



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**ESTUDIO ARQUEOMAGNÉTICO REALIZADO EN SEIS
ESTRUCTURAS *IN SITU* PERTENECIENTES A LA ZONA
ARQUEOLÓGICA DE TEOTIHUACÁN**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:

KAREN ARREOLA ROMERO

TUTOR:

DR. AVTANDIL GOGICHAISHVILI
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNIDAD MICHOACÁN

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX, 17 DE MAYO 2024



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.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos Académicos

A nuestra máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme la oportunidad de estudiar en el Instituto de Geofísica en la ciudad de México.

Al Programa de posgrado en Ciencias de la Tierra por permitirme continuar con mis estudios y realizar mi investigación.

A mi tutor, el Dr. Avto Gogichaishvili por su apoyo y guía para realizar el presente trabajo.

Al Dr. Fredy Rubén Cejudo-Ruíz por su apoyo y consejo durante mi trabajo de laboratorio.

A mi Comité evaluador integrado por el Dr. Avto Gogichaishvili, Dr. Miguel Ángel Cervantes-Solano y Dr. Fredy Rubén Cejudo-Ruíz. Por evaluar mis avances semestre a semestre y aconsejarme.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de apoyo para el desarrollo de mi trabajo de investigación.

Al proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT N ° IN100224, para poder realizar mi trabajo de investigación.

Agradezco 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; por las muestras que proceden de proyectos de conservación e investigación a cargo de Arqueóloga Verónica Ortega y Restauradora Gloria Torres en el marco de conservación integral del Edificio 1, Plaza de la Luna y el proyecto de conservación de pintura mural in situ y en acervos

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 brindarme su apoyo y consejos a lo largo de esta etapa, por estar ahí cuando los necesitaba.

INDICE

RESUMEN.....	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	11
Antecedentes.....	13
Alcance de la presente investigación.....	14
Objetivos.....	15
CAPÍTULO III. EXPERIMENTOS Y MÉTODOS.....	26
Introducción.....	26
Curvas susceptibilidad contra temperatura (k-T).....	27
Desmagnetización por campos alternos.....	28
Paleointensidades.....	30
Parámetros de paleointensidad.....	34
Ritmo de enfriamiento.....	35
Relajación magnética y temperatura de bloqueo.....	36
Anisotropía.....	36
Principios de la anisotropía.....	37
Anisotropía de la magnetización termoremanente (ATRM).....	39
Arqueomagnetismo.....	40
Arqueomagnetismo como técnica de datación.....	41
CAPÍTULO IV. CONTEXTO ARQUEOLÓGICO.....	42
Teotihuacán, la ciudad donde fueron creados los dioses.....	42
Fases culturales.....	44
Estructuras principales.....	46
La Calzada de los Muertos.....	47
Pirámide del Sol.....	47
Pirámide de la Luna.....	48
Templo de Quetzalcóatl.....	50
Sociedad teotihuacana.....	51
Organización social y política.....	51
Economía.....	52
Religión.....	52
Declive y abandono de la ciudad.....	53

Factores ambientales.....	53
Incendio en la ciudad.....	54
Desmantelamiento y destrucción de esculturas.....	55
Saqueo y reocupación de la ciudad por otras culturas.....	56
CAPITULO V. ZONA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA.....	58
Zona de muestreo.....	58
Toma de muestras.....	63
Análisis de laboratorio.....	63
CAPÍTULO VI. RESULTADOS.....	69
Mineralogía magnética.....	69
Desmagnetización por campos alternos.....	73
Paleointensidades.....	77
CAPÍTULO VII. DATACIÓN ARQUEOMAGNÉTICA.....	84
Introducción.....	84
Periodo: 100 a.C al 800 d.C.....	85
Periodo: 500 a. C al 1500 d. C.....	89
Modelo SHAWQ2k.....	94
CAPÍTULO VIII. DISCUSIÓN.....	100
CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES.....	107
REFERENCIAS.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. zonas de muestreo de los diferentes estudios arqueomagnéticos en Teotihuacán. Autor: Karen Arreola Romero.....	17
Figura 2. Fragmentos de cerámicas empleadas en el estudio (Rodríguez-Ceja M. 2003).....	18
Figura 3. Murales usados para el estudio, ubicado en el complejo sur (Gogichaishvili A. et. al., 2018).....	21
Figura 4. Diagrama ternario del grupo de minerales de óxidos de hierro y titanio (Lowrie, 2007).....	26
Figura 5. Diagramas de Zijderveld usando a) Desmagnetización escalonada con temperaturas crecientes y b) Desmagnetización en campos alternos crecientes en dos muestras de un horno romano en Toledo, España (Catanzariti et al., 2012).....	28
Figura 6. Principios de estimación de paleointensidad. (Tauxe 2005)	30
Figura 7. Ilustración del método Thellier-Thellier para determinar la paleointensidad absoluta (Tauxe 2005).....	31
Figura g. Grafica de Arai. pTRM vs NRM (Tauxe 2005).....	32
Figura 9. Tensor de anisotropía de TRM. El campo HX no solo crea magnetización en el eje x, sino que también afecta a los demás ejes (y/z) (García, 1996). Imagen: Karen Arreola Romero.....	38
Figura 10. Datación arqueomagnética utilizando el modelo geomagnético global SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et. al 2011, 2014; a) Declinación; b) Inclinación y c) Intensidad absoluta (Gogichaishvili A. et. al., 2022).....	40
Figura 11. Mapa de Teotihuacán por Millon 1973. En el mapa se observan la ubicación de cada una de las estructuras, palacios y conjuntos habitacionales de Teotihuacán.....	42
Figura 12. Línea del tiempo con las diferentes fases culturales de Teotihuacán.....	45
Figura 13. Pirámide del Sol. Fuente: Arqueología Mexicana.....	47
Figura 14. Pirámide de la Luna. Fuente: National Geographic.....	48
Figura 15. Templo de Quetzalcóatl. Fuente: Pueblos originarios.....	49

Figura 16. Zona arqueológica de Teotihuacán. Las estrellas de color verde representan los puntos de muestreo.....	57
Figura 17. Mapa de ubicación de las muestras recolectadas.....	58
Figura 18. Imagen satelital de la ubicación de las diferentes zonas de estudio.....	59
Figura 19. Fotografías de las muestras in situ. De la Plaza de la Luna A) Muestra T1; B) Muestra T2; Del Cuarto de las Columnas C) Muestra T3; Del Conjunto noroeste del Río San Juan D) Muestra T4; Del Conjunto de Edificios Superpuestos E) Muestra T5-1 y T5-2 y De la Plaza Oeste F) Muestra T6	61
Figura 20. Encapsulado Muestras encapsuladas y cortadas en el laboratorio. A) Bloques de yeso secándose en el sol; B) Bloque cortado para obtener especímenes; C) Especímenes cortados pertenecientes a la muestra T6; D) Especímenes de la muestra T6 encapsuladas en cubos de acrílico.....	63
Figura 21. Experimentos de desmagnetización por campos alternos. A) la medición de la NRM usando el magnetómetro de giro AGICO JR6a; B) Muestra prepara para el experimento de desmagnetización; C) Desmagnetizador LDA5.....	64
Figura 22. A la izquierda se observan las muestras seleccionadas para el experimento de curvas k-T; a la derecha es la muestra TEO-T1 molida.....	65
Figura 23. Pastillas de sal. En la imagen del lado izquierdo se muestran los fragmentos de cada muestra mientras que en la imagen del lado derecho se observan las 42 pastillas de sal que se hicieron.....	66
Figura 24. Paleointensidad. Pastillas de sal en el portamuestras, posteriormente se introducen al horno para realizar los experimentos de paleointensidad.....	66
Figura 25. Muestras seleccionadas para realizar el experimento de anisotropía.....	67
Figura 26. curvas termomagnéticas continuas de TEO 1.....	69
Figura 27. curvas termomagnéticas continuas de TEO 2.....	69
Figura 28 curvas termomagnéticas continuas de TEO 3.....	70
Figura 29. curvas termomagnéticas continuas de TEO 4.....	70
Figura 30. curvas termomagnéticas continuas de TEO 5-2.....	71

Figura 31. curvas termomagnéticas continuas de TEO 6.....	71
Figura 32. diagrama de Zijderveld representativos obtenidos durante los tratamientos de desmagnetización progresiva de campo alterno. La NRM indica el valor inicial de la magnetización en A/m y también se indica el valor del campo aplicado en cada paso en mT.....	74
Figura 33. Esteriograma de las paleodirecciones pertenecientes a las muestras TEO1, TEO2, TEO3, TEO4, TEO5-1, TEO5-2, TEO6.....	76
Figura 34. Especímenes 14, 23 y 38 aprobados después del experimento de paleointensidad.....	78
Figura 35. Especímenes 4, 9 y 25 rechazados después de realizar el experimento de paleointensidad.....	80
Figura 36. Datación arqueomagnética utilizando el modelo geomagnético global SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et. al 2011, 2014), en el periodo de 100 a.C al 800 d.C.....	88
Figura 37. Datación arqueomagnética utilizando el modelo geomagnético global SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et. al 2011, 2014), en el periodo de 500 a.C al 1500 d.C.....	92
Figura 38. Datación arqueomagnética utilizando el modelo geomagnético global SHAWQ2k (Campuzano et al., 2019), en el periodo de 0 al 1500 d.C.....	98
Figura 39. Mapa de las edades registras en las diferentes estructuras de Teotihuacán. Autor: Karen Arreola Romero.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II. Temperaturas de Curie de los minerales magnéticos (Tauxe, 2005).....	30
Tabla III. Relación de las muestras recolectadas.....	64
Tabla IV. Temperaturas de Curie obtenidas.....	72
Tabla V. Paleodirecciones medias determinadas por estructura.....	78
Tabla VI. Datos de paleointensidad de Thellier.....	85
Tabla VII. Paleointensidades de las muestras recolectadas.....	86
Tabla VIII. Intervalos de tiempo obtenidos por la técnica de datación arqueomagnética para el periodo de 100 a.C al 800 d.C.....	88
Tabla IX. Intervalos de tiempo obtenidos por la técnica de datación arqueomagnética para el periodo de 500 a.C al 1500 d.C.....	92
Tabla X. Comparación de los intervalos de tiempo obtenidos por la técnica de datación arqueomagnética para ambos periodos.....	97
Tabla XI. Intervalos de tiempo obtenidos por la técnica de datación arqueomagnética usando el modelo SHAWQ2k para el periodo de 0 al 1500 d.C.....	98
Tabla XII. Comparación de los intervalos de tiempo obtenidos por la técnica de datación arqueomagnética para ambos modelos.....	103
Tabla XIII. Tabla de resultados obtenidos en este estudio.....	104

RESUMEN

En el presente trabajo se reportan los resultados obtenidos de un estudio arqueomagnético y magnetismo de rocas realizado en seis estructuras *in situ* pertenecientes a la zona arqueológica de Teotihuacán. Las muestras orientadas mediante brújula magnética y solar fueron extraídas de Plaza de la Luna, Cuarto de las Columnas, Conjunto Noroeste de Rio San Juan, Conjunto Edificios Superpuestos y Plaza Oeste. La finalidad de la investigación es obtener nuevas edades sobre el abandono y declive de Teotihuacán. Se determinaron las componentes primarias o características direccionales arqueomagnéticas y arqueointensidades con el fin de realizar una datación absoluta y de esta manera obtener el intervalo de tiempo que mejor representa la última exposición al fuego de las muestras analizadas. Los tratamientos magnéticos y de magnetismo de rocas se realizaron en 56 muestras, de las cuales, con el experimento de curvas susceptibilidad contra temperatura (kT), se identificó que los minerales magnéticos presentes se trataba de titanomagnetitas ricas y pobres en titanio, donde la mayoría de las muestras exhibieron un comportamiento razonablemente reversible mientras algunos pocos testigos evidenciaron la existencia de múltiples fases ferrimagnéticas y posible contribución de la hematita antiferromagnética.

Se obtuvieron los valores de declinación e inclinación para los siete bloques, las cuales varían entre $339.6^\circ - 358.8^\circ$ y $32.5^\circ - 45.4^\circ$ respectivamente. Para obtener los valores de intensidad absoluta, se utilizó el método de doble calentamiento tipo Thellier, donde se seleccionaron 42 muestras de las cuales solo 30 arrojaron determinaciones confiables. Con los datos obtenidos de los experimentos, se procedió a realizar la datación arqueomagnética usando el modelo SHA.DIF.14 k (Pavón-Carrasco et. al 2014) y SHAWQ2k (Campuzano et al., 2019), obteniendo los intervalos de edad para cada una de las estructuras, los cuales corresponden a diferentes

fases culturales de Teotihuacán. Las estructuras fueron aparentemente incendiadas durante las fases *Tlamimilolpan*, *Xolalpan* y *Metepec*; los resultados se pueden relacionar y comparar con estudios previos en la zona. Nuestros hallazgos refuerzan la hipótesis sobre los diferentes episodios incendiarios controlados en zona como parte de rituales de cierre de ciclo o el inicio de una nueva etapa constructiva.

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

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Alrededor de nuestro planeta encontramos *el campo magnético terrestre* (CMT), el cual se trata de una coraza de origen natural que nos protege de los impactos de las partículas de alta energía provenientes del Sol, y además permite tener las condiciones ideales para la existencia de vida en nuestro planeta (Villalaín-Santamaría, 2016).

Este campo magnético tiene su origen en el interior del planeta, en específico, en el núcleo líquido, donde el movimiento magneto-hidrodinámico en el núcleo exterior de la Tierra ocasiona la movilización del material conductor, que en su mayoría es hierro y níquel, en presencia de un campo magnético débil, generando una corriente junto con el calor del decaimiento radiactivo en el núcleo provoca, el movimiento inductivo y las corrientes eléctricas producen un campo magnético que interactúa con el campo magnético secundario (o de 'fondo') (Elssasser, W.M., 1957). El CMT se puede modelar como un campo esencialmente dipolar, geocéntrico y axial, debido a que se produce un dipolo ubicado en el centro del planeta y su eje se encuentra considerablemente alineado con el eje de rotación terrestre.

El CMT no es constante en el tiempo, sino que presenta fluctuaciones o inversiones como por ejemplo las inversiones de polaridad. Cuando hablamos de una *inversión* nos referimos a que el polo sur magnético coincide con el sur geográfico, debido a que su configuración normal se trata cuando el polo sur del CMT se encuentra en el norte geográfico; por otro lado, podemos tener en la historia del CMT que no se logró completar la inversión en su totalidad, por lo cual el campo magnético parece que va invertirse, pero regresa a su posición original, esto se le conoce como *excursión magnética* (Lowrie, 2007).

Las variaciones de dirección (inclinación y declinación magnética) e intensidad de amplitudes menores, también conocidas como variaciones seculares pueden ser apreciables desde décadas o hasta siglos. La importancia de este fenómeno reside en lo fundamental que es para la rama de la Geofísica conocida como *Arqueomagnetismo* debido a que se utiliza como referencia para la datación de estructuras arqueológicas y se aplica en la arqueología (Gómez-Paccard et al., 2016).

En las rocas podemos encontrar minerales ferrimagnéticos de granos finos dispersos en una matriz con minerales diamagnéticos y paramagnéticos, y esos minerales ferrimagnéticos (en su mayoría los óxidos de hierro) tienen la capacidad de registrar el campo magnético de la Tierra en un momento preciso. La ciencia que estudia el campo magnético que se registra en las rocas al momento de su formación o por procesos geológicos posteriores, se le conoce como *Paleomagnetismo*, el cual se basa en tres hipótesis principales: el dipolo geocéntrico axial, los minerales que se encuentran en las rocas registran los cambios en el CMT y la magnetización remanente queda intacto a lo largo de tiempos geológicos (Butler, 1992).

Existen diversos procesos naturales asociados a la adquisición de magnetización en las rocas, algunos de estos procesos son: *magnetización termoremanente (TRM)* se presenta cuando las rocas se calientan a altas temperaturas se alinean sus minerales ferrimagnéticos con el campo magnético existente al enfriarse la roca gradualmente, *magnetización remanente detrítica (DRM)* típica de rocas sedimentarias, donde mientras se depositan los momentos magnéticos en condiciones acuáticas o subacuáticas, los granos se van alineando al campo presente, *magnetización remanente química (CRM)* o cristalina se refiere a cambios químicos por lo regular en presencia de fluidos calientes como ocurre, por ejemplo, durante el hidrotermalismo, en los minerales ferrimagnéticos, puede ser tanto la

alteración de los minerales o la precipitación a partir de una solución (Villalain-Santamaría, JJ 2016).

Siguiendo los principios del *Paleomagnetismo* también se puede utilizar para estudiar el CMT que se encuentra registrado en los artefactos arqueológicos, esta rama es conocida como *Arqueomagnetismo*. Con estos conocimientos es posible determinar las variaciones de espacio-tiempo que tuvo el campo geomagnético a partir de materiales arqueomagnéticos, además 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, 2007).

Antecedentes

Entre 2500 a.C y 1521 d.C gran parte del territorio mexicano y algunos países de Centroamérica, albergó la región cultural conocida como *Mesoamérica*. En esta zona nacieron y se asentaron diversas culturas prehispánicas como los olmecas, los zapotecas, los mayas, los mixtecos, los teotihuacanos, los aztecas, entre otros (González-Jácome A, 2000).

La cronología mesoamericana se divide en tres periodos: *Preclásico* que abarca desde el 1200 a.C hasta el 200 a.C, durante este periodo se desarrolló la cultura olmeca, considerada la primera gran civilización de Mesoamérica y además aparecieron las primeras ciudades mayas y los cuicuilcas; Clásico 200 a.C hasta el 900 d.C fue en este periodo donde florecieron diversos centros urbanos, predominando la cultura teotihuacana pero también se destacaron los mayas y los zapotecas; y el *Posclásico* 900 d.C hasta 1521, las culturas predominantes fueron los toltecas y mixtecas en el posclásico temprano, mientras que en el posclásico tardío destacaron los aztecas (Kirchhoff, P 1960).

En la ***zona arqueológica de Teotihuacán*** se han realizado varios estudios arqueológicos siendo uno de los sitios arqueológicos más estudiados en

México debido a su auge durante el periodo Clásico y su misterioso abandono, los estudios que se han realizado buscan agregar datos a la cronología de la cultura, siguiendo las teorías de incendios provocados por la misma civilización en rituales de purificación o iniciación/ terminación de alguna fase constructiva y con ayuda del arqueomagnetismo, proporcionar intervalos de tiempo a las estructuras de la ciudad.

En cuanto al colapso de una de las culturas más importantes del Clásico, no se sabe cuál fue el detonante que llevó a los teotihuacanos al abandono de la ciudad, las teorías apuntan 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: 1) el incendio sistemático de los templos y algunas zonas más, 2) el abandono de la ciudad por los teotihuacanos, 3) el saqueo por los grupos coyotlatelco y 4) la reocupación de sectores por los grupos coyotlatelco.

También existen otros estudios que demuestran evidencias de fuego en la ciudad partes de un ritual antes del abandono, conocido como “*El Gran Incendio*” el trabajo realizado por Soler-Arechalde et al., (2006) donde tomaron muestras de *estucos* (yesos empleados en la cultura teotihuacana para la construcción de pisos, estructuras, cerámicas y soportes de pinturas murales) teniendo como resultado edades arqueomagnéticas entre 500-575 d.C, las cuales son consistentes con la teoría del gran incendio de Teotihuacán.

Alcance de la presente investigación

En este trabajo se realizaron experimentos de magnetismo y arqueointensidad en seis sitios pertenecientes a la zona arqueológica de Teotihuacán, se reportaron resultados de mineralogía magnética, componentes direccionales del campo magnético, arqueointensidades y

ejercicios de datación con la finalidad de obtener intervalos de tiempo pertenecientes a las épocas del abandono y declive de Teotihuacán.

Los estudios arqueomagnéticos para la cronología de 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 las grandes civilizaciones antiguas en nuestro país.

En la zona arqueológica de Teotihuacán los principales estudios de datación absoluta son: Manzanilla en 2003, realizaron fechamientos arqueomagnéticos y radiocarbónicos que demuestran los eventos que tuvieron lugar en la caída de esta civilización: 1) el incendio sistemático de los templos y algunas zonas más, 2) el abandono de la ciudad por los teotihuacanos, 3) el saqueo por los grupos coyotlatelco y 4) la reocupación de sectores por los grupos coyotlatelco; en 2006 realizado por Soler-Arechalde et. al., se tomaron muestras de estucos que al estudiar el registro del CMT, se obtuvieron edades entre 500-575 d.C, por lo cual coincide con la teoría del Gran Incendio de Teotihuacán.

A pesar de haberse realizado diversos experimentos en la zona los resultados de este trabajo aportan nuevas dataciones las cuales contribuyen al conocimiento y comprensión del abandono de la región aportando datos cronológicos sobre las edades en las etapas de la cultura teotihuacana.

Objetivos

Objetivo general

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

Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se quieren lograr en el trabajo son:

- 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.
- Estimar la temporalidad del abandono y declive de Teotihuacán
- Proporcionar nuevos datos a la cronología de la zona arqueológica de Teotihuacán.

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE. ESTUDIOS ARQUEOMAGNÉTICOS PREVIOS EN TEOTIHUACÁN

Teotihuacán fue una de las ciudades más importantes de Mesoamérica, y en la actualidad uno de los sitios arqueológicos más estudiados en México, ubicado a 2250 m sobre el nivel del mar en las tierras altas frescas y semiáridas del centro de México. Floreció entre el 100 a.C – 650 d.C, mucho tiempo antes de la llegada de los aztecas a la ciudad. (Cowgill, 2008).

En México y Estados Unidos, desde los sesenta, se han realizado importantes proyectos para conocer las características y la magnitud de las civilizaciones prehispánicas, en estas investigaciones se han realizados dataciones usando radiocarbono, pero también se empezó a utilizar el método arqueomagnético como técnica de datación (Gogichaishvili *et. al*, 2022).

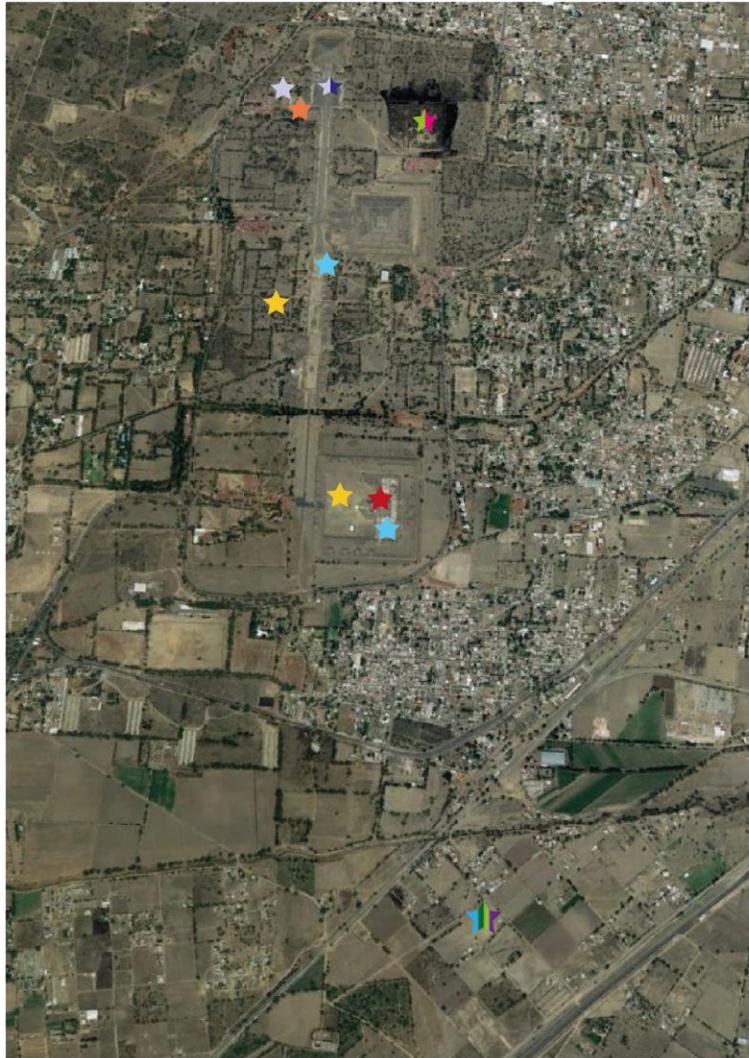
Los datos arqueomagnéticos son fundamentales para comprender la evolución del campo magnético terrestre en escalas de tiempo de cientos a miles de años; en muchos materiales arqueológicos se encuentran partículas magnéticas que adquieren una remanencia en algún momento en específico guardando la intensidad y la dirección del campo magnético de la Tierra (Soler-Arechalde, *et. al* 2006). 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 (Soler-Arechalde, 2007).

En la siguiente imagen se muestra una recopilación de las zonas de muestreo de los diferentes estudios arqueomagnéticos realizados en la zona arqueológica de Teotihuacán y sus alrededores. (Figura 1). Posteriormente

se describirán cada uno de los estudios que se observan en el mapa y al final se presenta una tabla con los resultados de los estudios (Tabla I).



ESTUDIOS ARQUEOMAGNÉTICOS EN TEOTIHUACÁN



Sitio de estudio

Ciudadela

- ★ Wolfman 1990
- ★ Hueda Y., Soler A. M., 2001

Grupo Viking

- ★ Wolfman 1990

Plaza Oeste

- ★ Hueda Y., Soler A. M., 2001

Templo de Quetzalcóatlcoatl

- ★ Terán-Guerrero A.G., et. al., 2016

Palacio de Quetzalpapálotl

- ★ Goguitchaichvili A. et. al., 2018

Palacio de los Jaguares

- ★ Goguitchaichvili A. et. al., 2018
- ★ Goguitchaichvili A. et. al., 2022

Plaza de la Luna

- ★ Herrero-Bervera, E., 2015
- ★ Goguitchaichvili A. et. al., 2022

Xalla

- ★ Sánchez-López, F., 2005
- ★ Rodríguez-Ceja M. 2003
- ★ Soler-Arechalde, A. M., et.al, 2006

Teopancazco

- ★ Wolfman 1990
- ★ Hueda Y. et. al, 2004
- ★ Sánchez-López, F., 2005
- ★ Romero-Hernández, E., 2008

Autor: Karen Arreola Romero

Figura 1. zonas de muestreo de los diferentes estudios arqueomagnéticos en Teotihuacán. Autor: Karen Arreola Romero

En 1990 Wolfram muestreo pisos, columnas y hoyos quemados en 9 puntos localizados en Teotihuacán; estas muestras se tomaron de la Estructura 1D de La Ciudadela, del Grupo Viking y precisamente de Teopancazco; los fechamientos arqueomagnéticos de Wolfman arrojaron edades alrededor de 475 d.C. (Wolfman 1990).

En Teopancazco, un barrio aledaño a Teotihuacán, Hueda y Soler en 2001, tomaron muestras de los puntos TE1 Ciudadela y TE4 Complejo Plaza Oeste, donde las muestras fueron desmagnetizadas mediante campos alternos crecientes hasta 100 mT y su obtuvieron por datación arqueomagnética edades de 553–606 d.C y 551–607 d.C respectivamente. (Hueda Y., Soler A. M., 2001).

En 2003, se realizó un estudio en fragmentos de cerámicas precolombinas hechas de arcilla cocida, los sitios muestreados fueron Cuanalan, Xalla y Teopancazco, ubicados en Teotihuacán, mediante los métodos Thellier-Thellier clásico y Thellier modificado por Coe (Coe, 1967) se obtuvo la intensidad de las muestras, obteniendo edades entre 525 -575 d.C. (Rodríguez-Ceja M. 2003).



Figura 2. Fragmentos de cerámicas empleadas en el estudio (Rodríguez-Ceja M. 2003)

En 2004 por primera vez se realizó un estudio arqueomagnético en muestras, las cuales eran mezclas de cal sin quemar pertenecientes a Teotihuacán y Tenochtitlán; estas mezclas de cal fueron utilizados en diferentes actividades, desde las formaciones de escultura y cerámicas, hasta la construcción de pisos. La mineralogía magnética en las muestras apunta a titanomagnetitas de grano fino y las direcciones medias características de los sitios se correlacionaron con la curva de variación paleosecular de Mesoamérica, obteniendo cuatro etapas de ocupación en Teotihuacán; 350 y 550 d.C, 850 – 950 d.C (sugiriendo una ocupación posterior al colapso) y 1375-1415 d.C, donde la quema del piso posiblemente ocurrió por la ocupación de los aztecas (Hueda Y. *et. al*, 2004).

Por Sánchez-López, F. en 2005 se tomaron 60 muestras de la zona habitacional que pertenecían a Xalla y Teopancazco, se obtuvieron los valores de declinación e inclinación en las muestras, además de obtener las edades para cada muestra y se compararon con la base de datos de la Dra. Linda Manzanilla que había realizado por el medido de radiocarbono, obteniendo edades entre 550 – 537 d.C. (Sánchez-López, F., 2005).

En 2006 también se tomaron muestra de yeso en las áreas de Xalla y Teopancazco, se recolectaron 153 muestras entre ambos sitios; se realizaron experimentos de histéresis, mediante la desmagnetización de campos alternos se mostraron que tenían magnetizaciones de uno o dos componentes, la mineralogía magnética apunta a titanomagnetitas de grano fino con comportamiento de dominio pseudo-único y las direcciones medias obtenidas en Xalla apuntan a fechas promedio de 550 d. C. \pm 25 años, que coinciden con el ‘Gran Incendio’ de Teotihuacán que tuvo lugar en el 575 d.C; para Teopancazco se estimaron entre 250–350 d. C. y 350–425 d. C. (Soler-Arechalde, A. M., et. al, 2006).

En Teopancazco en el 2008 se recopilaron muestras de pisos, en el trabajo realizado por Romero, E., se estudiaron ocho muestras de las cuales se obtuvieron fechas arqueomagnéticas que posteriormente se compararon con las fechas radiocarbono que se tenían para la zona. Las conclusiones del trabajo fueron que las muestras sin quemar corresponden a la elaboración del piso en 375 ± 20 d.C, mientras que las muestras quemadas corresponden a la terminación de la fase constructiva Tlamimilolpan en 420 ± 20 d.C. (Romero-Hernández, E., 2008).

En el 2015, Emilio Herrero Bervera realizó un estudio en 27 cerámicas no orientadas recolectadas alrededor de la Pirámide del Sol, Pirámide de la Luna y la Plaza de las Luna, los experimentos se realizaron en la Universidad de Hawái en Manoa. Se realizaron experimento de susceptibilidad vs temperatura para conocer el comportamiento magnético de las cerámicas, y

de los intervalos de temperatura de Curie los más predominantes pertenecían a magnetita pobre en Ti; usaron el procedimiento de Thellier-Coe obteniendo una paleointensidad promedio de $38,871 \pm 1.8 \mu\text{T}$; correlacionaron la curva CALS3K.4 con las curvas de Mesoamérica publicadas por Aguirre et al. (2013) y Alva-Valdivia et al. (2010), obteniendo un intervalo de edad entre 430 y 500 d.C. (Herrero-Bervera, E., 2015).

En el 2016 se realizó un trabajo para obtener dataciones magnéticas en tres sitios: Ciudadela de Teotihuacán, Sierra de las Navajas y Xalasco, Tlaxcala, para el estudio se extrajeron cinco muestras que corresponden al conjunto E y al Templo de Quetzalcóatl; cuatro muestras provenientes de la Sierra de las Navajas y cinco muestras de Xalasco Tlaxcala. El resultado de las dataciones arqueomagnéticas en este estudio fueron, para la Ciudadela: entre 324- 440 d.C y 440 -600 d.C, esta última corresponde al 'Gran Incendio'; para Sierra de las Navajas: 330-550 d.C y para Xalasco: 100 a.C -33 d.C, 330-410 d.C, 540-589 d.C y 651-720 d.C. (Terán-Guerrero A.G., et. al., 2016).

