala, Honduras y el Salvador) que Daniel Wolfram estudio entre 1969 y 1973 para obtener una cronología para Mesoamérica, en el estudio se encontraron edades entre 1 al 1200 d.C basándose en los datos arqueomagnéticos direccionales. Las muestras provienen de cerámicas quemadas, debido a que en ese entonces las dataciones de radiocarbono eran muy escasas la mayoría de su trabajo solo se realizó con estratigrafía, estilos cerámicos y arquitectónicos.

Sample No.	Provenience	Geographic coordinates (in deg)	Sample type	Age	Method of determination	F/F ₀
<i>Mexican samples</i> ^o						
1.	Morett, Colima	104W,19N	W-D	830 ± 280 B.C.	C ¹⁴ (UCLA 796)†	1.067, 0.987, 1.157
2.	Morett, Colima		W-D	825 ± 225 B.C.	C ¹⁴ (UCLA 799)†	1.140, 1.153
3.	Mexico, D.F. (Cuauhtlan)		Ceramic	100-300 B.C.	S	1.142, 1.250
4.	Morett, Colima		W-D	A.D. 1 ± 170	C ¹⁴ (UCLA 798)†	1.404
5.	Morett, Colima		Ceramic	A.D. 100 ± 200	C ¹⁴ (UCLA 911)†	1.880, 1.870
6.	Morett, Colima		Ceramic	A.D. 1-100	S	1.200
9.	Morett, Colima		Ceramic	A.D. 325 ± 100	C ¹⁴ (UCLA 912)†	1.568
10.	Morett, Colima		Ceramic	A.D. 500-700	SS	0.990, 1.222
11.	Morett, Colima		Ceramic	A.D. 500-700	SS	1.038, 1.148
12.	Tula, Hidalgo	99.3W,20.6N	Ceramic	A.D. 800-900	SS	1.192, 1.190
13.	Tizapan el Alto, Jalisco	103.1W,19.8N	Ceramic	A.D. 900-1100	SS	1.258, 1.248
14.	Tizapan el Alto, Jalisco		Ceramic	A.D. 900-1100	SS	1.383
15.	Amapa, Nayarit	105.3N,22.1N	Ceramic	A.D. 1000-1100	SS	1.593
16.	Amapa, Nayarit		Ceramic	A.D. 1200-1500	SS	1.468, 1.380
17.	Central Mexico (Aztec)		Ceramic	A.D. 1300-1500	SS	1.255
21.	Morett, Colima		Ceramic	A.D. 150-750	S	0.925
31.	Morett, Colima		Ceramic	300 B.C.-A.D. 100	S	1.098
32.	Playa del Tesoro	103.8W,18.4N	Ceramic	A.D. 150-750	S	1.644
34.	Playa del Tesoro		Ceramic	300 B.C.-A.D. 100	S	1.950
40.	Morett, Colima		Ceramic	300 B.C.-A.D. 100	S	1.085
<i>Arizona samples</i>						
41.	Tucson		Bricks	A.D. 1920	H	1.000, 1.030
42.	Tucson	111.5W,32.7N	Bricks	A.D. 1780		1.140, 1.153
43.	Snaketown	112.8W,33.9N	Ceramics	300 B.C.-A.D. 1	SCP	1.245, 1.180, 1.063
44.	Snaketown		Ceramics	100 B.C.-A.D. 100	SCP	1.130, 0.833
44.	Snaketown		Ceramics	100 B.C.-A.D. 100	SCP	1.568
45.	Snaketown		Ceramics	A.D. 100-300	SCP	1.410, 1.468
46.	Snaketown		Ceramics	A.D. 300-500	SCP	1.220
47.	Snaketown		Ceramics	A.D. 500-700	SCP	1.142, 0.926
48.	Snaketown		Ceramics	A.D. 700-900	SPT	0.744, 1.200, 1.010
49.	Snaketown		Ceramics	A.D. 900-1100	SCP	1.271, 1.254
50.	Snaketown		Ceramics	A.D. 900-1100	SCP	1.402, 1.348, 1.506
52.	Snaketown		Ceramics	A.D. 1200-1400	SPT	1.453, 1.222
53.	Pima	109.8W,32.9N	Ceramics	A.D. 1850-1900	ST	1.004

Figura 4.7. Edades, parámetros magnéticos y tipos de muestras de Arizona y México (Bucha *et al.*, 1970)

Otro estudio realizado en México fue el de la cabeza de tortuga de Izapa, Chiapas (Figura 4.8a), realizado por Malmström en 1976, la cabeza consistía en una escultura basáltica que se encontraba en la costa del Pacífico cerca del borde de Guatemala, al acercarle una brújula a la escultura la aguja

siempre se desviaba en dirección de la nariz de la tortuga. Se cree que la razón de que tenga forma de tortuga se debe a que en las playas cercanas a Izapa se encuentran nidos de tortuga negra de caparazón profundo que migra entre la costa de Guatemala y las islas Galápagos; los chinos también asociaban a las tortugas con el magnetismo, usando el término ‘roca tortuga negra’ para el basalto y haciendo sus primeras brújulas en forma de este animal. Debido a que fue el único objeto magnético encontrado en el sitio, los descubridores argumentaron que era un artefacto humano que fue alcanzado por un rayo y de esta manera fue inducido el campo magnético.

Además de la cabeza de tortuga, en 1979 se encontró en Guatemala esculturas a las que llamaron “*Fat Boys*” (Figura 4.8b), con las cuales asociaban el magnetismo con cualidades humanas, solo se puede conocer de estas esculturas que el polo magnético se encontraba en el ombligo, simbolizando la fuerza vital o la continuidad de la vida, mientras que si se encontraba en el templo derecho simbolizaba la conciencia, la memoria o el intelecto. En la figura 4.9 se muestra un mapa de las zonas estudiadas por Malmström donde se descubrieron esculturas con magnetismo.



Figura 4.8. a) Cabeza de tortuga de Izapa, Chiapas (Malmström, 1976); b) *Fat Boys*, La Democracia, Guatemala (Malmström, 1979)



Figura 4.9. Mapa de México con evidencia de magnetismo en México asociado a esculturas basálticas (Malmström, 2008)

Urrutia *et. al.*, entre 1981-1986 desarrolló un proyecto en colaboración entre la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad de Sternwate en Bonn, Alemania; en este estudio reportaron que los ejes mayores de edificios de sitios del Formativo tanto en Oaxaca como en Tabasco están orientados a 8° hacia el noroeste, por otro lado, en Teotihuacán, Chichen Itzá, Uxmal y Labná se observa una orientación 20° hacia el noroeste.

Investigaciones arqueomagnéticas recientes

A partir del año de 1999 se retoman investigaciones arqueomagnéticas en México, una de la hipótesis que se plantearon los investigadores era que, en la zona de México (Figura 4.10), había un estuco compuesto de ceniza volcánica y escoria molida, el cual tenía minerales magnéticos al igual que las rocas sedimentarias y podría guardar el campo magnético al endurecerse (Hueda, 2000).

El primer estudio que se realizó con ayuda del Dr. Tarling perteneciente de la Universidad de Plymouth, Inglaterra se efectuó el muestreo en

Teotihuacán, en el cual la técnica consistía en adherir mediante un pegamento epóxico algunos cilindros de madera a la muestra, una vez que se secase se podría orientar a con una brújula magnética, así como también con una brújula solar (Figura 4.11), los lugares donde se tomaron muestras fue de Teopancazco Cacaxtla, Tlaxcala, Xochicalco, Morelos y en el Templo Mayor de la Ciudad de México (Hueda y Soler 2001); las muestras fueron procesadas mediante desmagnetización mediante campos alternos crecientes hasta 100 mT y se obtuvieron las arqueodirecciones para el templo Teopancazo y el Templo Mayor, donde la temporalidad de estos templos fueron periodo clásico y periodo posclásico respectivamente (Hueda y Soler, 2001; Hueda 2004).



Figura 4.10. Localización de la zona arqueológica en el centro de México (Hueda. Y, 2004)



Figura 4.11. Muestra usando la técnica de encapsulado en madera, (Hueda. Y, 2004)

En este estudio se realizó una curva preliminar VGP (Figura 4.12) sumando los resultados obtenidos con los resultados reportados por Wolfram (Wolfram 1973, 1981, 1990), estos resultados estaban dirigidos para reevaluar la cronología relativa y absoluta mesoamericana entre un periodo del año 1 hasta 1200 d.C.

