



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES,
UNIDAD MORELIA

APORTES A LA CRONOLOGÍA ABSOLUTA DE LA
QUEMADA, ZACATECAS - ESTUDIO
ARQUEOMAGNÉTICO INTEGRAL DE LAS ESTRUCTURAS
DE COMBUSTIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN GEOCIENCIAS

PRESENTA:

ANDREA SÁNCHEZ RUIZ

TUTOR:

DR. AVTANDIL GOGICHAISHVILI

COTUTOR:

DR. MIGUEL ÁNGEL CERVANTES SOLANO

Morelia, Michoacán 2024

ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES



UNIDAD MORELIA



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

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

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 07** del **Comité Académico de la Licenciatura en Geociencias** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **24 de agosto de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Andrea Sánchez Ruiz** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **420138644**, con el trabajo titulado: "**Aportes a la cronología absoluta de La Quemada, Zacatecas - Estudio arqueomagnético integral de las estructuras de combustión**", bajo la dirección como tutor del **Dr. Avtandil Gogichaishvili** y como co-tutor el **Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dra. Ana María Soler Arechale
Vocal:	Mtro. Carlos Alberto Torreblanca Padilla
Secretario:	Dr. Avtandil Gogichaishvili
Suplente:	Dr. Gabriel Vázquez Castro
Suplente:	Dr. Gerardo Cifuentes Nava

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 08 de diciembre de 2023.

DRA. YUNUEN TAPIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

Dedicatoria ...

A mis papás, por darme siempre lo mejor, apoyarme en todos mis sueños y ser los mejores papás del mundo. Sin ustedes no estaría aquí, los quiero muchísimo.

A mi hermana Pao, mi más grande apoyo, quien siempre me dio palabras de ánimo, los mejores consejos y mi mejor amiga.

A mis abuelitos David y Servando, por enseñarme a poner todo mi esfuerzo en lo que hago, quisiera que me hubieran visto en la universidad.

A mis amigos de la universidad, Alex, Arely, Azul, Ayelen, Bucio, Daniela, Danlya, Diego, Dinorah, Juan Pablo, Natalia, Paco, Pao, Ricardo, Sarai, Yarco, Yoss, con quienes compartí grandes momentos, prácticas de campo, risas y se volvieron parte de mi familia. Nunca los voy a olvidar.

A Rusty y Tines.

Al grupo de paleomagnetismo y arqueomagnetismo, quienes fueron un gran apoyo e inspiración todos los días.

Agradecimientos

A la máxima casa de estudios la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Escuela Nacional de Estudios Superiores en Morelia, Michoacán, por el honor de pertenecer a esta institución su formación y oportunidades.

A todos mis profesores y profesoras de la Licenciatura en Geociencias, por su dedicación y compromiso con los estudiantes y con las clases.

A la UNAM a través del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT N°IN1000224.

Al Dr. Carlos Torreblanca director del INAH Zacatecas, por las facilidades brindadas durante el muestreo y elaboración de este manuscrito.

A Juan Gerardo Rivera Belmontes del INAH, Zacatecas, autor de las fotografías presentadas.

A los miembros del jurado examinador, Dra. Ana María Soler Arechalde, Dr. Carlos Alberto Torreblanca Padilla, Dr. Avtandil Gogichaishvili, Dr. Gabriel Vázquez Castro y Dr. Gerardo Cifuentes Nava, por sus revisiones, correcciones y recomendaciones para este manuscrito.

Agradezco infinitamente a mis tutores Dr. Avto Gogichaishvili y Dr. Miguel Cervantes, quienes me dieron grandes oportunidades a lo largo de este trabajo y me apoyaron con gran dedicación, por todo el tiempo que se tomaron en ayudarme, la confianza en mí y por compartir sus conocimientos con gran empeño.

Muchísimas gracias al Dr. Ruben Cejudo, quien me enseñó a utilizar los equipos en laboratorio, por sus clases durante la licenciatura, compartir alegremente y con paciencia sus conocimientos, el gran apoyo, tiempo y motivación que siempre me dio.

Infinitas gracias a todos.

Resumen

En este estudio se reportan los resultados arqueomagnéticos de 6 estructuras de combustión que corresponden al sitio arqueológico de La Quemada específicamente del Salón de la Ciudadela y Plaza de los Sacrificios. Los experimentos de magnetismo de roca indican que la titanomagnetita con bajo contenido en titanio es el principal mineral portador de la magnetización en la gran mayoría de las 60 muestras analizadas. Si bien, hay evidencias de la presencia de hematitas antiferromagnéticas su contribución en la magnetización termoremanente es despreciable. Las muestras fueron sometidas a tratamientos magnéticos de desmagnetización progresiva por campos alternos con lo cual se obtuvieron las direcciones arqueomagnéticas.

A partir de las direcciones medias obtenidas se emplearon modelos geomagnéticos y locales disponibles para poder determinar un probable intervalo de edad para cada sitio, debido a que las curvas SHAWQ2k, SHA.DIF,14K, [García-Ruiz et al. \(2022\)](#) y [Mahgoub et al. \(2019\)](#) mostraron resultados ligeramente diferentes, se empleó el método de remuestreo Bootstrap con el cual a partir de un análisis estadístico de los datos se puede determinar intervalos de edad más probables: Salón de la Ciudadela (813 – 825 d.C) y Plaza de los Sacrificios (766 – 786 d.C) y que corresponden con la segunda fase de ocupación: La Quemada (600/650 – 850 d.C) al igual que con el periodo de despoblamiento sistemático de la frontera norte de Mesoamérica durante 800 – 1100 d.C.

Palabras clave: La Quemada, Mesoamérica, Arqueomagnetismo, Geofísica, Zacatecas, Abandono.

Abstract

In this study, the archaeomagnetic results of 6 combustion structures that correspond to the archaeological site of La Quemada are reported, specifically the *Salon de la Ciudadela* and *Plaza de los Sacrificios*. Rock magnetic experiments indicate that titanomagnetite with low titanium content is the main mineral carrying magnetization in the great majority of the 60 analyzed samples. Although there is some evidence of the presence of antiferromagnetic hematites, their contribution to thermoremanent magnetization is rather negligible. The samples were subjected to magnetic treatments of progressive demagnetization by alternating fields in order to obtain structure-mean archaeodirections. Both geomagnetic models and available local curves were used to determine a probable age interval for each site. Because the curves SHAWQ2k, SHA.DIF,14K, García-Ruiz et al. (2022) and Mahgoub et al. (2019) showed slightly different results, the Bootstrap resampling method was used. Based on this statistical analysis of the data, the most probable age intervals can be determined: Salon de la Ciudadela (813–825 AD) and Plaza de los Sacrificios (766–786 AD) corresponding to the second phase of occupation known as La Quemada (600/650–850 AD) as well as the period of systematic depopulation of the northern border of Mesoamerica during 800–1100 AD.

Keywords: La Quemada, Mesoamerica, Archeomagnetism, Geophysics, Zacatecas, Abandonment.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	IV
Abstract	v
1 Introducción	1
2 Fundamentos teóricos	9
2.1 Generalidades del Campo Geomagnético	9
2.1.1 Origen y configuración	9
2.1.2 Variaciones del campo magnético terrestre	12
2.1.3 Inversiones de polaridad	15
2.2 Arqueomagnetismo	17
2.2.1 Registro del campo magnético terrestre en el pasado	17
2.2.2 Magnetismo de rocas	18
2.2.3 Mineralogía magnética	22
2.2.4 Tratamientos magnéticos	25
2.2.5 Visualización de los datos	26
2.2.6 Datación arqueomagnética	28
2.2.7 Aplicaciones del arqueomagnetismo	29
2.3 Arqueomagnetismo en México	30
3 Antecedentes arqueológicos: La Quemada	34
3.1 Estudios cronológicos	34
3.1.1 Edades radiométricas disponibles	35

3.1.2	Edades dendrocronológicas	38
3.1.3	Edades arqueomagnéticas	39
3.1.4	Estudios arqueomagnéticos: La Quemada	41
3.2	Discusión de las edades obtenidas en La Quemada	48
4	Descripción del sitio de estudio y detalles de muestreo	52
4.1	Ubicación	52
4.2	Contexto arquitectónico	52
4.2.1	Edificación	53
4.2.2	Ocupación	54
4.3	Procedencia de muestras analizadas	55
4.3.1	Método de muestreo	58
4.3.2	Preparación de muestras	60
5	Metodología	61
5.1	Tratamientos	61
5.1.1	Desmagnetización por campos alternos	61
5.1.2	Portadores magnéticos	61
5.1.3	Determinación de las direcciones medias por sitio	63
5.2	Datación arqueomagnética	64
5.2.1	Datación arqueomagnética basada en direcciones medias utilizando curvas globales y locales	64
6	Resultados y discusión	66
6.1	Magnetismo de rocas	66
6.2	Tratamientos magnéticos	70
6.2.1	Datación arqueomagnética	74
6.2.2	Implicaciones arqueológicas	79
7	Conclusiones Generales	86

Índice de figuras

1.1	Vista al Salón de las Columnas en el sitio arqueológico de La Quemada (Fotografía: Juan Gerardo Rivera Belmontes).	3
1.2	Planificación del sitio arqueológico La Quemada reproducido de	4
1.3	Cerámica Tepozán de La Quemada. En a) Cajete de cuerpo curvo pintada con motivos geométricos además de un ave con alas extendidas. En b) Olla de cuerpo convergente con tres soportes de botón, decorado con triángulos, líneas y aves (Obtenida de la Colección arqueológica del Museo Nacional de Antropología).	5
2.1	Elementos del campo magnético terrestre (Lanza and Meloni, 2006)	10
2.2	Carta isomagnética para el campo magnético total F en nT (Lanza and Meloni, 2006)	11
2.3	En a) modelo del dipolo axial geocéntrico, en b) modelo dipolar (Santamaría, 2016)	12
2.4	Variación del norte magnético desde 1900 a 2000 (Witze, 2019)	14
2.5	Modelo Glatzmaier-Roberts de la estructura del campo magnético. Se representan líneas del campo para poder visualizar la reversión de polaridad (Glatzmaier and Olson, 2005)	14
2.6	Escala de tiempo Geológico desde el Jurásico Superior, las porciones blancas indican una polaridad inversa, las porciones negras indican una polaridad normal (Garcés and Beamud, 2016)	16
2.7	Adquisición de la magnetización termoremanente en un artefacto arqueológico (Soler-Arechalde, 2006)	17

2.8	Propiedades magnéticas en los materiales. (a) diamagnetismo, (b) paramagnetismo, (c) ferromagnetismo. En presencia de un campo y tras retirarlo. La flecha roja representa la dirección del campo aplicado (Autora: Andrea Sánchez Ruiz)	20
2.9	Diagrama ternario para los óxidos de hierro (Tauxe, 2010)	24
2.10	En a) Red estereográfica representando la declinación e inclinación. Los círculos rellenos indican una inclinación positiva. En b) diagrama de desmagnetización durante el tratamiento de AFD (Tauxe, 2010; Butler, 1992).	26
2.11	Ejemplo del PCA. La línea sólida negra indica la línea de mejor ajuste a partir de los datos de desmagnetización progresiva. Los números en los puntos indican la temperatura durante la desmagnetización térmica. A partir del PCA se obtuvo una declinación de 162°C y una inclinación de 6.4°C (Butler, 1992).	27
2.12	Distribución de los datos arqueomagnéticos en el mundo. a), b) y c) mapa con datos direccionales y de intensidad, d) distribución temporal de los datos en conjunto (Gómez-Paccard et al., 2016)	28
2.13	Periodización de Mesoamérica contextualizado a la historia de México (Mexicana, 2002)	30
2.14	Fragmento M-160 encontrado por Coe en 1967 (Soler-Arechalde, 2006)	31
3.1	Gráfica de edades radiométricas obtenidas en La Quemada (Pimentel et al., 2021)	38
3.2	Gráfica de caja y bigotes de los intervalos arqueomagnéticos en La Quemada. A55 pertenece al Salón de las Columnas, A56 a la Plaza de los Sacrificios, A57, A58, A59 y A60 pertenecen a la cancha de Juego de Pelota (Pimentel et al., 2021).	40
3.3	Cancha de Juego de Pelota en el sitio arqueológico de La Quemada (Fotografía: Juan Gerardo Rivera Belmontes)	41
3.4	Fogones localizados en la parte sur de la cancha de Juego de Pelota (Torreblanca et al., 2020)	42

3.5	Cavidad quemada donde se observan restos óseos cubiertos por ceniza (Torreblanca et al., 2020)	43
3.6	Zonas de muestreo de LQ1, LQ2 (Plaza de los Sacrificios) y LQ3 y LQ4 (Salón de las Columnas)	44
3.7	Proyección estereográfica y estadística de Fisher de las paleodirecciones medias obtenidas	45
3.8	Distribución de los estudios arqueomagnéticos realizados en la frontera norte de Mesoamérica junto con los intervalos de edad obtenidos (Autora: Andrea Sánchez Ruiz)	47
3.9	Intervalos de edad para artefactos arqueológicos de la frontera norte de Mesoamérica. PL (Plazuelas), OC (El Ocote), PA (La Palma), Q (La Quemada), C (El Cópore), A (El Cerrito de los Agaves), L (Lo de Juárez) y PC (El Palacio de Ocomo) (Pimentel et al., 2022).	48
4.1	Sitio arqueológico de La Quemada construido en el cerro de Los Edificios . . .	53
4.2	Principales sitios alrededor de La Quemada durante el periodo Epiclásico (Torvinen and Nelson, 2020).	55
4.3	Modelo de elevación y los puntos de muestreo en La Quemada (Autor: Juan Gerardo Rivera Belmontes).	56
4.4	Ortoimagenes de la Plaza de la Ciudadela (Fotografías: Juan Gerardo Rivera Belmontes).	58
4.5	Ortoimagen de la Plaza de los Sacrificios donde se indican los puntos de muestreo LQ14 Y LQ15 (Fotografías: Juan Gerardo Rivera Belmontes)	58
4.6	Muestreo de los bloques LQ10, LQ11, LQ12, y LQ13 de la Plaza de la Ciudadela.	59
4.7	Muestreo de los bloques LQ14 y LQ15 de la Plaza de los Sacrificios.	59
4.8	Preparacion de las muestras para los experimentos de AFD y medición de la NRM.	60
5.1	En a) magnétometro de giro AGICO JR6. En b) desmagnetizador AGICO LDA5/PAM1	62

5.2	En a) mortero de ágata para la preparación de muestras del experimento de susceptibilidad vs. temperatura. En b) susceptibilímetro Kappabridge MFK1.	63
5.3	Curvas de variación paleosecular (a) declinación, (b) declinación y (c) intensidad a 45°N, 45°E utilizando los modelos ARCH3K.1, SED3K.1 Y CALS3K.3 (Pavón-Carrasco et al., 2011)	65
6.1	Susceptibilidad magnética en función de la Temperatura (curvas K-T). En color rojo se muestra el comportamiento de la susceptibilidad durante el calentamiento y en color azul durante el enfriamiento, la susceptibilidad magnética se muestra en unidades arbitrarias.	69
6.2	Diagramas ortogonales de desmagnetización progresiva por campos alternos.	72
6.3	Proyección estereográfica con las arqueodirecciones promedio obtenidas a nivel bloque LQ10, LQ11, LQ12, LQ13 y LQ14	74
6.4	Diagramas de igual área con las direcciones arqueomagnéticas obtenidas para cada bloque, en color rojo se muestra el promedio de Fisher (para más detalles consultar la tabla 6.1)	75
6.5	Determinación de las edades arqueométricas para el bloque correspondiente a La Ciudadela realizadas con la aplicación desarrollada por Pavón-Carrasco et al., (2014) a partir de: A) el modelo global SHAWQ.2k de Campuzano et al. (2019); B) el modelo global de variación de campo magnético SHADIF.14K de Pavón-Carrasco et al. (2011); C) la curva local de variación paleosecular desarrollada por García-Ruiz et al. (2022) y D) la curva de variación paleosecular propuesta por Mahgoub et al. (2019).	76
6.6	Determinación de las edades arqueométricas para el bloque correspondiente a Plaza de los Sacrificios realizadas con la aplicación desarrollada por Pavón-Carrasco et al., (2014) a partir de: A) el modelo global SHAWQ.2k de Campuzano et al. (2019); B) el modelo global de variación de campo magnético SHADIF.14K de Pavón-Carrasco et al. (2011); C) la curva local de variación paleosecular desarrollada por García-Ruiz et al. (2022) y D) la curva de variación paleosecular propuesta por Mahgoub et al. (2019).	77

6.7	Histogramas de intervalos de edad más probable obtenidos mediante el método de remuestreo Bootstrap, la línea roja indica la edad promedio de la muestra arqueológica mientras que las líneas a azules indican el intervalo del 95 % de confianza. 6.7)	80
6.8	En a) Cerámica incisa-grabada Cantunillo en el área de Malpaso, en b) Cerámica incisa predominante en las regiones de La Quemada.	81
6.9	Muestreo en la Plaza de los Sacrificios. Bloque LQ15 laja del muro norte	83
6.10	Ubicación de los estudios arqueomagnéticos realizados en el sitio arqueológico de La Quemada (Autora: Andrea Sánchez Ruiz)	85

Índice de tablas

2.1	Temperatura de Curie de minerales magnéticos (Tauxe, 2010)	22
2.2	Muestreo arqueomagnético en sitios de México a partir de 1999 (Soler-Arechalde, 2006).	32
3.1	Fechas obtenidas durante 1963 y 1964 del sector de El Cuartel mediante el método de CO ₂ -CS ₂	35
3.2	Fechas obtenidas para los estratos de la Terraza 18 (Nelson, 1997)	36
3.3	Fechas obtenidas para los estratos del Basurero 11 (Nelson, 1997; Salinas, 2007)	37
3.4	Fechas obtenidas para Basureros 7, 12 y 15 (Nelson, 1997; Salinas, 2007)	37
3.5	Edades dendrocronológicas(Pimentel et al., 2021)	39
3.6	Muestras e intervalos obtenidos del Salón de las Columnas y Plaza de los Sacrificios durante el muestreo de 2019 (Pimentel et al., 2021).	40
3.7	Intervalos obtenidos de los sitios de la frontera norte de Mesoamérica utilizando modelos globales y curvas de referencia locales (Pimentel et al., 2022).	50
4.1	Puntos de muestreo arqueomagnético, La Quemada.	57

6.1	Direcciones arqueomagnéticas promedio a nivel sitio. Dec. e Inc. Son los valores de la declinación e inclinación magnética respectivamente, N el número total de muestras tratadas y n es el número de especímenes individuales utilizados en el cálculo del promedio; R, k y α_{95} son los parámetros de dispersión de la estadística de Fisher (1953)	74
6.2	Dataciones arqueomagnéticas. Se muestran los intervalos de edades arqueomagnéticas de cada bloque obtenidas según los modelos geomagnéticos globales y curvas de variación paleosecular locales.	78
6.3	Intervalos de edades más probables obtenidas según el método de Bootstrap para cada bloque.	79
6.4	Estudios arqueomagnéticos realizados en el sitio arqueológico de La Quemada. En rojo se encuentran los nuevos datos cronológicos obtenidos en este estudio.	82

Capítulo 1

Introducción

Las Ciencias de la Tierra o Geociencias estudian la dinámica, evolución y estructura de nuestro planeta el cual cambia constantemente. Al ser un sistema multidimensional, es posible estudiar las interacciones que se presentan ya sea en el aspecto físico, químico y biológico permitiendo comprender diferentes fenómenos que ocurren a lo largo del tiempo geológico (ver por ejemplo, [Tarbuck et al. \(2005\)](#)).

Como parte de las Ciencias de la Tierra, el Paleomagnetismo estudia el origen y la evolución del Campo Magnético Terrestre (CMT) que queda registrado en las rocas (volcánicas o sedimentarias) durante su formación. Se basa en tres suposiciones: 1) Dipolo geocéntrico axial, 2) los minerales ferromagnéticos en las rocas son capaces de registrar el CMT y 3) La magnetización adquirida por una roca durante su formación puede permanecer esencialmente invariable en el tiempo (ver por ejemplo, [Butler \(1992\)](#)). Asimismo, el Arqueomagnetismo como técnica aplicada a los artefactos arqueológicos quemados, utiliza las bases del Paleomagnetismo para estudiar las variaciones espacio-temporales del campo magnético registradas en estructuras compuestas por minerales magnéticos expuestos a altas temperaturas. Gracias al Arqueomagnetismo, es posible caracterizar estos materiales para conocer su procedencia y eventualmente datar eventos arqueológicos importantes como son las etapas ocupacionales, de construcción y posterior declive además de conocer las características del CMT del pasado.

Mesoamérica es un área cultural comprendida por regiones de México, Guatemala, El Salvador, Honduras, Belice, Costa Rica y Nicaragua. Su cronología se ha determinado a lo

largo de tres periodos: Preclásico (2000 a.C 300 d.C), Clásico (300 d.C 900 d.C) y Posclásico (900 d.C 1521 d.C). Estos se caracterizaron por grandes crecimientos poblacionales, políticos, sociales y de urbanismo (ver por ejemplo, [Soler-Arechalde \(2006\)](#)).

En México y como parte de la frontera norte de Mesoamérica, se encuentra el sitio arqueológico de La Quemada en el municipio de Villanueva, Zacatecas. Este ha sido descrito como un centro ceremonial caracterizado por diversas estructuras de las cuales destacan: la cancha de Juego de Pelota, Salón de las Columnas, Pirámide Votiva, entre otros ([Nelson, 1997](#); [Torvinen and Nelson, 2020](#))). El nombre del sitio probablemente se debe a los restos quemados que se encontraron cuando las personas llegaban al lugar a extraer piedra para la construcción de la Hacienda La Quemada durante el siglo XVIII, sin embargo, otras hipótesis sugieren que el nombre proviene de los conquistadores españoles en el siglo XVI cuando vieron el sitio por primera vez ([Hrdlička, 1903](#)).

En la zona se han llevado a cabo numerosos estudios arqueológicos con el objetivo de deducir su cronología, pues el origen y posterior declive aún siguen siendo un misterio. En este asentamiento se observa la evidencia de un gran incendio el cual pudo haber ocasionado la destrucción de la ciudad. Gracias a los estudios radiométricos, dendrocronológicos y arqueomagnéticos, se han podido establecer tres fases de ocupación: Malpaso (400-600/650 AD), La Quemada (600/650-850 AD) y Ciudadela (850-1000 AD) ([Kelley, 2019](#); [Jiménez Betts and Darling, 2000](#); [Nelson, 1997](#); [Hers, 2005](#)). El lugar se ha llegado a asociar con el legendario Chicomoztoc, un enclave teotihuacano o la capital de todos los grupos indígenas asentados al norte del río grande de Santiago ya que La Quemada servía como una entidad política de, al menos, 220 pueblos ([Nelson, 2015](#)).

La construcción de La Quemada puede describirse en torno a su función, según [Nelson \(1997\)](#) a partir del núcleo monumental (conformado por grandes paredes y estructuras como el Salón de las Columnas y la Pirámide Votiva), y las áreas en los bordes (hechas de terrazas de menor tamaño). Al encontrarse edificada en el cerro de Los Edificios, el sitio arqueológico cuenta con grandes plataformas que fueron utilizadas con fines ceremoniales, administrativos y de vivienda. Siendo así, se observa que el sitio presenta cinco niveles ([Pimentel et al., 2021](#)) (Figura 1.1).



Figura 1.1: Vista al Salón de las Columnas en el sitio arqueológico de La Quemada (Fotografía: Juan Gerardo Rivera Belmontes).

El primer nivel (Figura 1.2) servía como acceso común para los habitantes, así como la cancha de Juego de Pelota de donde se han obtenido cuatro intervalos probables mediante datación arqueomagnética; en el segundo nivel se encontraban los complejos habitacionales, de uso ceremonial y administrativo; el tercer nivel se caracterizaba por la Plaza de los Sacrificios el cual cuenta con una datación arqueomagnética, además de la obtenida en este estudio. En el quinto nivel se presenta el conjunto de la Ciudadela en donde se observan construcciones de uso ceremonial, así como de defensa posiblemente construido durante el final de la ocupación de La Quemada. Esta estructura podría dar indicios de los conflictos que tuvo el sitio ya sea, político, social o bélico (Jiménez, 1990).

Las estructuras del sitio se encuentran construidas con lajas de riolita las cuales se unieron utilizando un mortero compuesto de arcilla que al erosionarse provoca el deterioro de los muros. Se observa que sobre los muros se aplicaron aplanados de barro y un encalado pulido a lo largo de todo el asentamiento.

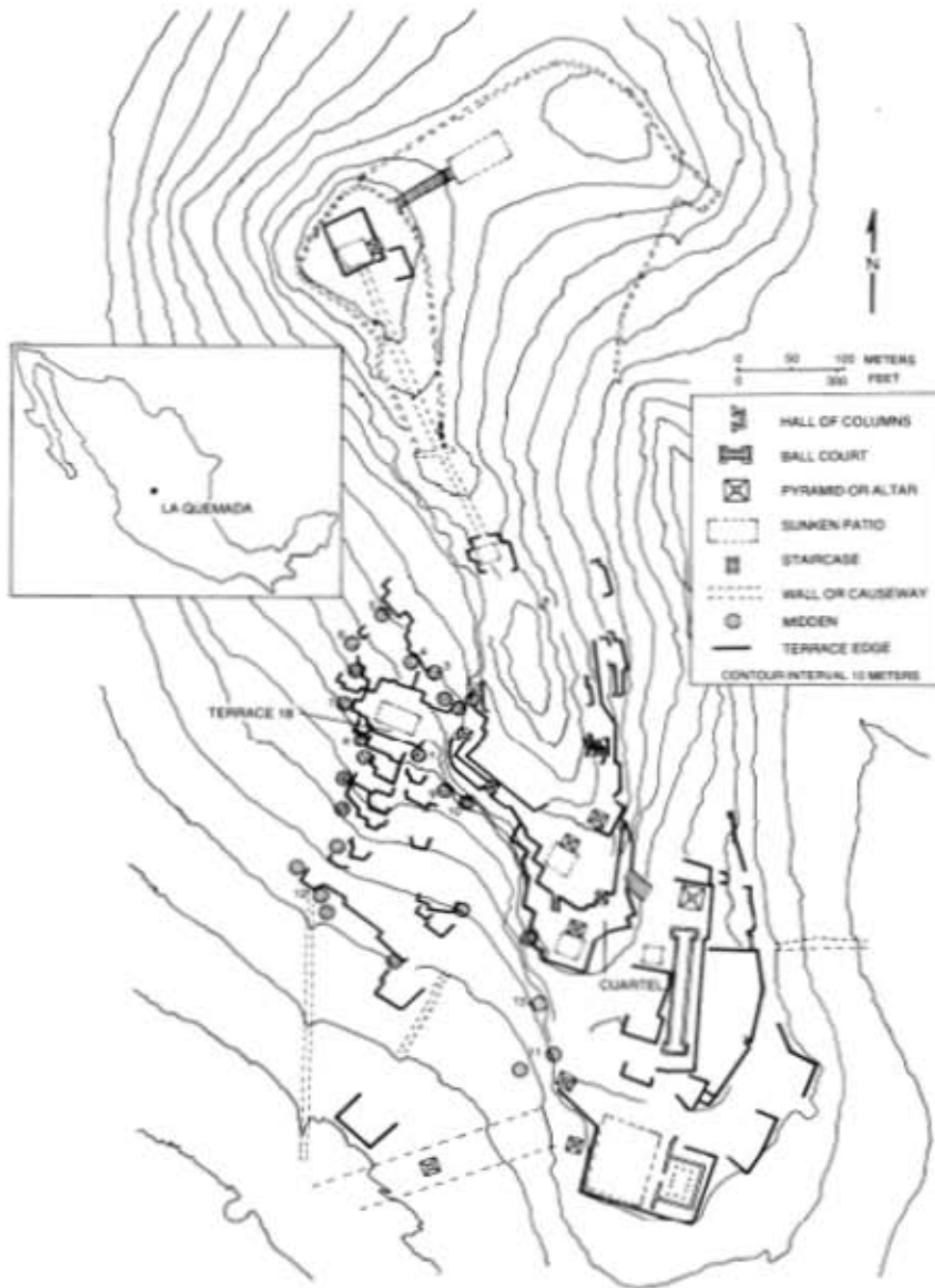


Figura 1.2: Planificación del sitio arqueológico La Quemada reproducido de (Nelson, 1997)

El inicio ocupacional de La Quemada coincide con el declive de Teotihuacán y con ello surge la necesidad de tener un nuevo centro administrativo y político, además, posiblemente la minería y el comercio de la turquesa fueron una gran parte del desarrollo de las sociedades en la frontera norte de Mesoamérica (Berney, 2002). Estas piedras se encontraron en sitios arqueológicos de Mesoamérica desde 600 a.C, donde el control por su comercio pudo haber sido una gran fuente de poder económico, ya que, de acuerdo con los trabajos realizados por Weigand (1975); Weigand et al. (1977), La Quemada formaba parte de una ruta de turquesa desde el Cañón Chaco al suroeste de América hasta Tula en el centro de México (Nelson, 1997).

En cuanto a las interacciones que tuvo el sitio con sus alrededores destaca Alta Vista, perteneciente a la cultura de los chalchihuites. De la cerámica Cantunillo correspondiente a la cultura de los chalchihuites, se encuentra una similitud con el tipo de cerámica de La Quemada conocida como Tepozán (Strazicich, 1995; Pimentel et al., 2021; Wells, 2000), de las que destacan características incisas grabadas y loza grabada (Figura 1.3).



