



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia

Estudio arqueomagnético realizado en estructuras  
de combustión *in situ* localizadas en el sitio  
arqueológico Paquimé, Chihuahua; implicaciones  
geomagnéticas y arqueológicas

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**LICENCIADA EN GEOCIENCIAS**

P R E S E N T A

ALONDRA MABEL GALVÁN LUGO

DIRECTOR DE TESIS:  
**DR. MIGUEL ÁNGEL CERVANTES SOLANO**

CO-DIRECTOR DE TESIS:  
**DR. AVTANDIL GOGICHASHVILI**

MORELIA, MICHOACÁN

FEBRERO, 2024



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.

# Agradecimientos

A mis padres por brindarme su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida y darme las herramientas necesarias para lograr cada uno de mis objetivos, por darme una vida llena de amor y enseñarme a disfrutar cada paso que doy, los amo con todo mi corazón.

A mi hermano por ser mi compañero de aventuras, por dejarme siempre pasos firmes, ser un gran ejemplo por seguir y darme esa ayuda extra cuando lo necesitaba.

A Josué mi pareja, mi mejor amigo y mi cómplice, por darme esos empujoncitos extras cada vez que algo me detenía, por enseñarme a que las cosas se hacen con pasión y se lucha por lograr cada meta hasta conseguirla, por darme mil motivos para no rendirme y ayudarme a entender que a veces está bien parar y tomar un descanso para después seguir dándolo todo.

A Mayita quien más que una mascota se volvió mi hermanita, te agradezco por tu amor incondicional, por llenar mis días de alegría desde el inicio hasta el final del día, por ser mi acompañante cuando tenía que terminar tareas en la madrugada y preferías acostarte a mi lado hasta que terminará, por enseñarme una forma de amor tan única, gracias.

A mis amigas, amigos y a los Geos en general por ayudarme a abrir mi mente, por hacer que las clases y mi vida universitaria fuera más divertida y por ser mi geofamilia.

A mis profesoras y profesores por compartir su pasión y conocimientos por medio de las clases.

Al Dr. Rubén Cejudo por su apoyo y orientación para realizar la preparación y análisis de las muestras, sin sus consejos y ayuda hubiera sido más complicado.

A mis asesores el Dr. Miguel Cervantes y el Dr. Avto Gogichaishvili por sus consejos y por darme la oportunidad de realizar este proyecto, así como compartir sus experiencias dentro del área para el desarrollo de esta tesis.

Al Proyecto Arqueológico Paquimé dirigido por el Dr. Eduardo Gamboa por la oportunidad de realizar esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo recibido mediante el Proyecto CF-2019-1761.

Al PROYECTO UNAM-DGAPA-PAPIIT n° IN100224.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por brindarme todas las herramientas necesarias dentro de la licenciatura y permitirme ser parte de la comunidad estudiantil, así como sus talleres y actividades culturales, ya que cada actividad fue fundamental para mi desarrollo académico, profesional y personal.

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Introducción</b> .....	2
<b>Objetivos</b> .....	5
<b>1. Campo magnético terrestre</b>	
1.1 Origen del campo magnético terrestre .....	6
1.2 Componentes vectoriales .....	8
1.3 Polo geomagnético virtual .....	9
1.4 Variación paleosecular .....	11
<b>2. Propiedades magnéticas de la materia</b>	
2.1 Magnetización .....	15
2.2 Susceptibilidad y permeabilidad magnética .....	16
2.3 Temperatura de Curie y punto de Néel .....	18
2.4 Tipos de magnetización .....	21
<b>3. Método arqueomagnético</b>	
3.1 Magnetización en estructuras arqueológicas .....	24
3.2 Desmagnetización .....	26
3.3 Curvas regionales de referencia de las variaciones del campo magnético terrestre .....	29
3.4 Datación arqueomagnética .....	30
<b>4. Contexto arqueológico</b>	
4.1 Antecedentes arqueológicos .....	32
4.1.1 Cronología del sitio .....	34
4.1.2 Cultura Casas Grandes .....	39
4.1.3 Arquitectura .....	43
4.2 Casa de los hornos .....	48
4.3 Antecedentes arqueomagnéticos .....	52
<b>5. Metodología</b>	
5.1 Sitio de muestreo .....	54
5.2 Colecta de muestras .....	56

5.3 Preparación de especímenes .....	58
5.4 Medición de la magnetización .....	61
5.4.1 Representación de datos .....	62
5.4.2 Desmagnetización por campos alternos .....	62
5.4.3 Obtención de los componentes de magnetización .....	63
5.5 Análisis de resultados .....	64
<b>6. Resultados</b>	
6.1 Propiedades magnéticas de las rocas .....	67
6.2 Direcciones arqueomagnéticas .....	69
6.3 Dataciones arqueomagnéticas .....	75
6.4 Determinación de las edades más probables .....	82
6.5 Implicaciones arqueológicas .....	84
<b>Conclusión</b> .....	85
<b>Referencias</b> .....	87
<b>Anexo 1. Relación fotográfica de muestras</b> .....	93

## Resumen

La ciudad de Paquimé ubicada en Chihuahua, México, es uno de los sitios arqueológicos con mayor relevancia en el norte de México. Paquimé es hogar de la cultura Casas Grandes denominada así por su gran desarrollo de arquitectura que demuestra las etapas evolutivas de la región, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo realizar una datación arqueomagnética por medio de las magnetizaciones termoremanentes de muestras de hornos de pozo ubicados en la unidad 1 de Paquimé, denominada casa de hornos, nombrada así por los seis hornos que rodean la zona.

Se tomaron catorce muestras de mano orientadas magnéticamente para ser preparadas y analizadas en el Servicio Arqueomagnético Nacional del Instituto de Geofísica Unidad Michoacán. El tratamiento magnético que se utilizó para el estudio de la remanencia magnética de las muestras fue desmagnetización por campos alternos para obtener las direcciones características (inclinación y declinación) de cada espécimen. Por cada muestra se obtuvieron ocho especímenes y mediante la estadística de Fisher se obtuvieron las direcciones medias por muestra las cuales fueron utilizadas para la datación arqueomagnética al compararlas con curvas de variación paleosecular locales y regionales, en específico para este trabajo fueron utilizadas como referencia la curva de variación secular locales de Mahgoub *et al.*, (2019), de García-Ruiz *et al.*, (2022) y las globales de SHAWQ.2K y SHA.DIF.14K de Pavón-Carrasco *et al.*, (2014) partir de las cuales se logró establecer que las muestras estudiadas tienen una edad de entre los 800 a 1200 d.C. lo que indica que los hornos fueron utilizados durante la segunda y última etapa de crecimiento de la ciudad, lo cual corresponde con las edades radiométricas realizadas previamente.

# Introducción

Las variaciones del campo magnético terrestre (CMT) se presentan en cambios de dirección e intensidad magnética, que se perciben a partir de la comparación entre valores medios anuales de una zona en particular a lo que se le denomina variación secular del campo geomagnético, Villalaín-Santamaría (2016), actualmente existen registros de las variaciones seculares existentes desde 1600 en cuanto a datos sobre la dirección y desde 1836 para el caso de la intensidad, por tal motivo se ha recurrido a estudiar las características de las rocas y materiales arqueológicos sometidos a procesos de calentamiento a altas temperaturas, es decir, que adquiera una magnetización remanente estable, paralela y proporcional al campo magnético de la Tierra, propiedades importantes para el estudio del campo magnético y con ello la datación arqueomagnética (Gómez-Paccard *et al.*, 2016).

La disciplina geofísica que estudia el registro de las variaciones en dirección e intensidad del CMT en materiales geológicos y arqueológicos que han sido expuestos a temperaturas altas es el arqueomagnetismo, que se basa en que el CMT está compuesto por tres parámetros: declinación; azimut de la proyección a la horizontal del campo, inclinación; ángulo que se forma entre el CMT y el plano horizontal, e intensidad del CMT que de acuerdo con el Sistema internacional se mide en Teslas. Estos parámetros son fundamentales para el proceso de datación arqueomagnética, que consiste en la comparación estadística de las mediciones de dichos parámetros con la curva de variación paleosecular (CVPS) que describe las variaciones de estos parámetros geomagnéticos en función del tiempo para una región geográfica en particular, cabe recalcar que estas curvas se encuentran en constante actualización debido a nuevos estudios que brindan mayor información de periodos de tiempo que contribuyen de manera importante con la construcción de las curvas regionales y globales (Carrancho *et al.*, 2022).

En el caso de México, se han hecho actualizaciones a la CVPS en los últimos años; sin embargo, la falta de datos sobre el norte del país y las variaciones en la calidad de los datos ha dificultado la definición de la curva (Tchibinda-Madingou *et al.*, 2021). Uno de los sitios arqueológicos ubicado en el norte de México que presenta las características óptimas para contribuir a la CVPS es Paquimé, la ciudad que alberga la cultura Casas Grandes se ubica en el estado de Chihuahua, México, es

reconocida por ser un testimonio único de la relación entre la cultura de América del Norte y Mesoamérica (Posada y Reyes, 2020). La cultura Casas Grandes se ha caracterizado por su impresionante arquitectura única de las culturas del desierto, con casas y edificios de hasta cuatro pisos, construidos por adobe. De acuerdo con Di Peso (1974) estas edificaciones fueron modificadas con el paso de los años desde que los habitantes de la ciudad comenzaron a construirlas, pues al inicio del asentamiento los pobladores comenzaron viviendo en cuevas que se encontraban en el lugar, después construyeron pequeñas casas de adobe en pozos de poca profundidad para después reconstruirlas con pozos más anchos y finalmente eliminar los pozos y colocar las casas sobre el nivel del suelo. Las casas contaban con habitaciones para descanso y otras con pequeños hornos en el centro de la habitación que se cree eran utilizadas para cocinar y como sistema de calefacción, pues la forma esférica de las habitaciones ayudaba a mantener las casas calientes durante las temporadas de descenso de temperatura; sin embargo, cuando las temperaturas se elevaron se eliminaron estos hornos y solo se conservaron los hornos comunitarios ubicados en el exterior y en edificios comunitarios.

Cabe recalcar que debido a la gran extensión de la ciudad el arqueólogo Di peso (1974) las identificó por unidades de acuerdo a las características en común que se tenían en la arquitectura o en los artefactos que formaban parte de los vestigios hallados, identificando en total veinte unidades de las que algunas son; la casa de las serpientes, casa de las guacamayas, montículo de la cruz, montículo de las ofrendas, casa de la noria, montículo de los héroes, casa de los muertos, casa de los cráneos, casa de los pilares, montículo del pájaro y casa de los hornos, esta última en particular consta de un conjunto de nueve cuartos, dos plazas pequeñas y cuatro hornos exteriores, los cuales cuentan con las características apropiadas para realizar dataciones arqueomagnéticas, pues al ser construidos en pozos con recubrimiento de rocas, estas adquieren la dirección del norte magnéticos cada vez que son expuestas a altas temperaturas y al tratarse de hornos, se remagnetizaban cada vez que se utilizaban, por lo tanto las rocas conservan el registro magnético de la última ocasión que se utilizaron (Gómez-Paccard *et al.*, 2016). Di Peso (1974) realizó las primeras dataciones de los hornos por medio del método de  $^{14}\text{C}$  en donde analizaron muestras con material orgánico dentro del horno y se obtuvo una edad de  $1310 \pm 30$  d.C. que pertenece al último periodo de Paquimé, ya que de acuerdo con los registros la ciudad fue abandonada durante en el año 1450 d.C. en cuanto a

estudios arqueomagnéticos se analizaron piezas cerámicas de la zona de Mimbres y Ramos pertenecientes a Paquimé y se obtuvieron intensidades de 41  $\mu\text{T}$  a 59  $\mu\text{T}$  y edades de 960 d.C. a 1600 d.C. Este método de datación arqueomagnética representa un método alternativo y eficiente para datar artefactos arqueológicos fabricados durante los últimos 14000 años ya que aporta una ventaja significativa si se le compara con los métodos radiométricos más comunes como el K/Ar y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , cuyo intervalo de aplicación se extiende a intervalos de tiempo más antiguos ( $> 50$  ka) o el  $^{14}\text{C}$  el cuál es el más utilizado para datación arqueológica, sin embargo, estas dataciones se realizan sobre el carbono proveniente de la materia orgánica asociada a los objetos estudiados y no se hace directamente sobre el material en cuestión por el contrario, la datación arqueomagnética permite datar el momento de la fabricación o último uso. Si bien existen trabajos anteriores (Mark et al., 2010; Urrutia Fucugauchi et al., 2016a; 2016b; Pérez-Rodríguez et al., 2015); que han probado la eficacia de esta metodología, estos trabajos difieren un tanto en cuanto al modelo de predicción de variación de la variación secular utilizado como en las curvas de referencia utilizadas, hay que señalar también que los datos disponibles para la construcción de las curvas de variación secular para Mesoamérica son aún escasos y algunos con los nuevos criterios de calidad para que puedan agregarse a las curvas de variación secular regionales (Hervé et al., 2019; Maghubet al., 2017; 2019; García-Ruiz et al., 2021). En el caso particular del sitio arqueológico estudiado en este trabajo, aunque existen dataciones de  $^{14}\text{C}$ , estas fueron realizadas en estructuras distintas a las ahora estudiadas las cuales podrían no representar el mismo momento además de las limitaciones del método antes descritas por lo que las nuevas edades arqueomagnéticas permiten conocer con mayor precisión y detalle la cronología absoluta del sitio y no solo de aquellos objetos o materiales asociados a las muestras que fueron datadas por  $^{14}\text{C}$ . Por tanto, se tomaron doce muestras de bloques de roca y dos de piso quemado de los hornos de la unidad 1 llamada Casa de los Hornos con el objetivo de utilizar el método arqueomagnético como técnica de datación para las muestras tomadas y comparar los resultados obtenidos con los resultados de investigaciones previas realizadas por  $^{14}\text{C}$ , definir la curva de variación secular de la región y así comprobar la cronología de Paquimé.

## Objetivos específicos

- Identificar las características magnéticas de cada una de las muestras a partir de su respuesta a experimentos de mineralogía magnética.
- Determinar el vector geomagnético.
- Estimar la edad del momento en que se utilizó por última vez.
- Calcular los promedios arqueomagnéticos a nivel sitio a partir del análisis estadístico de Fisher
- Analizar las componentes direccionales del campo magnético de las muestras de piso quemado mediante tratamientos magnéticos progresivos.
- Determinar las edades arqueomagnéticas mediante las curvas de variación paleosecular del CMT.
- Establecer la cronología arqueológica del sitio Paquimé mediante la comparación de las edades arqueomagnéticas con las edades arqueomagnéticas con las edades previamente disponibles.

# Capítulo I. Campo magnético terrestre

## 1.1 Origen del campo magnético terrestre

El campo magnético de la Tierra (CMT) ha brindado protección contra los rayos cósmicos desde el origen de la vida y ha funcionado como una herramienta de orientación para los organismos vivientes, entre ellos los humanos. Existen distintas teorías sobre el origen del CMT, la primera fue propuesta por W. Gilbert en 1600 donde supone que en el centro de la Tierra existe un imán gigantesco que da origen al CMT, modelo que fue descartado años más tarde a causa la comprobación de las capas internas de la Tierra en donde se establece que el núcleo consta de una parte interna sólida y una parte externa líquida, lo que descarta la posibilidad de que exista un imán gigante en el centro del planeta (Ibarra D., 2003).

Otro modelo que es más acertado es el modelo del dínamo autoinducido propuesto por J. Larmor en 1919 basándose en las aportaciones realizadas por Oersted sobre las corrientes eléctricas que generan campos magnéticos y M. Faraday acerca de que los campos variables inducen corrientes eléctricas en espiras conductoras. El modelo postula la existencia de un dínamo autoinducido en el núcleo exterior de la Tierra que es lo que le da origen al CMT, en la figura 1.1 se ejemplifica cómo funciona a grandes rasgos.

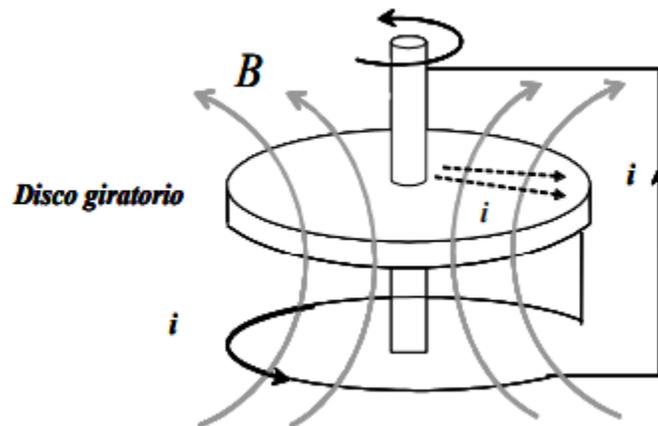


Figura 1.1. Modelo simplificado del dínamo autoinducido, donde  $i$  es la corriente y  $B$  es el campo magnético generado, tomado de A. Ibarra-Durán 2003.

En primera instancia se consideraría que la corriente y el campo magnético inducido decrecen con el paso del tiempo, sin embargo, de acuerdo con el modelo el campo magnético variable atraviesa el disco giratorio induciendo una corriente eléctrica en él, lo que refuerza el campo inicial y formando así un ciclo interminable. Aplicado al CMT, la rotación de la Tierra crea un flujo de partículas cargadas en el núcleo exterior del planeta que al estar en movimiento constituyen corrientes eléctricas y así dan origen a un campo magnético que interactúa con el núcleo en movimiento e induce corrientes eléctricas que refuerzan el campo inicial. En 1954 E. Bullard y H. Gellmann modificaron el modelo de Larmor y es conocida como el modelo del Geodínamo en el que se establece que cualquier modelo propuesto debe considerar que el campo se mantenga activo durante periodos de tiempo largos; dar explicación sobre el origen de este partiendo de la improbabilidad de un campo magnético previo, debe tener una apreciación exterior de un campo dipolar con deriva hacia el Oeste; que explique la desviación del eje del dipolo respecto del eje de rotación terrestre, debe considerar en sus cálculos que el núcleo de la Tierra es mayormente líquido y la mecánica de fluidos relativa a su movimiento; como la influencia del efecto Coriolis por la rotación de la Tierra, debe predecir las inversiones periódicas de los polos y se debe explicar de manera razonable las energías requeridas para el funcionamiento del sistema (Sanchez, 2008).

El modelo establece matemáticamente que se dispone de un dinamo simple formado por un disco que gira alrededor de un eje al que está conectado a una bobina que roza mediante unos cepillos con el disco y el eje a su vez, lo que produce un campo magnético perpendicular al disco uniforme y de intensidad  $H$ , este se inducirá a la fuerza electromotriz por el flujo del campo y una corriente en el disco de intensidad dando la ecuación 1.1.

$$(1.1) \quad I = \frac{1}{2} \frac{H v_0 r}{R}$$

Donde  $v_0$  es la velocidad de giro inicial en los extremos del disco,  $r$  el radio del disco y  $R$  la resistencia opuesta por el conductor a la circulación de corriente, que eventualmente la corriente del disco producirá un campo magnético de intensidad  $\pi H v_0 R$ . El modelo también propone que según la velocidad de giro de la dinamo esta podrá generar un campo y autoalimentarse de forma que este persista

en el tiempo e incluso pueda crecer, estas ideas se aplicaron a las ecuaciones de Maxwell en una esfera y así Bullard y Gellman concluyeron que un sistema de corrientes acimutales en el núcleo terrestre podría llegar a generar, a partir de un campo magnético inicial residual, un campo magnético de gran escala dipolar; el campo magnético causara corrientes que realimentaran dicho campo (Bullard y Gelman, 1954; Sanchez, 2008)

Los modelos anteriormente descritos no toman en cuenta la naturaleza del núcleo externo como fluido hidromagnético, para esto se formula el teorema de Cowling en 1934 que afirma que “ningún campo magnético axisimétrico puede ser mantenido por un movimiento de fluido perfectamente axisimétrico” el teorema pone en evidencia que la desviación del polo norte magnético respecto del eje de rotación de la Tierra no se trataba de una imperfección, sino de un sutil detalle que permitía el mantenimiento de la dinamo homogénea en el núcleo de la Tierra. En 1970 Lilley se basa en este teorema y describe que la desviación anteriormente mencionada entre el norte magnético y el norte geográfico podría ser un indicador de una tendencia del flujo del núcleo hacia la simetría que de ser alcanzada se perdería la acción de la dinamo y el campo dipolar decaería, posiblemente para volver a crecer en un sentido inverso (Sanchez, 2008).

## **1.2 Componentes vectoriales**

El campo magnético terrestre se encuentra definido por tres elementos principales no coplanares: inclinación ( $I$ ); que es el ángulo medido en grados del vector total con respecto a la proyección en el plano horizontal, declinación ( $D$ ); ángulo medido en grados entre la componente horizontal del campo magnético y el norte geográfico, e intensidad ( $H$ ); magnitud del vector total medida en Teslas  $T$  (Hernández-Avila, 2010). A estos elementos se le agregan otros vectores dando en total siete: norte ( $X$ ) y este ( $Y$ ) como componentes de la intensidad horizontal, intensidad vertical ( $Z$ ) y la intensidad total ( $F$ ) que se representan gráficamente como en el esquema de la figura 1.2.

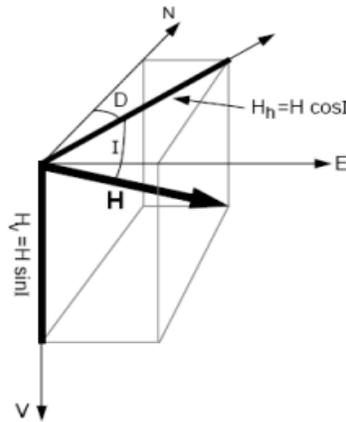


Figura 1.2. Elementos magnéticos utilizados para la descripción de la dirección y magnitud del campo magnético, tomada de Butler, 1991.

Donde N es el norte geográfico, E en el este geográfico y Hv es la vertical con respecto al plano horizontal, que se obtienen mediante las siguientes ecuaciones.

$$(1.3) \quad N = H \cos I \cos D$$

$$(1.4) \quad E = H \cos I \sin D$$

$$(1.5) \quad H_v = H \sin I$$

### 1.3 Polos virtuales

El Polo Geomagnético Virtual (PGV) es el punto sobre el planeta que corresponde al polo geomagnético de este dipolo imaginario, para esto se necesitan conocer las coordenadas de latitud  $\lambda$  y de longitud  $\phi$ , (Osorio-Aguillón, 2018) con la latitud se obtendrá el valor de colatitud con la ecuación 1.6.

$$(1.6) \quad \lambda = 90^\circ - \theta$$

Otro parámetro necesario para calcular el PGV es la colatitud magnética que en términos de la inclinación está dada por

$$(1.7) \quad \cot \theta_m = \frac{1}{2} \tan I$$

El punto de observación es S y el polo es P, como se observa en la figura 1.3

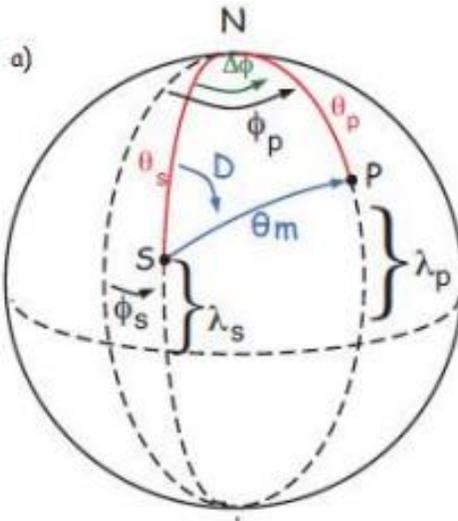


Figura 1.3. Ubicación geométrica de los puntos S y P sobre la superficie de la esfera, modificado de Tauxe, (2010).

Para localizar el PGV se debe usar trigonometría esférica, comenzando por calcular la colatitud con ayuda de la ecuación 1.8.

$$(1.8) \quad \cos \theta_p = \cos \theta_s \cos \theta_m + \text{sen} \theta_s \text{sen} \theta_m \cos D$$

Y la declinación

$$(1.9) \quad \cos D = \frac{\cos \theta_p - \cos \theta_s \cos \theta_m}{\text{sen} \theta_s \text{sen} \theta_m}$$

El momento del dipolo virtual se puede obtener mediante la siguiente ecuación

$$(1.10) \quad VDM = \frac{4\pi r^3}{\mu_0} B_{\text{antiguo}} (1 + 3\cos^2 \theta_m)^{1/2}$$

Donde  $B_{\text{antiguo}}$  se refiere a la densidad del flujo magnético antiguo,  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío y  $\theta_m$  es la distancia entre el punto de observación S y P, como se muestra en la figura 1.3.

## 1.4 Variación secular

El CMT presenta variaciones temporales que suelen ser de origen interno y externo con respecto a la superficie de la Tierra, no existe un método en específico para determinar el origen de una variación por lo que se asignan como variaciones externas cuando se presentan en una escala inferior a cinco años y cuando son superiores se denominan variación secular (VS) y son de origen interno (Osorio-Aguillón, 2018). La amplitud de la VS en el CMT para un lugar de observación determinado fluctúa de unos pocos nanoTeslas (nT) por año a varias decenas de nT por año en la intensidad magnética y para el caso de la declinación e inclinación puede presentar cambios de pocos minutos por año a decenas de minutos por años, estas VS pueden ser vistas en los observatorios magnéticos y en los registros arqueológicos y geológicos.

Las observaciones del campo magnético muestran la VS en escalas mensuales y anuales, se localizan en el mapa y se les coloca la fecha en que se tomó dicha medida, en la figura 1.4 se presenta la variación sufrida por el campo geomagnético desde el siglo XVI, Lanza y Meloni (2006).

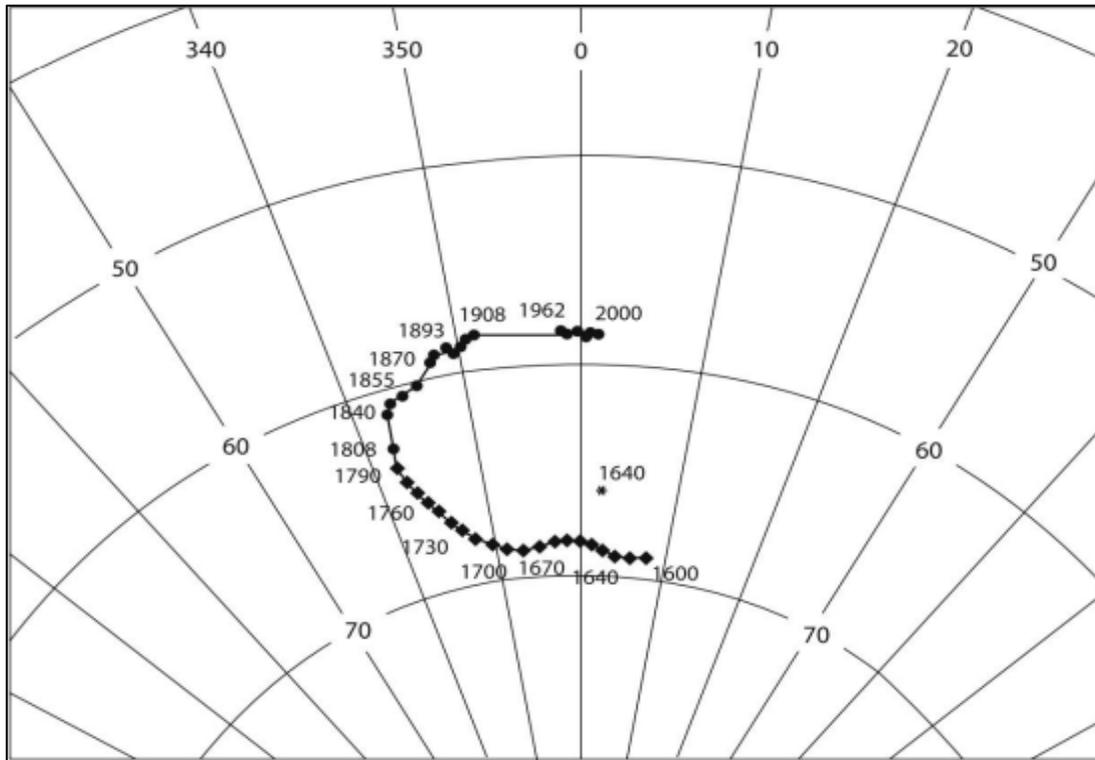


Figura 1.4. Migración del norte magnético graficado del año 1600 al 2000, tomado de Lanza, 2006.

Estos eventos ocurren en dos escalas de tiempo debido a dos tipos de procesos del núcleo; variación del campo dipolar y variación del campo no dipolar. Las características del campo dipolar de la Tierra fueron descritas por Gauss (1839) mediante un análisis armónico esférico que permitió inferir las características de las variaciones globales del campo durante los últimos 160 años, donde se observó la disminución del momento magnético del dipolo de  $9.6 \times 10^{22}$  a  $7.8 \times 10^{22}$  Am<sup>2</sup> desde el año 1900 hasta el 2000, figura 1.5, mientras que el ángulo entre el eje del dipolo y el eje de rotación de la Tierra no han presentados cambios significativos permaneciendo alrededor de las 11.5°, el dipolo ha manifestado un movimiento de precesión alrededor del eje de rotación que ha llevado al polo geomagnético norte de su posición de 63.5° en 1830 a 71.6° para 1990 por lo que se estima que ocurrió con una velocidad de 0.05° por año. El análisis de los datos desde 1600 en adelante ha demostrado que una línea de fuerza ideal del campo puramente dipolar se ha movido durante los últimos 400 años en dirección oeste a una velocidad de alrededor de 0.08° por año, con una variación en latitud de aproximadamente 0.01° por año (Lanza y Meloni, 2006).

