

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de esta monografía es la introducción al arqueomagnetismo, rama del paleomagnetismo que estudia los materiales arqueológicos que contienen óxidos de hierro y por tanto pueden registrar ya sea la variación del campo geomagnético o ser caracterizados mediante experimentos de propiedades magnéticas.

La monografía comienza con una introducción a los fundamentos del paleomagnetismo: el campo magnético terrestre y sus variaciones, un efecto en los materiales y las diversas técnicas para los procesos de laboratorio y el análisis de los resultados.

En una segunda parte se describen las bases del arqueomagnetismo y de manera muy breve se presenta una revisión de los estudios realizados en México, algunos con más de cuarenta años.

México a pesar de ser uno de los principales exponentes de la cultura mesoamericana, con un gran número y diversidad de culturas, ha sido poco estudiado como se muestra por el escaso número de investigaciones efectuadas. Sin embargo, a partir del año 2000 se está realizando investigación de manera continua en el Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica. La investigación se desarrolla principalmente mediante la elaboración de tesis de Licenciatura cuyos resultados han avalado la aplicabilidad y confiabilidad del método, por lo que es cada vez mayor el número de antropólogos y arqueólogos interesados.

1. EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

a) Introducción

Desde tiempos remotos los hombres han estado interesados por el funcionamiento de los imanes. El primer reporte científico lo hace Tales de Mileto en el siglo VI antes de Cristo donde describe la atracción de pequeños objetos por medio de una barra de ámbar habiendo sido previamente frotada por una piel de gato.

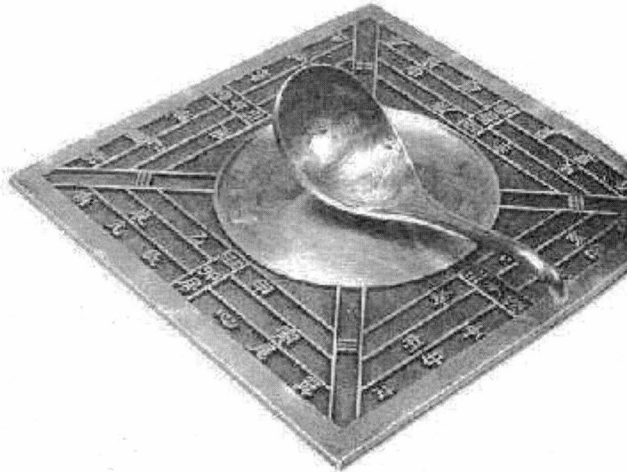


Fig. 1 Brújula china.

Pero un hecho que cambió definitivamente la historia de la humanidad fue la introducción de la brújula en el siglo XII, desarrollada por los chinos durante la dinastía Qin (221-206 a.C.), ya que permitió el descubrimiento de nuevas tierras y muy cercano a nosotros los viajes de Cristóbal Colón (Figura 2).

En ese tiempo se pensaba que el magnetismo era debido a la Estrella Polar y no a un punto en el interior de la Tierra. La deducción en 1546 por G. Mercator de que los polos del campo magnético se encontraban en la Tierra, permitió a W. Gilberts en 1600 concluir que el campo magnético de la Tierra era similar a un gran imán de barra, lo que implica que la inclinación es dependiente de la latitud geográfica. Esta variación fue corroborada con las mediciones que se hicieron en diversas partes del mundo, como las que realizó el Barón Von Humboldt en México y en Centro y Sudamérica.

b) Fundamentos

El concepto central de muchos principios del paleomagnetismo es que el campo magnético terrestre es un campo dipolar, egocéntrico y axial. Lo que