Figura 1.3: Cerámica Tepozán de La Quemada. En a) Cajete de cuerpo curvo pintada con motivos geométricos además de un ave con alas extendidas. En b) Olla de cuerpo convergente con tres soportes de botón, decorado con triángulos, líneas y aves (Obtenida de la Colección arqueológica del Museo Nacional de Antropología).

Durante la segunda fase de ocupación, la cerámica pasó de motivos geométricos a las representaciones figurativas como las aves con alas extendidas, felinos y motivos geométricos de las piezas (Figura 1.3). La distribución y estilo de la cerámica ha sido clasificada de acuerdo con los diseños que pueden asociarse a diferentes periodos temporales, además del intercambio entre otros asentamientos como Los Pilarillos.

Desde las primeras excavaciones en 1833 se han encontrado numerosos restos humanos en áreas ceremoniales como el Salón de las Columnas y la pirámide en el Cuartel. De acuerdo con estos hallazgos existen tres alternativas en las interpretaciones de los restos óseos encontrados según Nelson et al. (1992) 1) donde estos provienen de los enemigos asesinados, 2) que las víctimas de sacrificio fueran miembros de la comunidad o prisioneros y 3) que los huesos pertenezcan a miembros venerados de la comunidad, preservando sus restos en estructuras mortuorias para honrar su memoria. Otros trabajos que se han realizado en la zona han permitido conocer el contexto histórico, político y social de este asentamiento; uno de ellos fue el trabajo realizado por Nelson (1997), quien publicó los contextos estratigráficos de las excavaciones realizadas entre 1988 y 1993. Otro autor es Trombold (2005) con un estudio sobre la población en el Valle de Malpaso región dominante del sitio La Quemada; y Wells (2000) con su trabajo enfocado en la producción de la cerámica, organización y estructura residencial de La Quemada.

Anteriormente, se sabía poco sobre la estructura e interacciones en las que se regía el sitio arqueológico de La Quemada; fue a partir de los estudios de datación los que facilitaron definir su secuencia ocupacional, sin embargo, las cuestiones por las que se llegó a la destrucción y subsecuente abandono siguen siendo analizadas. Gracias a los estudios de datación arqueomagnética en los sitios arqueológicos, tales como El Cerrito de los Agaves, El Cópore, El Ocote, El Palacio de Ocomo, La Palma, Lo de Juárez, Plazuelas, El Cerrito y La Quemada (ver Ruiz et al. (2019); López et al. (2021); Esparza López et al. (2021); Pomedio et al. (2022); Morales et al. (2015); Pimentel et al. (2020); Morales et al. (2020)) se ha podido contextualizar el declive y abandono de los principales sitios arqueológicos de la frontera norte de Mesoamérica.

Con lo anterior, desde el punto de vista arqueológico, las nuevas dataciones obtenidas en este trabajo son una contribución importante a la cronología ocupacional del sitio, desde

el punto de vista geofísico representan nuevos datos sobre el comportamiento del campo Geomagnético registrado durante el tiempo en La Quemada.

Hipótesis

Mediante los estudios que se han realizado en el sitio de La Quemada, se han podido determinar las tres fases de ocupación gracias a las técnicas de datación radiométrica, dendrocronológica y arqueomagnética.

En este trabajo, los resultados obtenidos correspondientes a las muestras del Salón de la Ciudadela y Plaza de los Sacrificios permiten asociar dos intervalos respectivamente. Estos indican que el abandono y destrucción de la ciudad fue de manera gradual.

Objetivo general

Obtener direcciones arqueomagnéticas (declinación e inclinación) medias registrado en artefactos quemados localizados en el sitio arqueológico de La Quemada, Zacatecas mediante los tratamientos magnéticos (desmagnetización por campos alternos), con la finalidad de obtener nuevos intervalos de edades para el sitio y así contribuir a la cronología absoluta de la Quemada y de la frontera septentrional de Mesoamérica.

Objetivos específicos

- Identificar la presencia de minerales magnéticos portadores de la magnetización remanente con base en las temperaturas de Curie proporcionadas por las curvas termomagnéticas continuas (Susceptibilidad en función de temperatura).
- Obtener las componentes primarias de dirección arqueomagnética (declinación, inclinación) registrados en las muestras para conocer la configuración del campo magnético antiguo a partir de la desmagnetización por campos alternos y el análisis por componentes principales.
- Determinar y asociar un intervalo de edad para las muestras del sitio arqueológico de La Quemada, Zacatecas utilizando las curvas locales y modelos geomagnéticos

disponibles de datación para así contribuir a definir la cronología del sitio y conocer las características espacio-temporales del CMT.

Justificación

Este estudio arqueomagnético en La Quemada es de suma importancia tanto arqueológica como geofísica, puesto que permite conocer cómo ha evolucionado el campo magnético de la Tierra, además de definir intervalos de edad para eventos constructivos importantes; esto ayuda a conocer el desarrollo de los asentamientos arqueológicos más importantes de la frontera norte de Mesoamérica, tal es el caso de La Quemada, donde eventos de conquista, colonización y exploración por otros grupos como los Toltecas requieren de un amplio análisis para poder identificar posibles relaciones sociales y culturales ([Nelson, 1997](#)).

A partir del estudio de la termorremanencia adquirida por materiales arqueológicos de distintas edades, se pueden establecer curvas de variación secular del CMT, lo que contribuye a fundamentar el método de datación arqueomagnética como una técnica confiable ([Carrancho et al., 2022](#)). Por lo tanto, los resultados de este trabajo aportarán nuevas dataciones que contribuirán a la cronología del sitio y a comprender cómo fue el proceso de abandono ([Pimentel et al., 2021](#)).

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1. Generalidades del Campo Geomagnético

Al igual que los planetas en el sistema solar, la Tierra posee un campo magnético propio del cual se tuvieron las primeras evidencias con el uso de la brújula desde el siglo IX d.C. y XII d.C. Sin embargo, fue el primer estudio del Campo Magnético Terrestre (CMT) conocido como De Magnete por Sir W. Gilbert (ver ([Lanos, 2019](#))) en donde se exponen experimentos y observaciones relacionados con imanes naturales para explicar el funcionamiento de la brújula y cómo ésta apunta hacia el norte, lo que llevó a deducir que este instrumento funciona debido al comportamiento magnético de la Tierra y con ello dando inicio al Geomagnetismo, rama de la geofísica que estudia el campo magnético de la Tierra.

2.1.1. Origen y configuración

El origen del CMT es producido por las corrientes de convección que ocurren en el núcleo externo líquido de la Tierra, el cual está formado por hierro, níquel y otros componentes que hacen que el fluido se comporte como un electro-conductor ([García-Redondo, 2023](#)) que se mueve a través de un campo magnético débil y a su vez genera una corriente eléctrica. Este es controlado por el movimiento de rotación de la Tierra sobre su propio eje causando que funcione como un dínamo auto sostenido creando el CMT ([Tauxe, 2010](#)).

Para un punto en la superficie, el CMT es un vector (F) el cual se puede descomponer

en tres direcciones o componentes (Figura 2.1): el eje-x (X) se encuentra en el meridiano geográfico al norte, el eje-y (Y) está en el paralelo geográfico en dirección al este y el eje-z (Z) que se encuentra paralelo a la vertical en el punto positivo hacia abajo .

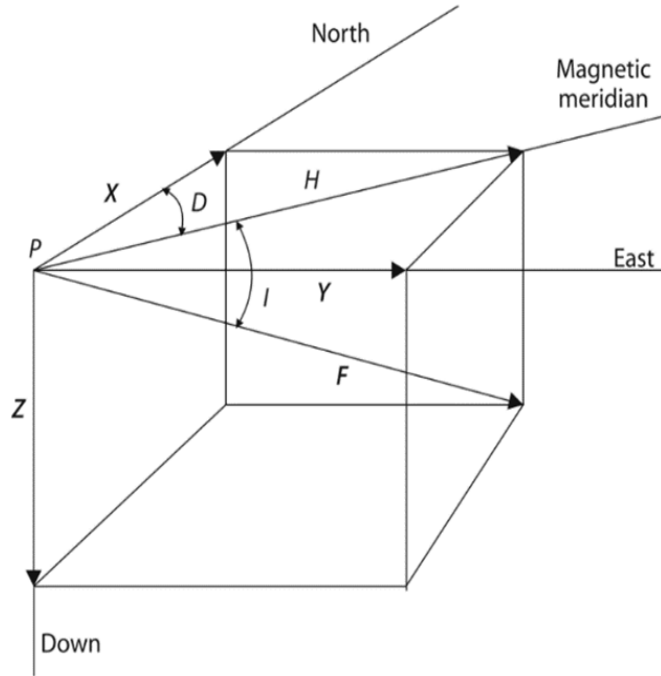


Figura 2.1: Elementos del campo magnético terrestre (Lanza and Meloni, 2006)

Para describir al CMT también se utilizan los elementos angulares, los cuales se obtienen a partir de dos ángulos: inclinación (I) del vector F con respecto al plano horizontal (H) y la declinación (D) que es el ángulo entre H, el componente horizontal F y el componente X. Estos se describen mediante las siguientes ecuaciones (Lanza and Meloni, 2006):

$$H = F \cos I; Z = F \sen I; Z = H \tan I; X = H \cos D; Y = H \sin D \quad (2.1)$$

La intensidad del campo magnético varía entre los 20,000 nT en el ecuador y 70,000 nT en los polos. Su morfología se representa mediante cartas isomagnéticas (Figura 2.2) las cuales muestran curvas de un mismo valor de una componente individual y que se han adquirido mediante observaciones magnéticas a lo largo del tiempo.

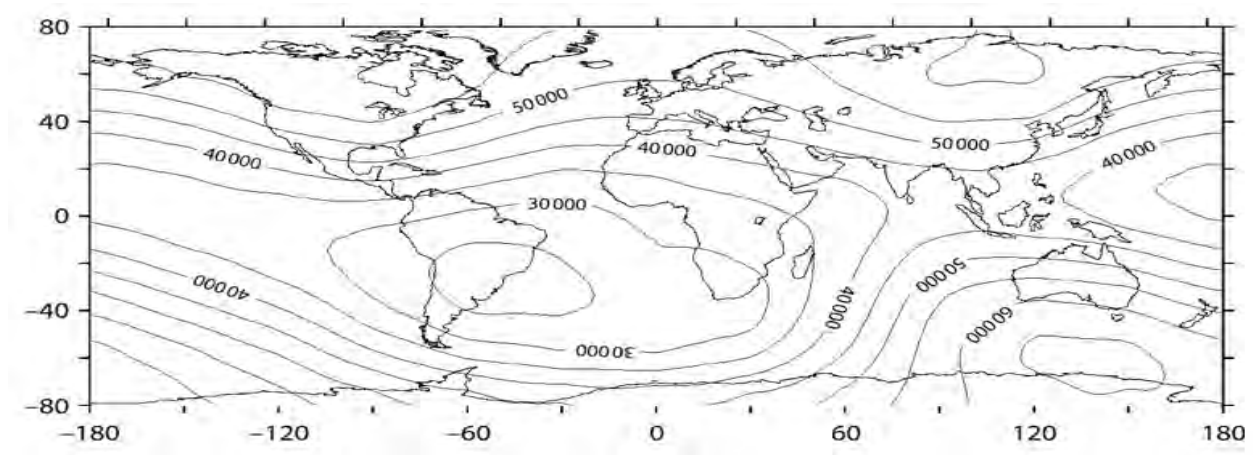


Figura 2.2: Carta isomagnética para el campo magnético total F en nT (Lanza and Meloni, 2006)

Modelo del dipolo geocéntrico axial y modelo dipolar El modelo del dipolo geocéntrico axial (GAD) (Figura 2.3) describe cómo el campo es creado por un dipolo situado en el centro de la Tierra, el cual se basa en cuatro leyes de la teoría electromagnética (García Pimentel et al., 2020; Arreola, 2022):

$$\nabla \times B = \mu j \quad (2.2)$$

Donde B es el campo magnético, j es la densidad de corriente y μ es la permeabilidad del espacio en el vacío.

Ley de Faraday: Explica que un campo eléctrico es generado cuando un campo magnético varía en el tiempo:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E \quad (2.3)$$

Forma electromagnética de la Ley de Ohm: Describe que un conductor ya sea sólido o líquido, se mueve a una velocidad u y σ es la conductividad eléctrica en el núcleo.

$$j = \sigma(E + u \times B) \quad (2.4)$$

Simplificando esta ecuación obtenemos la cuarta ley que explica la divergencia del campo magnético es igual a cero o, en otras palabras, los monopolos magnéticos no existen.

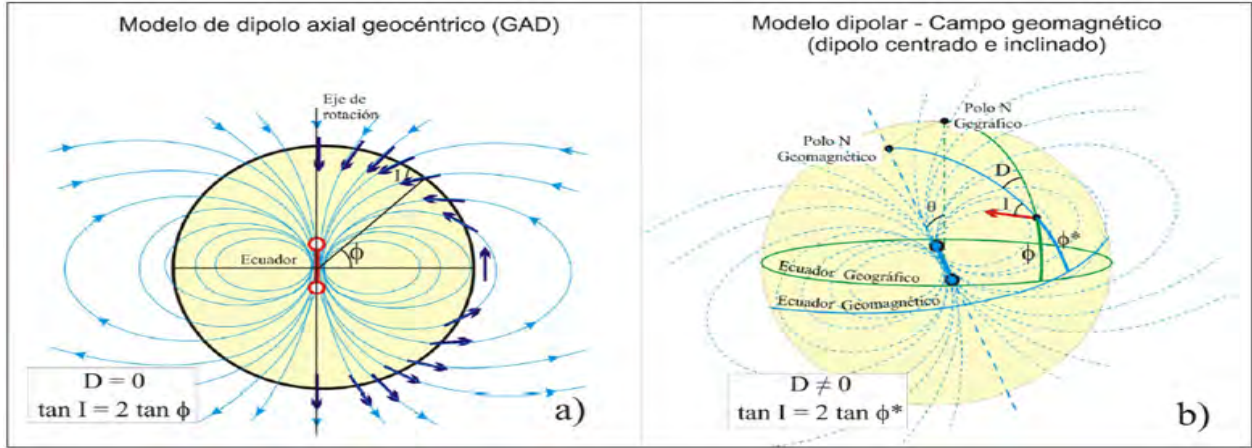


Figura 2.3: En a) modelo del dipolo axial geocéntrico, en b) modelo dipolar (Santamaría, 2016)

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.5)$$

El modelo es una aproximación en la que se infiere que el dipolo magnético está alineado e inclinado a 11° con respecto al eje de rotación de la Tierra y explica la relación entre la latitud ϕ y la inclinación magnética I (García-Redondo, 2023).

$$\tan I = 2 \tan \phi \quad (2.6)$$

El modelo dipolar (Figura 2.3 b) muestra la geometría del CMT donde el campo es creado por un dipolo en el centro con cierta inclinación y explica las variaciones entre valores de declinación y la diferencia entre los polos geográficos y magnéticos (Santamaría, 2016). No obstante, se encuentran diferentes modelos que describen al CMT y que gracias a los diferentes estudios magnéticos alrededor del mundo, el International Geomagnetic Reference Field (IGRF) genera modelos del campo que se actualizan constantemente (García Pimentel et al., 2020).

2.1.2. Variaciones del campo magnético terrestre

El campo magnético terrestre varía en intensidad y dirección a lo largo del tiempo debido al movimiento convectivo del núcleo externo. Estos cambios se clasifican según la magnitud y

duración local o regional además de si el origen es interno o externo (ionosfera y magnetosfera) (Lanza and Meloni, 2006). Debido a que las variaciones de origen externo dependen de la actividad solar, los mecanismos de adquisición de la magnetización no permiten su registro y los análisis paleomagnéticos no son posibles. Por otro lado, las variaciones de origen interno relacionadas principalmente con el campo magnético de la Tierra quedan registradas en artefactos arqueológicos y volcánicos fácilmente observables en los estudios paleomagnéticos y arqueomagnéticos (Santamaría, 2016; Lanza and Meloni, 2006).

Variación secular

Esta variación es la que experimenta el CMT en una escala de tiempo mayor a 5-10 años respecto a un polo geográfico, su origen es interno y en este caso el campo magnético experimenta un cambio en dirección e intensidad de manera continua o semi-continua (Lanza and Meloni, 2006). Se ha llegado a determinar esto gracias a observaciones geomagnéticas en donde se grafica para varios años algún elemento del CTM en función del tiempo (Figura 2.4). A partir de esto, se observa que, para latitudes medias la declinación respecto al norte actual se encuentra entre los 20° , mientras que la inclinación se encuentra entre los 40° y 60° principalmente (García-Redondo, 2023), a su vez, la rotación del núcleo externo respecto al manto se relaciona con la variación de la dirección del CMT al oeste.

A pesar de que estos cambios ocurren a nivel global, se encuentran variaciones regionales, las cuales permiten realizar curvas de variación secular (Tarling, 2021) por áreas y bloques, estas curvas son utilizadas como referencia para estudios paleomagnéticos además del arqueomagnetismo: técnica de datación para estructuras arqueológicas.

Excursiones geomagnéticas Cuando los polos intercambian su posición, se experimenta, por lo regular, una disminución de la intensidad. Pese a ello, debido a la inestabilidad del CMT los intercambios de posición de los polos pueden no completarse (Figura 2.5), a este fenómeno se le conoce como excursión geomagnética (Butler, 1992).

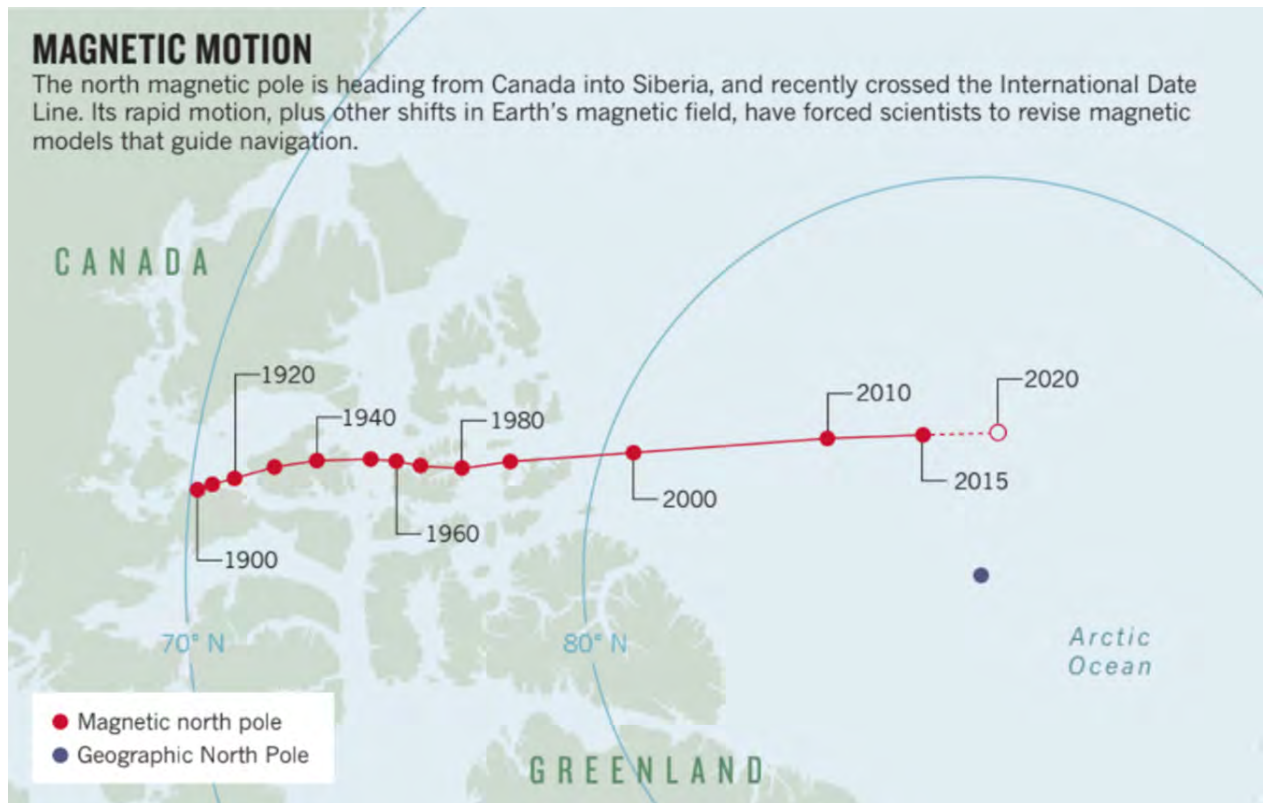


Figura 2.4: Variación del norte magnético desde 1900 a 2000 (Witze, 2019)

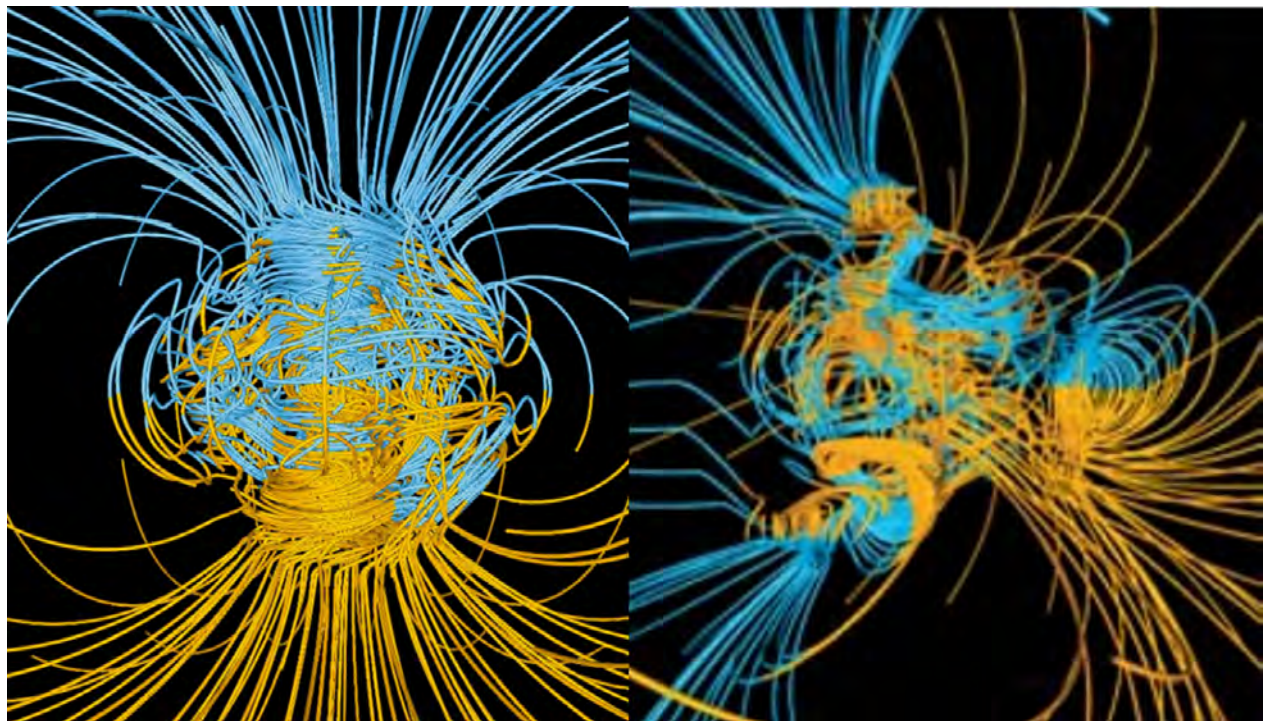


Figura 2.5: Modelo Glatzmaier-Roberts de la estructura del campo magnético. Se representan líneas del campo para poder visualizar la reversión de polaridad (Glatzmaier and Olson, 2005)

2.1.3. Inversiones de polaridad

El fenómeno de inversión de polaridad se conoce desde que Bernard Brunhes descubrió en 1906 rocas volcánicas magnetizadas inversamente, esto ocurre cuando los polos N y S intercambian su posición durante un periodo de tiempo corto menor a 5000 o inclusive 10000 años en ciertas ocasiones ([Soler-Arechalde, 2006](#)).

Se puede describir mediante el polo geomagnético virtual donde un punto en la superficie corresponde con los polos del dipolo axial generando la dirección del campo en una ubicación determinada ([García Pimentel et al., 2020](#); [García-Redondo, 2023](#)). Durante este fenómeno, la caída de la intensidad causa que el campo dipolar se desestabilice, además de un periodo transicional donde el polo presenta un comportamiento errático; estos periodos pueden tener una duración de algunos miles de años, sin embargo, otros autores han sugerido transiciones de menor tiempo.

Las inversiones de polaridad han ocurrido a lo largo de tiempos geológicos y fueron descubiertas mediante el estudio de los minerales magnéticos, los cuales se alinean en la dirección del campo magnético cuando un material es expuesto a altas temperaturas (magnetización termoremanente). Una forma de visualizar las inversiones de polaridad es mediante la Escala de Tiempo de Polaridad Geomagnética (GPTS). Esta se basa en lavas (principalmente) distribuidas globalmente con pares de edades radiométricas y polaridades magnéticas. Inicialmente se creía que los intervalos de polaridad tenían una duración de 1 Ma, y se denominaron épocas de polaridad, mientras que a los intervalos más cortos se les llama eventos de polaridad ([Garcés and Beamud, 2016](#)).

Con el descubrimiento de las anomalías magnéticas del fondo oceánico se pudo obtener un registro de las inversiones geomagnéticas hasta el Jurásico Superior, ocurren durante la expansión oceánica cuando el material del manto asciende por la dorsal oceánica, se solidifica y forma nueva litosfera. En la parte superior, la corteza que se forma está compuesta por rocas ígneas con contenido de titanomagnetita quienes adquieren una magnetización térmica remanente (TRM) durante su enfriamiento y en presencia de un CMT, registrando las inversiones de polaridad ([Tarbuck et al., 2005](#)). Las secuencias de polaridad de la GPTS se dividen en dos tiempos: polaridad inversa y polaridad normal, unidades conocidas como crones, mientras que para episodios largos (10^7 - 10^8 Ma) se les denomina supercrones (Figura

2.6).

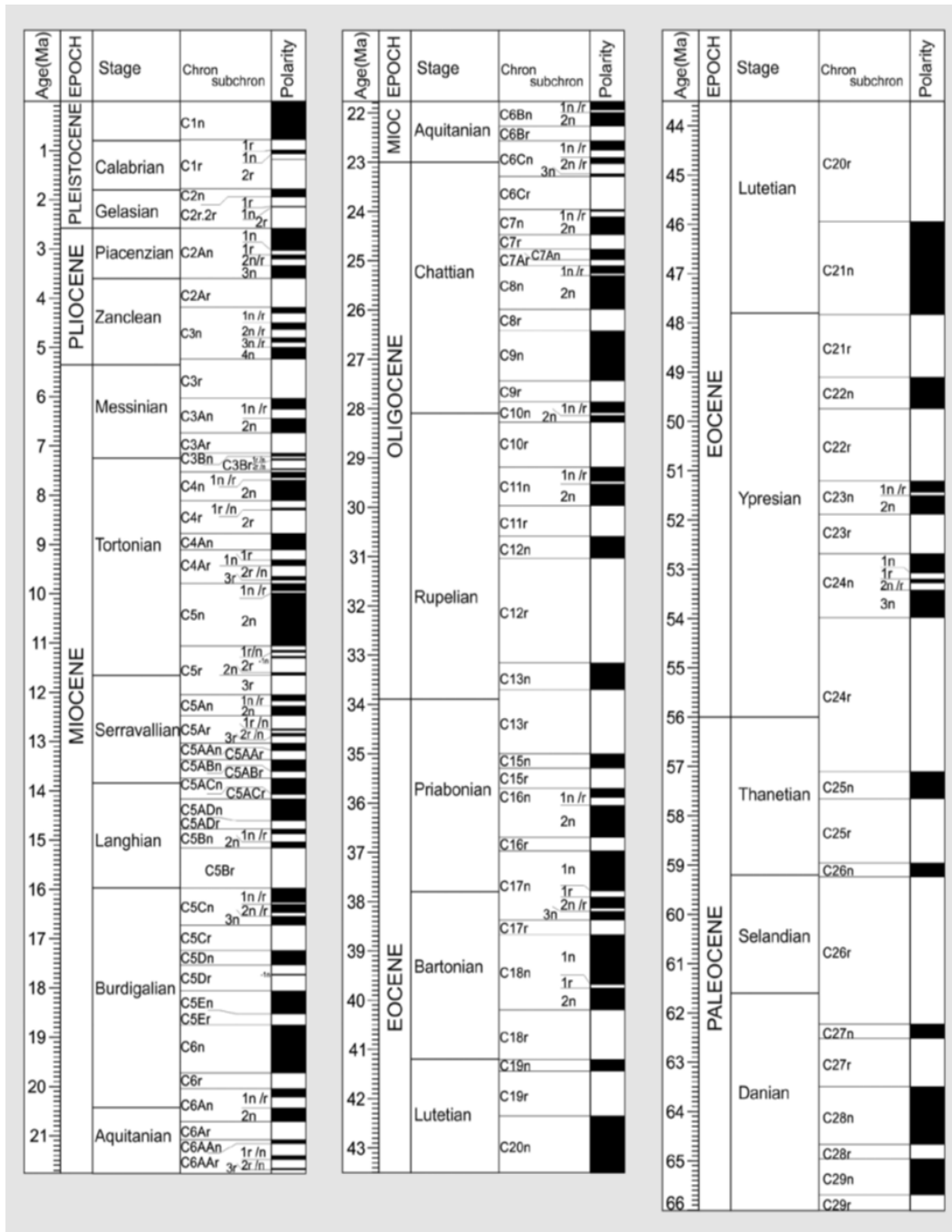


Figura 2.6: Escala de tiempo Geológico desde el Jurásico Superior, las porciones blancas indican una polaridad inversa, las porciones negras indican una polaridad normal (Garcés and Beaud, 2016)



Figura 2.7: Adquisición de la magnetización termoremanente en un artefacto arqueológico (Soler-Arechalde, 2006)

2.2. Arqueomagnetismo

El Arqueomagnetismo es una rama de la arqueometría en donde se aplican los principios del paleomagnetismo en el ámbito arqueológico. Como se ha mencionado anteriormente, se basa en las propiedades que se han descrito a lo largo de este capítulo, tales como el magnetismo natural y el registro del campo magnético en artefactos con una composición de óxidos de hierro. Estos artefactos corresponden a hornos, fogones, comales, temazcales, pisos, techos y muros (Figura 2.7) que durante su última exposición al fuego son capaces de registrar la dirección e intensidad del CMT (Soler-Arechalde, 2006; Lanos, 2019; Tarling, 2021).