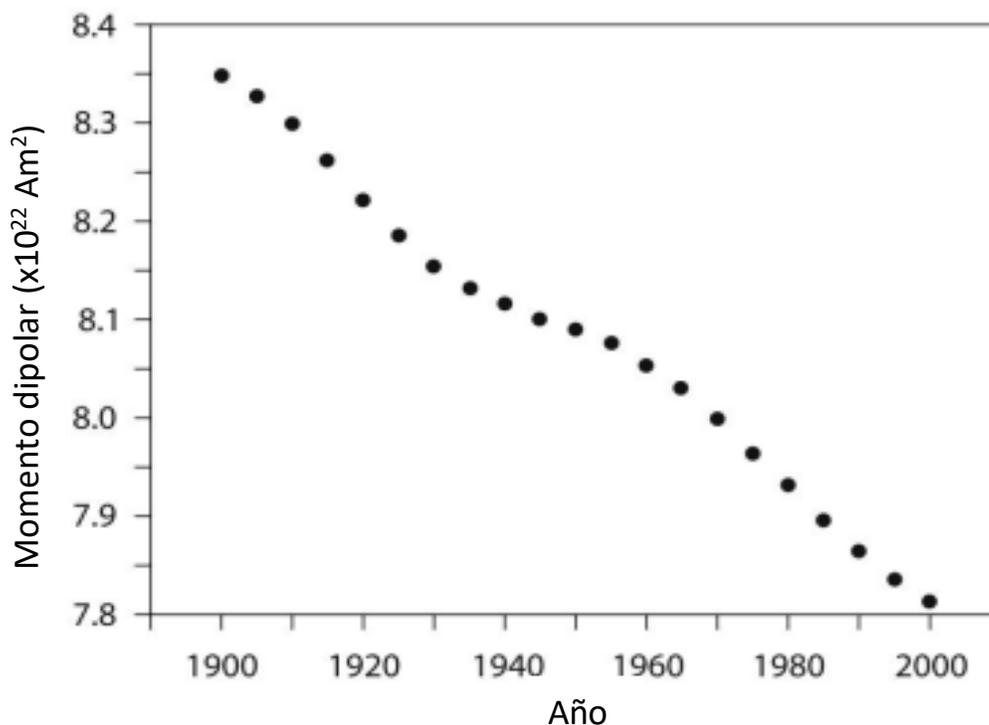


Figura 1.5. Variación del momento dipolar geomagnético de 1900 a 2000, tomado de Lanza y Meloni, 2006.

La variación del campo no dipolar se ha observado en los mapas de contorno de declinación de distintas épocas, en ellos se muestra una clara deriva en casi todas las líneas de contorno de declinación hacia el oeste, uno de los primeros geomagnetistas en plasmar estas líneas de contorno fue Halley en el siglo XVIII con un mapa del Océano Atlántico. Este fenómeno se denomina deriva hacia el oeste, se debe a la variación de la parte no dipolar del campo que de acuerdo con la estimación de Bullard se tiene un movimiento de  $0.2^\circ$  por año. Se ha demostrado que existe la posibilidad de discriminar dos comportamientos diferentes de la contribución del campo magnético no dipolar a la VS; una deriva hacia el oeste en algunas zonas y un efecto geográficamente estacionario con una fuerte variación de intensidad, razón por la que se separan las contribuciones de la VS del campo no dipolar en una parte estacionaria y otra a la deriva, Lanza y Meloni (2006).

En general estas variaciones hacen referencia a la intensidad del campo geomagnético, que dan evidencia a la disminución de la energía de su parte dipolar, pero al mismo tiempo se muestra un aumento de energía en la parte no dipolar como forma de compensar la desconexión dipolar, que queda plasmado en rocas volcánicas y sedimentos lacustres; que son estudiados por métodos magnéticos para obtener curvas de variación paleosecular, lo que permite tener un análisis estadístico para delinear el comportamiento del campo principal como se muestra en la figura 1.6.

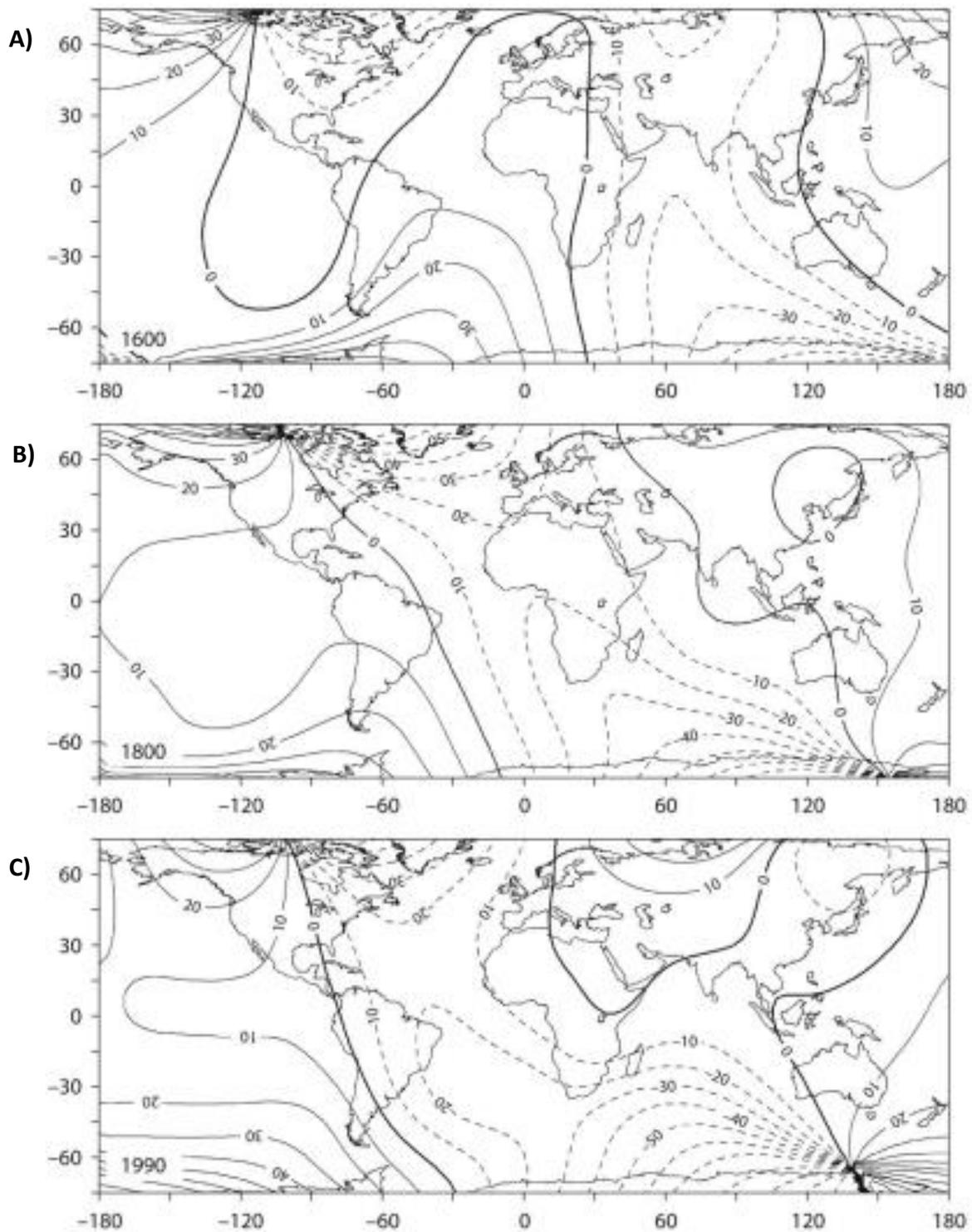


Figura 1.6. desplazamiento hacia el oeste del campo magnético de la Tierra mostrado por mapas de (A) 1600, (B) 1800 y (C) 1990 realizados a partir de la base de datos histórica con el modelo de Jackson 2000, tomado de Lanza y Meloni, 2006.

# Capítulo II. Propiedades magnéticas de la materia

## 2.1 Magnetización

Las propiedades magnéticas de los materiales se encuentran condicionadas por las fuentes del campo magnético a escala atómica; los momentos magnéticos orbitales y los momentos magnéticos intrínsecos de los electrones *spin*, la suma de todos los momentos magnéticos es el momento magnético total del átomo  $\vec{m}$ . El momento magnético es una magnitud equivalente a la masa para el campo gravitatorio y pueden ser sensibles a campos externos. A nivel macroscópico la magnetización es considerada como una magnitud vectorial definida como el momento magnético por unidad de volumen, ecuación 2.1 (Villalain-Santamaría, 2016).

$$(2.1) \quad \vec{M} = \frac{\overline{dm}}{dv}$$

Donde  $\vec{M}$  es la magnetización de la materia,  $\overline{dm}$  es la derivada del momento magnético respecto al volumen  $dv$ .

Al tratarse de una suma vectorial, la magnetización dependerá de las características de los momentos magnéticos atómicos. El funcionamiento del *spin* y de los momentos orbitales se explica mediante el principio de exclusión de Pauli que implica que cada orbital electrónico está ocupado por un máximo de dos electrones con momentos de *spin* opuestos, lo que resulta en que en la mayoría de los casos los momentos magnéticos atómicos se cancelen y en ausencia de campos externos los materiales presentan una magnetización nula. Al aplicar un campo magnético  $\vec{H}$  a un material, sus momentos magnéticos atómicos interactúan con el campo externo modificando su grado de alineamiento y su magnetización, entonces si se aplica un campo magnético externo los momentos magnéticos de cada grano rotarán hasta colocarse en paralelo al campo, pero en el momento en que el campo externo desaparezca, los momentos magnéticos regresarán a su eje de fácil magnetización, pero si los granos que originalmente ya contaban con una magnetización espontánea formando ángulos mayores a  $90^\circ$  con el campo aplicado, regresarán al sentido más próximo de su eje de fácil magnetización dando como resultado una

dirección preferente de los momentos magnéticos lo que se denomina como magnetización remanente  $M_R$  (Villalaín-Santamaría, 2016).

## 2.2 Susceptibilidad y permeabilidad magnética

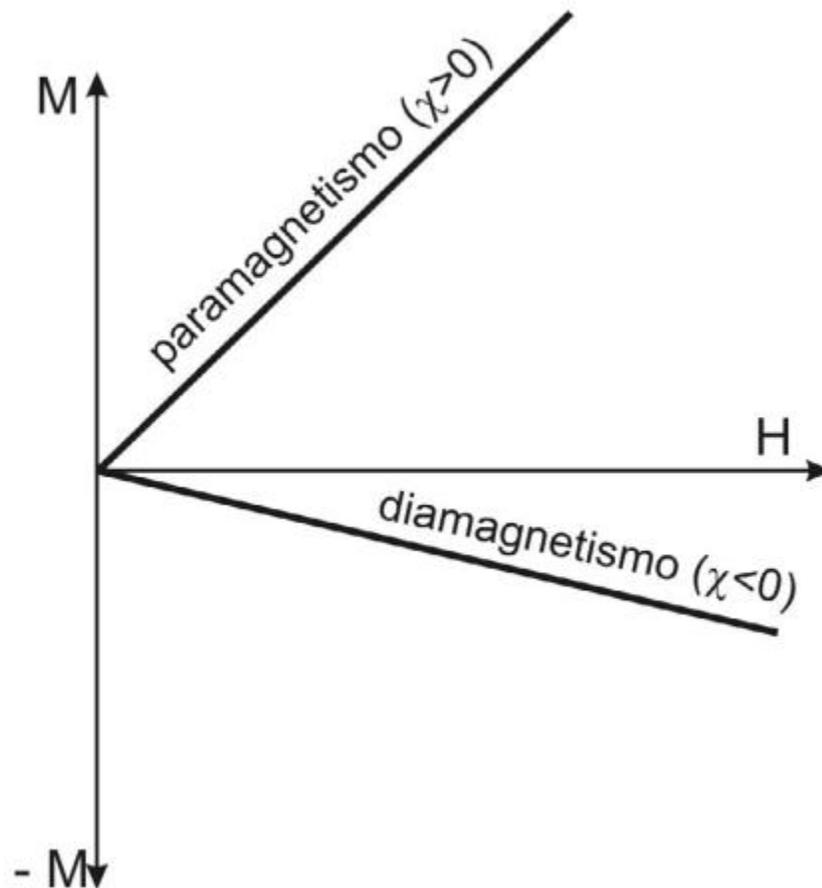
La relación entre el campo aplicado y la magnetización se conoce como susceptibilidad magnética  $\chi$ ; la cual se encarga de cuantificar la capacidad de ordenamiento de los momentos magnéticos atómicos ante un campo externo aplicado, se calcula mediante la ecuación 2.2 (Villalaín-Santamaría, 2016).

$$(2.2) \quad \vec{M} = \chi \vec{H}$$

Donde  $\vec{M}$  es la magnetización del material y  $\vec{H}$  es la intensidad del campo magnético, esta relación puede manifestarse de tres formas distintas, por tanto, se clasifican como; diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo. Los materiales metálicos con electrones desapareados como el hierro, cobalto y níquel tienen átomos que ocupan posiciones muy próximas en la red cristalina que permiten que exista una fuerte interacción entre los momentos magnéticos adyacentes, es decir, que en ausencia del campo externo presentan una magnetización espontánea o remanente, característica principal de los materiales ferromagnéticos que con la presencia de un campo aplicado reaccionan generando una magnetización intensa que implica valores de susceptibilidad positiva y de varios ordenes de magnitud mayores a los del diamagnetismo y paramagnetismo. Los elementos ferromagnéticos no se encuentran habitualmente en estado puro en las rocas, pero están presentes en minerales que se denominan ferrimagnéticos y antiferromagnéticos que reaccionan de manera similar a los ferromagnéticos,

El diamagnetismo se relaciona con el momento magnético orbital que reacciona oponiéndose al campo magnético externo generando una magnetización opuesta a ese campo, por lo que la susceptibilidad de los materiales diamagnéticos es negativa y muy pequeña. El diamagnetismo se encuentra presente en todas las reacciones de materiales en contacto con un campo aplicado, aunque en la mayoría de los casos no se aprecia porque se enmascara por los comportamientos paramagnéticos y ferromagnéticos, este tipo de materiales se denominan diamagnéticos y son los más comunes en la naturaleza (Villalaín-Santamaría, 2016).

Los materiales paramagnéticos cuentan con electrones desapareados, por lo que el momento magnético del átomo puede ser nulo y de aplicarse un campo magnético externo los momentos magnéticos de spin desapareados se orientan en la dirección de ese campo. Estos materiales tienen una susceptibilidad positiva como se muestra en la figura 2.1 y son dependientes de la temperatura, pues su eficiencia se ve afectada por la agitación térmica que incrementa el desorden de los momentos magnéticos de spin, debido a que la energía térmica es mayor que la energía magnética.



*Figura 2.1. Relación entre la magnetización y el campo externo aplicado en materiales paramagnéticos y diamagnéticos, donde  $\chi$  es la susceptibilidad magnética, Villalaín, 2016.*

La permeabilidad magnética  $\mu$  es un parámetro físico que describe como un material es afectado por un campo y se define como:

$$(2.3) \quad \mu = \mu_0 \mu_r$$

Donde  $\mu_0$  es la permeabilidad en el vacío con un valor de  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m y  $\mu_r$  la permeabilidad relativa del material que cambia de acuerdo con el material como se ejemplifica en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores de la permeabilidad relativa en algunos materiales, tomada de Flores-Vidal, 2013.

<b>Material</b>	<b>Permeabilidad relativa</b>
Aluminio	1.000032
Cobre	0.9999902
Magnesio	1.000012
Nitrógeno	1.000000

La permeabilidad puede ser dependiente de otros parámetros como; la temperatura, frecuencia y la dirección de propagación. La permeabilidad magnética relativa de los materiales se expresa de la siguiente manera:

$$(2.5) \quad \mu_r = \mu'_r - i\mu''_r$$

Siendo  $\mu'_r$  la parte real y  $i\mu''_r$  la parte imaginaria, el cociente entre ambas variables se define como la tangente de pérdidas magnéticas:

$$(2.6) \quad \tan \delta_\mu = \frac{\mu''_r}{\mu'_r}$$

La parte real de la permeabilidad se denomina permeabilidad magnética elástica que infiere la energía magnética que se almacena en un material, la parte imaginaria representa las pérdidas magnéticas debidas a procesos como corrientes magnéticas, histéresis o viscosidad y se denomina factor de pérdidas de la permeabilidad magnética (Flores-Vidal, 2013).

### 2.3 Temperatura de Curie y punto de Néel

La energía térmica desempeña un papel fundamental en el proceso de magnetización, debido a la agitación browniana que se genera puede ser lo suficientemente alta para impulsar la magnetización espontánea de algún grano monodominio y voltearla al sentido opuesto. Los materiales ferromagnéticos tienden a perder sus propiedades magnéticas cuando se calienta por encima de ciertas temperaturas y cuando se enfrían adquieren las propiedades del ambiente hasta que la temperatura vuelva a aumentar, esta pérdida de propiedades ocurre cuando el material se expone por encima de lo que se conoce como Punto de Curie, llamada así en honor al físico Pierre Curie que descubrió este fenómeno en 1895, lo que permitió describir la fenología del avance de materiales ferromagnéticos desde el interior de la Tierra, hasta su afloramiento en la superficie, teniendo en cuenta las variaciones de polaridad del campo magnético terrestre a lo largo del tiempo (Villalaín-Santamaría, 2016).

El físico Louis Néel creó la teoría sobre la estabilidad de la magnetización a partir de la competencia entre la energía térmica y la energía de anisotropía de la red cristalina. La magnetización de un conjunto de granos monodominio decrece exponencialmente con el tiempo siguiendo la ecuación 2.7:

$$(2.7) \quad M(t) = M_0 e^{\left[\frac{-t}{\tau}\right]}$$

Donde  $\tau$  es el tiempo de relajación, es decir, el tiempo que tarda en descender la magnetización en un factor de  $\frac{1}{e}$ . De acuerdo con Néel (1955) si el tiempo de relajación es largo, entonces la magnetización se considera como estable, también hace mención a cerca de que el tiempo de relajación es función del volumen del grano  $V$  y de la temperatura  $T$  de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(2.8) \quad \tau = \frac{1}{c} e^{\left[\frac{k_u V}{kT}\right]}$$

Donde  $k_u$  es la energía de anisotropía por unidad de volumen que depende de la forma del grano y de las propiedades de la red cristalina, es decir, que tiene relación directa con el tipo de mineral,  $k$  es la constante de Maxwell-Boltzmann y  $c$  es un factor de frecuencia.

El tiempo de relajación para un tamaño de grano determinado puede alcanzar valores de cientos a miles de millones de años, de modo que las rocas pueden mantener un registro magnético a lo largo del tiempo geológico. Si los granos cuentan con un volumen bajo o fueron expuestos a temperaturas muy altas, los tiempos de relajación pueden ser bastante cortos, dando una magnetización no estable, tal como se muestra en la figura 2.2, a los materiales con este tipo de características se les denomina superparamagnéticos (Herrejón-Lagunilla, 2020).

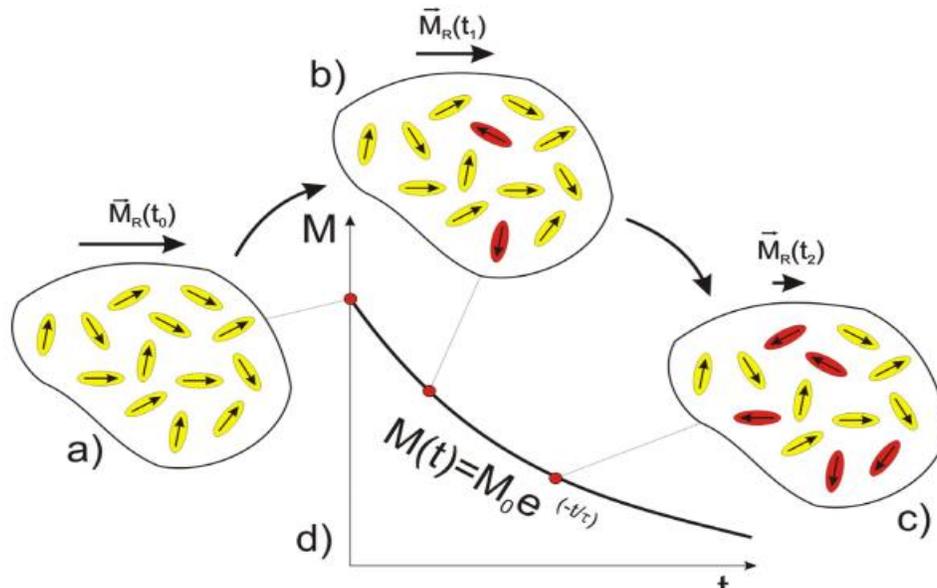


Figura 2.2. Mecanismo de relajación que explica la evolución de la magnetización de un grupo de granos monodominio con el tiempo  $M(t)$  donde (a) es la fase inicial con granos de monodominio (flechas amarillas) hacia una dirección preferencial, en la (b) se observa que algunos granos han cambiado de dirección (granos rojos) y en la (c) se muestra como cuando transcurre más el tiempo más granos cambian su dirección en dirección opuesta a la dirección preferencial inicial. Villalaín, 2016.

Se cree que los granos muy pequeños tienen este tipo de comportamiento ya que se comportan como un material paramagnético ante un campo externo aplicado, pues su tamaño les permite orientarse fácilmente con el campo y si este presenta algún cambio, los granos se reorientarían con el nuevo campo, por lo que de acuerdo con el tamaño y volumen de grano será la distribución de los dominios magnéticos, como se ejemplifica en la figura 2.3.

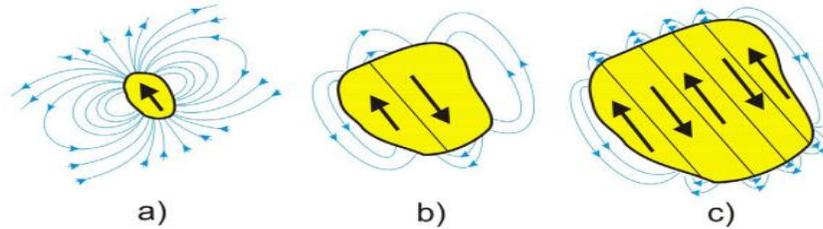


Figura 2.3. Modelo de grano monodominio a), grano pseudomonodominio b), grano multidominio y su división en dominios en función de su volumen, Villaláin, 2016.

## 2.4 Tipos de magnetización remanente

Los granos ferromagnéticos en estado monodominio tienen la capacidad de mantener una magnetización remanente estable por millones de años, pero el campo magnético terrestre tiene una intensidad débil, lo que no es suficiente para orientar los momentos magnéticos de los granos en un sentido determinado dentro de la dirección de fácil magnetización; sin embargo, existen procesos naturales asociados a la formación y evolución de las rocas que sufren una desestabilización de los momentos magnéticos de los granos, dando paso a una reorientación en la dirección del CMT (Herrejón Lagunilla, 2020).

La magnetización remanente térmica (TRM) ocurre cuando una roca se encuentra a una temperatura superior a la temperatura de Curie  $T_c$  de los minerales ferromagnéticos que la componen, estos se comportan como paramagnéticos, es decir que no tienen la capacidad de adquirir una magnetización remanente, si la roca se enfría por debajo de la  $T_c$  los granos se convierten en ferromagnéticos pero aun con altas temperaturas sus tiempos de relajación son muy cortos, comportándose entonces como inestables o como superparamagnéticos. La energía térmica provoca un desorden en los momentos magnéticos de los granos constantemente, por lo que si la roca continua enfriándose los tiempos de relajación de los granos aumentan y la energía térmica no es capaz de voltear el momento magnético, provocando que la magnetización espontánea de cada grano se bloquee y en ausencia de un campo magnético la magnetización sería nula; sin embargo, el enfriamiento en presencia del CMT es suficiente para lograr que la magnetización remanente de cada grano quede en la dirección más próxima a la del campo ambiental. La temperatura de bloqueo es aquella en la que su tiempo de relajación de la roca pasa de pocos segundos a millones de años, depende del tamaño del grano y es el mecanismo más

importante en las rocas ígneas y metamórficas, pero también en los materiales arqueológicos que han sufrido algún tipo de calentamiento (Villalaín-Santamaría, 2016).

Magnetización remanente detrítica (DRM), es el alineamiento de los momentos magnéticos de tipo mecánico, como en rocas sedimentarias, cuando la roca se está formando a partir del depósito de granos detríticos en aguas tranquilas, los granos ferromagnéticos pequeños tienen la libertad de colocarse en la dirección del campo magnético ambiental a causa del movimiento que pueden tener durante la caída debido a su tamaño. Cuando los granos se incorporan al sedimento con cierta dispersión aleatoria, presentan una orientación preferencial en promedio que hace que el conjunto tenga una magnetización remanente paralela al CMT como se ilustra en la figura 2.4 (Villalaín-Santamaría, 2016).

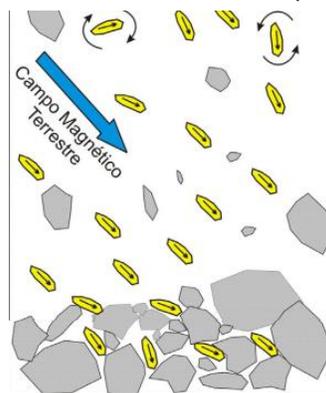


Figura 2.4. Modelo de adquisición de magnetización remanente detrítica donde se representa la dirección preferencial de los sedimentos (granos amarillos) hacia la dirección del campo magnético, Villalaín, 2016.

Existen perturbaciones que pueden desviar de forma sistemática la dirección de la remanencia en granos elongados debido a las fuerzas hidrodinámicas de la corriente del agua y la adaptación mecánica del grano a la superficie horizontal del depósito sedimentario que genera una reducción sistemática de la inclinación magnética. Como se muestra en la figura 2.5 en caso de que los granos finos (óvalos amarillos) se encuentren suspendidos en el interior de los poros (1) del sedimento saturado en agua (2) pueden tener la libertad de reorientarse, a lo que se le denomina magnetización remanente post-deposicional (pDRM).

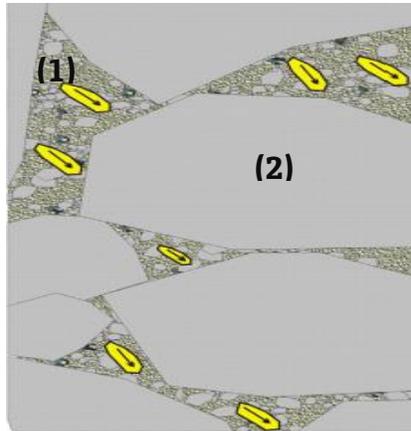


Figura 2.5. Modelo de adquisición de magnetismo remanente post-deposicional, tomada y modificada de Villalaín, 2016.

Magnetización remanente química (CRM), este tipo de magnetización ocurre después de la formación de la roca a causa de los procesos que pueden cambiar su mineralogía, ya sea por una alteración química de los minerales originales o por la creación de nuevos minerales (autigénicos). Cuando los cambios involucran minerales ferromagnéticos se genera una CRM, el crecimiento de los granos de mineral durante su creación implica un aumento progresivo del volumen de estos, originando desde la etapa inicial del crecimiento un tiempo de relajación muy corto que al aumentar de volumen crítico en el que la magnetización se bloquea del mismo modo que ocurre con la temperatura de bloqueo. Este tipo de magnetización es común en las rocas de tipo sedimentario y al ocurrir después de la formación de la roca se denominan magnetizaciones secundarias o remagnetizaciones.

Otros tipo de magnetización remanente natural es la magnetización remanente viscosa (VRM) que no son tan estudiados debido a la cantidad de ruido que tienen que dificulta su interpretación dentro del área del paleomagnetismo, estas magnetizaciones son originadas por granos cortos o medios que pueden perder su magnetización en periodos de tiempo cortos; siglos, milenios o millones de años, y pueden adquirir una nueva magnetización por exposición al CMT a temperatura ambiente por tal motivo se considera como magnetización secundaria y refleja el campo magnético actual o reciente. La magnetización remanente isotérmica (IRM) ocurre por la acción de un campo muy intenso inducido por la enorme corriente eléctrica asociada a un rayo (Villalaín Santamaría, 2016).

# Capítulo III. Método arqueomagnético

## 3.1 Magnetización en estructuras arqueológicas

El arqueomagnetismo se define como el estudio e interpretación de las propiedades magnéticas de materiales arqueomagnéticos calentados a altas temperaturas, esta técnica es aplicable al ámbito de las ciencias de la Tierra y de la Arqueología, se basa en dos fenómenos físicos; la existencia de variaciones espacio temporales del CMT y la capacidad de ciertos materiales arqueológicos que han sufrido procesos de calentamiento a altas temperaturas y que así adquirieron una magnetización termorremanente (Gómez-Paccard *et al.*, 2016). Esta magnetización es considerada como estable, paralela y proporcional al campo magnético terrestre presente en el momento de enfriamiento del material arqueológico (Villalaín-Santamaría, 2016).