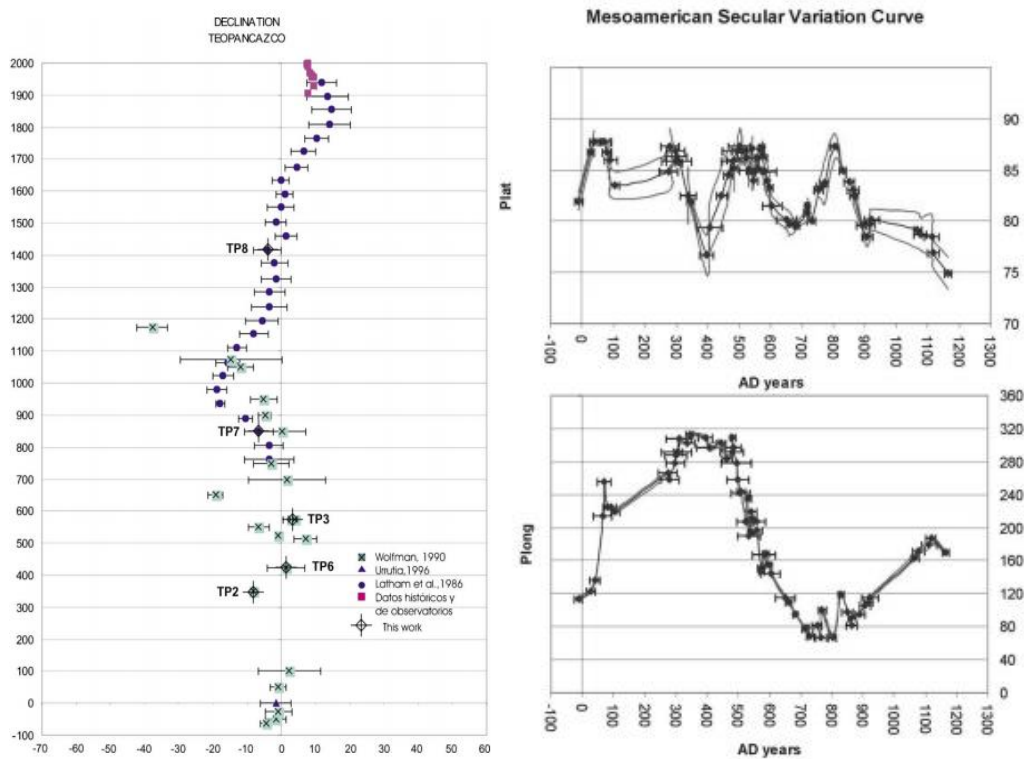


Figura 4.12. Curva de PSV para Mesoamérica, con datos de sitios arqueológicos, rocas volcánicas, datos históricos y de observatorio (Hueda. Y, 2004; Wolfram, 1973, 1990)

En 2004 se llevó a cabo el primer intento para la datación de pinturas murales de Mesoamérica, el estudio fue realizado por Gogichaishvili *et al.*, para el estudio seleccionaron cuatro pinturas murales (Figura 4.13), Templo de Venus, Templo Rojo, Chapulines y Estrellas, dichos sitios corresponden al periodo Clásico y Posclásico. Se determinó exitosamente la dirección de magnetización (Figura 4.14) de las 28 muestras tomadas y el resultado de

la pintura fue una mezcla de magnetita y hematita responsable de la magnetización y que aún conservaba la dirección del CMT del momento en el que fueron pintadas. Al no contar con una curva maestra confiable para Mesoamérica era difícil intentar una datación arqueomagnética, pero con la curva preliminar de Hueda. Y, 2004 (Figura 4.14) se pudo estimar edades, para el templo Venus, Estrellas y Chapulines entre 1000 d.C y 1200 d .C



Figura 4.13. Toma de muestras de murales (Gogichaishvili et al., 2016)

Tabla 4.2. Direcciones arqueomagnéticas medias de los murales estudiados (Gogichaishvili et al, 2004)

Mural	N	Dec (°)	Inc (°)	α_{95} (°)	k
Chapulines	7	339.8	47.1	7.5	65
Estrellas	10	351.8	48.3	10.4	63
Templo Rojo	5	16.8	44.1	5.3	209
Templo Venus	6	348.7	35.1	10	46

Otro estudio realizado en Teotihuacán, realizado en 2006 por Soler-Arechalde *et al.* en los yesos de cal encontrados en las áreas residenciales de Xalla y Teopancazco (Figura 4.15); se recolectaron 153 muestras las cuales se sometieron a experimentos de histéresis magnéticas, los cuales se muestran bastante simétricas (Figura 4.16), que probablemente refleje los rangos muy restringidos de las colectividades de los minerales magnéticos, las edades de las muestras corresponden a los periodos preclásico y clásico.

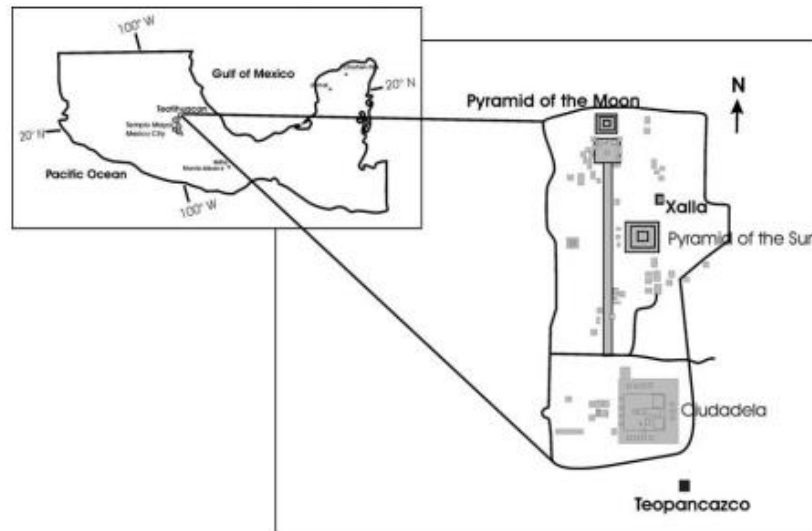


Figura 4.15. Ubicación de la zona de exploración (Soler-Arechalde, A.M. et al, 2006)

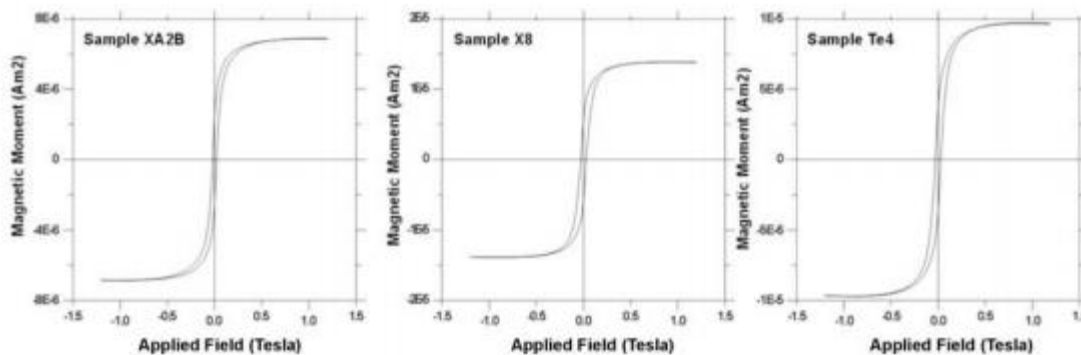


Figura 4.16. Ciclo de histéresis magnética para las muestras de Xalla y Teopancazo (Soler-Arechalde, A.M. et al, 2006)

Un estudio más reciente fue realizado por Morales, J *et. al.*, en 2013 en el cual se estudiaron rocas magnéticas y arqueointensidades de fragmentos de cerámicas (Figura 4.17a) recuperados en el sitio arqueológico de Puertas de Rolón, Colima. Los resultados de la datación arqueomagnética arrojaron cuatro posibles intervalos de tiempo (Figura 4.17b), el contexto arqueológico proporciona un *terminus post quem* (fecha más antigua) para las cerámicas de 2000 a.C – 1200 a.C, por lo cual el intervalo BC es el más congruente (1481 BC – 1265 BC).