2.2.1. Registro del campo magnético terrestre en el pasado

Anteriormente se describieron las variaciones que presenta el CMT a lo largo del tiempo. Los cambios de corto periodo tienen un origen externo en la ionosfera o magnetosfera asociado a la actividad solar, mientras que las variaciones de largo periodo tienen un origen interno observable a través de los estudios paleomagnéticos y arqueomagnéticos.

Por medio de los estudios paleomagnéticos se ha podido analizar el campo magnético antiguo que queda registrado en las rocas, esto ha permitido obtener y generar curvas de variación paleosecular (PSV). Por consiguiente, la magnetización de un material se atribuye a dos condiciones: la magnetización que existe en presencia de un campo magnético externo (magnetización inducida), y la magnetización presente en un campo magnético externo nulo (magnetización remanente) (Tauxe, 2010; Lanos, 2019). El comportamiento magnético de los

materiales se atribuye al movimiento de los electrones que responden a un campo magnético aplicado, así como a las partículas que conforman al átomo que tienen la capacidad de generar momentos magnéticos. En el caso del electrón, el momento magnético generado es proporcional a su momento angular (Tauxe, 2010; Lanza and Meloni, 2006; Butler, 1992), creando una magnetización inducida M_i en función de un campo aplicado H .

$$M_i = \chi H \quad (2.7)$$

Siendo χ a susceptibilidad magnética que es la capacidad con la que se magnetiza un material en presencia de un campo magnético. Por lo tanto, los momentos magnéticos tienden a alinearse en la dirección del campo magnético H , esto es debido a que corresponde a su mínima energía potencial, y por lo tanto, la suma de todos los momentos magnéticos es el momento magnético total del átomo (\vec{m}).

Una forma de describir el campo magnético para un punto es a partir de la siguiente ecuación:

$$B = \mu_o H + \mu_o J \quad (2.8)$$

Donde B es la inducción magnética (en T), H es la fuerza del campo magnético (en Am^{-1}), J es la magnetización (en Am^{-1}) y μ_o la permeabilidad. Al aplicar un campo H los momentos magnéticos del material modifican su grado de alineamiento al igual que su magnetización. Para cada material, la respuesta magnética es diferente en relación con la susceptibilidad y por estas condiciones se tienen 3 clasificaciones según las propiedades magnéticas de cada uno: Diamagnetismo, Paramagnetismo y Ferromagnetismo (Tauxe, 2010; Soler-Arechalde, 2006; Lanza and Meloni, 2006).

2.2.2. Magnetismo de rocas

Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo

Diamagnetismo Se relaciona con el momento magnético orbital. Los electrones se mueven en una órbita circular con una velocidad angular ω y, por lo tanto, tienen un momento magnético. Cuando se tiene la presencia de un campo magnético B , los electrones

son sometidos a la fuerza de Lorentz. Al estar sometidos a un campo magnético externo se adquiere un momento magnético opuesto a la dirección del campo y si todos los orbitales en la molécula están completos, los momentos magnéticos de los electrones se cancelan (Figura 2.8 a) y el momento total se vuelve nulo (Lanza and Meloni, 2006).

$$F_L = ev \times B \quad (2.9)$$

Por lo tanto, los materiales con comportamiento diamagnético presentan una susceptibilidad negativa y pequeña con una magnetización opuesta al campo. Un ejemplo de estos materiales son el agua, plomo, cuarzo, calcita, entre otros.

Paramagnetismo Este tipo de materiales (Figura 2.8 b) tiene su propio momento magnético por lo que no todos los orbitales están completos, y los electrones que no tienen par cuentan con un spin magnético libre (Lanza and Meloni, 2006; Soler-Arechalde, 2006). Al aplicar un campo magnético externo, los momentos magnéticos de spin desapareados se orientan en la dirección de este campo el cual produce una magnetización en el mismo sentido (Figura 2.8b), en este caso, los materiales como el aluminio, magnesio, titanio, aire, entre otros presentan una susceptibilidad positiva y una magnitud mayor a diferencia de los materiales diamagnéticos, no obstante, los paramagnéticos son fuertemente dependientes de la temperatura ya que la energía térmica es mayor que la magnética por lo que, en ausencia del campo magnético externo, los spines se orientaran nuevamente de forma aleatoria (Santamaría, 2016).

Ferromagnetismo El comportamiento ferromagnético (Figura 2.8 c) se presenta en algunos compuestos de hierro, como el níquel, cobalto, acero, hierro, entre otros y se caracterizan por tener una susceptibilidad positiva y grande. Para algunos materiales metálicos con electrones desapareados, los átomos se encuentran en posiciones cercanas a la red cristalina causando que los momentos magnéticos tengan una fuerte interacción entre sí (Santamaría, 2016; Soler-Arechalde, 2006; Tauxe, 2010). En estos casos, el material puede retener una magnetización remanente incluso cuando no se encuentra en presencia de un campo externo, esta propiedad es fundamental para el paleomagnetismo (Figura 2.8 c).

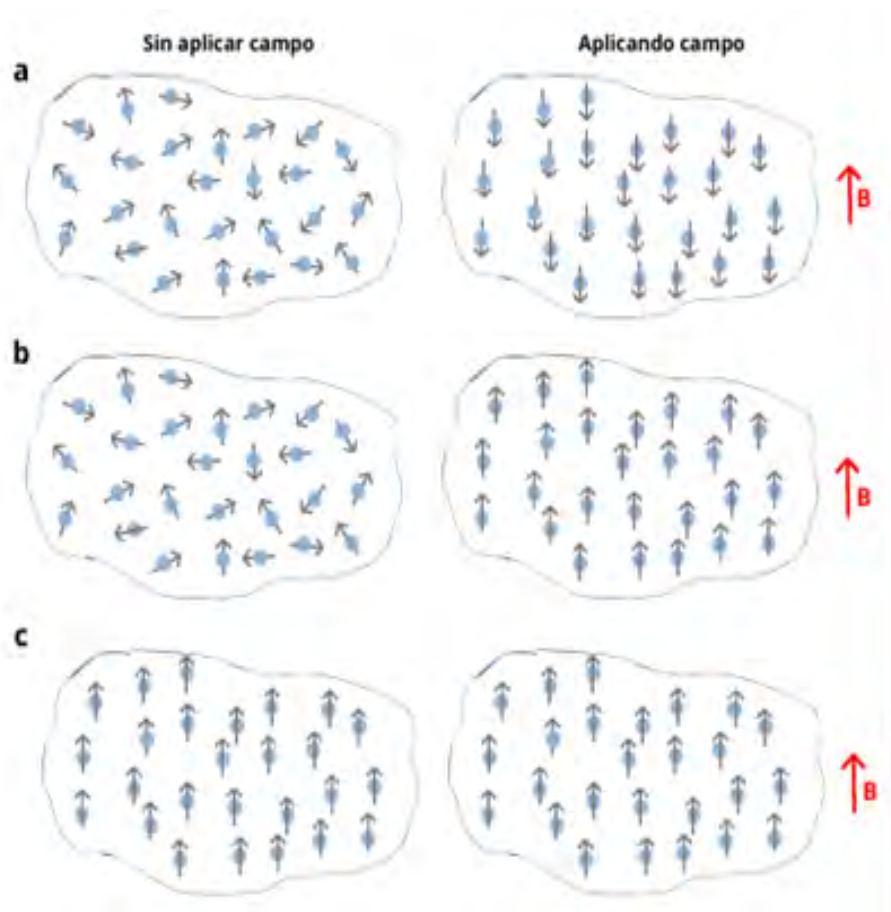


Figura 2.8: Propiedades magnéticas en los materiales. (a) diamagnetismo, (b) paramagnetismo, (c) ferromagnetismo. En presencia de un campo y tras retirarlo. La flecha roja representa la dirección del campo aplicado (Autora: Andrea Sánchez Ruiz)

Dominios magnéticos

Un material ferromagnético se compone de dominios o zonas en las que hay un ordenamiento de los momentos magnéticos además de una magnetización uniforme equivalente a la de saturación M_s . En esta zona ocurren los fenómenos magnéticos elementales que puede determinar las propiedades magnéticas de una roca (Lanza and Meloni, 2006; Santamaría, 2016; Soler-Arechalde, 2006). En un grano ferromagnético, los momentos del spin de electrones se encuentran de forma paralela, como resultado se tendrá una magnetización J_r con una energía magnetostática E_m que es proporcional al volumen del grano. Conforme el volumen aumenta la E_m también, siendo así, el grano se subdivide en dos o más partes causando que la alineación de los momentos sea antiparalela y, por ende, E_m decrece. Describiendo lo anterior, existen tres tipos de dominios:

- Dominio sencillo (DS): Este solo contiene un dominio en donde los cambios de magnetización son causados por la rotación de los espines atómicos. Tiene una magnetización fuerte igual a la de saturación ya que todos los momentos de los espines están paralelos, alta coercitividad y relativamente baja susceptibilidad (Butler, 1992).
- Dominio pseudo-sencillo (DPS): No se tiene una magnetización uniforme, presenta una alta remanencia de saturación al igual que fuerza de coercitividad (Butler, 1992).
- Dominio múltiple (MD): Este se caracteriza por tener más de un dominio, su magnetización es menor a la de saturación ya que su dirección es diferente entre cada dominio, baja coercitividad y alta susceptibilidad (Butler, 1992).

Al aplicar un campo, la magnetización que se genera es muy intensa y todos los dominios magnéticos se alinean en la misma dirección de este. Sin embargo, estos materiales al calentarse pierden las propiedades ferromagnéticas una vez que llegan a la temperatura de Curie convirtiéndose en paramagnéticos. Este tipo de comportamiento no se observa en su estado puro en las rocas sino en la corteza donde los minerales ferrimagnéticos y antiferromagnéticos son muy comunes (Tauxe, 2010; García-Redondo, 2023; Arreola, 2022).

Mineral	T _c [°C]
Greigita (Fe_3S_4)	330
Goethita ($FeOOH$)	70 - 125
Hematita (Fe_2O_3)	675
Maghemita (Fe_2O_3)	590 - 675
Magnetita (Fe_3O_4)	580
Pirrotita (Fe_7S_8)	325
Titanomagnetita ($TiFe_2O_4$)	<580

Tabla 2.1: Temperatura de Curie de minerales magnéticos (Tauxe, 2010)

2.2.3. Mineralogía magnética

Para comprender la adquisición de los registros paleomagnéticos y arqueomagnéticos es necesario conocer la mineralogía de los minerales ferromagnéticos. Al exponer los materiales a tratamientos magnéticos comúnmente ocurren alteraciones mineralógicas o cambios de fases magnéticas. Por consiguiente, se utilizan los tratamientos de magnetismo de roca que permiten determinar la temperatura de Curie, el dominio magnético, tamaño de grano, entre otras propiedades para así conocer el portador de la remanencia magnética (Tarling, 2021; Tauxe, 2010).

Temperatura de Curie

La temperatura de Curie T_C es aquella en la que un material pierde la capacidad de retener el magnetismo perdiendo el ferromagnetismo o ferrimagnetismo y actuando con condiciones paramagnéticas. Por debajo de esta temperatura, los momentos magnéticos actúan en dirección del campo magnético (Soler-Arechalde, 2006; Santamaría, 2016; Butler, 1992). Esta temperatura depende de la composición química de los elementos ferrimagnéticos y ferromagnéticos por lo que cada material tiene su propia temperatura de Curie (Tabla 2.1).

Tipos de magnetización

Sabiendo que el CMT varía tanto espacial como temporalmente los registros del CMT antiguo quedan en estructuras que han sufrido de alguna magnetización (Lanza and Meloni, 2006).

- Magnetización remanente natural (NRM): Es la suma vectorial de la magnetización primaria adquirida al momento de la formación del material, la secundaria y la inducida.
- Magnetización remanente anhisterética (ARM): Cuando sometemos una muestra a desmagnetización por campos alteros (AFD) que consiste en aplicar un campo que decrece en amplitud, se adquiere una remanencia paralela al campo estable por lo que ciertas partículas se magnetizaran en una dirección. preferencial mientras que otros momentos se alinean de forma aleatoria.
- Magnetización remanente química (CRM): Este tipo de magnetización se adquiere cuando un mineral ferromagnético se forma por debajo de su punto de Curie (575°C) posterior a su deposición.
- Magnetización remanente detrítica (DRM): Al depositarse los sedimentos en aguas tranquilas, los granos de minerales ferromagnéticos adquieren una magnetización, sin embargo, el movimiento se ve afectado por la inercia y la viscosidad del agua.
- Magnetización remanente isotérmica (IRM): Es la magnetización que se obtiene cuando un material se encuentra en presencia de un campo magnético externo e intenso a una temperatura constante. Este tipo de magnetización se utiliza para poder caracterizar los minerales ferromagnéticos en las rocas
- Magnetismo termoremanente (TRM): Esta magnetización la consiguen los minerales magnéticos cuando estos se enfrían después de estar expuestos a temperaturas mayores a las de Curie y en presencia de un campo magnético.
- Magnetismo remanente viscoso (VRM): Se adquiere gradualmente cuando un material se expone a campos magnéticos débiles.

Serie de titanomagnetitas

Los minerales ferromagnéticos más relevantes son los óxidos de hierro-titanio (magnetita, maghemita y hematita) (FeTi), oxihidróxidos (goetita) y los sulfuros de hierro (greigita y pirrotita) en donde su composición se muestra a partir del diagrama ternario (Figura 2.9) de

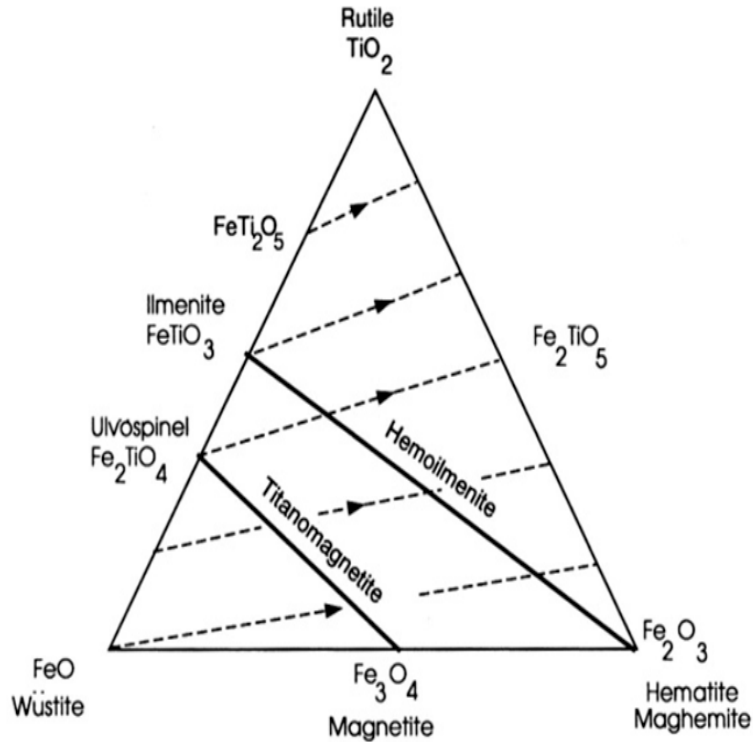


Figura 2.9: Diagrama ternario para los óxidos de hierro (Tauxe, 2010)

TiO_2 -FeO- Fe_2O_3 . De derecha a izquierda se muestra el incremento de hierro férrico (Fe^{3+}) a ferroso (Fe^{2+}), y de abajo hacia arriba se indica el contenido de titanio (Ti) (Butler, 1992; Tarling, 2021).

La serie de la ulvoespinela-magnetita e ilmetita-hematita son representadas en el diagrama ternario por una línea sólida negra que indica el incremento de la sustitución del titanio en las redes cristalinas de la magnetita y hematita (Tauxe, 2010).

Ocurren como minerales principales en rocas ígneas al igual que las magnetitas debido a la oxidación a alta temperatura, en sedimentos, puede presentarse como un componente detrítico. La temperatura de Curie para la magnetita es de 575°C , el cual es el más importante de la serie, por encima de los 600°C hay una solución completamente sólida entre la ulvoespinela y la magnetita, por debajo de esa temperatura, la espinela puede transformarse en dos fases: Una de alto contenido en titanio y otra con bajo contenido. Asimismo, debido a la oxidación a baja temperatura, la serie de la titanomagnetita puede oxidarse a titanomaghemita (Butler, 1992; Tarling, 2021).

Serie de titanohematitas

Una de las mayores fuentes en los registros paleomagnéticos es la hematita que, puede aparecer como mineral ferrimagnético principal en rocas mayormente oxidadas. También conocida como hematita-ilmenita ($\text{Fe}_{2-y}\text{Ti}_y\text{O}_3$) se caracteriza por su apariencia de color rojo o negro y tiene una temperatura de Curie entre los 675°C y 685°C . Su magnetización de saturación es constante y relativamente baja a $j_s \approx 2\text{G}$ (Butler, 1992; Tauxe, 2010).

2.2.4. Tratamientos magnéticos

Con la finalidad de aislar la componente característica de la magnetización, las muestras se someten a diferentes tratamientos magnéticos que permiten observar la ChRM (García Pimentel et al., 2020).

Desmagnetización por campos alternos (AFD)

Se aplica un campo débil a la muestra lo que causa una alineación de los granos de menor o igual coercitividad a la del campo, por consiguiente, se reduce el campo aplicado, la magnetización de las partículas se vuelve aleatoria y solo quedan las remanencias de las partículas con coercitividades mayores al campo que se aplicó (Carrancho et al., 2022; Tauxe, 2010). La desmagnetización es representada en un diagrama AFD (Figura 2.10b) y de igual manera, se mide la dirección de la muestra la cual se representa en una red estereográfica (Figura 2.10a).

Desmagnetización térmica (TRM)

Este tratamiento consiste en calentar la muestra a una temperatura por debajo de la de Curie de los minerales ferromagnéticos y se deja enfriar en un campo magnético nulo, ya que, de esta manera, los granos con temperaturas de bloqueo menor a la temperatura aplicada adquieran una magnetización termoremanente. Este método ha probado ser efectivo para rocas donde la hematita es el mineral ferromagnético principal (Soler-Arechalde, 2006).

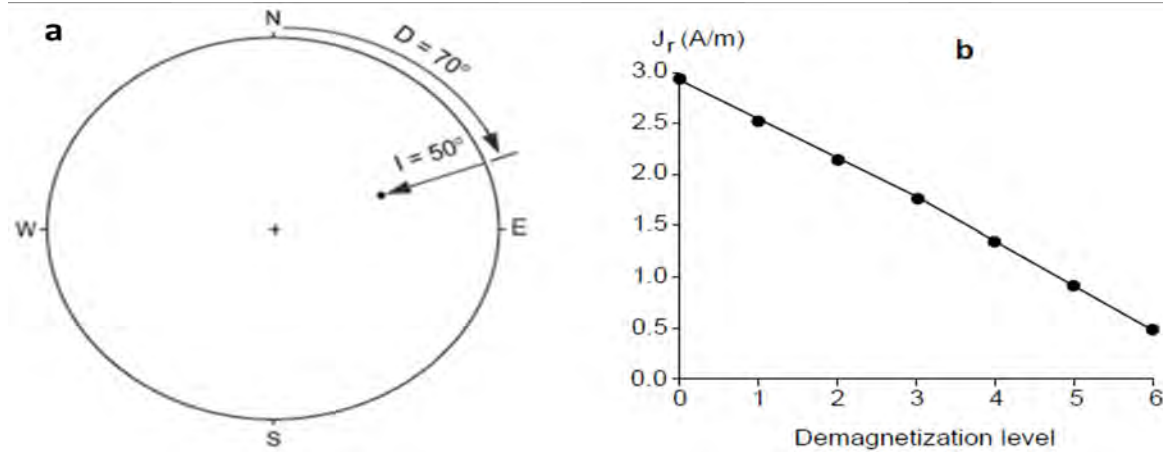


Figura 2.10: En a) Red estereográfica representando la declinación e inclinación. Los círculos rellenos indican una inclinación positiva. En b) diagrama de desmagnetización durante el tratamiento de AFD (Tauxe, 2010; Butler, 1992).

2.2.5. Visualización de los datos

Para poder observar y determinar las direcciones medias es necesario aplicar un análisis estadístico debido a la dispersión de los datos durante las desmagnetizaciones progresivas. Esta dispersión es observable en rocas con baja magnetización y de las cuales la ChRM es de menor porcentaje que la NRM total (Butler, 1992).

Análisis por componentes principales (PCA)

Este tipo de análisis descrito por Kirschvink (1980) aplica una línea de mejor ajuste a los datos a partir de una serie de observaciones, calcula la desviación angular máxima (MAD) para asegurar una precisión de medición en la que la línea de mejor ajuste se determina (Figura 2.11).

Estadística de Fisher

Esta estadística se basa en suponer a los vectores de magnetización distribuidos en la superficie de una esfera para poder calcular las direcciones medias con límites de confianza. La función de densidad Fisher $P_{dA}(\theta)$ da la probabilidad por unidad de área angular dA para encontrar una dirección dentro de la misma a un ángulo θ de la media verdadera (Tauxe, 2010; Fisher et al., 1993; Butler, 1992). Siendo así, el área angular es expresada en estereoradianes

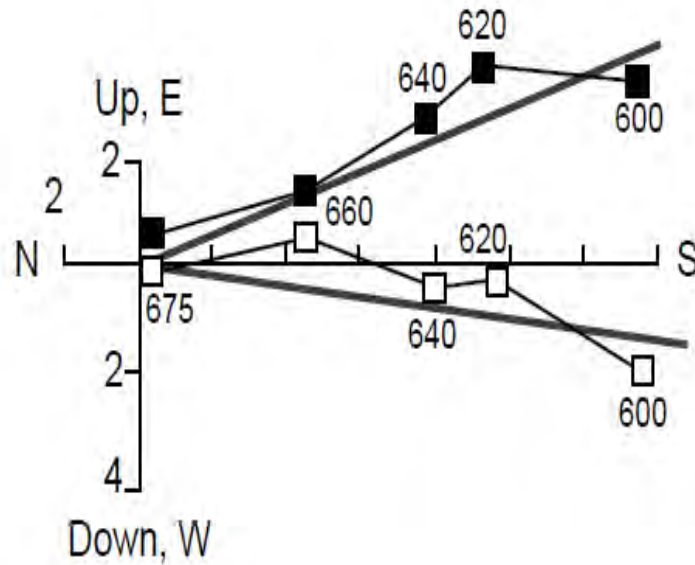


Figura 2.11: Ejemplo del PCA. La línea sólida negra indica la línea de mejor ajuste a partir de los datos de desmagnetización progresiva. Los números en los puntos indican la temperatura durante la desmagnetización térmica. A partir del PCA se obtuvo una declinación de 162°C y una inclinación de 6.4°C (Butler, 1992).

considerando que el área total de una esfera son 4π estereoradianes, por lo que las direcciones se encuentran de acuerdo con la distribución de Fisher, con k siendo el parámetro de precisión:

$$P_{dA}(\theta) = \frac{k}{4\pi \operatorname{sen} h(k)} \exp(k \cos \theta) \quad (2.10)$$

El ángulo a partir de la media verdadera donde se encuentra un porcentaje de direcciones o desviación estándar angular puede calcularse a partir de la distribución de Fisher:

$$\theta_{63} = \frac{81^\circ}{\sqrt{k}} \quad (2.11)$$

El ángulo final de interés es el que contiene el 95 % de las direcciones se calcula por:

$$\theta_{95} = \frac{140^\circ}{\sqrt{k}} \quad (2.12)$$

2.2.6. Datación arqueomagnética

La base del método arqueomagnético son las curvas regionales y globales de variación secular. Las curvas regionales son generadas a partir de herramientas estadísticas sobre datos disponibles para una región en concreto, mientras que las curvas globales se realizan por modelos geomagnéticos regionales y globales a partir del análisis de esféricos armónicos lo cual da una descripción sobre las variaciones del CMT en cualquier punto sirviendo como una curva de referencia utilizada para la datación (Tarling, 2021; Gómez-Paccard et al., 2016).

La calidad de las curvas depende de la distribución de los datos, por ejemplo, la mayoría de los datos arqueomagnéticos se encuentran concentrados en Europa mientras que para Norteamérica aún son pocos los datos disponibles.

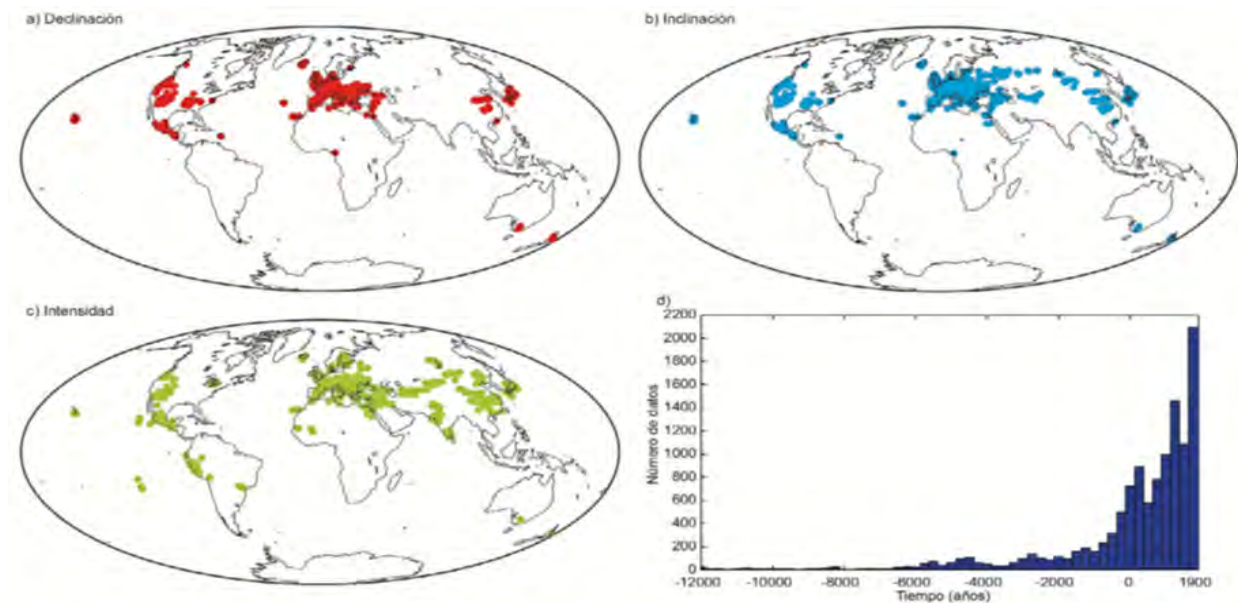


Figura 2.12: Distribución de los datos arqueomagnéticos en el mundo. a), b) y c) mapa con datos direccionales y de intensidad, d) distribución temporal de los datos en conjunto (Gómez-Paccard et al., 2016)

La datación consiste en comparar los componentes de declinación, inclinación e intensidad que quedan grabados en la estructura con una curva de variación secular bien definida dependiendo de la región (Gómez-Paccard et al., 2016), al compararse se obtienen los rangos de edad más probables para cada uno de los parámetros y al combinarse se obtiene la datación arqueomagnética, por ejemplo, Pavón-Carrasco et al. (2011) desarrollaron el modelo SHA.DIF.14K que utiliza ya sea el 95 % o 65 % de confianza al obtener el intervalo más

probable y con el que se realizan las interpretaciones necesarias.

2.2.7. Aplicaciones del arqueomagnetismo

El arqueomagnetismo como estudio del campo magnético antiguo al igual que las propiedades magnéticas de materiales arqueológicos tiene otras aplicaciones además de la datación:

Caracterización de fuegos paleolíticos

Las estructuras de combustión comúnmente se identifican por la presencia de cenizas o la evidencia de material quemado, sin embargo, cuando se encuentran yacimientos paleolíticos no es fácil caracterizarlos debido a la posible alteración ambiental y estado de conservación. Gracias a que los minerales ferromagnéticos son sensibles y modifican sus propiedades magnéticas al calentarse crean anomalías como la susceptibilidad magnética. Este parámetro además da información sobre los minerales ferromagnéticos que se encuentran en la estructura y por lo tanto se asocia su modificación por la exposición al fuego ([Gómez-Paccard et al., 2016](#)).