Las estructuras arqueológicas tienen un gran potencial para esta técnica por el hecho de que la gran mayoría de estas están compuestas principalmente de arcillas que contienen minerales ferromagnéticos y han sido sometidos a procesos de calentamiento intensos en el pasado, por tal motivo las estructuras como; hornos, hogares, tumbas de incineración, suelos quemados y otras estructuras de combustión son capaces de actuar como una especie de brújulas fósiles al adquirir una magnetización remanente que queda bloqueada de forma permanente en ellos. La magnetización remanente resultante es paralela y proporcional al campo magnético presente en el momento de enfriamiento (Villalaín, *et al.*, 2016; Gómez-Paccard *et al.*, 2016). Cabe recalcar que al tratarse de una magnetización termorremanente puede ser afectada nuevamente al estar expuesta a altas temperaturas que pasen por encima de la temperatura de bloqueo del material, provocando su reorientación, pero ahora con las características del campo ambiental de ese momento. Por ello, la termorremanencia adquirida por materiales arqueológicos quemados refleja el campo geomagnético presente durante el último calentamiento sufrido por el material, de modo que constituyen un registro del campo magnético terrestre en el pasado.

El arqueomagnetismo es la rama de la ciencia que se ocupa de analizar la variación secular del CMT a partir de las arqueodirecciones; declinación e inclinación y de las arqueointensidades; intensidad del CMT, también se le conoce

como paleointensidad (Villalaín-Santamaría, 2016). Esta técnica tiene origen a inicios del siglo XX en Francia, donde investigadores aplicaron métodos paleomagnéticos a estructuras arqueológicas con lo que lograron definir las características del CMT en Francia durante los últimos dos mil años y así obtuvieron las primeras curvas de variación secular de los distintos parámetros que definen el campo magnético de esa región y desde entonces esta técnica se ha desarrollado como uno de los métodos de datación más eficaces y rápidos, que dentro al aplicarse en yacimientos arqueológicos es posible obtener la estimación de temperaturas de calentamiento en materiales quemados, la identificación de fuegos paleolíticos y la identificación de posibles procesos post-deposicionales.

El procedimiento para esta técnica inicia con la toma de muestras en el yacimiento arqueológico, cabe recalcar que al tratarse de un estudio de arqueodirecciones se deben tomar muestras que no hayan sido movidas desde el tiempo de la adquisición de la termorremanencia, ya que se debe marcar *in situ* la orientación geográfica con el menor error posible. Los procedimientos de muestreo dependen de la naturaleza y grado de cohesión del material de la muestra; los materiales duros como rocas o ladrillos se suelen muestrear con perforadoras eléctricas o de gasolina acopladas a brocas diamantadas, aunque en la mayoría de los casos se suelen tomar bloques de mano, antes de tomar las muestras estas deben ser orientadas por lo que en el caso de los bloques de mano se les suele colocar una escayola en la superficie para formar una superficie completamente plana y así poder tener mayor control sobre la orientación de la muestra, figura 3.1 (Gómez-Paccard *et al.*, 2016).



Figura 3.1. Toma y orientación de la muestra con la escayola colocada en la superficie, Gómez-Paccard *et al.*, 2016.

Hecho esto, se extrae la muestra con especial cuidado para evitar que se pierda la orientación. En laboratorio se preparan las muestras para su análisis, lo que consiste en consolidarlas en caso de que el material sea muy frágil, esto con ayuda de pegamento disuelto en agua que se vierte cuidadosamente sobre la muestra para evitar que los granos del material se muevan, una vez que la muestra es firme se encapsula en yeso para mantenerla en un cubo y que así al realizarle los cortes necesarios se mantenga la orientación, posteriormente se le da el tamaño y forma adecuado para los experimentos con ayuda de una cortadora con la que se forman cubos de 3 cm. A partir del estudio de la termorremanencia grabada en los especímenes y mediante un tratamiento estadístico de los resultados se obtiene una dirección de intensidad media con un error asociado, estos valores son los que permitirán describir el vector campo magnético en la localidad de la estructura estudiada y correspondiente al último calentamiento que sufrió la estructura arqueológica (Gómez-Paccard *et al*, 2016).

### **3.2 Desmagnetización**

Uno de los experimentos por lo que pasan las muestras arqueológicas para ser analizadas mediante el método arqueomagnético es la desmagnetización, primero se mide la magnetización remanente natural del espécimen en donde se obtienen los valores de intensidad y declinación del espécimen para después ser sometido a un lavado magnético por la aplicación de campos alternos crecientes o calentamientos escalonados (Osorio-Aguillón, 2018). En el caso de la desmagnetización por campos alternos se aplica un campo externo débil que va incrementando en cada paso, se aplica el campo y al terminar se mide el espécimen en el magnetómetro, esto se repite incrementando el valor de intensidad del campo aplicado hasta que se haya desmagnetizado un 90 % el espécimen. Al aplicarse un campo externo débil las partículas cuya coercitividad es menor o igual a la coercitividad del campo aplicado se alinean con él y al decaer el campo, las partículas se reorientan al azar, por lo que solo quedarán los granos con una remanencia mayor al campo aplicado, por esta razón se va desmagnetizando el espécimen (Lanza y Meloni, 2006).

Una vez que la muestra se desmagnetizo es posible observar la dirección característica de cada espécimen, para determinarla se emplea la red estereográfica y el diagrama de Zijderveld; que grafica la magnetización en cada paso del lavado, consiste en una proyección del vector de magnetización sobre el plano horizontal y otra sobre el plano vertical con uno de los componentes en el plano horizontal, este se construye graficando el punto final del vector de desmagnetización que es proyectado como dos puntos en dos planos ortogonales; el plano horizontal A que contiene el vector  $\sqrt{x^2 + y^2}$  y el plano vertical B que contiene el vector  $x\sqrt{x^2 + y^2}$  o al vector  $y\sqrt{y^2 + z^2}$ , donde  $x, y$  y  $z$  son los ejes en coordenadas cartesianas:

$$(3.1) \quad x = M \cos I \cos D$$

$$(3.2) \quad y = M \cos I \sin D$$

$$(3.3) \quad z = M \cos I$$

Donde  $y$  es el este y  $x$  es el norte, también se grafica la intensidad de la magnetización en función del campo aplicado como se muestra en la figura 3.2 (Osorio-Aguillón, 2018).

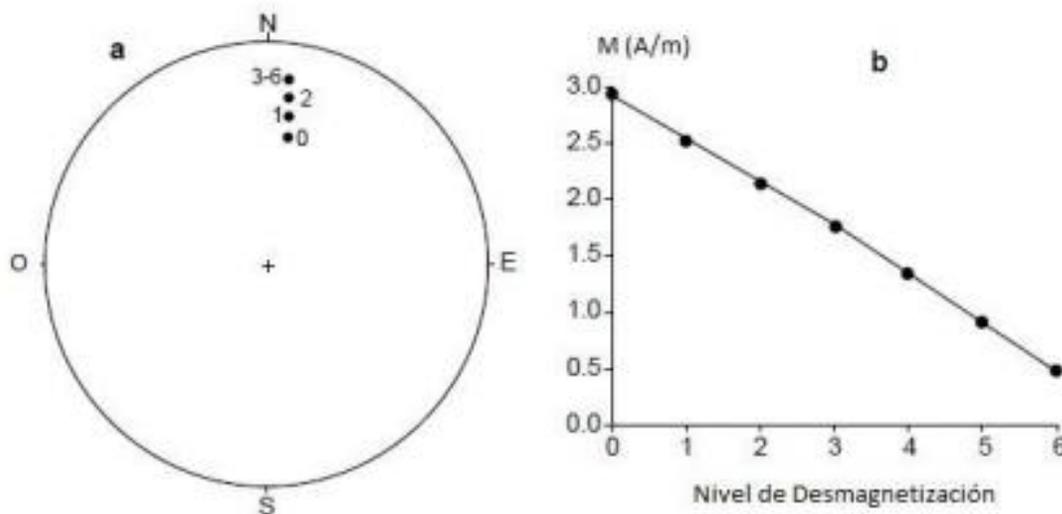


Figura 3.2. a) Proyección de igual-área donde se indica el nivel de desmagnetización y b) grafica de la desmagnetización progresiva, tomado de Butler, 1992.

Al realizar un lavado magnético se obtienen tres tipos de espectros de coercitividad, el primero ocurre cuando la magnetización característica y las secundarias no se traslapan y por tanto los diagramas de Zijdervel presentan un comportamiento lineal al origen en ambos componentes, en el segundo caso: se presenta un traslape parcial por lo que el contacto entre las rectas se curva, sin embargo, pueden obtenerse dos líneas rectas con tendencia al origen, y el tercero sucede cuando hay un traslape total de las componentes primaria y secundaria por lo que no es posible determinar las componentes de magnetización, en estos casos se utilizan círculos de remagnetización, un método que consiste en observar a los vectores resultantes de  $M_P$  y  $M_S$  tras cada paso de desmagnetización, estas direcciones definirán un círculo en la red estereográfica, figura 3.3, a lo que se denomina círculo de remagnetización, y la intersección de los círculos de varios especímenes ayuda a encontrar las componentes de la magnetización principal. Hecho esto, se vuelve a graficar en una red estereográfica y empleando la estadística de Fisher se obtiene su dirección media (Osorio-Aguillón, 2018).

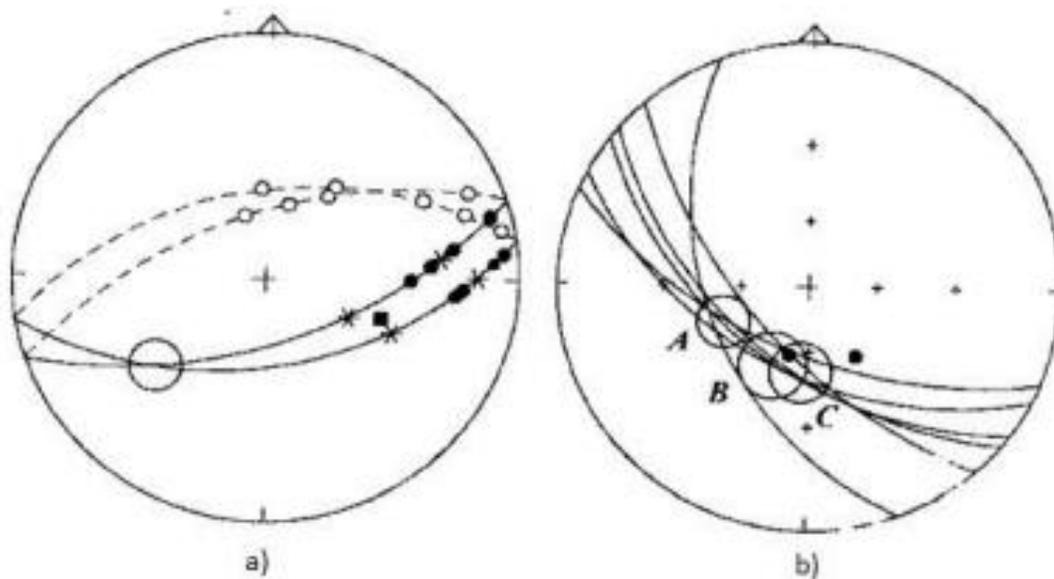


Figura 3.3. Modelo de círculos de remagnetización para determinar las componentes de la magnetización, en a) se encuentran los puntos de los vectores que se traslapan y en b) se encuentran los puntos que determinan las direcciones de magnetización del espécimen; señaladas como A.B y C, tomado de Arechalde, 2006.

### **3.3 Curvas regionales de referencia de las variaciones del campo magnético terrestre**

Mediante estudios de estructuras arqueológicas aplicando el método arqueomagnético, es posible describir las variaciones regionales del campo magnético durante los últimos milenios, un ejemplo de ello es el catálogo de datos arqueomagnéticos de España (Gómez-Paccard *et al*, 2006) que fue hecho gracias a los estudios realizados en estructuras arqueológicas durante los últimos años. Es evidente que aún es necesario continuar estudiando nuevas estructuras arqueológicas para aumentar la densidad de datos para algunas épocas históricas que actualmente se encuentran poco representadas y así mejorar la precisión de las curvas regionales. Al comparar las curvas de variación regionales se observa como la evolución temporal del CMT no es igual, por lo que llego a la conclusión de que la variación secular del CMT no es uniforme temporal ni espacialmente y por tal motivo se debe determinar de manera independiente en cada una de las regiones del planeta; sin embargo, existen sitios arqueológicos en todo el mundo que aún no han sido explorados, la mayoría de los datos arqueomagnéticos que se tienen hasta el momento son en su mayoría de Europa y América del Norte, en la figura 3.4 se muestran los sitios en donde se cuenta con datos arqueomagnéticos, esta escases de datos limita la capacidad de descripción de las variaciones espaciotemporales del campo magnético con precisión (Gómez-Paccard *et al.*, 2016).

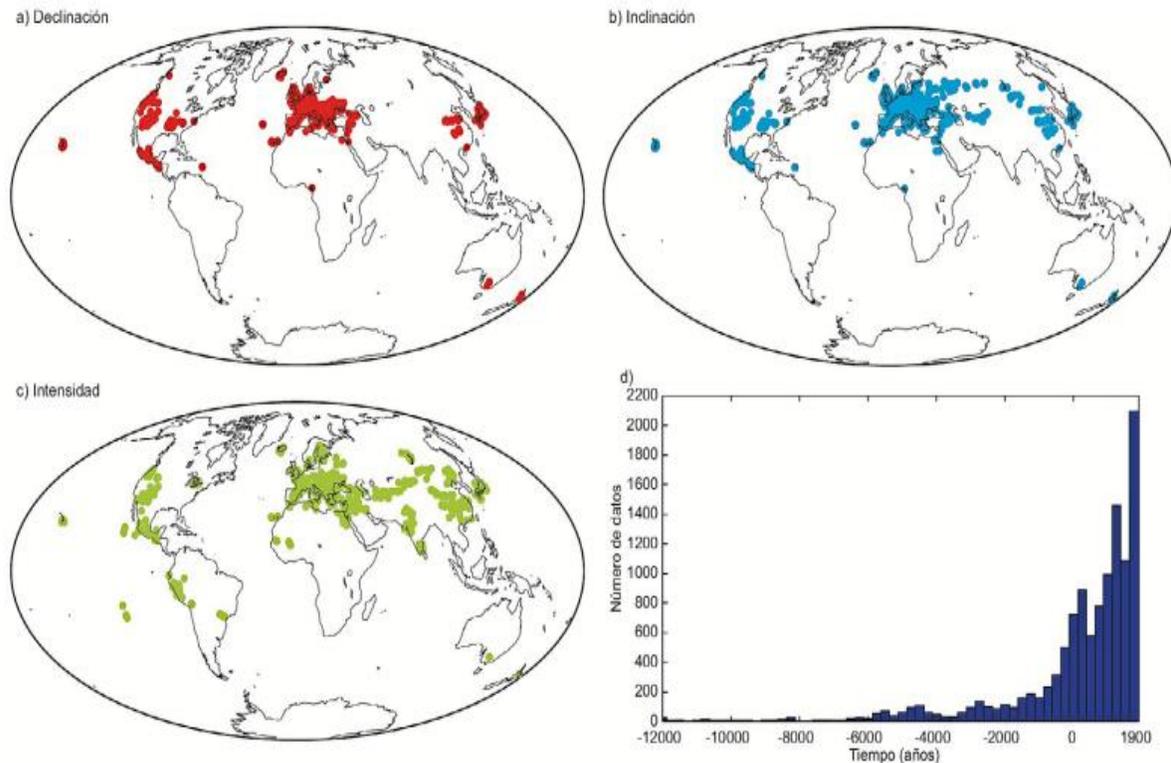


Figura 3.4. Distribución mundial de datos arqueomagnéticos para los últimos 14 milenios. a-c) Mapa con los datos direccionales y de intensidad, d) Distribución temporal de los datos direccionales y de intensidad (todos los datos conjuntos), tomado de Gómez-Paccard, 2016.

### 3.4 Datación arqueomagnética

Las curvas regionales de variación paleosecular son la base del método arqueomagnético de datación, estas curvas de referencia se establecen a partir de distintas herramientas matemáticas como tratamientos estadísticos; ventanas móviles y estadística bayesiana, sobre el conjunto de datos disponibles para una región en concreto, método es aplicable a regiones de aproximadamente 600 km de radio (Gómez-Paccard *et al.*, 2016). Otro método utilizado es el establecimiento de modelos geomagnéticos regionales o globales a partir del análisis en armónicos sobre la esfera, lo que permite obtener una descripción de las variaciones espaciales y temporales del campo geomagnético en cualquier punto de la región considerada, generando para cualquier punto una curva de variación secular de referencia que puede se usada para la datación, un ejemplo de ello es la curva de variación secular,

figura 3.5, obtenida en Madrid para los últimos 8000 años a partir del modelo SHA.DIF.14k y mapas de elementos geomagnéticos para el año 1200 d.C. (Pavón-Carrasco *et al.*, 2014).

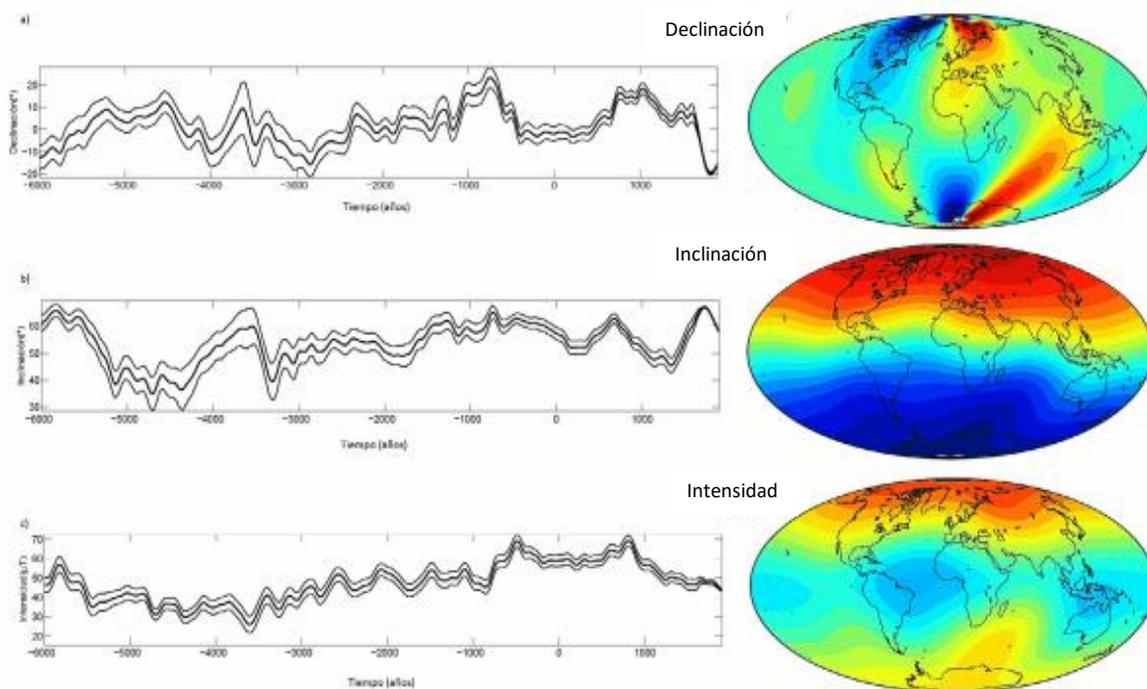


Figura 3.5. Curvas de variación secular del CMT en Madrid, tomado de Pavón-Carrasco *et al.*, 2014.

Esta técnica de datación consiste en comparar las características del campo magnético terrestre registrado y grabado en una estructura arqueológica de edad desconocida, con la curva de variación secular de referencia de la región correspondiente, a partir de la comparación de los valores de declinación, inclinación e intensidad geomagnética que se obtuvieron durante el estudio, la combinación de los resultados permitía obtener un nivel de confianza más alto. Por tanto, la datación arqueomagnética es similar a la datación radiométrica, donde se comparan estadísticamente los datos obtenidos para la estructura estudiada con aquellos proporcionadas con una curva de referencia (Gómez-Paccard *et al.*, 2016).

# Capítulo IV. Contexto arqueológico

## 4.1 Antecedentes arqueológicos

La zona arqueológica de Paquimé se ubica en el municipio de Casas Grandes, al suroeste del estado de Chihuahua, figura 4.1, abarca una superficie aproximada de 70 hectáreas que en su mayoría no ha sido excavada (Posada y Reyes, 2020). Dentro de la zona que fue excavada se encuentran rasgos característicos de distintas culturas como lo son la cultura del desierto, del Occidente y del centro del país, lo que dio lugar a una cultura convergente de todas; que se expone en su forma de organización social, manejo de recursos y supervivencia, religión, manifestaciones artísticas y su arquitectura (Guerrero *et al.*, 2019), figura 4.2.



Figura 4.1. Localización de Paquimé, tomada de Ure y Searcy, 2015.



*Figura 4.2. Aérea del centro de Paquimé donde se observan algunas de sus estructuras principales, tomada de Ure y Searcy, 2015.*

El centro ceremonial fue construido por los pueblos del desierto en el año 900 d.C. que tiempo después se convirtió en un punto de encuentro en las rutas comerciales del norte de América y Mesoamérica, momento en que Paquimé comenzó a crecer y pasar de tener edificaciones semienterradas fabricadas con lodo y techos de ramas a utilizar herramientas como madera para modelar las casas y tener techos de vigas y tierra apisonada, con lo que construyeron nuevos cuartos que llegaron a tener cuatro pisos de altura en el año 1200 d.C. aunado a esta renovación arquitectónica se sumó su habilidad para controlar el agua por medio de aljibes, canales, acequias, drenajes y una laguna de oxidación de desechos (Guerrero *et al.*, 2019), este sistema hidráulico cuenta con una gran extensión, pues va desde las montañas hasta los valles del río Casas Grandes y es una parte fundamental del complejo residencial.

Las actividades de investigación en Paquimé comenzaron en 1936 por parte del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), pero fue hasta el periodo de 1956 a 1962 que se realizó la excavación de 2/3 de las casas por parte del Arqlgo. Charles Di Peso y el Arqlgo. Eduardo Contreras inició el proyecto de conservación de los vestigios, que años más tarde en 1985 el Arqlgo. Ben Browm le daría

continuidad. En 1990 Paquimé fue inscrito en la lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO por el motivo de ser un testimonio excepcional de las relaciones entre los pueblos de Norte de México y Mesoamérica (Posada-Martínez *et al.*, 2020), así como ofrecer evidencia única de la construcción con tierra y de su ensamble arquitectónico, por lo que además fue inscrito en el registro de protección especial de la UNESCO en 2015 y actualmente se encuentra a cargo del Arq'lgo. Eduardo Gamboa Carrera (Guerrero *et al.*, 2019).

#### **4.1.1 Cronología del sitio**

La cronología de Paquimé se ha identificado en fases de acuerdo a cada autor en respuesta a las dataciones que se han realizado desde la excavación de la ciudad, lo que ha provocado distintas discusiones y comparaciones de las mismas, principalmente en la transición del periodo Viejo al periodo Medio a causa de la falta de evidencia y la paulatina transición de un periodo a otro (Pitezal y Searcy, 2013), en 1974 Di peso realizó dataciones por medio de  $^{14}\text{C}$ , dendrocronología e hidratación de obsidiana con lo que nombro cuatro fases por las que atravesó Paquimé comenzando con el periodo Plainware que va desde el año 0 d.C. al 700 d.C., periodo Viejo que fue en donde se dio el mayor crecimiento de la ciudad y se clasifica en tres fases; convento (700 al 900 d.C.), Pilon (900 al 950 d.C.) y Perros Bravos (950 al 1060 d.C.), periodo Medio que subdivide en; fase Diablo, Paquimé y Buena Fe, y por último periodo Tardío; sin embargo, años más tarde, LeBlanc (1980) dató dos regiones cercanas y estrechamente relacionadas con Casas Grandes con los métodos de dendrocronología con árboles del periodo medio y  $^{14}\text{C}$  a piezas de cerámica con lo que complemento la cronología del sitio; que posteriormente sería nuevamente cuestionada y modificada por más investigadores como lo fue Braniff (1986), Lekson (1984) y Reyman (1995) haciendo énfasis en el periodo Medio.

De acuerdo con Di Peso (1974) las primeras aldeas establecidas en Paquimé datan en el año 700 d.C. durante el periodo cerámico a finales del periodo llano e inicios del periodo viejo (700 al 1200 d.C.), conformadas por casas comunitarias rodeadas por casas subterráneas que se utilizaban como viviendas, a partir de los 1060 d.C. comenzó la renovación arquitectónica en donde se utilizó una nueva técnica para modelar el lodo con madera y con ello inicio la construcción de nuevos cuartos de varios pisos de altura, terrazas, áreas de corrales y patios que utilizaban

como talleres, lo que llevo a una transformación monumental para el año 1200 d.C. fecha coincide con la propuesta de Reyman (1995) y que además menciona que este crecimiento arquitectónico duro hasta el año 1400 d.C. El centro principal incluyó un núcleo de edificios con tres o más pisos, con muros de adobe, al margen de una terraza natural del río Casas Grandes y alrededor de este núcleo se encuentran estructuras más bajas, montículos ceremoniales y canastas de pelota (Philips *et al.*, 2001). Mientras que LeBlanc (1980) agrega que la fecha de inicio de Paquimé de 1060 d.C. de Di Peso no cuenta con la evidencia necesaria, por lo que sugiere un nuevo rango de tiempo que abarca el periodo medio entre 1150-1300 d.C. que coincide con las fechas obtenidas por las técnicas que utilizo y propone que entre 1130-1170 d.C. Paquimé fue el centro de una red económica regional que pudo haber finalizado en el año 1300 d.C. que además corresponde con la fase Diablo de Di Peso o el periodo de decadencia, tal como se expone en la figura 4.3.

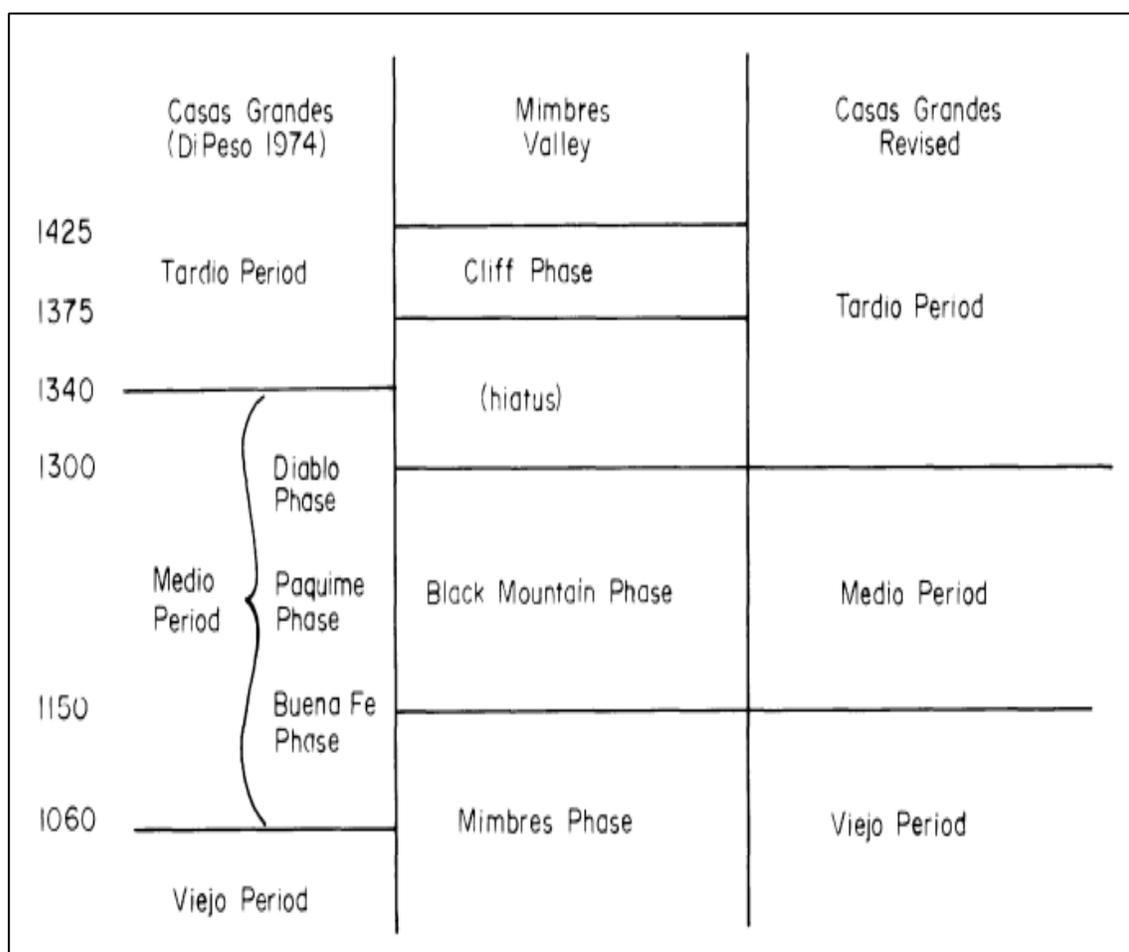


Figura 4.3. Comparación de las fases propuestas por Di Peso y LeBlanc, LeBlanc (1980).