La erupción del volcán Xitle tuvo impacto en las poblaciones de Cuicuilco y Teotihuacán, en el estudio realizado por Urrutia-Fucugauchi, J *et. al* en 2016, se analizaron datos que se fecharon mediante radiocarbono y datos paleomagnéticos, presentando nuevas estimaciones para la erupción. Para conocer la edad de la erupción del volcán Xitle se determina a partir de la correlación de los datos paleomagnéticos con el modelo de referencia de variación secular obteniendo un intervalo de 1995 – 2177 años AP; mientras que el análisis *bootstrap* de las edades radiocarbónicas y arqueomagnéticas proporcionaron tres intervalos de 235-222 BC, 71-11BC y 248-276 AD, estas estimaciones apoyan la idea de que la erupción del volcán Xitle tiene relación con la caída de Cuicuilco y el desarrollo de Teotihuacán. (Urrutia-Fucugauchi J., et. al, 2016).

Se han realizado estudios de la pintura en los murales de Teotihuacán, debido a que la variedad de tonos en sus pinturas se obtenía de óxidos de hierro al usarlos en los murales pequeñas partículas magnéticas quedaban en la superficie y es posible obtener la remanencia magnética que guardaron, en 2018 Gogichaishvili A. *et. al.*, tomaron muestras del Palacio de Quetzalpapálotl, el Palacio de los



Figura 3. Murales usados para el estudio, ubicado en el complejo sur (Gogichaishvili A. *et al.*, 2018)

Jaguares y el Complejo Sur. Los experimentos de mineralogía magnética muestran la existencia de minerales ferrimagnéticos (magnetita/titanomagnetita) y antiferromagnéticos (hematita / ilmenohematita); la datación arqueomagnética se logró usando la inclinación y declinación magnética de las muestras, arrojando un intervalo entre 312 – 409 d.C, durante esta época se realizaron los murales. (Gogichaishvili A. *et. al.*, 2018).

En el 2022 se realizaron estudios de arqueointensidad en 24 muestras pertenecientes a la zona del Patio de Los Jaguares y el muro 4A en la Plaza de la Luna con el objetivo de obtener nuevas edades sobre el abandono y declive de Teotihuacán, además conocer si tienen relación con el ‘Gran Incendio’. Después de realizar los experimentos y análisis requeridos por el método arqueomagnético, el intervalo obtenido para las muestras fue de 327 - 441 d.C como la mejor estimación de la última exposición al fuego, estos datos sugieren que en Teotihuacán existieron varios episodios de fuego intenso, que era controlados, como un ritual por parte de la civilización. (Gogichaishvili A. *et. al.*, 2022).

A continuación, se muestra una tabla recapitulativa de los estudios mencionados anteriormente, en ellas se encuentran los datos magnéticos de las muestras estudiadas, así como algunos datos de paleointensidades, la edad obtenida de las dataciones y sus coordenadas.

Tabla I. Tabla de resultados de los estudios previos en la zona de Teotihuacán

Zona de muestreo	Coordenadas	Dec [°]	Inc [°]	a95 [°]	Paleointensidad	Edad	Referencia
<i>Teopancazco</i>	19°40'6.6"N 98°50'48.0"O	7	50	3		360-455 d.C	(Wolfman 1990)
<i>Grupo Vikingo</i>	19°41'23.3"N 98°50'47.1"O	3.9	40.2	3.3		455-510 d.C	
		2.1	41.1	3.1		450-520 d.C	
<i>Ciudadela Conjunto 1D</i>	19°40'52.3"N 98°50'46.7"O	2.4	40.8	1.6		465-505 d.C	
		3	39.1	0.6		475-495 d.C	
		1	40	1		480-510 d.C	
<i>TE1 Ciudadela</i>	19°40'55.3"N 98°50'49.3"O	3.8	38.7	5.75		553-606 d.C	(Hueda Y., Soler A. M., 2001)
<i>TE4 Complejo Plaza Oeste</i>	19°41'18.1"N 98°50'51.9"O	6	38.6	8.26		551-607 d.C	
<i>Tp2 Teopancazco</i>	19°40'6.6"N 98°50'48.0"O	351.7	34	10		325-424 d.C	(Hueda Y. et al, 2004)
<i>Tp3 Teopancazco</i>		4	36.7	3.51		491-629 d.C	
<i>Tp8 Teopancazco</i>		356.8	36.9	2.17		1414-1423 d.C	
<i>Xalla</i>	19°41'45.0"N 98°50'28.9"O	355.5	38.4	3.95		537 – 650 d.C	(Sánchez-López, F., 2005)
		354.7	36.1	4.88			
		4.3	41.9	11.7			
		356.6	34.6	2.24			
		356.2	45.8	2.89			
		355.1	42.6	2.09			
<i>Teopancazco</i>	19°40'6.6"N 98°50'48.0"O	353.9	46.3	4.23		550 - 575 d.C	
		346.2	41.0	20.24			

		354.3	35.2	2.07			
<i>Xalla S4R1 F1</i>	19°41'45.0"N 98°50'28.9"O	352.4	40.5	9.8		550-575 d.C	(Rodríguez-Ceja M. 2003) (Soler-Arechalde, A. M., et. al, 2006)
<i>Xalla S1 F1</i>	19°41'45.0"N 98°50'28.9"O	356.8	38.5	3.57		525-575 d.C	
<i>Xalla Red walls</i>	19°41'45.0"N 98°50'28.9"O	351.4	42.7	8.11		545-605 d.C	
<i>Tp30-31 Teopanazco</i>	N464; E111 N464; E112	4.2	39.4	9.32		407-433 d.C	(Romero-Hernández, E., 2008)
<i>Tp32-34 Teopanazco</i>	N464: E114	4.3	44.3	14.8		470-433 d.C	
<i>TP75 Teopanazco</i>	N467; E105	335.2	30.2	3.1		300-340 d.C	
<i>Cerámicas Pirámide del Sol Pirámide de la Luna Plaza de las Luna</i>	19°41'32.9" N 98°50'37.6" O				38,871 ± 1.8 µT	430-500 d.C	(Herrero-Bervera, E., 2015)
<i>CQE1 Ciudadela Pirámide de Quetzalcóatl</i>	19°40'55.3"N 98°50'49.3"O	359.0	37.6	3.9		384-440 d.C	(Terán-Guerrero A.G., et. al., 2016)
<i>CQE2 Ciudadela Pirámide de Quetzalcóatl</i>		2.9	38.4	2.6		397-440 d.C	
<i>CQE3 Ciudadela Pirámide de Quetzalcóatl</i>		348.5	40.2	1.7		324-386 d.C	
<i>CEE2 Conjunto E (CE)</i>		1.0	38.3	2.8		435-600 d.C	
<i>Basaltos del volcán Xitle</i>	19°19'32.0"N 99° 7'42.1"O	359.8	32.8	2.2	59.9 ± 7.7 µT	235-222 a.C 71-11 a. C 248-276 d.C	(Urrutia-Fucugauchi J., et. al, 2016)
<i>Murales del Palacio de Quetzalpapálotl</i>	19°41'52.6"N 98°50'45.4"O	41.3	351.6	3.2		312-409 d.C	(Gogichaishvili A. et. al., 2018)
<i>Patio de los Jaguares</i>	19°41'52.4"N 98°50'45.4"O	44.6	355.5	1.1	52.2 ± 1.6 µT	327 – 441 d.C	(Gogichaishvili A. et. al., 2022)
<i>Muro 4A Plaza de la Luna</i>	19°41'55.0"N 98°50'39.2"O						

A pesar de que los estudios se han realizado en la misma zona, han arrojado datos diversos y sus edades también son diferentes, esto se debe a las diferentes eras constructivas que existieron a lo largo de la historia de

Teotihuacán, además también los estudios nos ayudan a conocer si las diferentes culturas llegaron a convivir en algún momento; también varios de los estudios coinciden con la teoría del 'Gran Incendio', aportando nuevos datos sobre el colapso de la civilización. Al realizar más estudios en la zona, las bases de datos se van ampliando y en futuros estudios, los datos obtenidos pueden llegar a ser más precisos a lo que fue la realidad en esa época.

Como se mencionó antes, la zona de Teotihuacán es una zona de interés para diversos estudios en diferentes ámbitos de la ciencia, en particular para el método arqueomagnético se ha vuelto atrayente para realizar estudios con los cuales se logra obtener edades de las muestras y con ayuda de la arqueología, darle lugar en la línea del tiempo de la cultura teotihuacana y de esta manera conocer más del pasado.

CAPÍTULO III. EXPERIMENTOS Y MÉTODOS

Introducción

El arqueomagnetismo es la ciencia que consiste en el estudio de materiales arqueológicos que contengan minerales magnéticos, estos minerales son capaces de conservar las variaciones del campo magnético terrestre. Con ayuda de la remanencia magnética de los materiales recolectados se es posible lograr una datación con la cual se podrá conocer las etapas de construcción, procedencia, identificación y análisis de objetos arqueológicos (Soler-Arechalde, 2007).

Esta datación se aplica principalmente a la magnetización termoremanente, debido a que las estructuras quemadas de barro cocido son ricas en óxidos de hierro, las cuales, al calentarse, y superar la temperatura Curie, se magnetizan fácilmente en la dirección del campo presente en el ambiente, en este caso se magnetizan en sentido del campo magnético terrestre que se encuentre en ese momento. Posteriormente al enfriarse la magnetización adquirida formará una termoremanencia magnética. Al momento de recolectar los elementos arqueológicos que estuvieron expuestos a dicho calentamiento y enfriamiento, se pueden recuperar muestras orientadas y medir sus parámetros magnéticos (Schmidt, A. 2007).

Después de realizar los procedimientos necesarios en el laboratorio, los datos obtenidos se tendrán que comprar con la curva de variación secular de la región correspondiente, donde se comparan valores de declinación, inclinación e intensidad geomagnética que se obtuvieron a partir de los experimentos de la estructura con las curvas de referencia.

Curvas susceptibilidad contra temperatura (k-T)

Para realizar estos experimentos es necesario conocer los diferentes tipos de minerales con características magnéticas que se encuentran en las rocas. El grupo de óxidos hierro-titanio son los más importantes de los minerales magnéticos. En el diagrama ternario que se muestra a continuación se muestran la composición de dichos minerales, en las esquinas del diagrama se encuentran tres minerales: wüstita (FeO), rutilo (TiO_2) y hematita (Fe_2O_3), además se pueden observar dos series: a) titanomagnetita y b) titanohematita (Lowrie, 2007).

Asimismo, se debe conocer de estos minerales la temperatura a partir de cual un material pierde su susceptibilidad magnética (*temperatura de Curie*), su nombre se debe a Pierre Curie quien demostró que el magnetismo se perdía a una temperatura crítica, sin embargo cada material, al tener su propia *temperatura de Curie*, es necesario conocer los valores en los cuales se podrá identificar ese material en particular y en algunos minerales ferromagnéticos, al sobrepasar la temperatura de Curie su magnetización desaparece y al enfriarse pueden adquirir una nueva magnetización en dirección al campo presente en el ambiente (Figura 4).

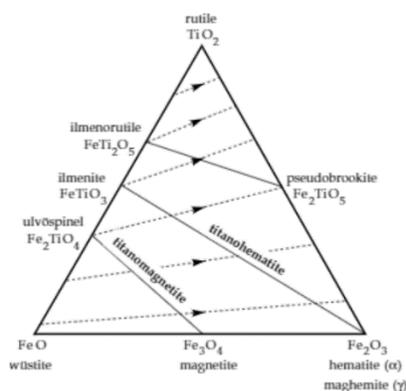


Figura 4. Diagrama ternario del grupo de minerales de óxidos de hierro y titanio (Lowrie, 2007)

En los experimentos para la obtención de Curvas susceptibilidad contra temperatura (k-T), se logran identificar los minerales magnéticos de la muestra, así como las transformaciones químicas de los minerales. Durante el experimento se realizan en un horno que se encuentra conectado a un campo aplicado en el laboratorio, y al aumentar y disminuir la temperatura de la muestra, se obtiene un registro de las características de los minerales, así como también conocer si hubo algún cambio químico de los materiales o se conservaron durante todo el experimento. En la tabla II se presenta la temperatura de Curie de algunos minerales magnéticos.

Tabla II. Temperaturas de Curie de los minerales magnéticos (Tauxe, 2005)

Mineral	Composición	Temperatura de Curie [°C]
Goetita	FeOOH	70-125
Greigita	Fe ₃ S ₄	330
Hematita	Fe ₂ O ₃	675
Maghemita	Fe ₂ O ₃	590-675
Magnetita	Fe ₃ O ₄	580
Pirrotita	Fe ₇ S ₈	325
Titanomagnetita	TiFe ₂ O ₄	<580

Desmagnetización por campos alternos

Se toman muestras de la estructura que se considera magnetizado, se miden sus direcciones iniciales de remanencia magnética y posteriormente las muestras se someten a desmagnetización en pasos donde el campo alterno va incrementando. Para este tipo de desmagnetización se puede realizar por calentamiento, campos magnéticos alternos o microondas sintonizadas (Tarling D.D, 2007). En la imagen a continuación se muestran los diagramas de *Zijderveld* (Figura 5) usando los métodos de desmagnetización de calentamiento y el método de campos alternos en muestras de Toledo, España (Catanzariti et al., 2012).

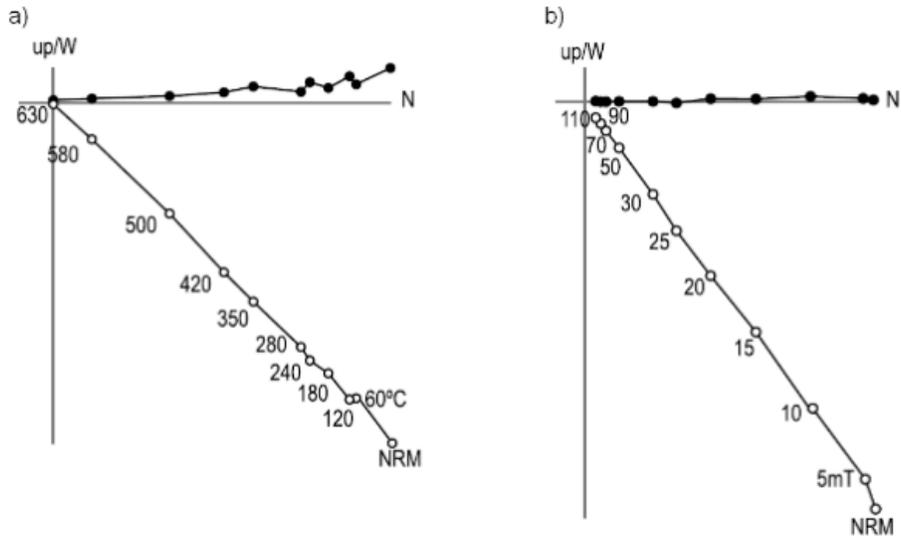


Figura 5. Diagramas de Zijderveld usando a) Desmagnetización escalonada con temperaturas crecientes y b) Desmagnetización en campos alternos crecientes en dos muestras de un horno romano en Toledo, España (Catanzariti et al., 2012)

Con los datos obtenidos, los vectores se combinan para determinar la dirección media del sitio o muestra; el uso de diagramas ortogonales también conocidas como diagramas de *Zijderveld* es la manera con la cual se representan estas direcciones. Y con las direcciones vectoriales, se grafican en una red estereográfica donde se puede observar la tendencia a la dirección.

En cuanto a la técnica de *desmagnetización en campos alternos crecientes*, durante el proceso permite desmagnetizar minerales de baja coercitividad, como los minerales ferrimagnéticos como es la magnetita o la maghemita, sin embargo, para los minerales con alta coercitividad como la hematita antiferromagnética no se pueden desmagnetizar completamente usando esta técnica al menos con los campos disponibles en laboratorio.

Paleointensidades

Debido a que la intensidad de la magnetización es una cantidad escalar, no es necesario que la muestra se encuentre orientada, por esta razón esta técnica puede ser utilizada en objetos como los fragmentos de cerámica, que no se encuentran en su posición original de cocción (Valet, J.P., 2007).

Suponiendo que no se preluclieron cambios químicos en la muestra, y la susceptibilidad sigue constante, es posible determinar el campo magnético del pasado, debido a que los mecanismos por los cuales se adquirieron la magnetización remante se puede relacionar de manera lineal con el campo aplicado en el laboratorio.

$$M_{MRN} = \alpha_0 B_0 \quad \text{Ec (1)}$$

La magnetización remante natural de la muestra, es proporcional a la intensidad del campo pasado

$$M_{lab} = \alpha_{lab} B_{lab} \quad \text{Ec (2)}$$

Entonces la magnetización adquirida en el laboratorio será proporcional al campo aplicado.

Donde α_0 y α_{lab} son constantes de proporcionalidad B_0 es la intensidad del campo pasado y B_{lab} es la intensidad del campo de laboratorio.

Entonces para determinar el campo antiguo usando 1 y 2,

$$B_0 = \frac{M_{MRN}}{M_{lab}} B_{lab} \quad \text{Ec (3)}$$

De esta manera la remanencia del laboratorio tendrá la misma proporcionalidad con respecto al campo del pasado, sus remanencias estarían relacionadas linealmente con el campo aplicado y si la magnetización remanente natural tiene solo una componente, entonces solo se necesitaría, para obtener el campo en el pasado (Figura 6), es medir la

magnetización remanente natural, y aplicar a la roca una remanencia en el laboratorio para obtener la proporcionalidad entre ambos campos.

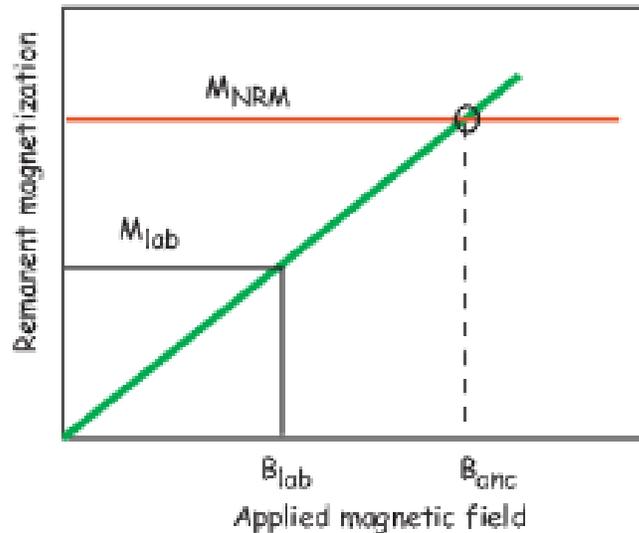


Figura 6. Principios de estimación de paleointensidad. (Tauxe 2005)

Debido a que no es una práctica tan simple y es necesario verificar los resultados constantemente, se utiliza un método en pasos sucesivos empleando calentamientos y enfriamientos, en presencia de un campo de laboratorio. El método fue desarrollado por Thellier-Thellier en 1959, donde las muestras se someten a un doble calentamiento-enfriamiento, que se va repitiendo, aumentando paulatinamente la temperatura. 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.

Para realizar este método primero se debe calentar la muestra a cierta temperatura (T_1) y se debe enfriar 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 $pTRM$) se obtendrá:

$$M_1 = M_{NRM} + pTRM \quad \text{Ec (4)}$$

Posteriormente se calienta la muestra por segunda vez y se enfría en una dirección antiparalela al anterior, es decir, a campo de laboratorio $-B_{lab}$. La segunda remanencia será:

$$M_2 = M_{NRM} - pTRM \quad \text{Ec (5)}$$

Con la suma o resta de las dos remanencias obtenidas, será posible conocer la M_{NRM} , y la $pTRM$ adquirida en la primera etapa de los calentamientos y enfriamientos. De esta manera, repitiendo los pasos anteriores e incrementar las temperaturas progresivamente, se generará un diagrama de pérdida de NRM y ganancia de $pTRM$, como se observa en la figura a continuación.

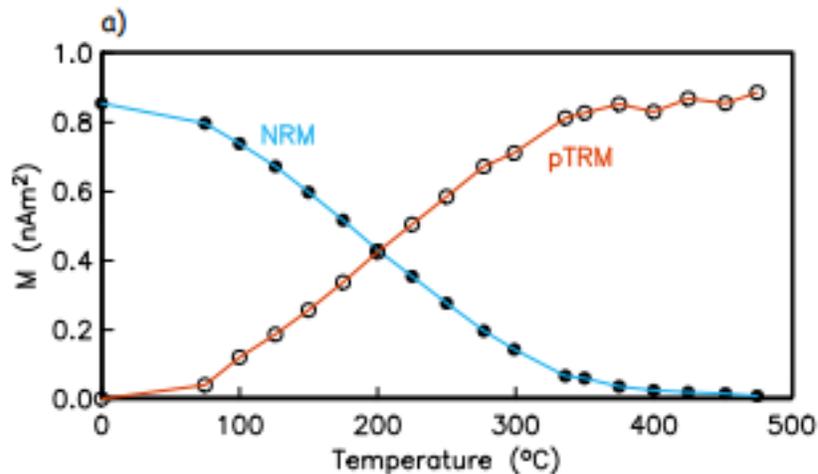


Figura 7. Ilustración del método Thellier-Thellier para determinar la paleointensidad absoluta (Tauxe 2005)

De la ganancia paulatina de $pTRM$ vs NRM después de cada doble calentamiento-enfriamientos a una misma temperatura, se obtiene un diagrama de Arai (Figura 8), donde la pendiente multiplicada por el campo aplicado, nos proporciona el valor de la intensidad del campo antiguo de la muestra.

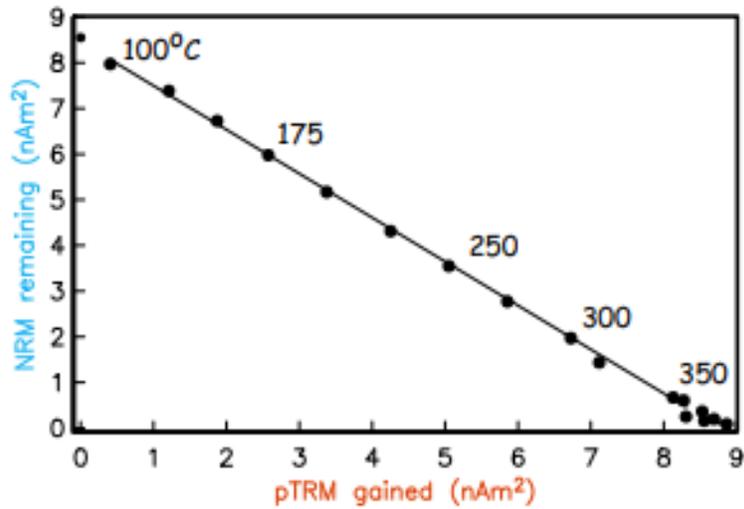


Figura g. Grafica de Arai. pTRM vs NRM (Tauxe 2005)

La variante de este método propuesta por Coe en 1967, sustituye el primer enfriamiento por un primer enfriamiento en presencia de un campo nulo, y de esta manera medir directamente M_{NRM} :

$$M1 = M_{NRM} \quad \text{Ec (6)}$$

Posteriormente, durante el segundo enfriamiento, con la presencia de un campo de laboratorio, se adquiriría pTRM:

$$M2 = M_{NRM} - pTRM \quad \text{Ec (7)}$$

Al igual que el método de Thellier-Thellier, repitiendo los calentamientos a temperaturas que aumentan progresivas, generaran un diagrama de Arai, y la magnitud del campo antiguo también se determina a partir de la pendiente.

Parámetros de paleointensidad

En el experimento de paleointensidad se deben considerar diversos parámetros que aseguran la calidad de los resultados obtenidos (Tauxe, 2005). Estos parámetros son:

- **f** es la fracción de remanencia, a partir de un 30% los valores son aceptados. Fue definida por Coe et. al en 1978, se define como:

$$f = \frac{\Delta y T}{y_0} \quad \text{Ec (8)}$$

Donde $\Delta y T$ es la longitud del segmentos NRM/TRM utilizado para el cálculo de la pendiente.

- **g** (*gap factor*) es el factor que penaliza la distribución de los puntos de los datos y en general superior al 60% es aceptable, se define como:

$$g = 1 - \frac{\underline{\Delta y}}{\Delta y T} \quad \text{Ec (9)}$$

Donde $\underline{\Delta y}$ es dado por:

$$\underline{\Delta y} = \frac{1}{\Delta y T} \sum_{i=1}^{i=N-1} \Delta y_1^2 \quad \text{Ec (10)}$$

Mientras el espacio entre los datos se vuelva menos uniforme, el valor g va a disminuir.

- **q**, es el índice de calidad de Coe, combina el error estándar de la pendiente (β), la fracción de NRM (f) y el factor g :

$$q = \beta f g \quad \text{Ec (11)}$$

- **MAD** (*Maximum Deviation Angle*) de Kirschvink (1980) se define como, donde σ_i son las desviaciones estándar de los tres vectores:

$$MAD = \frac{\sqrt{(\sigma_2^2 + \sigma_3^2)}}{\sigma_1} \quad \text{Ec (12)}$$

Ritmo de enfriamiento

Un resultado de la magnetización termorremanente, depende de la velocidad de enfriamiento mientras el objeto sigue bajo la influencia de un campo magnético (Dunlop, 2007).

La ecuación (13), muestra la determinación del campo adquirido en la muestra, pero esos casos son ideales, donde las velocidades de enfriamiento son iguales (Folgerhaiter, 1899):

$$\frac{TRM_{natural}}{TRM_{lab}} = \frac{H_{natural}}{H_{lab}} \quad \text{Ec (13)}$$

Donde $TRM_{natural}$, $H_{natural}$ son la magnitud y la intensidad de la muestra, mientras que TRM_{lab} , H_{lab} son la magnitud y la intensidad adquirida en el laboratorio.

En la naturaleza y en el laboratorio, no sucede este escenario, por lo cual se debe realizar una corrección para eliminar o disminuir el efecto generado por los diferentes ritmos de enfriamiento (Biggin et al, 2013):

$$B_0 = f_{CR} \frac{TRM_{natural}}{TRM_{lab}} TRM_{lab} \quad \text{Ec (14)}$$

Donde el factor de corrección de la velocidad de enfriamiento es:

$$f_{CR} = \frac{1}{1 + \Delta TRM} \quad \text{Ec (15)}$$

y la fracción de paleointensidad sobreestimada,

$$\Delta TRM = k \cdot \log \log \left(\frac{CR_{lab}}{CR_{natural}} \right) \quad \text{Ec (16)}$$

Entonces al corregir el efecto del ritmo de enfriamiento y aumenta el valor de la TRM_{lab} , la intensidad del campo se reduce, en cambio si el valor de TRM_{lab} disminuyera, entonces la intensidad del campo aumentaría (Tauxe 2005).

Relajación magnética y temperatura de bloqueo

Al aplicar un campo magnético a ciertos cristales, estos van a rotar a un eje preferencial, y durante este proceso los cristales se relajan, y dependiendo de la temperatura, su volumen o la fuerza de coercitividad la relajación va a

variar. Si el mineral decae rápido, la magnetización remanente registrada no será precisa.

Louis Néel en 1949, estudió el efecto del tiempo de relajación, para explicar la viscosidad magnética. Néel usó su teoría para desarrollar un modelo de TRN en partículas ferromagnéticas de dominio único. De esta manera, en este tipo de partículas se observa un decaimiento exponencial con respecto al tiempo. Entonces los tiempos de relajación dependen de la temperatura, porque si aumenta, entonces se reducirán.

La temperatura de bloqueo se trata del punto donde el tiempo de relajación es lo suficientemente largo como para igualar a un tiempo de relajación crítico arbitrario τ_s (Pollard, 1999). Entre la temperatura de Curie y la Temperatura de bloqueo la magnetización de los granos ferromagnéticos decaerá rápidamente y será poco confiable, pero cuando la temperatura decrece a partir de la temperatura de bloqueo, la partícula experimentará un aumento de su tiempo de relajación y su comportamiento será estable (Butler, 2004).

Anisotropía

Los minerales magnéticos que se encuentran en las rocas con una matriz de minerales paramagnéticos y diamagnéticos buscan orientarse donde la magnetización minimice su energía. Cuando se encuentran en presencia de un campo, los momentos tienden a rotar y a alinearse en sentido del campo, pero las resistencias a orientarse se llaman *anisotropías*, y pueden proporcionar algunas direcciones preferentes para la magnetización. Este fenómeno puede investigarse mediante la *anisotropía magnética*, la cual es una técnica basada en la variabilidad de las propiedades magnéticas.

Existen diferentes tipos de anisotropía, por ejemplo, la *anisotropía magnetocristalina*, presente en los cristales de hematita o pirrotita, la magnetización de la partícula se adquiere fácilmente a lo largo de su línea

cristalográfica; en los granos de magnetita, la magnetización es mayor a lo largo de la dimensión más larga del grano y menor a lo largo de la dimensión más corta, esto se le conoce como *anisotropía de forma*; mientras que la *anisotropía magnética* es donde los granos se encuentran orientados en dirección del campo presente (Hroudá, F, 2007).

En la actualidad, los instrumentos modernos son sensibles para poder medir la anisotropía en casi todos los tipos de rocas con presión. Esta técnica también sirve para los análisis de estructural, por lo cual la anisotropía ha tenido un amplio uso en varias ramas de la Geología y la Geofísica.

Principios de la anisotropía

La magnetización m depende de la intensidad del campo magnetizante H de tal manera:

$$M = \kappa H \quad \text{Ec (17)}$$

Donde la k es la susceptibilidad magnética, independiente del campo de las sustancias paramagnéticas y diamagnéticas.

Si la magnetización no es paralela al campo magnetizante, entonces la relación entre la magnetización y la intensidad del campo débil, se puede describir de una manera más compleja en un sistema de ecuaciones de 3x3:

$$\begin{aligned} M_1 &= \kappa_{11}H_1 + \kappa_{12}H_2 + \kappa_{13}H_3 \\ M_2 &= \kappa_{21}H_1 + \kappa_{22}H_2 + \kappa_{23}H_3 \\ M_3 &= \kappa_{31}H_1 + \kappa_{32}H_2 + \kappa_{33}H_3 \end{aligned} \quad \text{Ec (18)}$$

O bien:

$$M_i = \kappa_{ij}H_j \quad \text{Ec (19)}$$

Donde M_i son las componentes del vector de magnetización, H_j las componentes del vector de intensidad del campo y k_{ij} son las componentes del tensor de susceptibilidad simétrico que refleja la susceptibilidad en su forma (Tauxe, 2005).

Si la susceptibilidad es mayor en una dirección entonces será menor en dirección perpendicular. Viéndolo en un sistema de coordenadas cartesianas las tres direcciones las podemos simplificar como:

$$\begin{aligned} M_{xx} &= \kappa_{xx}H_x \\ M_{yy} &= \kappa_{yy}H_y \\ M_z &= \kappa_{zz}H_z \end{aligned} \quad \text{Ec (20)}$$

Por ejemplo, si se aplica un campo magnético paralelo al eje x , se producirá una magnetización correspondiente a $M_{xx} = \kappa_{xx} H_x$, y en caso de tener anisotropía se generaría dos magnetizaciones adicionales tanto en el eje y como en el eje z (Figura 9) (García, 1996).