Determinación de paleotemperaturas

El método arqueomagnético permite también determinar la última temperatura de calentamiento dando un contexto sobre el uso de la estructura. Esto se realiza aislando la magnetización original y la adquirida posteriormente durante el último calentamiento mediante el tratamiento de desmagnetización por campos alternos [Gómez-Paccard et al. \(2016\)](#).

Estudios de cronología relativa de eventos de combustión

Debido a la ocupación de grupos neandertales en yacimientos, se encuentran acumulaciones de materiales líticos u óseos cercanos a estructuras de combustión y se conoce como palimpsestos. Debido a la acumulación, se aprecian las superficies estratificadas por lo que determinar su correspondencia a una sola temporalidad es limitante ([Gómez-Paccard](#)

et al., 2016). En este caso, el arqueomagnetismo permite diferenciar entre las temporalidades existentes y así dar un contexto ocupacional.

2.3. Arqueomagnetismo en México

Mesoamérica comprende una amplia región en la que las sociedades se relacionaron entre sí y se establecieron a causa de intercambio de recursos, desplazamientos y la necesidad del dominio de unas sociedades sobre otras. La periodización surge al inicio del siglo XX (Figura 2.13) debido al estudio detallado de la cerámica y a las técnicas estratigráficas, por consiguiente, se establecieron las primeras secuencias culturales. Fueron dos hallazgos arqueológicos los que provocaron las primeras periodizaciones científicas de Mesoamérica: en 1907 y 1909 cuando Zelia Nuttall descubrió restos cerámicos bajo la lava de Coyoacán y Manuel Gamio quien encontró vestigios en el occidente de la cuenca de México (Mexicana, 2002), estos descubrimientos motivaron la necesidad de conocer la relación cronológica con la cerámica de aquella época.



Figura 2.13: Periodización de Mesoamérica contextualizado a la historia de México (Mexicana, 2002)

Son el Preclásico, Clásico y Posclásico los periodos en los que se comprende la cronología de Mesoamérica la cual ha sido determinada a partir de secuencias estratigráficas y fechamientos utilizando el método de C14, sin embargo, el uso del arqueomagnetismo ha tomado gran importancia, puesto que ha mostrado obtener resultados sumamente precisos

(Soler-Arechalde, 2006).

Los primeros estudios arqueomagnéticos en México fueron realizados por Nagata y colaboradores en 1965 donde se determinó la paleointensidad en alfarería de Cuicuilco y en material volcánico del Xitle.

En 1967, Coe reportó un fragmento que posiblemente pertenecía a una brújula flotante 2.14 en San Lorenzo Tenochtitlán, Veracruz. De este fragmento, se llevaron a cabo estudios más detallados con los que se determinó el vector del momento magnético. En Izapa, Chiapas se encontró una escultura de material basáltico representando la cabeza de una tortuga además de otras piezas de basalto en forma de caparazón de tortuga y que, de acuerdo con el contexto, podía ser llenado con agua de lluvia y construir el recipiente de brújula flotante. Estas evidencias del conocimiento del magnetismo fueron encontradas por Malmstrom (1976).

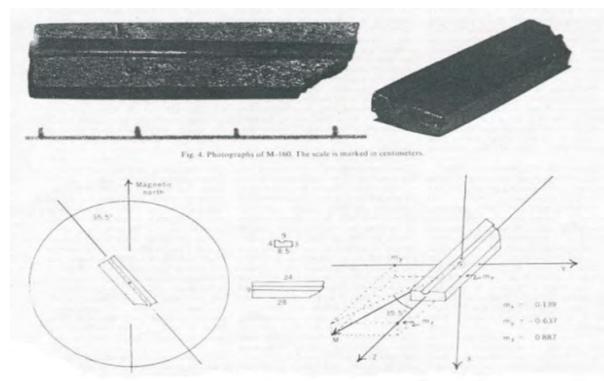


Figura 2.14: Fragmento M-160 encontrado por Coe en 1967 (Soler-Arechalde, 2006)

Las primeras muestras para fechamiento arqueomagnético en donde se revaluó la cronología de Mesoamérica del 1 al 1200 d.C. fueron tomadas por Daniel Wolfman en 1969. Estas corresponden a sitios como Teotihuacán, Tenango, Huapalco, Tula, entre otros.

Se tomaron 96 muestras de las cuales, a partir de los tratamientos magnéticos comparados con otros estudios, se pudo publicar una curva de deriva polar para Mesoamérica (Soler-Arechalde, 2006).

Para 1981 y 1986, Urrutia y contribuyentes realizaron investigaciones sobre la orientación de edificios en ciudades prehispánicas como parte de una colaboración entre la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la universidad de Sternwate en Bonn, Alemania; se llegaron a identificar en sitios como La Venta una orientación 8 grados al NW, otros

sitios como Teotihuacán y Chichen-Itzá mostraron orientaciones a 20 grados hacia el NE (Soler-Arechalde, 2006).

Las investigaciones arqueomagnéticas se retomaron en México en el año de 1999 cuando se adquirieron muestras de Teotihuacán adhiriendo con pegamento epóxico testigos cilíndricos (Collinson et al., 2013; Schmidt, 2007) con la posibilidad de ser orientados con la brújula. Asimismo, se muestrearon sitios como Teopancazo, Cacaxtla, Tlaxcala, Xochicalco, Morelos y el Templo Mayor de la Ciudad de México por Hueda y Soler en 2001. Los resultados obtenidos de estas investigaciones se muestran en la Tabla 2.2.

Sitio	Número de muestras	Temporalidad	Referencia
La Joya, Veracruz	4 y 17	Preclásico Clásico	Aguilar y Morales, 2011
Teopancazo, México 1999	3	Clásico	Hueda, 200 Hueda et al., 2004
Teopancazo, México 2003	2	Clásico	Sánchez, 2005 Soler et al., 2006
Teopancazo, México 2005	4 y 10	Preclásico Clásico	Romero, 2008 Hernández, 2010
Xalla, México 2001	1	Clásico	Rodríguez, 2003 Soler et al., 2006
Xalla, México 2003	2	Clásico	Sánchez, 2005 Soler et al., 2006
Xochicalco, Morelos 1999	2	Posclásico	Hueda y Soler, 2001 Soler y Hueda 2006
Xochicalco, Morelos 2006	2	Clásico	Soler et al., 2008
Xochicalco, Morelos 2007	2	Clásico	Soler y Caballero, 2008
Tecama, México 2007	4	Posclásico	Saavedra, 2010
Tula, Hidalgo 2007	9	Posclásico	Martínez, 2012
Chapultepec, DF	1	Clásico	López, 2008 López et al., 2010
Templo Mayor, DF 1999	1	Posclásico	Hueda, 2000
Templo Mayor, DF 2002	1	Posclásico	Rodríguez, 2003
Templo Mayor, DF 2004	1	Posclásico	Goguitchaichvili et al., 2004
Cacaxtla, Tlaxcala 2004	1	Clásico	Goguitchaichvili et al., 2004
Cholula, Puebla 2004	2	Clásico	Goguitchaichvili et al., 2004
Tlatelolco, DF 2002	2	Posclásico	Guerrero, 2003
Teotihuacán, México	2 y 4	Preclásico Clásico	Terán, 2012
Xalasco, Tlaxcala	3	Clásico	Terán, 2012
Sierra de las Navajas, México	3	Clásico	Terán, 2012
Los Grifos, Chiapas	3 y 2	Preclásico Clásico	Fregoso, 2010
Templo Mayor, DF 2012	7	Posclásico	Soler et al., 2012 Soler y Barrera, 2013
Coyoacán, DF 2006	3	Posclásico	Soler, 2012
Coyoacán, DF 2012	1	Clásico	Soler et al., 2013

Tabla 2.2: Muestreo arqueomagnético en sitios de México a partir de 1999 (Soler-Arechalde, 2006).

Durante el año 2004, se realizó el primer intento para la datación de pinturas murales de Mesoamérica llevado a cabo en el Templo de Venus, Templo Rojo, Chapulines y Estrellas (Arreola, 2022) sitios correspondientes al periodo Clásico y Posclásico; en este estudio se determinó exitosamente la dirección de la magnetización de las 28 muestras por lo que la estimación de las edades fue definida utilizando la curva preliminar de Hueda-Tanabe et al. (2004) debido a la poca confiabilidad de una curva maestra confiable para Mesoamérica, siendo así, se obtuvo un intercalo de 1000 d.C y 1200 d.C.

Actualmente, numerosos procesamientos de fragmentos de cerámica provenientes de Xalla y Teopancazco se encuentran en desarrollo para la determinación de paleointensidad con la finalidad de construir una curva de variación para el periodo 0 y 1200 d.C. Uno de los avances fue la técnica desarrollada por el Dr. Juan Julio Morales en la que se realiza un encapsulamiento en sales para fragmentos de cerámica facilitando el manejo y permitiendo tratar a las cerámicas como muestras paleomagnéticas estándar (Soler-Arechalde, 2006).

Capítulo 3

Antecedentes arqueológicos: La Quemada

3.1. Estudios cronológicos

Como se ha mencionado, la cronología de Mesoamérica abarca tres grandes periodos: Preclásico (2000 aC–300 d.C), Clásico (300–900 d.C) y Posclásico que culminó en 1521 d.C ([Soler-Arechalde, 2006](#); [Mexicana, 2002](#)) El Posclásico y Epiclásico fueron los periodos caracterizados por grandes cambios en el ámbito, político, social y económico para los asentamientos a causa de los cambios climáticos, la relación con otros grupos y la alteración del paisaje ([Pimentel et al., 2022](#)).

Uno de los asentamientos más importantes que conforma la frontera norte de Mesoamérica es La Quemada en Zacatecas, sitio que se llegó a correlacionar con Chicomóztoc, lugar donde los Mexicas permanecieron durante su viaje al Anáhuac. En el sitio se observa la evidencia de paredes y pisos quemados, sugiriendo que había sido incendiado voluntariamente como parte de un proceso de abandono. A pesar de que el sitio cuenta con numerosos datos cronológicos absolutos, no se ha llegado a asociar un intervalo absoluto para el incendio ocurrido. En este capítulo se presentan los estudios que se han realizado en la zona arqueológica de La Quemada.

3.1.1. Edades radiométricas disponibles

Los estudios en la zona comenzaron durante 1951 y 1952 por Pedro Armillas con el propósito de obtener una cronología absoluta regional. Inicialmente, las primeras muestras fueron analizadas por el método de dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, debido a los problemas de manipulación y preparación química se optó por abandonar el método (Pimentel et al., 2021).

Fueron las excavaciones realizadas en el sector de El Cuartel sobre la acrópolis de La Ciudadela de donde se obtuvieron las primeras tres fechas del sitio: (M-430, 1065 ± 200 AD) proveniente de una viga de madera del techo, la segunda fecha corresponde a (M-431, 1175 ± 200 AD) obtenida de una concentración de madera carbonizada, sin embargo, estas primeras dos fechas no forman parte de las fases de ocupación del sitio por lo que se sugiere una posible contaminación de la muestra o una posible reocupación del sitio. Para la tercera fecha se obtuvo un intervalo de (M-432, 745 ± 200 AD), este resultado se considera válido debido a que se relaciona con la secuencia ocupacional del asentamiento (Pimentel et al., 2021).

Posteriormente, para 1963 y 1964 se obtuvieron 9 fechas, 7 de las cuales corresponden a La Quemada y 2 al sitio de la Presa de Ambosco ubicada a 6 km de La Ciudadela. En la Tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos mediante el método CO_2 y CS_2 para las muestras correspondientes a La Quemada.

Muestra	Fechas obtenidas
M-1651	720 ± 120 d.C
M-1652	410 ± 120 d.C
M-1653	720 ± 120 d.C
M-1654	870 ± 120 d.C
M-1655	770 ± 120 d.C
M-1656	1180 ± 110 d.C
M-1658	930 ± 120 d.C

Tabla 3.1: Fechas obtenidas durante 1963 y 1964 del sector de El Cuartel mediante el método de CO_2 - CS_2

El periodo de mayor actividad de construcción para el sector de El Cuartel corresponde a los promedios de las muestras M-1652, M-1653, M-1654 y M-1655, sin embargo, la muestra de carbón M-1658 al haberse obtenido a 50 cm por encima de la superficie del techo

colapsado de la última construcción, indica una posible reocupación por otro grupo que vivió en las ruinas del sitio durante los años 810 y 1050 d.C y por ende, asociando la caída de La Quemada durante los años 835 y 850 d.C (Pimentel et al., 2021).

Para 1988 y 1993 se obtuvieron 39 dataciones radiométricas las cuales permitieron realizar un contexto estratigráfico por Nelson (1997), en las zonas de la Terraza 18, Basurero 7, Basurero 11 además de los intervalos obtenidos por Trombold (2005) en las Adjuntas.

Nelson (1997) obtuvo edades de los ocho estratos de la Terraza 18 con los cuales pudo identificar la ocupación de la Terraza, ver Tabla 3.2.

Estrato	Fecha
Primero	n.º38 (540 ± 80 d.C)
	n.º39 (650 ± 50 d.C)
Segundo	n.º37 (390 ± 70 d.C)
Tercero	n.º22 (530 ± 60 d.C)
	n.º19 (670 ± 120 d.C)
Quinto	n.º4 (600 ± 50 d.C)
	n.º12 (360 ± 60 d.C)
	n.º15 (690 ± 90 d.C)
Sexto	n.º1 (690 ± 50 d.C)
	n.º2 (630 ± 60 d.C)
	n.º3 (740 ± 50 d.C)
Séptimo	n.º18 (500 ± 80 d.C)
	n.º13 (600 ± 60 d.C)
	n.º21 (840 ± 70 d.C)
	n.º17 (660 ± 60 d.C)
	n.º14 (720 ± 60 d.C)
	n.º16 (820 ± 60 d.C)

Tabla 3.2: Fechas obtenidas para los estratos de la Terraza 18 (Nelson, 1997)

Las dataciones corresponden a muestras de material carbonizado como madera, carbón, restos óseos o leña. Otra de las estructuras más datadas es el Basurero 11 del cual se han obtenido 13 intervalos con base en los cuatro estratos, ver Tabla 3.3: temprano, medio, tardío y posocupacional. En este caso, el criterio de selección de muestras se basó en que los fragmentos mostraran correspondencia entre un estrato y otro. Debido a que este Basurero no ha sufrido alteraciones, las edades obtenidas son de gran calidad. Entre los intervalos, el más temprano corresponde al número 34 (610 ± 60 d.C) asociado al área donde los desechos arquitectónicos se depositaban (Salinas, 2007).

Estrato	Fecha
Temprano	n.º34 (610 ± 90 d.C)
	n.º32 (630 ± 90 d.C)
	n.º33 (670 ± 100 d.C)
Medio	n.º35 (540 ± 80 d.C)
	n.º28 (610 ± 80 d.C)
	n.º31 (640 ± 80 d.C)
Tardío	n.º26 (660 ± 90 d.C)
	n.º27 (800 ± 80 d.C)
Posocupacional	n.º9 (610 ± 60 d.C)
	n.º8 (630 ± 60 d.C)
	n.º11 (700 ± 60 d.C)

Tabla 3.3: Fechas obtenidas para los estratos del Basurero 11 (Nelson, 1997; Salinas, 2007)

De igual forma, se encuentran edades por radiocarbono para los Basureros 6, 7 y 15, donde algunas edades se relacionan con los periodos de construcción de la Terraza 18. Por ejemplo, el Basurero 15 se asocia con una terraza previamente construida por debajo de la 18, sugiriendo periodos de reconstrucción originados por el incremento en la población (Salinas, 2007; Nelson, 1995). En resumen, los intervalos de edad radiométricas observan en la (Figura

Basurero	Fecha	Contexto de muestreo
7	n.º25 (610 ± 60 d.C)	Materiales desechados de estructuras residenciales
	n.º24 (660 ± 50 d.C)	
	n.º23 (460 ± 90 d.C)	
12	n.º29 (1816 ± 1 d.C)	Incendio forestal
15	n.º30 (740 ± 70 d.C)	Trozos de carbón dispersos asociado a una de las terrazas

Tabla 3.4: Fechas obtenidas para Basureros 7, 12 y 15 (Nelson, 1997; Salinas, 2007)

3.1).

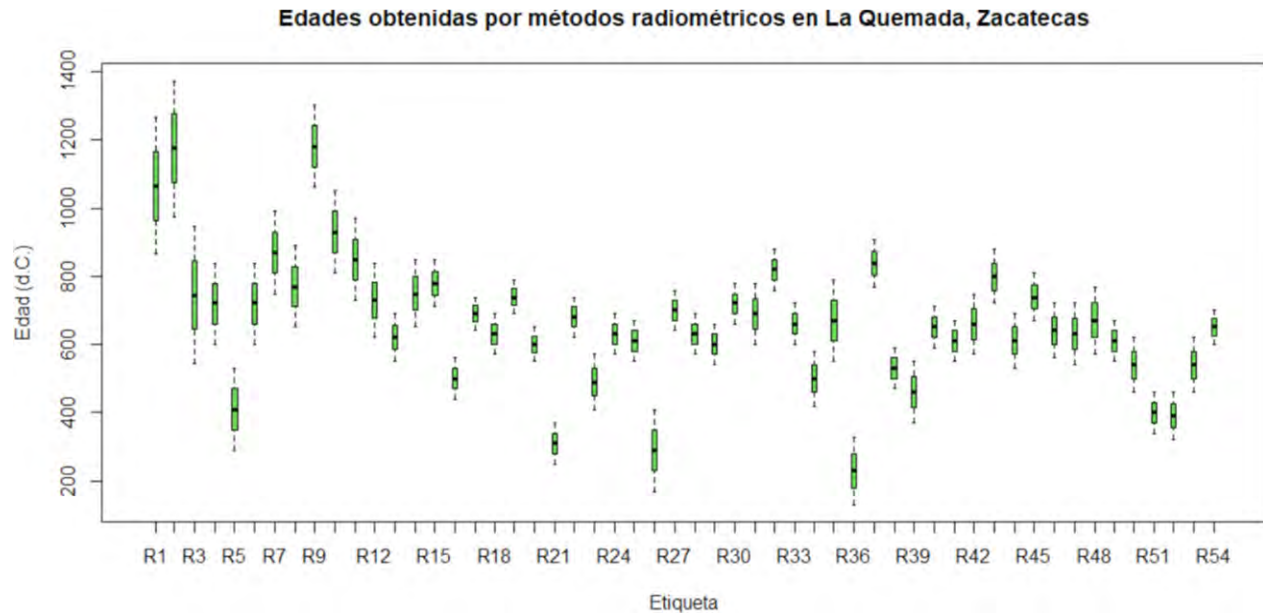


Figura 3.1: Gráfica de edades radiométricas obtenidas en La Quemada (Pimentel et al., 2021)

3.1.2. Edades dendrocronológicas

Durante 2012–2014 el arqueólogo Marco Antonio Santos Ramírez realizó excavaciones en la zona de El Cuartel en donde se identificaron dos fases de construcción, la primera como una estructura de un solo piso posiblemente de uso ceremonial, y la segunda corresponde con una remodelación de dos pisos de mampostería y de adobe diferente al observado en otros sectores. A partir del contexto arquitectónico el piso superior es asociado a actividades sociales y públicas además de que la cerámica encontrada en la zona sugiere el área habitacional de una población élite (Pimentel et al., 2021; Nelson, 1997).

Las vigas encontradas en esta zona permitieron realizar los estudios dendrocronológicos, dado que contaban con al menos 50 anillos de crecimiento anual. Este análisis permitió cruzar las fechas obtenidas para distintas especies de árboles por lo que se identifica que crecieron durante un mismo periodo y con las mismas condiciones climáticas como se observa en la Tabla 3.5. Las muestras que presentaron fechas cruzadas en un mismo contexto se combinaron en cronologías. A partir de esta metodología se determinó que las vigas de los cuartos en El Cuartel se talaron con una diferencia de 20 años entre sí, sugiriendo diferentes periodos de construcción (Pimentel et al., 2021).

DATACIONES DENDROCRONOLÓGICAS REALIZADAS EN LA QUEMADA						
Estructura	Descripción	Número de			Etiqueta	Intervalo de edad calibrada
		Anillos	Tipo de pino	Carbón o Madera		
El cuartel	Habitación K	174	III	M	61	466 - 639 d. C.
Terraza 18		39	III	C	62	623 - 661 d. C.
El cuartel	Habitación E	58	III	C	63	654 - 711 d. C.
El cuartel	Habitación E	41	I	C	64	665 - 704 d. C.
El cuartel	Habitación K	91	I	C	65	637 - 726 d. C.
El cuartel	Viga quemada recuperada en la exploración de Armillas	56	I		66	715 - 770 d. C.

Tabla 3.5: Edades dendrocronológicas (Pimentel et al., 2021)

3.1.3. Edades arqueomagnéticas

Debido a que en el sitio se encuentran estructuras evidentemente expuestas a altas temperaturas, es posible aplicar el método arqueomagnético. Durante 2019 se recolectaron muestras de la Plaza de los Sacrificios y del Salón de las Columnas con el objetivo de definir y determinar los intervalos de edad que puedan corresponder a la caída o abandono del sitio (López-Delgado et al., 2019).

Se aplicaron experimentos de magnetismo de roca, y, a partir de las curvas termomagnéticas (k/T) se identificó a la magnetita pobre en titanio como principal portador de la magnetización de los pisos quemados. Para las paleodirecciones, solo se consiguieron para 23 de los 32 especímenes de las muestras LQ1, LQ2 y LQ3; fue la muestra LQ4 de la cual no se pudo obtener ninguna dirección paleomagnética debido a su comportamiento durante el experimento de campos alternos.

Solo doce especímenes de las muestras LQ1 y LQ3 fueron aptas para experimentos de paleointensidad ya que las curvas k-T mostraron un comportamiento reversible. En el caso de LQ1 (Plaza de los Sacrificios) la paleointensidad media fue de $40.6 \pm 2.6 \mu\text{T}$, para LQ3 (Sala de las Columnas) la paleointensidad fue de $56.5 \pm 3.9 \mu\text{T}$.

A continuación, en la Tabla 3.6 se indican las muestras obtenidas con su respectivo intervalo.

Estructura	Descripción	Intervalo obtenido
Salón de columnas	LQ3, piso quemado de arcilla, LQ4 pared quemada de la fachada	1018 - 1163 d.C
Plaza de los Sacrificios	Pisos quemados	854 - 968 d.C
Cancha de juego de pelota	Fogón 1	931 - 1006 d.C
Cancha de juego de pelota	Fogón 2	698 - 947 d.C
Cancha de juego de pelota	Fogón 2	1463 - 1623 d.C
Cancha de juego de pelota	Cavidad/hoyo quemado	757 - 980 d.C

Tabla 3.6: Muestras e intervalos obtenidos del Salón de las Columnas y Plaza de los Sacrificios durante el muestreo de 2019 (Pimentel et al., 2021).

Un segundo estudio arqueomagnético se realizó en la cancha de Juego de Pelota ubicada en el primer nivel del asentamiento. Las muestras fueron obtenidas de tres habitaciones asociadas a esta estructura divididas por muros de mampostería en donde se encontraban fogones y un depósito de restos óseos (Torreblanca et al., 2020). A partir del análisis arqueomagnético se identifican los intervalos obtenidos en La Quemada en la (Figura 3.2)

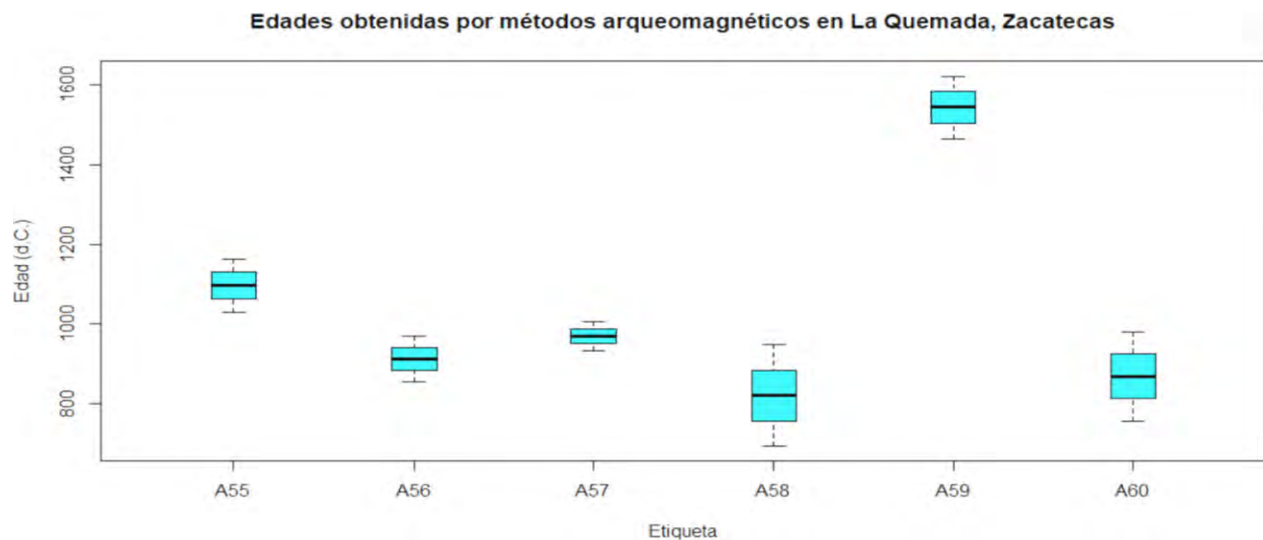


Figura 3.2: Gráfica de caja y bigotes de los intervalos arqueomagnéticos en La Quemada. A55 pertenece al Salón de las Columnas, A56 a la Plaza de los Sacrificios, A57, A58, A59 y A60 pertenecen a la cancha de Juego de Pelota (Pimentel et al., 2021).

3.1.4. Estudios arqueomagnéticos: La Quemada

Cancha de Juego de Pelota

Las canchas de Juego de Pelota son el aspecto más importante característico de las culturas de Mesoamérica debido a que era una de las actividades más comunes, de ellas se tenía una gran importancia social y ritual gracias a sus asociaciones astronómicas de la dualidad entre el día y la noche. En La Quemada, el juego de pelota era usual, ya que se encuentran 3 canchas, la principal localizada en la parte pública, y otras dos canchas de menor tamaño en la Terraza 18 y Ciudadela. Los primeros estudios en esta estructura comenzaron durante 1950 por Pedro Armillas y fue John Charles Kelley quién propuso que la cancha presentaba la forma de una “I”. Para 1979 y 1980, Román López y Laura Castañeda realizaron exploraciones como parte del mantenimiento del sitio en donde se excavó una entrada junto a la cancha en donde se observaron cortes o aberturas que conformaban el suelo de la cancha. Peter Jiménez realizó la última intervención en esta estructura basándose en el trabajo de López y Castañeda de donde se descubrieron restos humanos por debajo del piso de la cancha (Torreblanca et al., 2020).

La zona de estudio (Figura 3.3) se encuentra al pie de la ladera sur, la cancha tiene dimensiones de 80 m de longitud y 15 m de ancho mientras que sus paredes son de 1.50 m de altura, en la parte sur se encontraba añadida una plataforma a la que se accede mediante una escalera localizada al sur (Pimentel et al., 2021).



Figura 3.3: Cancha de Juego de Pelota en el sitio arqueológico de La Quemada (Fotografía: Juan Gerardo Rivera Belmontes)

El primer fogón (Fogón 1) estaba compuesto por aberturas que delimitaban un hoyo por encima del suelo, sus dimensiones eran de 25x15 cm por lado y 10 cm de profundidad (Figura 3.4 a). Para el caso del segundo fogón (Fogón 2) (Figura 3.4 b) este tenía un nivel circular con un diámetro de 50 cm cubierto por losas y un revestimiento de arcilla.



Figura 3.4: Fogones localizados en la parte sur de la cancha de Juego de Pelota (Torreblanca et al., 2020)

La tercera área de estudio (Figura 3.5) se localiza en la parte exterior de la cancha, este corresponde a un depósito de restos humanos

A partir de los experimentos de magnetismo de rocas se obtuvo la dirección característica de la magnetización termoremanente. En cuanto a la mineralogía magnética determinada por las curvas k-T se determinó la presencia de la titanomagnetita con bajo contenido en titanio y un comportamiento irreversible.

La datación se consiguió utilizando MATLAB con el modelo SHA.DIF.14K, los intervalos obtenidos para el Fogón 1 fueron entre 931 y 1006 d.C, para el caso del Fogón 2 se obtuvieron dos intervalos, ambos con la misma probabilidad: 693 y 947 d.C, el segundo de 1463 y 1623 d.C. Para el caso de la cavidad quemada, el intervalo fue entre 757 y 980 d.C indicando este como el último periodo de actividad en la cancha de Juego de Pelota. El fogón 1 presentó un pequeño traslape con la datación de la cavidad quemada entre 931 y 980 d.C; sin embargo, los intervalos entre 931 y 1006 d.C y 693-947 d.C pertenecen a la segunda fase de ocupación: La Quemada y la transición entre la tercera fase: Ciudadela.



Figura 3.5: Cavidad quemada donde se observan restos óseos cubiertos por ceniza (Torreblanca et al., 2020)

La Quemada: Declive y abandono del sitio en dos etapas del periodo Clásico

Como se ha mencionado anteriormente, la fase inicial de ocupación para el Valle de Malpaso ocurrió durante 400 y 600/650 d.C observado a través de la decoración de la cerámica Cantunillo perteneciente a la cultura Chalchihuites. A través de las evidencias en la cerámica, los cambios destacados por la decoración pintada y diseños figurativos de tipo Tepozán indican un cambio cultural durante el periodo Epiclásico (600-900 d.C) no solo en las regiones de La Quemada, sino también en Los Altos de Jalisco y las regiones del Bajío además de la cerámica policromada en la región de Tunal Grande, sur de Zacatecas, noreste de Guanajuato y oeste de San Luis Potosí (López-Delgado et al., 2019).