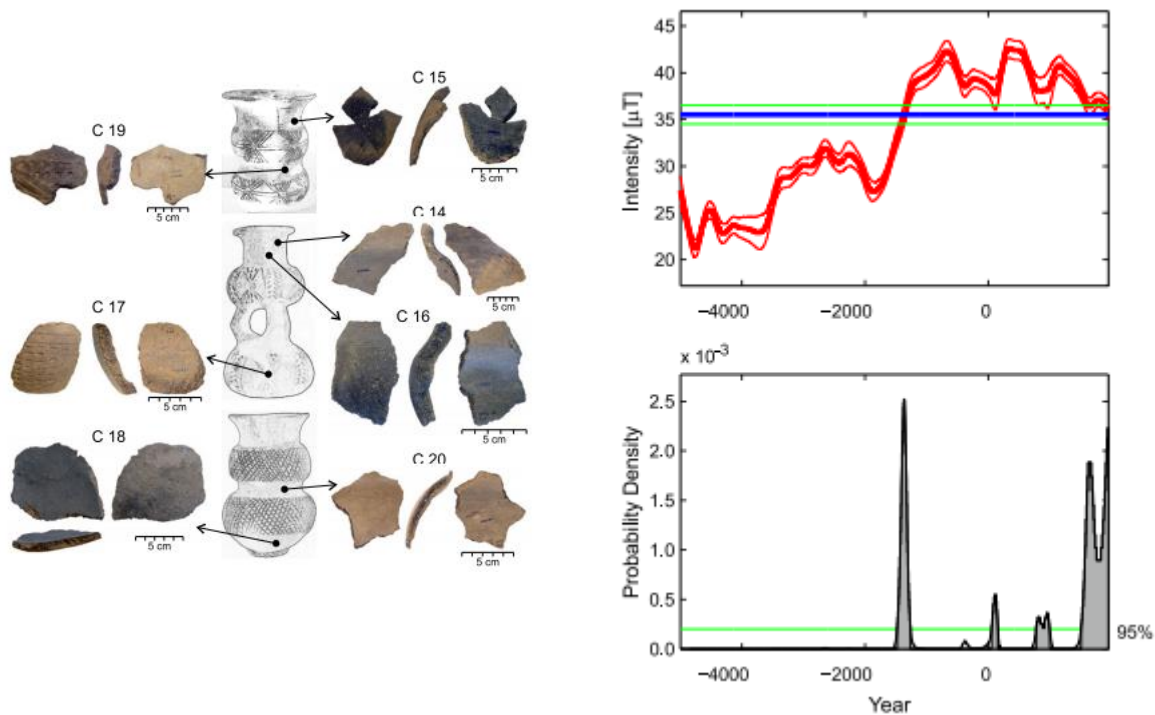


Figura 4.17. Rocas y cerámicas de Puertas de Rolón, Colima; a) Reconstrucción hipotética de la cerámica recolectada; b) Resultados de la datación arqueomagnética (Morales, J *et. al.*, en 2013)

A lo largo de los años se ha aumentado el interés por las antiguas civilizaciones que habitaban en México y con el avance de la tecnología las investigaciones han tenido gran alcance que en el siglo pasado solo vivía en la imaginación; en el capítulo se ha revisado varios estudios y se puede observar la evolución de los diferentes softwares, así como se han desarrollado diferentes técnicas

revolucionarias que han facilitado el estudio de las diferentes muestras tomadas en campo.

Gracias al contexto histórico, sobre las civilizaciones, se puede conocer el comportamiento de estas mismas en el pasado y con la integración de los estudios arqueomagnéticos a la arqueología se logra una visión más acertada sobre el pasado y de esta manera nos podemos dar una idea de las sociedades en Mesoamérica.

En el país se ha mostrado un esfuerzo por parte de la Universidad Autónoma de México para desarrollar nuevos institutos para el estudio del paleomagnetismo y el arqueomagnetismo para estudiar las diferentes zonas del país y ampliar la historia que ya conocemos.

CAPÍTULO 5. ZONA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

Zona de muestreo

Las muestras que se analizaron provienen del sector N4W1 (Millon *et. al.*, 1973), en específico en la zona del Patio de Los Jaguares y del muro norte del edificio conocido como 4A en la Plaza de Luna; estas áreas se encuentran en el extremo norte de la Calzada de Muertos y corresponden a edificios relacionados con actividades públicas en la Gran Plaza.

En la figura 5.1 se observa las zonas de donde provienen las muestras, las muestras T1 y T2 fueron extraídas de la penúltima etapa constructiva del acceso sur del Patio de Los Jaguares; pertenecen a un muro quemado cubierto con yeso estuco y decorado con pintura roja.



Figura 5.1. Vista aérea de la zona arqueológica de Teotihuacán que muestra las localidades de muestreo

La muestra T3 proviene de la pared norte del edificio 4A, un elemento que comparte evidencia de exposición a un fuego intenso que involucra el corredor que conecta los edificios 4 y 4A; corresponde a la última etapa constructiva de la 4A, la cual parece ser una modificación a la planta original de la Plaza ocupando la zona que separa los edificios 4 y 5. Ambas zonas, después de ser expuestos al fuego, continuaron en funcionamiento e incluso sufrieron modificación en su estructura como en su pintura.

Análisis de laboratorio

Los experimentos de este estudio se realizaron en las instalaciones del Servicio Arqueomagnético Nacional en la ciudad de Morelia, el cual pertenece a la Universidad Nacional Autónoma de México.

Las curvas de susceptibilidad vs temperatura (k-T) se registraron con el dispositivo AGICO Kappabridge MFK1B conectado a un horno CS3 con un campo aplicado de $H_{app} = 300 \frac{A}{m}$. La velocidad de calentamiento y enfriamiento se mantuvo a 10° por minuto. La magnetización termoremanente (TRM) se midió con un magnetómetro giratorio JR6 AGICO.

Las 24 muestras pertenecientes a los tres sitios de nuestros, se desmagnetizaron casi por completo utilizando campos alternos de pico hasta 90 mT utilizando un desmagnetizador LDA5; el análisis de los datos de los tratamientos magnéticos se realizó con el software Remasoft, Chadima y Hroudá, 2006, mientras que el análisis de componentes principales (Kirschvink, 1980) se utilizó para calcular los componentes característicos de las paleodirecciones; para determinar las paleointensidades se realizaron con el método de Thellier y Thellier (1959) modificado por Coe *et. al.*, 1978, se seleccionaron para los experimentos muestras que exhibían componentes paleomagnéticos uni-vectoriales sin ninguna sobreimpresión secundaria y las curvas termomagnéticas continuas reversibles y razonablemente

estables. Se utilizó un horno de doble cámara ASC Scientific TD-48 equipado con bobinas, dicho experimento consistió en una secuencia de 11 pasos dobles de calentamiento-enfriamiento entre la temperatura ambiente y 540 °C, usando un campo de laboratorio $B_{LAB} = 50 \mu T$ aplicados a lo largo del eje transversal del horno; las muestras se dejaron a enfriar naturalmente. Durante el experimento se realizaron tres calentamientos adicionales de chequeo (pTRM *Checks* por sus siglas en inglés) a temperaturas claves siempre inferiores a las temperaturas de desbloqueo.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mineralogía magnética

Las curvas termomagnéticas continuas (Figura 6.1) mostraron un comportamiento reversible para todas las muestras; en todas se encuentra magnetita o titanomagnetita empobrecida de Ti. En las muestras T1 se detectaron dos fases ferrimagnéticas inferiores, a una temperatura aproximadamente de 200 °C a 400°C.