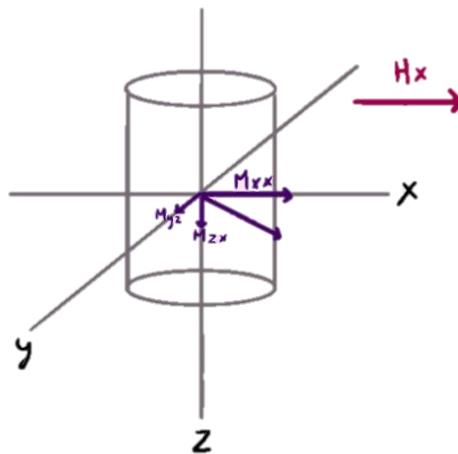


Figura 9. Tensor de anisotropía de TRM. El campo H_x no solo crea magnetización en el eje x , sino que también afecta a los demás ejes (y/z) (García, 1996). Imagen: Karen Arreola Romero.

Anisotropía de la magnetización termoremanente (ARTM)

Para medir la ARTM, primero se debe desmagnetizar la muestra la muestra, puede hacer mediante desmagnetización con campos alternos o calentando la roca por encima de su temperatura de Curie o de Néel y enfriándola a cero. Luego la roca se magnetizará en dirección del primer campo adquirido y recalentándola por encima de su temperatura de Curie o de Néel y enfriándola en presencia de un campo y una velocidad fija. Después de medir la TRM obtenida, se vuelve a desmagnetizar. Son necesarios al menos seis pasos para realizar este experimento. También es importante revisar que no se produjeron cambios químicos durante la adquisición de la TRM (Hirt, A.M, 2007).

Para corregir en nuestros datos el factor de ARTM, intentando eliminarlo o disminuirlo, Aitken (1981), sugiere orientar las muestras de tal forma que la dirección NRM sea paralela al campo aplicado en el laboratorio.

Arqueomagnetismo

El potencial del Arqueomagnetismo se debe a que muchas estructuras arqueológicas contienen óxidos de hierro, debido al uso de la arcilla en las antiguas civilizaciones. Además, al ser sometidos a un proceso de calentamiento para su fabricación, es posible que guarden en su interior el registro de la variación del campo geomagnético.

Es una técnica usada desde el siglo XX, donde en Francia, varios investigadores realizaron por primera vez, estudios paleomagnéticos en estructuras arqueológicas, logrando definir las características del campo magnético en Francia para alrededor de dos mil años, así como también obtuvieron las primeras curvas de variación secular para la región (Thellier y Thellier, 1959). Desde ese entonces la técnica arqueomagnética se ha desarrollado y en la actualidad hay investigadores que estudian y profundizan diversos factores relacionados con el tema.

Las investigaciones arqueomagnéticas pueden utilizarse para: estudios de las variaciones espacio-temporales del campo geomagnético en el área de interés, fechamientos de estructuras y eventos, identificación de instrumentos que indiquen el conocimiento de las culturas sobre el campo magnético de la Tierra, estudio de construcciones, propiedades magnéticas de los materiales empleados por diversas culturas (Soler -Arechalde, 2007), identificación y caracterización de fuegos paleolíticos, determinación de paleo temperaturas, estudios de cronología relativa de eventos de combustión (Gomez-Paccad 2016).

Su técnica de datación es similar a la datación radiocarbónica, donde se comparan los datos obtenidos de la muestra estudiada con una curva patrón.

Arqueomagnetismo como técnica de datación

Esta técnica consiste en comparar el campo magnético, registrado en una muestra arqueológica de la cual desconocemos su edad, con la curva de variación secular de la región correspondiente. Se necesitan los valores declinación, inclinación e intensidad magnéticas obtenidas del estudio arqueomagnético, en la figura x se muestra un estudio realizado en muestra de suelo quemado de Teotihuacán, donde se obtuvo una edad de 327-441 d.C como la mejor estimación de exposición del fuego.

Al combinar los resultados obtenidos de cada parámetro, se obtiene una datación final con cierto nivel de confianza, que en general se establece de un 95% (Pavón-Carrasco et al., 2011).

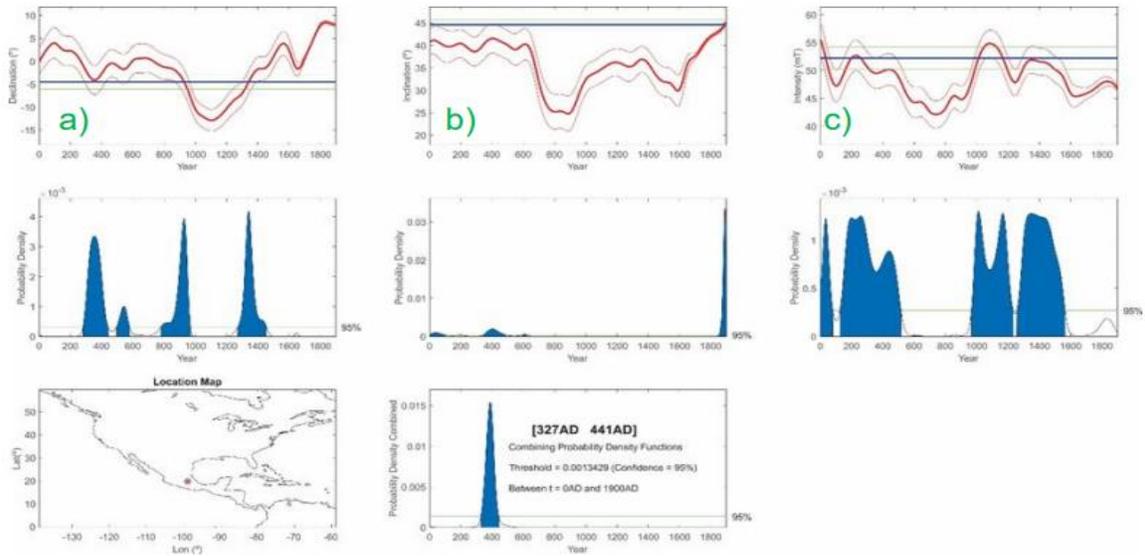


Figura 10. Datación arqueomagnética utilizando el modelo geomagnético global SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et. al 2011, 2014; a) Declinación; b) Inclinación y c) Intensidad absoluta (Gogichaishvili A. et. al., 2022)

CAPÍTULO IV. CONTEXTO ARQUEOLÓGICO

Teotihuacán, la ciudad donde fueron creados los dioses

Teotihuacán fue una de las ciudades más importantes en Mesoamérica, la cual abarca un largo periodo siendo su inicio en el año 100 a.C hasta su declive que ocurrió entre los años 650-750 d.C. Se encuentra ubicada en el altiplano central en México, a 2250 m sobre el nivel del mar. Fue habitado con alrededor de 100 000 a 200 000 habitantes durante su apogeo (entre 350-450 d.C), aunque podrían tratarse de una población mayor, en ese entonces el área urbana alcanzaba alrededor de 20 km² (Cowgill 2015). Además de ser un centro religioso, también era un centro económico donde se explotaba la obsidiana y era una importante ruta comercial (Manzanilla 2017). El nombre de la ciudad significa “*el lugar donde fueron creados los dioses*”, nombre que fue asignado por los aztecas que llegaron a asentarse siglos después del abandono de la ciudad.

La zona arqueológica de Teotihuacán es uno de los sitios arqueológicos con mayor exploración en México, siendo estudiada no sólo por instituciones mexicanas, en estas exploraciones se encuentran estudios de instituciones estadounidenses, canadienses, japonesas, francesas, entre otras, esto se debe a que es un sitio clave para el estudio del urbanismo y la creación de las sociedades estatales.

La ciudad fue cuidadosamente diseñada (Figura 11), con un complejo ceremonial y viviendas a su alrededor, teniendo un eje central conocido como la *Calzada de los Muertos*, la cual tiene una dirección N-S, donde se encuentran las principales estructuras empezando con la *Pirámide de la Luna* y el *Palacio de Quetzalpapálotl*, con el *Patio de los Pilares*, el *Patio de los Jaguares* y la *Subestructura de los Caracoles Emplumados*, seguida por la *Pirámide del Sol* y el *Complejo Xalla*, posteriormente se encuentra el

complejo *Calle de los Muertos*, el cual es compuesto por los *Grupo Viking*, *Plaza Este*, *Plaza Oeste* y *Edificios Superpuestos* y termina en la *Ciudadela* junto al Templo de Quetzalcóatl.

Teotihuacán también contaba con palacios y conjuntos habitacionales, los cuales se encontraban alrededor de las estructuras, estos lugares eran; *La Ventilla*, *Tetitla*, *Totómetla*, *Atetelco*, *Zacuata*, *Yayahuala*, *Tepantitla*, *Amancalco* y *Teopanazco*.

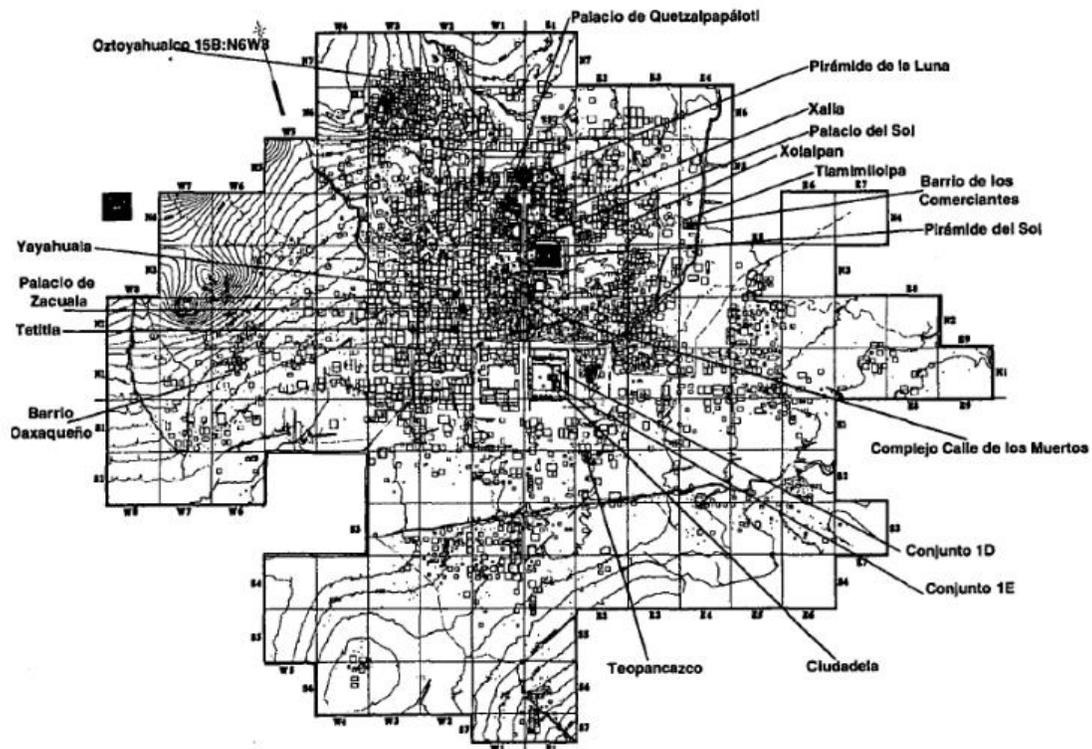


Figura 11. Mapa de Teotihuacán por Millon 1973. En el mapa se observan la ubicación de cada una de las estructuras, palacios y conjuntos habitacionales de Teotihuacán.

Fases culturales

Para describir el desarrollo de Teotihuacán se divide en diferentes etapas constructivas a lo largo de la línea del tiempo de la cultura teotihuacana (Figura 12).

Durante la fase **Tezoyuca-Patlachique**, que abarca 200 a.C.- 1 d.C, se empiezan a concentrar las primeras poblaciones en el valle y posteriormente para el año 100 a.C habían alrededor de 5 000 habitantes en un área de 4-6 km². Debido a la erupción del volcán Xitle, las poblaciones de Cuicuicuilco empiezan a emigrar asentándose en el valle de Teotihuacán, también durante esta etapa se convierte en el mayor centro comercial de obsidiana (Millon 1973).

En la siguiente etapa, conocida como **Tzacualli** abarca el periodo de 1-100 d. C, la ciudad se extiende hasta 20 km², durante este periodo se construyen las **Pirámides del Sol** y la **Luna** y la **Calzada de los Muertos**, además de empezar las primeras etapas constructivas para el *Templo de Quetzalcóatl* (Millon 1973). La población estimada durante esta fase es de 25 000 habitantes, en especial en el norte de la ciudad (Cowgill 1974).

En la etapa **Miccoatl** del 100-170 d.C, el número de habitantes aumentaría a 60 000 (Cowgill 1974), cubriendo una extensión de 22 km², para esta etapa las fases ocupadas en etapas anteriores son abandonadas y se realizan las primeras remodelaciones en la **Pirámide del Sol**, también durante esta etapa se construye el **Templo de Quetzalcóatl** y la **Ciudadela**.

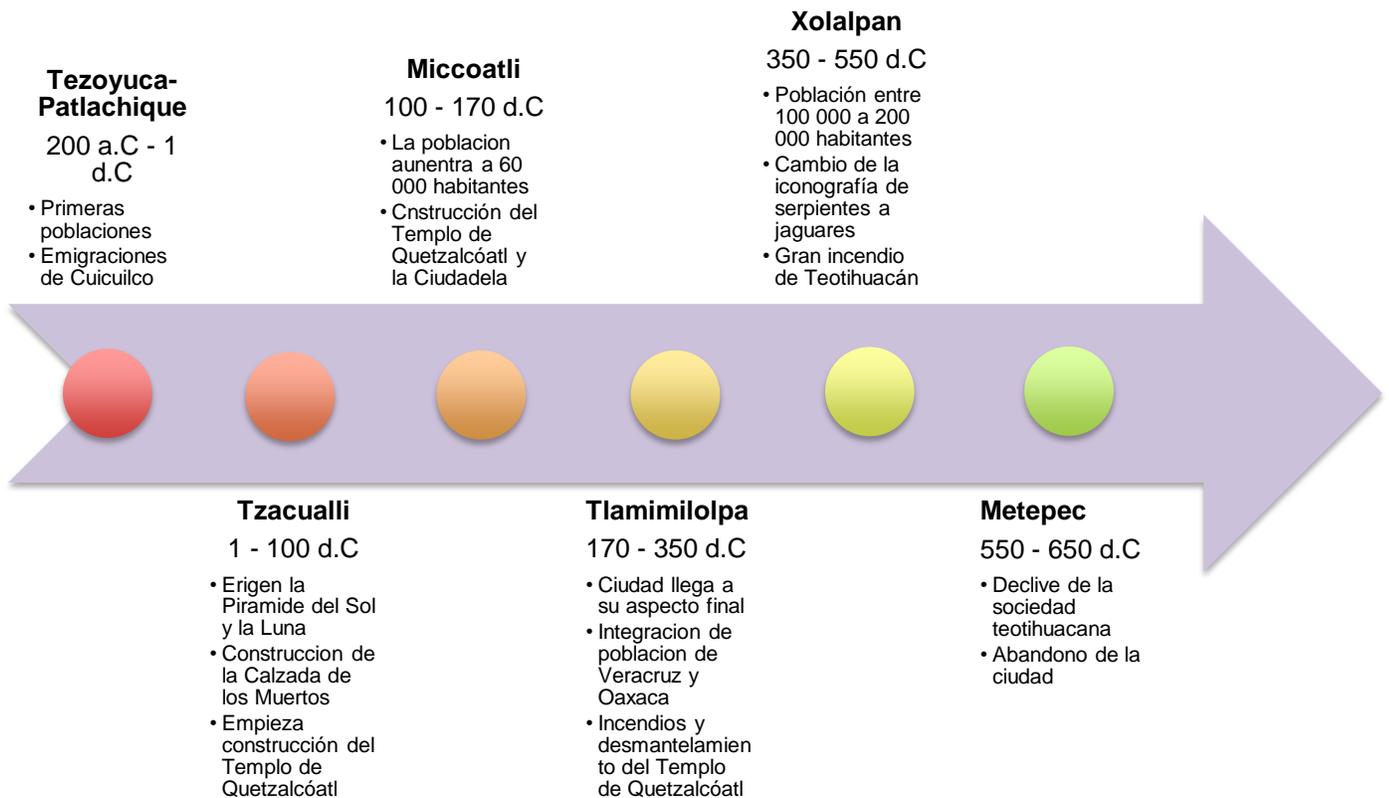
En la fase **Tlamimilolpa** que incluye los años del 170-350 d.C, la ciudad seguía expandiéndose con la integración de grupos que provenían de Veracruz y Oaxaca (Manzanilla 2017) desarrollándose y consolidando grandes conjuntos habitacionales. En el transcurso de este periodo la

ciudad consigue su aspecto final, se termina de construir la **Plaza de la Luna** y el “Gran Mercado” enfrente de la **Ciudadela** (Millon 1973). Durante esta primera etapa de apogeo concluyó con una serie de sucesos donde del **Templo de Quetzalcóatl** se desprendieron las esculturas de la fachada, se le prendió fuego y se construyó otra plataforma; asimismo se presentaron varios rituales de terminación de la fase **Tlamimilolpa** (Manzanilla 2017).

A lo largo de la fase **Xolalpan** que corresponde al periodo de 350-550 d.C, la ciudad tenía una población de 150 000 – 200 000 habitantes (Cowgill 1974), se integran poblaciones provenientes de Michoacán (Manzanilla 2017). Este periodo fue denominado por Millon como “fase de renovación urbana”, la ciudad se pintaba de rojo, pero la iconografía de serpientes se convertía en jaguares y la ciudad era habitada por numerosas poblaciones de migrantes. Además, en esta fase sucedió el ‘*Gran Incendio*’ (550-650 d.C), se tienen evidencias de la destrucción provocada por el fuego, así como el desmantelamiento de estructuras y saqueos, este fuego se hizo presente tanto en el centro de la ciudad ceremonial como en los barrios cercanos como *Xalla* y *Teopancazco*. 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) estudio muestras quemadas pertenecientes a la **Ciudadela** y **Grupo Viking** obteniendo edades de alrededor 475 d.C; Soler y Urruita (2001) fecharon pisos quemados en *Xalla* y obtuvieron edades hacia 550 d.C; Manzanilla (2003) recolectaron pedazos de madera carbonizada en *Teopancazco*, de la cual la fecha obtenida fue de 555 d.C; Soler-Arechalde et. al (2006) tomaron muestras de yeso en *Xalla* y *Teopancazco* obteniendo edades entre 500-575 d.C. En cuanto al desmantelamiento en la ciudad Acosta (1964) menciona que la piedra tallada del **Palacio de Quetzalpapálotl** fue desprendida y estas piedras fueron encontradas en la puerta del **Patio de los Pilares**.

En el marco de los años 550-650 d.C, en la fase llamada **Metepec**, debido a la decadencia del sistema teotihuacano, la mala calidad en la que quedaron los edificios y el colapso del sistema, provocó el abandono de la ciudad y posteriormente llegaron los saqueadores, los coyotlatelcos. A pesar de tener varias remodelaciones en ciertos sectores, la ciudad fue abandonada poco a poco (Manzanilla, 2017).

Figura 12. Línea del tiempo con las diferentes fases culturales de Teotihuacán.



Estructuras principales

Las principales estructuras que se encuentran en Teotihuacán son la **Pirámide del Sol**, la **Pirámide de la Luna**, el **Templo de Quetzalcóatl** y la **Ciudadela**, estos nombres también fueron asignados por los aztecas, a excepción de La Ciudadela, nombre que fue asignado por los conquistadores españoles que pensaron que se era un recinto militar. También es importante mencionar la **Calzada de los Muertos**, debido a que es el camino que cruza toda la ciudad y a lo largo de ella se encuentran otras estructuras y palacios.

La Calzada de los Muertos

Llamada por los aztecas como "**miccaotli**", que significa "**camino de los muertos**", a causa de que pensaron que los montículos situados a sus bordes eran tumbas. Es el eje principal de la ciudad, tiene de ancho alrededor de 40 metros y en su límite norte se encuentra la Plaza de la Luna y hacia el sur se encuentra la Ciudadela; el cauce del río San Juan fue desviado por los teotihuacanos para que la atravesara perpendicularmente y de esta manera dividir la ciudad en cuatro cuadrantes. Mientras se camina por de la calzada encontraremos las estructuras más importantes de Teotihuacán que son las **pirámides del Sol y la Luna**, el **Palacio de Quetzalpapálotl**, con el **Patio de los Pilares**, el **Patio de los Jaguares** y la Subestructura de los **Caracoles Emplumados**, el **Complejo de la Calle de los Muertos** que está compuesto por: **Edificios Superpuestos**, **Grupo Viking** y los **conjuntos Plaza Oeste y Plaza Este**, para finalizar con la **Ciudadela y el Templo de Quetzalcóatl** (López Luján, 2006).

Pirámide del Sol

Es la tercera pirámide más grande de la época prehispánica, fue llamada por los aztecas *Tonatiuh itzacual*, aunque para ser que fue consagrada para

el dios de la lluvia debido a las ofrendas y los sacrificios de niños enterrados en la zona. Fue construida en la fase *Tzacualli*, es un montículo de tierra conformada por cinco recubiertos con pintura sobre el estuco, sus dimensiones son 225 m de lado y 63.5 m de alto, con una escalera donde se puede llegar a la zona más alta, se cree que pudo ser originalmente más alta debido a que tenía un santuario en la cima, pero actualmente solo hay una plataforma cuadrada irregular (Figura 13), se encuentra decorada con felinos que emergen de portales con estrellas marinas y plumas (López Luján, 2006).



Figura 13. Pirámide del Sol. Fuente: Arqueología Mexicana.

En su interior hay una caverna natural, que fue modificada para convertirse en uno de los espacios secretos y sagrados de Teotihuacán, al pie de la pirámide se encuentra el acceso bajando a 6 m de profundidad para recorrer un canal de 100 m y llegar a 4 cámaras artificiales, donde se cree se realizaban ritos y celebraciones religiosas relacionadas con el agua, la fertilidad o ceremonias de investidura y oráculos (Heyden 1973).

Pirámide de la Luna

Al terminar la *Calzada de los Muertos*, se encuentra la *Plaza de la Luna*, que está rodeada por la *Pirámide de la Luna* y 13 templos menores. La pirámide era conocida como *metzli itzacual*, que significa ‘encierro de la Luna’, es la segunda pirámide más grande de Teotihuacán y posiblemente fue consagrada a la diosa del agua y la fertilidad, esto debido a dos imágenes de la diosa que se encontraron en la plaza. Su construcción empezó en la fase *Tzacualli*, pero se encontraron seis etapas constructivas después, siendo en la fase *Xolalpan* donde alcanzó una altura de 150 m y su base 140 m por lado (Figura 14).



Figura 14. Pirámide de la Luna. Fuente: National Geographic

Durante las excavaciones realizadas por Rubén Cabrera y Saburo Sugiyama realizadas entre los años 1998 y 2004, se encontraron cabezas decapitadas y restos de guerreros y dignatarios extranjeros, además de animales inmolados, donde el sacrificio más antiguo data de aproximadamente el año 200 d.C el cual consistía en un extranjero fue enterrado vivo con las manos atadas, el cual rodearon con animales que representaban poderes míticos y supremacía militar: un lobo, un halcón, pumas, águilas y víboras de

casabel, algunos de ellos también enterrados vivos dentro de jaulas (Sugiyama y López Luján, 2006).

La Ciudadela

Se encuentra al este de la *Calzada de los Muertos*, cubre una superficie de 160 000 m² la cual podría albergar 100 000 personas, está rodeada por la Gran Plataforma, la cual es una estructura cuadrangular sobre la cual se aprecian 15 basamentos piramidales, de esta estructura se puede acceder a la Gran Plaza donde se levanta un adoratorio dedicado a Quetzalcóatl. En este lugar se encuentra al norte, el Templo de Quetzalcóatl.

Templo de Quetzalcóatl

Fue construido durante la fase *Miccoatl*, 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, en el pasado estuvo pintada de colores intensos (Figura 15). En un principio tenía en sus alfardas, taludes y tableros fueron tallados los sinuosos cuerpos de serpientes emplumadas nadando entre conchas y caracoles. Alrededor de los 400 d.C, ocurrió un gran cambio en la estructura política y religiosa teotihuacana, que provocó el desmantelamiento de la pirámide y fue cubierta con otro edificio llamado *Plataforma Adosada*, en un intento de silenciar a Quetzalcóatl.



Figura 15. Templo de Quetzalcóatl. Fuente: Pueblos originarios

Además, se encontraron cerca de 200 víctimas de sacrificios 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; 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 teotihuacana

Organización social y política

A diferencia de otras culturas de Mesoamérica, no se tiene representaciones que narren las diferentes jerarquías en Teotihuacán, por lo cual la sociedad teotihuacana estaba jerarquizada en función del diseño de la ciudad, es decir la zona ceremonial, donde era sede de las actividades políticas, administrativas y religiosas y la zona residencial, la cual estaba dividida en diferentes barrios que cumplían funciones específicas. Además, todos comían lo mismo y tenían accesos a los bienes locales y foráneos. (Manzanilla 2017).

Por otro lado, Millon (1976) señala que la sociedad teotihuacana estuvo formada por seis niveles sociales económicos y culturales que se encontraban definidos. En la cabeza se encontraba la élite gobernante que tal vez habitaban en el *Templo de Quetzalcóatl*, la *Pirámide del Sol* o 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*.

Como se mencionó, ante la ausencia de los registros de la jerarquía teotihuacana, se considera que Teotihuacán fue regido por monarcas que tenía una gran ambición y gran poder, 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), por otro lado, algunos otros se inclinan a pensar en un cogobierno a cargo de dos a siete gobernantes que representaban los diferentes distritos de la ciudad que no habían una distinción clara entre la función política y religiosa (Manzanilla 1993, 2017) 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 en la fase *Tlamimilolpa*.

Economía

El Valle de Teotihuacán proporcionaba recursos para la recolección y caza, además gracias a sus canales de se obtenía cosechas de maíz, frijol, calabaza, chile, tomate, amaranto; también se explotaba obsidiana y contaban con arcilla de excelente calidad, la cual llegó a tierras mayas, el norte de México y a la costa del Golfo de México. Los puntos para

comercializar en la ciudad se encontraban en el *Gran Mercado* frente a *La Ciudadela* (Cowgill 1973).

Religión

Los teotihuacanos eran politeístas, aunque no se conocen los nombres de los dioses que eran venerados, de los dioses aztecas se pueden reconocer las mismas deidades, las cuales eran *Tláloc*, dios de la lluvia y la fertilidad, *Chalchihuitlicue*, diosa de las aguas horizontales, *Quetzalcóatl*, la serpiente emplumada, responsable de la fertilidad en la tierra y la vida misma, *Huehuateotl*, el dios viejo, era el encargado del fuego y protector de la casa y del fogón, *Mictlantecuhtli*, dios de la Muerte y el Señor del infierno, *Xipe Totec*, dios de la primavera (el comienzo de la época de lluvias) y de la nueva vegetación (Manzanilla 2017). Los monumentos donde se realizaban rituales para las deidades eran la *Pirámide del Sol* y la *Pirámide Luna* las cuales estaban consagradas a los dioses de la lluvia, el agua y la fertilidad; el *Templo de Quetzalcóatl*.

Declive y abandono de la ciudad

El colapso y abandono de Teotihuacana no debió ser un hecho común y de alguna manera afectó a las culturas mesoamericanas del período Clásico, debido a su amplio desarrollo y actividades económicas que eran importantes en las demás culturas; además de ser una de las metrópolis más grandes de este periodo y albergar una de las poblaciones más grandes de Mesoamérica.

Para explicar el colapso de Teotihuacán se deben considerar diversos factores dentro y fuera de la ciudad, además factores ambientales. Manzanilla (2006) sugiere que a finales del periodo de Teotihuacán las sociedades de nivel intermedio obtuvieron una riqueza y un poder cada vez mayores que la autoridad central, debilitando el Estado y desempeñado un

papel importante en su colapso; otro factor que pudo intervenir en la caída de la civilización fue el de un proceso de deforestación y deterioro del valle, produciendo menor cantidad de lluvias afectando las cosechas (Lorenzo 1968).

Factores ambientales

Lachniet *et. al* 2012, hicieron una reconstrucción de precipitaciones de 2400 años a partir de una estalagmita absolutamente datada del suroeste de México, en el estudio encontraron entre 550-850 d.C., las condiciones ambientales fueron anormalmente secas y las precipitaciones escasas. Debido a que la agricultura se centraba alrededor de la ciudad, el suministro de alimentos en el valle se vio afectada por la condición climática y la población empezó a sufrir de hambrunas, por lo cual pudo ser un factor importante que llevó al abandono de la cultura.

Incendio en la ciudad

Debido a los estudios realizados en la zona, se cuentan con evidencias de destrucción debido al fuego. Millon (1988) detectó evidencias de incendios en todas las estructuras monumentales de la *Calzada de los Muertos*, en las escalinatas y plataformas de los templos igualmente que en construcciones asociadas a la ciudad. Los estudios realizados en el Conjunto de *Xalla* por Manzanilla y López Lujan 2001, corroboraron las evidencias detectadas por Millon.

Tiempo después, Daniel Wolfam (1990) muestreo pisos, columnas y hoyos quemados de diferentes zonas de la ciudad: Estructura 1D de *La Ciudadela*, *Grupo Viking* y *Teopancazco*; los fechamientos arqueomagnéticos de Wolfman arrojaron edades alrededor de 310-475 d.C.

En el 2001, Soler y fecharon pisos quemados en *Xalla* y obtuvieron edades hacia 550 d.C. (Soler y Urruita 2001); mientras que Hueda y Soler ese mismo año, tomaron muestras de *la Ciudadela* y el *Complejo Plaza Oeste*, donde obtuvieron por datación arqueomagnética edades de 553–606 d.C y 551–607 d.C respectivamente. (Hueda Y., Soler A. M., 2001).

Alrededor del 2003, se realizó un estudio en fragmentos de cerámicas hechas de arcilla cocida halladas en *Teopancazco* donde se obtuvieron edades entre 525 -575 d.C. (Rodríguez-Ceja M. 2003)

Otro estudio que respalda la teoría del incendio es el trabajo realizado por Soler-Arechalde et. al (2006), de las zonas de *Xalla* y *Teopancazco*, se tomaron muestras de yesos llamados *estucos*, que eran empleados en la cultura teotihuacana para pisos, estructuras, cerámicas y soportes de pinturas murales; y al realizar el estudio arrojaron edades entre 500-575 d.C, por lo cual coincide con la teoría del *Gran Incendio* de Teotihuacán.

Terán-Guerrero A.G., et. al., 2016, realizaron un trabajo para obtener dataciones magnéticas de *la Ciudadela* y *Templo de Quetzalcóatl*, donde el resultado de las dataciones arqueomagnéticas del estudio fueron de 324-440 d.C y 440 -600 d.C, siendo esta última la que corresponde al *Gran Incendio*.

Desmantelamiento y destrucción de esculturas

Durante los rituales de terminación se realizaron desmantelamiento de elementos decorativos y piedras de *La Ciudadela* y varias escalinatas de *la Calzada de los Muertos*, las escaleras que bordeaban *la Calzada de los Muertos* fueron desmanteladas, en particular las que se encontraban en la *Plaza de la Luna* (Bernal 1963); Acosta (1964) menciona que la piedra tallada del *Palacio de Quetzalpapálotl* fue desprendida y estas piedras fueron encontradas en la puerta del *Patio de los Pilares*; Morelos-García (1993)

menciona que las esculturas de cabezas felinas que decoraban los las escaleras del Complejo de la *Plaza Oeste* (fueron desmanteladas y arrojadas al piso de la plaza, junto a ellas un friso de piedra tallada, una pata y un brazo de felino y otros objetos; lo mismo sucedió en el complejo de *Xalla*, donde en su patio principal se encontraron cabezas y patas de felinos desmanteladas, así como piedras talladas que pertenecían a un friso (Manzanilla y López-Luján 2001). Manzanilla (2003) observó que en la zona de *Teopancazco* se encontraron representaciones de las deidades *Huehuetéolt* y *Tláloc* tiradas en el piso, acompañadas por restos de vasijas de piedra rotas, las cuales, sus fragmentos fueron esparcidos en varios cuartos.