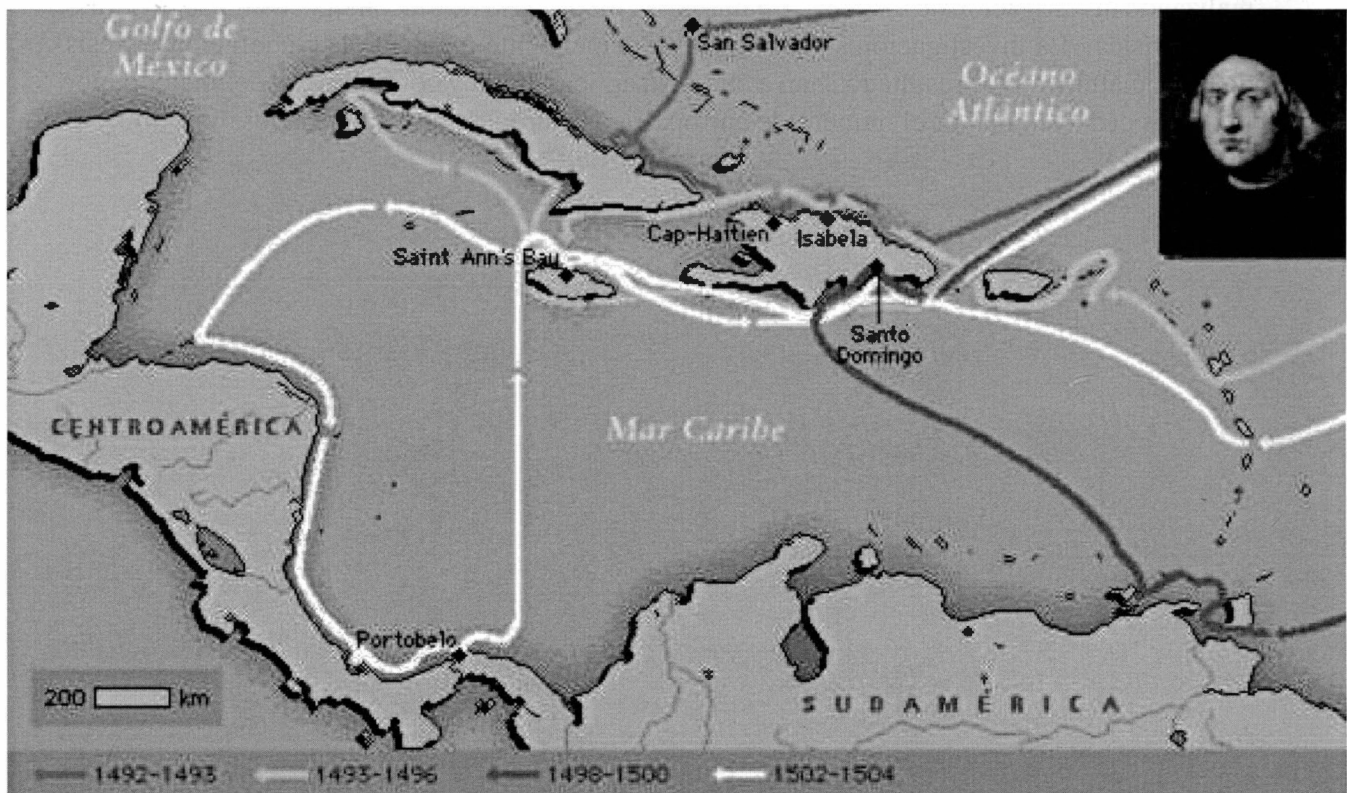


Fig. 2. Viajes de Colón.

significa que es producido por un dipolo, colocado en el centro del planeta y cuyo eje está alineado con el eje de rotación de la Tierra.

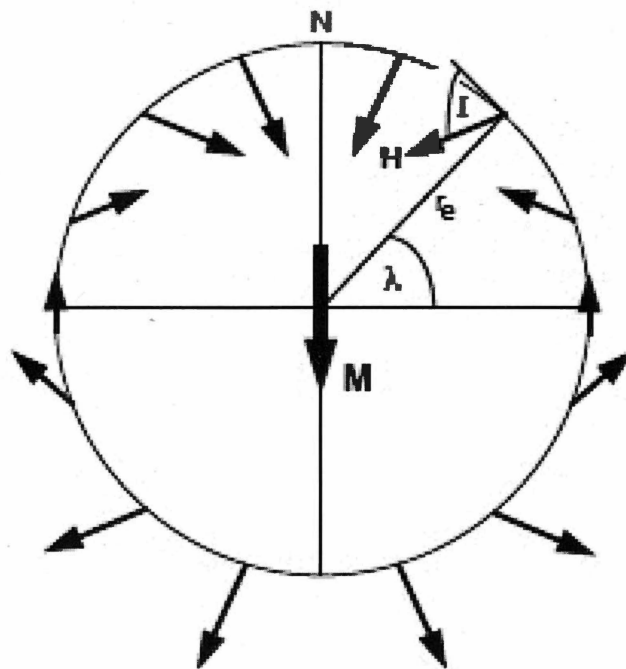


Fig. 3. Modelo del dipolo geocéntrico y axial (Butler, 1992)
 λ latitud geográfica; r_e radio medio terrestre; M dipolo magnético; I inclinación; N norte geográfico.