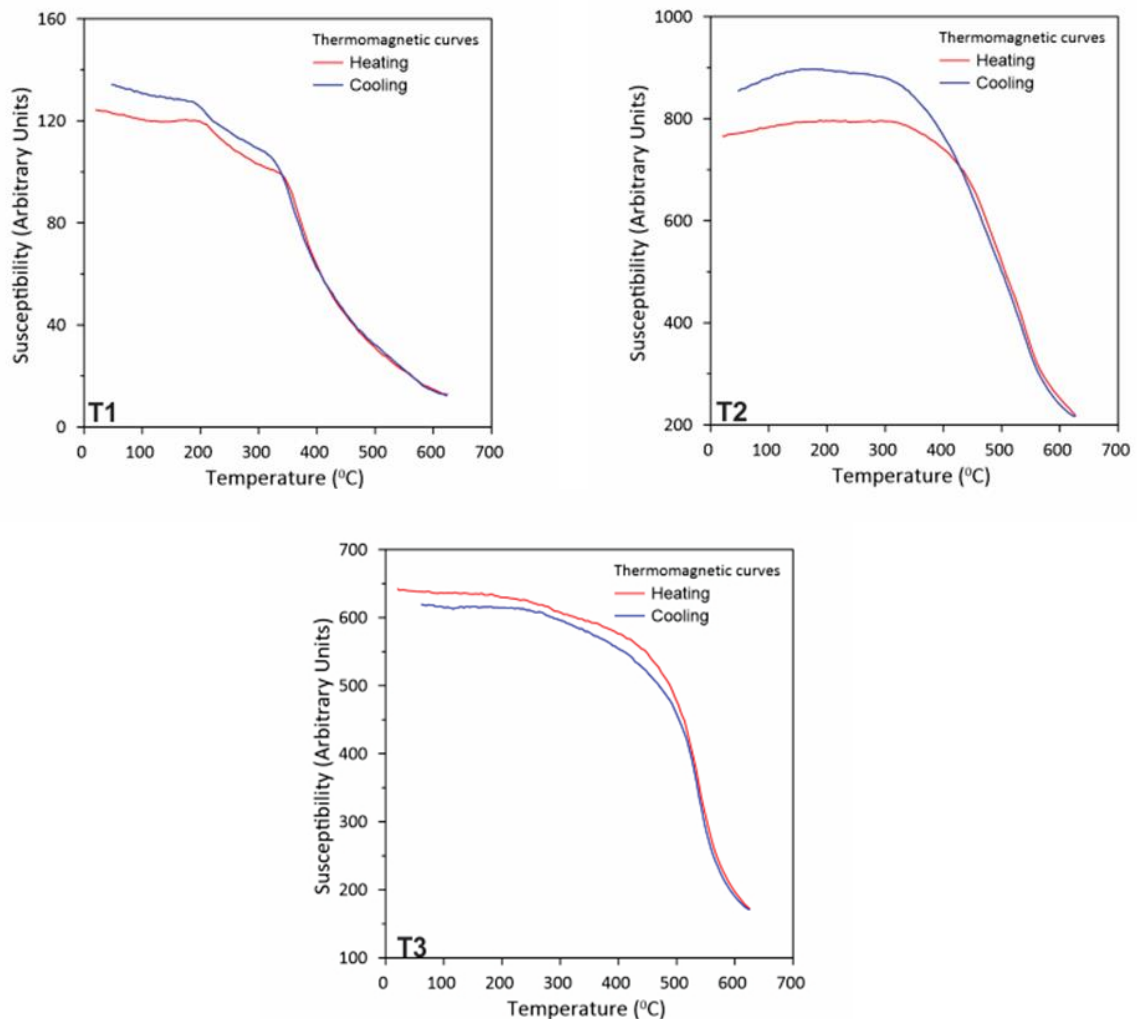


Figura 6.1. Curva termomagnética continua (susceptibilidad vs temperatura). La línea corresponde a la etapa de calentamiento, mientras que la línea azul a la etapa de enfriamiento

Desmagnetización por campos alternos

El proceso de desmagnetización MRN para las 24 muestras apunta a un único componente paleomagnético con sobreimpresiones viscosas insignificantes, las cuales se eliminan en los primeros pasos del tratamiento; la desmagnetización casi por completo se logra a un campo alterno de pico de 70 mT aproximadamente, en la figura 6.2 se muestran los gráficos ortogonales de Zijdeveld que se obtuvieron en este proceso.

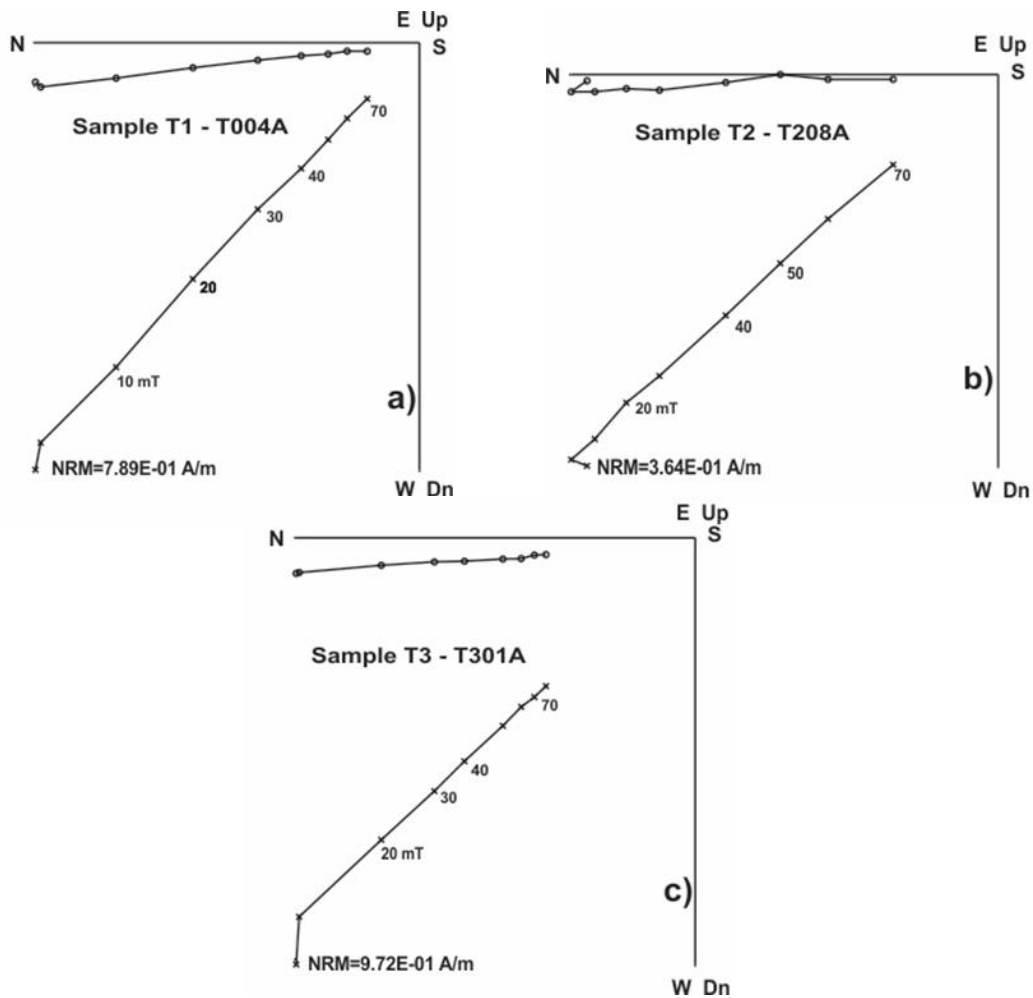


Figura 6.2. Diagramas ortogonales vectoriales representativos obtenidos durante los tratamientos de desmagnetización progresiva de campo alterno. NRM indica el valor inicial de la magnetización en A/m, se indica el valor pico del campo aplicado en cada paso en mT.

Aunque provienen de diferentes localidades todas las muestras arrojaron paleodirecciones medias similares e indistinguibles.

Tabla 6.1. Paleodirecciones medias determinadas por estructura

Muestra	Inclinación	Declinación	α_{95}	k	N
T1	45.2 °	355.4 °	1.7°	1038	8
T2	44.3°	354.4°	2.6°	776	8
T3	44.1°	356.1°	2.3°	573	8

Arqueointensidades

Las 24 muestras fueron seleccionadas para los experimentos de Thellier de doble calentamiento, esto debido a que los especímenes analizados exhibieron componentes paleomagnéticos uni-vectoriales térmicamente estables. A pesar de analizar todas las muestras disponibles, sólo 15 de ellas arrojaron determinaciones técnicamente aceptadas (Tabla 6.1); en la Figura 6.3 los diagramas de Zijderveld en los puntos finales MRN muestran segmentos razonablemente rectos que apuntan al origen en todos los casos.