Con el objetivo de contextualizar el proceso de abandono y caída de La Quemada, se llevó a cabo un estudio arqueomagnético en las zonas del Salón de las Columnas y Plaza de los Sacrificios (Figura 3.6). Ambos de gran importancia puesto que el primero era una de las estructuras principales debido a su arquitectura. Aquí, las excavaciones revelaron que el edificio había estado completamente techado y renovado en cuatro ocasiones.

Para este trabajo se obtuvieron las muestras LQ3 (piso quemado de arcilla) de las

Columnas; para la Plaza de los Sacrificios correspondiente al tercer nivel del asentamiento, se adquirieron las muestras LQ1 y LQ2 de pisos quemados.



Figura 3.6: Zonas de muestreo de LQ1, LQ2 (Plaza de los Sacrificios) y LQ3 y LQ4 (Salón de las Columnas)

El estudio consistió en 32 especímenes de cuatro sitios para experimentos de desmagnetización por campos alternos, curvas termomagnéticas, ciclos de histéresis y la adquisición de curvas de magnetización remanente isotérmica.

Para el caso de los experimentos de intensidad, cada muestra fue dividida en 6 especímenes preparados en cilindros de sal con el objetivo de tratarlos como muestras paleomagnéticas estándar. Se utilizó el método de doble calentamiento de tipo Thellier modificado por Coe utilizando un horno MMTM-80 en 13 pasos de calentamiento y los chequeos de la pTRM durante todo el procedimiento

Las direcciones paleomagnéticas se pudieron obtener de 23 de los 32 especímenes en donde se observó un comportamiento magnéticamente estable para todas las muestras de los sitios LQ1, LQ2 y LQ3 (Figura 3.7). No obstante, para LQ4 no se pudo obtener el mismo resultado debido a que no se pudo aislar el componente principal de magnetización durante el experimento de desmagnetización por campos alternos además de que no se pudo aislar la remanencia característica al haber aplicado un campo de 95 mT (López-Delgado et al., 2019).

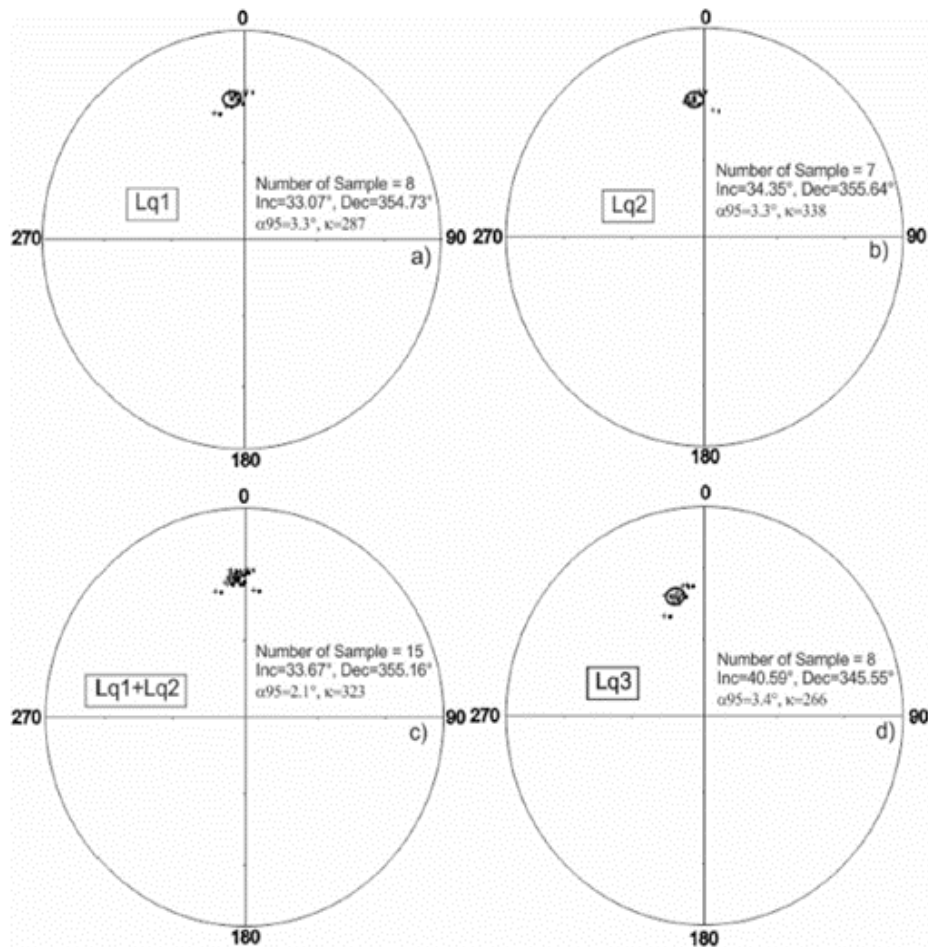


Figura 3.7: Proyección estereográfica y estadística de Fisher de las paleodirecciones medias obtenidas

En cuanto a la arqueointensidad, solo 12 especímenes de LQ1 y LQ3 mostraron determinaciones aceptables de acuerdo con los chequeos positivos de pTRM y los parámetros de calidad (q) y la fracción de remanencia (f); mientras que para LQ1 y LQ2 las arqueodirecciones se obtuvieron de manera exitosa.

De LQ1 se tuvo una intensidad promedio de $40.6 \pm 2.6 \mu\text{T}$ mientras que para LQ3, la arqueointensidad promedio fue de $56.5 \pm 3.9 \mu\text{T}$. En el caso de LQ2 y LQ4 no se lograron intensidades adecuadas debido a las determinaciones con baja calidad.

Finalmente, la datación se obtuvo utilizando el modelo SHA.DIF.14K dando un intervalo entre 854 y 968 d.C como la edad más probable de los sitios LQ1 y LQ2. LQ3 adquirió un intervalo de 1018 y 1163 d.C el cual no coincide con las edades radiométricas estimadas para

La Quemada.

De acuerdo con estos resultados, se indica que el incendio del lugar ocurrió en dos etapas, y que además algunas estructuras como es el caso del Salón de las Columnas pudo haber sido re-incendiado de acuerdo con el intervalo del sitio LQ3.

Se estima que durante 300-350 d.C poblaciones sedentarias llegaron al valle central y norte de Zacatecas lo que llevó a la fase inicial temprana de ocupación del Valle de Malpaso. Por ello, se considera que la primera ocupación del sitio inició durante 400 y 500 d.C correspondiente a la primera fase de La Quemada: Malpaso. Como se mencionó anteriormente, los tipos de cerámica muestran grandes similitudes con la cultura Chalchihuites por lo que periodos como 600/650 y 850 d.C representan el apogeo del asentamiento durante el periodo Epiclásico (Torreblanca et al., 2020; López-Delgado et al., 2019; Pimentel et al., 2022).

Despoblamiento de la frontera norte de Mesoamérica durante el Postclásico temprano

La frontera norte de Mesoamérica cuenta con numerosos asentamientos prehispánicos que fueron ocupados durante 200 y 900 d.C. Diferentes hipótesis se han tenido sobre el despoblamiento de la frontera norte de Mesoamérica durante el Postclásico temprano. Algunas de ellas son el cambio climático, la ruptura de redes de intercambio en Mesoamérica, y la tensión generada entre otros grupos por el control del terreno y agricultura, razones que afectaron la economía.

Un estudio realizado por Wogau et al. (2019) sugiere que dos eventos de sequía alrededor de 700-790 d.C y 810-880 d.C además de conflictos sociales causaron el despoblamiento de la frontera norte de Mesoamérica.

En este trabajo, se utilizaron edades arqueomagnéticas actualizadas al igual que modelos regionales y curvas de variación paleosecular con lo que se ha podido establecer cronologías absolutas más precisas para diferentes estructuras. Los sitios muestreados fueron los siguientes: Plazuelas, El Ocote, La Palma, La Quemada, El Cópore, El Cerrito de los Agaves, Lo de Juárez y El Palacio de Ocomo (Figura 3.8).

De la misma forma, se utilizó el método de remuestreo Bootstrap descrito por Efron (1992) para observar la distribución de los datos muestreados en donde los intervalos de edad más

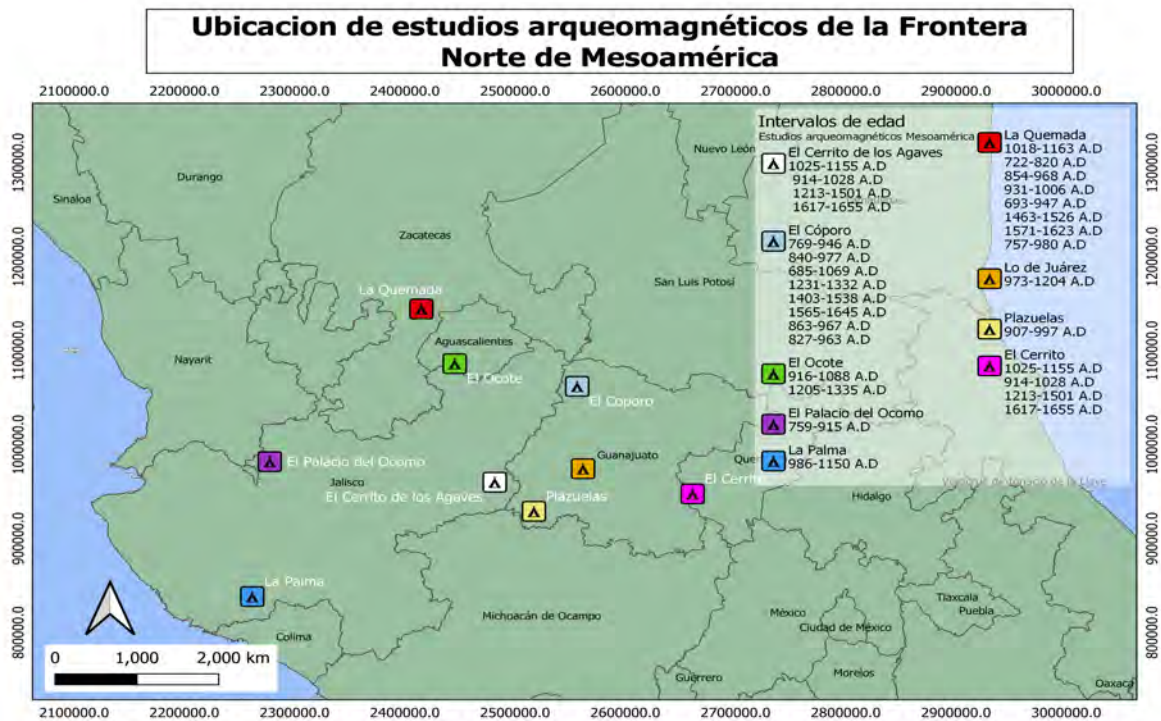


Figura 3.8: Distribución de los estudios arqueomagnéticos realizados en la frontera norte de Mesoamérica junto con los intervalos de edad obtenidos (Autora: Andrea Sánchez Ruiz)

probables obtenidos a partir de diferentes artefactos arqueológicos proporcionan un rango de edad de 750 y 1100 d.C.

Los datos arqueomagnéticos obtenidos de la frontera norte de Mesoamérica fueron analizados con el fin de hacer una comparación utilizando diferentes modelos y curvas de variación paleosecular. De este trabajo se analizaron estructuras arqueológicas como pisos quemados y fogones los cuales permitieron obtener direcciones medias y en algunos casos valores de intensidad con que se recalcularon algunos intervalos utilizando modelos como SHA.DIF14K y SHAWQ.2K. Los intervalos de edad obtenidos para los artefactos arqueológicos de los sitios anteriormente mencionados se muestran en la (Figura 3.9)

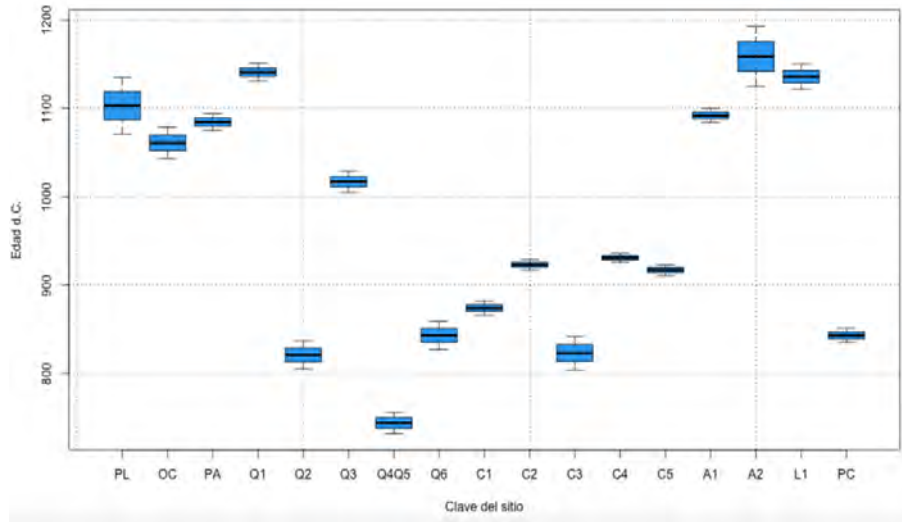


Figura 3.9: Intervalos de edad para artefactos arqueológicos de la frontera norte de Mesoamérica. PL (Plazuelas), OC (El Ocote), PA (La Palma), Q (La Quemada), C (El Cóporo), A (El Cerrito de los Agaves), L (Lo de Juárez) y PC (El Palacio de Ocomo) (Pimentel et al., 2022).

3.2. Discusión de las edades obtenidas en La Quemada

A partir de los estudios dendrocronológicos, radiométricos y arqueomagnéticos, la cronología de La Quemada se ha definido en tres fases de ocupación. Sin embargo, también se ha podido sugerir una posible reocupación durante el Postclásico, probablemente por el grupo de los Zacatecos, ya que en el estudio realizado por Torreblanca et al. (2020) se obtuvo un intervalo posterior (1463–1623 d.C) a estas fases; lo anterior podría indicar un posible reuso del espacio en ruinas de La Quemada.

El abandono gradual es una de las sugerencias sobre la destrucción de La Quemada. Durante la fase de Ciudadela, conflictos de defensa, cierres de espacios y accesos al igual que sacrificios humanos, pudieron haber sido los causantes del incendio y abandono, mismo que se sugiere debido a las similitudes en sitios como Alta Vista (Torreblanca et al., 2020; López-Delgado et al., 2019). Sin embargo, cuestiones migratorias por cambios climáticos y de terreno también son propuestas por Pimentel et al. (2022) sobre el despoblamiento de la frontera norte de Mesoamérica como El Ocote, El Cóporo, Plazuelas, La Quemada, entre otros de los cuales a partir de una reconstrucción paleomagnética de sedimentos del lago La Alberca, Guanajuato se pudo identificar dos periodos de sequía alrededor del 700–790 d.C y

810–880 d.C coincidentes con la segunda fase: La Quemada. No obstante, se encuentran las cuestiones como conflictos causados por las redes de comercio en Mesoamérica, así como el control del terreno y de la agricultura lo que pudo haber llevado al abandono de la frontera norte durante el Postclásico temprano (Pimentel et al., 2022; Nelson, 2015).

Utilizando el modelo SHA.DIF.14K López-Delgado et al. (2019) obtuvieron un intervalo entre 854 y 968 d.C para los sitios LQ1 y LQ3 pertenecientes a la Plaza de los Sacrificios y Salón de las Columnas respectivamente y que coincide con la última fase de ocupación: Ciudadela. Debido a los criterios de calidad para las muestras LQ1 y LQ3 fue posible obtener el vector geomagnético completo en el cual la intensidad promedio fue de $40.6 \pm 2.6 \mu\text{T}$ para LQ1, mientras que para LQ3 la intensidad fue $56.5 \pm 3.9 \mu\text{T}$. Sin embargo, LQ2 (Plaza de los Sacrificios) y LQ4 (Salón de las columnas) mostraron determinaciones de baja calidad por lo que fueron descartadas al inicio del experimento.

Al ser uno de los sitios con más datos cronológicos disponibles, se realizó un análisis estadístico con el fin de analizar su tendencia. Pimentel et al. (2021) construyeron una base de datos que cuenta con 66 fechas absolutas, 54 radiométricas, 6 arqueomagnéticas y 6 dendrocronológicas. De ahí, al menos el 50 % pertenece al intervalo 600 a 800 d.C de la primera fase ocupacional, 56 fechas se encuentran dentro de las fases ocupacionales y al menos 5 son posteriores a la última fase.

A partir de esta base de datos y de los estudios arqueomagnéticos realizados en los sitios de la frontera norte de Mesoamérica se hizo uso de diferentes modelos geomagnéticos globales y curvas de referencia locales, tales como: SHA.DIF14K, Mahgoub et al. (2019), SHAWQ.2K y García-Ruiz et al. (2022) ver Tabla 3.7.

Los intervalos obtenidos indican que los artefactos arqueológicos quemados pertenecen al final del Epiclásico e inicios del Postclásico temprano con un intervalo entre 750 y 1100 d.C coincidiendo con la fase de abandono durante este periodo (Pimentel et al., 2022).

Por otro lado, Torreblanca et al. (2020) llevaron a cabo un estudio en la cancha de Juego de Pelota, estructura que cuenta con el intervalo de edad más joven. Dos de los sitios muestreados fueron fogones y un sitio era una cavidad quemada. Después de haber obtenido las direcciones, el intervalo más probable para el fogón 1 fue de 931-980 d.C. el cual representa un periodo cercano al final de la fase de Ciudadela. En el caso del fogón 2, el intervalo fue de

Archaeological Site	Site Code	Location	Dated Material	SHA.DIF.14k (14K) (A.D.)	Mahgoub et al., 2019 [45]. (MG) (A.D.)	SHAWQ.2K (2K) (A.D.)	García-Ruiz et al., 2022 [46]. (GR). (A.D.)
Plazuelas	PL	Guanajuato	Burned floor	857-945	1362-1377	755-861	1055-1299
El Ocote	OC	Aguascalientes	Burned floor	914-1099	925-1036	893-1109	1045-1424
La Palma	PA	Jalisco	Burned floor	1193-1337	1279-1463		
La Quemada	Q1	Zacatecas	Burned floor	990-1154	988-1147	979-1241	941-1233
	Q2		Burned floor	1006-1183	1058-1264	1006-1236	1038-1322
La Quemada	Q3	Zacatecas	Fire pit	704-825	907-938	614-828	557-893
			Fire pit	867-955	1388-1506		
	Q4, Q5	Fire pit	931-1007	934-1013	1307-1411	904-1070	914-1265
El Cópore	C1	Guanajuato	Fire pit	694-947	643-731	587-967	571-873
			Fire pit	1464-1524	1430-1541	1572-1692	
	C2	Burned cavity	1572-1624	893-974	605-1014	564-890	
	C3	Burned floor	743-981	1350-1497	1178-1295		
		Burned floor	770-949	824-977	721-970	763-969	
El Cerrito de Los Agaves	C4	Jalisco	Burned floor	844-984	885-999	878-1008	822-975
			Burned floor	680-1098	643-764	579-1104	525-969
	C5	Burned floor	1201-1348	822-1049		1016-1434	
	A1	Jalisco	Interior burned floor	1389-1546	1276-1542		
			Exterior burned floor	1559-1651			
A2	Burned floor	875-969	893-996	730-846	837-981		
Lo de Juárez	L1	Guanajuato	Burned floor	846-966	882-984	880-985	800-973
			Fire pit	1027-1155	1057-1190	1065-1230	970-1108
El Palacio de Ocomo	PC	Jalisco	Burned floor	924-1028		580-1093	427-738
			Burned floor	1214-1492	1299-1523	1189-1487	1100-1450
				1623-1655			
				973-1190	989-1055	968-1250	1045-1289
				761-913	1258-1328	738-919	814-965

Tabla 3.7: Intervalos obtenidos de los sitios de la frontera norte de Mesoamérica utilizando modelos globales y curvas de referencia locales (Pimentel et al., 2022).

1463 y 1623 d.C y como se menciona anteriormente, este puede asociarse a una reocupación por otro grupo. No obstante, se observó que el contexto de los sitios muestreados del fogón 1, fogón 2 y la cavidad quemada, destaca solo algunos puntos de combustión a diferencia del Salón de las Columnas y Plaza de los Sacrificios.

En los sitios, el fuego cubrió áreas extensas. Una evidencia fue el intervalo de 854 y 968 d.C que indica que los pisos de la Plaza de los Sacrificios fueron quemados, mientras que para el Salón de las Columnas se observó una exposición al fuego durante 1018 y 1163 d.C. Lo anterior muestra que el incendio de La Quemada ocurrió inicialmente en algunas estructuras, escaleras y accesos que eventualmente fueron cerrados y que para los últimos años de la fase Ciudadela el sitio fue abandonado y quemado por completo.

El hecho de que La Quemada contara con numerosos caminos prehispánicos lo hizo uno de los centros ceremoniales, arquitectónicos y de comercio más importantes, pues contaba con una de las rutas más eficientes entre México Central y el Suroeste (Berney, 2002) cercano a Alta Vista donde el comercio de turquesa era codiciado y con el cual La Quemada tenía muchas similitudes. Una cuestión significativa es que el comienzo de la población del

asentamiento coincide con la caída de Teotihuacán al igual que con un incremento de piedra turquesa en sitios de Mesoamérica lo que causó una economía política, histórica y cultural trascendental (Berney, 2002; Turkon, 2004; Weigand, 1975) ya que se estima su consumo limitado a la élite.

En el sitio, las evidencias indican que rituales de cierre, así como ofrendas e incendios intencionales se llevaron a cabo como un proceso de abandono gradual, primero en la parte de la Acrópolis que corresponde con la Plaza de los Sacrificios en el tercer nivel del asentamiento y finalmente hacía el Salón de las Columnas. Es por esto, que los estudios arqueomagnéticos realizados en la zona de La Quemada y sus alrededores muestran las ventajas del método para poder comprender el contexto arqueológico de la zona al igual que el conocimiento geofísico ya que se obtienen nuevos datos sobre el comportamiento del campo geomagnético durante ese tiempo registrado en este sitio arqueológico.

Capítulo 4

Descripción del sitio de estudio y detalles de muestreo

4.1. Ubicación

La zona arqueológica de La Quemada es uno de los asentamientos más valiosos de la frontera norte de Mesoamérica, ubicada en el municipio de Villanueva, Zacatecas en el Valle de Malpaso. Se encuentra delimitado por la Sierra Palomas hacia el este y la Sierra Morones al este y es drenado por el río Malpaso ([López-Delgado et al., 2019](#)).

4.2. Contexto arquitectónico

Este centro ceremonial servía como una entidad política de al menos 200 pueblos y aldeas. Está compuesto por terrazas artificiales, plataformas, escaleras, canchas de pelota, patios, templos y complejos residenciales muchos de los cuales están construidos en el cerro de Los Edificios alrededor de muros de mampostería ([Nelson, 1997](#)), además, alrededor de la zona se observan redes de caminos prehispánicos ([Nelson, 2015](#)) que servían como un intercambio social, administrativo y cultural que asociaban a La Quemada con legendarios sitios. Se ha descrito como un enclave Teotihuacano en contra de las intrusiones Chichimecas, un centro tarasco y como un emporio tolteca.

4.2.1. Edificación

La construcción del sitio (Figura 4.1) se adaptó para el uso ceremonial, administrativo y de vivienda, esto se observa debido al aprovechamiento de la roca del terreno que cual fue manufacturada para poder ser utilizada en los cimientos y plataformas. Siendo así, el sitio arqueológico se construyó en 5 niveles: en el primer nivel se encontraba la entrada común para todos los habitantes conformada por dos bases piramidales además de un camino empedrado de 35 m de ancho con 400 m de longitud el cual conducía al Salón de las Columnas, a la Gran Plaza donde se celebraban ceremonias religiosas, a la cancha de pelota y la Pirámide Votiva donde residía la deidad principal (Pimentel et al., 2021). Para acceder al segundo nivel se hallaban dos grandes escaleras las cuales conducían a El Cuartel y Plaza de la Pirámide además de los complejos habitacionales y espacios administrativos y ceremoniales. Conformando el tercer nivel, se localizaba una gran plaza rodeada por complejos habitacionales conocido como el Conjunto de los Maestros en donde se observa una base piramidal, un altar central y grandes pasillos. En este nivel sobresale la Plaza de los Sacrificios en donde se localizó una escultura tallada en piedra (Torreblanca et al., 2020). Finalmente,



Figura 4.1: Sitio arqueológico de La Quemada construido en el cerro de Los Edificios

el quinto nivel se localizaba en la parte superior noroccidental y noreste del cerro, en este

destaca el área de la Ciudadela la cual tenía una plaza con un altar central, una base piramidal y un salón de columnas sugiriendo un uso de carácter sagrado que contaba con una escalinata de 70 m de longitud como uno de los accesos (Torreblanca et al., 2020).

4.2.2. Ocupación

La ocupación de La Quemada comenzó durante los periodos del Clásico tardío y Epiclásico (500-900 AD) con un apogeo cultural durante (600-800 AD) (Trombold, 2005) por lo que se definen 3 fases de ocupación: la primera correspondiente a Malpaso durante (400-600/650 AD), este periodo coincide con el máximo crecimiento poblacional de Teotihuacan y donde posiblemente los primeros habitantes pertenecían a las regiones del cañón de Juchipila y los Altos de Jalisco, además de la ocupación de otros grupos como los Mexica, Tarascos y Toltecas (Nelson, 1997). El crecimiento arquitectónico del sitio corresponde con la segunda fase La Quemada (600/650-850 AD) que coincide con la caída de Teotihuacán. La última fase de ocupación de nombre Ciudadela (850-1000 AD) culminó en un abandono gradual del sitio en donde se observa la evidencia de un gran incendio debido a la presencia de estructuras carbonizadas como suelos, techos y pisos (Pimentel et al., 2021).

La producción de cerámica era una práctica significativa alrededor del Valle de Malpaso que ha servido para caracterizar la distribución de grupos sociales, especialmente en la zona de La Quemada. De acuerdo con su distribución en sitios como Alta Vista, la región de los cañones, el Bajío y con la región del Tunal Grande (Figura 4.2) se encontraba una gran similitud de la alfarería conocida como Tepozán con la decoración de la cerámica Cantunillo correspondiente a la cultura de los Chalchihuites identificando a La Quemada como uno de los centros religiosos, ceremoniales y políticos más importantes (Torreblanca et al., 2020; Wells, 2000).

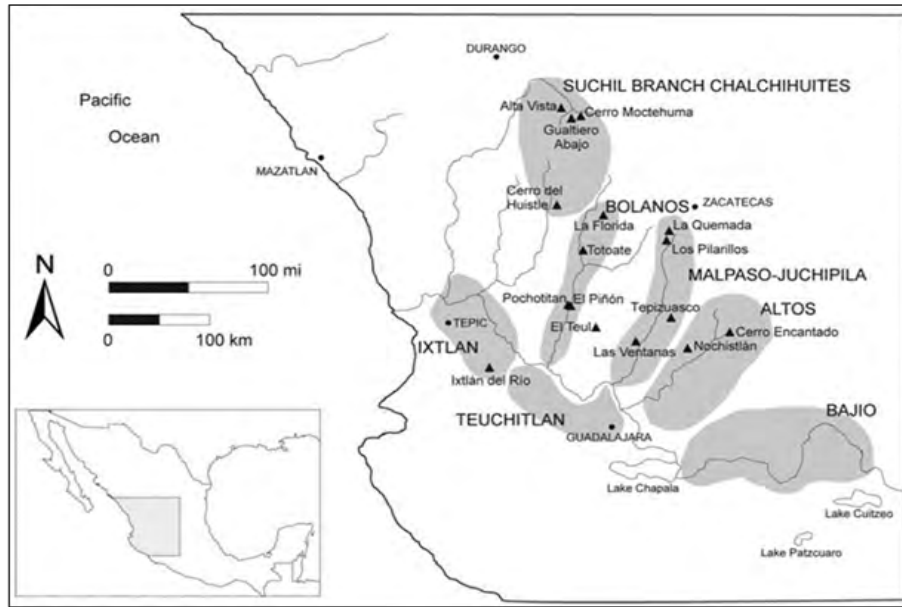


Figura 4.2: Principales sitios alrededor de La Quemada durante el periodo Epiclásico (Torvinen and Nelson, 2020).

4.3. Procedencia de muestras analizadas

Las muestras fueron obtenidas del sitio arqueológico La Quemada, Zacatecas en el municipio de Villanueva, de ahí, los puntos de muestreo arqueomagnético pertenecen al Salón de La Ciudadela ubicada en el quinto nivel del asentamiento y la Plaza de los Sacrificios ubicada en el tercer nivel (Figura 4.3). Esto con el fin de obtener fragmentos quemados que, a su vez permitirán realizar un estudio arqueomagnético. El trabajo de campo fue realizado por el Arqueol. Juan Gerardo Rivera Belmontes, Arqueol. Carlos Alberto Torreblanca Padilla y el Dr. Avtandil Gogichaishvili.

Las muestras correspondientes a La Ciudadela y la Plaza de los Sacrificios se muestran con su respectiva ubicación en coordenadas en la Tabla 4.1.



Figura 4.3: Modelo de elevación y los puntos de muestreo en La Quemada (Autor: Juan Gerardo Rivera Belmontes).