Así para cualquier punto en la superficie terrestre, la latitud geomagnética es igual a la geográfica. Si m es el momento magnético del dipolo y a es el radio terrestre, H la componente horizontal y Z la componente vertical del campo a la latitud λ , entonces:

$$H_h = \frac{M \cos \lambda}{r_e^3}, H_v = \frac{2M \sin \lambda}{r_e^3} \quad (1)$$

y el campo total H

$$H = (H_h^2 + H_v^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{M}{r_e^3} (1 + 3 \sin^2 \lambda)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

y la tangente de la Inclinación magnética es H_v/H o ecuación del dipolo:

$$\tan I = 2 \tan \lambda, \quad (3)$$

donde I es la inclinación en el punto de medida y λ es la latitud geográfica.

El campo magnético terrestre en un punto de su superficie es un vector (F) que se determina mediante dos ángulos: declinación e inclinación y su intensidad.

La declinación (D) es el ángulo que forma la componente horizontal del vector con el norte

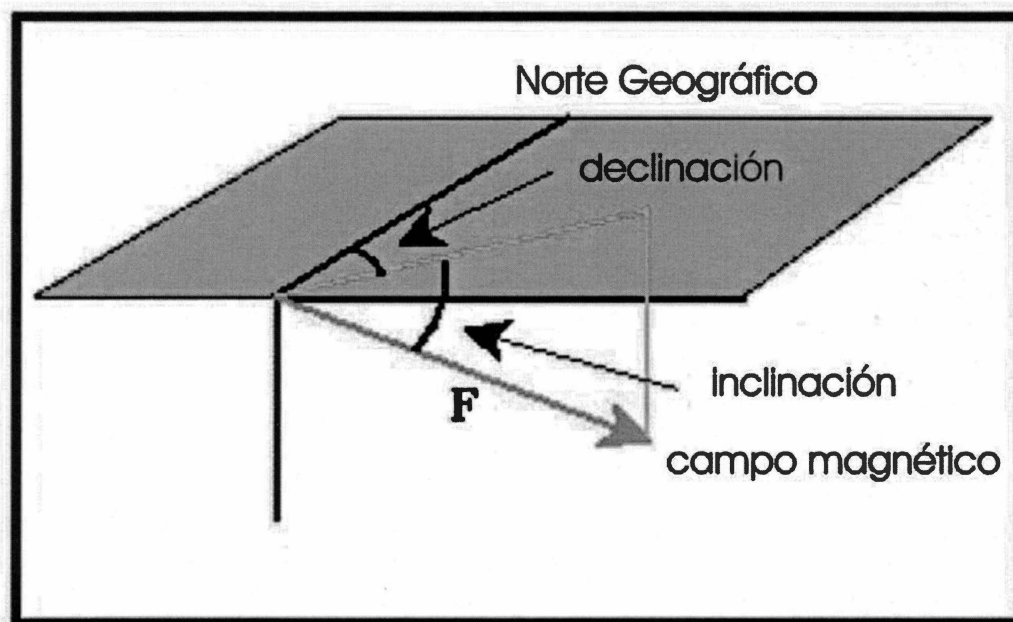


Fig. 4. Esquema de ángulos que definen el campo magnético terrestre en un punto sobre la superficie.

geográfico, la inclinación (I) es el ángulo que forma el vector con el plano horizontal ($-90^\circ \leq I \leq 90^\circ$). La intensidad normalmente se mide en Teslas¹.

Para poder comparar resultados de localidades muy separadas es conveniente calcular los polos paleomagnéticos que representarían la posición donde el eje dipolar promedio en el tiempo cortaría la superficie terrestre, referido al sistema actual de coordenadas.