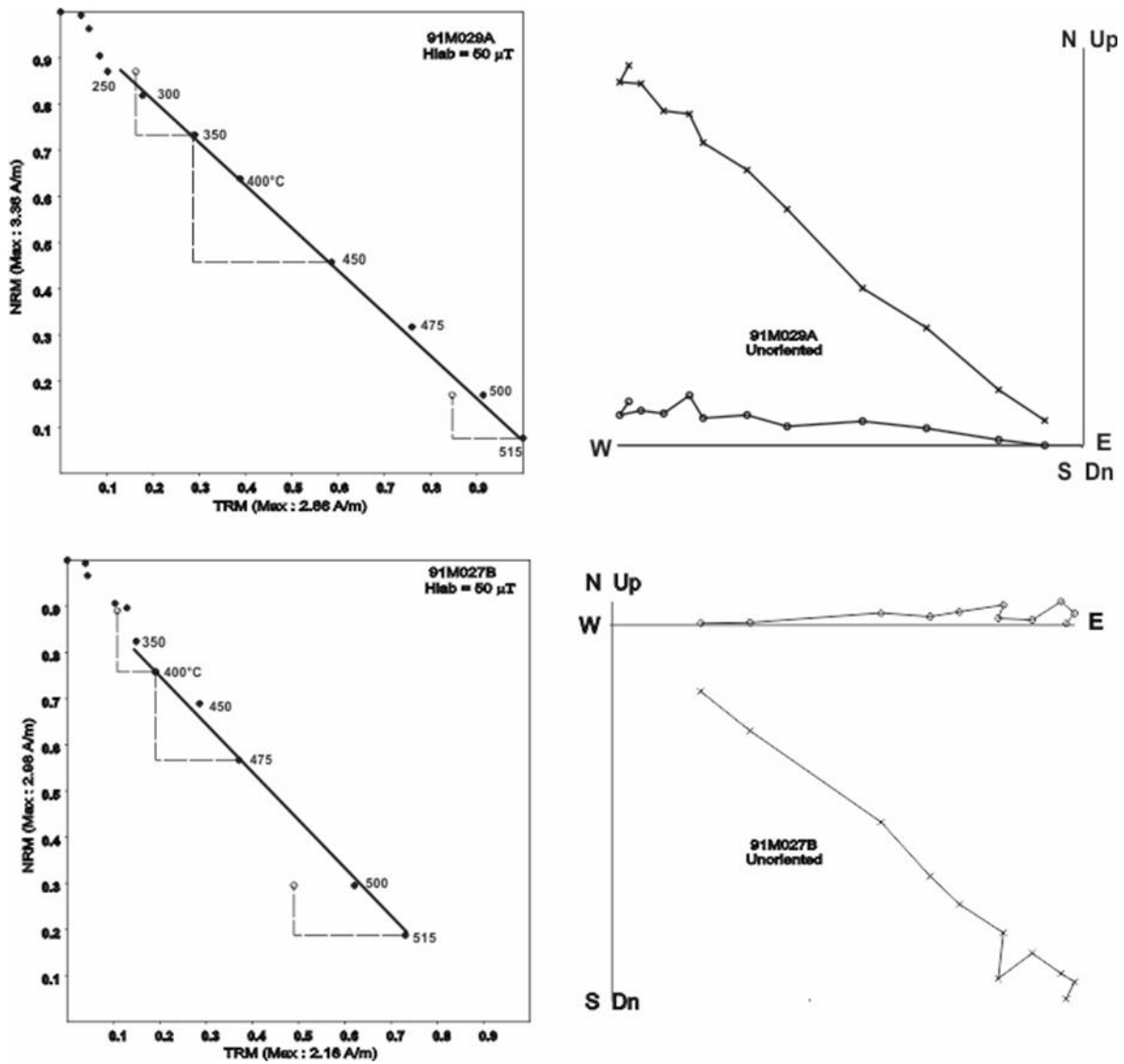


Figura 6.3. Diagramas Arai representativos obtenidos durante los experimentos de paleointensidad. NRM removido vs TRM adquirido para los pisos quemados de Teotihuacán y sus correspondientes diagramas ortogonales.

Para los parámetros de calidad de Coe *et al.*, 1978, f varía entre 0.14 a 0.94 y q tiene un rango entre 6.1 a 37.2; se descartaron nueve determinaciones individuales por los parámetros de MAD (Leonhardt *et al.*, 2004; Gogichaishvili *et al.*, 1999) porque excedieron los 10° ; el factor de curvatura k (Paterson *et al.*, 2011) arrojó valores superiores a 0.3; por último, todas

las muestras aceptadas tienen paleointensidades individuales similares, la cuales varían entre 49.5 a 54.5 μT (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. Datos de paleointensidad de Thellier para las muestras aceptadas

Sample	Tmin- Tmax °C	N	f	q	g	MAD (°)	γ (°)	H \pm σH (μT)
91M013	200-500	8	81	18.5	0.82	3.6	4.8	54.5 \pm 2.0
91M014	200-500	8	0.67	9.9	0.76	6	5.6	53.3 \pm 2.4
91M016	200-515	9	0.79	15.1	0.77	4.4	6.2	51.5 \pm 1.9
91M017	200-500	8	0.72	7.6	0.81	6.8	5.9	53.3 \pm 3.4
91M018	200-515	9	0.8	20.1	0.74	3.4	4.6	51.8 \pm 1.6
91M019	150-515	10	0.95	37.2	0.82	2.1	4	53.8 \pm 1.3
91M020	150-500	9	0.56	13.8	0.86	4.9	6.1	51.2 \pm 1.5
91M021	150-515	10	0.76	8.6	0.85	5.5	5.3	50.7 \pm 2.3
91M022	200-515	9	0.78	16.9	0.81	4.2	3.8	54.4 \pm 1.8
91M023*	200-515	9	0.77	14.7	0.79	4.6	5.8	62.1 \pm 2.6
91M024	200-515	9	0.81	14.3	0.81	5.1	3.9	49.5 \pm 2.3
91M026	150-515	10	0.83	20.4	0.84	3.2	2.8	51.3 \pm 1.7
91M027	150-515	10	0.81	26.4	0.82	2.8	4.3	52.2 \pm 1.4
91M029	150-515	10	0.84	34.6	0.85	2.5	4.1	49.7 \pm 0.9
91M030**	150-400	6	0.39	5.8	0.81	8.4	6.8	53.4 \pm 2.4

*la muestra 91M023 arrojó un valor anormal y fue rechazada para el cálculo

** la muestra 91M030 mostró un valor de k un poco elevado, respecto a la media individual

DISCUSIÓN

Las muestras arrojaron paleodirecciones y paleointensidades que estadísticamente son indistinguibles, por lo cual se decidió calcular la media de todas las 24 determinaciones individuales, los valores promedio son: Inclinación = 44.6°, Declinación = 335.5°, α_{95} = 1.1° y k = 685, N = 24; mientras que el promedio de la paleointensidad absoluta en 15 determinaciones es de 52.16 \pm 1.6 μT .

Para obtener las edades, se utilizó el modelo geomagnético SHA.DIF.14k (Pavón Carrasco *et al.*, 2014) a partir de las componentes direccionales y el valor de la paleointensidad promedio de las muestras estudiadas. Con ayuda de la herramienta de Matlab (Figura 6.4) se compara con la curva PSV global para obtener los intervalos de edad más probables, arrojando en este caso un único intervalo temporal entre 327-441 d.C, el cual se considera como la mejor estimación de la última exposición al fuego de estas muestras.

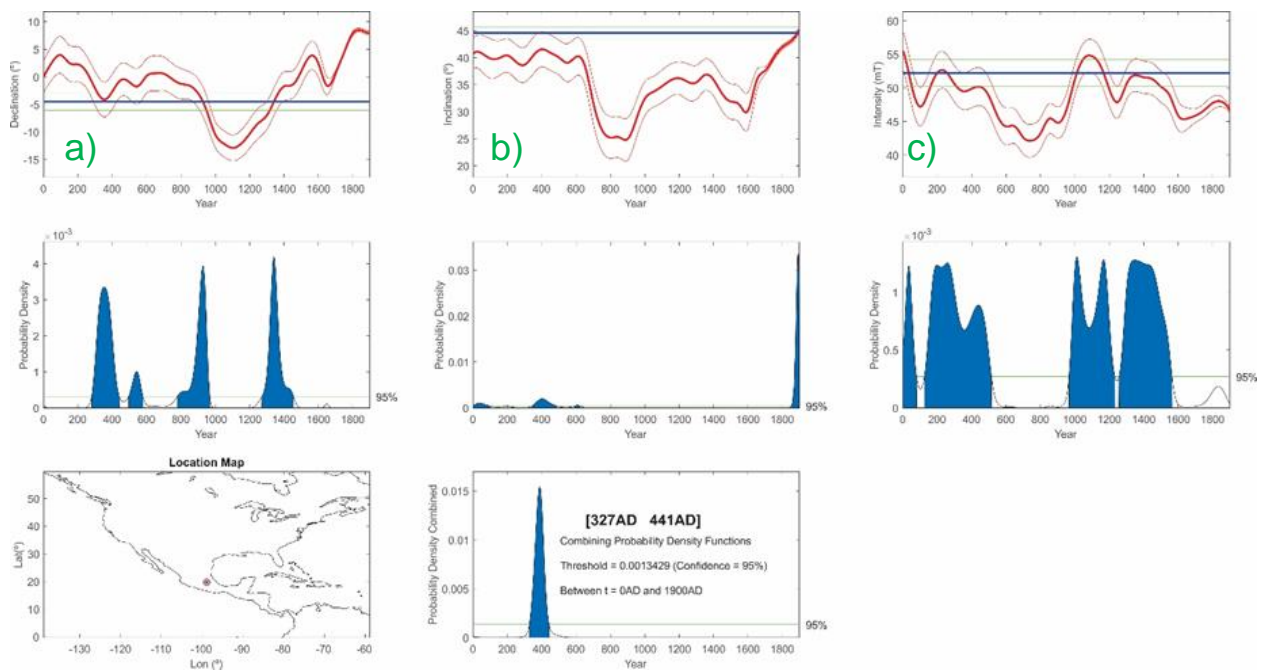


Figura 6.4. Datación arqueomagnética utilizando el modelo geomagnético global SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco *et. al* 2011, 2014), para las muestras tomadas, basadas en el vector completo geomagnético a) Declinación; b) Inclination y c) Intensidad absoluta