Muestra	Ubicación	Coordenadas	Observaciones
LQ10	Salón de la Ciudadela, 5to Nivel. Pozo realizado a 3.8 metros al noroeste	E 7223919 N 2485768 ALT. 2243	El pozo para la extracción de la muestra de piso se realizó sobre el área realizada anteriormente por Legeman en 1993
LQ11	Salón de la Ciudadela, 5to Nivel. Pozo realizado a 3.8 metros al noroeste	E 7223919 N 2485768 ALT. 2243	El pozo para la extracción de la muestra de piso se realizó sobre el área realizada anteriormente por Legeman en 1993
LQ12	Salón de la Ciudadela, 5to Nivel. Pozo realizado a 9.3 metros al noroeste	E 7223919 N 2485768 ALT. 2244	El pozo para la extracción de la muestra de piso se realizó sobre el área realizada anteriormente por Legeman en 1993
LQ13	Salón de la ciudadela, 5to Nivel. Pozo realizado a 9.3 metros al noroeste	E 7223919 N 2485768 ALT. 2244	El pozo para la extracción de la muestra de piso se realizó sobre el área realizada anteriormente por Legeman en 1993
LQ14	Cuarto Sur de la Plaza de los Sacrificios. Tercer nivel	E 724127 N 2485142 ALT 2175	Muestra extraída del aplanado del muro norte
LQ15	Cuarto Sur de la Plaza de los Sacrificios. Tercer nivel	E 724127 N 2485142 ALT 2175	Laja del muro norte del cuarto Sur de La Plaza de los Sacrificios

Tabla 4.1: Puntos de muestreo arqueomagnético, La Quemada.

LQ10, LQ11, LQ12 y LQ13 fueron tomadas de la Plaza de la Ciudadela (Figura 4.4), esta zona se caracteriza por construcciones de uso ceremonial y defensivo observado debido a la muralla que rodea el sitio y que, además, fue construida durante el final de la ocupación de La Quemada.

Para el caso de las muestras LQ14 y LQ15 fueron tomadas de la Plaza de los Sacrificios la cual se destaca por una plaza hundida con un altar central (Figura 4.5).



Figura 4.4: Ortoimágenes de la Plaza de la Ciudadela (Fotografías: Juan Gerardo Rivera Belmontes).



Figura 4.5: Ortoimagen de la Plaza de los Sacrificios donde se indican los puntos de muestreo LQ14 Y LQ15 (Fotografías: Juan Gerardo Rivera Belmontes)

4.3.1. Método de muestreo

Se recolectaron *in-situ* 6 localidades (Figuras 4.6 y 4.7) de piso y muro quemado utilizando el método de recolección por bloque de mano. Este consiste en colocar sobre el fragmento mezcla de yeso que se nivela con ayuda de una placa de acrílico, una vez seco se utiliza la brújula magnética y solar para su orientación. Finalmente, para poder extraer la muestra se

utiliza el mazo y cincel ambos amagnéticos.



Figura 4.6: Muestreo de los bloques LQ10, LQ11, LQ12, y LQ13 de la Plaza de la Ciudadela.



Figura 4.7: Muestreo de los bloques LQ14 y LQ15 de la Plaza de los Sacrificios.

4.3.2. Preparación de muestras

Para poder llevar a cabo los experimentos de magnetismo de roca, cada muestra fue preparada en laboratorio de acuerdo con el experimento a realizar; para LQ14 la muestra fue consolidada debido a su fragilidad. A continuación, se describe el procedimiento de preparación para los bloques de mano.

Para la consolidación, se prepara una mezcla de 60 % agua y 40 % pegamento el cual no interfiere con las mediciones ya que es un material esencialmente diamagnético. Esta mezcla se coloca en 3 capas en la parte superficial de la muestra y se deja secar entre cada paso, esto permite obtener un fragmento menos frágil para su corte en especímenes.

Los 6 bloques se encapsularon en moldes de yeso siempre conservando la dirección del norte magnético marcado en campo, una vez seco el molde se marcaron los especímenes y se cortaron en 8 cm^3 , para cada bloque se obtuvieron al menos 10 especímenes para el experimento de desmagnetización por campos alternos (Figura 4.8).



Figura 4.8: Preparación de las muestras para los experimentos de AFD y medición de la NRM.

Capítulo 5

Metodología

5.1. Tratamientos

5.1.1. Desmagnetización por campos alternos

Se desmagnetizaron un total 60 especímenes utilizando un desmagnetizador LDA5/PAM1 (Figura 5.1b). Consiste en someter el espécimen a pasos de campos magnéticos alternos los cuales van incrementando con el fin de remover paulatinamente magnetización remanente natural (en nuestro caso termoremanente) así como las magnetizaciones secundarias. Inicialmente y entre cada paso, se mide la NRM (Magnetización Remanente Natural por sus siglas en inglés) con el fin de identificar la magnetización primaria empleando un magnetómetro de giro AGICO JR6 (Figura 5.1a). Por lo general, la muestra se desmagnetiza en sus tres ejes (x, y, z) desde los 5 hasta los 100 mT en incrementos graduales de 5 mT. Este experimento permite obtener los componentes magnéticos característicos en el diagrama de Zijdeveld con el cual se observa y se visualiza la dirección de la magnetización primaria.

5.1.2. Portadores magnéticos

Con la finalidad de identificar a los minerales magnéticos responsables de la magnetización presente en las muestras y de evaluar su estabilidad térmica, se realizaron experimentos de susceptibilidad magnética en función de la temperatura con ayuda del susceptibilímetro AGICO Kappa Bridge modelo MFK1 (Figura 5.2b). Para estos experimentos, se utilizó una

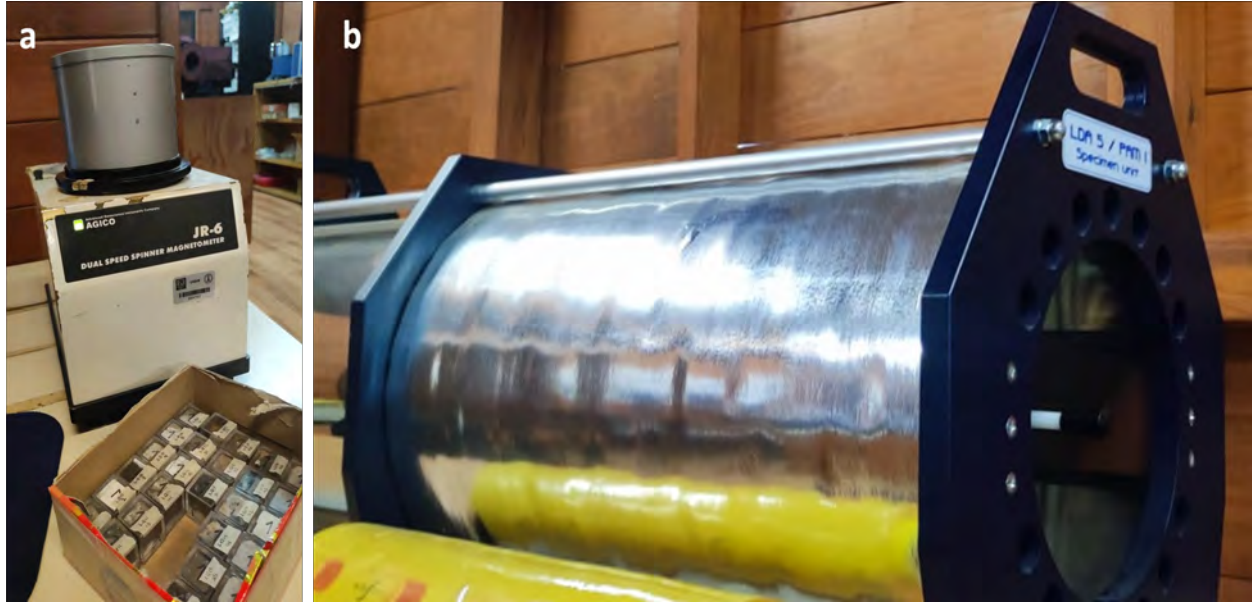


Figura 5.1: En a) magnétometro de giro AGICO JR6. En b) desmagnetizador AGICO LDA5/PAM1

muestra de polvo de cada uno de los sitios el cual fue obtenido al triturar las muestras de roca con un mortero de ágata (Figura 5.2a) y tamizadas con un tamiz no magnético del no. 30 (0.595 mm) hasta obtener aproximadamente un gramo de polvo. Para la medición de la susceptibilidad magnética, el polvo se colocó en un porta muestras de cuarzo y posteriormente fue calentado a un ritmo de $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$, desde la temperatura ambiente hasta alcanzar los 650°C . Una vez alcanzada esta temperatura, fueron enfríasdas al mismo ritmo. Todo el experimento fue realizado en presencia de gas argón para reducir la posible oxidación durante el calentamiento. La temperatura de Curie fue obtenida determinando el punto de inflexión en la caída de la susceptibilidad magnética el cual corresponde con la eliminación de las fases ferromagnéticas en los minerales presentes en las muestras (ver por ejemplo [Prévot et al. \(1983\)](#)).

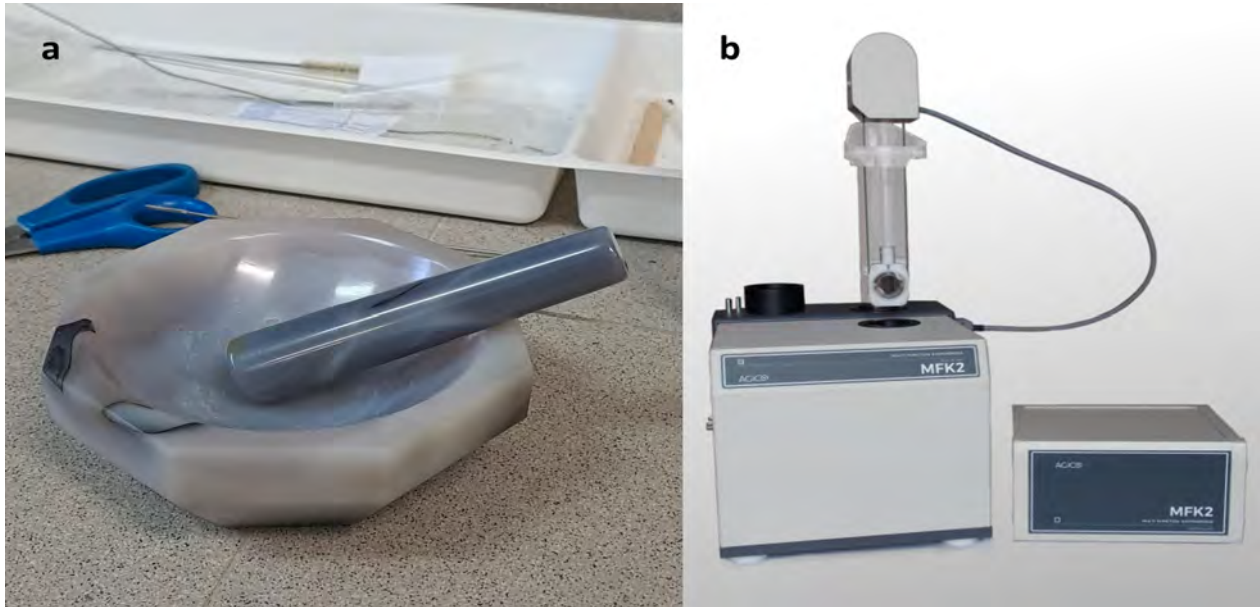


Figura 5.2: En a) mortero de ágata para la preparación de muestras del experimento de susceptibilidad vs. temperatura. En b) susceptibilímetro Kappabridge MFK1.

5.1.3. Determinación de las direcciones medias por sitio

Las direcciones medias fueron determinadas a partir de un análisis estadístico por PCA (Principal Component Analysis por sus siglas en inglés) al igual que la estadística de Fisher. Los resultados de estas direcciones medias fueron comparados con curvas locales y globales para la datación en donde se estima una densidad de probabilidad con un nivel de confianza del 95 %.

5.2. Datación arqueomagnética

Debido a que el CMT varía tanto espacial como temporalmente, es posible reconstruir sus variaciones a partir de modelos globales y locales que se realizan a partir de los registros arqueomagnéticos y paleomagnéticos de los últimos milenios. Compilando estos registros, se construyen las Curvas de Variación Paleosecular (PSVC) de cualquier región a través del estudio de la magnetización remanente ([Pavón-Carrasco et al., 2011](#)) que se compara con una PSVC de referencia y se obtiene el intervalo más probable para el artefacto arqueológico.

5.2.1. Datación arqueomagnética basada en direcciones medias utilizando curvas globales y locales

La técnica de datación arqueomagnética requiere una compilación de registros concentrados en una región de $2 \times 10^5 \text{ km}^2$ lo cual permite tener una aproximación para zonas en donde no se encuentran datos suficientes para construir una PSVC ([Pavón-Carrasco et al., 2011](#)). La datación implica establecer la posición del polo norte magnético aparente a partir de la declinación e inclinación del campo en un determinado artefacto con la finalidad de establecer la posición del norte magnético local en el pasado ([Greco Mainero et al., 2014](#)). GEOMAGÍA50 es la base de datos que cuenta con 3798 determinaciones de intensidad arqueomagnética y paleomagnética de los últimos 50,000 (49900 a 1998 d.C) años proporcionada por [Korhonen et al. \(2008\)](#); su utilidad se comprobó mediante la comparación de las diferentes técnicas en la determinación de paleointensidad realizado por [Donadini et al. \(2007\)](#).

A partir de lo anterior, es posible generar modelos locales, tal es el caso de la región europea. Empleando un Análisis de Esféricos Armónicos se publicaron los modelos: SCHA.DIF.3K basado en datos arqueomagnéticos y SHA.DIF8K a partir de registros sedimentarios en lagos; estos modelos proporcionan información de los tres componentes del campo magnético. Por otro lado, los modelos globales denominados CALS se realizan a partir de diferentes bases de datos. El primero de ellos: ARCH3K.1 ([Donadini et al., 2009](#); [Korte and Constable, 2011](#)) se desarrolló únicamente utilizando datos arqueomagnéticos y ha mostrado abarcar el mismo periodo de tiempo coincidiendo con el modelo local SCHA.DIF.3K, esto

hace que ARCH3K.1 sea una de las mejores opciones como modelo global de datación para las regiones de Europa y Asia, mientras que CALS3K.3 (Figura 5.3) es la mejor representación del campo global para dataciones fuera de Eurasia (Pavón-Carrasco et al., 2011).

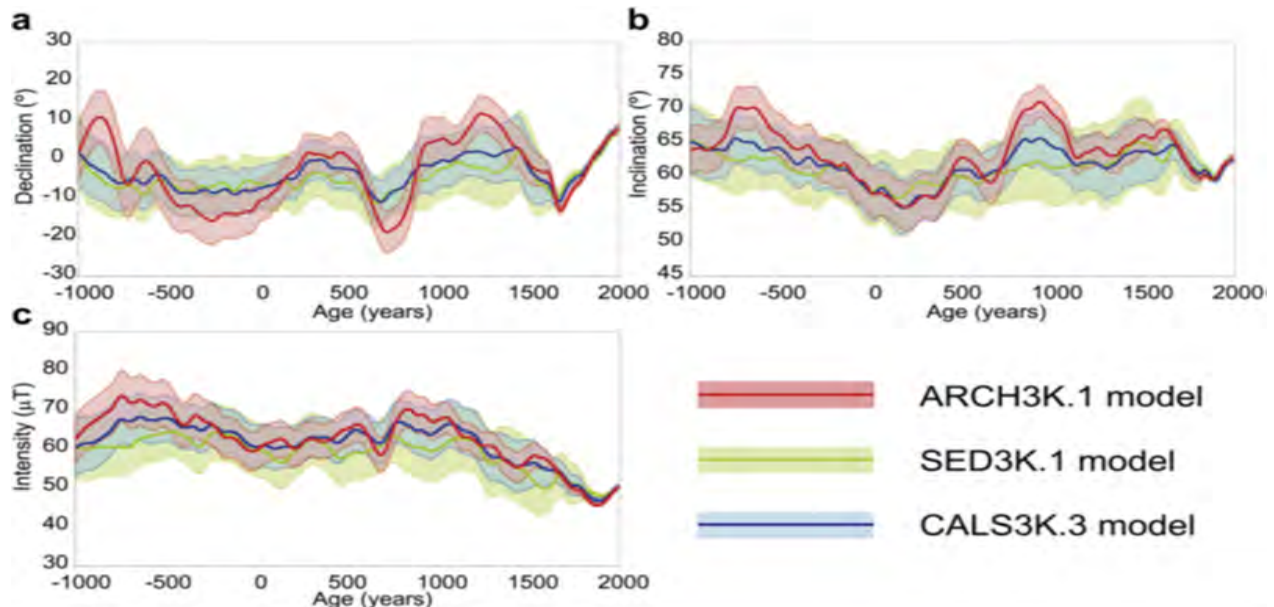


Figura 5.3: Curvas de variación paleosecular (a) declinación, (b) declinación y (c) intensidad a 45°N, 45°E utilizando los modelos ARCH3K.1, SED3K.1 Y CALS3K.3 (Pavón-Carrasco et al., 2011)

Para obtener un intervalo de edad se utiliza la dirección arqueomagnética o el vector geomagnético completo. Al disponer solo de las arqueodirecciones (declinación e inclinación) se combinan las funciones de densidad de probabilidad de ambos elementos y, por lo tanto, se puede obtener más de un intervalo de datación probable. En cambio, si se dispone del vector geomagnético completo (declinación, inclinación e intensidad) el número de intervalos probables disminuye y se llega a un único intervalo en algunos casos (Carrancho et al., 2022).

Capítulo 6

Resultados y discusión

6.1. Magnetismo de rocas

Con la finalidad de identificar a los minerales magnéticos responsables de la magnetización presente en las muestras y de evaluar su estabilidad térmica, se realizaron experimentos de susceptibilidad magnética en función de la temperatura, se utilizó un susceptibilímetro AGICO Kappa Bridge modelo MFK1. Para estos experimentos se utilizó una muestra de polvo para cada uno de los sitios, obtenido al triturar las muestras de roca o piso con un mortero de ágata y fueron tamizadas con un tamiz no magnético del hasta obtener aproximadamente un gramo de polvo. Para la medición de la susceptibilidad magnética, el polvo se colocó en un portamuestras de cuarzo y posteriormente fue calentado a un ritmo de 15 °C/min, desde la temperatura ambiente hasta alcanzar los 670°C. Una vez alcanzada esta temperatura, fueron enfriadas al mismo ritmo. Todo el experimento fue realizado en presencia de gas argón para reducir los efectos de la oxidación durante el calentamiento. La temperatura de Curie fue obtenida determinando el punto de inflexión en la caída de la susceptibilidad magnética según se describe en [Prévot et al. \(1983\)](#).

En la curva termomagnética continua obtenida de la muestra LQ10 (Figura 6.1) se observa durante el calentamiento una fase magnética con una Temperatura de Curie alrededor de 578°C lo cual corresponde a la Magnetita casi pura o titanomagnetita con muy bajo contenido en titanio mientras que durante el enfriamiento se presentó una disminución significativa del valor de susceptibilidad y una nueva fase magnética alrededor de los 320°C.

Este comportamiento se debe a la transformación de los minerales magnéticos durante el calentamiento producto posiblemente de la oxidación y se le considera irreversible.

En las Curvas de las muestras LQ11 (Figura 6.1) se observa durante el calentamiento una fase magnética principal con una temperatura de Curie cercana a los 585°C a partir de la cual la muestra ha disminuido más del 95 % del valor de la susceptibilidad magnética inicial y posteriormente se observa con una nueva disminución en los 670°C posiblemente hematita, sin alcanzar la pérdida total de la susceptibilidad que también se puede atribuir al artefacto experimental. Aunque estas mismas temperaturas se mantienen durante el enfriamiento, se observa una caída significativa de la susceptibilidad inicial que alcanza una disminución de hasta el 60 % por lo que se le considera irreversible.

La curva K-T de la muestra LQ12 (Figura 6.1) indica la presencia de varias fases magnéticas durante el calentamiento; es notoria una caída parcial de la susceptibilidad magnética en los 440°C disminuyendo alrededor del 25 % de la magnetización máxima y una segunda caída de la susceptibilidad, la más significativa, al alcanzar los 580°C disminuyendo más del 98 % del valor inicial lo cual es compatible con titanomagnetita con bajo contenido en titanio o magnetita casi pura. Durante el calentamiento se observa solamente esta misma fase magnética con un aumento moderado de la magnetización total lo que indica la transformación de los minerales magnéticos (inversión de titanomaghemita ver [Özdemir \(1987\)](#)) de baja coercitividad durante el calentamiento probablemente hacia magnetita. Un comportamiento muy similar se aprecia en la curva correspondiente a la muestra LQ13, por lo que se les considera irreversibles.

El comportamiento de las curvas k-T de la muestra LQ14 (Figura 6.1) indica la presencia de una fase magnética principal a una temperatura de Curie aproximada de 595°C en donde el valor de la susceptibilidad muestra una disminución del 90 al 95 % del valor de la susceptibilidad correspondiente con la titanomagnetita con bajo contenido en titanio. Durante el enfriamiento se observan esencialmente las mismas temperaturas en la curva de calentamiento, sin embargo, hay una disminución del valor de la susceptibilidad inicial del 60 %, siendo así, el comportamiento de la muestra LQ14 es irreversible.

La curva k-T de la muestra LQ15 (Figura 6.1) indica un comportamiento de baja señal magnética al límite de sensibilidad del instrumento que puede ser debido a un material

antiferromagnético o a que la muestra pudo no haber alcanzado la temperatura adecuada para crear la termoremanencia completa. De las curvas se puede distinguir una fase magnética a una temperatura de Curie de 587°C y con una disminución del valor inicial de la susceptibilidad hasta un 95 a 98 %. Durante el enfriamiento la caída de la susceptibilidad es del 70 % por lo que nuevamente, el comportamiento corresponde a uno irreversible.

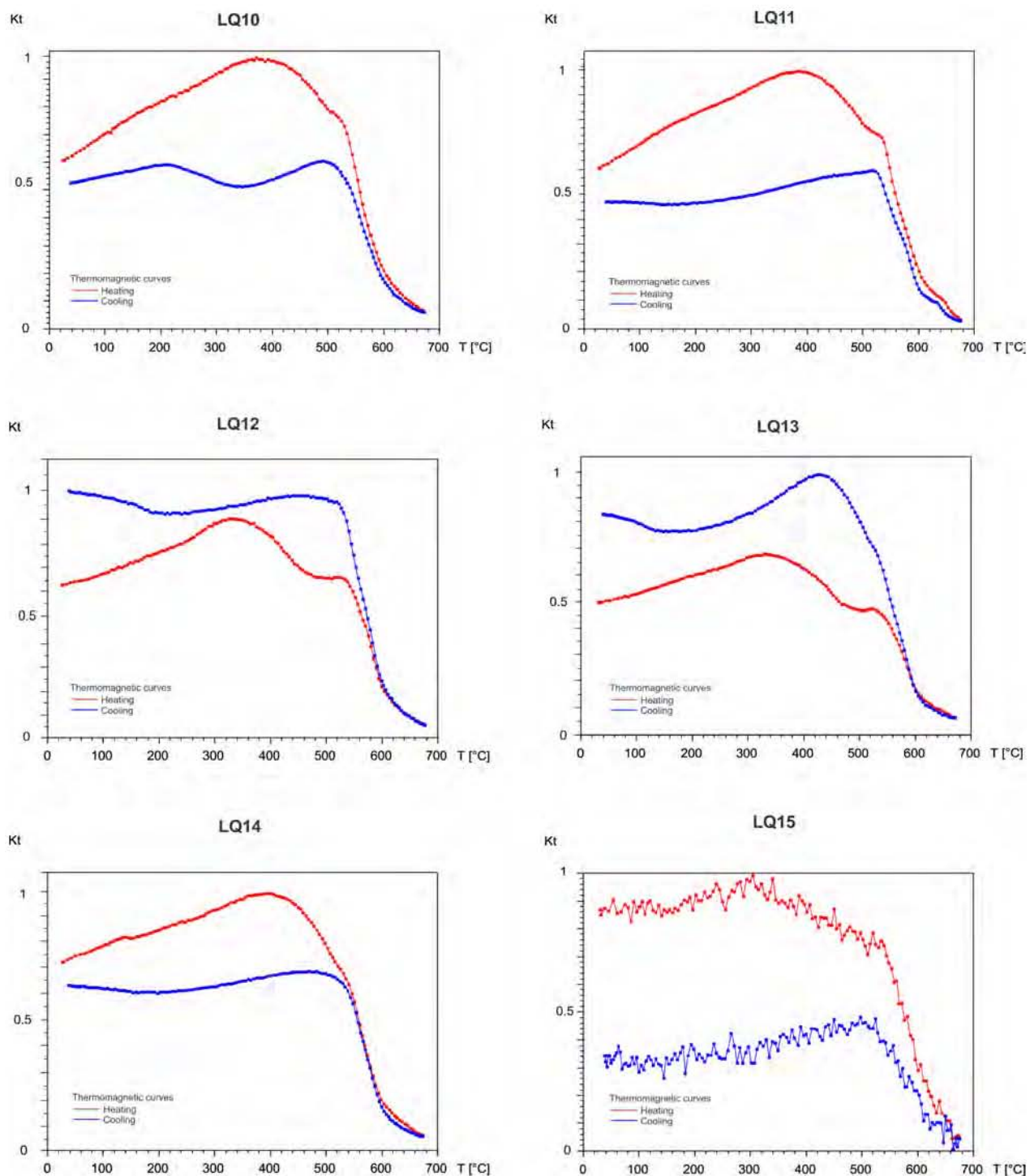


Figura 6.1: Susceptibilidad magnética en función de la Temperatura (curvas K-T). En color rojo se muestra el comportamiento de la susceptibilidad durante el calentamiento y en color azul durante el enfriamiento, la susceptibilidad magnética se muestra en unidades arbitrarias.

6.2. Tratamientos magnéticos

Magnetización remanente natural (MRN)

Una vez preparadas las muestras para los tratamientos magnéticos, estas fueron colocadas dentro de un ambiente libre de campo magnético durante diez días para eliminar los efectos de una posible remagnetización de origen viscoso. Posteriormente, a cada una de las muestras se les fue medida su magnetización remanente natural MRN, un espécimen por muestra, empleando un magnetómetro de Giro AGICO JR6-A. En general se observa una baja dispersión entre las direcciones MNR en las muestras de los sitios LQ10, LQ11, LQ12, LQ13, lo que indica que estas muestras no han sufrido alteraciones magnéticas significativas desde la última vez que fueron magnetizadas lo cual, al tratarse de muestras arqueológicas, corresponde con el último uso. En el caso de los sitios LQ14 y LQ12, aunque existe una dispersión mayor, esta sigue siendo baja, esto significa que estas muestras pudieron sufrir algún tipo de remagnetización posterior al último calentamiento posiblemente de origen viscoso.

Desmagnetización por campos alternos (AFD)

Una vez que fueron medidas las direcciones de la MRN y con la finalidad de aislar las componentes de la magnetización característica principal registrada en las muestras, así como las componentes secundarias, se realizó el tratamiento de desmagnetización progresiva mediante campos alternos a un espécimen de cada muestra (60 en total). Para la desmagnetización se utilizó un desmagnetizador AGICO LDA 5A el cual permite la aplicación de campos alternos de hasta 100 mT. Las componentes de la magnetización característica fueron calculadas mediante el método de componentes principales descrito por [Kirschvink \(1980\)](#). El comportamiento de las muestras de los bloques LQ10, LQ11, LQ12, LQ13 mostró una razonable linealidad hacia el origen de coordenadas en los diagramas ortogonales con una componente magnética inicial de origen viscoso la cual fue removida, en todos los casos, aplicando campos de 5mT. Los valores de los campos destructivos medios, donde se ha desmagnetizado más del 50 % de la magnetización inicial, fueron de 10 a 30 mT y se desmagnetizaron a un 80 % aplicando campos magnéticos desde 50 a 70 mT lo cual indica que

la magnetización presente en estas muestras proviene de minerales magnéticos de mediana a baja coercitividad. En todas estas muestras, se obtuvieron las componentes de magnetización característica ChRM empleando de 6 a 11 puntos, con valores de máxima desviación angular MAD (Maximum Angular Deviation por sus siglas en inglés) entre 1.9 a 6.3° (Figura 6.2).

En el caso de los especímenes correspondientes al bloque LQ14 se identificó en algunos casos, la presencia de una segunda componente de magnetización más significativa la cual era removida al retirar campos entre los 5 mT y 15 mT, que representaba cerca del 30 % de la magnetización total con valores de MDF de 10 a 25 mT y MAD de 0.8° a 11.6°, en todos los casos fue posible calcular la ChRM empleando 4 a 10 puntos.

En el caso del bloque LQ15, los especímenes tratados, once en total, se mantienen magnetizados por encima del 98 % de la magnetización inicial después de aplicar campos de hasta 100mT esto puede deberse a la presencia de minerales de alta coercitividad magnética como los responsables de la magnetización, en estos casos no fue posible calcular las componentes ChRM, (Figura 6.2).