En 2020, se encontraron 160 fragmentos de una escultura en el complejo de *Xalla*, dicha escultura era antropomorfa con un cuerpo completo, erguido, con la cabeza de frente, cuello corto, los brazos extendidos hacia abajo, manos con palmas ahuecadas, las piernas rectas y las plantas de los pies, plana, con una altura de 128 cm (Manzanilla 2019). El material con el que fue tallado fue mármol de calcita, una roca metamórfica que no pertenece al Valle de Teotihuacán, por lo cual pudo existir un intercambio de materiales o expediciones a tierras lejanas para obtener material. La escultura tiene varios daños que pudieron hacerse usando taladros puntiagudos y tabulares, además de un cincel para mutilar seis fragmentos en el cuerpo; esta destrucción de la escultura pudo deberse a un choque violento en la ciudad donde las esculturas también se vieron afectadas (Rosales 2022)

Saqueo y reocupación de la ciudad por otras culturas

Teotihuacán después de su abandono, fue constantemente saqueado. Armillas (1994) observó que todas las ofrendas, en el *Grupo Viking* habían sido extraídas en tiempo de los teotihuacanos y encima habían construido

otro piso sobre el que previamente había sido saqueado; Sugiyama (2005) menciona que hubo saqueos en la *Templo de Quetzalcóatl*, y con esto dejaron poca evidencia sobre los gobernantes que posiblemente estuvieran enterrados en el templo. También en *Palacio de Quetzalpapálotl* se detectaron grandes saqueos y muchos fueron encontrados en el *Patio de los Pilares* (Acosta 1964). Con estos estudios se cree que la ciudad no fue saqueada por otras culturas posteriormente al abandono de los teotihuacanos, sino que los mismos pobladores se llevaron consigo sus reliquias antes de abandonar la ciudad.

En las últimas construcciones de las estructuras en Teotihuacán (*Calzada de los Muertos, Tetitla y Atetelco*), se encontraron grandes cantidades de cerámica perteneciente a los coyotlatelcos (Bernal 1936; Armillas 1950), por lo cual, esta cultura, no solo realizaron un saqueo sistemático de la ciudad también se quedaron después del abandono por parte de los teotihuacanos.

De las exploraciones realizadas en el proyecto de Manzanilla en 1996, de las exploraciones en los túneles al este de la Pirámide del Sol mediante excavaciones atrás de la Pirámide del Sol se puede concluir que el pueblo coyotlatelco vivía en Teotihuacán alrededor del 600 d.C, se encontró evidencia de que enterraban a sus muertos en los túneles, además de restos de cerámica. También hay evidencia de que esta cultura vivía en algunos de los complejos residenciales de la zona. Los coyotlatelcos, si bien, se asentaron en Teotihuacán, no hay evidencia que respalde que hubo construcciones o rituales por esta cultura, los estudios parecen demostrar que solo se asentaron un periodo y realizaron saqueos y desmantelaron estructuras teotihuacanas.

CAPITULO V. ZONA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

Zona de muestreo

En la zona arqueológica de Teotihuacán se tomaron siete muestras de mano (bloques o monolitos) provenientes de seis diferentes estructuras de la zona (Figura 16). Las muestras proceden de proyectos de conservación e investigación a cargo de Arqueóloga Verónica Ortega y Restauradora Gloria Torres en el marco de conservación integral del Edificio 1, Plaza de la Luna y el proyecto de conservación de pintura mural in situ y en acervos.

A continuación, se muestra un mapa donde se observa la distribución de las zonas de muestreos (Figura 17) y una imagen satelital de los puntos de extracción de muestras (Figura 18), así como una tabla de relación de cada una de las muestras recolectadas (Tabla III).



Figura 16. Zona arqueológica de Teotihuacán. Las estrellas de color verde representan los puntos de muestreo.



ZONA DE MUESTREO EN TEOTIHUACÁN



UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS

- Plaza de la Luna
 - 📍 T1
 - 📍 T2
- Cuarto de las Columnas
 - 📍 T3
- Conjunto Noroeste del Río San Juan
 - 📍 T4
- Complejo Calle de los Muertos
 - Edificios Superpuestos
 - 📍 T5-1
 - 📍 T5-2
- Plaza Oeste
 - 📍 T6

Autor: Karen Areola Romero

Figura 17. Mapa de ubicación de las muestras recolectadas



Figura 18. Imagen satelital de la ubicación de las diferentes zonas de estudio

Tabla III. Relación de las muestras recolectadas

Estructura	Muestra	Coordenadas	
Plaza de la Luna	T1, T2	19°41'52.40"N	98°50'36.71"O
Cuarto de la Columnas	T3	19°41'49.14"N	98°50'54.30"O
Conjunto noroeste del Río San Juan	T4	19°41'13.51"N	98°50'54.30"O
Conjunto de Edificios Superpuestos	T5-1, T5-2	19°41'10.61"N	98°50'54.37"O
Plaza Oeste	T6	19°41'17.60"N	98°50'53.01"O

De la *Plaza de la Luna* se tomaron las muestras **T1**: del edificio 9, al lado sur en el marco inferior del tablero (Figura 19A) y **T2**: del edificio 10, al lado norte en el marco inferior del tablero (Figura 19B). La muestra **T3** (Figura 19C) pertenece al *Cuarto de las Columnas* de la estructura 28 del mapa de Millon en el sector N4E1 (Millon et. al 1973). En el *conjunto noroeste del Río San Juan*, de la plataforma oeste del patio central en la moldura interior del primer cuerpo del lado norte fue extraída la muestra **T4** (Figura 19D).

Del *Complejo Calle de los Muertos*, se tomaron muestras de los *Edificios Superpuestos* y la *Plaza Oeste*. En el *Conjunto de Edificios Superpuestos*, ubicado en el sector N2W1 del mapa de Millon, en los cuartos al sur de la plataforma F se tomaron las muestras **T5-1** y **T5-2** (Figura 19E). Por último, la muestra **T6** se extrajo de la *Plaza Oeste*, siendo una muestra de piso de la esquina sureste de la Habitación 14 (Figura 19F).

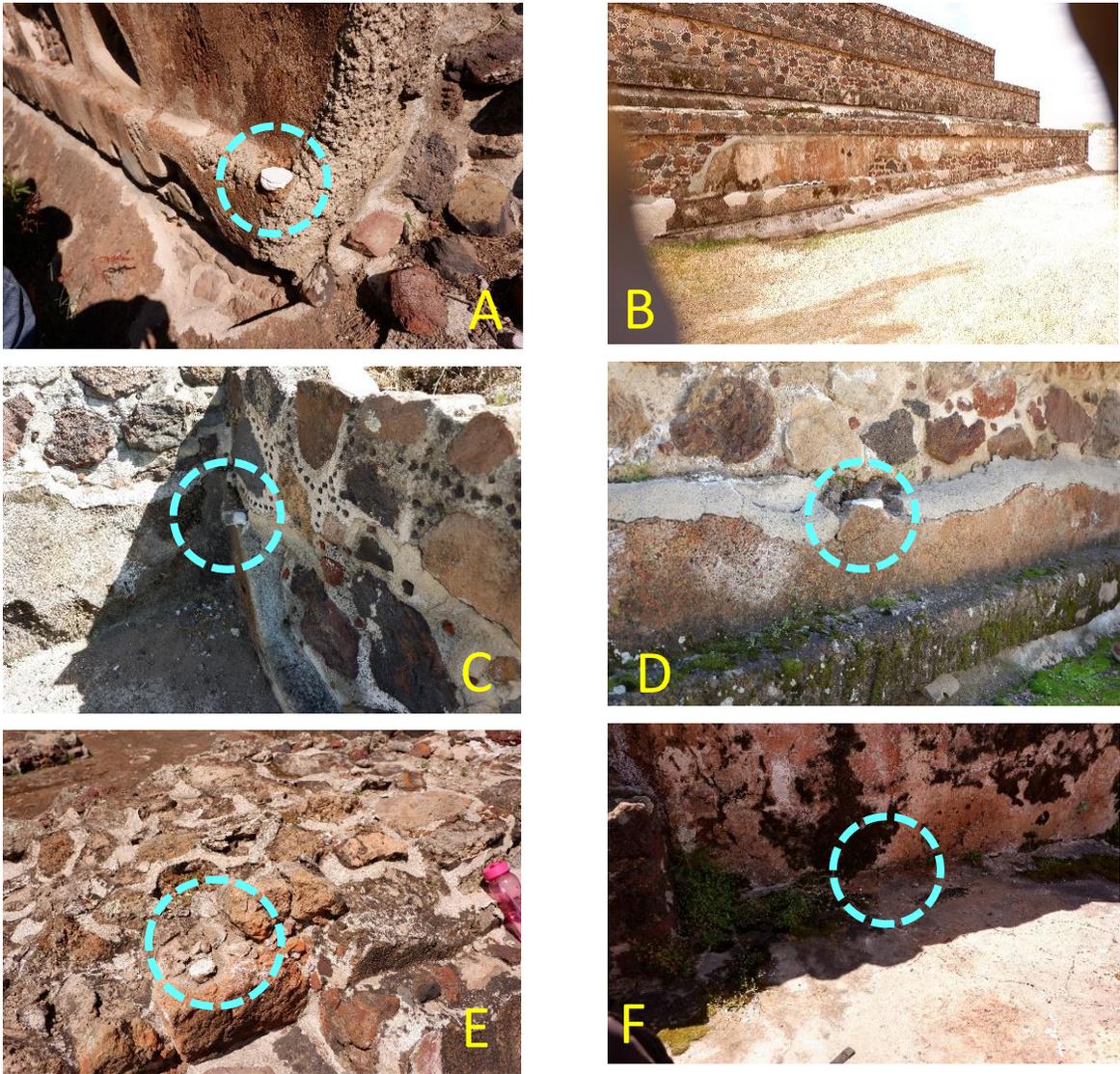


Figura 19. Fotografías de las muestras in situ. De la Plaza de la Luna A) Muestra T1; B) Muestra T2; Del Cuarto de las Columnas C) Muestra T3; Del Conjunto noroeste del Río San Juan D) Muestra T4; Del Conjunto de Edificios Superpuestos E) Muestra T5-1 y T5-2 y De la Plaza Oeste F) Muestra T6

Toma de muestras

Para tomar una muestra de un piso quemado, en el área que se desea estudiar, se coloca un poco de yeso, con la finalidad de nivelar la muestra y poder orientarla haciendo uso de una brújula tipo Brunton, posteriormente con la ayuda de un marcador permanente se traza una línea recta orientada al norte magnético y con una regla se trazan líneas paralelas a la línea central. En paralelo, se toma el azimut de la sombra de sol igualmente con la brújula magnética con la finalidad de corregir la declinación local. Para finalizar las muestras se extraen con ayuda de un martillo y cincel, para ser embalsadas en papel burbuja y cinta adhesiva y cuidadosamente colocadas en bolsas de polipropileno debidamente rotulada, para después ser trasladada al laboratorio.

Análisis de laboratorio

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

Después de traer las muestras de campo, en el laboratorio, fueron encapsuladas en yeso en bloques cuadrados conservando a orientación marcado en campo y se dejaron secar al sol. Al secarse los bloques de yeso se procedió a cortar en cubos de 2 cm, para posteriormente colocarlos en cubos de acrílico rellanados con algodón (para evitar que la muestra se rompa en los experimentos), con los cubos terminados se empezó con los análisis de laboratorio (Figura 20). De este procedimiento se obtuvieron 56 especímenes, 8 especímenes de cada muestra.

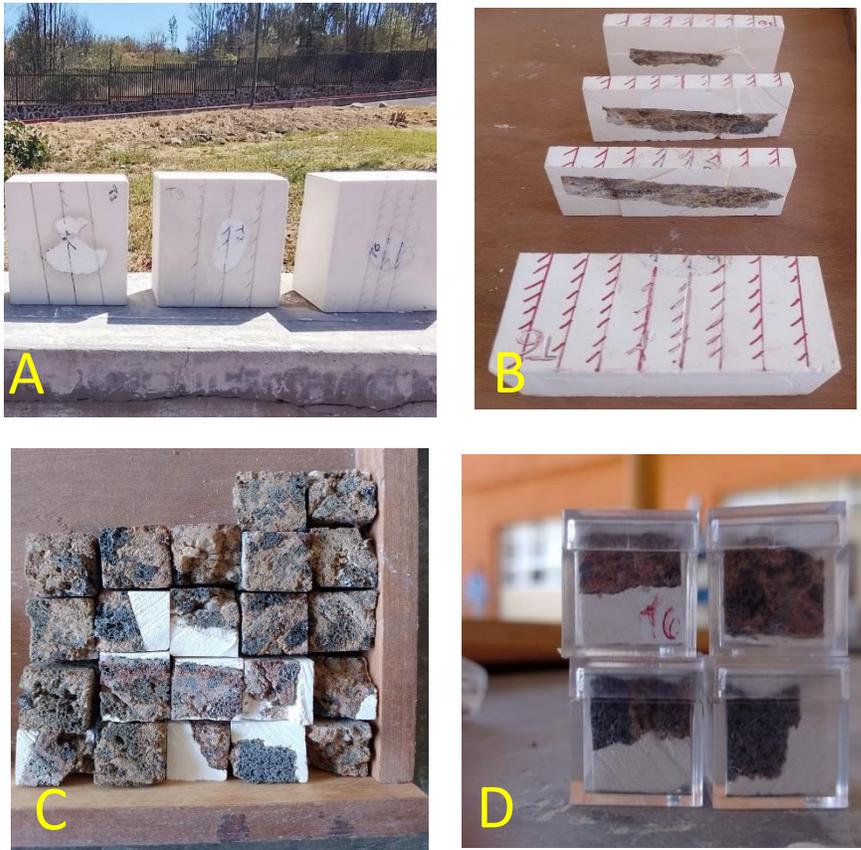


Figura 20. Muestras encapsuladas y cortadas en el laboratorio. A) Bloques de yeso secándose en el sol; B) Bloque cortado para obtener especímenes; C) Especímenes cortados pertenecientes a la muestra T6; D) Especímenes de la muestra T6 encapsuladas en cubos de acrílico

El primer experimento realizado fue medir la magnetización remanente natural (NRM por sus siglas en inglés) usando un magnetómetro de giro AGICO JR6a en todos los especímenes (Figura 21A), posteriormente los 56 especímenes se desmagnetizaron casi por completo utilizando campos alternos de hasta 100 mT utilizando un desmagnetizador LDA5 ((Figura 21B-C); el análisis de los datos de los tratamientos magnéticos se realizó con el software Remasoft, Chadima y Hroudá, 2006, por otro lado, el análisis de componentes principales (Kirschvink, 1980) se utilizó para calcular los componentes característicos (primarios) de las paleodirecciones.

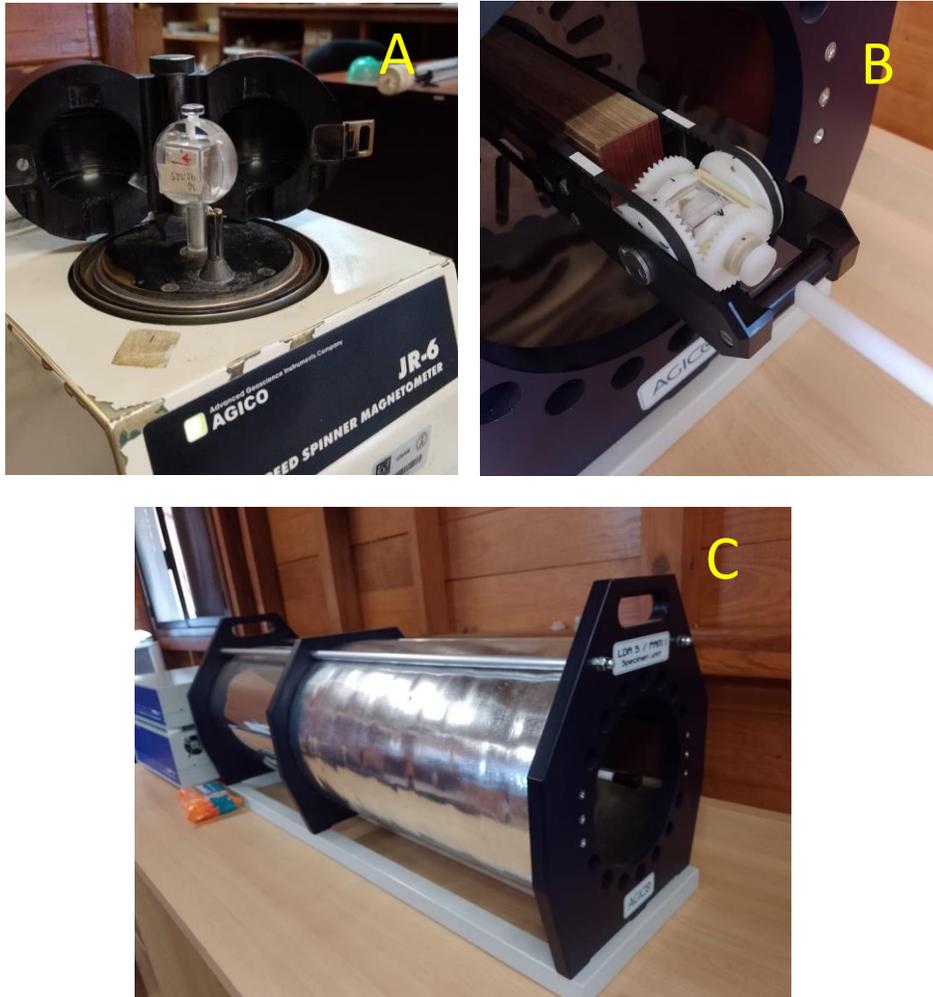


Figura 21. Experimentos de desmagnetización por campos alternos. A) la medición de la NRM usando el magnetómetro de giro AGICO JR6a; B) Muestra prepara para el experimento de desmagnetización; C) Desmagnetizador LDA5

Para el siguiente experimento se molió un espécimen por sitio de estudio, con la finalidad obtener alrededor de 1 gramo y realizar el experimento de curvas continuas de susceptibilidad vs temperatura (también conocidas como curvas k-T) y así estimar la mineralogía magnética de las muestras (Figura 22).

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 $H_{app}=300$ A/m. La velocidad de calentamiento y enfriamiento se mantuvo a 10° por minuto.



Figura 22. A la izquierda se observan las muestras seleccionadas para el experimento de curvas k-T; a la derecha es la muestra TEO-T1 molida.

En el experimento de paleointensidad se empleó el método de Thellier y Thellier (1959) modificado por Coe et al. (1978) sobre especímenes seleccionados que mostraban componentes paleomagnéticos uni-vectoriales sin sobreimpresiones secundarias y las curvas termomagnéticas continuas razonablemente reversibles y estables. Con las muestras seleccionadas, se fracturaron en seis fragmentos pequeños, con una dimensión de alrededor de 1 cm, y de esta manera hacer las pastillas de sal que se utilizarían posteriormente para el experimento (Figura 23). Se obtuvieron en total 42 pastillas de sal.



Figura 23. Pastillas de sal. En la imagen del lado izquierdo se muestran los fragmentos de cada muestra mientras que en la imagen del lado derecho se observan las 42 pastillas de sal que se hicieron

Se utilizó un horno de doble cámara ASC Scientific TD-48 equipado con bobinas, dicho experimento consistió en una secuencia de 12 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 y las muestras se dejaron a enfriar naturalmente. (Figura 24).



Figura 24. Paleointensidad. Pastillas de sal en el portamuestras, posteriormente se introducen al horno para realizar los experimentos de paleointensidad

Durante el experimento se realizaron cuatro calentamientos adicionales de chequeo (*pTRM Checks* por sus siglas en inglés) a temperaturas claves siempre inferiores a las temperaturas de desbloqueo, para observar el comportamiento de las muestras en el experimento.

Terminando el experimento de paleointensidad, se realizó experimento de corrección de anisotropía de remanencia en 31 muestras seleccionadas previamente los cuales dieron resultados positivos de paleointensidad. (Figura 25).



Figura 25. Muestras seleccionadas tratadas y calentadas para realizar el experimento de anisotropía

Por último, utilizando el modelo geomagnético SHA.DIF14K (Pavón-Carrasco 2014) a partir de las componentes direccionales y el valor de la paleointensidad promedio de las muestras estudiadas, se obtiene las edades registradas en las muestras.

CAPÍTULO VI. RESULTADOS

Mineralogía magnética

Las curvas termomagnéticas continuas de nuestras muestras solo las muestras TEO 1, TEO4 y TEO 5-2 mostraron un comportamiento reversible en comparación con las muestras restantes, para la muestra TEO 5-1 no se logró realizar el experimento con éxito probablemente por muy débil valor de la susceptibilidad inicial. En las gráficas la línea roja corresponde al calentamiento, mientras que la línea azul corresponde al enfriamiento.

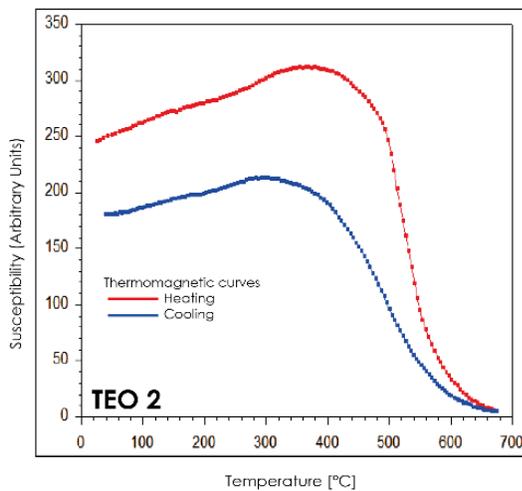
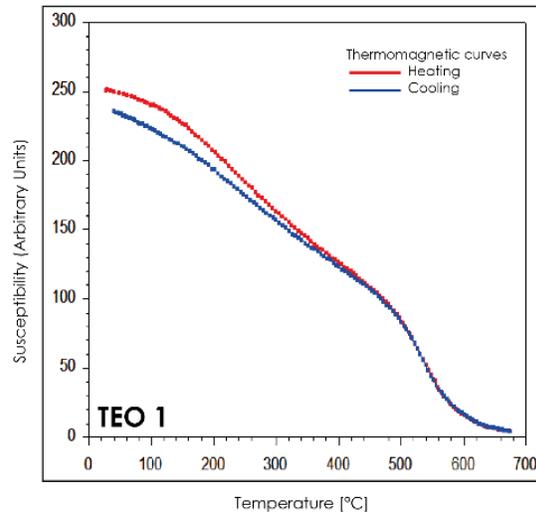
A continuación, se describirá el comportamiento de las curvas obtenidas durante el experimento y su mineralogía magnética, así como también, se presenta una tabla con las temperaturas de calentamiento y enfriamiento encontradas en las gráficas.

Tabla IV. Temperaturas de Curie obtenidas

Muestra	Tc calentamiento [°C]	Tc enfriamiento [°C]
TEO 1	554	544
	650	650
TEO 2	595	530
TEO 3	226	585
	583	
TEO 4	152	156
	580	565
	663	663
TEO 5-2	180	150
	310	268
	586	560
	652	645
TEO 6	441	445
	597	590

La muestra TEO 1 tiene un comportamiento reversible, por la curva obtenida el mineral en esta muestra corresponde a titanomagnetita pobre en Ti. Además de tener otra fase mineral entre 600 y 700 °C que podría corresponder a presencia de

Figura 26. curvas termomagnéticas continuas de TEO 1



En la muestra TEO 2 se encuentra presencia de titanomagnetitas rica en Ti, pero no es una curva completamente reversible, debido a que los valores de susceptibilidad en la curva de enfriamiento no alcanzan a la curva de calentamiento. (Figura 27)

Figura 27. curvas termomagnéticas continuas de TEO 2

La muestra TEO 3 también contiene titanomagnetitas rica en Ti, pero en la curva de calentamiento se encuentra otra fase mineral alrededor de los 100 y 200 °C por lo cual podría traerse de la presencia de goethita, la cual no aparece en la curva de enfriamiento. (Figura 28)

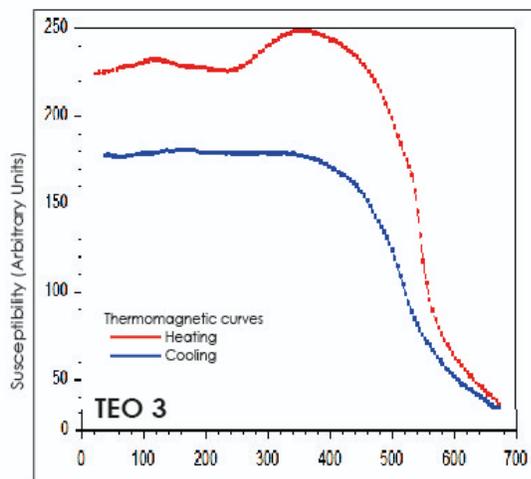
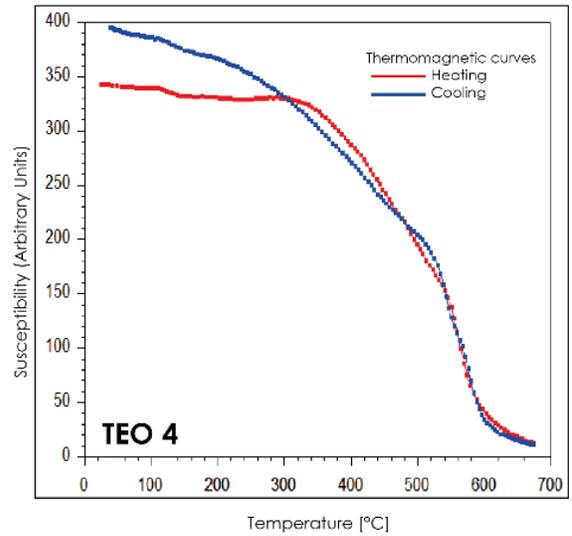


Figura 28 curvas termomagnéticas continuas de TEO 3

La curva de la muestra TEO 4 tiene contenido de titanomagnetita pobre en Ti, pero también se encuentran dos fases minerales, la primera entre 100 y 200 °C, la cual podría ser goethita, mientras que la segunda entre los 600 y 700 °C puede corresponder a hematita. (Figura 29)

Figura 29. curvas termomagnéticas continuas de TEO 4



En cuanto a la muestra TEO 5-2, su comportamiento es esencialmente reversible y el mineral presente es la titanomagnetita pobre en Ti, pero también hay presencia de otras tres fases minerales. (Figura 30)

La segunda entre 200 y 300 °C podría deberse miembros intermedios de titanomagnetita rica en Ti; y en la última fase entre 600 y 700 °C la hematita sería la responsable.

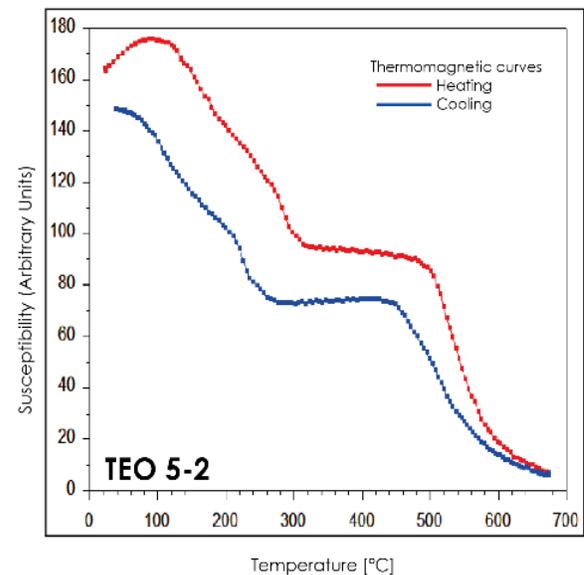


Figura 30. curvas termomagnéticas continuas de TEO 5-2

Por último, la muestra TEO 6 corresponde a presencia de titanomagnetita pobres en Ti, no tiene un comportamiento reversible y además hay otra fase mineral entre los 300 y 400 °C. (Figura 31)

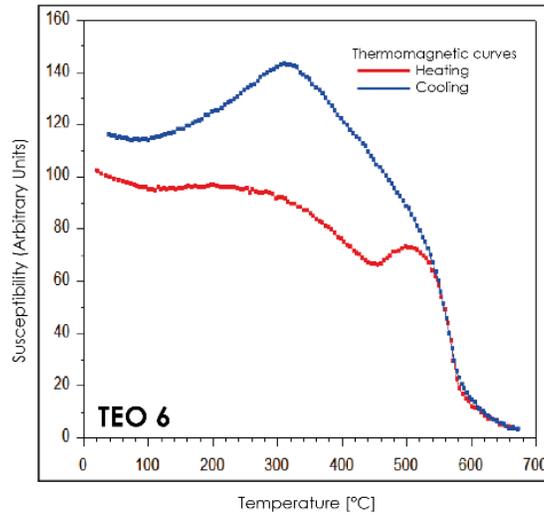
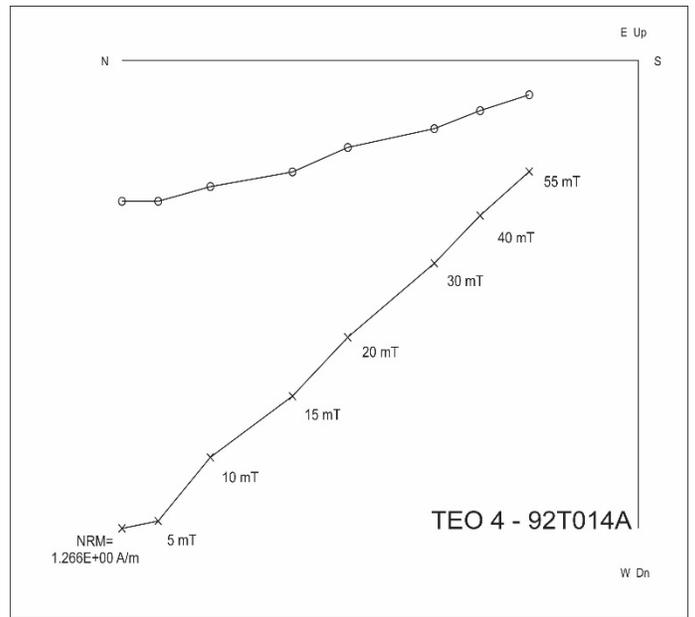
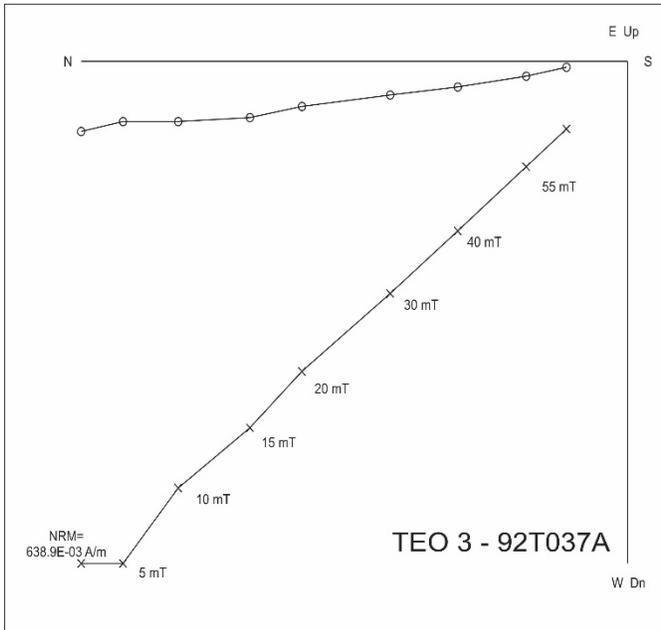
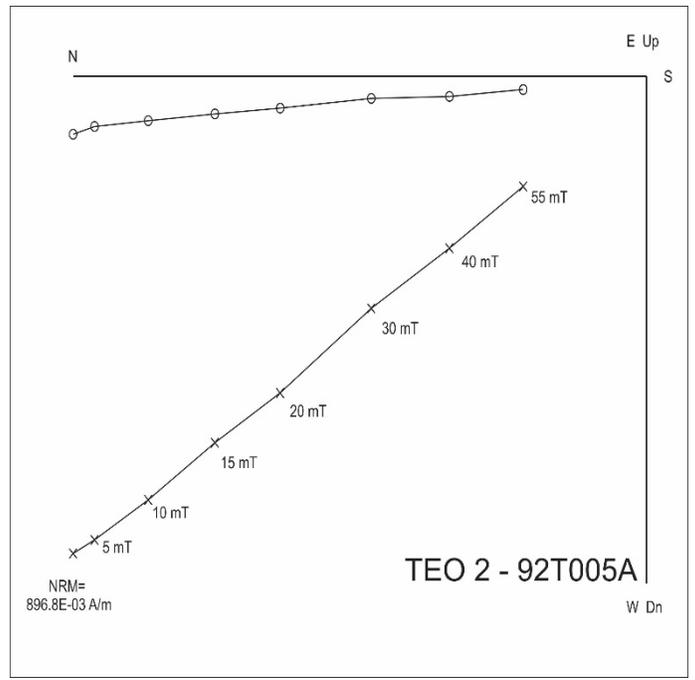
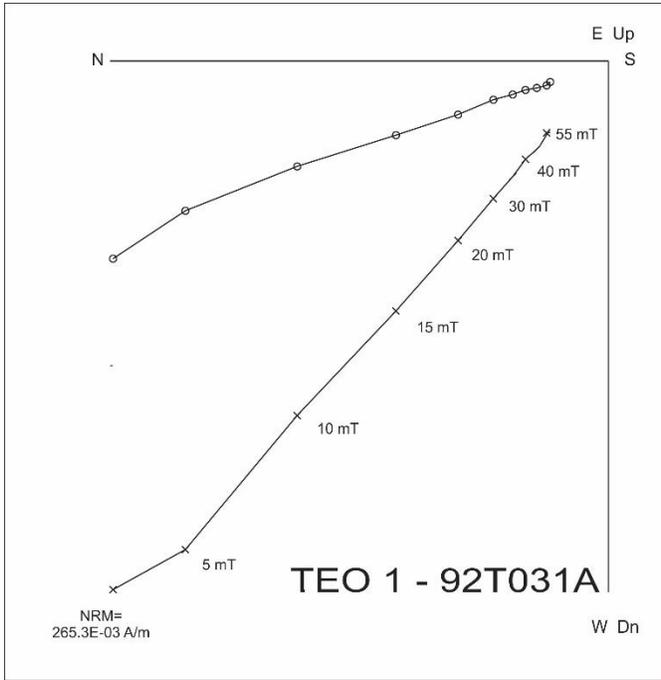


Figura 31. curvas termomagnéticas continuas de TEO 6

Desmagnetización por campos alternos

El proceso de desmagnetización de los 56 especímenes obtenidos muestra, en la mayoría de casos, un comportamiento que corresponde a un solo componente magnético, donde las magnetizaciones secundarias que eventualmente existían en las muestras (como por ejemplo la viscosidad magnética) se eliminan en los primeros pasos del tratamiento.