Para poder hacerlo debemos conocer las declinaciones e inclinaciones medias (D_m, I_m) en una localidad S con coordenadas (λ_s, ϕ_s) y se pueden calcular las del polo Paleomagnético (λ_p, ϕ_p) de acuerdo con la Figura 5:

$$\begin{aligned} \text{sen} \lambda_p &= \text{sen} \lambda_s \cos p + \cos \lambda_s \text{sen}(p) \cos D_m \quad (-90^\circ \leq \lambda_p \leq +90^\circ) \\ \phi_p &= \phi_s + \beta \text{ cuando } \cos p \geq \text{sen} \lambda_s \text{sen} \lambda_p \quad (4) \\ \phi_p &= \phi_s + \beta \text{ cuando } \cos p < \text{sen} \lambda_s \text{sen} \lambda_p, \end{aligned}$$

donde $\text{sen} \beta = \text{sen}(p) \text{sen} D_m / \cos \lambda_p \quad (-90^\circ \leq \beta \leq +90^\circ)$.

Cualquier paleodirección instantánea que sea convertida a polo con las ecuaciones anteriores se le

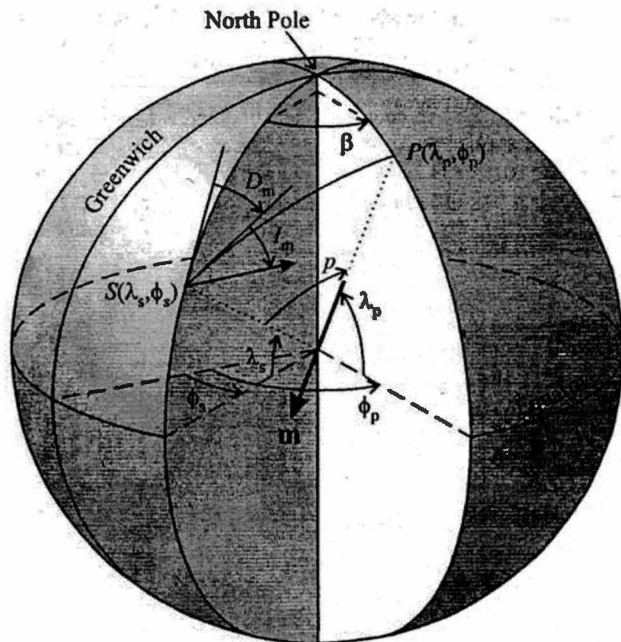


Fig. 5. Relación para calcular la posición (λ_p, ϕ_p) del polo Paleomagnético P relativo a el sitio de muestreo (λ_s, ϕ_s) con la dirección media (D_m, I_m) (Merrill *et al.*, 1998).

conoce como polo virtual geomagnético (VGP) y el promedio de varios de ellos constituye un polo Paleomagnético.

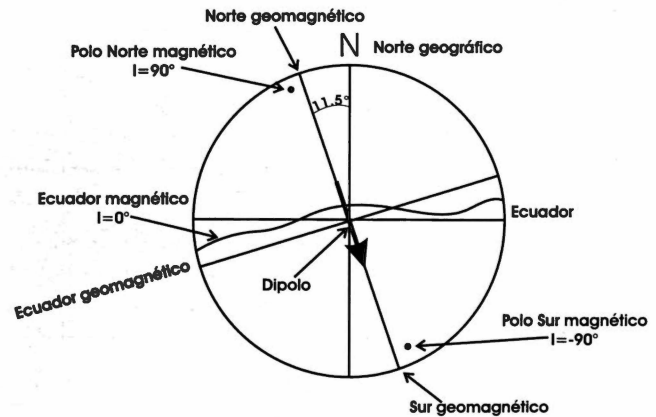


Fig. 6 Definición de los diferentes polos en magnetismo terrestre.

La mejor aproximación del campo magnético actual es un campo dipolar cuyo eje forma un ángulo de 11.5° con el eje de rotación de la Tierra. Su morfología se representa mediante cartas isomagnéticas, que muestran curvas de igual valor de una componente particular del campo. A continuación se muestran cartas del IGRF (International Geomagnetic Reference Field) para el año 2005.