Por el contrario, Reyman (1995) argumenta que Casas Grandes fue el centro de mayor comercio desde el año 1300 d.C. hasta aproximadamente el año 1450 d.C. que corresponde al periodo medio, ver en figura 4.4.

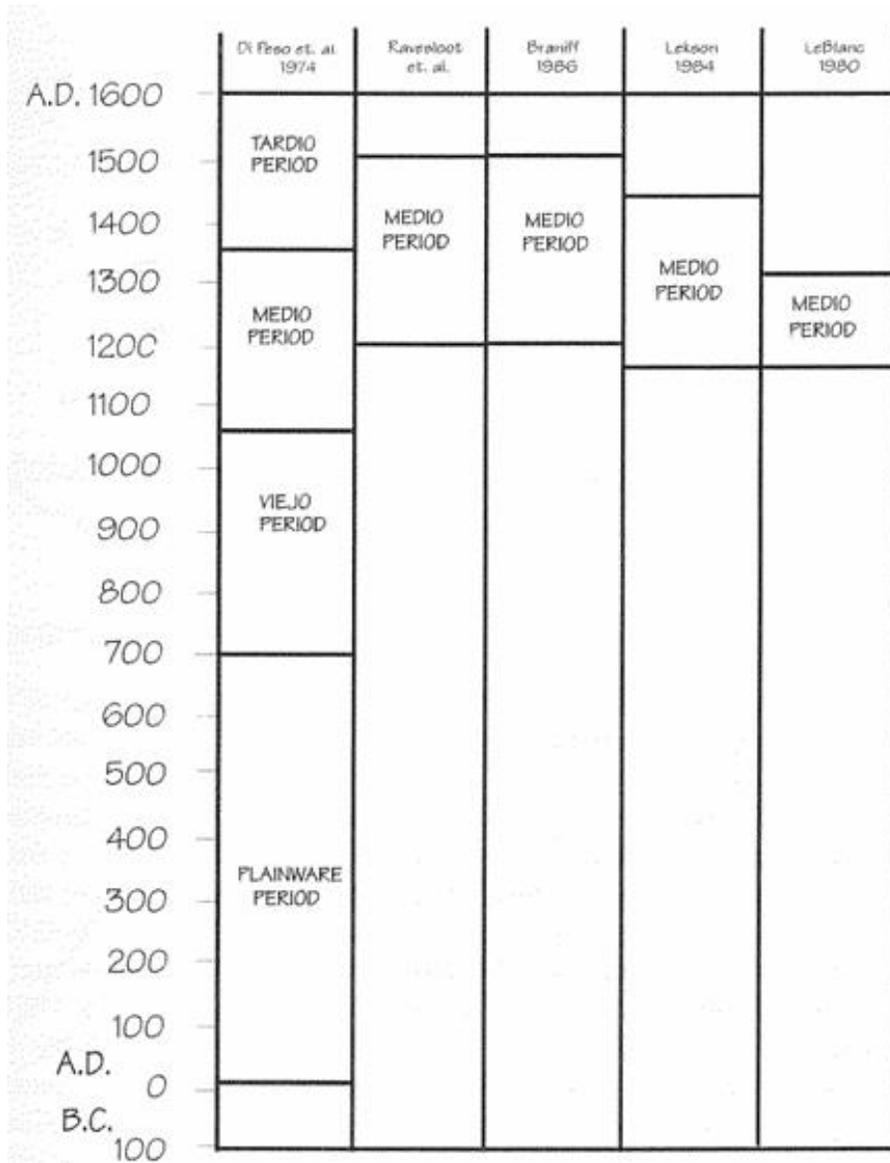


Figura 4.4. Comparación de fases propuesta por Reyman (1995).

Sin embargo, Stewart (2005) a través de técnicas de radiocarbono aplicado a muestras de cerámica pertenecientes a Paquimé y regiones cercanas concluye que el periodo Medio da inicios alrededor de los 1200 a 1250 d.C. de acuerdo con sus dataciones y sugiere que posiblemente la transición de periodos no fue sincrónica en todas partes. Además de que se dio una transición tan drástica en poco tiempo

por la reestructuración de la organización en cada familia debido a la llegada de culturas externas que pasaron a formar parte de Casas Grandes, lo que contribuyó a la rápida evolución de la ciudad en cuanto a la arquitectura y conocimientos en general; finalmente se establece que el periodo Viejo data del 600 al 1200 d.C. (Rakita, 2001) y el periodo Medio del 1200/1250 al 1450/1500 d.C. (Rakita y Raymond, 2003).

La ciudad se encuentra en una zona árida con temperaturas elevadas, sin embargo, con el gran abastecimiento de lluvias y ríos, los pobladores lograron asentarse en el sitio y obtener productos agrícolas (Cornejo, 2016) además de que utilizaron a su favor las variaciones topográficas para sustentar diversos productos como lo fue el sotol, agave, yuca, bellotas, piñones, frutos de nopal, mezquite, pasto y malezas comestibles, al igual que la caza de ciervos y conejos (Whalen y Minnis, 2003). La gran capacidad de adaptación de los habitantes no solo les permitió adaptarse a las altas temperaturas y aprovecharlas, sino que también les permitió aprovechar los recursos de la zona para la creación de herramientas como lo fue con la cerámica; que se utilizó con fines decorativos y como elementos de uso común como metates y morteros, estos artefactos reflejan la cultura Mogollón perteneciente al suroeste de Estados Unidos que al llegar al país algunos investigadores la llaman cultura Casas Grandes y que además, presenta manifestaciones en cuevas desde su asentamiento en Estados Unidos y que su abandono coincide con la fecha del surgimiento de la cultura Casas Grandes, es decir, con su llegada al norte de México alrededor de los años 1000 a 1100 d.C. periodo de tiempo en el que se infiere que los habitantes pertenecientes a la cultura darían inicio a la construcción de la ciudad, indicando que su asentamiento comenzó en las cuevas; algunas de las principales son; la cueva del Tragadero, la Laja, la del rincón, la Olla, el Corral, la Ventana, los escalones y el Arco, Posada y Reyes (2020).

Existe poca evidencia sobre los asentamientos durante el periodo Viejo debido a que fueron destruidos y reconstruidos con nuevas técnicas y formas durante el periodo Medio, por tanto, Di Peso (1974) dato el sitio Convento ubicado al oeste del Río Casas Grandes en el que baso la mayor parte de su investigación sobre el periodo Viejo abarcando una zona de 2700 m<sup>2</sup> en donde se encontraban casas de pozo, estructuras de bloque de habitación de superficie y una valla fronteriza; estructuras que fueron datadas de acuerdo al estilo arquitectónico y por

radiocarbono a partir de las que se identificaron las tres fases del periodo Viejo; Convento (700 al 900 d.C.), Pilón (900 al 950 d.C.) y Perros Bravos (950 al 1060 d.C.), aunque tampoco existe suficiente evidencia sobre la fase Pilón, por lo que Pitezal y Michael (2013) sugieren realizar una excavación más profunda que permita encontrar más evidencia sobre el periodo Viejo y así comprender mejor la transición al periodo Medio en donde se marca una diferencia drástica en las cerámica roja sobre marrón a múltiples policromías, cambios en la ideología y el cambio de casas de pozo a estructuras superficiales de adobe. El periodo Medio fue dividido en fases por Di Peso (1974) y datadas por Lekson en 1984 como; fase Buena Fe (1130/1150 al 1300 d.C.), Paquimé (1300 al 1400 d.C.); donde ocurrió la gran renovación urbana y fase Diablo (1400 d.C.), la cual se considera más como el evento que termino con la cultura Casas Grandes que como una fase (Lekson, 2011). Whalen y Minis (2009) excavaron cuatro sitios en Paquimé pertenecientes al periodo Medio temprano y concluyeron que dio inicios durante el 1200 d.C. y teniendo una expansión más grande durante el 1250 d.C. por lo que la fase Paquimé probablemente surgió a inicio o después del 1300 d.C. (Lekson, 2011). Durante el periodo Medio las poblaciones ocuparon mayormente las laderas de tierras altas que debido a su menor potencial agrícola se construyeron sistemas de terrazas para extender el uso de suelo agrícola hasta los asentamientos (Whalen y Minnis, 2003).

Paquimé tuvo una evolución mucho más rápida que los otras cultural del norte del país, esto debido a la cercanía que tenía con las culturas de Mesoamérica y la influencia que esta tuvo en Casas Grandes, pues utilizaban la Sierra Madre Occidental como una especie de corredores para mantener contacto entre ambas áreas (Contreras-Sánchez *et al.*, 1989), fomentando el apogeo de la ciudad durante los años 1261 y 1340 d.C. A demás de que de acuerdo con Lekson (2011) la expansión poblacional de Paquimé coincide con la despoblación del sitio Mimbres que ocurrió entre 1125 y 1130 d.C. por otra parte el Río Casas Grandes es el río más largo del noroeste de Chihuahua con 16,600 km<sup>2</sup> lo que dio lugar a suelos fértiles con gran potencial agriculturas lo que posiblemente fue una de las razones por las que las personas llegaron y se asentaron en Paquimé, Whalen y Minnis (2001) calcularon que en un radio de 5 km podrían ubicarse alrededor de 3,000 personas que con la evidencia sobre las habilidades de los pobladores de Casas Grandes es razonable que las personas se vieran atraídas hacia la ciudad para asentarse y formar parte de la cultura en una región árida (Whalen y Minnis, 2003). Sin embargo, la

cuidad de Paquimé fue abandonada antes de la llegada de los españoles, de acuerdo con Contreras (1989) entre 1564 y 1584 inicio la conquista en el Norte de México a cargo del capitán Francisco de Ibarra cuyo objetivo principal era buscar minas y al llegar a Paquimé se encontraron con las ruinas de una ciudad abandonada que de acuerdo con algunos habitantes de culturas vecinas sus pobladores habían huido hace algún tiempo en dirección al Norte debido a las guerras, que sucedieron entre 1340 y 1660 d.C. provocadas por grupos nómadas que además saquearon e incendiaron el lugar, aunque también se asocia el abandono de la ciudad con problemas ambientales de la región o bien ambos, Posada y Reyes (2020).

#### **4.1.2 Cultura Casas Grandes**

La zona arqueológica de Paquimé, hogar de la cultura Casas Grandes es considerada como la más importante del Norte de México debido a su gran riqueza arquitectónica, cultural y artística, además de ser un testimonio material de la gran civilización que vivió en ella. A inicios del periodo viejo, diversas culturas externas como los Mogollón llegaron a territorio de Casas Grandes en donde ya había pequeñas aldeas, establecidas durante el periodo viejo en el centro de Paquimé y a 150 km al sur en la cuenca de Babicora y hacia el Río Santa Maria (Stewart *et al*, 2005), posteriormente durante el crecimiento de Paquimé llegaron otras culturas como los Aztecas, lo que provocó que existiera una desigualdad social a causa de que se hablaran varias lenguas y se integraran nuevas ideologías y costumbres, por lo que una forma de unificación entre culturas surgió a partir del dualismo (Pailes, 2017).

De acuerdo con VanPool (2007) las interpretaciones basadas en las cerámicas policromadas de Paquimé demuestran que los chamanes eran fundamentales en el sistema de poder del centro ceremonial, los cuales eran elegidos a partir de una percepción espiritual que puede implicar trances en los que se entra en un sueño luminal para obtener conocimientos e interactuar con fuerzas sobre naturales (VanPool, 2009; Pailes, 2017). Por tanto, de acuerdo con el análisis mortuorio realizado por Rakita (2009) el chamanismo era practicado en los asentamientos pequeños del periodo viejo posiblemente dominado por afiliaciones de clanes, durante este periodo solían realizarse ceremonias mortuorias públicas, lo que

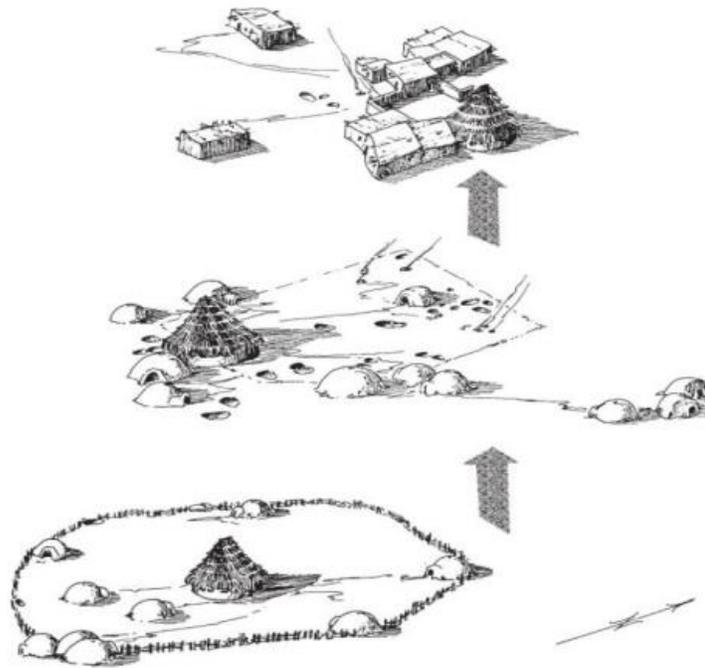
sugiere que todos participaban y afrontaban una pérdida de su red social de forma pública, aunque también se realizaban de forma discreta en la que el cadáver casi no era manipulado, para ambos casos el chaman era el encargado de realizar las ceremonias, por tanto este tipo de rituales fungieron como un escenario en el que las comunidades podían mostrar sus vínculos y los miembros individuales afirmaban su poder y estatus en la comunidad, ya que no existían puestos de liderazgo, pues los chamanes fungían como una conexión con los antepasados y se mantenía un sistema igualitario (Rakita, 2001); en el periodo Medio la población creció considerablemente por lo que los rituales mortuorios tuvieron que cambiar y pasaron a ser privados y con pocos individuos durante la ceremonia, además de que se establecieron puestos de poder en donde se nombraba a líderes y eran legitimados a través del acceso a los antepasados en la forma de restos humanos curados, lo que da inicio al culto a los antepasados en Paquimé (Rakita, 2001) y el empleo de reliquias humanas para simbolizar la continuidad de la identidad de la elite en la veneración de los antepasados (Rakita, 2006; Pailes, 2017), lo que ayudo a integrar a la comunidad al igual que la cerámica policromada, pues la decoración y simbolismo plasmados actuaron como un culto a la fertilidad y a la tierra; para este momento las elites llevaban el control de la ciudad y se fomentaba en la participación a raíz de minimizar la lealtad, fomentando así un nuevo sistema religioso en donde los practicantes estaban a cargo de los rituales; sin embargo para finales del periodo Medio las instituciones autoritarias perdían poder y se reflejaba en las ceremonias mortuorias que nuevamente eran públicas por lo que se cree que las negociaciones de poder, prestigio y estatus estaban presentes (Rakita, 2001).

Otra manera de identificar la ideología de la cultura Casas Grandes es por medio de la arquitectura y la distribuciones de la cultura material como el juego de pelota y las paredes gruesas de los edificios, que indican una arquitectura de poder y que de acuerdo con Whalen y Minnis (1996; 2001) la cancha de juego de pelota en forma de "T" en Paquimé refleja el dominio que se tuvo sobre las regiones alrededor de Casas Grandes; pues se identifica esta forma en las puertas de los hogares de los asentamientos circundantes a Paquimé, además de ser una posible sede de rituales en donde se incluye el sacrificio humano. El centro ceremonial de Paquimé demuestra el simbolismo y sus relaciones con otras culturas del resto del país en sus características monumentales que incluyen tres juegos de pelota, un pozo de acceso, 16 montículos, santuarios, senderos, arquitectura en la cima de una colina y

manantiales, los cuales no se encontraban en el centro de Paquimé, pues existen otras regiones circundantes que se relacionaron con la cultura Casas Grandes, teniendo presencia en su estilo arquitectónico, en cerámicas, ideología e incluso en su sistema político que van del centro de chihuahua al sur de Nuevo México y en el norte de la Sierra Madre Occidental en donde se encontró presencia de arte rupestre con símbolos de Casas Grandes con una fuerte asociación con Paquimé (Kelley, 2012; Gamboa y Valencia, 2008).

El comercio fue otra de las actividades que permitió que la influencia de Casas Grandes se extendiera a sus alrededores bajo la estrategia de ayudar a las poblaciones más necesitadas o con recursos escasos para así formar alianzas, lo que consistía en proporcionar alimentos a estas comunidades cuando las lluvias eran escasas y tenían un déficit de producción agrícola (Whalen y Minnis, 2006), pues su alimentación se basaba principalmente en el maíz, frijoles y animales, aunque también se encontraron semillas de calabaza, nueces y semillas de chía, que necesitan de un abastecimiento continuo de agua lo que infiere que eran provenientes de otras regiones, por tanto eran consideradas exóticas; sin embargo, lograron cultivarlas en Casas Grandes al igual que otras plantas y árboles como lo son; la manzanilla, el roble, enebro y algunos no identificados pertenecientes a las coníferas (Stewart *et al*, 2005), debido a su sistema de drenaje y almacenamiento de agua, en cuanto a los animales Stewart (2005) menciona que se encontraron restos de conejo tontail, liebre, tuza, mamíferos pequeños, búhos y mejillón de agua dulce, de los cuales se cree que algunos formaban parte de su dieta y eran adquiridos de la caza en jardín dentro y alrededor de los campos, además de contar con criaderos de pavos, los cuales se desconoce si eran de uso funerario o para alimentación. Hecho que fue la pauta para el crecimiento del pueblo pues dichas estrategias permitieron formar y mantener contacto con distintas regiones y sociedades que además de incentivar la importación de ideologías y objetos exóticos también sirvió para reforzar posiciones sociales (Earle, 1997; Whalen y Minnis, 2006). Este tipo de interacciones comenzaron durante el periodo Viejo en donde se ha identificado la presencia de cerámicas provenientes de otros estados y la aparición de conchas marinas pertenecientes a la costa de Sonora, minerales como la turquesa del Sur del país, una sonaja de cobre de origen Mesoamericano y una placa circular de pizarra con dos perforaciones en el centro que se asocia con el entierro de personajes sacrificados en Teotihuacan (Posada y Reyes, 2020). Además de que en la etapa final

de este periodo hubo cambios en la arquitectura de Paquimé como la construcción de cuartos rectangulares y casas sin foso, lo que dio inicio al periodo Medio y a la arquitectura pueblo ancestral tal como se muestra en la figura 4.5.



*Figura 4.5. Desarrollo de aldeas de El Convento, tomado de Di Peso, 1974.*

Las redes de intercambio que se han identificado indican relaciones con el Occidente y el centro de México con el uso del caracol como trompeta, lo que tuvo gran importancia para Paquimé como parte de los rituales, tal como en el centro del país, otro de los indicios del comercio de Paquimé son las guacamayas que fueron traídas de Veracruz y que eran una parte importante de su religión y del arte de la cultura Casas Grandes y que de acuerdo con Lorena Posada, Yarira Reyes y Daniela Holguin (2020) durante el siglo XVI Paquimé tuvo relaciones comerciales con Michoacán por la presencia de sonajas de cobre y con otros sitios como Chichen Itzá y Guatemala; por la presencia de turquesa y con Tenochtitlan.

### 4.1.3 Arquitectura

Uno de los mayores distintivos de la cultura Casas Grandes es su impresionante arquitectura que Whalen y Minnis (2001) describen como una arquitectura de poder, pues el uso de paredes gruesas en el centro de Paquimé es uno de los nodos de poder que caracterizan a este tipo de arquitectura, colocando las habitaciones del centro de la ciudad con paredes más gruesas y las de las ciudades vecinas con paredes más delgadas, infiriendo así que el poder se encuentra en el centro, la cual comenzó a construirse durante el Periodo viejo, sin embargo, los habitantes reconstruían y remodelaban sus casas por lo que existe un hueco en la historia de su evolución arquitectónica que va desde su asentamiento en cuevas hasta la fase convento que el arqueólogo Di Peso (1974) describió a detalle, durante esta fase las construcciones se enfocaron en satisfacer las necesidades de los habitantes siendo más cómodas con una gran similitud entre las chozas, de las que se tenían tres tipos las domesticas, las comunitarias y para rituales; las domesticas eran utilizadas por familias que por el tamaño que tenían se cree que la choza más pequeña albergaba a dos personas, la mediana a una familia de entre cuatro o cinco personas y la más grande hasta quince personas considerando que un adulto necesita al menos 4.5 m<sup>2</sup> para dormir. El principal objetivo de estas construcciones era proteger a los habitantes del viento, las lluvias e incluso nieve, por lo que no tenían ningún tipo de orientación en cuanto a la estructura de la ciudad ni en cuanto a la entrada de las chozas (Di Peso, 1974).

La construcción de las chozas consistía en excavar un pozo de aproximadamente 75 cm de profundidad, en donde se coloca un marco hecho por palos de madera arqueados en la parte superior y amarrados en la punta con maleza y hierva, tal como se ve en la figura 4.6, sobre la estructura del marco ya formado se colocaba una mezcla de lodo que formaba adobe alrededor de toda la estructura dejando una abertura en un lado que formaba la entrada.

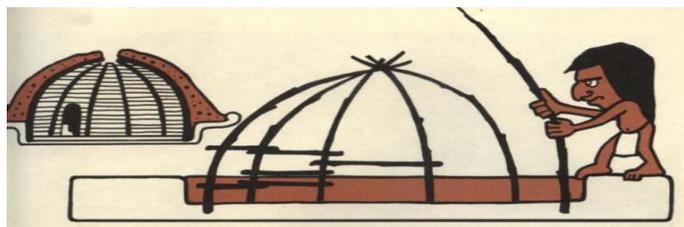


Figura 4.6. Estructura interna y externa de las chozas de la fase convento, tomado del libro Casas Grandes, tomado de Di Peso 1974.

Durante la misma fase se utilizó una segunda técnica de construcción que consistía en edificios comunitarios de 45 m<sup>2</sup> aproximadamente, lo que era cuatro veces más grande que las chozas domésticas, los edificios eran construidos dentro de un pozo tal como las chozas pero con una estructura distinta, tal como se muestra en la figura 4.7, se hacían dos hileras de postes que se colocaban para formar las paredes y el marco del techo con una altura de dos metros y se unían con hierva o maleza para después ser cubierto por lodo y al interior del edificio se colocaba en el piso un horno revestido de adobe de 42 cm de diámetro (Di Peso, 1974).

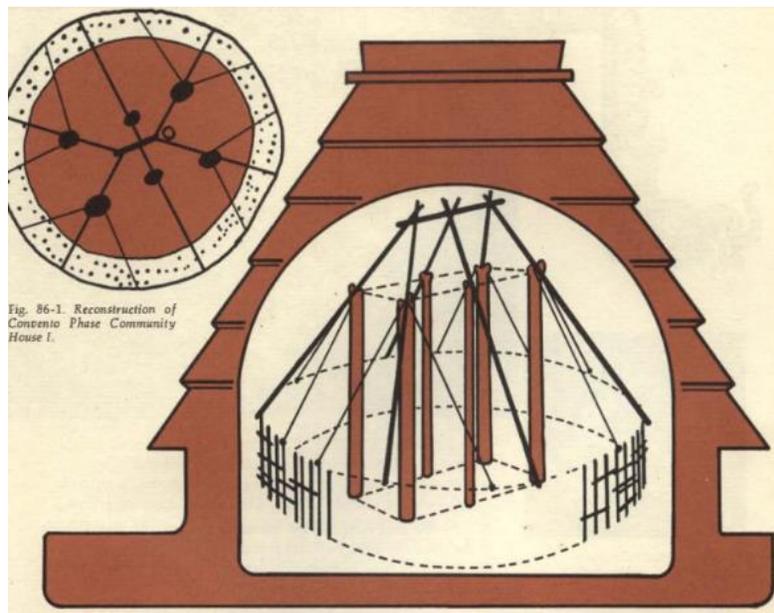
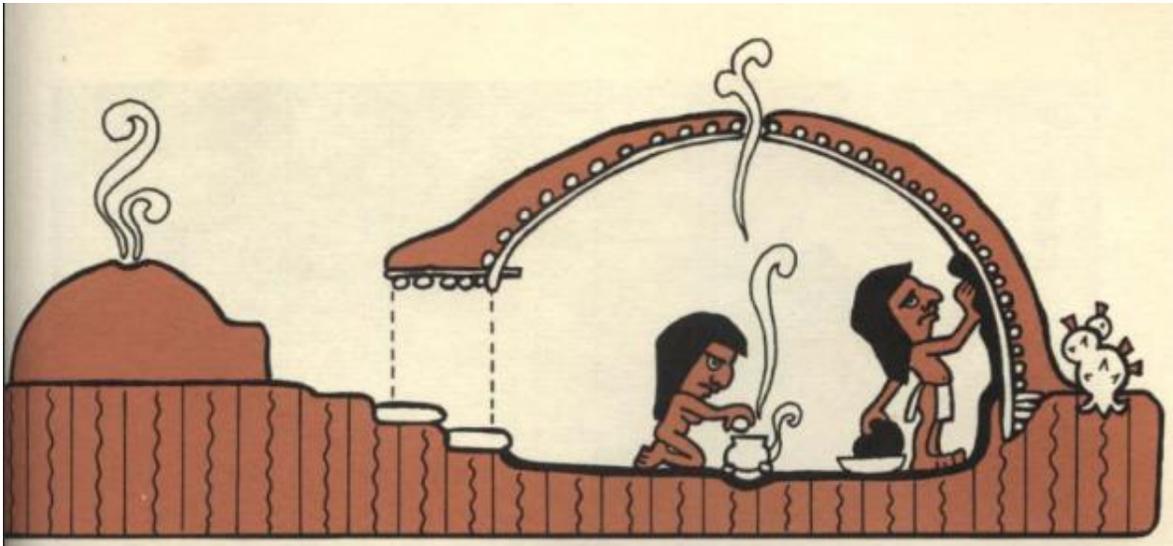


Figura 4.7. Técnica de construcción de edificios comunitarios, recuperado del libro Casas Grandes de Di Peso 1974.

Al término de la fase Convento, da inicio la fase Pilon del 900 d.C. al 950 d.C. en la que se hicieron algunos cambios en la construcción de las chozas domésticas, comenzando por colocar las estructuras de madera por fuera del pozo excavado y se les comenzó a dar una forma de “D” a las chozas, se orientaron hacia el este, el procedimiento siguiente fue el mismo que el utilizado en la fase convento, pero se le agregó un enyesado de adobe por dentro de la estructura y en el piso de las chozas, lo que hacía las estructuras más duraderas y resistentes, otra característica importante de esta fase que se añadió un horno en el centro de las chozas, como se observa en la figura 4.8, tal como el que se tenía en los edificios comunitarios de la fase Convento (Di peso, 1974).



*Figura 4.8. Chozas por dentro y fuera durante la fase Pilon, recuperada del libro Casas Grandes por el arqueólogo Di Peso en 1974.*

En cuanto a los edificios comunitarios, se derribó la estructura que ya se tenía en la fase previa y se realizó una excavación más grande siendo ahora de 9.70 m de diámetro por lo que Di Peso (1974) sugiere que se realizó esta expansión por la necesidad de recibir a más personas. La construcción del edificio comenzó con la expansión del área, el levantamiento de la estructura por fuera de la excavación y se colocaron seis postes alrededor del centro del edificio que servían para sostener el techo de paja, se eliminó una especie de banqueta que se tenía en la entrada y se reemplazó por una rampa, se reconstruyó el horno y se orientó la puerta hacia el este, tal como se muestra en la figura 4.9.



*Figura 4.9. Edificio comunitario de la Fase Pilon, obtenido del libro Casas Grandes por Di Peso en 1974.*

Durante la fase que el arqueólogo Di Peso (1974) llamo Perros Bravos que va del 950 d.C. al 1060 ± 190 d.C. las chozas no sufrieron tantas modificaciones, se conservó la estructura principal a la que se le aumentaron alrededor de 10 m<sup>2</sup>, es decir que se le agregaron cuartos a las chozas, en las que opto por ya no construir hornos dentro de las casas por lo que Di Peso (1974) sugiero que se atravesó por un periodo cálido en el que ya no era necesario mantener cálido el interior de las chozas y que se podía cocinar en espacios en el exterior. Una innovación arquitectónica que surgió durante esta fase fue añadir una especie de contenedor en una de las habitaciones como se muestra en la figura 4.10.