Las muestras se desmagnetizaron casi por completo entre los campos de 55 mT y 70 mT. En los gráficos ortogonales de Zijdeveld que se muestra a continuación se puede observar el proceso de desmagnetización realizado (Figura 32).



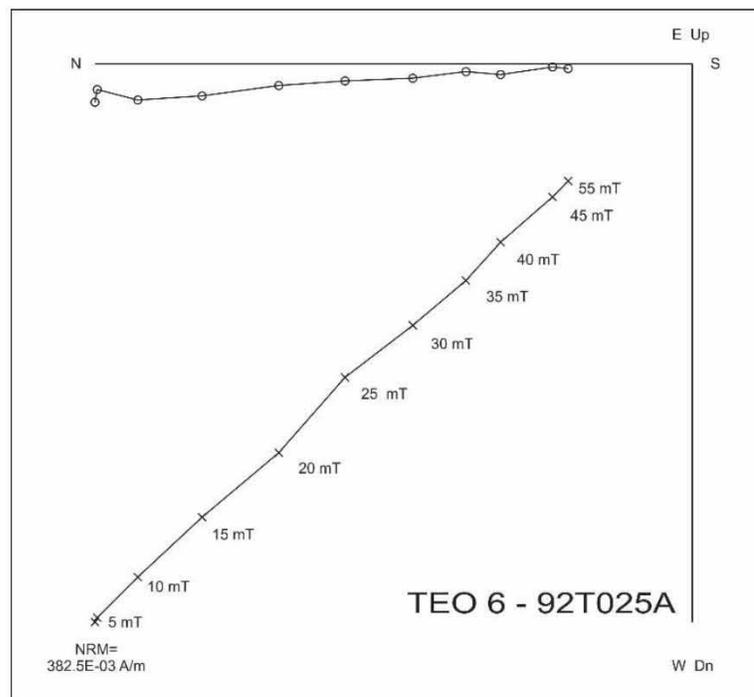
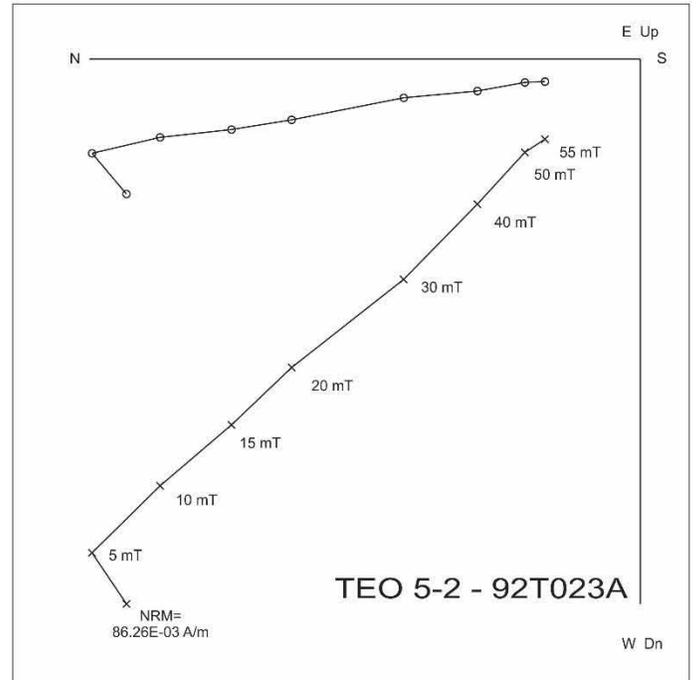
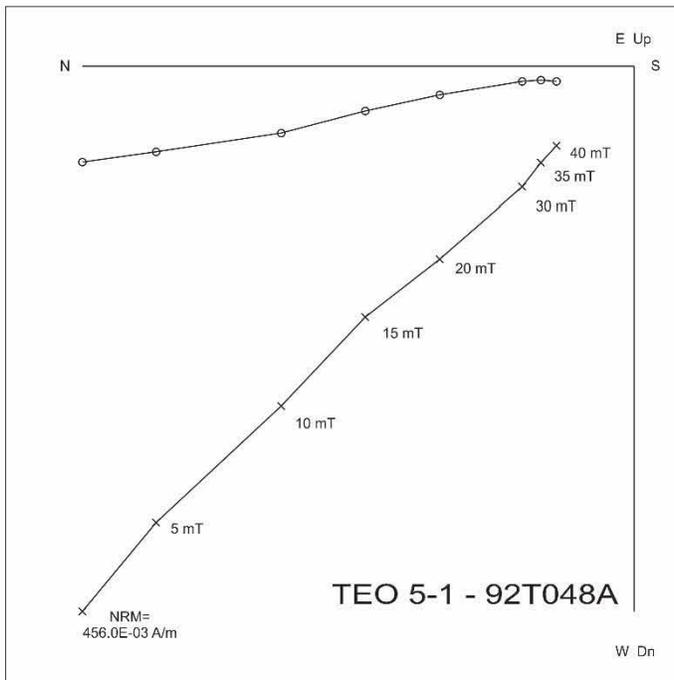
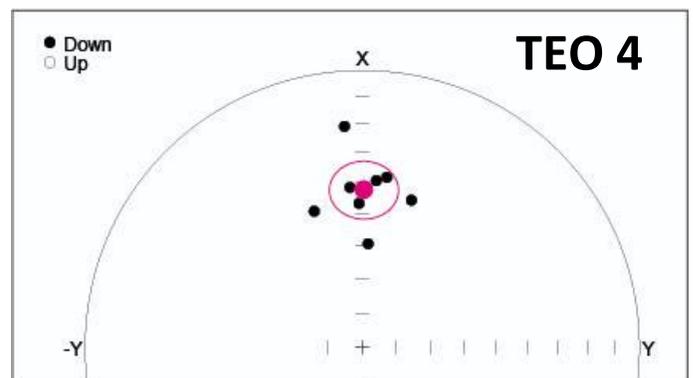
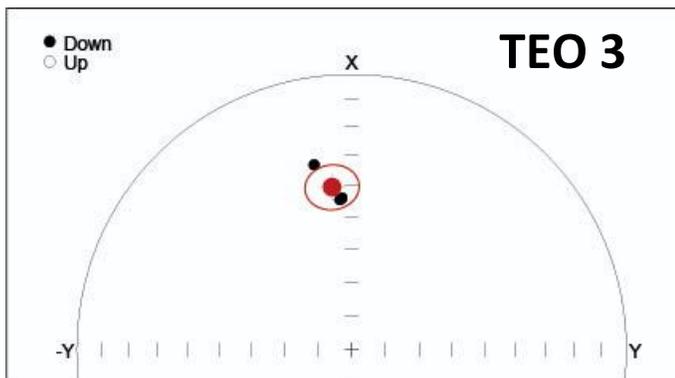
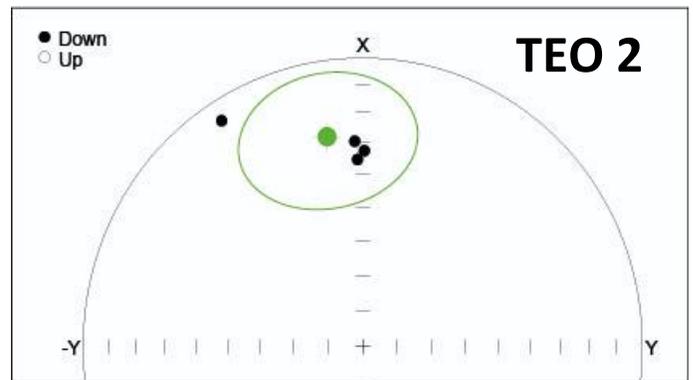
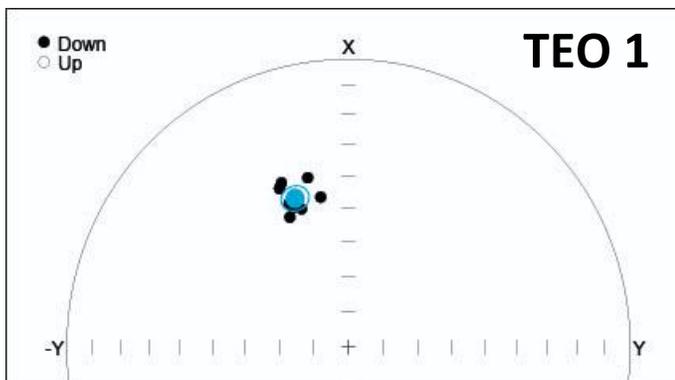


Figura 32. diagrama de Zijderveld representativos obtenidos durante los tratamientos de desmagnetización progresiva de campo alterno. La NRM indica el valor inicial de la magnetización en A/m y también se indica el valor del campo aplicado en cada paso en mT.

La paleodirecciones medias de los bloques se muestran en la tabla a continuación, también los estereogramas de las siete muestras recolectadas.

Tabla V. Paleodirecciones medias determinadas por estructura

Muestra	N	Declinación [°]	Inclinación [°]	α_{95} [°]	k
TEO 1	8	339.6	40.6	1.6	1853
TEO 2	4	358.8	32.5	4.9	640
TEO 3	4	353.1	40.1	7.3	4267
TEO 4	8	352.3	42.5	2.0	3583
TEO 5-1	8	346.3	45.4	0.8	5768
TEO 5-2	8	352.2	43.0	1.2	4880
TEO 6	8	357.5	43.1	0.6	7022



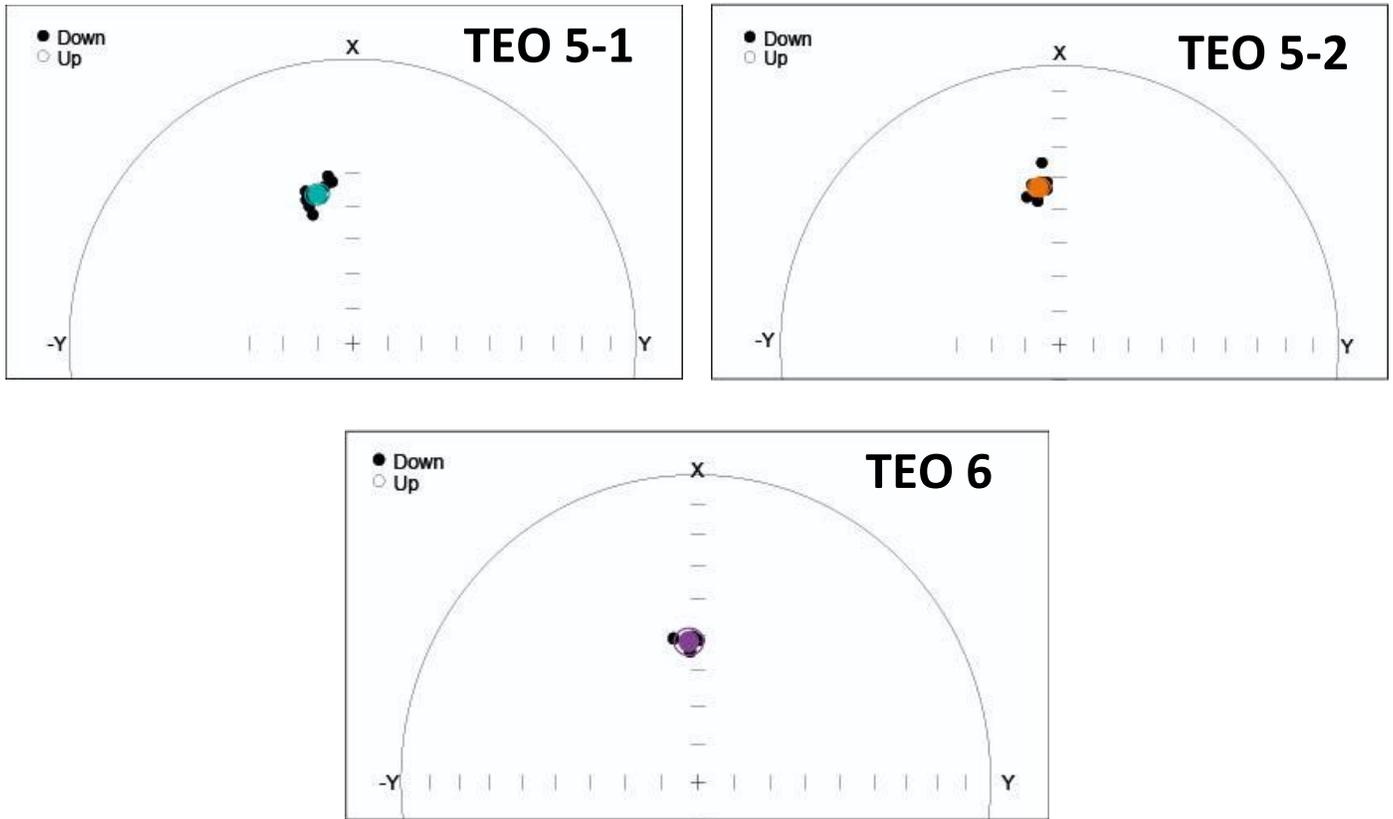


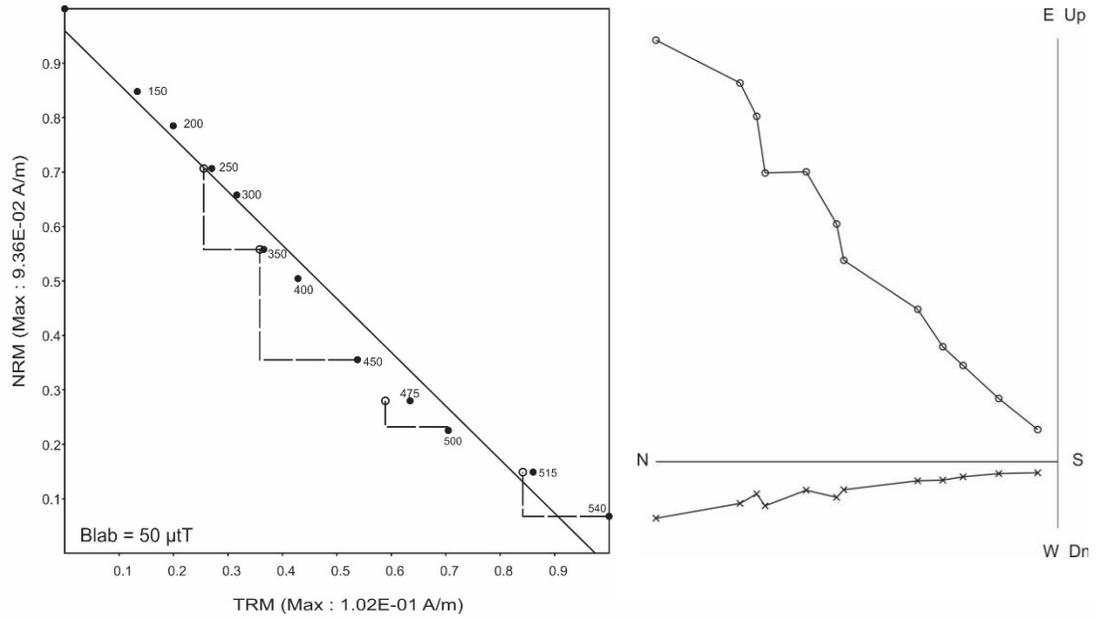
Figura 33. Esteriograma de iguales areas de las paleodirecciones pertenecientes a las muestras TEO1, TEO2, TEO3, TEO4, TEO5-1, TEO5-2, TEO6

Paleointensidades

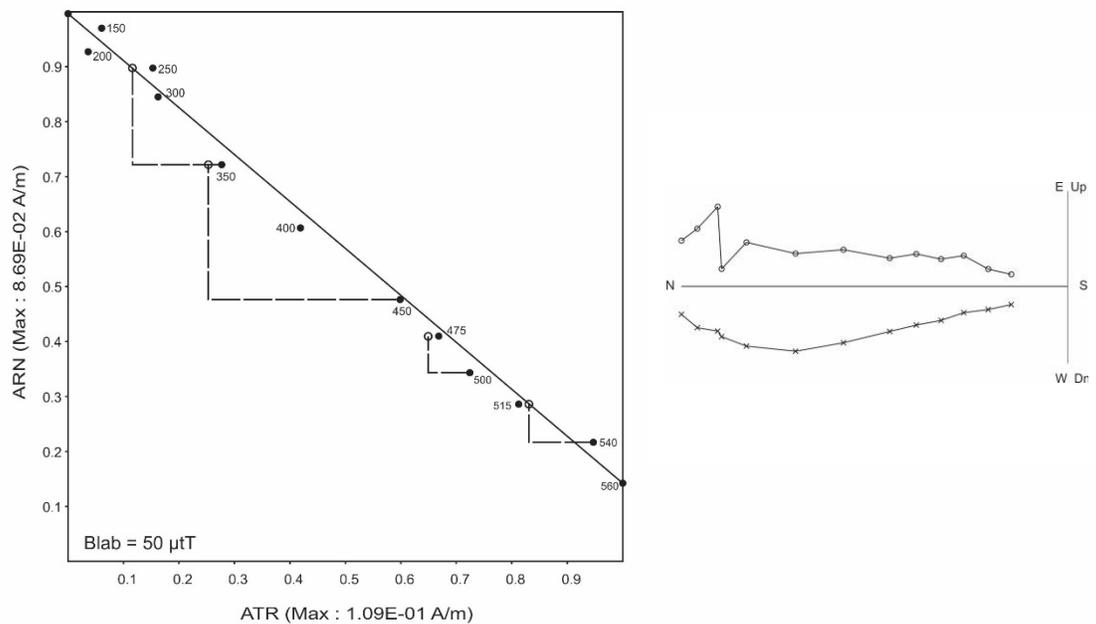
Después de revisar que las siete muestras de mano presentaron un único componente paleomagnético uni-vectorial, se realizaron los experimentos de Thellier de doble calentamiento modificado por Coe et al. (1967, 1978) en los 42 especímenes encapsulados en sal.

Aunque se analizaron todas las muestras individuales, las sólo 30 de ellas arrojaron determinaciones técnicamente aceptadas (Tabla VI). A continuación, se muestran ejemplos de diagramas de Arai y Zijdeveld de los especímenes aceptados (figura 34); mientras que las figuras (35) se muestran ejemplos de los especímenes rechazados.

TEO 3 - 92T014A



TEO 4 - 92T023A



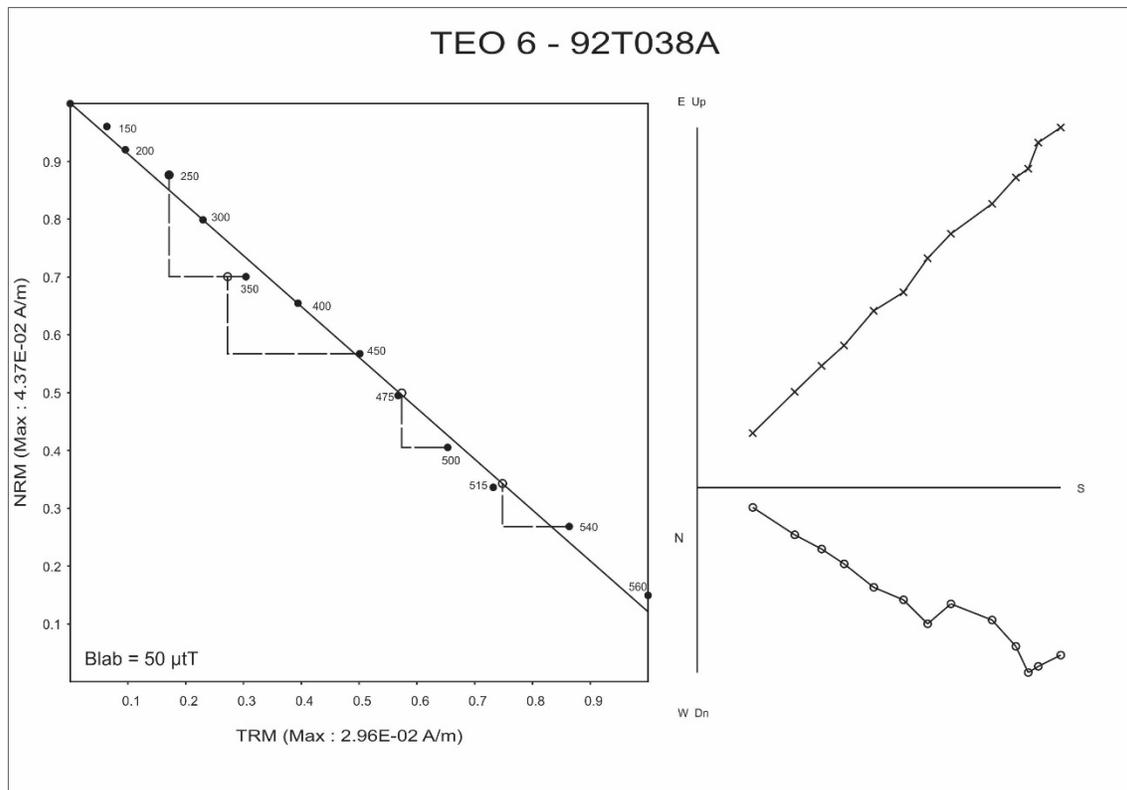
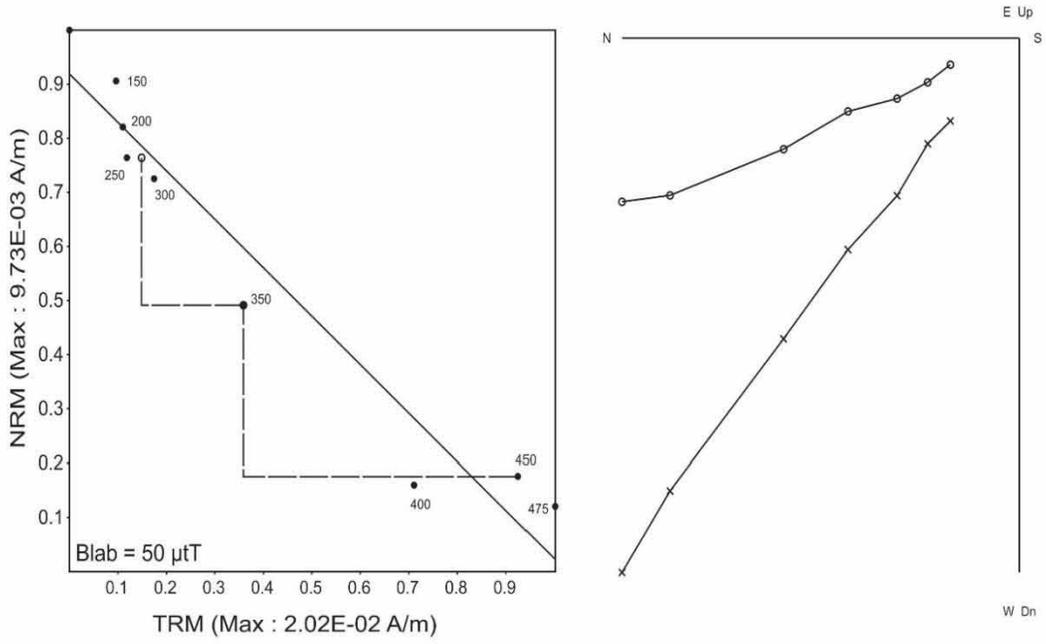
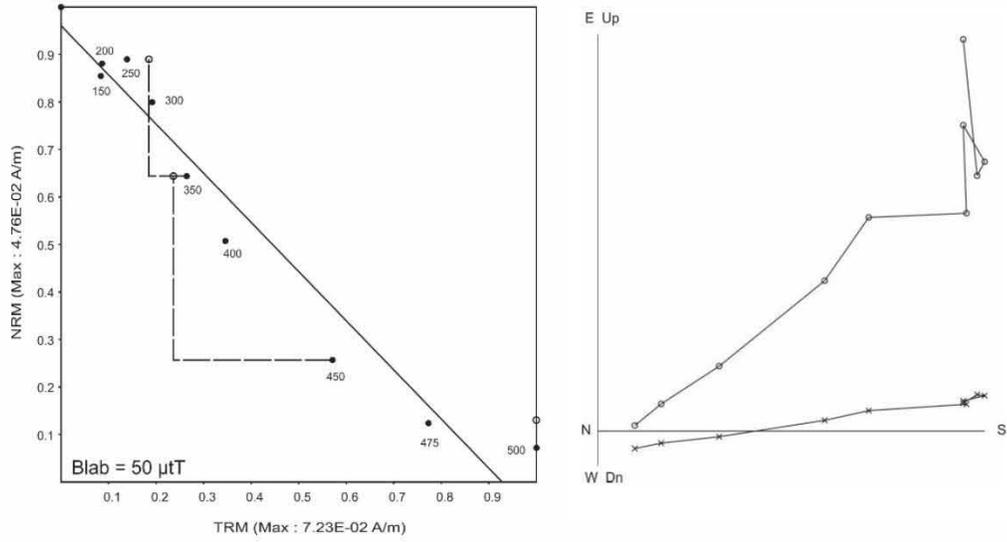


Figura 34. Especímenes 14, 23 y 38 aprobados después del experimento de paleointensidad.

TEO 1 - 92T004A



TEO 2 - 92T009A



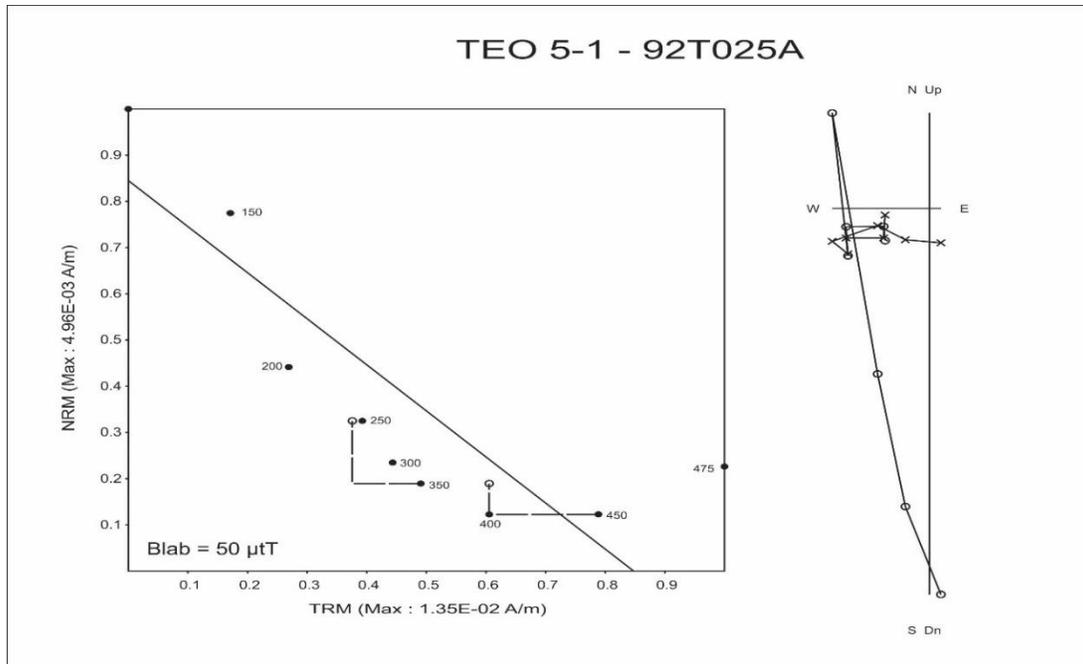


Figura 35. Especímenes 4, 9 y 25 rechazados después de realizar el experimento de paleointensidad.

Los parámetros de calidad de Coe (1978); f varía entre 0.42 a 0.98; g tiene valores entre 0.70 y 0.91; q tiene un rango entre 2.22 a 42.2; por último, los 42 especímenes tienen paleointensidades individuales que varían entre 14.32 a 65 μT (Tabla VI).

Todos los especímenes se revisaron individualmente y se rechazaron 12 especímenes (en rojo en la tabla) debido a que no cumplían con los parámetros de calidad y no se observaba una simetría después de realizar el experimento de Thellier-Thellier modificado por Coe 1967. Por otro lado, los especímenes en color azul se marcaron debido a que sus paleointensidades variaban respecto al resto de especímenes del bloque, pero no mostraban un comportamiento por el cual debían ser rechazadas.