El colapso de Teotihuacán siempre ha sido tema de discusión, la teoría más aceptada y la que se ha comprobado, como se ha mencionado antes, consiste en un incendio que posiblemente se deba a un cierre de ciclos y posteriormente lleve a la migración de la civilización alrededor del 650 d.C; los estudios arqueomagnéticos previos en la zona, como el realizado por

Soler-Arechalde *et. al.*, 2006 donde estudiaron el quemado y no quemado de estucos, les proporcionó una edad entre 550-575 d.C.

Otro estudio realizado en la Plaza de las Columnas por el INAH en 2019, arrojaron que entre los años 350 a 450 d.C la civilización maya tuvo participación en grandes eventos realizados en Teotihuacán, esto debido a que se encontraron fragmentos de murales de estilo maya demolidos intencionalmente, además de incendios en el complejo, sugiere una interacción entre ambas culturas en algún cambio importante en la ciudad o inicio de nuevas alianzas/vínculos.

Si comparamos los resultados obtenidos en investigaciones anteriores con los obtenidos anteriormente parece indicar que Teotihuacán experimentó varios episodios de incendios, los cuales probablemente fueron provocados por la civilización con simbolismos para rituales, como aquellos que son para dar terminación a un ciclo o el inicio de alguna etapa constructiva.

Siendo así, el propósito de los incendios no era para destruir la ciudad, sino para empezar una nueva etapa constructiva para darle una nueva imagen a los espacios urbanos, por lo cual los incendios registrados en siglos posteriores a los resultados obtenidos, podrían estar relacionados al colapso de la sociedad teotihuacana y el nacimiento de las nuevas civilizaciones mesoamericanas.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Después de todo, durante el proceso de elaboración de este trabajo se cumplió la mayoría de los objetivos propuestos en el principio de la investigación, además de realizar una nueva aportación tanto científico como histórica para la civilización teotihuacana.

En esta investigación se tuvo como objetivo obtener dataciones del abandono y declive de Teotihuacán al realizar un estudio arqueomagnético. En base a los resultados adquiridos de la datación arqueomagnética, cumplimos en su totalidad dicho objetivo debido a que no obtuvimos edades referentes al abandono de la ciudad, sino que las muestras arrojaron un periodo de tiempo anterior a este evento.

Dentro de nuestros objetivos teníamos obtener la susceptibilidad magnética frente a la temperatura y los minerales magnéticos en las muestras, estos objetivos se lograron con éxito; de las curvas termomagnéticas identificamos magnética y titanomagnetita pobre en Ti y un comportamiento reversible para todas las muestras.

Los resultados cronológicos que se obtuvieron, se pueden relacionar a estudios anteriores realizados en la zona, contribuyendo a las teorías que se tienen sobre los incendios en la ciudad con un propósito simbólico, por lo cual se cumplieron con éxito los objetivos específicos propuestos en un principio.

Para concluir, los estudios arqueomagnéticos aportan información sobre los sitios arqueológicos al determinar variaciones temporales y espaciales del CMT a partir de los materiales arqueomagnéticos, en este caso fueron muestras quemadas, de las cuales obtuvimos el periodo del incendio; por lo tanto, se debería fomentar el interés en realizar este tipo de investigaciones

para mejorar la base de datos global y de esta manera obtener resultados más exactos a la realidad y conocer sobre el pasado de la Tierra.

REFERENCIAS

- Aguilar-Parra, L.I., Morales-Sánchez, R. (2011) Estudio arqueomagnético: Una aplicación a la cronología de la arquitectura de tierra en el sitio “La Joya”, Veracruz: México, Escuela Nacional de Antropología e Historia, Bsc thesis of Archaeology, p. 195.
- Acosta, Jorge R. (1962a). “El Palacio de las Mariposas en Teotihuacán.” Boletín INAH, no. 9 (septiembre): 5-7.
- Acosta, Jorge R. (1962b). “Últimos trabajos arqueológicos en Teotihuacán.” Boletín INAH, no. 10 (diciembre): 8-10.
- Acosta, Jorge R. (1964). El palacio de Quetzalpapálotl. México: INAH (113 figuras).
- Armillas, Pedro. (1944) 1991a. “Exploraciones recientes en Teotihuacán, México.” En Pedro Armillas: Vida y obra, editado por Teresa Rojas Rabiela, 77-98. México: Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social-INAH (tomo I).
- Bernal, Ignacio (1963) Teotihuacán. Descubrimientos y reconstrucciones. México, INAH.
- Bloxham, J., and Gubbins, D. (1989). The evolution of the Earth’s magnetic field. *Scientific American*, 261: 30–37
- Bucha V., Taylor R. E., Berger R, Haury, E. W. (1970) Geomagnetic Intensity: Changes during the Past 3000 years in Western Hemisphere, *Science*, 168, pp. 111-114.
- Butler, R. F. (2004). *Paleomagnetism: From Magnetic Domains to Geologic Terranes*, Portland, Oregon: University of Portland
- Carlson, J.B. (1982). Brújula de piedra-imán, ¿primicia china u olmeca? *La Palabra y el Hombre*, 44, pp. 15-28
- Carrancho, A., Gogichaishvili, A., Kapper, L., Morales, J., Soler, A.M. y Tema, E. (2015). Geomagnetic applications in archeology: state of the art and recent advances. En: *New Developments in Paleomagnetism Research* (Ed. Lev. V. Eppelbaum), Nova Science Publisher.

- Catalá, J.D., Abad, J. (2018). Magnetismo, Editorial: Tébar Flores, Pro Quest EbookCentral
- Catanzariti, G., M. Gomez-Paccard, G. McIntosh, F. J. Pavon-Carrasco, A. Chauvin y M. L. Osete (2012). New archaeomagnetic data recovered from the study of Roman and Visigothic remains from central Spain (3rd-7th centuries). *Geophys. J. Int.*, 188(3), 979-993.
- Chadima, M., Hroudá, F., (2006). Remasoft 3.0—a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer. *Travaux Geophysiques XXVII*, 20–21
- Coe R.S, Grommé C.S, Menkinen E., (1978). Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low. *J Geophys Res* 83(B4):1740–1756.
- Coe, M. D., 1967. Olmec civilization, Veracruz, México: Dating of San Lorenzo Phase, *Science*, 155, 1399-1401.
- Cowgill, G. L. (2008). An update on Teotihuacan. *Antiquity*, 82(318), 962–975.
- Daly, L., and Le Goff, M., (1996). An updated and homogenous world secular variation database. 1. Smoothing of the archaeomagnetic results, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 93, 159–90.
- Dunlop, D. (1995). Magnetism in rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B2), 2161-2174.
- Dunlop, D., and Özdemir, Ö. (1997). *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press, 573 pp
- Elsasser W.M. (1957). "Geophysics Symposium on Solar and Terrestrial Relationships," these PROCEEDINGS, 43, 14-24.
- Elsasser, W. (1958). The Earth as a Dynamo. *Scientific American*, 198(5), 44-49.
- Evans, M.E. Y Heller, F (2003). *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmagnetics*. Academic Press, San Diego, CA. 299 pp.