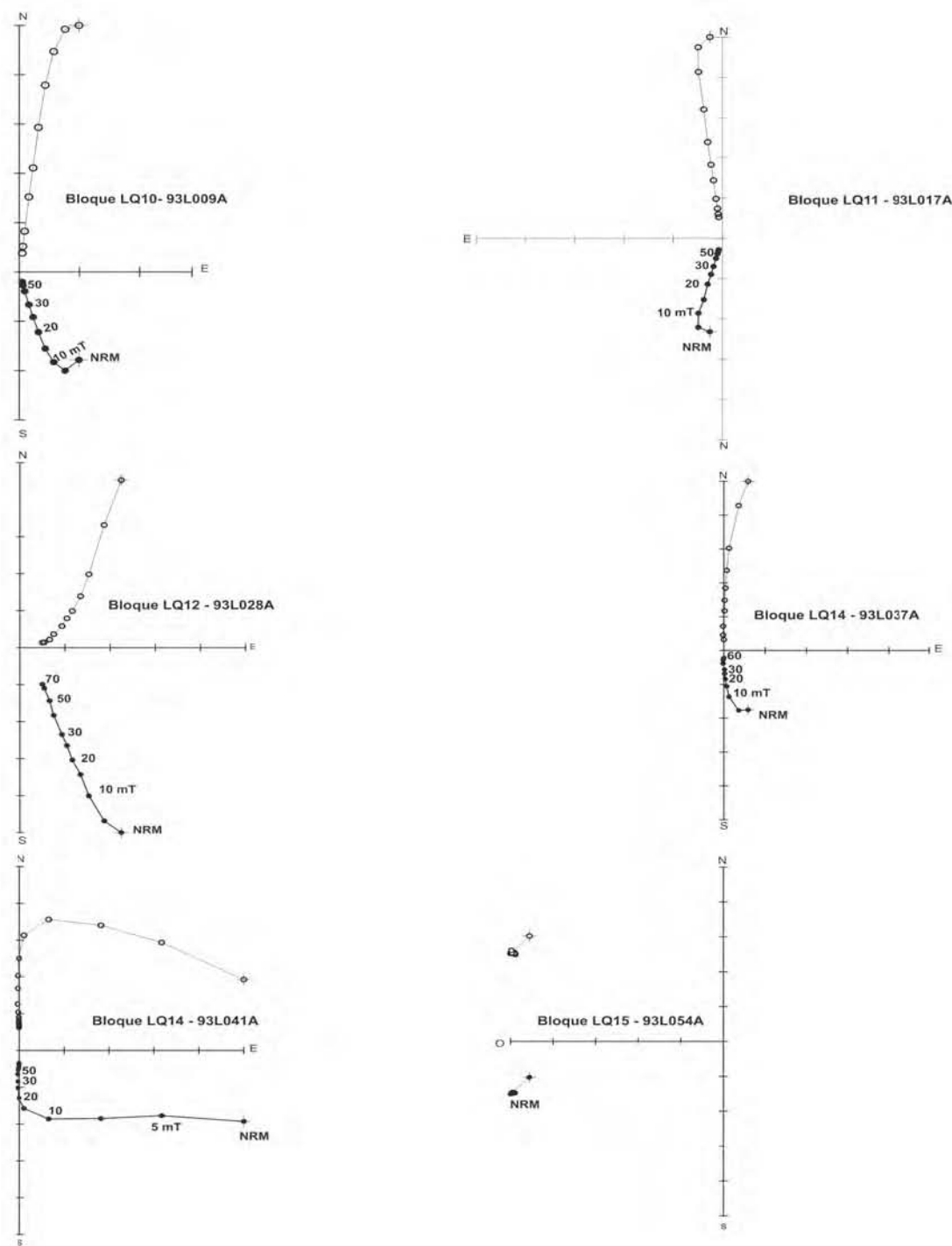


Figura 6.2: Diagramas ortogonales de desmagnetización progresiva por campos alternos.

Arqueodirecciones Medias

Una vez determinadas las componentes características de cada espécimen, con la finalidad de confirmar que las direcciones individuales de los especímenes a nivel bloque se ajustan a una distribución de tipo Fisher et al. (1993), se determinó su dirección arqueomagnética. Para el bloque LQ10 se emplearon 9 de los 10 especímenes en el cálculo del promedio, para el bloque LQ11 se utilizaron 10 especímenes al igual que para el bloque LQ13, para bloque LQ12 se utilizaron 8 de los 10 especímenes y 6 de 10 especímenes para la muestra LQ14. En términos generales se observa un buen agrupamiento a nivel bloque, con dispersiones α_{95} entre 1.9° a 6.3° calculados con al menos 7 determinaciones. Los parámetros k y R confirman esta misma situación lo que significa que a nivel bloque las direcciones obtenidas de los especímenes comparten una dirección común lo cual indica, de manera indirecta, que la remanecia magnética es muy probablemente de origen primario y que permaneció sin alteraciones significativas desde el momento en que fueron magnetizadas por última vez, (Figura 6.3).

Posteriormente, a partir de este análisis, se agruparon los datos de los especímenes según su bloque de procedencia como se describe en la sección de muestreo, es decir, los bloques LQ10, LQ11, LQ12, LQ13 pertenecen al sitio Salón de la Ciudadela y los bloques LQ14 y LQ15 al sitio llamado Plaza de los Sacrificios.

Para el Sitio de la Ciudadela, la dirección promedio se obtuvo utilizando 38 de los 40 especímenes tratados con parámetros de dispersión de Fisher $\alpha_{95} = 1.8^\circ$, $K = 167.8$ y $R = 37.78$. Estos parámetros muestran una muy baja dispersión por lo cual son aptos para realizar datación arqueomagnética exitosa.

En el caso de la Plaza de los Sacrificios, como ya se explicó anteriormente, no fue posible obtener las direcciones arqueomagnéticas del Bloque LQ15 (Figura 6.4) por lo que el promedio fue calculado únicamente con las direcciones obtenidas del bloque LQ14 con esto, el promedio fue calculado utilizando siete de las diez muestras que fueron tratadas ($n/N = 7/10$), el resumen de los resultados se muestra en la Tabla 6.1.

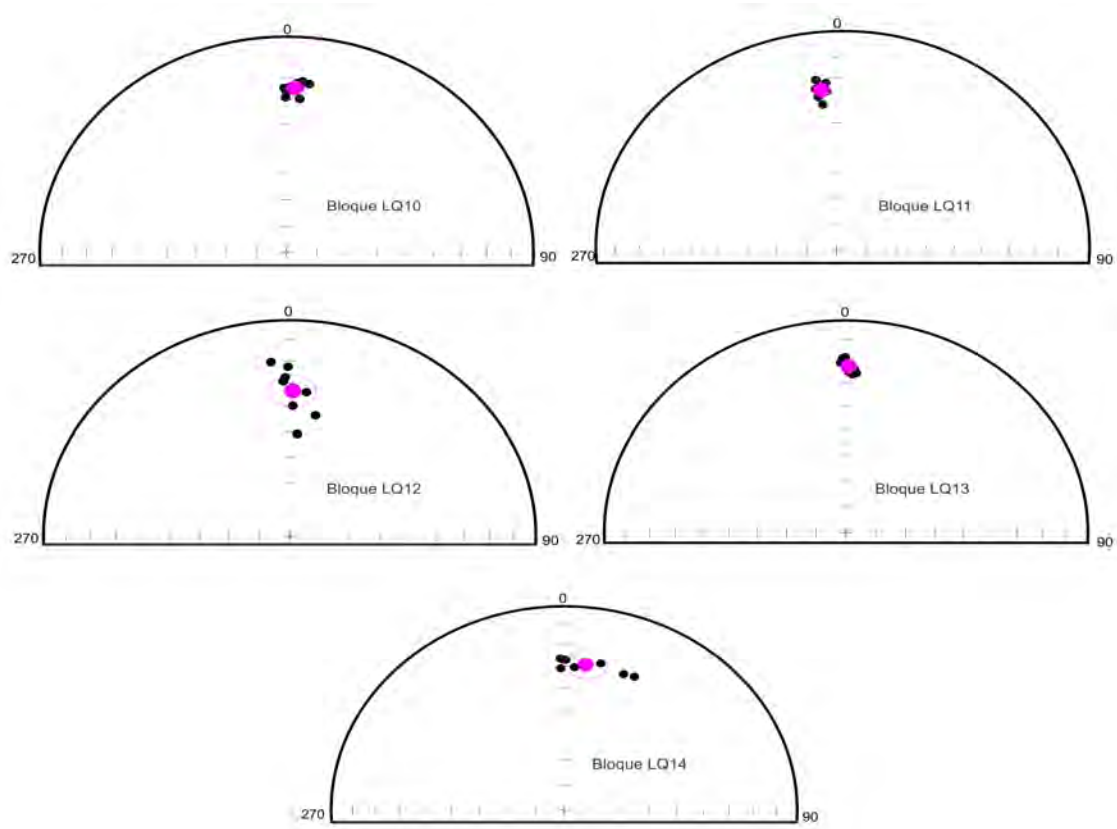


Figura 6.3: Proyección estereográfica con las arqueodirecciones promedio obtenidas a nivel bloque LQ10, LQ11, LQ12, LQ13 y LQ14

Sitio	Bloque	Dec. [°]	Inc. [°]	α_{95}	n/N	r	k
Salón de la Ciudadela	LQ10	2.5	24.9	2.4	10/10	8.98	458.44
	LQ11	355.2	25.4	1.9	10/10	9.99	619.36
	LQ12	1	31.7	6.3	8/10	7.91	78.62
	LQ13	0.7	22.8	1.9	10-oct	9.99	644.7
Promedio		359.8	25.6	1.8	38/40	37.78	167.8
Plaza de Sacrificios	LQ14	4.7	28.7	5.8	7/10	6.95	109.15
	LQ15	NA (No se desmagnetizaron las muestras)					
Promedio		4.7	28.7	5.8	7/10	6.95	109.15

Tabla 6.1: Direcciones arqueomagnéticas promedio a nivel sitio. Dec. e Inc. Son los valores de la declinación e inclinación magnética respectivamente, N el número total de muestras tratadas y n es el número de especímenes individuales utilizados en el cálculo del promedio; R, k y α_{95} son los parámetros de dispersión de la estadística de Fisher (1953)

6.2.1. Datación arqueomagnética

Para obtener las edades de los bloques, se comparó las direcciones arqueomagnéticas obtenidas con los valores esperados según los modelos globales de variación paleo secular

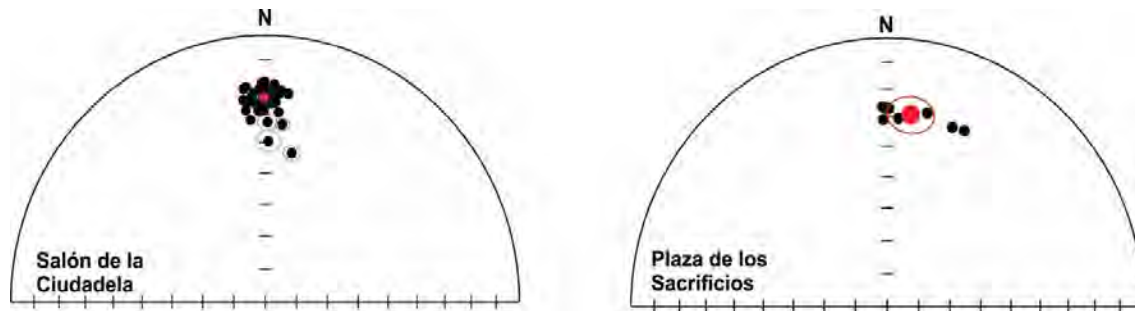


Figura 6.4: Diagramas de igual área con las direcciones arqueomagnéticas obtenidas para cada bloque, en color rojo se muestra el promedio de Fisher (para más detalles consultar la tabla 6.1)

del campo geomagnético SHA.DIF.14K de [Pavón-Carrasco et al. \(2011\)](#) que comprende los últimos 14 mil años y del modelo SHAWQ.2K propuesto por [Campuzano et al. \(2019\)](#) que cubre los últimos dos mil años construido a partir de una estricta revisión de los datos arqueomagnéticos y volcánicos globales disponibles por lo que, podría afirmarse, este nuevo modelo presenta una descripción más fina del campo geomagnético. Igualmente se utilizaron las curvas de variación paleosecular regionales recientemente publicadas, la Curva de Variación Paleosecular local de [Mahgoub et al. \(2019\)](#) basada en datos provenientes de lavas históricas y de artefactos arqueológicos quemados en Mesoamérica durante los últimos 46 ka y la curva direccional para los últimos tres milenios de [García-Ruiz et al. \(2022\)](#) construida mediante 82 datos arqueomagnéticos direccionales obtenidos de artefactos arqueológicos quemados y erupciones volcánicas recientes. Las dataciones arqueomagnéticas se realizaron con la herramienta de datación basada en MATLAB desarrollada por [Pavón-Carrasco et al. \(2011\)](#). El resultado de las cuatro dataciones se resume en la Tabla 6.2 y los intervalos de datación en las (Figuras 6.5 y 6.6).

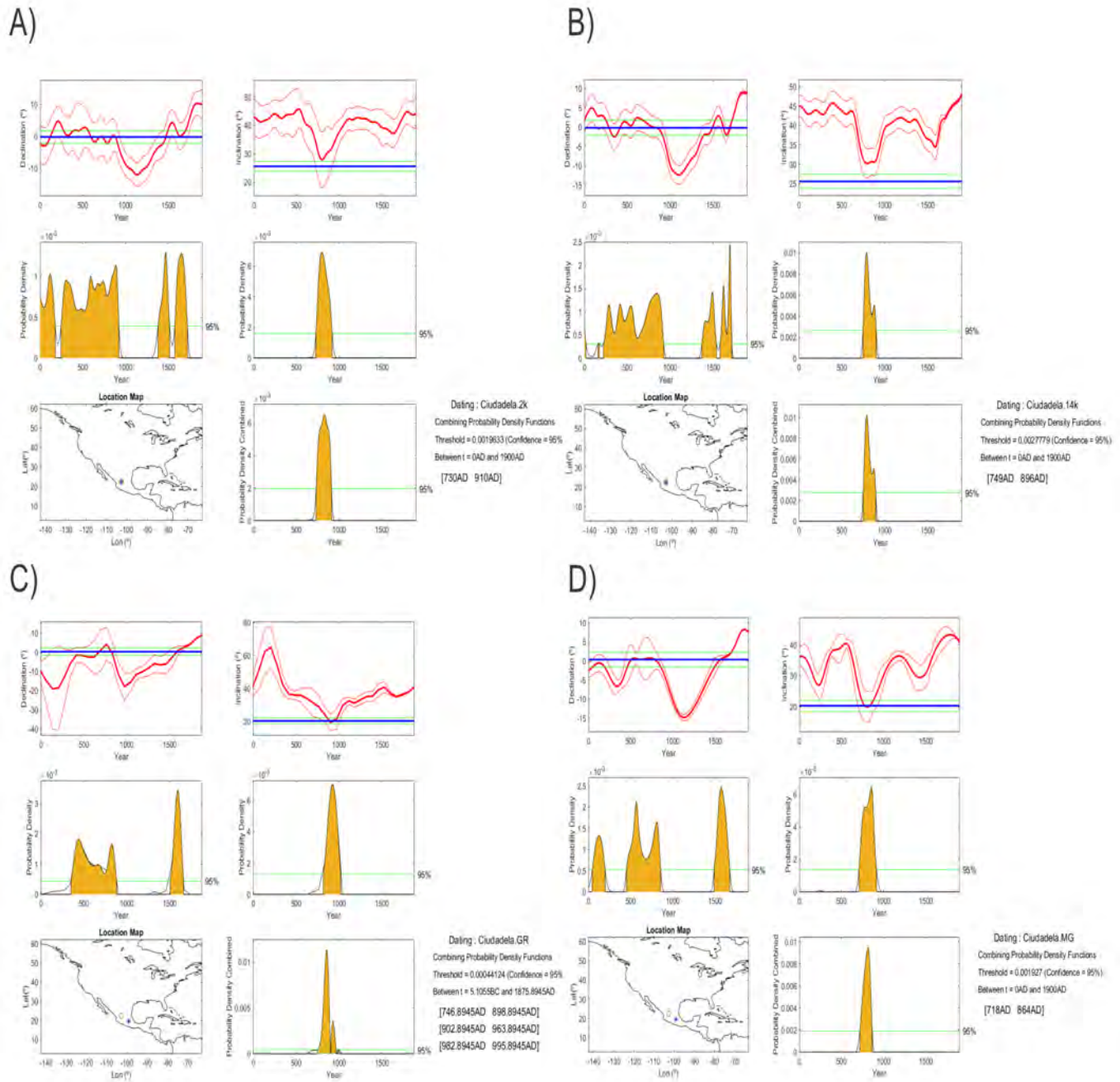


Figura 6.5: Determinación de las edades arqueométricas para el bloque correspondiente a La Ciudadela realizadas con la aplicación desarrollada por Pavón-Carrasco et al., (2014) a partir de: A) el modelo global SHAWQ.2k de Campuzano et al. (2019); B) el modelo global de variación de campo magnético SHADIF.14K de Pavón-Carrasco et al. (2011); C) la curva local de variación paleosecular desarrollada por García-Ruiz et al. (2022) y D) la curva de variación paleosecular propuesta por Mahgoub et al. (2019).

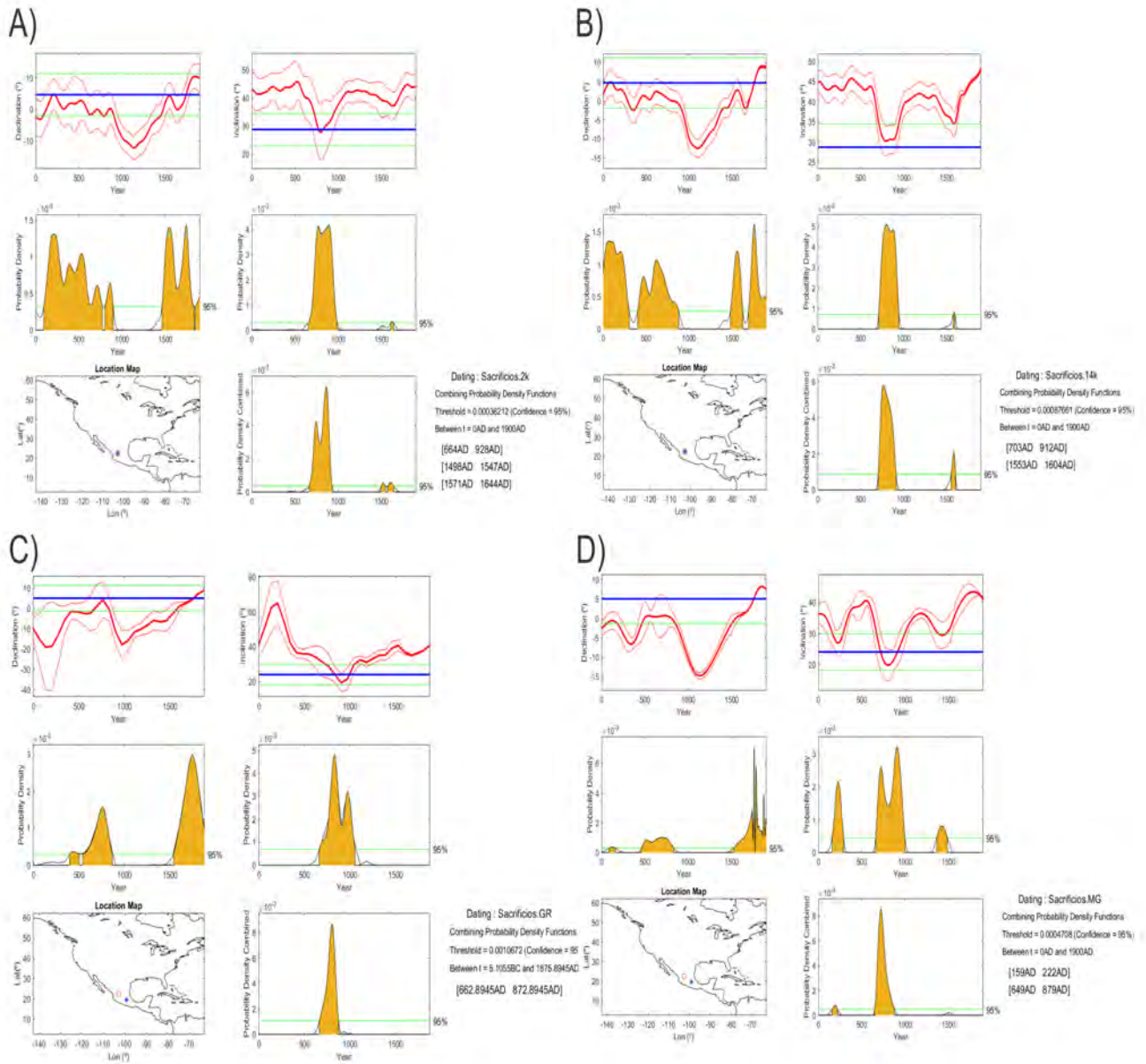


Figura 6.6: Determinación de las edades arqueométricas para el bloque correspondiente a Plaza de los Sacrificios realizadas con la aplicación desarrollada por Pavón-Carrasco et al., (2014) a partir de: A) el modelo global SHAWQ.2k de Campuzano et al. (2019); B) el modelo global de variación de campo magnético SHADIF.14K de Pavón-Carrasco et al. (2011); C) la curva local de variación paleosecular desarrollada por García-Ruiz et al. (2022) y D) la curva de variación paleosecular propuesta por Mahgoub et al. (2019).

DATACIONES ARQUEOMAGNÉTICAS UTILIZANDO CURVAS LOCALES Y GLOBALES							
Sitio	Material	SHAWQ.2K	SHA.DIF14k	Mahgoub et al., 2019 (MG)	García-Ruiz et al., 2022 (GR)		
Salón de la Ciudadela	Pisos quemados	730 - 910 d.C	749 - 896 d.C	718 - 864 d.C	746 - 898 d.C		
					902 - 963 d.C		
					982 - 995 d.C		
Plaza de los Sacrificios	Laja de muro	664 - 928 d.C	703 - 912 d.C	159 - 222 d.C	662 - 872 d.C		
		1498 - 1547 d.C				1553 - 1604 d.C	649 - 879 d.C
		1571 - 1644 d.C					

Tabla 6.2: Dataciones arqueomagnéticas. Se muestran los intervalos de edades arqueomagnéticas de cada bloque obtenidas según los modelos geomagnéticos globales y curvas de variación paleosecular locales.

Determinación de los intervalos estadísticamente más probables

Como puede observarse, dadas las diferentes curvas utilizadas, el resultado de la datación arqueomagnética genera intervalos con edades igualmente probables para cada bloque. Por este motivo y con la finalidad de establecer cuál de estas edades es estadísticamente la más probable, se utilizó el método de remuestreo Bootstrap descrito por [Efron \(1992\)](#).

En términos generales, este método consiste en construir una muestra de observaciones teóricas (edades) para cada artefacto arqueológico y cada uno de los intervalos de edad obtenidos con las cuatro curvas utilizadas, y a partir de esto, se seleccionan sus valores máximos y mínimos ([Pimentel et al., 2022](#)), se calcula una muestra de distribución de probabilidad uniforme constituida con valores esperados según los modelos globales y locales, dando una mayor ponderación a las curvas locales.

Esta distribución utilizada es una distribución uniforme continua simple en la que todos los resultados son igualmente probables en el intervalo entre los valores máximo y mínimo otorgado ([González-Hernández et al., 2020](#)). En este trabajo se calculó la media Bootstrap de la edad de cada artefacto datado junto con su desviación estándar y se estableció un intervalo de confianza del 95 % ([Pimentel et al., 2022](#)), ver Tabla 6.3 y (Figura 6.7).

DATACIONES ARQUEOMAGNÉTICAS OBTENIDAS UTILIZANDO EL MÉTODO DE BOOTSTRAP		
Sitio	Material	Intervalo Obtenido
Salón de la Ciudadela	Pisos quemados	813 - 825 d.C
Plaza de los Sacrificios	Laja de muro	766 - 786 d.C

Tabla 6.3: Intervalos de edades más probables obtenidas según el método de Bootstrap para cada bloque.

6.2.2. Implicaciones arqueológicas

El Epiclásico (650-900 d.C) se caracterizó por el declive de grandes áreas culturales de Mesoamérica, entre ellos Teotihuacán. Con ello, surgieron los conflictos armados y sociales al igual que competencias comerciales entre otros asentamientos.

El abandono del norte del México prehispánico ha sido propuesto como una de las consecuencias del cambio climático debido a actividades antropogénicas, esto comenzando en la parte sur de la frontera y extendiéndose hacia los sitios más grandes como El Cópore y La Quemada (Michelle, 2012; Pimentel et al., 2022). Estos cambios climáticos coinciden con las fases de ocupación en donde los asentamientos arqueológicos de Mesoamérica como Alta Vista, la región del Tunal Grande y El Cópore comenzaron a tener un declive irreversible durante los periodos de 720 y 930 AD (Trombold, 1990). A pesar de esto, los arqueólogos proponen que el abandono y destrucción gradual de La Quemada pudo haber sido una consecuencia de la descomposición social (Gogichaishvili, 2019) observada en la distribución de la cerámica incisa-grabada (Figura 6.8) alrededor de basureros y terrazas. Estos artefactos fueron parte de redes de intercambio en otros asentamientos alrededor de La Quemada y Los Pilarillos en donde las actividades estaban socialmente segregadas en el núcleo del asentamiento y donde los miembros representaban las actividades cívicas o ceremoniales (Wells, 2000; Strazicich, 1995).

Además del hecho de que La Quemada sugiere su destrucción por un colapso social, existen

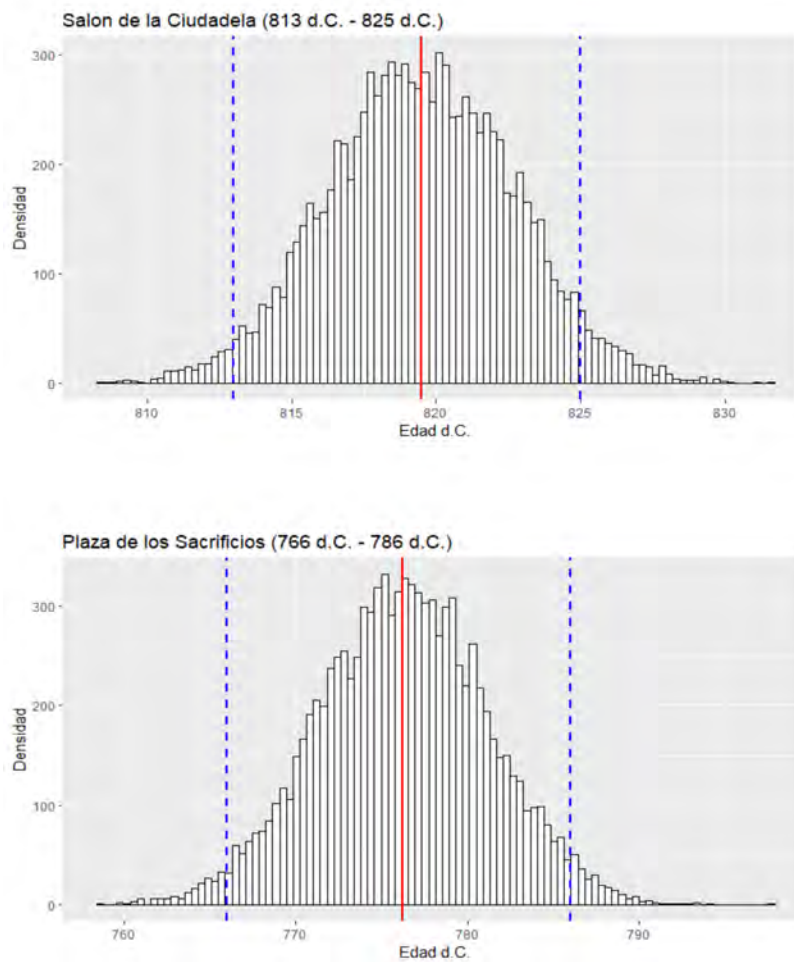


Figura 6.7: Histogramas de intervalos de edad más probable obtenidos mediante el método de remuestreo Bootstrap, la línea roja indica la edad promedio de la muestra arqueológica mientras que las líneas a azules indican el intervalo del 95 % de confianza. (6.7)

referencias a su declive en mitos de destrucción Huichol. En ellos se hacen descripciones generales como “gran roca cubierta de edificios y rodeada de murallas”, en este caso la ruta de del peyote se desvía hacia el norte de La Quemada sugiriendo que los Huicholes intentaban evitar lo que quedaba del sitio. Por otro lado, se hacen referencia a sociedades militares como águilas y jaguares los cuales intervenían para poder establecer el control de las rutas comerciales de peyote, sal, plumas o conchas. En definitiva, si los mitos Huichol hacen referencia a La Quemada, estos podrían indicar que el sitio tuvo su declive debido a la falta de control de las rutas comerciales que causaron la ruptura de ciertos grupos sociales (Weigand, 1975; Wells, 2000). Por otra parte, se encuentran los restos funerarios

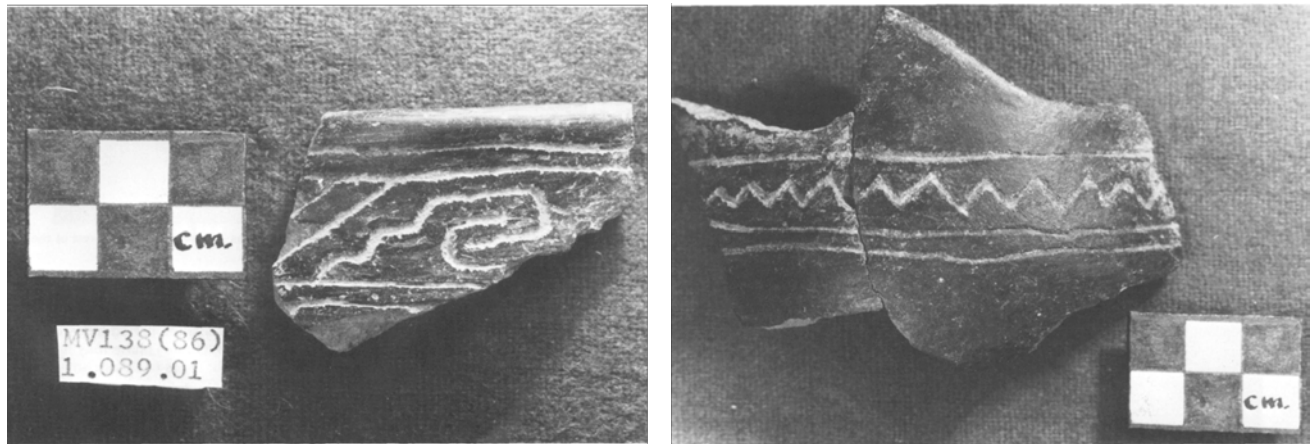


Figura 6.8: En a) Cerámica incisa-grabada Cantunillo en el área de Malpaso, en b) Cerámica incisa predominante en las regiones de La Quemada.