También en la tabla se reportan los valores corregidos por anisotropía de las 31 muestras seleccionadas.

Tabla VI. Datos de paleointensidad de Thellier

	Sample	Tmin-Tmax [°C]	N	f	g	q	B ± σB [μT]	B ± σB Corregido [μT]
1	92T001A	150-400	7	0.72	0.81	16.03	38.37319 ± 1.08206	35.76080 ± 1.08206
	92T002A	150-515	11	0.75	0.89	23.67	39.80601 ± 1.44354	38.59665 ± 1.44354
	92T003A	150-560	13	0.75	0.87	15.32	39.62936 ± 1.69779	38.70174 ± 1.69779
	92T004A	150-400	8	0.87	0.71	10.98	30.47511 ± 1.72202	-
	92T005A	150-540	11	0.49	0.88	17.18	34.36674 ± 0.8655	32.52012 ± 0.8655
	92T006A	150-400	7	0.87	0.82	8.32	31.222 ± 2.66136	-
2	92T007A	150-560	14	0.96	0.74	5.22	37.31677 ± 5.67851	-
	92T008A	150-560	12	0.87	0.85	14.31	39.54894 ± 2.38151	36.59097 ± 2.38151
	92T009A	150-475	9	0.91	0.81	12.25	39.80886 ± 2.39054	-
	92T010A	150-450	10	0.50	0.86	5.03	21.5335 ± 1.86058	21.42618 ± 1.86058
	92T011A	150-400	12	0.94	0.87	15.04	42.13751 ± 2.30146	39.52387 ± 2.30146
	92T012A	300-515	7	0.42	0.72	2.22	33.14433 ± 4.4382	32.63410 ± 4.4382
3	92T013A	150-500	10	0.76	0.84	11.28	38.40667 ± 2.18438	34.59201 ± 2.18438
	92T014A	150-540	12	0.93	0.90	17.81	45.33199 ± 2.28195	43.03467 ± 2.28195
	92T015A	150-515	12	0.98	0.87	11.54	39.94832 ± 2.98078	36.23372 ± 2.98078
	92T016A	150-560	12	0.95	0.89	23.60	49.44359 ± 1.88637	47.12311 ± 1.88637
	92T017A	150-515	11	0.92	0.88	2.88	46.6136 ± 1.3136	42.76919 ± 1.3136
	92T018A	150-515	12	0.80	0.87	15.89	44.65736 ± 1.95926	35.89782 ± 1.95926
4	92T019A	150-560	14	0.55	0.88	10.96	18.49154 ± 0.85099	-
	92T020A	150-560	13	0.81	0.89	13.12	47.04806 ± 2.58458	44.84894 ± 2.58458
	92T021A	150-500	10	0.76	0.70	8.96	14.31513 ± 0.84898	12.38023 ± 0.84898
	92T022A	150-560	13	0.88	0.80	25.92	21.3756 ± 0.57745	21.19900 ± 0.57745
	92T023A	150-560	13	0.86	0.89	30.30	33.77473 ± 0.85578	29.98012 ± 0.85578
	92T024A	150-560	13	0.88	0.85	45.02	49.0648 ± 0.81346	48.90888 ± 0.81346
5-1	92T025A	150-350	6	0.83	0.75	7.36	31.98373 ± 2.70398	-
	92T026A	200-475	8	0.68	0.84	3.95	33.73714 ± 4.89494	-
	92T027A	200-400	5	0.91	0.73	14.22	33.13215 ± 11.55174	-
	92T028A	150-400	6	0.77	0.73	2.56	28.76811 ± 6.36466	-

	92T029A	150-450	8	1.17	0.82	4.90	32.58063 ± 6.34698	-
	92T030A	150-500	10	1.00	0.87	13.22	39.28685 ± 2.59367	39.27165 ± 2.59367

5-2	92T031A	150-560	13	0.88	0.84	10.12	41.46377 ± 3.02318	39.27165 ± 3.02318
	92T032A	150-500	11	0.94	0.87	43.10	44.41674 ± 0.85009	42.21333 ± 0.85009
	92T033A	150-540	12	0.96	0.85	23.70	45.69233 ± 1.56605	42.62257 ± 1.56605
	92T034A	150-540	12	0.92	0.84	18.69	43.56192 ± 1.81065	40.06781 ± 1.81065
	92T035A	150-500	11	0.91	0.87	38.28	42.03166 ± 0.86877	39.62358 ± 0.86877
	92T036A	150-540	12	0.84	0.81	16.59	39.84009 ± 1.63048	39.36225 ± 1.63048

6	92T037A	150-560	13	0.93	0.90	33.58	39.45427 ± 0.97583	38.56968 ± 0.97583
	92T038A	150-560	13	0.86	0.91	35.87	65.00217 ± 1.42215	64.73746 ± 1.42215
	92T039A	250-560	10	0.76	0.88	17.26	59.53248 ± 2.32889	53.11411 ± 2.32889
	92T040A	150-540	12	0.84	0.89	16.78	49.14013 ± 2.08536	47.26315 ± 2.08536
	92T041A	250-560	10	0.77	0.86	39.33	59.82493 ± 1.00308	58.68250 ± 1.00308
	92T042A	150-540	12	0.88	0.86	42.30	50.12930 ± 0.89717	49.05736 ± 0.89717

* Las muestras en rojo, fueron rechazadas porque no cumplieron con los parámetros de calidad y no sirvieron para los experimentos

** Las muestras en azul, son muestras que mostraron un comportamiento diferente respecto a su bloque, pero no mostraban características para ser rechazadas

Los promedios de las paleointensidades para los 6 bloques se muestran en la siguiente tabla (VII), del bloque TEO 5-1 se rechazaron sus seis especímenes por lo cual no se utilizaron esos datos, para el resto de los bloques se utilizó la paleointensidad corregida.

Tabla VII. Paleointensidades de las muestras recolectadas

Estructura	Muestra	n/N	Paleointensidad [μT]
Plaza de la Luna	TEO 1	4/6	36.39 \pm 1.02
	TEO2	4/6	32.54 \pm 2.41
Cuarto de la Columnas	TEO 3	6/6	39.94 \pm 20.6
Conjunto noroeste del Río San Juan	TEO4	5/6	31.46 \pm 1.14
Conjunto de Edificios Superpuestos	TEO 5-2	5/6	40.78 \pm 1.35
Plaza Oeste	TEO 6	6/6	51.90 \pm 1.45

CAPÍTULO VII. DATACIÓN ARQUEOMAGNÉTICA

Como se mencionó anteriormente, algunos materiales arqueológicos poseen un registro único del campo magnético, para este trabajo después de realizar los experimentos anteriores, se procedió a realizar la datación arqueomagnética y de esa manera obtener intervalos de tiempo para cada bloque de muestra, con el cual posteriormente se realizará la interpretación arqueológica.

La base del método arqueomagnético de datación, son las curvas de variación secular, las cuales funcionan como curvas de referencia y se establecen a partir de funciones matemáticas. Al comparar las características del campo magnético contenido en la muestra (declinación, inclinación e intensidad), con las curvas de variación secular de la región correspondiente, se pueden obtener los intervalos de edad más probables para cada parámetro magnético y al combinar los tres resultados se obtiene una datación arqueomagnética del 95% de confianza (Pavón-Carrasco et al., 2011).

Para realizar este ejercicio de datación se utilizó el modelo geomagnético SHA.DIF.14k (Pavón Carrasco et al., 2014) el cual es un modelo geomagnético global a partir de los análisis esféricos armónicos sobre la esfera, con los cuales es posible obtener las variaciones del campo magnético en cualquier punto de la Tierra, generando una curva de variación secular de referencia, la cual puede ser usada para la datación.

Con ayuda de la herramienta de Matlab y a partir de las componentes direccionales (declinación e inclinación) y los valores de las paleointensidades obtenidas en los experimentos de laboratorio, se procede a realizar una comparación con la curva de variación paleosecular (PSV) global para obtener los intervalos de edad más probables.

Después de realizar los experimentos de laboratorio y con los resultados obtenidos, incluyendo los datos corregidos por anisotropía, se realizó esta técnica de datación en los siete bloques de muestra que recolectamos, pero para bloque 5-1, al no resultar exitoso el experimento de paleointensidad, solo se realizó la datación con las componentes direccionales obtenidas.

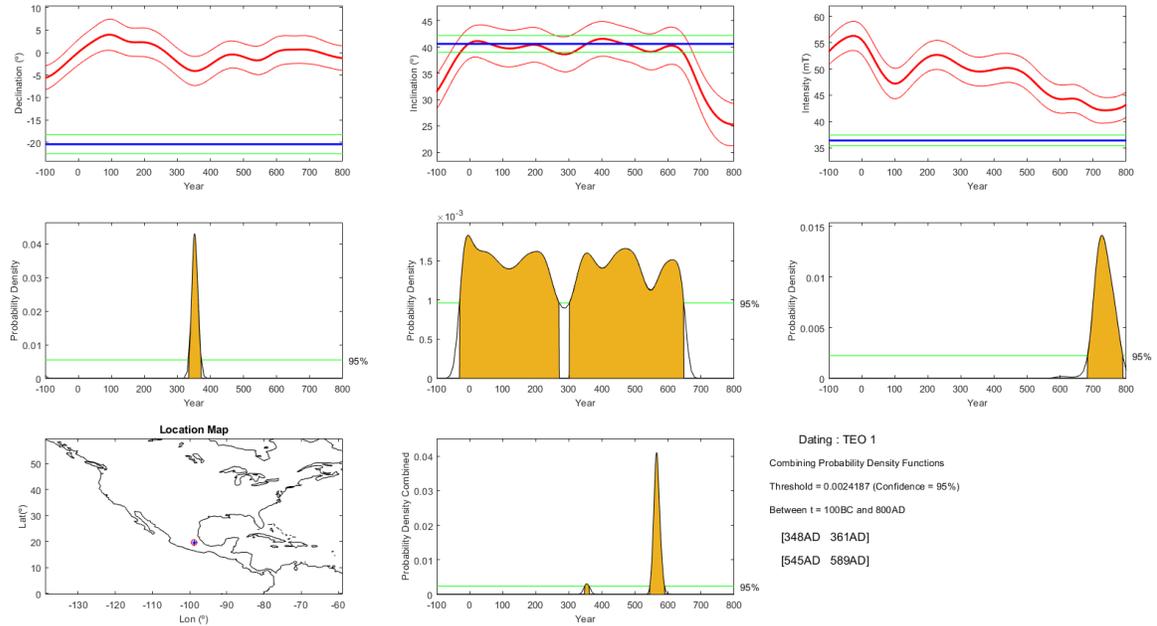
A continuación, se muestran los intervalos de edad más probables obtenidos de la datación arqueomagnética, se realizaron los experimentos para dos periodos: 1) 100 a.C al 800 d.C (Tabla VIII) y 2) 500 a.C al 1500 d.C (Tabla IX).

Periodo: 100 a.C al 800 d.C

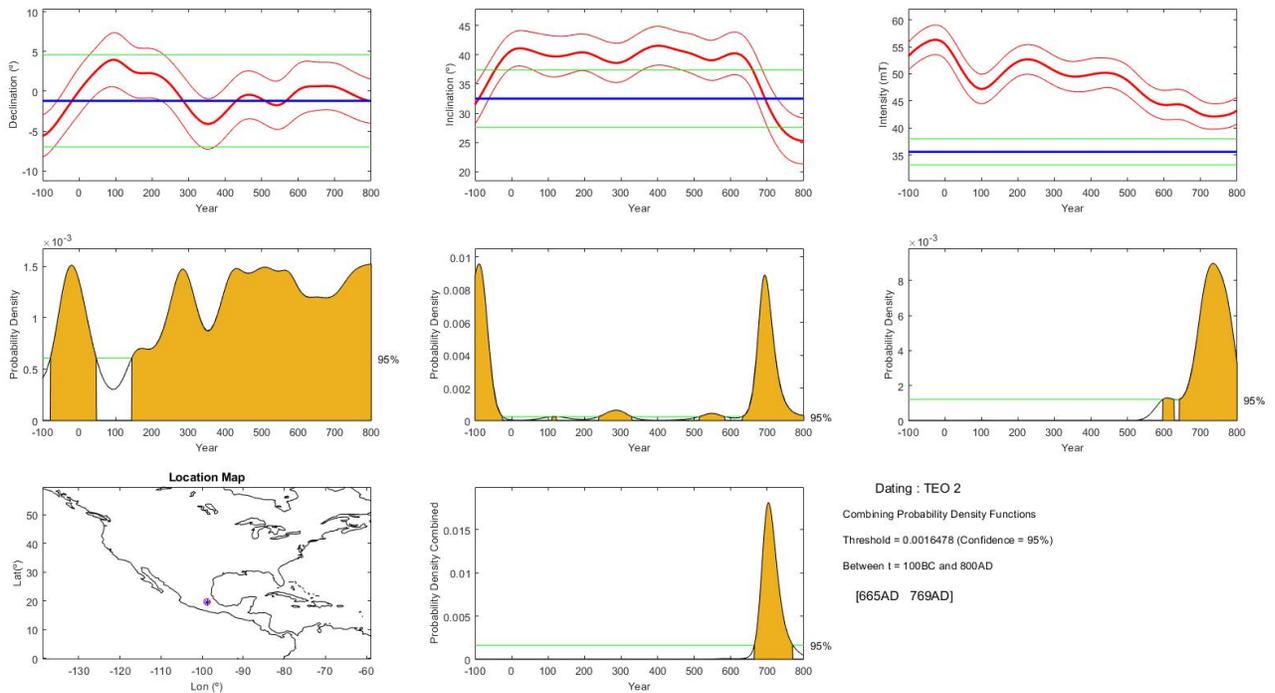
Tabla VIII. Intervalos de tiempo obtenidos por la técnica de datación arqueomagnética para el periodo de 100 a.C al 800 d.C

Periodo: 100 a.C al 800 d.C		
Estructura	Muestra	Intervalo de edad
Plaza de la Luna	TEO 1	348 – 361 d.C
		545 – 589 d.C
	TEO2	665 – 769 d.C
Cuarto de la Columnas	TEO 3	515 – 700 d.C
Conjunto noroeste del Río San Juan	TEO4	558– 627 d.C
Conjunto de Edificios Superpuestos	TEO 5-1	342 – 389 d.C
		342 – 309 d.C
	TEO 5-2	531 – 621 d.C
Plaza Oeste	TEO 6	371 – 438 d.C

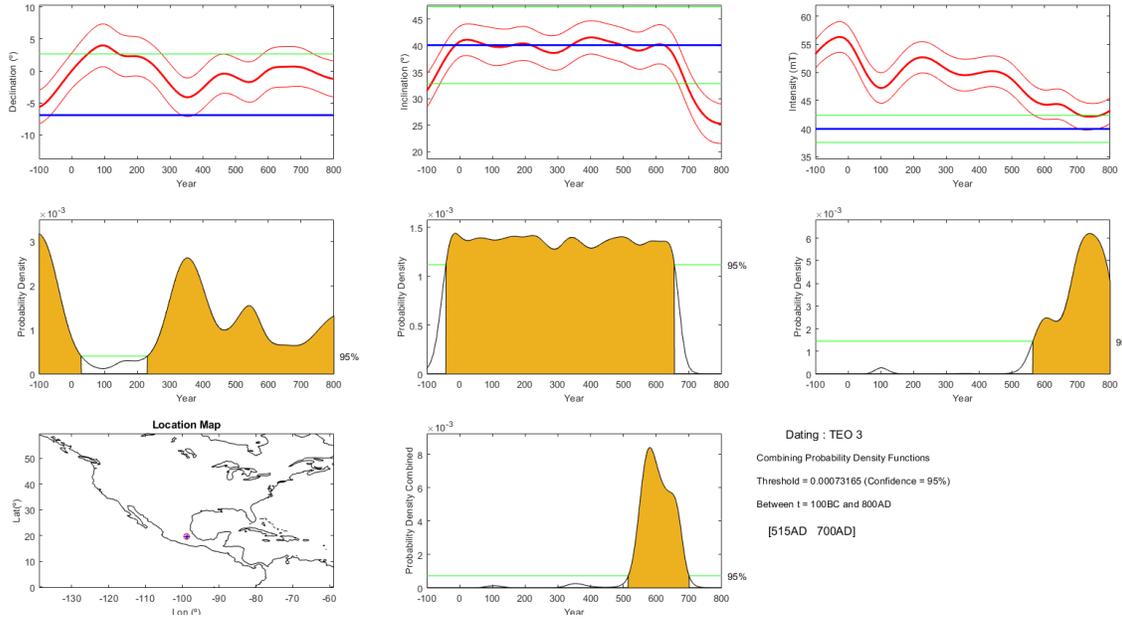
BLOQUE TEO 1 – PLAZA DE LA LUNA



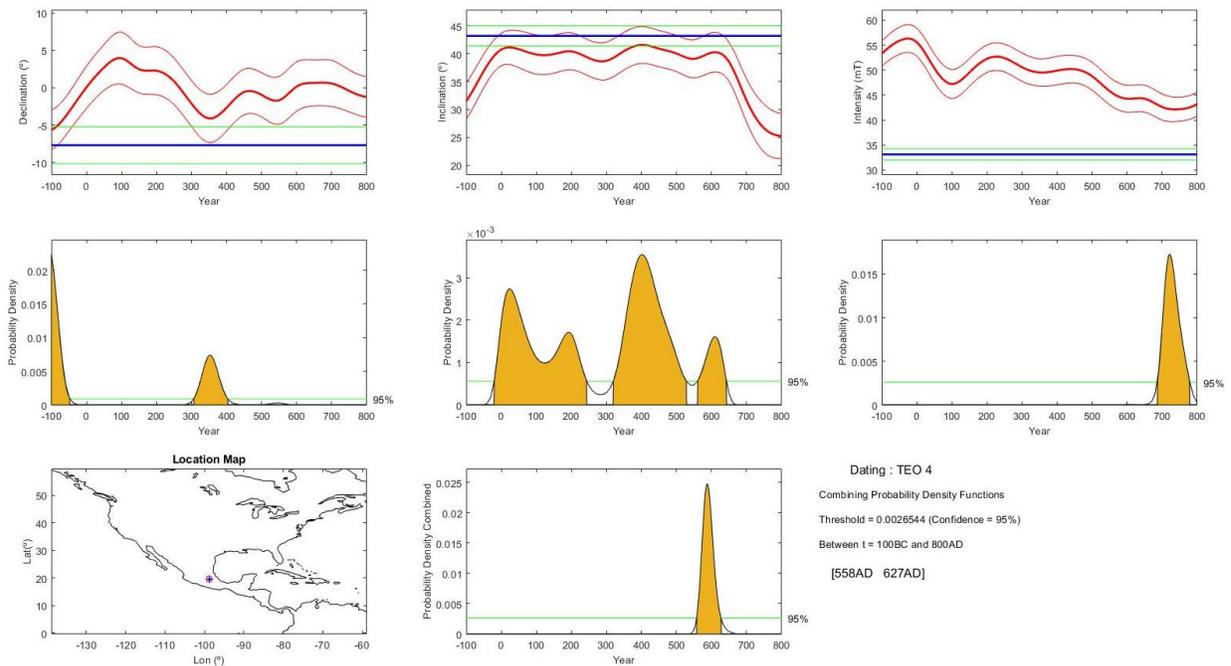
BLOQUE TEO 2 – PLAZA DE LA LUNA



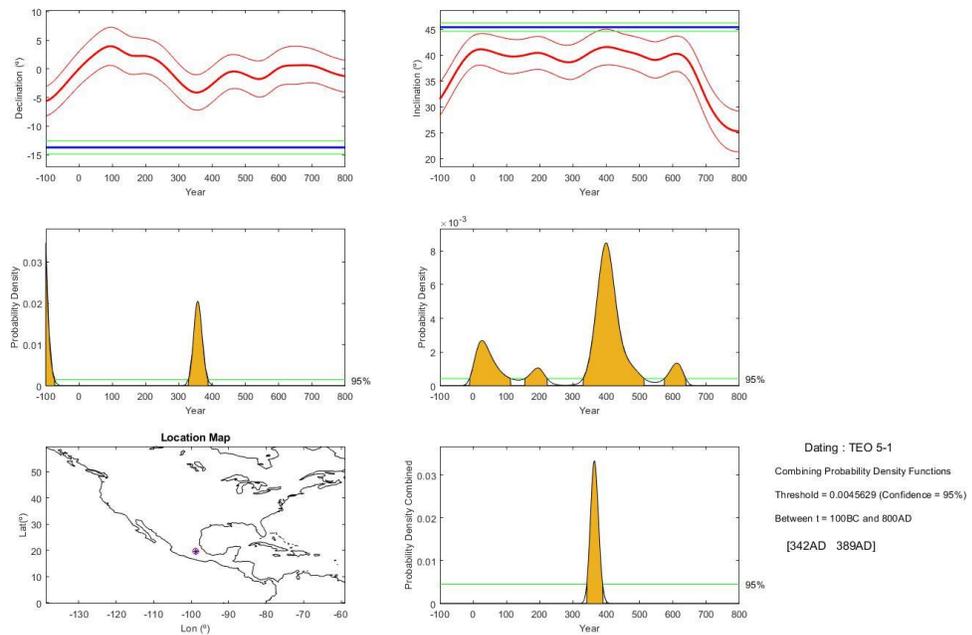
BLOQUE TEO 3 – CUARTO DE LA COLUMNAS



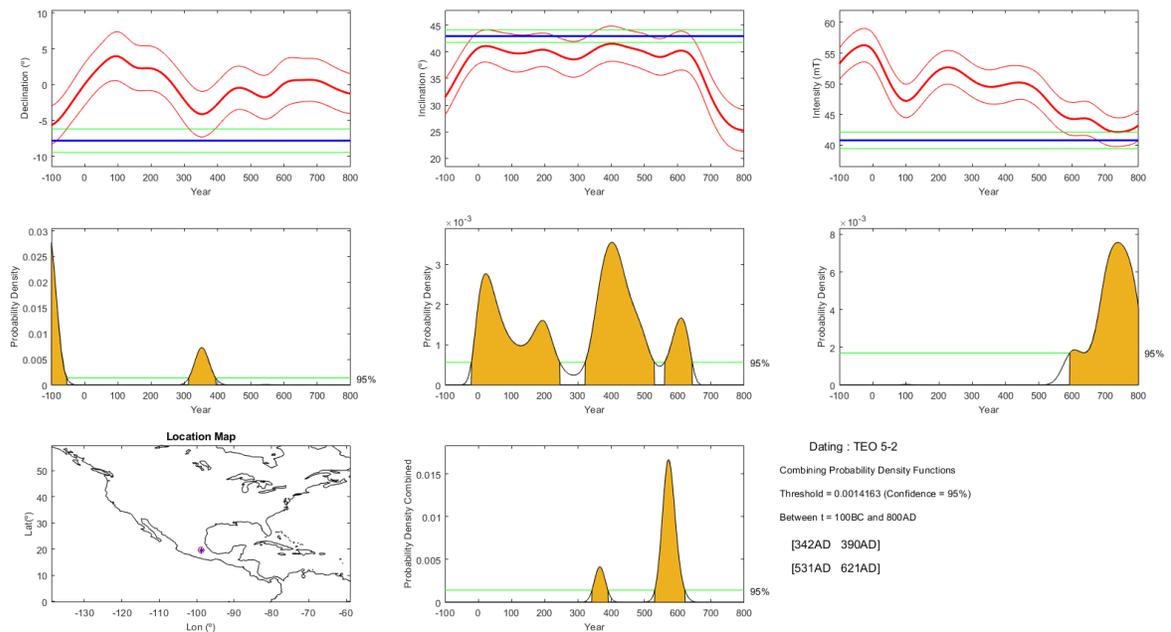
BLOQUE TEO 4 – CONJUNTO NOROESTE DEL RÍO SAN JUAN



BLOQUE TEO 5-1 – CONJUNTO DE EDIFICIOS SUPERPUESTOS



BLOQUE TEO 5-2 – CONJUNTO DE EDIFICIOS SUPERPUESTOS



BLOQUE TEO 6 – PLAZA OESTE

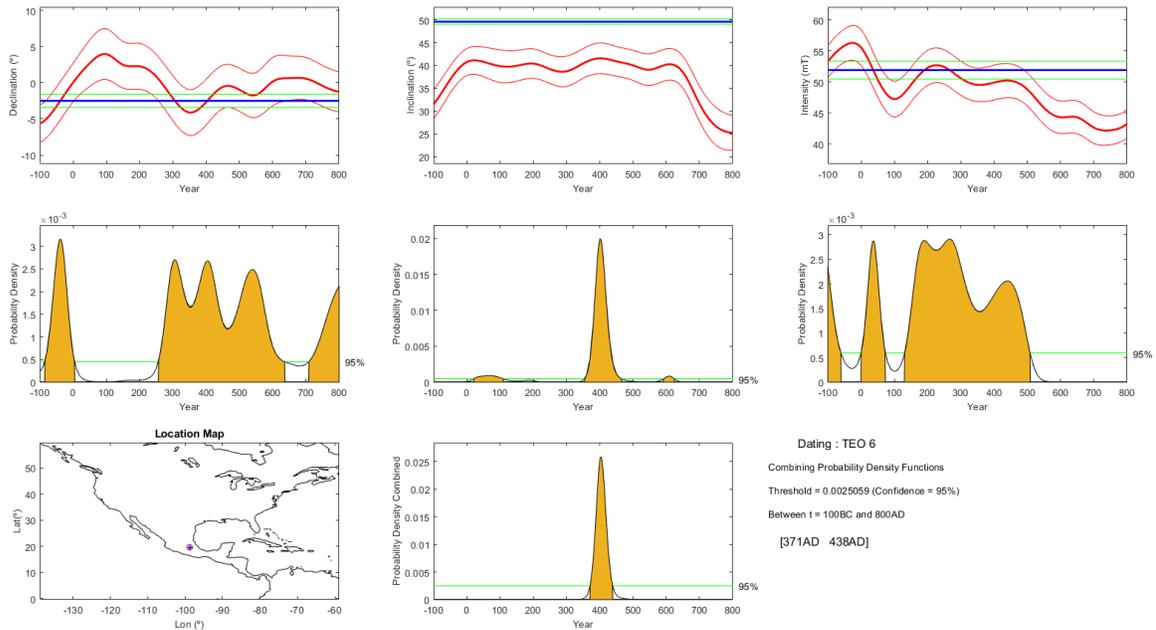


Figura 36. Datación arqueomagnética utilizando el modelo geomagnético global

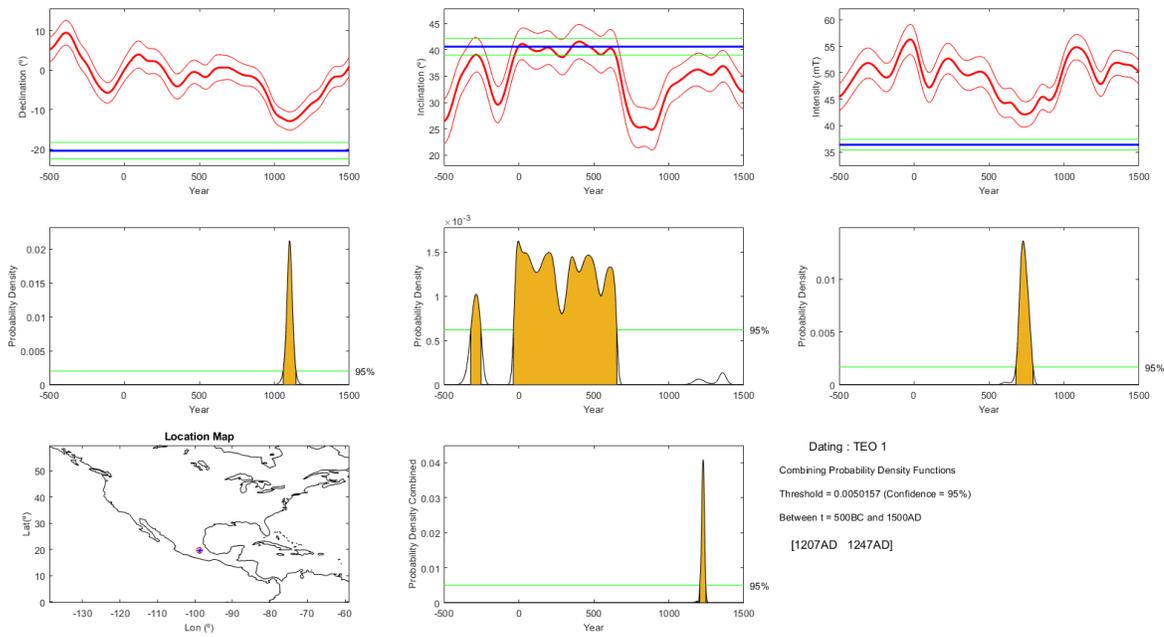
SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et. al 2011, 2014), en el periodo de 100 a.C al 800 d.C

Periodo: 500 a. C al 1500 d. C

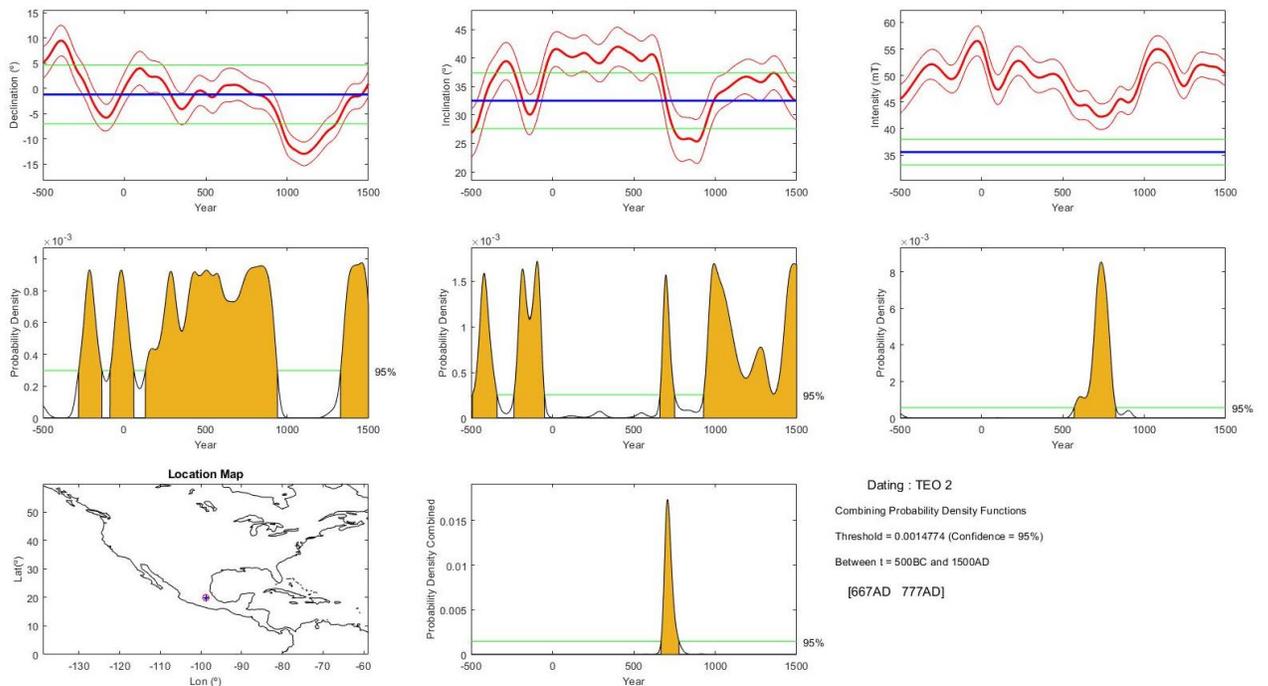
Tabla IX. Intervalos de tiempo obtenidos por la técnica de datación arqueomagnética para el periodo de 500 a.C al 1500 d.C