- Fregoso, D., 2010, Estudio Arqueomagnético del Abrigo Rocoso “Los Grifos”, Chiapas. Sitio de Ocupación Temprana en América: Mexico, Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Bsc Thesis of Physics, 124 p
- Games, K. P., (1977). The magnitude of the paleomagnetic field: a new non-thermal, non-detrital method using sun-dried bricks. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 48, 315-32
- Genevey, A., Gallet, Y., Constable, C., Korte, M., y Hulot, G. (2008), *ArcheoInt: An upgraded compilation of geomagnetic field intensity data for the past ten millennial and its application to the recovery of the past dipole moment.* *Geochem. Geophys. Geosyst.* 9(4).
- Glatzmaier, G.A., (2002). Geodynamo simulations—how realistic are they?. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 30: 237–257.
- Glatzmaier, G.A., and Roberts, P.H. (1995). A three-dimensional self-consistent com Tarling D.D. (2007) *Archeomagnetism.* In: Gubbins D., Herrero-Bervera E. (Eds) *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism.* Springer, Dordrecht.
- Goguitchaichvili, A., M. Prévot, N. Roberts and J. Thompson, (1999). An attempt to determine the absolute geomagnetic field intensity in Southwestern Iceland during the Gauss-Matuyama reversal. *Phys. Earth Planet. Lett.*, 115, 53-66
- Goguitchaichvili, A., Soler, A. M., Zanella, E., Chiari, G., Lanza, R., Urrutia-Fucugauchi J., González, T. (2004). Pre-Columbian mural paintings from Mesoamerica as geomagnetic field recorders. *Geophysical Research Letters* 31/12.
- Goguitchaishvili, A., Morales, J., López, R. E., Soler, A., Fucugauchi, J. U., & Solano, M. C. (2016). Primer intento de datación de pinturas murales mesoamericanas. *Arqueología Iberoamericana*, 8(29), 3-8.
- Gómez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P., McIntosh, G., Osete, M.L., Catanzariti, G., Ruiz-Martinez, V.C. y Núñez, J.I. (2006). The first archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula.

- Comparison with other data from Western Europe and with global geomagnetic field models. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7, pp. 1-20.
- Gómez-Paccard, M., Pavón-Carrasco, F.J., y Carrancho, A. (2016). Arqueomagnetismo: aplicación al estudio del campo magnético de la Tierra y a la caracterización de yacimientos arqueológicos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, (24.3), pp. 294-303
 - Gubbins, D. Geomagnetic reversals. *Nature* 452, 165–167 (2008).
 - Harold, M. R. (1960). Magnetic dating: the spinning magnetometer, *Archaeometry*, 3, 47–9.
 - Hernández-Ávila, E. R. (2010) Control Cronométrico basado en arqueomagnetismo de Teopancazco, Estado de México: México, Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Bsc Thesis of Physics, p. 104.
 - Hroudá, F., Müller, P. y Hanák, J. (2003). Repeated progressive heating in susceptibility vs. temperature investigation: A new palaeotemperature indicator? *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 653-657
 - Hueda Y., (2000). Fechamiento arqueomagnéticos de estucos de los sitios de Teopancazco, Teotihuacán y Templo Mayor, Tenochtitlan. Tesis Licenciatura Arqueología, ENAH, México, 128 pp.
 - Hueda Y., Soler A. M., (2001). Fechamiento arqueomagnético de estucos en sitios de Teopancazco, Teotihuacán, Templo Mayor, Tenochtitlán. Informe presentado al Consejo de Arqueología. Agosto de 2001.
 - Hueda-Tanabe, Y., Soler-Arechalde, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Barba, L., Manzanilla, L., Rebolledo-Vieyra, M., Goguitchaichvili, A., (2004). Archaeomagnetic studies in central Mexico—dating of Mesoamerican lime-plasters. *Phys. Earth Planet. Inter.* 147 (2), 269–283
 - INAH, (2019). “Nuevos hallazgos en Teotihuacán revelan relación con mayas entre 350 y 450 dC” en *Boletín* 8195, México.
 - Jiménez, P., Morales, J., & Soler, A. M. (2019). La Quemada: Decline and

- Jones C. (2007) Geodynamo. In: Gubbins D., Herrero-Bervera E. (eds) Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. Springer, Dordrecht.
- Korte, M., Donadini, F., Constable, C. G., (2009). Geomagnetic field for 0-3 ka: 2. a new series of time-varying global models. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 10, Q06008
- Lachniet, M. S., Bernal, J. P., Asmerom, Y., Polyak, V., & Piperno, D. (2012). A 2400 yr Mesoamerican rainfall reconstruction links climate and cultural change. *Geology*, 40(3), 259–262.
- Lanos, P., M. Kovacheva y A. Chauvin (2000), *Arqueomagnetismo, metodología y aplicaciones: Implementación y práctica del método arqueomagnético en Francia y Bulgaria*, *Eur. J. Archaeol.* 2, 365 - 392.
- Leonhardt, R., C. Heunemann, D. Krása, (2004). Analyzing absolute paleointensity determinations: Acceptance criteria and the software ThellierTool 4.0 *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*,
- Linford, N.T. y Platzman, E. (2004). Estimating the approximate firing temperature of burnt archaeological sediments through an unmixing algorithm applied to hysteresis data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 147 (2–3), 197–207
- López-Delgado, V., Soler-Arechalde, A.M., Espinosa-Rodríguez, G., Goguitchaichvili, A. (2011) Rock-magnetic and archeomagnetic survey from some classical settlements at Chapultepec archeological site (western Mesoamerica): *Studia Geophysica et Geodaetica*, 55(2), pp. 329-342.
- López-Delgado, V., Soler-Arechalde, A.M., Esparza-López, J. R., Goguitchaichvili, A., Caballero-Miranda, C.I., Morales, J. (2017) Guachimontones de Teuchitlán: un estudio arqueomagnético para mejorar la cronología del Occidente de México: *Arqueología Iberoamericana* 33, 27-34
- López-Delgado, V., Goguitchaichvili, A., Torreblanca, C., Cejudo, R., Jimenez, P., Morales, J., & Soler, A. M. (2019). La Quemada: Decline and

abandonment in two stages on the classic period northern frontier of Mesoamerica. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 24 (October 2018), 574–581.

- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. New York: Cambridge University Press.
- Lowrie, W (2007). *Fundamentals of Geophysics*, Cambridge, New York, Melbourne. *Geological Magazine - GEOL MAG*, 145.
- Manzanilla, Linda Rosa. (1993). Manzanilla 1993. Vida cotidiana. Armonía en el tiempo y el espacio, *Arqueología Mexicana* 1. *Arqueología mexicana*. I. 16-19.
- Manzanilla, Linda Rosa. (1996). Manzanilla 1996 La estructura económica de Teotihuacan y Tiwanaku.
- Manzanilla, L. (2001). Agrupamientos sociales y gobierno en Teotihuacán, Centro de México. *Reconstruyendo La Ciudad Maya: El Urbanismo En Las Sociedades Antiguas*, 461–482.
- Manzanilla, L. (2003). El proceso de abandono de Teotihuacán y su recuperación por grupos epiclásicos. *Statistical Field Theor*, 53(9), 1689–1699.
- Manzanilla, L. (2003). The abandonment of Teotihuacan. *The Archaeology of Settlement Abandonment in Middle America*, 91–104.
- Manzanilla, L. (2018). El palacio de Xalla en Teotihuacan. 53(9), 1689–1699.
- Martínez-Miranda, V. (2013) Tula el tiempo perdido- Fechamientos arqueomagnéticos: México, *Escuela Nacional de Antropología e Historia: Bsc thesis in Archaeology*, p. 191.
- Merrill R.T. (2007) Rock Magnetism. In: Gubbins D., Herrero-Bervera E. (eds) *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer, Dordrecht. https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/978-1-4020-4423-6_281puter simulation of a geomagnetic field reversal. *Nature*, 377: 203–209

- Millon, R., (1973). Urbanization at Teotihuacán, Mexico. Volume One: The Teotihuacán Map. Part One: Text. University of Texas Press.
- Millon, R., (1988). The last years of Teotihuacan dominance. En Yoffee, N. y G.L. Cowgill (eds.). The Collapse of Ancient States and Civilizations, The University of Arizona Press, Tucson, pp. 102-164
- Molina-Vázquez. R. (2014). Arqueometría en México. Revista De Divulgación Científica Y Tecnológica De La Universidad Veracruzana. 27(1).
- Morales, J., Gogutchichvili A., Olay-Barrientos M. A., Carvallo C., Aguilar-Reyes B. (2013). Archeointensity investigation on pottery vestiges from Puertas de Rolón, Capacha Culture: In search for affinity with other Mesoamerican pre-Hispanic cultures. Stud. Geophys. Geod. 57, 605-626.
- Nagata. T. (1965). Archeomagnetic Intensity Studies of South and Central America. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 17(3), pp. 399-405.
- Needham, Joseph y Wang, Ling. (1964). Science and Civilization in China, Vol 4. Physics and Physical Technology. Nueva York: Cambridge University Press, pp. 249-267.
- Parsons, J. R., & Sugiura Y, Y. (2012). Teotihuacan and the Epiclassic in Central Mexico. The Oxford Handbook of Mesoamerican Archaeology, January 2019, 309–323.
- Paterson, G., (2011). A simple test for the presence of multidomain behavior during paleointensity experiments. J. Geophys. Res. 116 (B10104).
- Pavón-Carrasco, F. J., Rodríguez-González, J., Osete, M. L., Torta, J. M., (2011). A matlab tool for archaeomagnetic dating. Journal of Archaeological Science 38 (2), 408–419
- Pavón-Carrasco, F. J., Osete, M. L., Torta, J. M., De Santis, A., (2014). A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. Earth Planet. Sci. Lett. 388, 98–109

- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Campuzano, S.A., McIntosh, G., y Martín-Hernández, F. (2015). Recent Developments In Archeomagnetism: The Story Of The Earth's Past Magnetic Field. En *New Developments in Paleomagnetism Research*, pp. 99-158. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Reinders, J., Hambach, U., Krumsiek, K., Sanke, M., and Strack, N., (1999). An archaeomagnetic study of pottery kilns from Bruhl-Pingsdorf (Germany), *Archaeometry*, 41, 413–20.
- Romero-Hernández, E. (2008). Fechamientos Arqueomagnéticos de pisos con control estratigráfico de la excavación Teopancazco 2005, Teotihuacán: Universidad Nacional Autónoma de México, México, Bsc Thesis of Physics, p. 51.
- Saavedra-Cortes, S. P. (2010) Estudio arqueomagnético en el área de Tecamac, Estado de México: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Bsc Thesis of Physics, p. 85.
- Sánchez-López, F., (2005). Nuevos fechamientos arqueomagnéticos de Xalla y Teopancazco, zonas habitacionales de Teotihuacán: Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Mexico, Bsc Thesis of Physics, p. 80.
- Soler- Arechalde, A.M. (2006). Investigaciones arqueomagnéticas en México. Fundamentos. Historia y Futuro. Monografías del Instituto de Geofísica UNAM, 10, pp 5-88
- Soler- Arechalde, A.M. (2006). Investigaciones arqueomagnéticas en México. Fundamentos. Historia y Futuro. Monografías del Instituto de Geofísica UNAM, 10, pp 5-88
- Soler-Arechalde, A. M., Sánchez, F., Rodríguez, M., Caballero-Miranda, C., Goguitchaishvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Manzanilla, L., & Tarling, D. H. (2006). Archaeomagnetic investigation of oriented pre-Columbian lime-plasters from Teotihuacan, Mesoamerica. *Earth, Planets and Space*, 58(10), 1433–1439.
- Soler-Arechalde, A. M., Sánchez, F., Rodríguez, M., Caballero-Miranda, C., Goguitchaishvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Manzanilla, L., Tarling,

- D. H., (2006) Archaeomagnetic investigation of oriented pre-Columbian lime-plasters from Teotihuacan, Mesoamerica: *Earth, Planets and Space*, 58(10), pp. 1433-1439.
- Soler-Arechalde, A.M., Caballero Miranda, C. (2008) Reporte de Fechamiento Arqueomagnético. Xochicalco 2006: Technical report delivered to Excavation Project Leader of INAH, p. 6.
 - Soler-Arechalde, A.M., Orea, A., Caballero Miranda, C. (2008) Reporte de Fechamiento Arqueomagnético. Xochicalco 2007: Technical report delivered to Excavation Project Leader of INAH, p. 9.
 - Soler-Arechalde, A.M., Barrera, A., Morales, R. (2012). Reporte de Datación arqueomagnética Templo Mayor, CDMX. Technical report delivered to Excavation Project Leader of INAH, p. 21.
 - Soler-Arechalde, A.M., Barrera, A. (2013). Reporte de Datación Arqueomagnética Ofrenda 161, Plaza Manuel Gamio, Templo Mayor, D.F.: Technical Report delivered to Excavation Project Leader of INAH, p. 9
 - Soler-Arechalde, A.M., Barrera, A., Martínez Longoria, A. (2013) Reporte de Datación Arqueomagnética Templo de la Inmaculada Concepción, Coyoacán, DF: Technical report delivered to Excavation Project Leader of INAH, p. 14.
 - Soler-Arechalde, Ana Ma., Caballero-Miranda, Cecilia, Urrutia-Fucugauchi, Jaime, Osete-López, María Luisa, López-Delgado, Verónica, Goguitchaichvili, Avto, & Barrera-Huerta, Alan. (2019). An updated catalog of pre-hispanic archaeomagnetic data for north and central Mesoamerica: Implications for the regional paleosecular variation reference curve. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(2), 497-518. E-pub 30 de octubre de 2019.
 - Sternberg, R.S. (2008). Archaeomagnetism In *Archaeometry—A Semi-Centennial Review*. *Archaeometry*, 50, pp. 983-998.
 - Straulino-Mainou, L., Sedov, S., Soler-Arechalde, A.M., Pi-Puig, T., Villa, G., Balanzario-Granados, S., Doménech-Carbó, M.T., Osete-Cortina, L.,

- Leonard, D. (2016) Maya Lime Mortars-Relationship between Archaeomagnetic Dating, Manufacturing Technique, and Architectural Function-The Dzibanché Case: *Geosciences*, 6(49), pp. 1-27.
- Sugiyama, Saburo (1993): “Worldview Materialized in Teotihuacan, Mexico”. En: *Latin American Antiquity* (Honolulu), 4.2: 103-129.
 - Tarduno J.A., Cottrell R.D., Smirnov A.V. (2007) Paleointensity: Absolute Determinations Using Single Plagioclase Crystals. In: Gubbins D., Herrero-Bervera E. (eds) *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer, Dordrecht.
 - Tarling, D.H. (1975). *Archaeomagnetism: The Dating of Archaeological Materials by Their Magnetic Properties*. *World Archaeology*, 7, pp. 185-197.
 - Taylor, G. K. (2010). L. Tauxe 2010. *Essentials of Paleomagnetism*. University of California Press. (paperback). *Geological Magazine*, 147(6), pp.988–989.
 - Terán-Guerrero, A. G. (2013) *Estudios arqueomagnéticos en Ciudadela, Sierra de las Navajas y Xalasco, Cultura Teotihuacana: Mexico*, Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Master thesis in Earth Sciences, pp.155.
 - Terán-Guerrero, A.G., Soler Arechalde A.M., Gogichaishvili A., Caballero-Miranda, C., Morales, J., Urrutia-Fucugauchi, J. (2016) *Dataciones arqueomagnéticas en la Ciudadela de Teotihuacán, Sierra de las Navajas y Xalasco: Arqueología Iberoamericana*, 29, pp. 15-20.
 - Thellier, E., (1938). *Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications geophysiques*. *Ann. Inst. Globe Univ. Paris* 16, 157–302.
 - Thellier, E., (1941). *Sur les propriétés del'aimantation thermorémanente des terres cuites*. *C. R. Acad. Sci. Paris* 213, 1019–1022.
 - Thellier, E., (1946). *Sur l'intensité du champ magnétique terrestre, en France, à l'époque gallo-romaine*. *C. R. Acad. Sci. Paris* 222, 905–907.

- Urrutia-Fucugauchi, J., 1996, Paleomagnetic Study of the Xitle-Pedregal de San Angel lava flow, southern basin of Mexico: *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 97, 177-196.
- Villalain-Santamaría, J.J. (2016). La historia del campo magnético terrestre registrada en las rocas. *Fundamentos del Paleomagnetismo. Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 24, pp. 261-274.
- Walton, D. (1977). Archaeomagnetic intensity measurements using a SQUID magnetometer, *Archaeometry*, 19, 192–200
- Witze, A. (2019). Earth's magnetic field is acting up and geologists don't know why. *Nature*, 565, 143-144.
- Wolfman, D. (1990) Archaeomagnetic Dating in Arkansas and the Border Areas of Adjacent States-II, in Eighmy J.L. , Sternberg R.S. (eds.), *Archaeomagnetic dating: Tucson, The University of Arizona Press* , pp. 237-260.
- Wolfman, D. (1990) Mesoamerican Chronology and Archaeomagnetic A.D. 1-1200, in Eighmy J.L., Sternberg R.S. (eds.), *Archaeomagnetic dating: Tucson, The University of Arizona Press* , pp. 261-308.