[Trombold \(1990\)](#)

encontrados con rasgos de cortes, por ejemplo, en el Salón de las Columnas, Terraza 18 o el área del Cuartel caracterizando las practicas mortuorias de La Quemada de carácter ritual y no necesariamente relacionados con episodios de guerra o gran violencia ya que, de ser así, no se encontrarían patrones rituales en otros sitios como Alta Vista o el Cópore en donde las estructuras se utilizaban para acumular los restos de los antepasados y donde no hay evidencia de violencia o guerra asociada al abandono de estos sitios ([Ortiz et al., 2007](#); [Nelson et al., 1992](#); [Nelson, 1995](#); [Wells, 2000](#)). Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que en La Quemada hayan ocurrido posibles eventos violentos o conflictos de guerra que pueden relacionarse a su arquitectura especialmente en La Ciudadela (5to nivel del asentamiento), ésta se encuentra delimitada por una gran Muralla considerada como un elemento arquitectónico de carácter ceremonial y defensivo construida durante la última fase de ocupación por lo que puede representar indicios de los posibles conflictos que tuvo La Quemada.

Gracias a los estudios previamente realizados en la zona, se han podido analizar las posibles causas que llevaron a la clausura del sitio; al no encontrar restos óseos que presentaran características mortuorias asociadas a rituales o violencia en abundancia, es muy probable que el sitio haya sido clausurado de forma gradual. A partir de las dataciones y estudios realizados por ([Torvinen and Nelson, 2020](#); [Ortiz et al., 2007](#); [Strazicich, 1995](#); [Pimentel et al., 2022](#); [López-Delgado et al., 2019](#); [Nelson, 1997](#); [Trombold, 2005](#); [Nelson et al., 1992](#))

se puede indicar una correspondencia con los resultados obtenidos en este estudio.

Utilizando curvas locales y globales al igual que el método de Bootstrap, fue posible obtener dos nuevos intervalos de edad para el sitio Salón de la Ciudadela y Plaza de los Sacrificios Tabla 6.4 los cuales contribuyen a definir la secuencia ocupacional de La Quemada 6.10.

ESTUDIOS ARQUEOMAGNÉTICOS REALIZADOS EN EL SITIO ARQUEOLÓGICO DE LA QUEMADA, ZACATECAS									
Muestra	Sitio	Declinación	Inclinación	Intensidad	α_{95}	n/N	R	K	Intervalo Obtenido
LQ3, LQ4	Salón de lasColumnas	345.55°	40.59°	56.5 ± 3.9 μ T	3.4°	8		266	1018 - 1163 d.C
LQ1 y LQ2	Plaza de los Sacrificios	356.16°	33.67°	40.6 ± 2.6 μ T	2.1°	15		263	854 - 968 d.C
LQ1 (Fogón 1)	Cancha de Juego de Pelota	351.3°	34.7°		2.6°	13		263	931 - 1006 d.C
LQ4 (Fogón 2)	Cancha de Juego de Pelota	359.9°	33.4°		2.7°	8		422	693 - 947 d.C
LQ4 (Fogón 2)	Cancha de Juego de Pelota	358.9°	33.4°		2.7°				1463 - 1623 d.C
LQ7 (Cavidad quemada)	Cancha de Juego de Pelota	357.7°	33.1°		3.2°	6		342	757 - 980 d.C
LQ10	La Ciudadela (Este estudio)	359.8°	25.6°		1.8°	38/40	37.78	167.8	813 - 825 d.C
LQ11									
LQ12									
LQ13									
LQ14	Plaza de los sacrificios (Este estudio)	4.7°	28.7°		5.8°	7/10	6.95	109.2	766 - 786 d.C
LQ15				No se desmagnetizaron las muestras					

Tabla 6.4: Estudios arqueomagnéticos realizados en el sitio arqueológico de La Quemada. En rojo se encuentran los nuevos datos cronológicos obtenidos en este estudio.

Para el caso del Salón de la Ciudadela se obtuvo un intervalo “optimoff de 813 d.C – 825 d.C el cual corresponde con la segunda fase de ocupación misma que se asocia al intervalo de 766 d.C – 786 d.C para la Plaza de los Sacrificios, éste último de acuerdo con el muestreo realizado se puede decir que el incendio llevado a cabo en esta zona no fue de gran magnitud, ya que del bloque LQ15 que corresponde una laja de muro (Figura 6.9) no fue posible obtener direcciones arqueomagnéticas probablemente debido a que representan direcciones de NRM totalmente inesperados para el periodo arqueológico. Esto puede indicar que los eventos de incendio en La Quemada fueron controlados e intencionales.

Estos intervalos indican que la clausura de algunas zonas fue de manera gradual, puede decirse que el abandono e incendio del sitio comenzó en la zona de la Acrópolis en la Plaza de los Sacrificios de donde se obtuvo el intervalo de 766 – 786 d.C y que se relaciona con los resultados obtenidos en el estudio de López-Delgado et al. (2019) coincidiendo con el cierre de accesos como escalinatas y paulatinamente con el abandono total del sitio. Se encuentran otros intervalos arqueomagnéticos de 1018 – 1163 d.C para el Salón de las Columnas y otro



Figura 6.9: Muestreo en la Plaza de los Sacrificios. Bloque LQ15 laja del muro norte

intervalo de 1463 – 1623 d.C para la Cancha de Juego de Pelota, estos asociados a eventos de reocupación posiblemente chichimeca.

Con lo mencionado anteriormente, a partir de la caída de Teotihuacán, muchos centros ceremoniales y políticos florecieron gracias a la necesidad de un nuevo núcleo de poder por lo que surgieron competencias culturales, sociales y de comercio rasgos que se observan durante la segunda fase de ocupación: La Quemada (600/650 – 850) conocida por el gran crecimiento arquitectónico del sitio al igual que con la caída de Teotihuacán, asimismo las alteraciones del terreno y actividades antropogénicas .

A partir de otros estudios arqueomagnéticos realizados en la frontera norte de Mesoamérica los intervalos demuestran que el despoblamiento de la zona ocurrió durante el Postclásico temprano asociado a cambios climáticos posiblemente por eventos de sequía durante 700 – 790 d.C y 810 – 880 d.C y que también se relacionan con los sitios El Cópore, Plazuelas y Cerro Barajas (Pimentel et al., 2022). Igualmente, los intervalos obtenidos en este estudio muestran una correspondencia con los resultados obtenidos por otros métodos que se presentaron en el Capítulo 3.1.4.

La evidencia presentada tanto en estudios previos como en este estudio lleva a concluir que tanto los conflictos sociales como cambios climáticos que afectaron el terreno fueron causas en conjunto y que pudieron ocurrir simultáneamente llevando a tensión entre los diferentes

asentamientos del norte prehispánico de México. Sin embargo, llevar a cabo estudios de otros sitios como Lo de Juárez, Ocote, La Palma y Los Agaves ([García Pimentel et al., 2020](#)) de donde los eventos de incendio aún se debaten podrían contribuir al conocimiento de los conflictos y ampliar la línea del tiempo de Mesoamérica durante el Epiclásico.

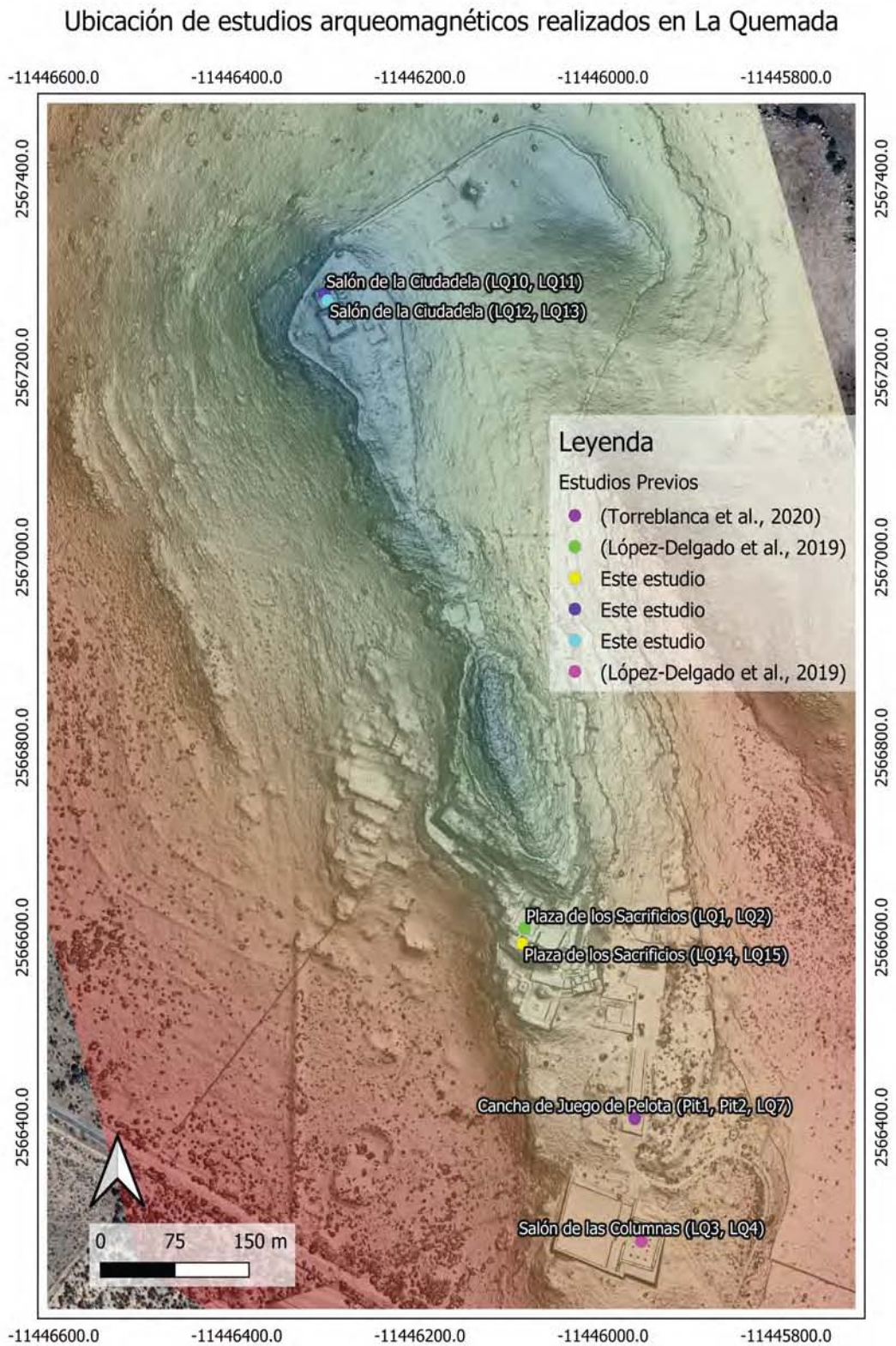


Figura 6.10: Ubicación de los estudios arqueomagnéticos realizados en el sitio arqueológico de La Quemada (Autora: Andrea Sánchez Ruiz)

Capítulo 7

Conclusiones Generales

El estudio arqueomagnético realizado en este trabajo permitió cumplir con los objetivos que se plantearon al inicio de la investigación y con lo cual, los resultados presentados son aportes valiosos ya que representan nuevos datos sobre la cronología absoluta del sitio.

Dentro del objetivo general se tenía obtener el vector geomagnético completo (declinación, inclinación e intensidad), sin embargo, a partir de las curvas de susceptibilidad vs. temperatura se descartó el experimento de paleointensidad, puesto que los 6 bloques mostraron un comportamiento irreversible que es indicativo a la inestabilidad térmica marcada. Las arqueodirecciones fueron determinadas exitosamente para el sitio de Salón de la Ciudadela agrupando los bloques LQ10, LQ11, LQ12 y LQ13 utilizando 38 de 40 especímenes, mientras que del sitio Plaza de los Sacrificios se obtuvieron estas direcciones solamente a partir del bloque LQ14 pero con parámetros de confianza de α_{95} y R que hacen esta determinación confiable. Un comportamiento interesante fue el mostrado por el bloque LQ15 durante los experimentos de desmagnetización ya que al aplicar campos de 5 hasta los 100 mT los especímenes se mantienen magnetizados por encima del 98 % probablemente debido a la presencia de minerales magnéticos altamente coercitivos.

Dentro de los objetivos específicos se encuentra determinar la mineralogía magnética, este se cumplió al realizar las curvas termomagnéticas en las que se identifica a la titanomagnetita con bajo contenido en titanio o magnetita casi pura como principal portador de la magnetización, además de la presencia de otros minerales como hematita en algunos casos.

A partir de las arqueodirecciones obtenidas se utilizaron curvas globales y locales para poder determinar un intervalo de edad para cada sitio, debido a que las curvas SHA.DIF.2K, SHA.DIF.14K, García-Ruiz y Maghoub mostraron resultados igualmente probables se utilizó el método de remuestreo Bootstrap con el cual a partir de un análisis estadístico de las curvas anteriores se pudieron determinar intervalos de edad como los más probables: Salón de la Ciudadela (813-825 d.C) y Plaza de los Sacrificios (766-786 d.C) y que corresponden con la segunda fase de ocupación: La Quemada (600/650-850 d.C).

Siendo así, estos nuevos datos cronológicos se relacionan con los obtenidos en otros estudios y con lo cual, se puede determinar que La Quemada sufrió de múltiples episodios de incendio que pueden asociarse a clausuras rituales en algunas partes del asentamiento como es el caso de la Plaza de los Sacrificios evidenciado en el estudio realizado por [López-Delgado et al. \(2019\)](#). Hasta ahora, se muestra una gran similitud entre los periodos de despoblamiento de sitios de la frontera norte de Mesoamérica por lo que continuar con los estudios en la zona es muy importante. Con todo lo anterior, se ha demostrado que el arqueomagnetismo como técnica de datación cuenta con aplicaciones importantes tanto en la Geofísica y en la Arqueología pues a partir de ella es posible datar artefactos arqueológicos a mediante el estudio de la termorremanencia que adquieren al igual que reconstruir las variaciones del campo magnético en regiones determinadas y así mejorar futuras curvas regionales y globales para la datación.

Bibliografía

- Arreola, K. (2022). Estudio arqueomagnético integral de estructuras quemadas localizadas en la zona arqueológica de Teotihuacán.
- Berney, C. (2002). *Trade on the Mesoamerican frontier: Evaluating the significance of blue-green stones at La Quemada, Zacatecas, Mexico*. PhD thesis, University of British Columbia.
- Butler, R. F. (1992). *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes*, volume 319. Blackwell Scientific Publications Boston.
- Campuzano, S. A., Gómez-Paccard, M., Pavón-Carrasco, F. J., and Osete, M. L. (2019). Emergence and evolution of the South Atlantic Anomaly revealed by the new paleomagnetic reconstruction SHAWQ2K. *Earth and Planetary Science Letters*, 512:17–26.
- Carrancho, Á., Paccard, M. G., and Carrasco, F. J. P. (2022). La datación arqueomagnética. fundamentos, éxitos y limitaciones. *Cuaternario y Geomorfología*, 36(3-4):31–44.
- Collinson, D. W., Creer, K., and Runcorn, S. K. (2013). *Methods in Palaeomagnetism: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Palaeomagnetic Methods, Held in the Physics Department of the University of Newcastle upon Tyne, April 1–10, 1964*. Elsevier.
- Donadini, F., Korte, M., and Constable, C. (2009). Geomagnetic field for 0–3 ka: 1. new data sets for global modeling. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(6).
- Donadini, F., Riisager, P., Korhonen, K., Kahma, K., Pesonen, L., and Snowball, I. (2007). Holocene geomagnetic paleointensities: A blind test of absolute paleointensity techniques and materials. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 161(1-2):19–35.

- Efron, B. (1992). Bootstrap methods: another look at the jackknife. In *Breakthroughs in statistics: Methodology and distribution*, pages 569–593. Springer.
- Esparza López, R., López-Delgado, V., Cejudo, R., Goguitchaichvili, A., Yoshida, T., Rétiz García, M., Cervantes-Solano, M., Morales, J., Bautista, F., et al. (2021). Estudio petromagnético y arqueomagnético del sitio El Cerrito de Los Agaves en la parte suroriental de los Altos de Jalisco, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(3).
- Fisher, N. I., Lewis, T., and Embleton, B. J. (1993). *Statistical analysis of spherical data*. Cambridge university press.
- Garcés, M. and Beamud, E. (2016). La Magnetoestratigrafía y la Escala del Tiempo Geológico basada en las inversiones del campo magnético terrestre. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24(3):282–282.
- García Pimentel, A. G. et al. (2020). Estudio arqueomagnético de artefactos quemados del sitio arqueológico el Cóporo (Guanajuato).
- García-Redondo, N. (2023). *Estudios arqueomagnéticos y de arqueointensidad en materiales arqueológicos quemados de la península ibérica y el Cáucaso*. PhD thesis, Universidad de Burgos.
- García-Ruiz, R., Goguitchaichvili, A., Pavón-Carrasco, F. J., Soler, A. M., Pérez-Rodríguez, N., Osete, M. L., Morales, J., and Kravchinsky, V. (2022). Fluctuations of magnetic inclination and declination in Mexico during the last three millennia. *Quaternary Geochronology*, 71:101309.
- Glatzmaier, G. A. and Olson, P. (2005). Probing the geodynamo. *Scientific American*, 292(4):50–57.
- Gogichaishvili, Avtandil, T. C. (2019). Revelan expertos de la unam que el abandono del sitio "la quemada" fue gradual y no por un gran incendio. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2019_62.html.

- Gómez-Paccard, M., Pavón-Carrasco, F. J., and Carrancho, Á. (2016). Arqueomagnetismo: aplicación al estudio del campo magnético de la Tierra ya la caracterización de yacimientos arqueológicos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24(3):294–294.
- González-Hernández, I. J., Simón-Marmolejo, I., Granillo-Macías, R., Santana-Robles, F., Rondero-Guerrero, C., Soto-Campos, C. A., et al. (2020). Simulación de la distribución uniforme generalizada. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 7(13):23–28.
- Greco Mainero, M. C., Goguichaishvili, A., Morales, J., Bocco, G., Gogorza, C. S., and Rapalini, A. E. (2014). Perspectivas de los estudios de arqueomagnetismo en Sudamérica.
- Hers, M.-A. (2005). Imágenes norteñas de los guerreros tolteca-chichimecas. *Reacomodos demograficos del Clasico al Posclasico en el centro de Mexico, Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF*, pages 11–44.
- Hrdlička, A. (1903). The region of the ancient "Chichimecs," with notes on the Tepecanos and the ruin of La Quemada, Mexico. *American Anthropologist*, 5(3):385–440.
- Hueda-Tanabe, Y., Soler-Arechalde, A. M., Urrutia-Fucugauchi, J., Barba, L., Manzanilla, L., Rebolledo-Vieyra, M., and Goguitchaichvili, A. (2004). Archaeomagnetic studies in central Mexico dating of Mesoamerican lime-plasters. *Physics of the Earth and planetary interiors*, 147(2-3):269–283.
- Jiménez Betts, P. and Darling, J. A. (2000). Archaeology of Southern Zacatecas: The Malpaso, Juchipila, and Malparaiso-Bolaños Valleys. *Greater Mesoamerica. The Archaeology of West and Northwest Mexico*, pages 155–180.
- Jiménez, P. (1990). La Quemada, Zacatecas.
- Kelley, J. C. (2019). The Chronology of the Chalchihuites Culture 1. In *The Archaeology of West and Northwest Mesoamerica*, pages 269–287. Routledge.
- Kirschvink, J. (1980). The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal International*, 62(3):699–718.

- Korhonen, K., Donadini, F., Riisager, P., and Pesonen, L. (2008). Geomag50: an archeointensity database with PHP and MySQL. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(4).
- Korte, M. and Constable, C. (2011). Improving geomagnetic field reconstructions for 0–3 ka. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 188(3-4):247–259.
- Lanos, P. (2019). Physique de l'archéomagnétisme pour la datation de bâtiments du haut moyen âge. *Reflets de la physique*, (63):54–59.
- Lanza, R. and Meloni, A. (2006). *The Earths Magnetic Field*. Springer.
- López, V., Rodríguez, L. I., Goguitchaichvili, A., Morales Castoreña, I., Cejudo Ruiz, R., Morales, J., Soler, A. M., Bautista, F., and García, R. (2021). De Chupícuaro al despoblamiento de la frontera septentrional. Evidencia arqueomagnética del sitio Lo de Juárez, Guanajuato, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(1).
- López-Delgado, V., Goguitchaichvili, A., Torreblanca, C., Cejudo, R., Jimenez, P., Morales, J., and Soler, A. M. (2019). La quemada: Decline and abandonment in two stages on the classic period northern frontier of mesoamerica. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 24:574–581.
- Mahgoub, A. N., Juárez-Arriaga, E., Böhnell, H., Manzanilla, L. R., and Cyphers, A. (2019). Refined 3600 years palaeointensity curve for Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 296:106328.
- Malmstrom, V. H. (1976). Knowledge of magnetism in pre-Columbian Mesoamerica. *Nature*, 259(5542):390–391.
- Mexicana, A. (2002). Tiempo mesoamericano (2500 ac-1521 dc). *Revista Arqueología Mexicana, Edición Especial. Editorial Raíces, Mexico*.
- Michelle, E. (2012). An anthracological approach to understanding Late Classic period cultural collapse in Mesoamerica's northwestern frontier. In Badal, E., Carrión, Y., Macias, M., and Ntinou, M., editors, *Wood and Charcoal: Evidence for Human and Natural History*, volume 13

of *Saguntum Extra*, pages 217–225. Departament de Prehistòria i d'Arqueologia, Universitat de València.

- Morales, J., Castaneda, C., Cardenas, E., and Goguitchaichvili, A. (2015). New evidence of the date of abandonment of the Plazuelas archaeological site in Guanajuato, Mexico through archaeomagnetic dating of a burned floor. *ARQUEOLOGIA IBEROAMERICANA*, 28:40–45.
- Morales, J., Smith Márquez, S. M., Goguitchaichvili, A., and Cárdenas García, E. (2020). Estudio arqueomagnético del sitio arqueológico El Palacio de como (noroeste de Mesoamérica): Evidencia de su abandono en el Posclásico. *Arqueología Iberoamericana*, 46.
- Nelson, B. (1995). Complexity, hierarchy, and scale: a controlled comparison between Chaco Canyon, New Mexico, and La Quemada, Zacatecas. *American Antiquity*, 60(4):597–618.
- Nelson, B. (1997). Chronology and stratigraphy at La quemada, Zacatecas, Mexico. *Journal of Field Archaeology*, 24(1):85–109.
- Nelson, B. (2015). Desplazamiento ritual en el Occidente de México: Del pasado prehispánico al presente. *Arqueología Mexicana*, 22(131):54–59.
- Nelson, B., Darling, J. A., and Kice, D. A. (1992). Mortuary practices and the social order at La Quemada, Zacatecas, Mexico. *Latin American Antiquity*, 3(4):298–315.
- Ortiz, A. G., de Santiago, A. V., and Quintero, J. I. M. (2007). Evidencias de prácticas rituales en La Quemada, Zacatecas: análisis de un osario. *Estudios de Antropología Biológica*, 13(1).
- Özdemir, Ö. (1987). Inversion of titanomaghemites. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 46(1-3):184–196.
- Pavón-Carrasco, F. J., Rodríguez-González, J., Osete, M. L., and Torta, J. M. (2011). A matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science*, 38(2):408–419.
- Pimentel, A. G., Goguitchaichvili, A., Torreblanca, C., Kravchinsky, V., Cervantes, M., García, R., Cejudo, R., Bautista, F., and Morales, J. (2022). Depopulation of the Northern Border of Mesoamerica during the Early Postclassic: Evidence from the Reappraisal of Archaeomagnetic Data. *Land*, 11(12):2103.

- Pimentel, A. G., Goguitchaichvili, A., Torreblanca, C., Ruiz, R. C., Kravchinsky, V., García, R., Morales, J., and Cervantes, M. (2020). The memory of fire in El Coporo (Northern Mesoamerica): Apogee and abandonment. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 30:102274.
- Pimentel, A. G., Torreblanca, C., Solano, M. C., Cejudo, R., García, R., Goguitchaichvili, A., Belmontes, J. G. R., and Morales, J. (2021). Catálogo de dataciones absolutas disponibles para la zona arqueológica de La Quemada, Zacatecas, norte de Mesoamérica. *Arqueología Iberoamericana*, 13(48):8–29.
- Pomedio, C. M., López, V., Goguitchaichvili, A., Cejudo, R., Morales, J., Soler-Arechalde, A. M., Cervantes-Solano, M., and García, R. (2022). Estudio arqueomagnético del piso quemado en La Palma, valle de Cuzalapa, Sierra de Manantlán (Jalisco). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 74(1).
- Prévot, M., Mankinen, E. A., Grommé, S., and Lecaille, A. (1983). High paleointensities of the geomagnetic field from thermomagnetic studies on rift valley pillow basalts from the Mid-Atlantic Ridge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B3):2316–2326.
- Ruiz, R. C., Ruiz, R. G., Marín, A. P., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Solano, M. C., and Zúñiga, F. B. (2019). Intervención arqueomagnética en El Ocote (Aguascalientes, México): implicaciones cronológicas absolutas. *Arqueología Iberoamericana*, 11(44):3–9.
- Salinas, C. (2007). *Dating of La Quemada and theory of its development*. PhD thesis, Archaeological Studies Program, University of Wisconsin-La Crosse.
- Santamaría, J. J. V. (2016). La historia del campo magnético terrestre registrada en las rocas. Fundamentos del Paleomagnetismo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24(3):261–261.
- Schmidt, A. (2007). Archaeology, magnetic methods. *Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism*, pages 23–31.
- Soler-Arechalde, A. M. (2006). Investigaciones arqueomagnéticas en México. fundamentos. historia y futuro. *Monografías del Instituto de Geofísica*, (10).

- Strazicich, N. M. (1995). *Prehispanic pottery production in the Chalchihuites and La Quemada regions of Zacatecas, Mexico*. State University of New York at Buffalo.
- Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., and Tasa, D. (2005). *Earth: an introduction to physical geology*. Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River.
- Tarling, D. H. (2021). Archaeomagnetism. In *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, pages 15–19. Springer.
- Tauxe, L. (2010). *Essentials of paleomagnetism*. Univ of California Press.
- Torreblanca, C., Gogutchiaichvili, A., López, V., Cejudo, R., Morales, J., Bautista, F., Kravchinsky, V., and Garcia, R. (2020). Ball court in la quemada, northern mesoamerica: Absolute chronological contributions through the archeomagnetic study of associated fire pits. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 33:102558.
- Torvinen, A. and Nelson, B. (2020). Refinement of the Chronology of La Quemada, Zacatecas, Mexico, Using Ceramic Seriation. *Latin American Antiquity*, 31(1):61–80.
- Trombold, C. D. (1990). A reconsideration of chronology for the La Quemada portion of the northern Mesoamerican frontier. *American Antiquity*, 55(2):308–324.
- Trombold, C. D. (2005). A population estimate for the epiclassic middle Malpaso Valley (La Quemada), Zacatecas, Mexico. *Latin American Antiquity*, 16(3):235–253.
- Turkon, P. (2004). Food and status in the prehispanic Malpaso Valley, Zacatecas, Mexico. *Journal of Anthropological Archaeology*, 23(2):225–251.
- Weigand, P. C. (1975). Possible References to La Quemada in Huichol Mythology. *Ethnohistory*, pages 15–20.
- Weigand, P. C., Harbottle, G., and Sayre, E. V. (1977). Turquoise sources and source analysis: Mesoamerica and the southwestern USA. *Exchange systems in prehistory*, pages 15–34.
- Wells, E. C. (2000). Pottery production and microcosmic organization: The residential structure of La Quemada, Zacatecas. *Latin American Antiquity*, 11(1):21–42.

Witze, A. (2019). Earth's magnetic field is acting up and geologists don't know why. *Nature*, 565(7738):143–145.

Wogau, K. H., Arz, H. W., Böhnelt, H. N., Nowaczyk, N. R., and Park, J. (2019). High resolution paleoclimate and paleoenvironmental reconstruction in the Northern Mesoamerican Frontier for Prehistory to Historical times. *Quaternary Science Reviews*, 226:106001.