Periodo: 100 a.C al 800 d.C		
Estructura	Muestra	Intervalo de edad
Plaza de la Luna	TEO 1	1207 – 1247 d.C
	TEO2	667 – 777 d.C
Cuarto de la Columnas	TEO 3	504 – 711 d.C
		1223 – 1262 d.C
Conjunto noroeste del Río San Juan	TEO4	558 – 526 d.C
	TEO 5-1	342 – 389 d.C
Conjunto de Edificios Superpuestos	TEO 5-2	338 – 387 d.C
		530 – 628 d.C
Plaza Oeste	TEO 6	371 – 449 d.C

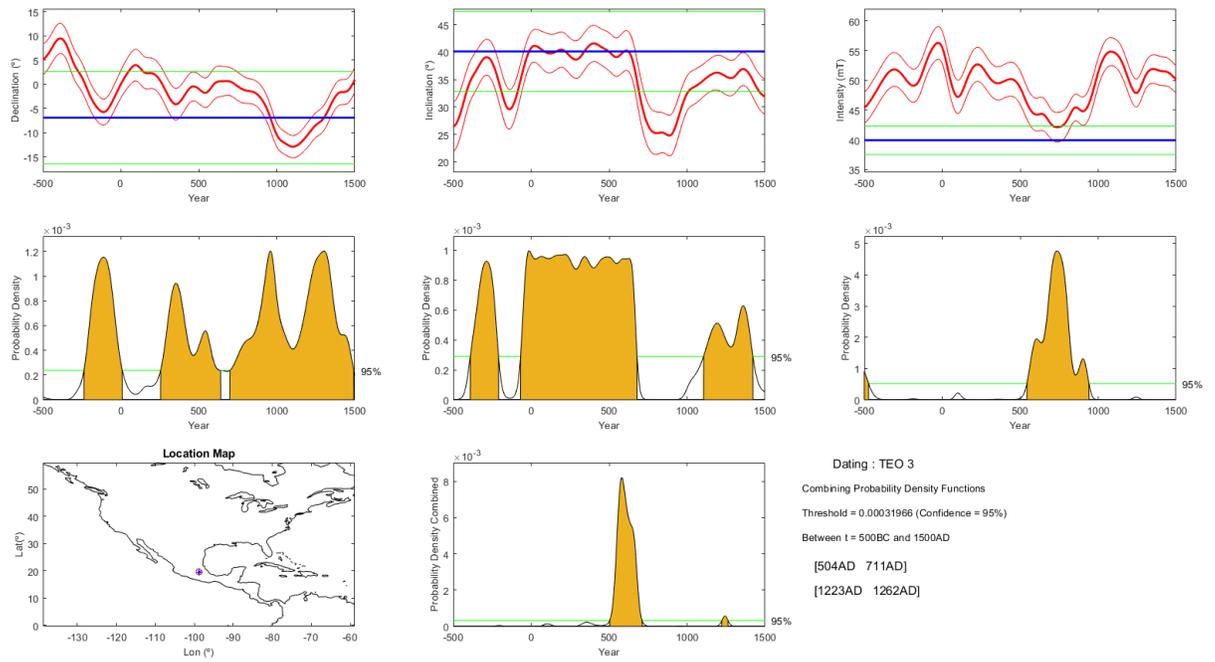
BLOQUE TEO 1 – PLAZA DE LA LUNA



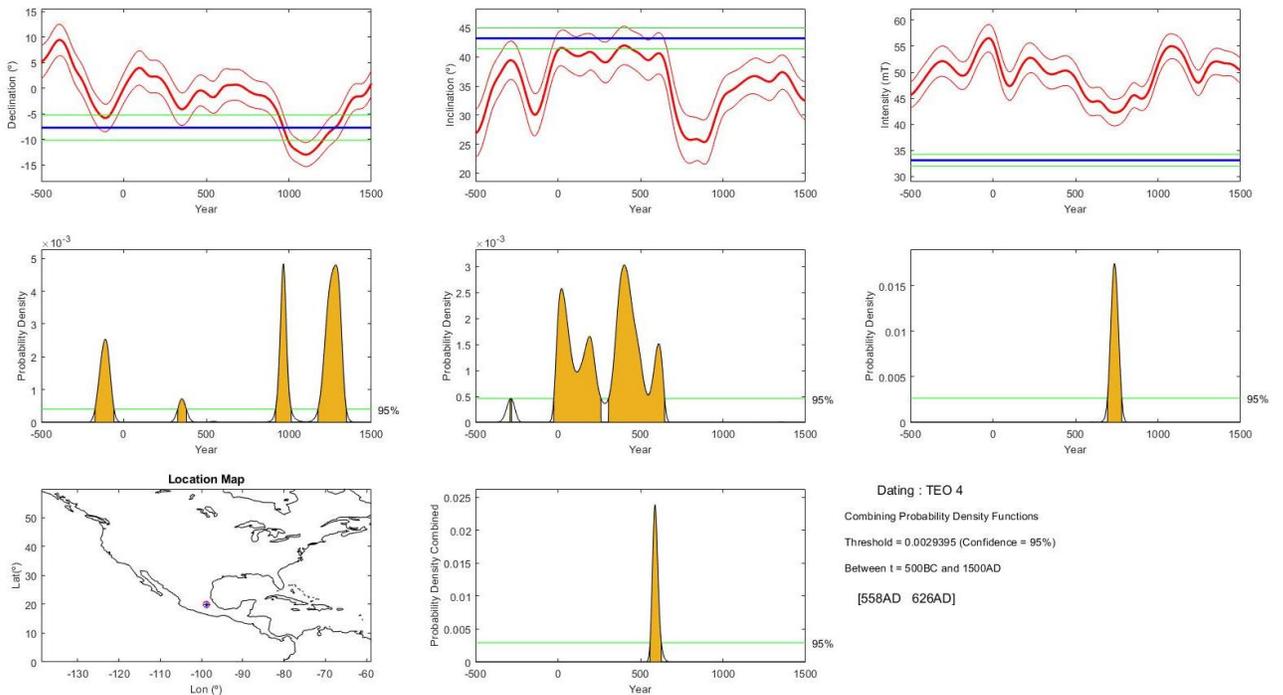
BLOQUE TEO 2 – PLAZA DE LA LUNA



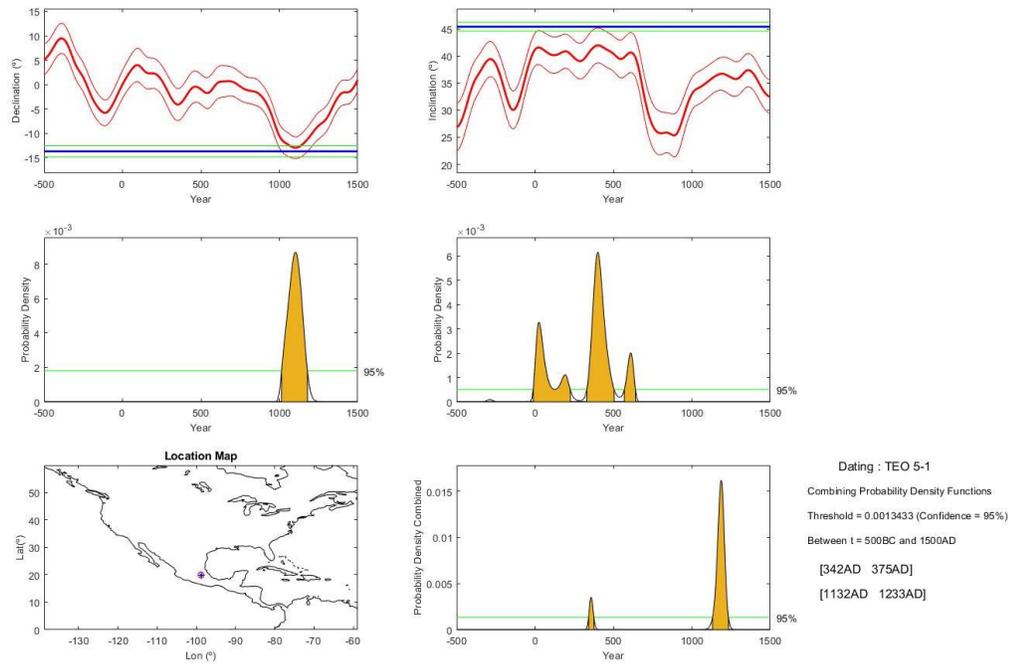
BLOQUE TEO 3 – CUARTO DE LA COLUMNAS



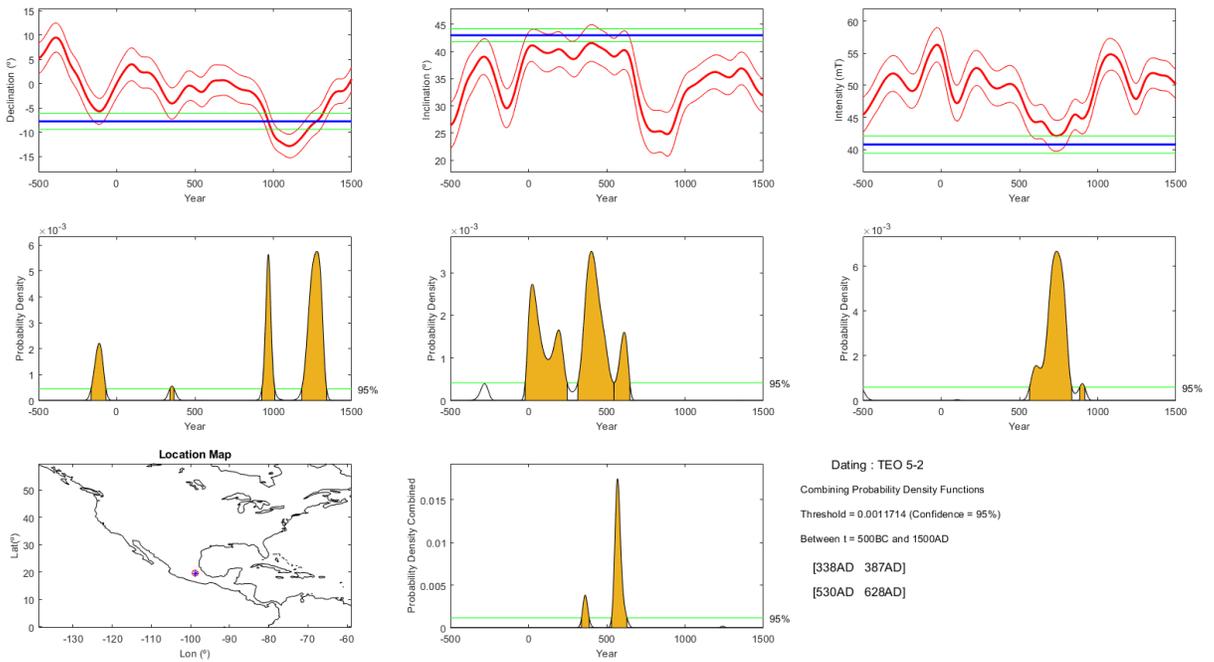
BLOQUE TEO 4 – CONJUNTO NOROESTE DEL RÍO SAN JUAN



BLOQUE TEO 5-1 – CONJUNTO DE EDIFICIOS SUPERPUESTOS



BLOQUE TEO 5-2 – CONJUNTO DE EDIFICIOS SUPERPUESTOS



BLOQUE TEO 6 – PLAZA OESTE

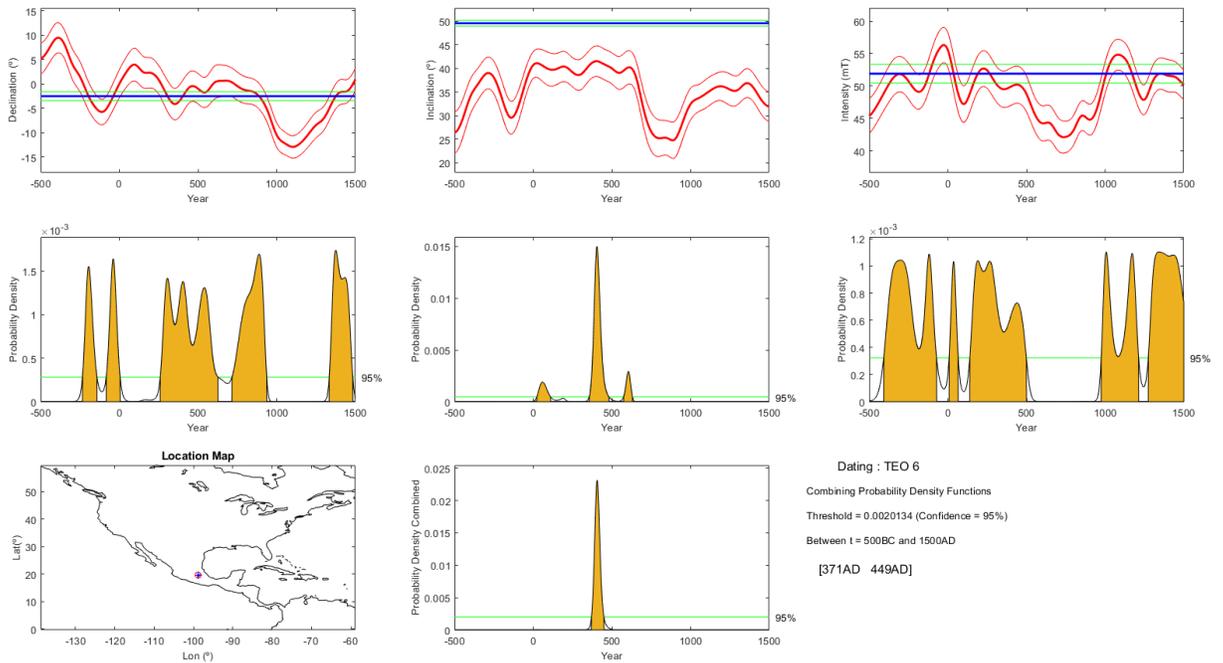


Figura 37. Datación arqueomagnética utilizando el modelo geomagnético global SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et. al 2011, 2014), en el periodo de 500 a.C al 1500 d.C

Después de realizar la datación en ambos periodos, se compararon los resultados, obteniendo intervalos de tiempo parecidos en algunas estructuras, mientras que, en otras estructuras, por ejemplo, TEO 1, los intervalos de tiempo son completamente diferentes, en la tabla a continuación se muestra esta comparación (Tabla X).

Tabla X. Comparación de los intervalos de tiempo obtenidos por la técnica de datación arqueomagnética para ambos periodos

Estructura	Muestra	Intervalo de edad	Intervalo de edad
		(periodo 100 a.C al 800 d.C)	(periodo 500 a.C. al 1500 d.C)
Plaza de la Luna	TEO 1	348 – 361 d.C 545 – 589 d.C	1207 – 1247 d.C
	TEO2	665 – 769 d.C	667 – 777 d.C
Cuarto de la Columnas	TEO 3	515 – 700 d.C	504 – 711 d.C
			1223 – 1262 d.C
Conjunto noroeste del Río San Juan	TEO4	558– 627 d.C	558 – 626 d.C
Conjunto de Edificios Superpuestos	TEO 5-1	342 – 389 d.C	342 – 375 d.C 1132 – 1233 d.C
	TEO 5-2	342 – 390 d-C 531 – 621 d.C	338 – 387 d. C 530 – 628 d.C
Plaza Oeste	TEO 6	371 – 438 d.C	371 – 449 d.C

Modelo SHAWQ2k

A modo de comparar diferentes modelos globales se utilizó el modelo SHAWQ2k (Campuzano et al., 2019), sus iniciales SHA indica la técnica de modelado matemático de Análisis Armónicos Esféricos (o en inglés, Spherical Harmonic Analyses), WQ indica que el modelo se calcula con un esquema de análisis relacionado con la clasificación de datos de entrada y 2k corresponde al intervalo de tiempo que utiliza el modelo, el cual es desde 1000 a.C a 1900 d.C.

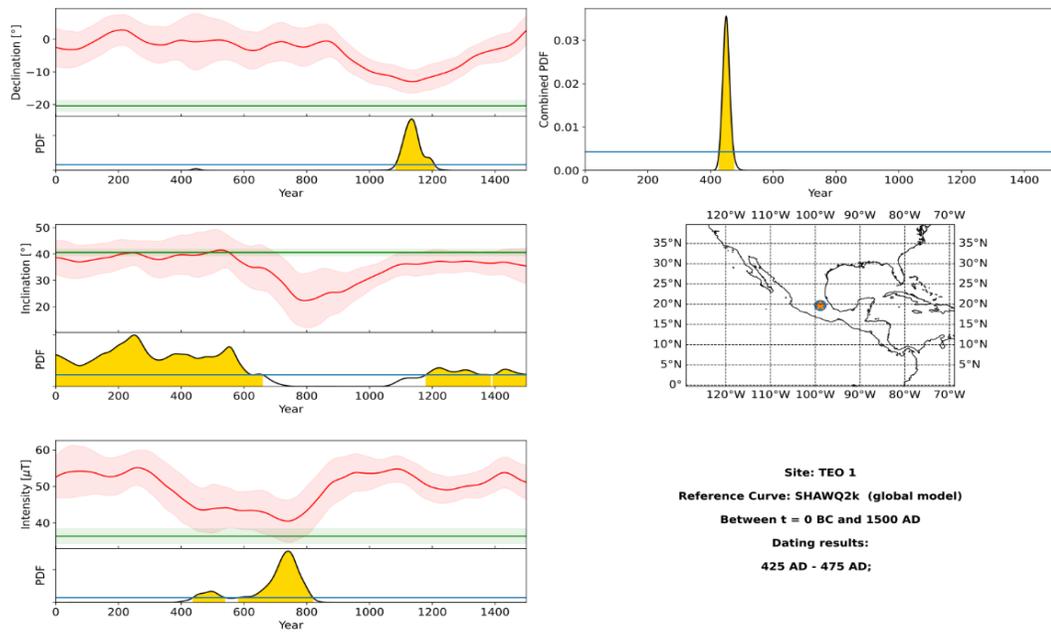
Para realizar la datación se utilizó la plataforma de datación arqueomagnética de Serrano et al. 2024, la cual contiene datos actualizados hasta febrero del 2024, y se trata de una curva de referencia sintética con datos locales y modelos geomagnéticos actualizados.

Al igual que con el modelo SHA.DIF.14k, se utilizan los datos magnéticos obtenidos de los experimentos (declinación, inclinación y paleointensidad) y el intervalo utilizado para este modelo fue de 0 a 1500 d.C. A continuación, se muestran los datos obtenidos.

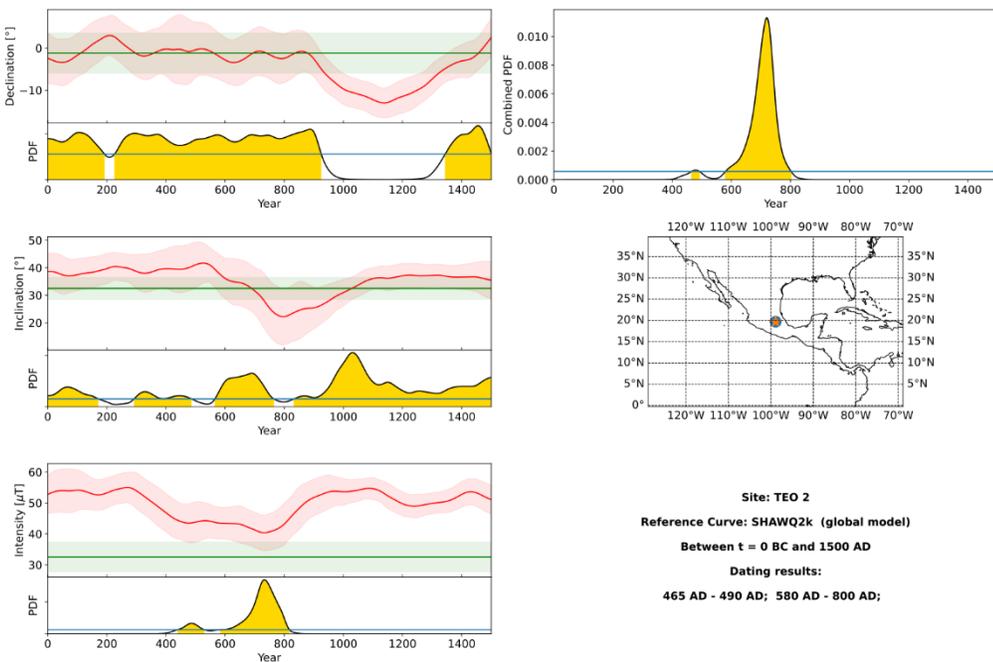
Tabla XI. Intervalos de tiempo obtenidos por la técnica de datación arqueomagnética usando el modelo SHAWQ2k para el periodo de 0 al 1500 d.C

Estructura	Muestra	Intervalo de edad (periodo 0 al 1500 d.C)
Plaza de la Luna	TEO 1	425 – 475 d.C
	TEO2	465 – 490 d.C
		580 – 800 d.C
Cuarto de la Columnas	TEO 3	400 – 720 d.C
Conjunto noroeste del Río San Juan	TEO4	420 – 535 d.C
		635 – 665 d.C
Conjunto de Edificios Superpuestos	TEO 5-1	5 – 40 d.C
		400 – 515 d.C
		1095 - 1265 d.C
	TEO 5-2	405 – 670 d. C
Plaza Oeste	TEO 6	0– 65 d.C
		270 – 555 d.C

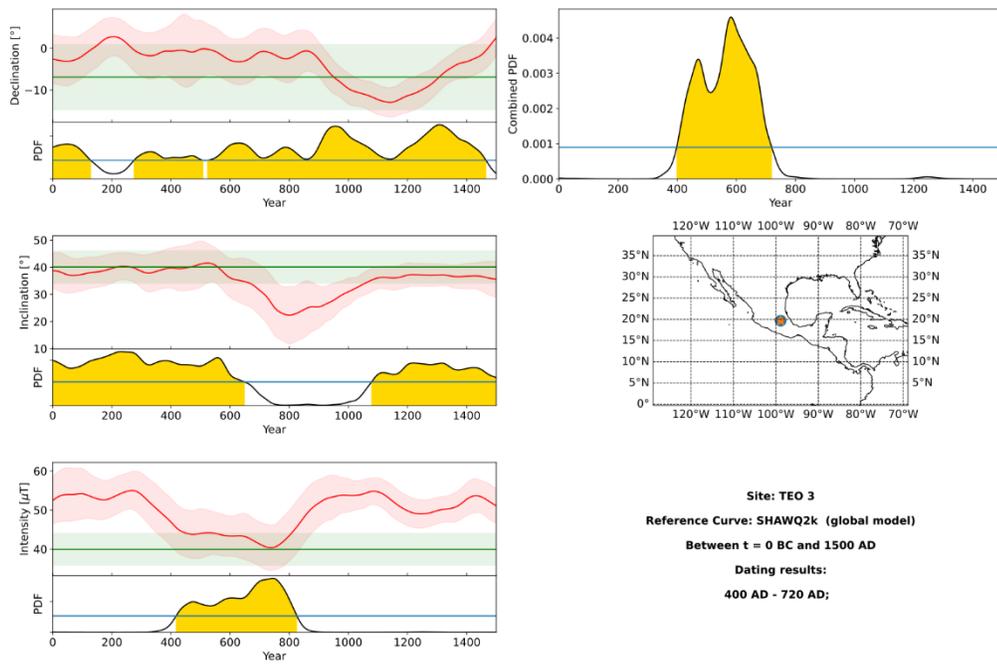
BLOQUE TEO 1 – PLAZA DE LA LUNA



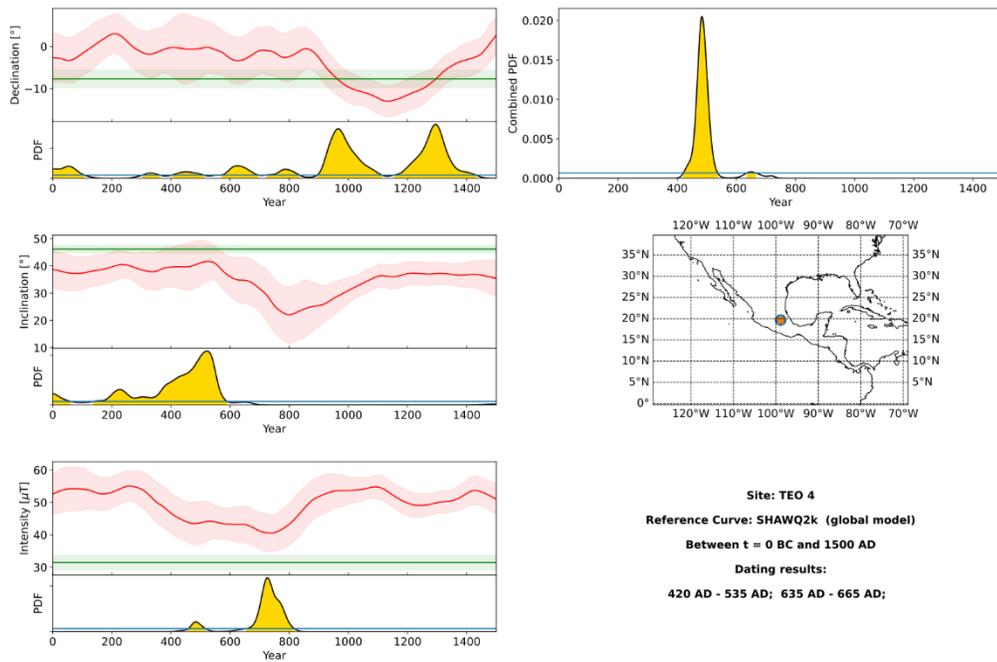
BLOQUE TEO 2 – PLAZA DE LA LUNA



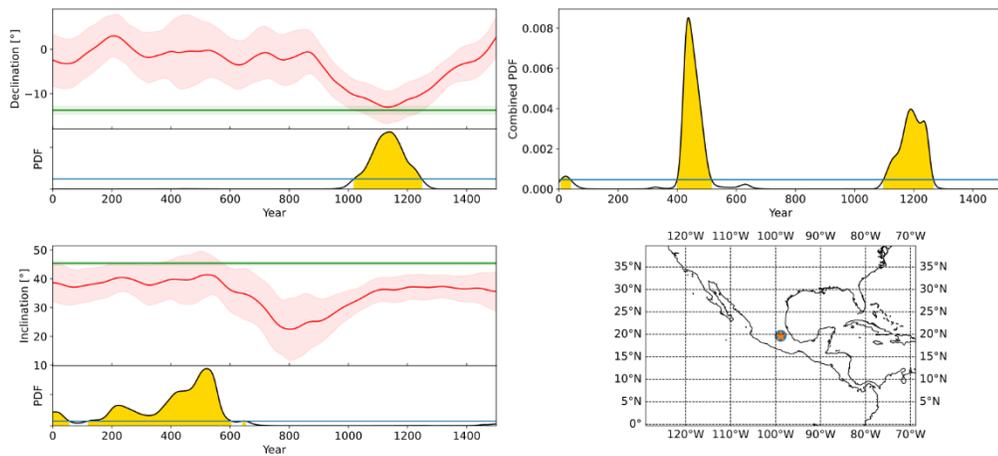
BLOQUE TEO 3 – CUARTO DE LA COLUMNAS



BLOQUE TEO 4 – CONJUNTO NOROESTE DEL RÍO SAN JUAN

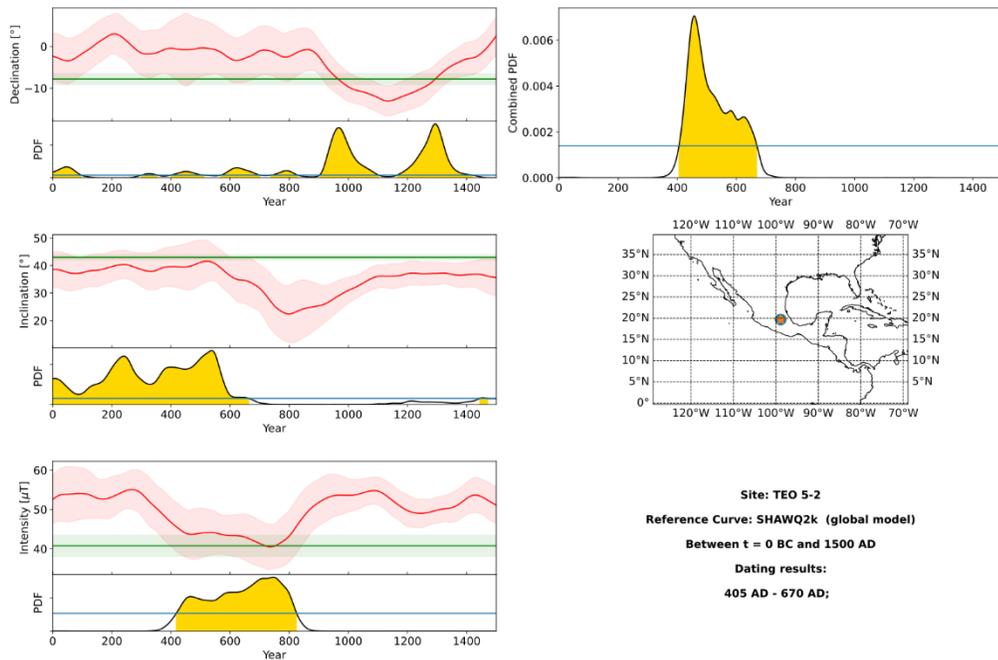


BLOQUE TEO 5-1 – CONJUNTO DE EDIFICIOS SUPERPUESTOS



Site: TEO 5-1
 Reference Curve: SHAWQ2k (global model)
 Between t = 0 BC and 1500 AD
 Dating results:
 5 AD - 40 AD; 400 AD - 515 AD; 1095 AD - 1265 AD;

BLOQUE TEO 5-2 – CONJUNTO DE EDIFICIOS SUPERPUESTOS



Site: TEO 5-2
 Reference Curve: SHAWQ2k (global model)
 Between t = 0 BC and 1500 AD
 Dating results:
 405 AD - 670 AD;

BLOQUE TEO 6 – PLAZA OESTE

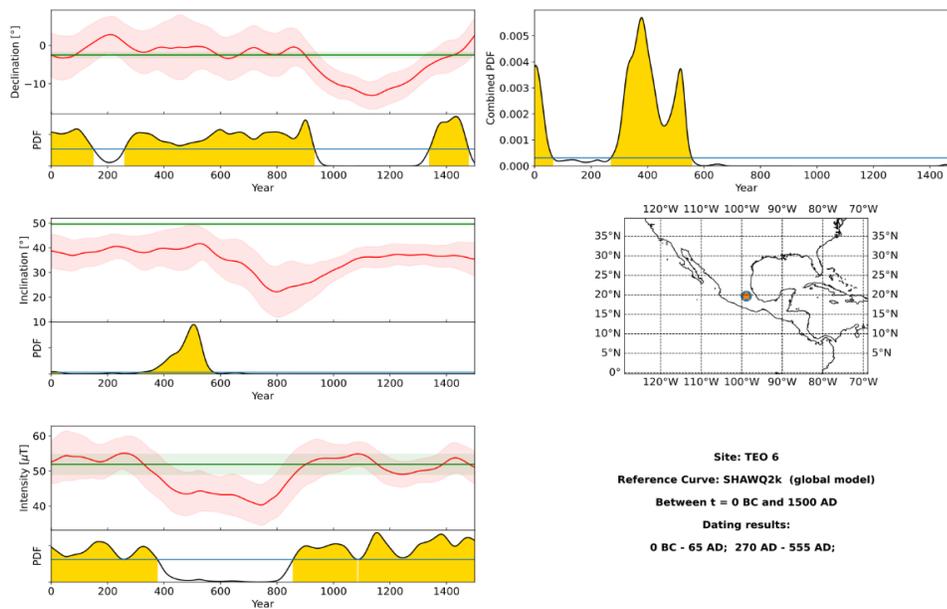


Figura 38. Datación arqueomagnética utilizando el modelo geomagnético global SHAWQ2k (Campuzano et al., 2019), en el periodo de 0 al 1500 d.C

En la siguiente tabla (Tabla XII) se muestran los intervalos obtenidos en los diferentes modelos e intervalos, puede observar que los intervalos de edad son parecidos para los dos modelos usados, la diferencia que se puede observar es que los intervalos obtenidos con el modelo SHAWQ2k abarcan un periodo de tiempo mayor, y en algunos casos combinan los resultados del modelo SHA.DIF.14k para los dos periodos utilizados. En cuanto a la muestra TEO 1, que para los periodos de tiempo utilizados nos mostraba diferentes edades, con el modelo SHAWQ2k los intervalos de tiempo obtenidos son diferentes a los obtenidos con el modelo anterior pero cercanos al periodo de 100 a. C – 800 d. C.