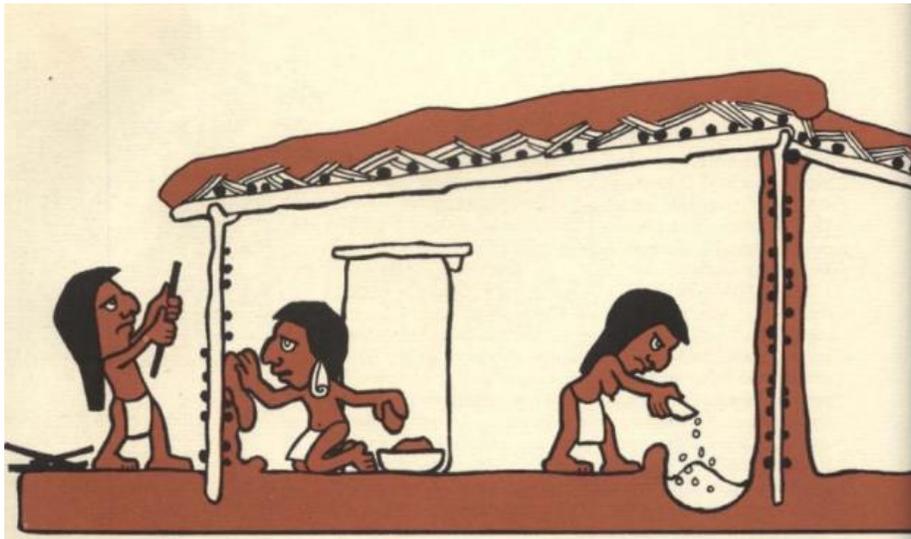


Figura 4.10. Choza de la fase Perros Bravos, obtenido del libro Casas Grandes por Di Peso en 1974.

En 1200 d.C. da inicio el Periodo Medio en el que la Cultura Casas Grandes se enfocó en desarrollar un sistema de conservación del agua lo que tuvo repercusiones en la arquitectura de la zona, ya no se realizaron modificaciones a la estructura de las casas, por otro lado, por dentro de las casas se agregó una especie de plataforma en las habitaciones que se utilizaba para dormir y consistían en plataformas de adobe con paredes perforadas por pequeñas entradas; sin embargo, ahora se cree que se utilizaban para almacenamiento (Whalen y Minnis, 2001). A pesar de la disminución de desarrollo arquitectónico en las casas, se añadieron sistemas de drenaje y cisternas, que funcionaban a partir de un canal de navegación colocado en la superficie que abastecía de agua a toda la ciudad, además de crear una especie de trinchera o trampa artificial en forma de media esfera que almacenaba el agua de las lluvias y era utilizada para abastecer los cultivos, también se contaba con una

entrada subterránea ubicada en el centro de la ciudad de Paquimé con una profundidad de 14 m a la que se tiene acceso por medio de escaleras y pasillos que tienen como destino un manto de agua, como se ilustra en la figura 4.11, lo que demuestra el gran conocimiento hidrológico que tenían los antiguos habitantes de la ciudad (Di Peso, 1974).

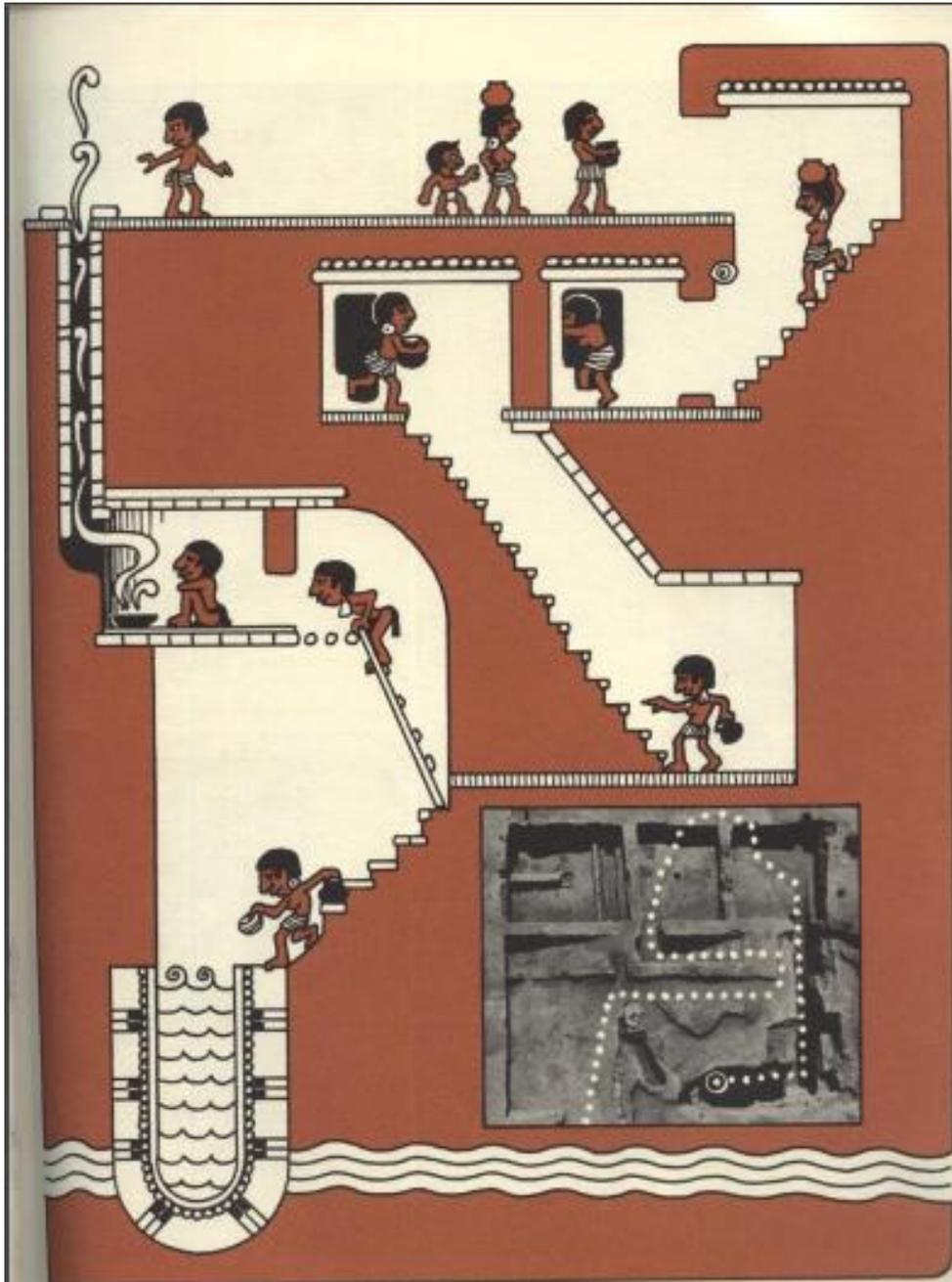


Figura 4.11. Sistema hidrológico subterráneo ilustrado por Di Peso en 1974.

## 4.2 Casa de los hornos

Debido a la gran extensión de la ciudad, Paquimé se ha distribuido en unidades de acuerdo las características en común que se encontraron en la zona (Parada-Carrillo, 2016), como es el caso de la unidad 1, o bien, casa de los hornos que se ubica en al norte de la ciudad y consta de cuatro hornos prehistóricos de pozo, dos hornos modernos, dos áreas de plaza, un montículo y dos grupos de casas (Di Peso, 1974b) como se observa en la figura 4.12, la unidad 1 cuenta con una extensión de 2,356.25 m<sup>2</sup> en donde se encuentran las estructuras mencionadas y espacios libres que son delimitados por un arroyo que de acuerdo con Di Peso (1974b) delimitaba la zona norte de la ciudad.

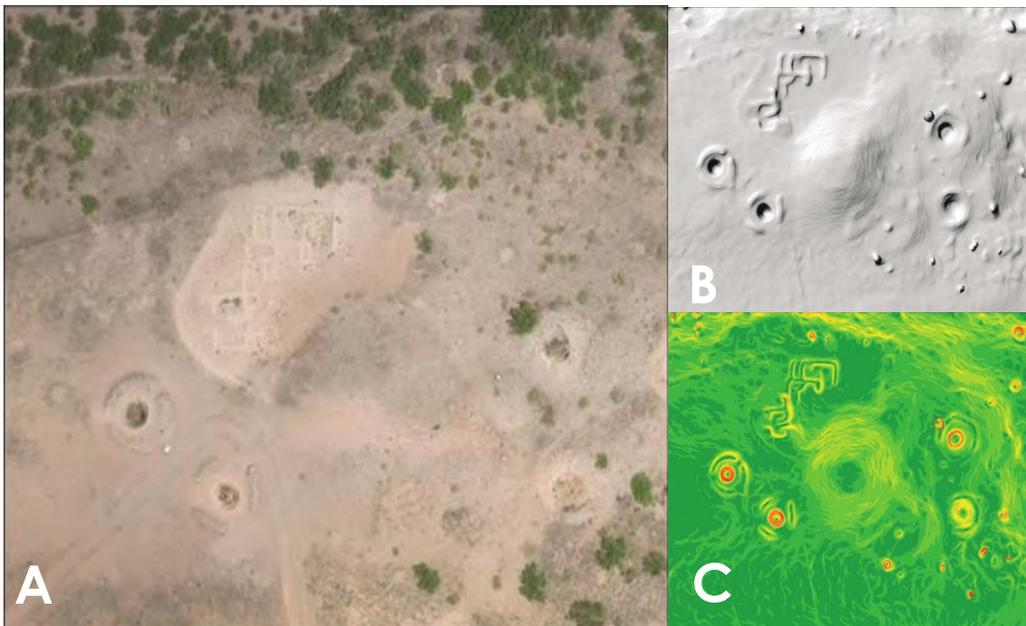


Figura 4.12. Unidad 1, casa de los hornos vista aérea (A) en modelo de sombras (B) y con análisis de pendiente generado por DSM (C) generados con ArcMAP de ESRI. Tomado y editado de Scott (2015).

Las casas incluían cuatro grupos familiares de múltiples habitaciones ramadas e interconectadas que bordean la plaza 1-1 de la figura 4.13 y fueron construidas con relleno natural de terraza y caliche, las elevaciones del piso muestran que las habitaciones fueron construidas dentro de un pozo, colocando las paredes contra los lados de la excavación inicial, la plaza se niveló hasta la grava de la terraza y con la tierra que se obtuvo de la nivelación se creó el núcleo del montículo 1-1 que después fue almacenando sobre sí mismo los residuos del relleno acumulado

de los hornos de pozo que se ubican a su alrededor, pues de acuerdo con Di Peso (1974b) el relleno de los hornos se extraía cada vez que era utilizado, figura 4.14.

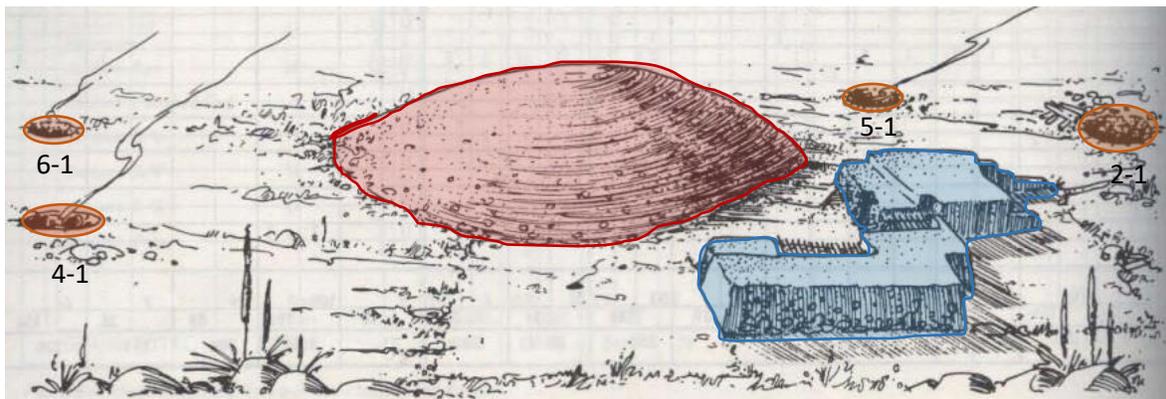


Figura 4.13. Panorámica de cómo se encontraba la casa de los hornos, donde se observan cuatro hornos de pozo (naranja), el montículo 1-1 (rojo) y las casas (azul), tomada y modificada de Di Peso y Fenner (1974).

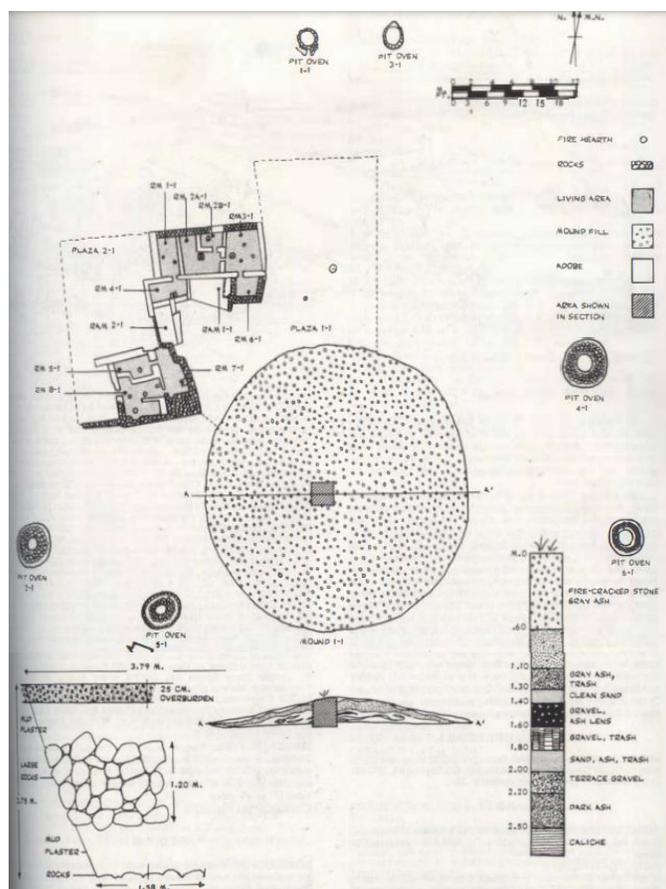


Figura 4.14. Aérea de la casa de los hornos con la composición de las estructuras encontradas, tomada y modificada de Di Peso y Fenner (1974).

Los hornos fueron característicos de la cultura Casas Grandes, siendo fundamentales en todas sus etapas de crecimiento, se han identificado distintos tipos dentro de la extensión del sitio; circulares, irregulares, rectangulares, en forma de cruz, compuesto y semicircular. En la unidad 1 se ubican seis hornos circulares dos de ellos con chimenea y cuatro sin chimenea como se muestra en las figuras 4.15 y 4.16.

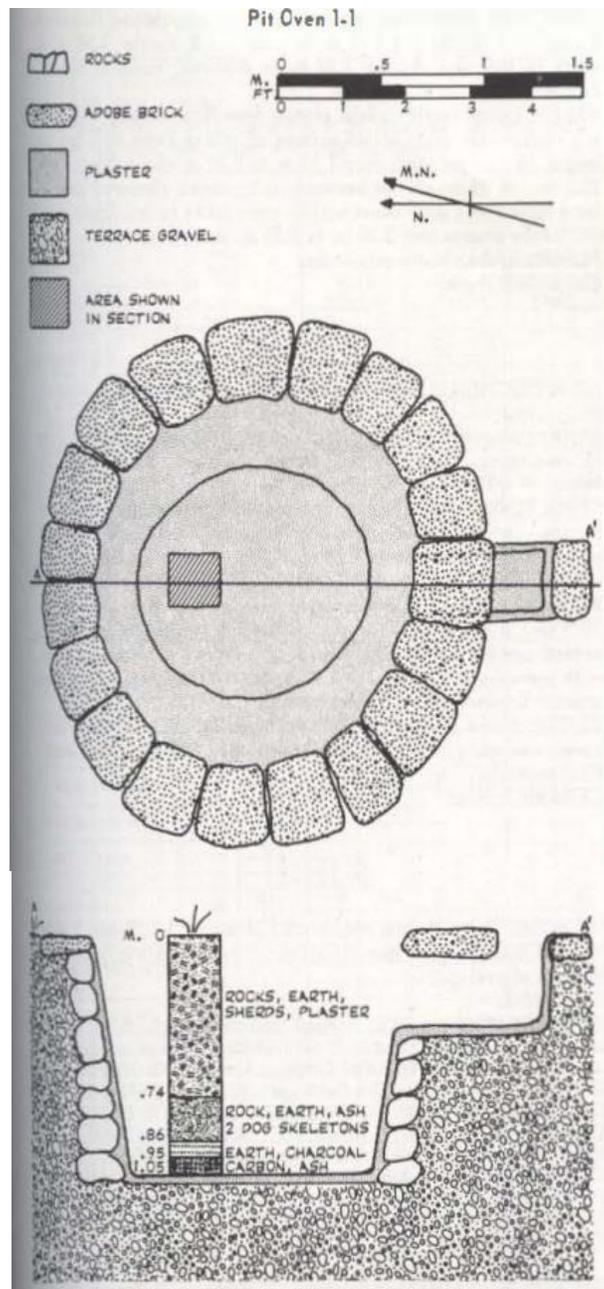


Figura 4.15. Horno de pozo con chimenea 1-1, compuesto de rocas, yeso, tierra, dos esqueletos de perros, cerámicas, carbón y cenizas, tomada de Di Peso y Fenner (1974).

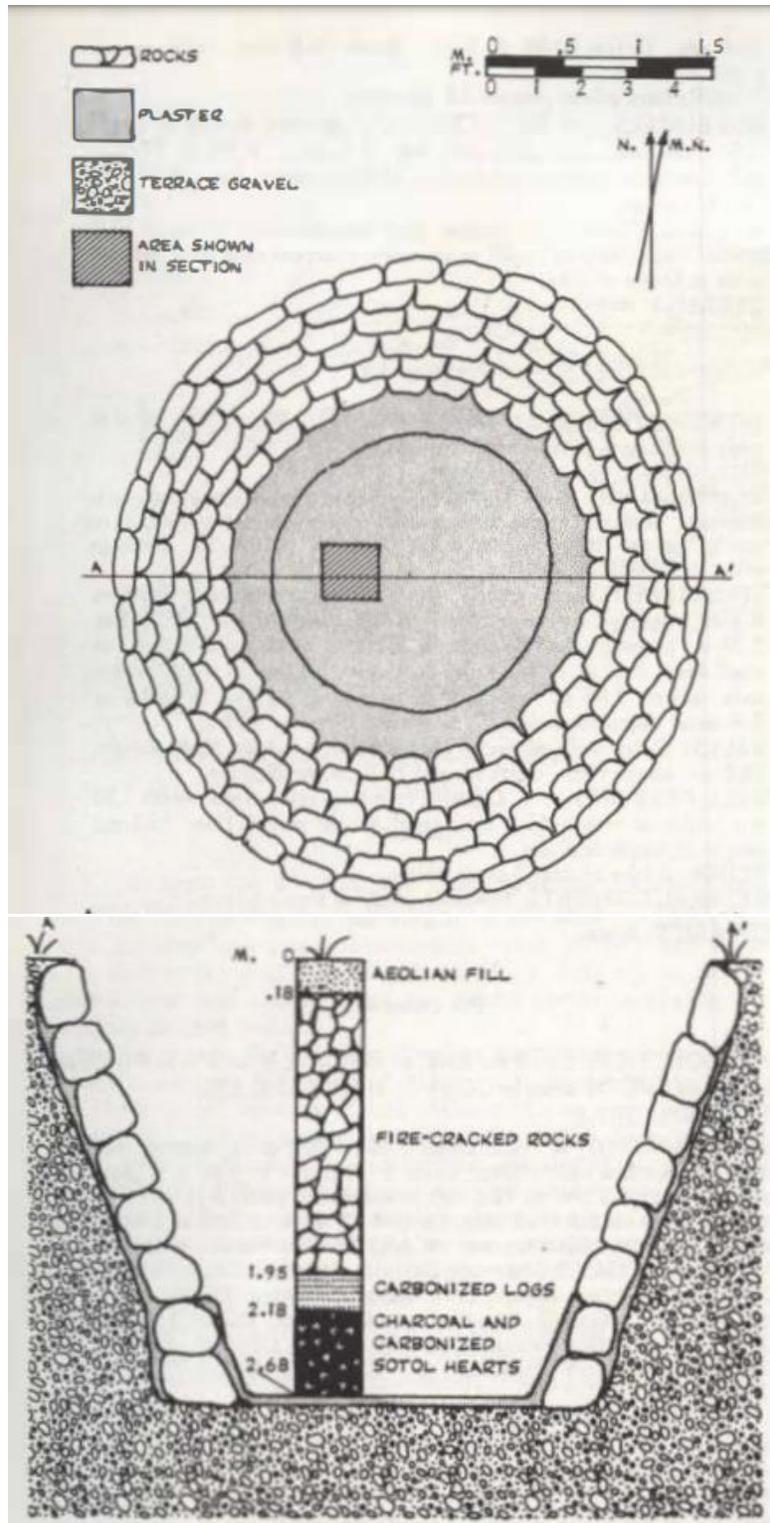


Figura 4.16. Horno de pozo 6-1, compuesto de relleno eólico, roca agrietada por el fuego, troncos carbonizados, cerámica y corazones de sotol carbonizados, tomada de Di Peso y Fennel (1974).

### 4.3 Antecedentes arqueomagnéticos

Los métodos de datación utilizados en Casas Grandes han sido por radiocarbono; con una edad de 1310 d.C.  $\pm$  30, dendrocronología; con una edad de 1340 d.C. Di Peso y Fenner (1974), palinología, hidratación de obsidiana y por arqueomagnetismo, este último fue publicado en 2021 (Alva Valdivia y colaboradores) y cuyo objetivo fue caracterizar magnéticamente y datar cerámicas policromados de dos especies; Mimbres y Ramos, provenientes del norte de Chihuahua en Paquimé, Villa ahumada, Galeana y Samalayuca , figura 4.17, los resultados de los experimentos de la mineralogía indican que las piezas de cerámica fueron creadas con diferentes materiales y se obtuvieron valores de intensidad de 49 a 59  $\mu$ T para las de tipo Mimbres y de 41 a 49  $\mu$ T para los de tipo Ramos, que utilizando el modelo global (Pavón-Carrasco *et al.*, 2014) y la curva de variación paleosecular regional de Maghoub *et al.*, (2019) se les asigno una edad absoluta de 960 a 1100 d.C. para las de tipo Mimbres , figura 4.18, y de 1300 a 1600 d.C. para las cerámicas de tipo Ramos , figura 4.19, (Alva-Valdivia *et al.*, 2021).



Figura 4.17. Ubicación de las zonas a las que pertenecen las cerámicas analizadas, tomada de Alva-Valdivia *et al.*, 2021.

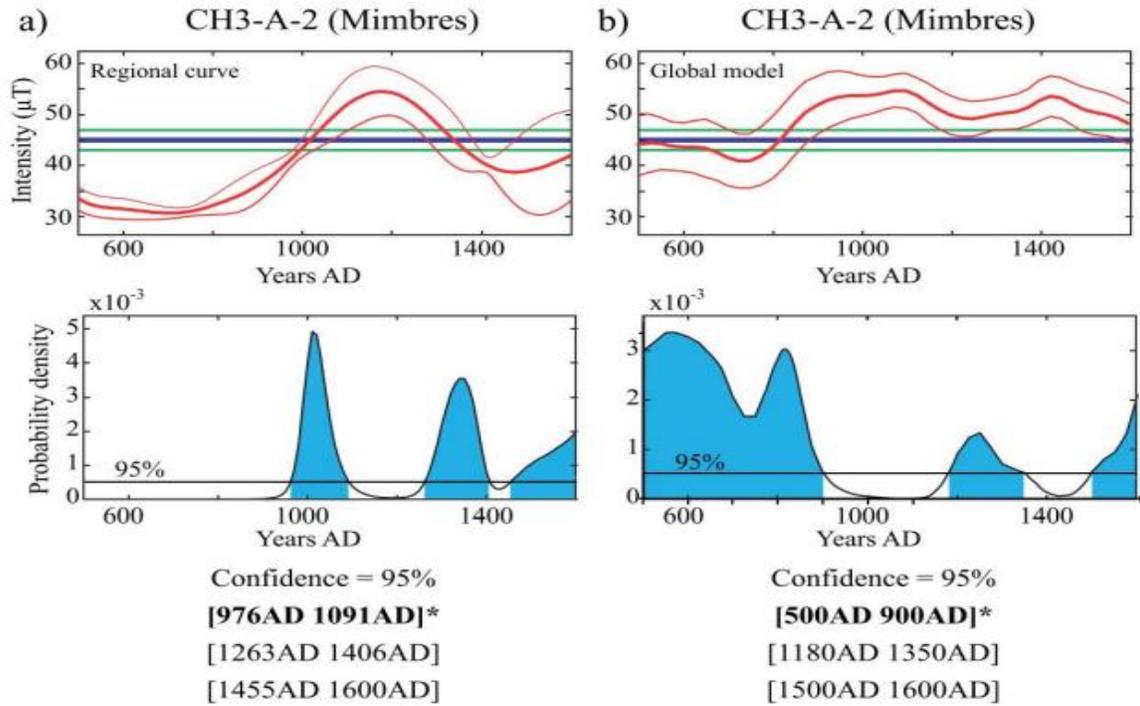


Figura 4.18. Curvas de variación paleosecular de las cerámicas tipo Mimbres, tomada de Alva-Valdivia et al., 2021.

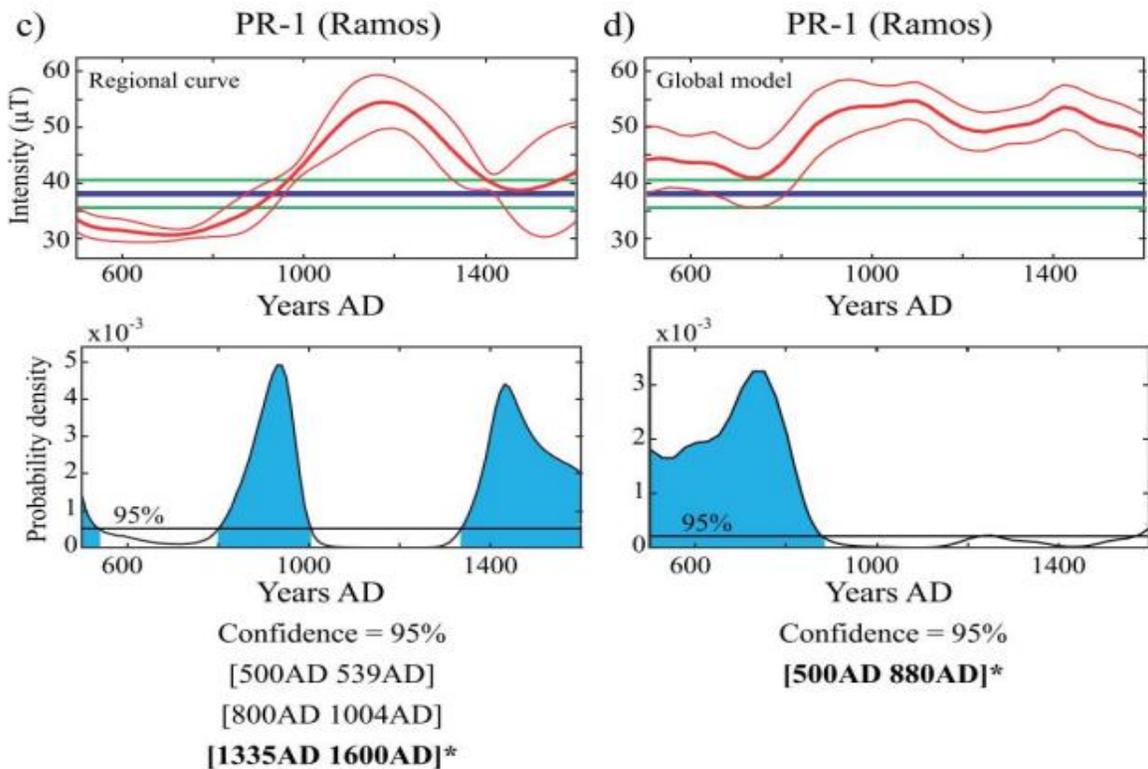


Figura 4.19. Curvas de variación paleosecular de las cerámicas tipo Ramos, Tomada de Alva-Valdivia et al., 2021.

# Capítulo V. Metodología

## 5.1 Sitio de muestreo

La zona arqueológica de Paquimé se encuentra en la parte noroccidental del estado de Chihuahua a 350 km al noroeste de la capital y a 295 km al suroeste de Ciudad Juárez, Chihuahua, pertenece al municipio de Casas Grandes. La situación geográfica de la zona arqueológica es de 107°58' O de longitud y 30°22' N de latitud norte del Meridiano de Greenwich, se encuentra a 1500 msnm y se encuentra dentro de la parte NE de la Sierra Madre Occidental entre los paralelos 28° y 29° (Posada y Reyes, 2020). El sitio de muestreo se localiza en cerca de la entrada al centro ceremonial de Paquimé, en la unidad llamada Casa de los hornos, como se muestra en la figura 5.1 y 5.2.

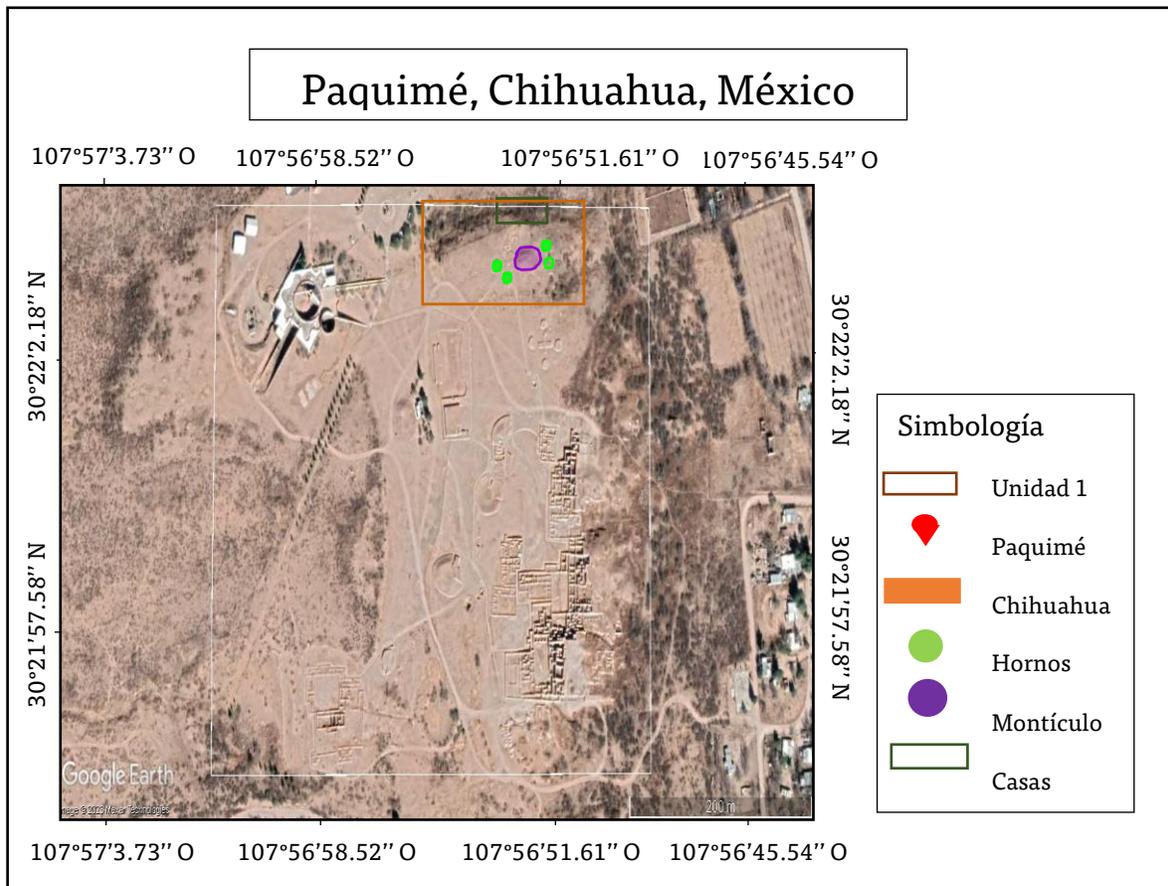


Figura 5.1. Mapa de la ciudad de Paquimé, tomada de Google Earth, 2023.

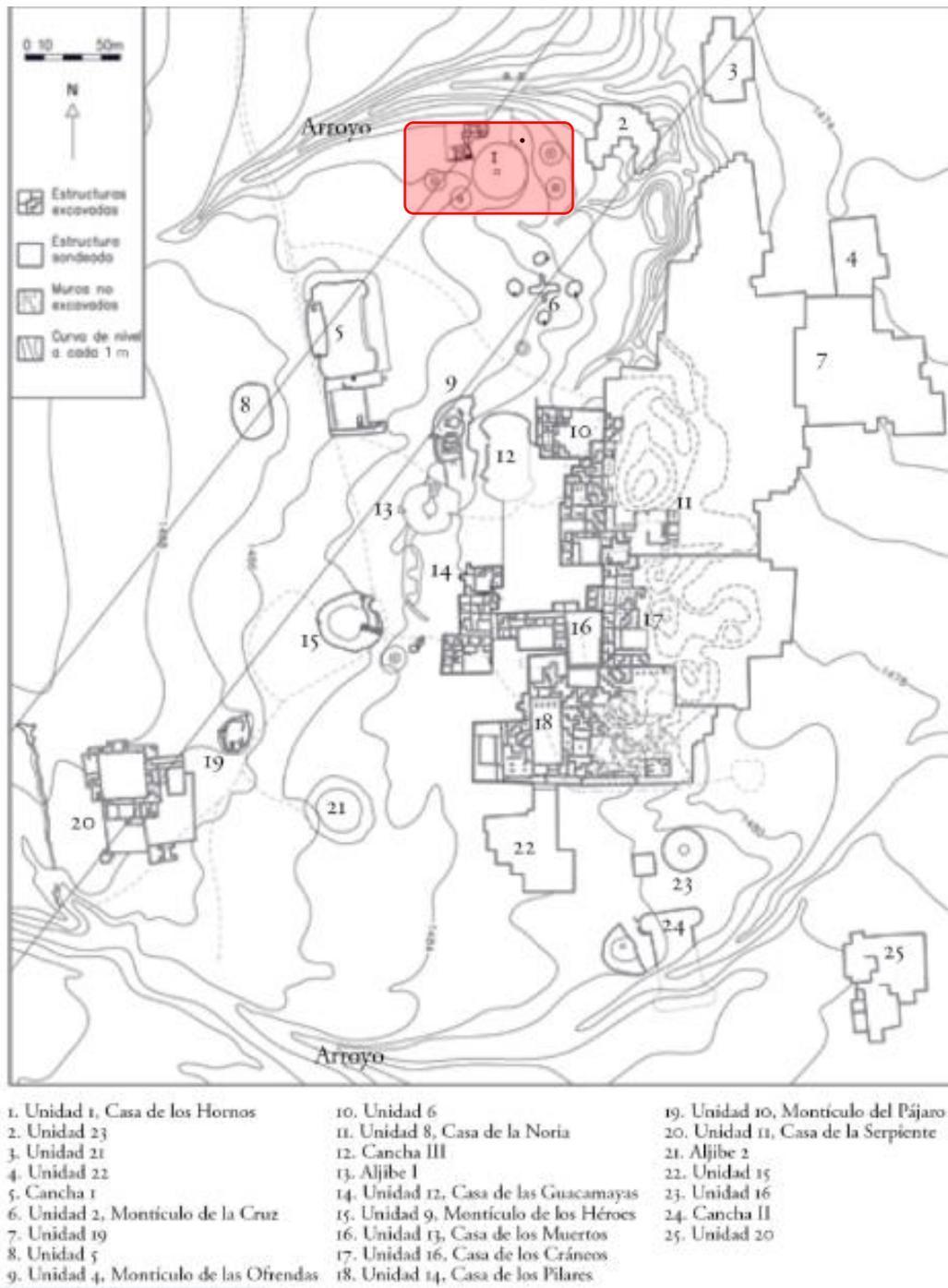


Figura 5.2. Croquis de la zona arqueológica en donde se muestra la zona de muestreo como unidad 1, marcada en rojo, imagen modificada de Parada-Carrillo, 2016.

## 5.2 Colecta de muestras

Se recolectaron 5 grupos de muestras nombradas con los códigos; PH1, PH2, PH3, PH5 y PP45, de 4 hornos ubicados en la unidad Casa de los hornos, en donde se tomaron muestras de mano de bloques de piedra y de piso quemado; en el anexo 1, tabla A1.1 se encuentra la relación fotográfica de las muestras.

Tabla 5.1. Numero de muestras con clave de identificación.

No. De muestra	Clave de grupo	Clave de muestreo
1	PH1	PH1-2
2		PH1-2B
3		PH1-3
4	PH2	PH2-1
5		PH2-2
6		PH2-3
7	PH4	PH4-1
8		PH4-2
9		PH4-3
10	PH5	PH5-1
11		PH5-2
12		PH5-3
13	PP45	PP45-1
14		PP45-2

En las siguientes figuras se muestran las estructuras y sitios en donde se tomaron las muestras.



Figura 5.3. Sitios de muestreo.



Figura 5.4. Sitios de muestreo.



Figura 5.5. Muestreo del grupo PH5.



Figura 5.6. Muestreo del grupo PH4.



*Figura 5.7. Muestreo del grupo PH1 y PH2.*

Como se observa, a cada una de las muestras se les colocó una escayola de yeso en donde se marcó la orientación de la muestra, una vez que todas las muestras fueron tomadas, etiquetadas y orientadas se empaquetaron para su transporte al laboratorio.

### **5.3 Preparación de especímenes**

Al tratarse de muestras de bloques se deben adecuar en tamaño y forma para que tenga las dimensiones necesarias por el portamuestras de los equipos. Primero se deben encapsular las muestras en yeso, como se muestra en la figura 5.8, ya que esto

permitirá tener un mayor control sobre esta y no se tendrán cambios en la orientación.

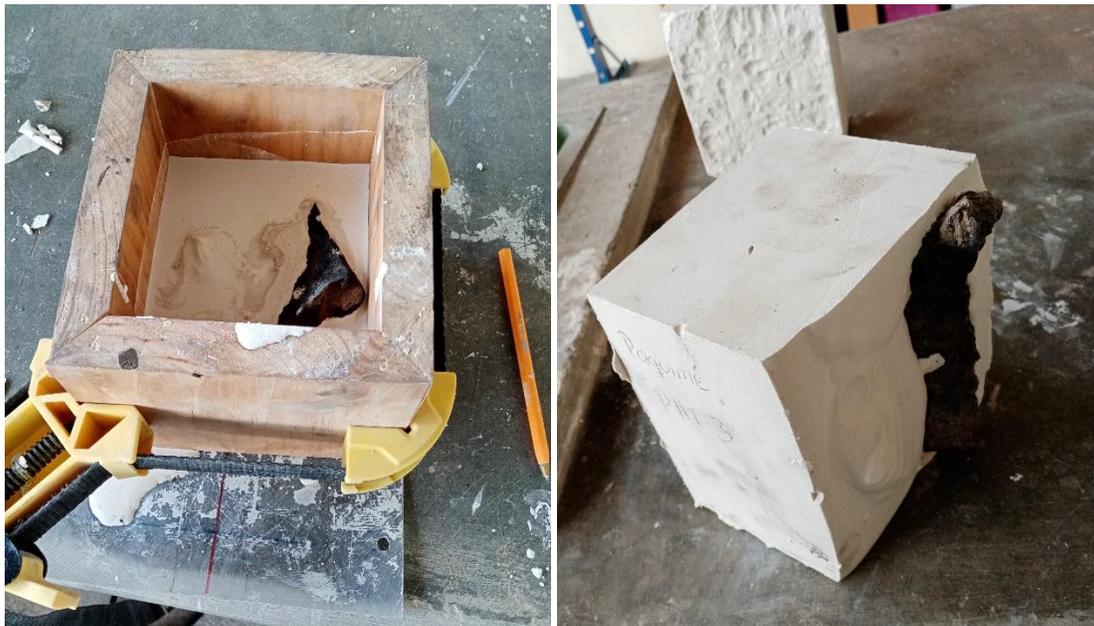


Figura 5.8. Encapsulado de las muestras.

Con la muestra encapsulada se cortaron 20 especímenes de cada una en cubos pequeños conservando la orientación de cada muestra, figura 5.9.

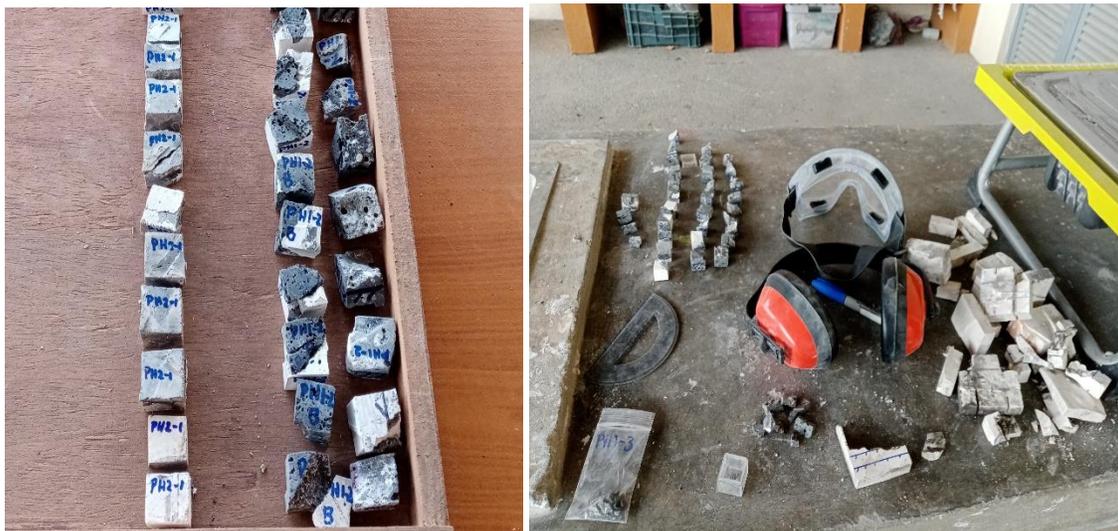


Figura 5.9. Corte de especímenes.

Como último paso se empaquetaron 8 de los especímenes en cubos de acrílico del tamaño de los cubos cortados, figura 5.10; sin embargo, algunos cubos

presentaban lados irregulares por el tipo de material o por el corte, por lo que se rellenaron al colocar los especímenes en los cubos con un poco de algodón para que permanecieran inmóviles y durante los experimentos.



Figura 5.10. Empaquetado de especímenes.

Al contar con un mayor número de especímenes se les asignó una clave de laboratorio a cada uno, tabla 5.2.

Tabla 5.2. Clave de laboratorio para especímenes de las muestras tomadas.

Clave de muestreo	Clave de laboratorio
PH1-2	92P001A – 92P008A
PH1-2B	92P009A – 92P016A
PH1-3	929017A – 92P024A
PH2-1	929025A – 92P032A
PH2-2	929033A – 92P040A
PH2-3	929041A – 92P048A
PH4-1	929049A – 92P056A
PH4-2	929057A – 92P064A
PH4-3	929065A – 92P072A
PH5-1	929073A – 92P080A
PH5-2	929081A – 92P088A
PH5-3	929089A – 92P096A
PP45-1	929097A – 92P104A
PP45-2	929105A – 92P112A

#### 5.4 Medición de la magnetización

Una vez que los especímenes ya están preparados se procede a medir su magnetización remanente natural (NRM) con el magnetómetro de giro JR6, figura 5.11, que cuenta con una sensibilidad de  $10^{-10}$  Am<sup>2</sup> y que mide la oscilación del campo magnético del espécimen con la rotación de esta.



Figura 5.11. Magnetómetro de giro con el espécimen.

Mediante el programa REMA6, el magnetómetro determina el momento magnético ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) del espécimen en coordenadas de la muestra, los datos obtenidos son transformados a las componentes del campo magnético ( $D$ ,  $I$ ,  $M$ ) y del mismo modo se pueden calcular correcciones geográficas y estructurales.

### 5.4.1 Representación de los datos

Los vectores de dirección en Paleomagnetismo son descritos en términos de inclinación ( $I$ ) y declinación ( $D$ ), para proyectar esta información se usan las proyecciones: igual-ángulo; representado como un círculo basado en un cono definido por vectores alrededor de una central, el tamaño del círculo cambia de acuerdo con la inclinación, estereográfica o de Wulff y de igual-área o de Lambert o Schmidt; tiene la propiedad de que el área de un cono de vectores alrededor de un vector central permanecerá constante independientemente de la dirección del vector central, su proyección será en forma de elipse, a menos que el vector central sea vertical (Hernández-Avila, 2010).

### 5.4.2 Desmagnetización por campos alternos

El método consiste en aplicar un campo débil a la muestra, causando que los granos de menor o igual coercitividad a la del campo aplicado se alineen a él; al reducirse el campo la magnetización de estas partículas se deja en posiciones al azar, por lo que sólo quedarán las remanencias de las partículas con coercitividades mayores que la del campo aplicado. Esta técnica es recomendada para el tratamiento de rocas ígneas (Hernández-Avila, 2010), por lo que se aplicó a los especímenes en el orden que muestra la tabla 5.3. con el desmagnetizador LDA5/PAM1 de AGICO, figura 5.12.

Tabla 5.3. Incrementos del campo aplicado a los especímenes.

<b>Campo aplicado</b> <b>[<math>\mu</math>T]</b>	<b>Tiempo</b> <b>[s]</b>
5	19
10	19
15	25
20	25
25	19
30	19
40	19
50	19
60	24
80	24
100	24

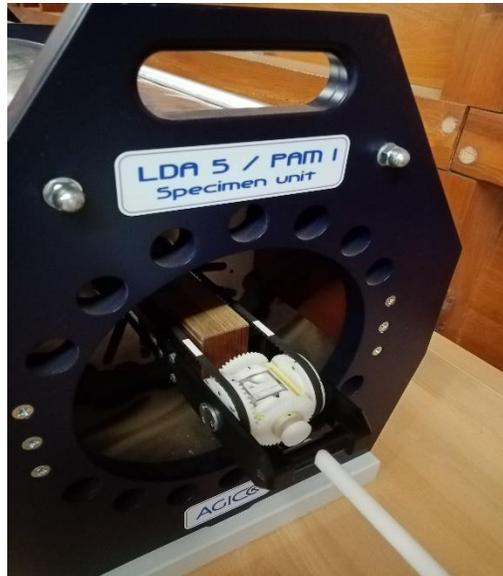


Figura 5.12. Desmagnetización por campos alternos.

### 5.4.3 Obtención de las componentes de magnetización

Para la obtención de los componentes de la magnetización se utilizan los diagramas de Zijdeveld DZ que proyectan en el mismo diagrama la intensidad y los cambios de dirección, donde el punto final del vector de desmagnetización es proyectado como dos puntos en dos planos ortogonales, el plano horizontal y el vertical como su muestra en la figura 5.13 (Hernández-Avila, 2010).

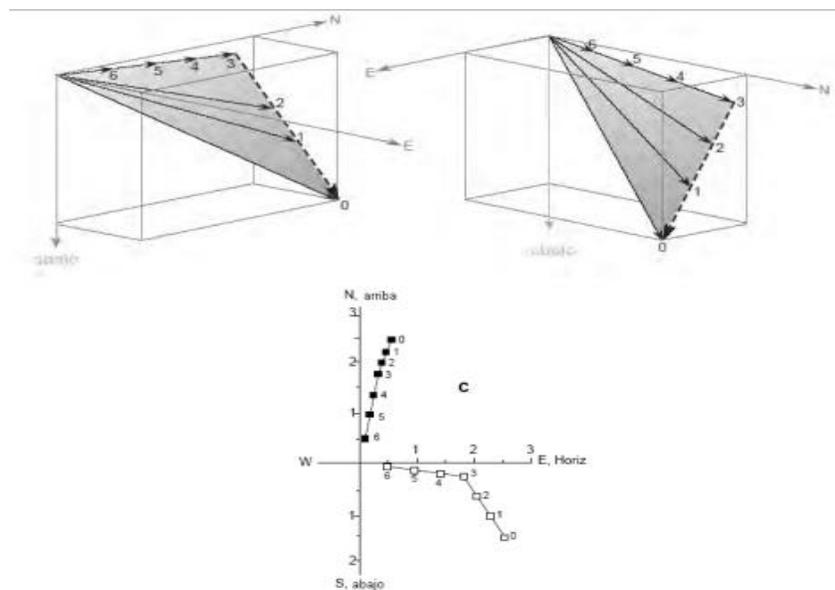


Figura 5.13. Diagrama de Zijdeveld (DZ) para un espécimen con desmagnetización en 6 pasos, tomada de Butler, 1991.

## 5.5 Análisis de resultados

Dada la cantidad de datos obtenidos por cada espécimen es necesario recurrir a técnicas estadísticas para el análisis de los datos, por lo que la estadística necesaria para determinar las direcciones medias en los vectores de magnetización como en los polos paleomagnéticos es de tipo bidimensional, la más apropiada es la estadística de Fisher que se basa en suponer a los vectores de magnetización distribuidos en la superficie de una esfera de acuerdo con una distribución normal. De acuerdo con Fisher (1953) las direcciones de los vectores de NRM de varios especímenes como puntos en la superficie de una esfera unitaria, con cada una de las direcciones con peso unitario, de manera que es posible la construcción de la función de densidad de probabilidad Fisher  $P_{dA}(\theta)$  análoga a la función de densidad de probabilidad Gaussiana de una distribución normal, pero para una distribución sobre la superficie de una esfera, la cual proporciona la probabilidad por unidad de área angular  $dA$  de encontrar una dirección dentro de dicha área, centrada en un ángulo  $\theta$  con un ancho de banda  $\theta + d\theta$  de la medida verdadera (Butler, 1991).

$$(5.1) \quad P_{dA}(\theta|k) = \int_{\theta}^{\theta+d\theta} P_{dA}(\theta'|k) d\theta'$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de la dirección verdadera y  $\kappa$  es el parámetro de precisión; que es una medida de la concentración de la distribución alrededor del valor medio, creciendo a mayor concentración. Por tanto, la función de probabilidad que le corresponde es:

$$(5.2) \quad P_{dA}(\theta|k) = \frac{k}{2 \sinh k} \sin \theta^{(k \cos \theta)}$$

Si se considera la dispersión de direcciones en la superficie de una esfera unitaria, la probabilidad de que un dato es particular caiga en un área diferencial de  $dA = \sin \theta' d\theta' d\phi$  la ecuación 5.1 adquiere la forma.

$$(5.3) \quad P_{dA}(\theta|k) = \int_{\theta}^{\theta+d\theta} P_{dA}(A'|k) \sin \theta \, d\theta' \, d\phi'$$

Si  $\phi$  es un ángulo azimutal simétricamente distribuido alrededor de la dirección media, la ecuación 5.2 se reescribe como:

$$(5.4) \quad P_{dA}(\theta|k) = \frac{k}{4\pi \sin hk} (k \cos \theta)$$

Es así como conociendo la función de densidad de Fisher podemos analizar el comportamiento de las observaciones, entonces la dirección media puede calcularse a partir de computar las direcciones de N vectores unitarios, determinando primero los cosenos directores de cada uno de ellos de la siguiente forma.

$$(5.5) \quad \begin{aligned} l_i &= \cos I_i \cos D_i \\ m_i &= \cos I_i \sin D_i \\ n_i &= \sin I_i \end{aligned}$$

Donde  $D_i$  es la declinación del i-esimo vector,  $I_i$  es la inclinación del i-esimo y  $l_i, m_i, n_i$  son los cósenos directores del i-esimo vector, y la resultante de la suma de cada uno de estos N vectores unitarios está dada por R como se detalla en la figura 5.14.



Figura 5.14. Resultante R de la suma de N vectores unitarios (Butler, 1992).

R está dado por la siguiente expresión:

$$(5.6) \quad R = \sqrt{(\sum_{i=1}^N l_i)^2 + (\sum_{i=1}^N m_i)^2 + (\sum_{i=1}^N n_i)^2}$$

De esta forma es posible obtener la declinación media  $D_m$  y la inclinación media  $I_m$  dadas por:

$$(5.7) \quad D_m = \tan^{-1} \left[ \frac{(\sum_{i=1}^N m_i)}{(\sum_{i=1}^N l_i)} \right] \quad \text{y} \quad I_m = \sin \left[ \frac{(\sum_{i=1}^N n_i)}{R} \right]$$

Es así como a partir de esta dirección media existen criterios de confiabilidad, cabe recalcar que en la estadística de Fisher el límite de confianza esta expresado como un ángulo radial a partir de la dirección media y el nivel de probabilidad indicado por el límite de confianza está completamente definido. Una aproximación del límite de confiabilidad está dada por el ángulo  $\alpha_{95}$

$$(5.8) \quad \alpha_{95} \approx \frac{140^\circ}{\sqrt{kN}}$$

Donde  $k$  es la mejor aproximación del parámetro de precisión  $\kappa$  de la función de densidad de probabilidad Fisher por  $k = (N - 1)(N - R)$  y  $\alpha_{95}$  es el ángulo que estima 2 veces el error estándar de la dirección media (Butler, 1991).

## Capítulo VI. Resultados y discusión

### 6.1 Propiedades magnéticas de rocas

Con el fin de determinar la naturaleza y estabilidad térmica de los minerales magnéticos presentes en las muestras estudiadas se llevaron a cabo experimentos de susceptibilidad magnética en función de la temperatura (curvas termomagnéticas continuas K-T). Para estos experimentos se utilizaron muestras provenientes de especímenes individuales de cada bloque de los hornos, 14 en total, las cuales fue pulverizadas en un mortero de ágata y un tamiz de malla no magnética no. 30 (0.595 mm) hasta obtener un gramo de polvo de cada una (figura 6.1 A). Para la medición de la susceptibilidad magnética se utilizó un susceptibilímetro AGICO Kappa Bridge modelo MFK1 calentando, a un ritmo de 15°C/min, la muestra de polvo desde la temperatura ambiente hasta alcanzar los 650°C; una vez alcanzada esta temperatura las muestras fueron enfriadas al mismo ritmo. Todo el experimento fue realizado en presencia de gas argón para reducir la posible oxidación durante el calentamiento (Figura 6.1 B). 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 (Prévoit *et al.*, 1983)



Figura 6.1. Detalle del susceptibilímetro utilizado para medir las muestras. A) Muestra pulverizada y B) susceptibilímetro AGICO MFK1.

El comportamiento observado en las curvas termomagnéticas se puede describir en tres tipos: A) en seis de las muestras se observa un comportamiento estable durante el calentamiento como en el enfriamiento, sin evidencia de alteraciones fisicoquímicas significativas por lo cual se considera reversible. Se observa también que la caída de la susceptibilidad magnética sucede entre temperaturas los 560° a 580° C lo cual indica con la presencia de magnetita casi pura o titanomagnetitas con bajo contenido en titanio como el mineral responsable de la magnetización presente de estas muestras, Figura 6.2, muestras PH1-2 y PH2-3. B) En otro grupo de cuatro muestras, las curvas termomagnéticas mostraron la existencia de dos fases ferromagnéticas durante el calentamiento con temperaturas de Curie cercanas a los 380° C para la primera y 560° C para la segunda. Durante el enfriamiento se conservan ambas fases, aunque se aprecia un ligero aumento en la susceptibilidad magnética lo cual sugiera la coexistencia de titanomagnetitas con alto y bajo en contenido titanio, Figura 6.2, muestra PH2-1. C) Para el resto de las muestras, las curvas muestran una única fase ferromagnética durante el calentamiento con temperaturas de Curie cercanas a los 580° C mientras que durante el enfriamiento hay un aumento significativo de las susceptibilidad y dos fases ferromagnéticas, la primera con temperaturas de Curie entre los 560° y 580° C y la segunda entre los 360° y 380°C, esto puede indicar la formación de titanomaghemita durante el calentamiento, Figura 6.2, muestra PP45-2.

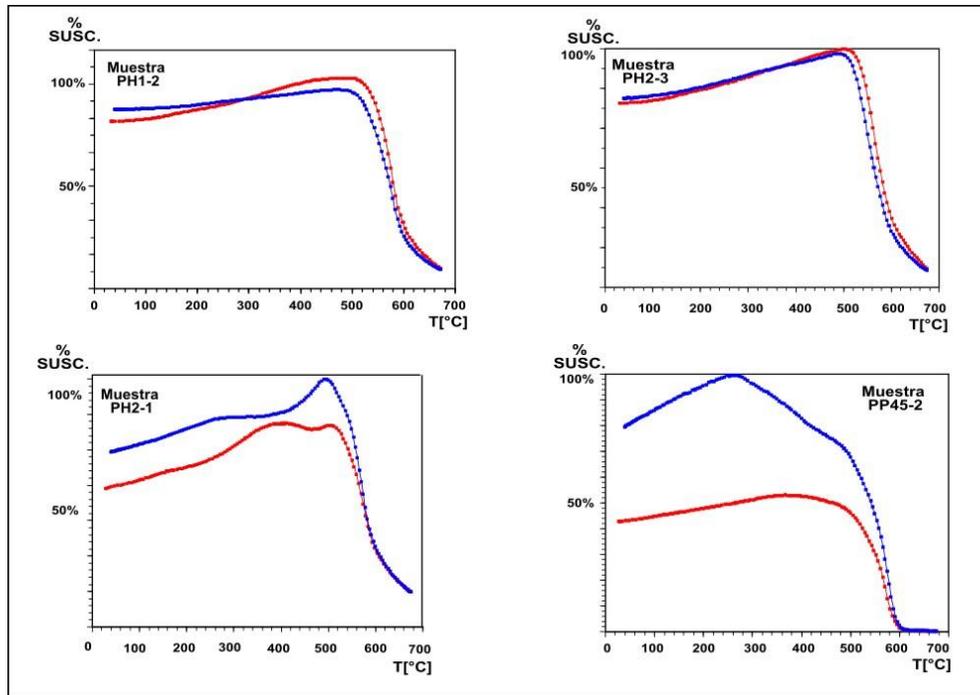


Figura 6.2. Curvas termomagnéticas (K-T) representativas. Las curvas un color rojo muestran el comportamiento de la susceptibilidad magnética durante el calentamiento y las de color azul durante el enfriamiento, la susceptibilidad indica porcentaje respecto de su valor inicial en unidades arbitrarias.