Tabla XII. Comparación de los intervalos de tiempo obtenidos por la técnica de datación arqueomagnética para ambos modelos

Estructura	Muestra	SHA.DIF.14K		Serrano et al. 2024
		Intervalo de edad (periodo 100 a.C al 800 d.C)	Intervalo de edad (periodo 500 a.C. al 1500 d.C)	Intervalo de edad (periodo 0 al 1500 d.C)
Plaza de la Luna	TEO 1	348 – 361 d.C	1207 – 1247 d.C	425 – 475 d.C
		545 – 589 d.C		465 – 490 d.C
	TEO2	665 – 769 d.C	667 – 777 d.C	580 – 800 d.C
Cuarto de la Columnas	TEO 3	515 – 700 d.C	504 – 711 d.C 1223 – 1262 d.C	400 – 720 d.C
Conjunto noroeste del Río San Juan	TEO4	558– 627 d.C	558 – 626 d.C	420 – 535 d.C
				635 – 665 d.C
Conjunto de Edificios Superpuestos	TEO 5-1	342 – 389 d.C	342 – 375 d.C 1132 – 1233 d.C	5 – 40 d.C 400 – 515 d.C 1095 - 1265 d.C
				342 – 390 d-C 531 – 621 d.C
Plaza Oeste	TEO 6	371 – 438 d.C	371 – 449 d.C	0– 65 d.C 270 – 555 d.C

CAPÍTULO VIII. DISCUSIÓN

El resumen de los resultados de los experimentos realizados se puede observar en la Tabla XI, donde se encuentran los datos obtenidos de las componentes direccionales y sus parámetros de calidad, así como los resultados obtenidos del experimento de paleointensidad y por último los intervalos de edad obtenidos para cada bloque muestreado.

Con la información obtenida de los experimentos podemos llevar a cabo la interpretación de los mismos con la información arqueológica que disponemos, además de compararlos con los estudios previos realizados en la zona.

Tabla XIII. Tabla de resultados obtenidos en este estudio

Estructura	Muestra	Coordenadas	Dec [°]	Inc [°]	a_{95} [°]	k	Paleointensidad [μT]	Edad
Plaza de la Luna	TEO1	19°41'52.40"N	339.6	40.6	1.6	1853	36.39 ± 1.02	425-475 d.C
	TEO2	98°50'36.71"O	358.8	32.5	4.9	640	32.54 ± 2.41	465-790 d.C 580-800 d.C
Conjunto de las Columnas	TEO3	19°41'49.14"N 98°50'39.31"O	353.1	40.1	7.3	4267	39.94 ± 20.6	400-720 d.C
Conjuntos noroeste del Río San Juan	TEO4	19°41'13.51"N 98°50'54.30"O	352.3	42.5	2.0	3583	31.46 ± 1.14	420 – 535 d.C 635 – 665 d.C
Conjunto de Edificios Superpuestos	TEO5-1	19°41'10.61"N	346.3	45.4	0.8	5768	-	5 – 40 d.C 400 – 515 d.C
	TEO5-2	98°50'54.37"O	352.2	43.0	1.2	4880	40.78 ± 1.35	1095 - 1265 d.C 405 – 670 d. C
Plaza Oeste	TEO6	19°41'17.60"N 98°50'53.01"O	357.5	43.1	0.6	7022	51.90 ± 1.45	0– 65 d.C 270 – 555 d.C

Como se ha mencionado anteriormente, el colapso de un centro tan extenso y desarrollado como lo la zona de Teotihuacán, ha sido un tema de discusión y las razones que llevaron a la cultura a abandonar su ciudad son diversas, aunque una de las teoría más aceptaba y de la cual se ha comprobado, es la cual en las últimas fases de la cultura, se produciría un gran incendio a lo largo de la ciudad, con la finalidad de limpiar la zona de los rastros de la cultura teotihuacana y también podría tratarse de un cierre de ciclos con el cual posteriormente llevarían a cabo una migración de la civilización alrededor del 650 d.C; donde estudios arqueomagnéticos previos han proporcionado edades entre 550-575 d.C (Soler-Arechalde et. al., 2006).

De los estudios previos realizados en la zona, junto con los resultados obtenidos de este estudio, indican que la zona de Teotihuacán tuvo varios episodios de incendios antes de su abandono, esos incendios fueron provocados y controlados por la civilización como ritos de iniciación o finalización de alguna etapa constructiva o como rituales en celebraciones donde le fuego tenía un gran valor simbólico para los teotihuacanos (Gogichaishvili et. al., 2022).

Las edades obtenidas en los estudios previos sumando los de este estudio, podemos observar que corresponden a las fases culturales de *Tlamimilolpa*, *Xolapan* y *Metepac*, lo cual nos habla de diferentes incendios controlados que se realizaron conforme la ciudad era construida hasta lo que conocemos el día de hoy; durante la fase de *Tlamimilolpa* (205-450 d.C), la ciudad llegaba a su aspecto final, las diferentes construcciones en las estructuras llegaban a su fin, además en esta misma fase ocurrieron incendios y desmantelamientos de la Pirámide de Quetzalcóatl; en la fase de *Xolapan* no solo hay un crecimiento poblacional, y hubo una “*fase de renovación urbana*” (Million 1973) donde la ciudad se pintaba de rojo y la iconografía de serpientes pasaría a convertirse en jaguares, además durante este periodo (450-650 d.C) hubo problemas dentro de la estructura social y las

diferentes poblaciones en la ciudad (Manzanilla 2006), por lo cual los teotihuacanos deciden abandonar el lugar y se produce el ‘Gran Incendio’ (550-650 d.C); por otro lado en la fase de *Metepec* de 650-750 d.C, después del incendio los edificios quedaron dañados y al no seguir el fallo en sistema teotihuacano, la ciudad empezó a ser abandonada poco a poco.

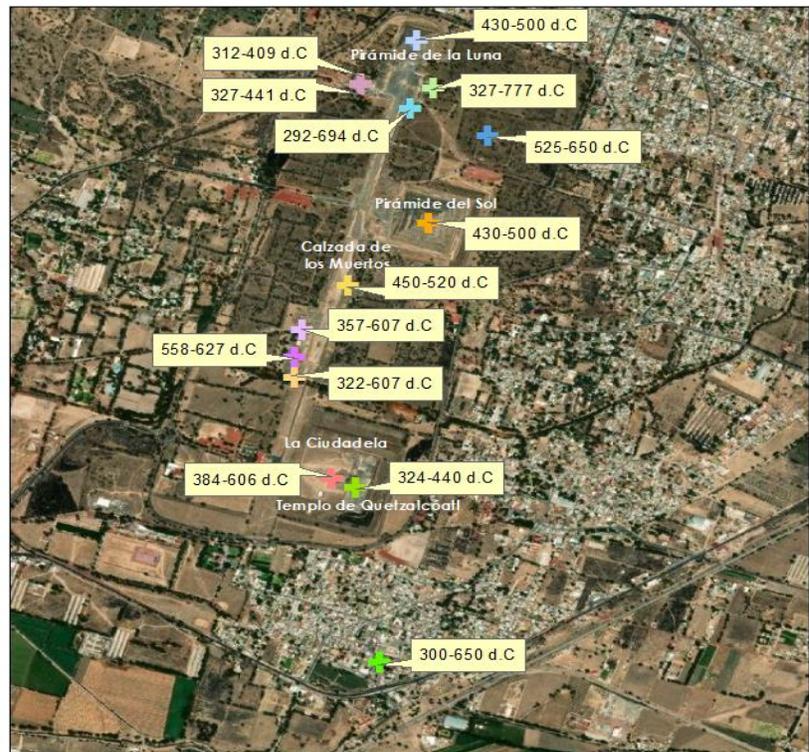
En el siguiente mapa (Figura 39) se muestran los intervalos de tiempo obtenidos para las diferentes estructuras de la zona arqueológica de Teotihuacán, posteriormente en la tabla XII se muestra un resumen de los datos obtenidos de los estudios, así como su ubicación y autor.



EDADES REGISTRADAS EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE TEOTIHUACÁN



SITIOS DE ESTUDIO	
ESTRUCTURA	
+	CIUDADELA
+	CONJUNTO DE EDIFICIOS SUPERPUESTOS
+	CONJUNTO NOROESTE DEL RIO SAN JUAN
+	CUARTO DE LAS COLUMNAS
+	GRUPO VIKING
+	PALACIO DE QUETZALPAPÁLOTL
+	PIRÁMIDE DE LA LUNA
+	PIRÁMIDE DEL SOL
+	PLAZA DE LA LUNA
+	PLAZA OESTE
+	TEMPLO DE LOS JAGUARES
+	TEMPLO DE QUETZALCÓATL
+	TEOPANCAZCO
+	XALLA



Autor: Karen Arreola Romero

Service Layer Credits: Source: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

Figura 39. Mapa de las edades registradas en las diferentes estructuras de Teotihuacán.

Autor: Karen Arreola Romero.

Tabla XIII. Tabla de resultados de los estudios previos en la zona de Teotihuacán, incluyendo datos del presente trabajo

<i>Zona de muestreo</i>	<i>Coordenadas</i>	<i>Dec [°]</i>	<i>Inc [°]</i>	<i>a₉₅ [°]</i>	<i>Paleointensidad</i>	<i>Edad</i>	<i>Referencia</i>
Teopancazco	19°40'6.66"N 98°50'48.02"O	7	50	3	-	360-455 d.C	
Grupo Vikingo	19°41'23.36"N	3.9	40.2	3.3	-	455-510 d.C	(Wolfman 1990)
	98°50'47.13"O	2.1	41.1	3.1	-	450-520 d.C	
Ciudadela	19°40'52.34"N	2.4	40.8	1.6	-	465-505 d.C	
Conjunto 1D	98°50'46.75"O	3	39.1	0.6	-	475-495 d.C	
		1	40	1	-	480-510 d.C	
TE1 Ciudadela	19°40'55.38"N 98°50'49.31"O	3.8	38.7	5.75	-	553-606 d.C	
TE4 Complejo Plaza Oeste	19°41'18.17"N 98°50'51.91"O	6	38.6	8.26	-	551-607 d.C	(Hueda Y., Soler A. M., 2001)
Tp2 Teopancazco		351.7	34	10	-	325-424 d.C	
Tp3 Teopancazco	19°40'6.66"N	4	36.7	3.51	-	491-629 d.C	(Hueda Y. <i>et. al</i> , 2004)
	98°50'48.02"O						
Tp8 Teopancazco		356.8	36.9	2.17	-	1414-1423 d.C	
Xalla		355.5	38.4	3.95	-		
		354.7	36.1	4.88	-		
	19°41'45.05"N	4.3	41.9	11.7	-	537 – 650 d.C	
	98°50'28.96"O	356.6	34.6	2.24	-		
		356.2	45.8	2.89	-		(Sánchez-López, F., 2005)
Teopancazco	19°40'28.67"N	353.9	46.3	4.23	-	550 - 575 d.C	
	98°50'43.01"O	346.2	41.0	20.24	-		

			354.3	35.2	2.07	-		
Xalla	19°41'45.05"N		352.4	40.5	9.8	-	550-575 d.C	
S4R1 F1	98°50'28.96"O							
Xalla	19°41'45.05"N		356.8	38.5	3.57	-	525-575 d.C	(Rodríguez-Ceja M. 2003)
S1 F1	98°50'28.96"O							(Soler-Arechalde, A. M., et. al, 2006)
Xalla Red walls	19°41'45.05"N		351.4	42.7	8.11	-	545-605 d.C	
	98°50'28.96"O							
Tp30-31	N464; E111		4.2	39.4	9.32	-		
Teopancazco	N464; E112						407-433 d.C	
Tp32-34	N464; E114	4.3	44.3	14.8	-			(Romero-Hernández, E., 2008)
Teopancazco								
TP75	N467; E105	335.2	30.2	3.1	-		300-340 d.C	
Teopancazco								
Cerámicas								
Pirámide del Sol	19°41'32.99" N							
Pirámide de la Luna	98°50'37.68" O	-	-	-	38.871 ± 1.8 μT		430-500 d.C	(Herrero-Bervera, E., 2015)
Plaza de las Luna								
CQE1 Ciudadela			359.0	37.6	3.9	-	384-440 d.C	
Pirámide de Quetzalcóatl								
CQE2 Ciudadela			2.9	38.4	2.6	-	397-440 d.C	
Pirámide de Quetzalcóatl	19°40'55.38"N							(Terán-Guerrero A.G., et. al., 2016)
CQE3 Ciudadela	98°50'49.31"O		348.5	40.2	1.7	-	324-386 d.C	
Pirámide de Quetzalcóatl								
CEE2			1.0	38.3	2.8	-	435-600 d.C	
Conjunto E (CE)								

Basaltos del volcán Xitle	19°19'32.02"N	359.8	32.8	2.2	59.9 ± 7.7 μT	235-222 a.C	(Urrutia-Fucugauchi J., et al, 2016)
	99° 7'42.11"O					71-11 a.C	
						248-276 d.C	
Murales del Palacio de Quetzalpapálotl	19°41'52.60"N	41.3	351.6	3.2	-	312-409 d.C	(Gogichaishvili A. et al., 2018)
	98°50'45.40"O						
Patio de los Jaguares	19°41'52.48"N	44.6	355.5	1.1	52.2 ± 1.6 μT	327 – 441 d.C	(Gogichaishvili A. et al., 2022)
	98°50'45.44"O						
Muro 4A Plaza de la Luna	19°41'55.06"N						
	98°50'39.27"O						
Plaza de la Luna	19°41'52.40"N	339.6	40.6	1.6	36.39± 1.02 μT	348 – 361 d.C	
						545 – 589 d.C	
						665 – 777 d.C	
	98°50'36.71"O	358.8	32.5	4.9	32.54 ± 2.41 μT		
Conjunto de las Columnas	19°41'49.14"N	353.1	40.1	7.3	39.94 ± 20.6 μT	515 – 700 d.C	
	98°50'39.31"O						
Conjuntos noroeste del Río San Juan	19°41'13.51"N	352.3	42.5	2.0	31.46 ± 1.14 μT	558– 627 d.C	
	98°50'54.30"O						
Conjunto de Edificios Superpuestos	19°41'10.61"N	346.3	45.4	0.8	-	342 – 389 d.C	Este trabajo
						342 – 390 d.C	
						531 – 621 d.C	
	98°50'54.37"O	352.2	43.0	1.2	40.78 ± 1.35 μT		
Plaza Oeste	19°41'17.60"N	357.5	43.1	0.6	51.90 ± 1.45 μT	371 – 438 d.C	
	98°50'53.01"O						

Puesto que existe evidencia de diferentes episodios incendiarios antes del abandono de la ciudad, no sugieren que los pobladores buscaban destruir la ciudad, al contrario la finalidad de los incendios se trataba de un ritual de purificación que daba paso a las nuevas fases constructivas de las estructuras, estos incendios también los realizaban al finalizar una etapa de construcción como una celebración, en donde nuevamente las estructuras sufrían bajo las llamas de los incendios; mientras que las edades correspondientes a las últimas fases culturales nos muestran como las antiguas culturas mesoamericanas borraban su esencia para permitir que nuevas civilizaciones puedan nacer y desarrollarse.

CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES

En este estudio arqueomagnético de muestras provenientes a diferentes estructuras en la zona arqueológica de Teotihuacán, se ha aportado intervalos de tiempo que se añaden la información recopilada sobre la zona arqueológica de Teotihuacán.

La mineralogía magnética obtenida en el experimento de susceptibilidad magnética frente a la temperatura (curvas termomagnéticas continuas) se identificaron titanomagnetitas ricas y pobre en Ti, donde algunas muestras (Teo 1, Teo 4 y Teo 5-2) mostraron comportamiento razonablemente reversible, además de observar en las curvas diferentes fases minerales en temperaturas anteriores a 500°C. Ocasionalmente, también se detectó la presencia de las hematitas, de bajo grado, que no contribuyeron notablemente en la termoremanencia total.

Se determinaron satisfactoriamente las componentes direccionales de las muestras provenientes de siete bloques (seis sitios), cumpliendo con los factores de calidad de los experimentos; por otro lado, las arqueointensidades fueron exitosas solo en seis de las siete estructuras (30 de 42 muestras analizadas), eso debido que durante el experimento de paleointensidad la muestra TEO5-1 no cumplió con los parámetros de calidad.

El ejercicio de datación realizado con la curvas geomagnética SHADIF.14k y la nueva plataforma de datación Serrano et al. 2024, los intervalos obtenidos no corresponden a una sola fase cultural, sino que las muestras pertenecen a diferentes etapas (*Tlamimilolpan*, *Xolalpan* y *Metepc*), mientras que la mayoría de las muestras solo presentan un intervalo de tiempo, la muestras TEO1 y TEO5-2 arrojaron dos posibles intervalos, lo que especulativamente correspondería a un primer incendio al terminar una importante fase

constructiva y el segundo intervalo corresponde al periodo del 'Gran Incendio' y la temporalidad de declive o abandono.

Además, estos resultados cronológicos obtenidos, se pueden relacionar y comparar con los resultados de estudios previos en la zona, contribuyendo a la teoría sobre los eventos incendiarios por parte de la cultura Teotihuacana con una carga simbólica mediante el fuego, de esta manera nuestra investigación proporciona nueva información sobre estos incendios.

En esta investigación tuvo como objetivo principal obtener nuevas edades sobre el abandono y declive de Teotihuacán, si bien el objetivo se cumplió, también se obtuvieron edades anteriores a este evento que sugieren que existieron incendios antes del abandono de la ciudad.

Los estudios arqueomagnéticos nos proporcionan nuevos datos o información complementaria en los sitios arqueológicos, donde al determinar el registro de las variaciones temporales del campo magnético terrestres en los materiales arqueomagnéticos es posible realizar dataciones y obtener intervalos de edad para las muestras, en este caso, se utilizaron muestras de material con vestigios quemados, pero también esta técnica puede ser utilizada en restos de cerámicas que las civilizaciones crearon en el pasado; por lo cual considero que se deben fomentar el interés sobre este tipo de investigaciones que indudablemente contribuye el rescate de nuestro patrimonio cultural.

REFERENCIAS

- Aguilar Reyes, B., Gogichaishvili, A., Morales, J., Garduño, V. H., Pineda, M., Carvalho, C., Moran, T. G., Israde, I., Rathert, M. C. (2013). An Integrated Archeomagnetic and C14 Study on Pre-Columbian Potsherds and Associated Charcoals Intercalated between Holocene Lacustrine Sediments in Western Mexico: Geomagnetic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 2753-2763 pp.
- Alva-Valdivia, L. M., Morales, J., Gogichaishvili, A., Popenoe de Hatch, M., Hernández-Bernal, M. S., & Mariano-Matías, E. Herrero-Bervera F. (2010). Absolute Geomagnetic Intensity Data from Preclassic Guatemalan Pottery. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 180, 41-51pp.
- Armillas, Pedro. (1944). "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).
- Beramendi-Orosco, L.E., González-Hernández, G., Urrutia-Fucugauchi, J., Manzanilla, L. R., Soler-Arechalde, A.M., Gogitchaishvili A., Jarboe, N. (2009). High-resolution Chronology for the Mesoamerican Urban Center of Teotihuacan Derived from Bayesian Statistics of Radiocarbon and Archaeological Data: *Quaternary Research*, 71(2), 99-107pp.
- Bernal, Ignacio (1963) Teotihuacán. Descubrimientos y reconstrucciones. México, INAH
- Biggin, A. J et al. (2013). The effect of cooling rate on the intensity of thermoremanent magnetization (TRM) acquired by assemblages of

pseudo-single domain, multidomain and interacting single-domain grains. *Geophysical Journal International*. 1 – 11 pp.

- Butler, R. F. (2004). *Paleomagnetism: From Magnetic Domains to Geologic Terranes*, Portland, Oregon: University of Portland
- Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007). *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer.
- Campuzano et al. (2019). Emergence and evolution of the South Atlantic Anomaly revealed by the new paleomagnetic reconstruction SHAWQ2k. *Earth and Planetary Science Letters* (512), 17-26 pp.
- Carrasco, D., Jones, L., Sessions, S. (2000). *Mesoamerica's classic heritage: from Teotihuacan to the Aztecs*. University Press of Colorado
- 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). *Geophysics. J. Int.*, 188(3), 979-993.
- Coe, M. D. (1967). Olmec civilization, Veracruz, México: Dating of San Lorenzo Phase, *Science*, 155, 1399-1401 pp.
- Coe, R. (1967). Paleo Intensities of the Earth's magnetic field determined from Tertiary and Quaternary rocks. *J. Geophysics. Res.*, 72, 3247-3262.
- Cowgill, G.L. (2007). The urban organization of Teotihuacan, Mexico, in E.L. Stone (ed.) *Settlement and society: essays dedicated to Robert McCormick Adams*: 261-95. Los Angeles (CA) & Chicago (IL): Cotsen Institute of Archaeology, University of California, and Oriental Institute, University of Chicago.

- Cowgill, G.L. (1997). State and society at Teotihuacan, Mexico. *Annual Review of Anthropology* 26: 129-161pp.
- Cowgill, G. L. (2008). An update on Teotihuacan. *Antiquity*, 82(318), 962–975 pp.
- Cowgill, G. L. (2015). *Ancient Teotihuacan: Early Urbanism in Central Mexico*. Cambridge University press.
- Dunlop, D. (1995). Magnetism in rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B2), 2161-2174 pp.
- Dunlop, D., and Özdemir, Ö. (1997). *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press, 573 pp.
- Dunlop, D. J. (2007). Magnetization, Viscous Remanent (VRM). Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007). *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, 621-630 pp. Springer.
- Elsasser W.M. (1957). "Geophysics Symposium on Solar and Terrestrial Relationships," these PROCEEDINGS, 43, 14-24 pp.
- Elsasser, W. (1958). The Earth as a Dynamo. *Scientific American*, 198(5), 44-49 pp.
- Folgerhaiter, G. (1899). Sur les variations seculaires de l'inclinaison magnetique dans l'antiquite, *J. Phys.*, 8, 660–667pp.
- Gogichaishvili A. *et al.*, (2018). From empirical considerations to absolute ages: How geomagnetic field variation may date Teotihuacan mural paintings. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 284, 10-16 pp.
- Gogichaishvili A. *et al.*, (2022). Refining the absolute chronology of Teotihuacan (Mesoamerica): New archaeomagnetic datings of fire

footprints. *Journal of Archaeological Science: Reports* 42: 103363, 1-6 pp.

- Gogichaishvili A. et. al., (2022). Refining the absolute chronology of Teotihuacan (Mesoamerica): New archaeomagnetic datings of fire footprints. *Journal of Archaeological Science: Reports* 42: 103363, 1-6 pp.
- González Jácome, Alba, (2000). Mesoamérica: un desarrollo teórico, *Dimensión Antropológica*, año 7, vol.19, mayo/agosto, México.
- 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.
- Herrero-Bervera, E. (2015). Spot Reading of the Absolute Paleointensity of the Geomagnetic Field Obtained from Potsherds (Age Ca. 500-430 AD) in Teotihuacan, Mexico. *Archaeological Discovery* (3). 72-84 pp.
- Heyden, D. (1973). ¿Un Chicomostoc en Teotihuacán? La cueva bajo la Pirámide del Sol. *Boletín INAH*, 6. 3-16 pp.
- Hirt, A.M. (2007). Magnetic Remanence, Anisotropy. Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007). *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. (535-540 pp.). Springer.
- Hrouda, F. (2007). Magnetic Susceptibility, Anisotropy. Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007). *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. (546-560 pp.). Springer.

- 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 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 Y., Soler-Arechalde A. M., Urrutia-Fucugauchi J., Barba L., Manzanilla L., Rebolledo M., Gogichaishvili A. (2004). Archaemagnetic studies in central México – dating of Mesoamerican lime-plasters. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 147, 269-283pp.
- Kirchhoff, Paul, (1960). Mesoamérica. Sus límites geográficos, composición étnica y caracteres culturales, Tlatoani-Sociedad de alumnos de la ENAH, México.
- Lachniet, M.S., et al. (2012). A 2400 yr. Mesoamerican rainfall reconstruction links climate and cultural change. *Geology* (40). 259-262 pp.
- López-Austin, A. (1989). “La historia de Teotihuacán”, en López Austin, Romero Galván, Martínez Marín, Teotihuacán. 13-35pp.
- Lorenzo, J.L (ed.). (1968). Materiales para la arqueología de Teotihuacán, INAH, México

- Manzanilla, L., López, C., Freter, A.C. (1996). Dating results from excavation in quarry tunnels behind the Pyramid of the Sun at Teotihuacan. *Ancient Mesoamerica* 7. 245-266 pp.
- Manzanilla, L., López-Lujan, L. (2001). Exploraciones en un posible palacio de Teotihuacán: el Proyecto Xalla (2000-2001). *Mexican Archaeology* XII (3): 58-61pp.
- Manzanilla, L. (2003). El proceso de abandono de Teotihuacán y su reocupación por grupos epiclásicos en Abandono de asentamientos prehispánicos. 70-76 pp.
- Manzanilla, L. (2003). The Abandonment of Teotihuacan. En (Inomata, T., Webb, R.W.) *The Archaeology of Settlement Abandonment in Middle America. Foundations of Archaeological Inquiry*. 91-101 pp.
- Manzanilla, L. (2009). Nuevos datos sobre la cronología de Teotihuacán en (Daneels, A). *Cronología y Periodización de Mesoamérica y el Norte de México*. Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM. 21-52 pp.
- Manzanilla, L. (2017). Teotihuacán. Opúsculos. El Colegio Nacional
- Manzanilla, L. (2019). “El palacio de Xalla”, en: L. Manzanilla (ed.) *El palacio de Xalla en Teotihuacán. Primer acercamiento, Proyecto ‘Teotihuacán. Elite y gobierno. Excavaciones en Xalla y Teopancazco’*, Dirección General de Asuntos del Personal Académico-Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM, México, pp. 41-66.
- Matos-Moctezuma, E. (2021). Teotihuacán. Fondo de Cultura Económica. México.

- 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) The Collapse of Ancient States and Civilizations, The University of Arizona Press, Tucson, pp. 102-164
- Morelos-García, N. (1993). Proceso de producción del espacio y estructura en Teotihuacán. Arqueología 274. INAH.
- Néel L., (1949). Théorie du traînage magnetique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites. Annales de Geophysique. 5. Pp 99-136.
- Parson, J., Sugiura, Y. (Nichols, D). (2012). Teotihuacan and the Epiclassic in Central Mexico. The Oxford Handbook of Mesoamerican Archaeology.
- Pavón-Carrasco, F.J., Rodríguez-González, J., Osete, M.L. y Torta, J.M. (2011). A matlab tool for archaeomagnetic dating. J. Archaeolo. Sci., 38(2), 408-419.
- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M. y 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 pp.
- Pollard, J. P. (1999). Paleomagnetism of late Cenozoic volcanics from east-central Mexico implications for regional tectonic evolution. Doctor of Philosophy thesis, Liverpool John Moores University, 268 pp.
- Rodríguez-Ceja M. (2003). Análisis y Fechamientos Arqueomagnético de estucos de zonas habitacionales de Teotihuacán (Xalla) y Templo Mayor. Tesis Licenciatura Física, Fac. Ciencias, UNAM, México, 64 pp.

- Romero-Hernández, E. (2008). Fechamientos Arqueomagnéticos de pisos con control estratigráfico de la excavación Teopancazco 2005, Teotihuacán: Universidad Nacional Autónoma de México, México, Bsc Tesis de Física, 51 pp.
- Rosales, E.A. (2022). El colapso de Teotihuacán explicado a través de una escultura. Pasajes. Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), 1-12 pp.
- Sánchez-López, F. (2005) Nuevos fechamientos arqueomagnéticos de Xalla y Teopancazco, zonas habitacionales de Teotihuacán: Universidad Nacional Autónoma de México, México, Bsc Tesis de Física, 80 pp.
- Schmidt, A. (2007). Archeology, Magnetic Methods, Anisotropy. Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007). *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. (23-31pp.). Springer.
- Serrano et al. (2024). ArchaeoPyDating: a new user-friendly realise for archeomagnetic dating. *Archaeometry*.(Artículo sometido)
- 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 pp.
- Soler-Arechalde. A.M. (2007). *Investigaciones arqueomagnéticas en México. Fundamentos. Historia y Futuro*. 16-31 pp.
- Soler-Arechalde, A.M., Caballero-Miranda, C, Urrutia-Fucugauchi, J, Osete-López, M.L, López-Delgado, V, Gogichaishvili, A, & Barrera-Huerta, A. (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 pp. E-pub 30 de octubre de 2019.

- Sugiyama, S. (2005). *Human sacrifice, militarism, and rulership: the symbolism of the Feathered Serpent Pyramid at Teotihuacan, Mexico*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sugiyama, S. & López-Lujan, L (ed.) (2006). *Sacrificios de consagración en la Pirámide de la Luna*. Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Tarling, D.D (2007). Archeomagnetism. Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007). *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. (31-33 pp.). Springer.
- Tauxe, L. (2005), *Lectures in Paleomagnetism*, Essay Press, <http://repositories.cdlib.org/sio/library/8>
- Terán-Guerrero A.G., et. al. (2016). Dataciones arqueomagnéticas en la ciudadela de Teotihuacán, Sierra de las navajas y Xalasco. *Arqueología Iberoamericana* 29, 15–20 pp.
- Thellier, E. y Thellier, O., (1959). Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Géophys.* 15, 285–376.
- Urrutia-Fucugauchi, J. (2007). Paleointensity, Demagnetization. Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007). *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. (156-157 pp.). Springer.
- Urrutia-Fucugauchi J., Gogichaishvili A., Pérez-Cruz L., Morales J. (2016). Archaeomagnetic dating of the eruption of Xitle volcano, basin

of Mexico: implications for the Mesoamerican centers of Cuicuilco and Teotihuacan. *Arqueología Iberoamericana* 30: 23-29 pp.

- Valet, J.P. (2007). Paleointensity, Absolute, Techniques. Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007). *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. (753-757 pp.). Springer.
- Villalaín-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
- Wolfman D. (1990). Mesoamerican chronology and archaeomagnetic dating, AD 1-1200. In *Archaeomagnetic dating* Eghmy, J. L. y R. S. Sternberg editors, University of Arizona Press, Tucson.