## 6.2 Direcciones arqueomagnéticas

Después de haber realizado la preparación de las muestras en especímenes cúbicos de 2 cm de lado, 112 en total, previo a los tratamientos magnéticos les fue medido el valor de la magnetización natural remanente (NRM) con ayuda de un magnetómetro AGICO JR6. Posteriormente y con el objetivo de identificar las componentes direccionales de la remanencia magnética presente en las muestras, se realizaron los experimentos de desmagnetización progresiva mediante la aplicación de campos magnéticos alternos para lo cual se utilizó un desmagnetizador AGICO LDA5 localizado en las instalaciones del el Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA) de la UNAM. Se aplicaron a cada espécimen (ocho por muestra) campos magnéticos alternos con intensidades máximas desde 5 mT hasta 100 mT con incrementos graduales de 5 mT; después de cada etapa de desmagnetización fue medida la remanencia magnética de cada muestra con ayuda del magnetómetro (Figura 6.3).

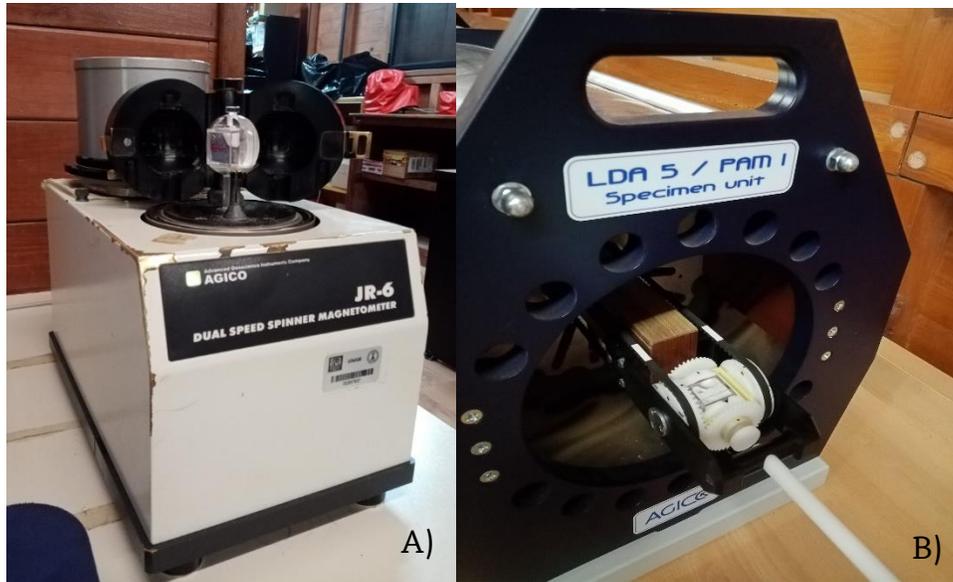


Figura 6.3. Equipo utilizado para los tratamientos magnéticos. A) Magnetómetro de giro AGICO JR6 y B) Desmagnetizador por campos alternos AGICO LDA5.

Las componentes de la remanencia magnética promedio de cada espécimen fueron determinadas mediante el método de análisis de componentes principales (PCA) propuesto por Kirschvink (1980). En general se emplearon entre 6 y 10 determinaciones direccionales individuales de desmagnetización para obtener los valores promedio, excepto en algunos especímenes provenientes de dos muestras en donde excepcionalmente se utilizaron cuatro determinaciones para el cálculo del promedio. Fue posible identificar las componentes direccionales en el 97% de las muestras estudiadas (109 de 112) con valores del campo destructivo medio (MDF) entre los 15 mT a 60 mT lo cual indica que las componentes de magnetización identificadas son de origen primario de naturaleza termorremanente.

En la mayoría de las muestras (85%), se observó una componente de magnetización inicial poco significativa probablemente de origen viscoso la cual siempre fue posible remover en la primera etapa de desmagnetización al aplicar campos alternos de 5mT, una vez removida esta componente, se aprecia una sola componente estable con un comportamiento unidireccional hacia el origen de coordenadas en los diagramas de desmagnetización ortogonales de Zijdeveld (1967), Figura 6.4, especímenes 92P014A y 92P023A. En el resto de los casos (12%), se observó una única componente de magnetización con un comportamiento lineal hacia el origen de coordenadas en los diagramas ortogonales, Figura 6.4, especímenes 92P040A y 92P052A.

Se presentaron algunos casos en donde no fue posible desmagnetizar por completo a las muestras aplicando campos de hasta 80 mT, (permaneciendo más del 20% de la magnetización original NRM, a pesar de esto, fue posible aislar las componentes direccionales características ya que igualmente mostraron un comportamiento lineal hacia el origen de coordenadas (Figura 6.4, especímenes 92P092A y 92P100A).

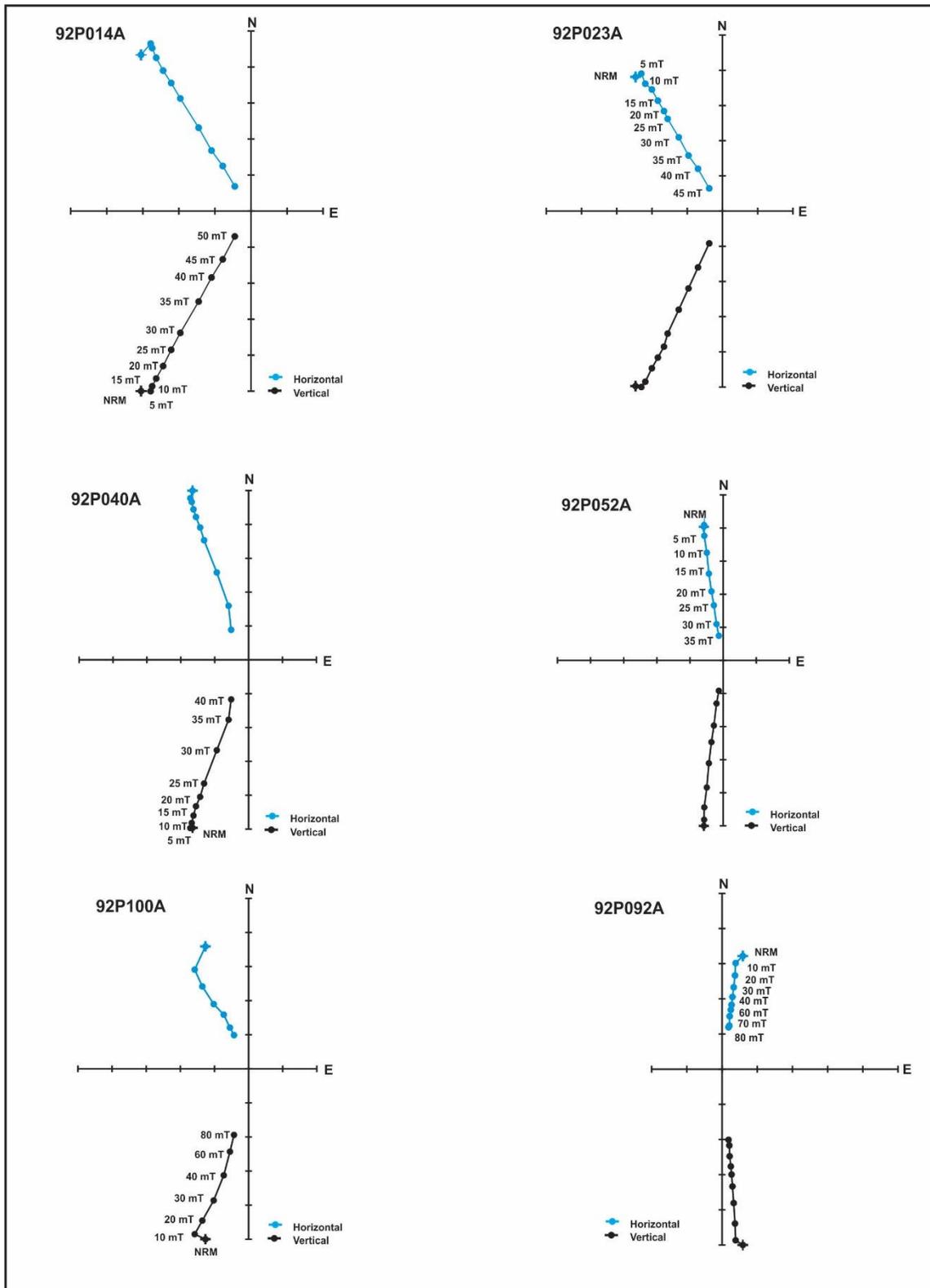


Figura 6.4. Diagramas ortogonales de desmagnetización representativos.

Para estimar las direcciones paleomagnéticas promedio de cada muestra se utilizó la estadística de Fisher (1953). En todos los casos fue posible determinar el promedio, en trece de ellos se utilizaron entre 7 y 8 determinaciones individuales para el cálculo y en un único caso (PP45-1) se utilizaron 4 determinaciones. En términos generales se observa un buen agrupamiento a nivel muestra, con valores de  $\alpha_{95}$  menores a  $10^\circ$ , excepto el loque PP45-1 donde la dispersión es de  $13.3^\circ$ . De igual forma los parámetros de dispersión K y R de la estadística de Fisher confirman esta misma situación lo cual indica el la remanecía magnética registrada en cada una de las muestras permaneció sin alteraciones significativas desde el momento en que fueron magnetizadas por última vez, los resultados se presentan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Direcciones promedio a nivel muestra del sitio Paquimé. Dec. es el valor de la declinación e Inc. se trata de la inclinación magnética, n es el número de especímenes individuales utilizados para el cálculo del promedio; R, k y  $\alpha_{95}$  son los parámetros de dispersión de la estadística de Fisher (1956).

<b>Horno</b>	<b>Muestra</b>	<b>Dec. [°]</b>	<b>Inc. [°]</b>	<b>n</b>	<b>R</b>	<b>k</b>	<b><math>\alpha_{95}</math> [°]</b>
<b>PH1</b>	PH1-2A	61.4	16.8	7	6.80	38.3	9.9
	PH1-2B	325.1	45.2	8	8.00	516.6	2.4
	PH1-3	337.2	49.9	8	8.00	550.1	2.4
<b>PH2</b>	PH2-1	0.5	-5.2	6	6.00	175.5	5.1
	PH2-2	343.4	43.3	8	7.90	115.3	5.2
	PH2-3	353.4	32.6	8	7.98	397.5	2.8
<b>PH4</b>	PH4-1	356.1	47.9	8	8.00	678.3	2.1
	PH4-2	351.5	57.1	8	8.00	1169.0	1.6
	PH4-3	345.8	55.2	8	8.00	349.2	3.0
<b>PH5</b>	PH5-1	349.9	60.3	7	6.90	115.6	5.6
	PH5-2	8.0	55.9	8	8.00	361.4	2.9
	PH5-3	9.1	59.7	8	8.00	312.1	3.1
<b>PP45</b>	PP45-1	354.2	25.4	4	3.94	49.0	13.3
	PP45-2	343.5	59.3	6	5.90	59.6	8.7

Por último, se calcularon los promedios de Fisher para cada horno según se describió en los detalles de muestreo. En el caso del horno PH1 se descartaron las determinaciones individuales provenientes de la muestra PH1-2A ya que, a pesar de

que se agruparon relativamente bien (Dec. = 61.4°, Inc. = 16.8°,  $\alpha_{95}$  = 9.9°, n = 7), las direcciones promedio son incoherentes y no corresponden con los valores direccionales esperados para la época y el área de estudio, esto puede deberse posiblemente a que las muestras fueron movidas después del calentamiento, este parece ser el mismo caso para el horno PH2 donde igualmente se descartaron los datos provenientes de la muestra PH2-1 (Dec. = 0.5°, Inc. = -5.2°,  $\alpha_{95}$  = 5.1°, n = 6) para el cálculo del promedio. Aunque se obtuvo un promedio para el horno PP45, este sitio fue descartado para la datación arqueomagnética ya que debido a su alta dispersión ( $\alpha_{95}$  = 11.9), los resultados resultarían ambiguos y poco confiables. Los promedios y sus parámetros de dispersión se muestran en la Tabla 6.2 y en la Figura 6.5.

Tabla 6.2. Direcciones promedio a nivel horno del sitio Paquimé. Dec. e Inc. Son los valores de la declinación e inclinación magnética respectivamente, N es el número de especímenes individuales utilizados para el cálculo del promedio; R, k y  $\alpha_{95}$  son los parámetros de dispersión de la estadística de Fisher (1953).

<b>Horno</b>	<b>Dec.</b> <b>[°]</b>	<b>Inc.</b> <b>[°]</b>	<b>N</b>	<b>R</b>	<b>k</b>	<b><math>\alpha_{95}</math> [°]</b>
<b>PH1</b>	338.7	46.0	16	15.96	370	1.9
<b>PH2</b>	348.8	38.1	16	15.82	81	4.2
<b>PH4</b>	351.4	53.5	24	23.88	196	2.1
<b>PH5</b>	356.6	55.0	23	22.87	170	2.3
<b>PP45</b>	346.6	45.7	9	8.57	21	11.9

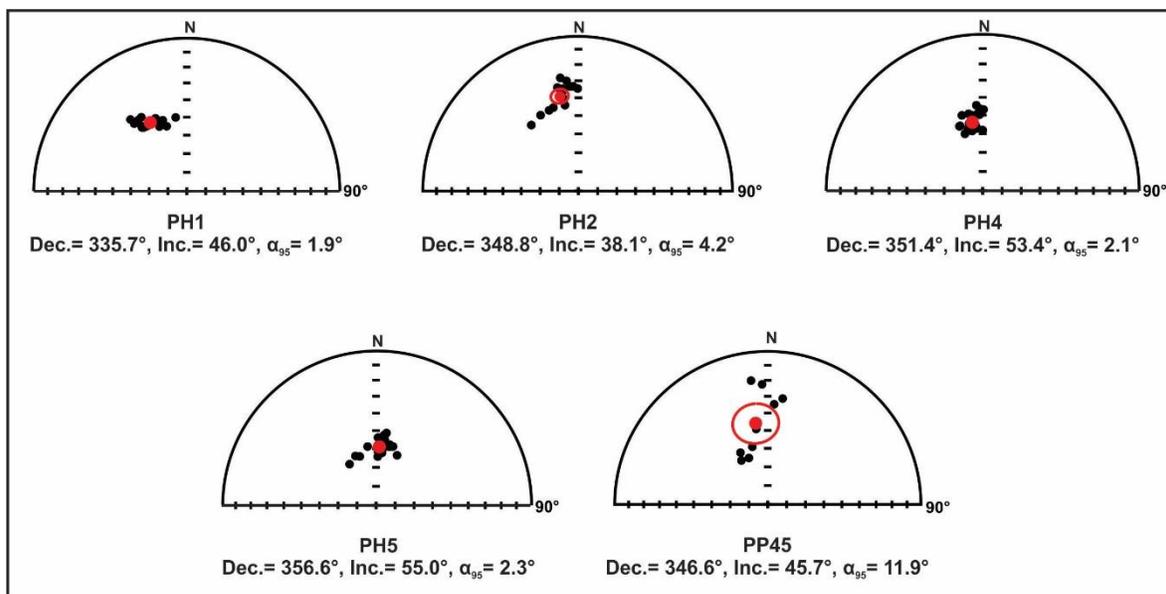


Figura 6.5. Diagramas de igual área con las direcciones arqueomagnéticas obtenidas para cada horno, en color rojo se muestra el promedio de Fisher (para más detalles consultar la tabla 6.2).

### 6.3 Dataciones Arqueomagnéticas

Para obtener las edades de los hornos estudiados, las direcciones arqueomagnéticas obtenidas se compararon con los modelos globales de variación paleosecular del campo geomagnético de SHA.DIF.14K de Pavón-Carrasco *et al.*, (2014) el cual comprende los últimos 14 mil años y con el modelo SHAWQ.2K propuesto recientemente por Campuzano *et al.*, 2019 y que abarca los últimos dos mil años. Se utilizaron también las curvas de variación locales de Mahgoub *et al.*, (2019), la curva del Suroeste de los Estados Unidos (SW) publicada por Jones *et al.*, (2021) y la curva de García-Ruiz *et al.*, (2022). Las dataciones arqueomagnéticas se realizaron con la herramienta de datación basada en MATLAB desarrollada por Pavón-Carrasco *et al.*, (2011). El resultado de las dataciones se resume en la Tabla 6.3 y los intervalos de datación en las Figuras 6.5 a 6.9.

Tabla 6.3. Intervalos de edades arqueomagnéticas de cada horno obtenidas según los modelos geomagnéticos globales y curvas de variación paleosecular locales.

<b>Horno</b>	<b>Intervalo de edad arqueomagnética [d.C.]</b>				
	<b>SW (E.U.)</b>	<b>SHA.DIF.14K</b>	<b>SHAWQ.2K</b>	<b>Mahgoub et al., (2019)</b>	<b>García-Ruiz et al., (2022)</b>
<b>PH1</b>	552-574	1034-1124	1065-1248	1096-1157	966-1052
<b>PH2</b>	552-565	858-967	705-856	882-1009 1329-1416	845-979
<b>PH4</b>	990-1076 1190-1343	1103-1137	995-1362	1304-1370	1426-1510
<b>PH5</b>	1280-1611	1260-1388	1205-1496	602-634	1453-1527

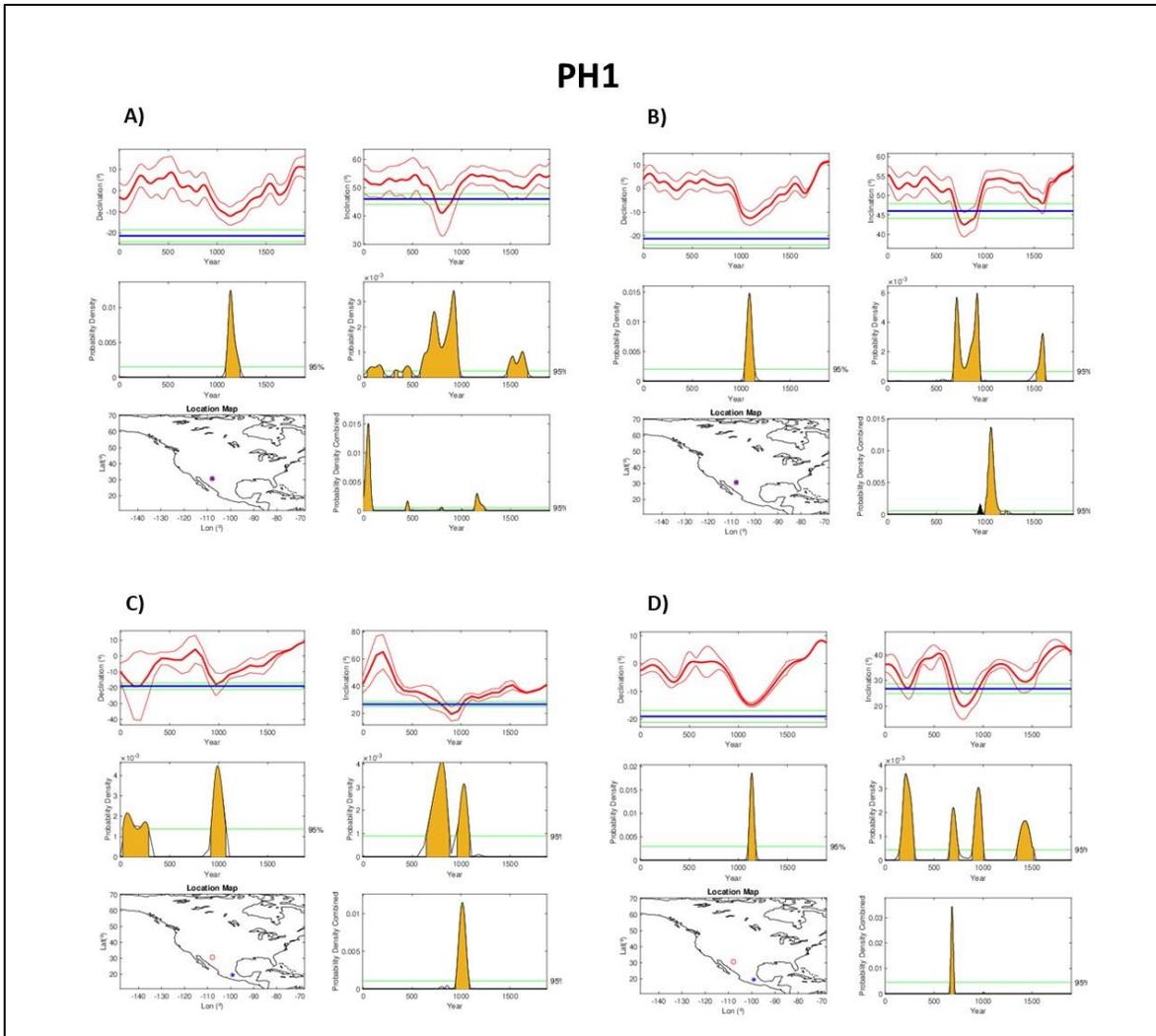


Figura 6.5. Determinación de las edades arqueométricas para el horno **PH1** realizadas con la aplicación de Matlab desarrollada por Pavón-Carrasco et al., (2014) a partir de: A) el modelo global SHAWQ.2k de Campuzano et al., (2019); B) el modelo global de variación de campo magnético SHADIF.14K de Pavón Carrasco et al., (2014); 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).

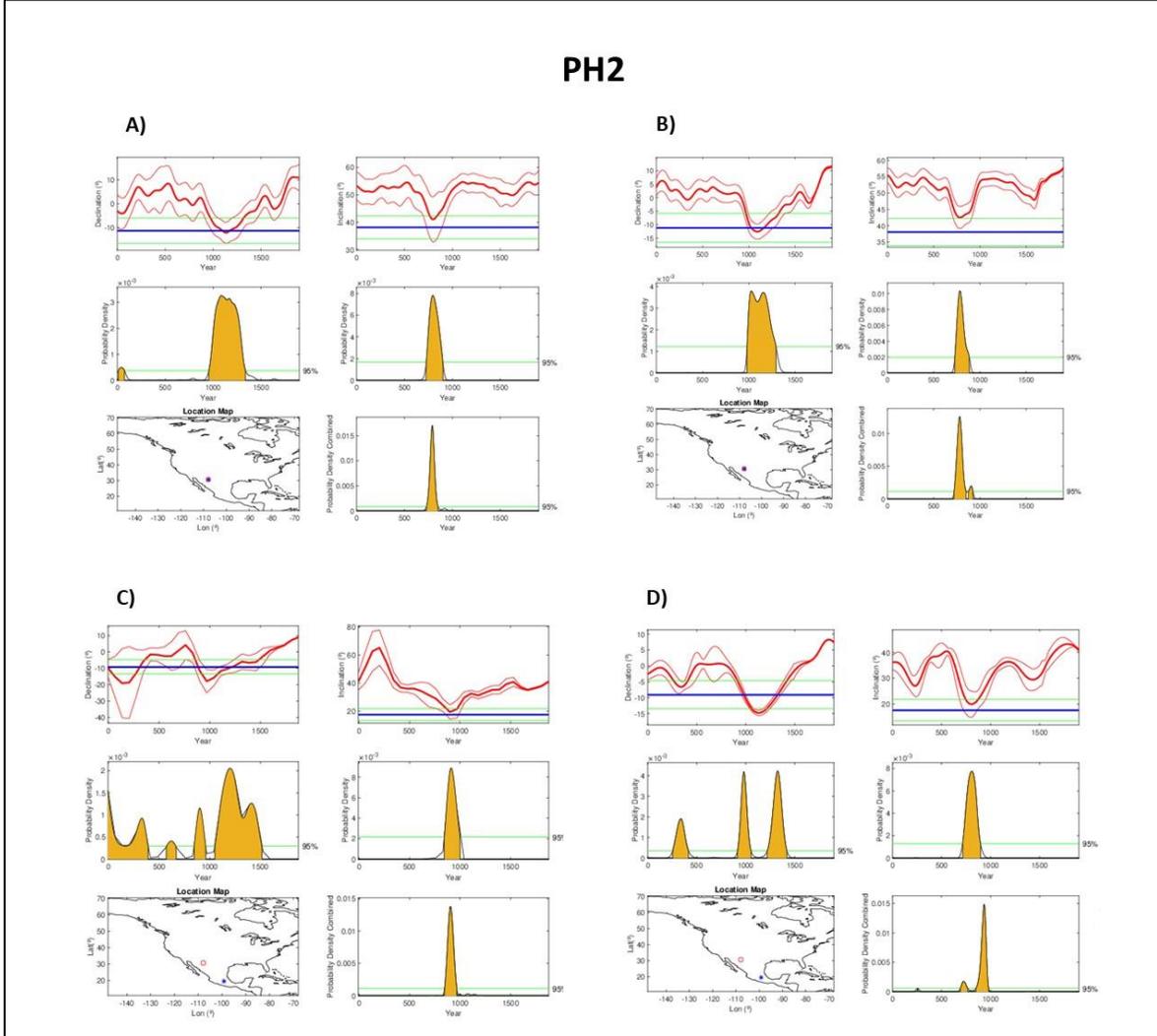


Figura 6.6. Determinación de las edades arqueométricas para el horno **PH2** realizadas con la aplicación de Matlab desarrollada por Pavón-Carrasco et al., (2014) a partir de: A) el modelo global SHAWQ.2k de Campuzano et al., (2019); B) el modelo global de variación de campo magnético SHADIF.14K de Pavón Carrasco et al., (2014); 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).

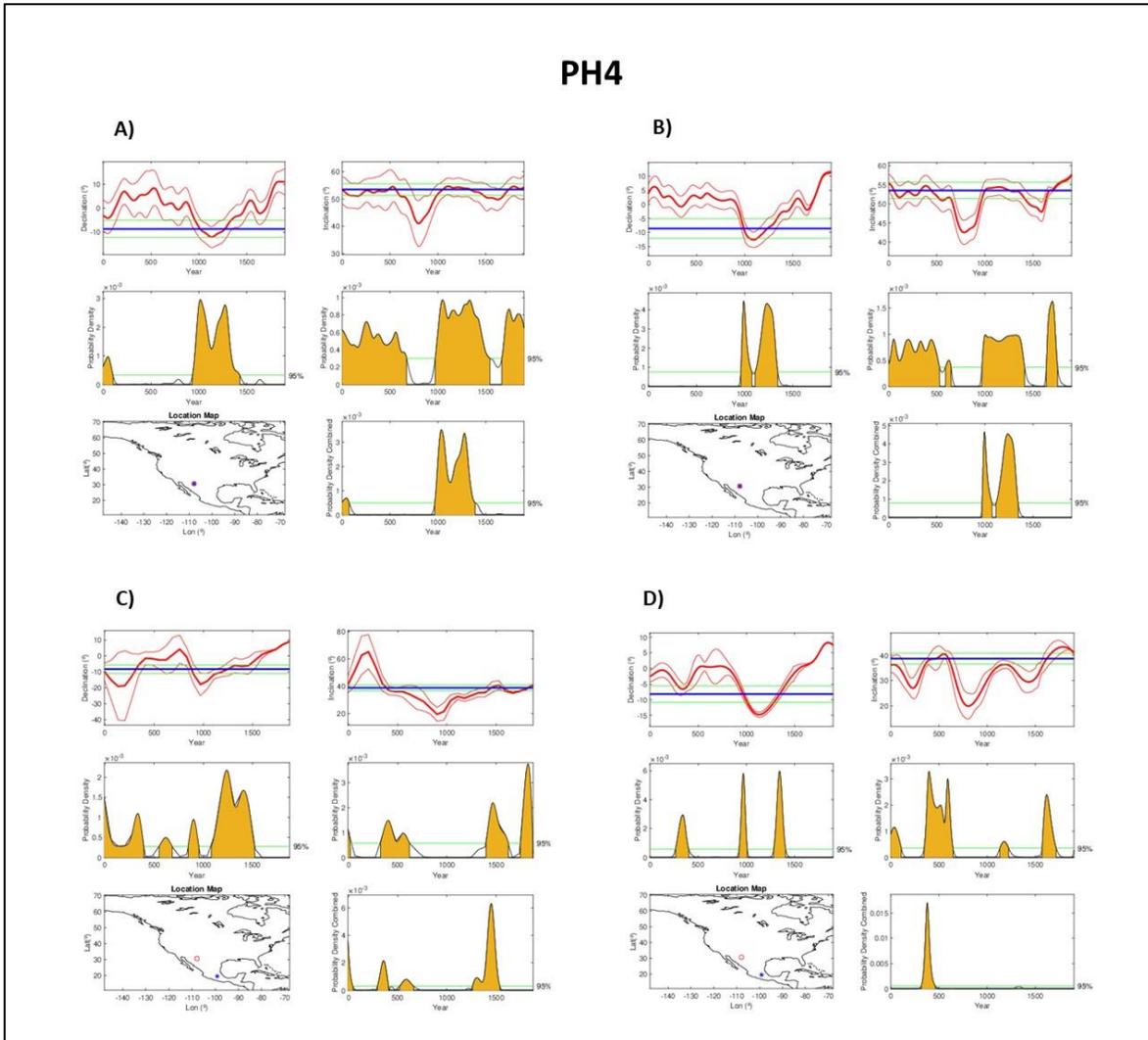


Figura 6.7. Determinación de las edades arqueométricas para el horno **PH4** realizadas con la aplicación de Matlab desarrollada por Pavón-Carrasco et al., (2014) a partir de: A) el modelo global SHAWQ.2k de Campuzano et al., (2019); B) el modelo global de variación de campo magnético SHADIF.14K de Pavón Carrasco et al., (2014); 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).

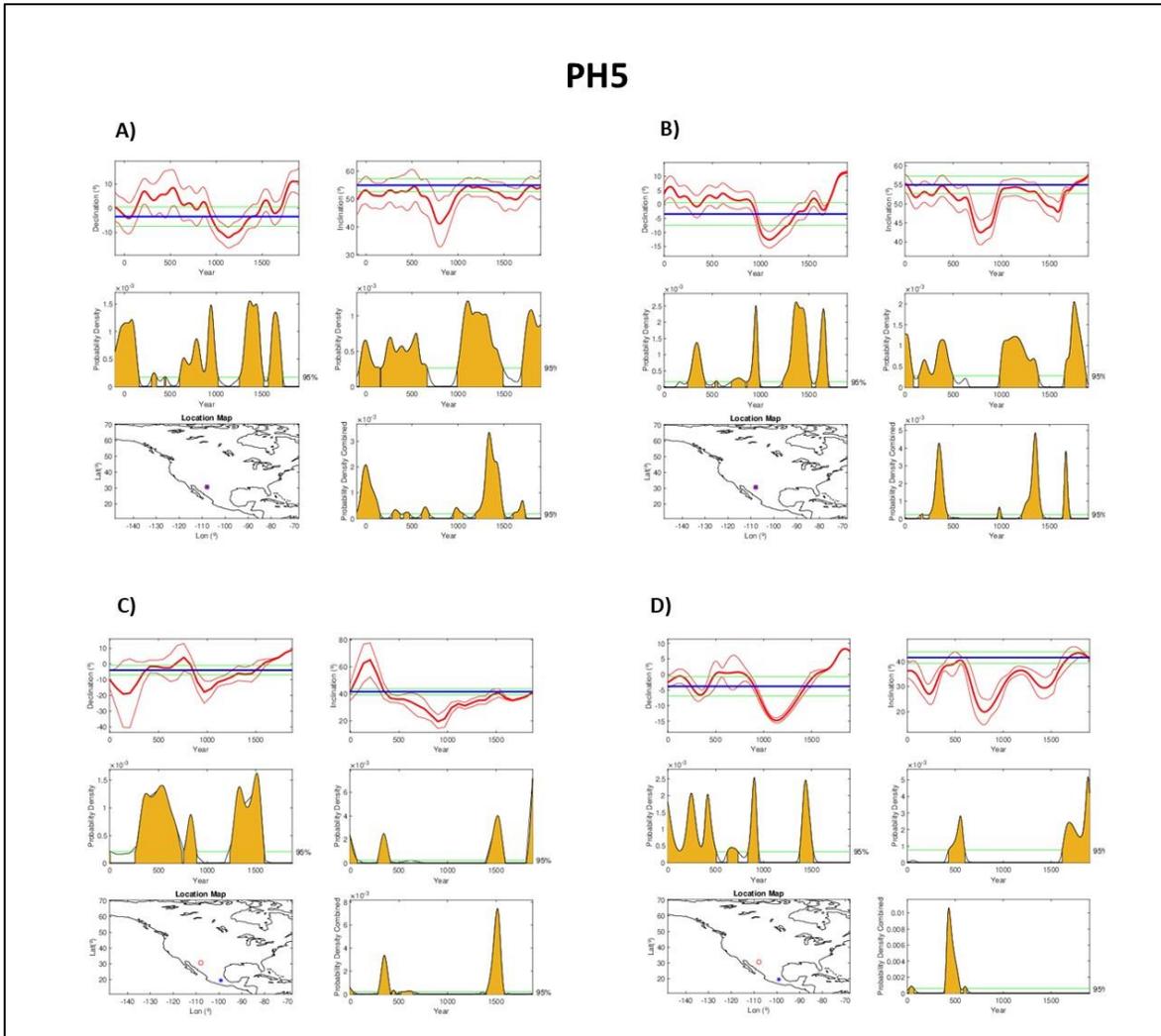


Figura 6.8. Determinación de las edades arqueométricas para el horno **PH5** realizadas con la aplicación de Matlab desarrollada por Pavón-Carrasco et al., (2014) a partir de: A) el modelo global SHAWQ.2k de Campuzano et al., (2019); B) el modelo global de variación de campo magnético SHADIF.14K de Pavón Carrasco et al., (2014); 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).

## 6.4 Determinación de las edades más probables

Para obtener el intervalo de edad más representativo de cada uno de los hornos se utilizó el método de remuestreo *Bootstrap* descrito por Efron (1979) el cual determina el valor más probable de una distribución discreta de edades obtenidas a partir de observaciones teóricas de la declinación e inclinación magnética calculadas mediante el modelo geomagnético global y dos de las curvas de variación secular locales (García-Ruiz *et al.*, 2022 y Mahgoub *et al.*, 2019). Este método ha demostrado su utilidad para establecer la edad más probable dentro de un conjunto de edades en un contexto arqueológico (García-Pimentel *et al.*, 2022) con características similares a Paquimé. Una vez determinadas estos valores se obtiene mediante una distribución de probabilidad cuál es el valor esperado más probable a un nivel del 95% así como su intervalo de confianza, Figura 6.10. Para fines de la cronología Arqueológica, el intervalo de edad aceptado aquí como el más probable para el momento del último calentamiento de los hornos es el que está dentro este intervalo. en la figura 6.11 se muestra un resumen de las edades obtenidas.

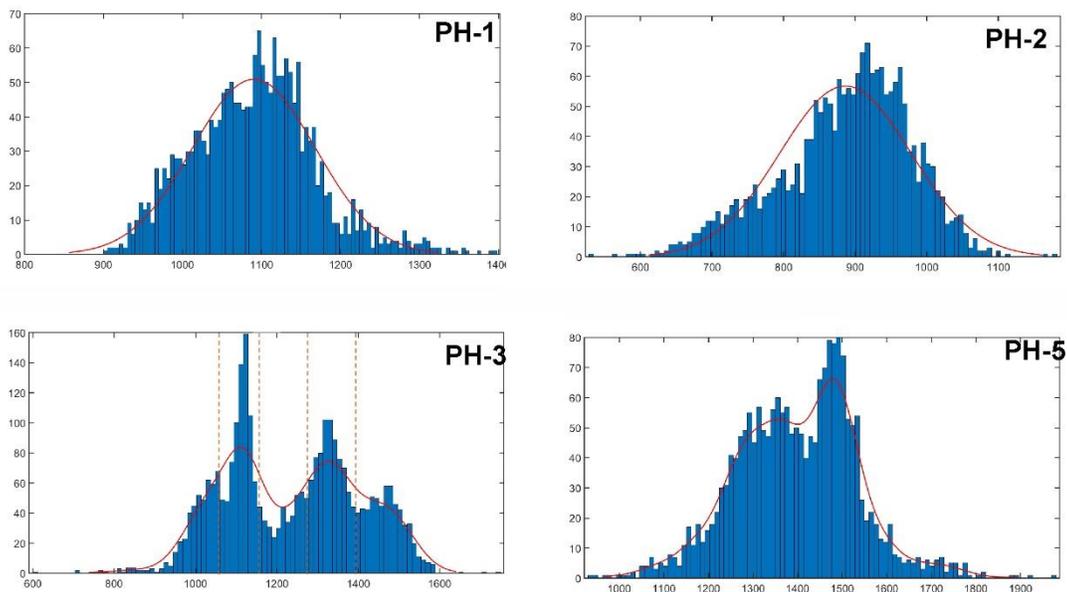


Figura 6.10. Histogramas de los intervalos de edad más probable para los hornos estudiados obtenidos mediante el método de remuestreo *Bootstrap*, la línea roja indica la

edad promedio de la muestra arqueológica mientras que las líneas a azules indican el intervalo del 95% de confianza.

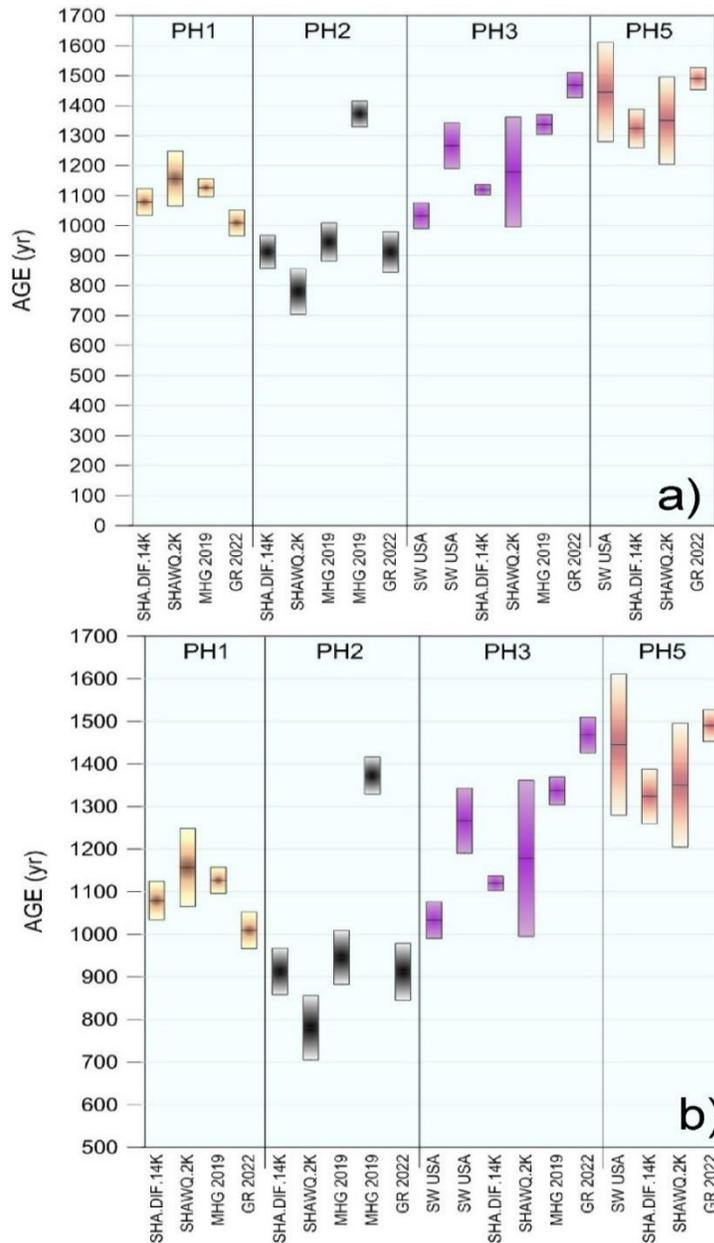


Figura 6.10. Intervalos de edad obtenidos utilizando los modelos geomagnéticos globales, curvas locales de variación paleosecular para Mesoamérica y una curva local para el SO de Estados Unidos. El eje horizontal muestra el sitio/modelo o curva utilizados: SHA.DIF.14K, SHAWQ.2K, Mahgoub et al. (2019), García-Ruíz et al. (2022) y SW USA (Jones et al., 2021).

## 6.5 Implicaciones arqueológicas

De manera preliminar y a falta de concluir algunas investigaciones arqueológicas en desarrollo que incluyen determinaciones de edades radiométricas de  $^{14}\text{C}$ , así como la correlación cronológica de los artefactos y estructuras, las edades arqueométricas aquí encontradas sugieren que las estructuras estudiadas identificadas como hornos se ubican temporalmente entre los 800 a 1200 años. Según Di-Peso (1974) las primeras aldeas establecidas en Paquimé corresponden al año 700 d.C. durante el periodo cerámico hasta finales del periodo llano e inicios del llamado Periodo viejo (1200 d.C.). Según Phillips *et al.*, (2001), a partir de los 950 d.C. comenzó una renovación arquitectónica que resultó en una transformación mayor para el año 1200 d.C. Por lo anterior es muy probable que, a juzgar por las edades arqueométricas aquí encontradas, el horno PH2 (874-890 d.C.) corresponda a esta primera etapa constructiva dejándose de utilizar para dar paso la renovación arquitectónica de la que habla Phillips *et al.*, (2001) mientras que el resto de los hornos, PH1, PH4 y PH5 posiblemente hayan sido utilizados contemporáneamente durante esta etapa hasta el año 1200 d.C. Estas edades son compatibles con las reportadas por Alva-Valdivia *et al.*, (2021) donde reportan una edad arqueométrica absoluta para una estructura de características similares (tipo mimbre) del sitio arqueológico Casas Grandes entre 960 - 1100 d.C. lo cual refuerza la hipótesis realizada por Contreras-Sánchez, *et al.*, (1989), acerca de la influencia que tuvo Paquimé sobre Casas Grandes pues utilizaban la Sierra Madre Occidental como una especie de corredor para mantener contacto entre ambas lo cual explicaría la similitud en las construcciones y en las edades.

## Conclusiones

De acuerdo con las curvas termomagnéticas, los minerales magnéticos responsables de la magnetización presente en las muestras estudiadas corresponden principalmente a titanomagnetitas con contenido variable en titanio, usualmente bajo con temperaturas de Curie entre los 560° C a 580°C. Excepcionalmente se observó también la presencia de titanomaghemita térmicamente inestable. Se observa también una buena estabilidad térmica en la mayoría de los casos lo que sugiere que la magnetización presente es muy probablemente de origen termorremanente.

Después de los tratamientos de desmagnetización progresiva mediante campos alternos, fue posible obtener, en la mayoría de los casos (97%) las componentes direccionales características de la magnetización presente en las muestras estudiadas. Los valores de los campos destructivos medios y su comportamiento durante los tratamientos magnéticos indican que la magnetización obtenida es portada por granos de dominio magnético pseudo-sencillo.

A nivel muestra fue posible calcular las arqueodirecciones mediante la estadística de Fisher. En términos generales se observa un buen agrupamiento a este nivel, con valores de  $\alpha_{95}$  menores a 10° (excepto el bloque PP45-1 con dispersión de 13.3°) lo cual indica que la remanencia magnética registrada en cada muestra permaneció sin alteraciones significativas desde el momento en que fueron magnetizadas por última vez y representan un registro del Campo Geomagnético presente al momento del último enfriamiento. A nivel horno, fue posible igualmente determinar las direcciones promedio mediante la estadística de Fisher, descartándose en únicamente dos casos, (horno PH1, muestra PH1-2A y horno PH2, muestra PH2-1) en los cuales a pesar de mostrar un buen agrupamiento, las direcciones promedio resultaron las direcciones promedio son incoherentes y no corresponden con los valores direccionales esperados para la época y el área de estudio, esto posiblemente a que las muestras fueron movidas después del último calentamiento.

La obtención de las edades arqueomagnéticas se realizó mediante la comparación de las direcciones obtenidas con las direcciones esperadas según los modelos globales de variación paleo secular del campo geomagnético de

SHA.DIF.14K y con el modelo SHAWQ.2K. Se utilizaron también las curvas de variación locales de Mahgoub *et al.*, (2019) y de García-Ruiz *et al.*, (2022). Para compensar la falta de información arqueológica absoluta o relativa que permitiera una interpretación objetiva de las edades, se realizó el tratamiento un tratamiento Bootstrap para estimar el intervalo de edad más probable. Este tratamiento arrojó que las edades de los hornos se encuentran entre los 957 a 1175 d.C. Cabe destacar que las edades de los hornos y su incertidumbre sugieren que fueron utilizados en distintas etapas excepto los hornos PH5 y PP45 cuyas edades dejan abierta la posibilidad de que hayan sido utilizados a finales de la misma etapa hacia 1200 d.C.

Las edades arqueométricas ubican temporalmente a los hornos, el último calentamiento, entre los 800 a 1200 años. El horno PH2 (874-890 d.C.) corresponda a una primera etapa constructiva dejándose de utilizar para dar paso una etapa segunda y muy importante etapa de renovación arquitectónica donde se ubican temporalmente a los hornos, PH1, PH4 y PH5 hasta el año 1200 d.C. Estas edades son compatibles con una edad arqueométrica absoluta del sitio arqueológico Casas Grandes de entre 960 - 1100 d.C. (Parada-Carrillo, 2016; Di Peso, 1974).

## Referencias bibliograficas

Alva-Valdivia, L. M., Rodríguez-Trejo, A., Cruz-Antillón, R., Hervé, G., Perrin, M., Salgado-Saito, M. M., & Mahgoub, A. N. (2021). Archaeomagnetic dating and magnetic characterization of ceramics from the Paquimé, Casas Grandes region, Chihuahua, Mexico. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 37(April).

Butler, R.F., (1991). Introduction to geomagnetism. In *Paleomagnetism* (pp. 1–15).

Campuzano, S. A., Gómez-Paccard, M., Pavón-Carrasco, F. J., 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.

Contreras Sanchez, E. (1989). PAQUIME Zona Arqueologica de Casas Grandes, Chih. Chihuahua: Instituto Nacional de Antropología e Historia, Centro Regional de Chihuahua.

Cornejo, B. (2016), Paquimé. Fondo de Cultura Económica, 139 pp.

Di Peso, C. C. (1974). Casas Grandes, a fallen trading center of the Gran Chichimeca. In G. J. Fenner (Ed.), *The amerind foundation, INC/Dragon* (1st ed.).

Di Peso, C.C., Fenner (1974). Casas Grandes, a fallen trading center of the Gran Chichimeca. In G. J. Fenner (Ed.), *The amerind foundation, INC/Dragon* (4).

Durán, A.I., (2003). ¿Cuál es el origen de nuestro campo magnético?, *Tecnociencia*, 5(1), 107–117.

Earle, Timothy K. (1997). *How Chiefs Come to Power: The Political Economy in Prehistory*. Stanford University Press, Stanford, California.

Efron, B., (1979), *Computers and the theory of statistics: thinking the unthinkable*. *SIAM review*, 21(4), 460-480.

Fisher R., (1953), *Dispersion on a Sphere*. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 217, 295-305.

Flores Vidal, M.S., (2013). Reflectividad en estructuras compuesto-metal, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética efectivas de compuestos. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de C.C. Físicas.

Gamboa-Carrera, E., Mancera-Valencia F. J. (2008). The Cultural Landscape of Cliff Houses in the Sierra Madre Occidental, Chihuahua. In *Archaeology without Borders: Contact, Commerce, and Change in the U.S. Southwest and Northwestern Mexico*, edited by Laurie D. Webster, Maxine E. McBrinn, and Eduardo Gamboa Carrera, pp. 355–364. University Press of Colorado, Boulder.

García Pimentel, A., Goguitchaichvili, A., Torreblanca, C., Kravchinsky, V., Cervantes, M., García, R., Cejudo, R., Bautista, F., Morales, J., 2022, Depopulation of the Northern Border of Mesoamerica during the Early Postclassic: Evidence from the Reappraisal of Archaeomagnetic Data. *Land*, 11, 2103.

García-Ruiz, R., Goguitchaichvili, A., Pavón-Carrasco, F. J., Soler, A. M., Pérez-Rodríguez, N., Osete, M. L., Morales, J., Kravchinsky, V., 2022, Fluctuations of magnetic inclination and declination in Mexico during the last three millennia. *Quaternary Geochronology*, 71, 101309.

Gómez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P., McIntosh, G., Osete, M.L., Catanzariti, G., Ruiz-Martinez, V.C. y Núñez, (2006). The first archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula. Comparison with other data from Western Europe and with global geomagnetic field models. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7, 1-20, Q12001.

Gómez-Paccard, M., Pavón-Carrasco, F.J., Carrancho, Á., (2016). Arqueomagnetismo: aplicación al estudio del campo magnético de la Tierra y a la caracterización de yacimientos arqueológicos. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 24(3), 294–303.

Guerrero, V., Saavedra, F., Torres-Torija, M. (2019). Zona arqueológica Paquimé. Patrimonio de la humanidad UNESCO / bien cultural inscrito en 1998 / referencia UNESCO: 560. *Tenso Diagonal*, 8, 12–26.

Hernández Avila, E.R., (2010). Control cronométrico basado en arqueomagnetismo de Teopancazco, Estado de México [Tesis para obtener grado en licenciatura en Física]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Herrejón Lagunilla, Á., (2020). Estudios arqueomagnéticos en materiales quemados prehistóricos de la península ibérica. Aplicaciones geocronológicas y geoarqueológicas. Universidad de Burgos.

Hervé, G., Perrin, M., Alva-Valdivia, L., Tchibinda, B. M., Rodriguez-Trejo, A., Hernandez-Cardona, A., Cordoba-Tello, M., Rodriguez, C. M. (2019). Critical analysis of the Holocenepalaeointensity database in Central America: Impact on geomagnetic modelling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 289, 1-10.

Jardón Sanchez, H., (2008). *El Origen Del Campo Magnético Terrestre* (Vol. 1).

Jones, S.A., E. Blinman, L. Tauxe, J. Cox, S. Lengyel, R. Sternberg, J. Eighmy, D. Wolfman, R. DuBois, (2021). MagIC as a FAIR Repository for America's Directional Archaeomagnetic Legacy Data, <https://doi.org/10.1029/2021JB022874>

Kelley, Jane H., David A., Phillips J. (2012). Medio Period Sites in the Southern Zone. In *Not so Far from Paquimé: Essays on the Archaeology of Chihuahua, Mexico*, edited by Jane H. Kelley and David A. Phillips Jr., pp. 54–80. University of Utah Press, Salt Lake City.

Kirschvink, J., 1980, The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal International*, 62(3), 699-718.

Lanza, R., y Meloni, A., (2006). *The Earth's Magnetism* (1a ed.). Springer US.

LeBlanc, S. A., 1980. The Dating of Casas Grandes. *Cambridge University Press*, 45(4), 799–806.

Lekson, S. H., 1984. Dating Casas Grandes. *Archaeological, Arizona Society, Historical*, 50(1), 55–60.

Lekson, S. H., 2010. Black Mountain and Paquime: dating the Medio periodo of Casas Grandes. 1974, 1–21

Mahgoub, A. N., Böhnell, H., Siebe, C., Salinas, S., Guilbaud, M. N. (2017). Paleomagnetically inferred ages of a cluster of Holocene monogenetic eruptions in the Tacámbaro-Puruarán area (Michoacán, México): implications for volcanic hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 347, 360-370.

Mahgoub, A.N., Juárez-Arriaga, E., Bohnell, H., Manzanilla, L.R., Cyphers, A., (2019b). Refined 3600 years palaeointensity curve for Mexico. *Phys. Earth Planet. In.* 296

Mahgoub, A.N., Juárez-Arriaga, E., Böhnell, H., Siebe, C., Pavón-Carrasco, F.J., (2019), Late- Quaternary secular variation data from Mexican volcanoes: Earth and Planetary Science Letters, 519, 28-39.

Osorio Aguillón, M. del C., (2018). Estudio arqueomagnético de Ndachjian Tehuacan en el estado de Puebla [Tesis doctoral]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Pailes, M. (2017). Northwest Mexico: The Prehistory of Sonora, Chihuahua, and Neighboring Areas. *Journal of Archaeological Research*, 25(4), 373–420.

Parada-Carrillo, G. (2016). Arquitectura y cerámica de Casas Grandes. Una comparación entre conceptos espaciales arquitectónicos y pictóricos. *Instituto de Investigaciones Estéticas*, 38(109), 171- 214.

Pavón-Carrasco F.J., Rodríguez-González J., Osete M.L., Miquel J., (2011), A Matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science* 38, 408 – 419.

Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M. y De Santis, A., (2014). A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 388, 98 - 109

Pérez-Rodríguez, N., Morales-Contreras, J., García-Tenorio, F., Gogishaishvili, A., (2015). Fechamiento arqueomagnético de las últimas tres erupciones plinianas del volcán Popocatépetl en Rapalini, A.E., Caballero-Miranda, C., Gogichaishvili, A. (eds.), *Proceedings São Paulo, Brasil, Latinmag Letters, Special Issue*, 6, C11, 1-7.

Phillips, David, Todd Van Pool, y Cristina Van Pool (2001). Arqueología y prehistoria del noroeste de México: homepage, Bibliografía (español). Fecha de consulta 4 abril 2017. <https://www.unm.edu/~dap/nwm/no-chih.html>

Pitezal, T. A., Searcy, M. T., 2013. Understanding the Viejo Period: What are the Data, *Collected Papers from the 17th Biennial Mogollon Archaeology Conference*, 77–81.

Posada, C. L., y Reyes, A.Y. (2020). Ruinas de Paquimé: Cronología de su historia y desarrollo. *Inventario de Monumentos, Edificios y Sitios: Históricos y Relevantes Del Noroeste de Chihuahua Período 700 a 1900*, 38–63.

Prévot, M., Mankinen, E. A., Grommé, S., 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.

Rakita, G. F. (2009). Mortuary and non-mortuary ritual practices at the pre-Hispanic site of Paquime' (Casas Grandes), Chihuahua, Mexico. In Stodder, A. L. (ed.), *Reanalysis and Reinterpretation in Southwestern Bioarchaeology*, Anthropological Research Papers No. 59, Arizona State University, Tempe. 55–79

Rakita, G. F. M., y Buikstra, J. 2001. *Social Complexity, Religious Organization, and Mortuary Ritual in the Casas Grandes Region of Chihuahua, Mexico*.

Rakita, G. F. M., y Raymond, G. R., 2003. The Temporal Sensitivity of Casas Grandes Polychrome Ceramics. *Kiva*, 68(3), 153–184.

Reyman, J. E., *The Grand Chichimeca: Essays on the Archaeology and Ethnohistory of Northern Mesoamerica*.

Scott, M. U., y Searcy, M. T., 2015. Mapping the Ancient City of Paquimé: Harnessing the Power of Pix4Dmapper and Unmanned Aerial Systems. *Paquimé Casas Grandes, México*.

Soler-Arechalde, A.M., (2006). Investigaciones arqueomagnéticas en México – Fundamentos, Historia y Futuro. *Monografías del Instituto de Geofísica*. No. 10. Universidad Nacional Autónoma de México. 90 pp.

Stewart, J. D., Kelley, J. H., Macwilliams, A. C., y Reimer, P. J., 2005. The Viejo Period of Chihuahua Culture in Northwestern Mexico. *Society for American Archaeology*, 16(2), 169–192.

Tauxe, L., (2010). *Essentials of paleomagnetism*. University of California Press.

Urrutia-Fucugauchi, J., A. Goguitchaichvili, L. Pérez-Cruz, J. Morales. (2016). Archaeomagnetic Dating of the Eruption of Xitle Volcano, Basin of Mexico: Implications for the Mesoamerican Centers of Cuicuilco and Teotihuacan. *Arqueología Iberoamericana* 30:23-29. URL: <http://laiesken.net/arqueologia/archivo/2016/30/4>.

VanPool, Christine S. (2009). The Signs of the Sacred: Identifying Shamans Using Archaeological Evidence. *Journal of Anthropological Archaeology* 28:177–190.

VanPool, Christine S., Todd L. VanPool. (2007). *Signs of the Casas Grandes Shamans*. University of Utah Press, Salt Lake City.

Villalaín Santamaría, J.J., (2016). La historia del campo magnético terrestre registrada en las rocas. *Fundamentos del Paleomagnetismo. Enseñanza*, 24(3), 261–274.

Whalen, M. E., Minnis, P. E. (2001) *Casas Grandes and Its Hinterland: Prehistoric Regional Organization in Northwest Mexico*. University of Arizona Press, Tucson.

Whalen, M. E., Minnis, P. E., (2006). Impulsos locales y distantes en el origen de Casas Grandes, Chihuahua. *Memoria del seminario de Arqueología del Norte de México*. 121-129.

Whalen, M. E., y Minnis, P. E., 2001. Architecture and Authority in the Casas Grandes Area, Chihuahua, Mexico. *Society for American Archaeology*, 66(4), 651–668.

Whalen, M. E., y Minnis, P. E., 2003. The Local and the Distant in the Origin of Casas Grandes, Chihuahua, Mexico. *American Antiquity*, 68(2), 314–332.

Zijderveld, J.D.A., 1967, AC demagnetization of rocks: Analysis of results. En: D.W. Collinson, K.M. Creer y S.K. Runcorn (Editores), Methods in Paleomagnetism. Elsevier, Amsterdam, pp. 254-286.

## Anexo 1. Relación fotográfica de muestras

Tabla A1.1. Relación de fotografías frontales y al reverso de las muestras que fueron utilizadas para los tratamientos magnéticos con la clave de registro que se les asigno en campo y en laboratorio.

Clave		Imagen	
Muestreo	Laboratorio	Frontal	Reverso
PH1-2	P0001A-P0008A		
PH1-2	P0009A-P0016A		
PH1-3	P0017A-P0024A		
PH2-1	P0025A-P0032A		

PH2-2	P0033A-P0040A		
PH2-3	P0041A-P0048A		
PH4-1	P0049A-P0056A		
PH4-2	P0057A-P0064A		
PH4-3	P0065A-P0072A		
PH5-1	P0073A-P0080A		

PH5-2	P0081A-P0088A		
PH5-3	P0089A-P0096A		
PP45-1	P0097A-P0104A		
PP45-2	P0105A-P0112A		