El campo magnético cumple con las leyes de Maxwell:

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot B &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

donde H es el campo magnético, B es la inducción, J es la densidad de corriente eléctrica y la parcial de D con respecto a t es el vector de desplazamiento de la densidad de corriente.

Como con excepción de las tormentas eléctricas la región de la superficie de la Tierra por encima de 50 km puede ser considerada como vacío electromagnético. Por tanto, se puede asumir que $J = 0$ y $\frac{\partial D}{\partial t} = 0$ y por tanto $\nabla \times H = 0$, lo que implica que H es un campo conservativo y por tanto existe un campo potencial escalar, tal que:

$$H = -\nabla \psi. \quad (6)$$

¹ Tesla= kg/sC, la intensidad del campo geomagnético es del orden de .05 mTeslas

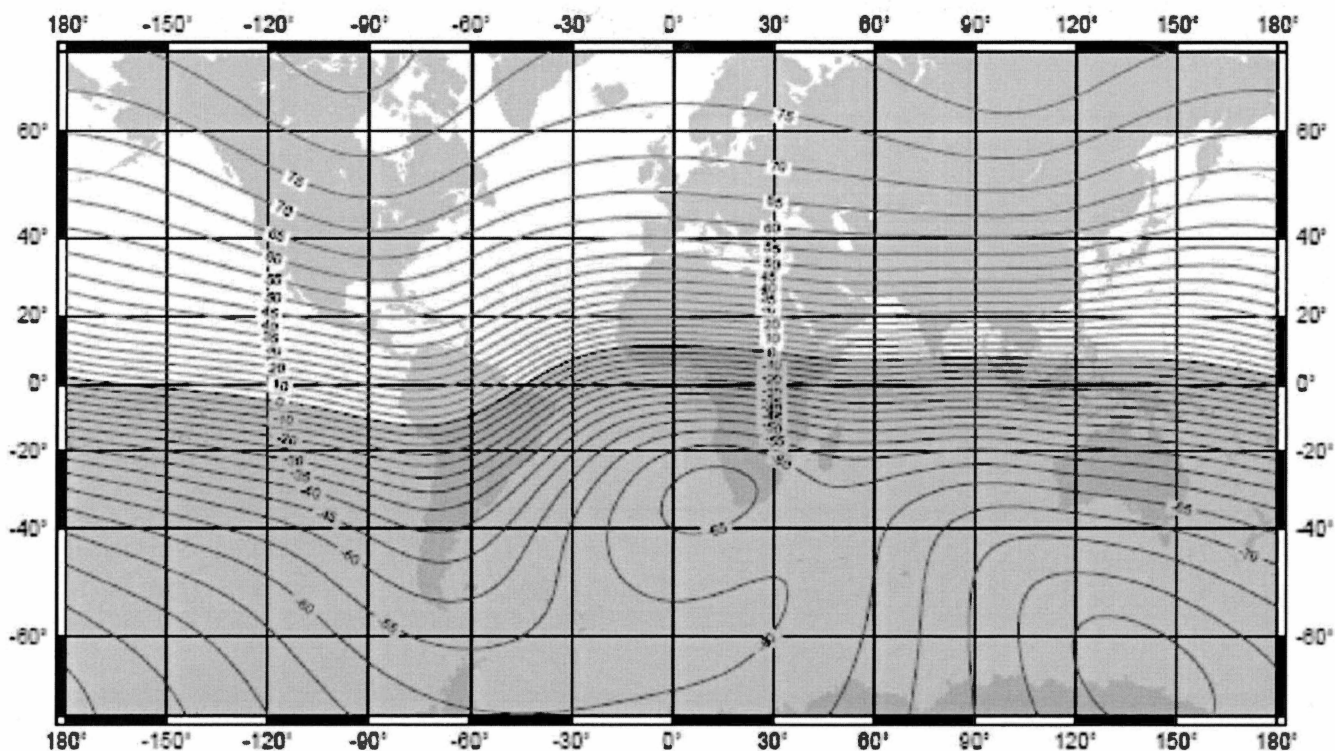


Fig. 7. Carta de igual inclinación magnética o Isoclina para el año 2005 del WMM (World Magnetic Model del IGRF). Proyección Mercator, curvas de nivel a 5°. Zonas sombreadas-inclinaciones menores de cero (Cred:British Geological Survey, NERC).

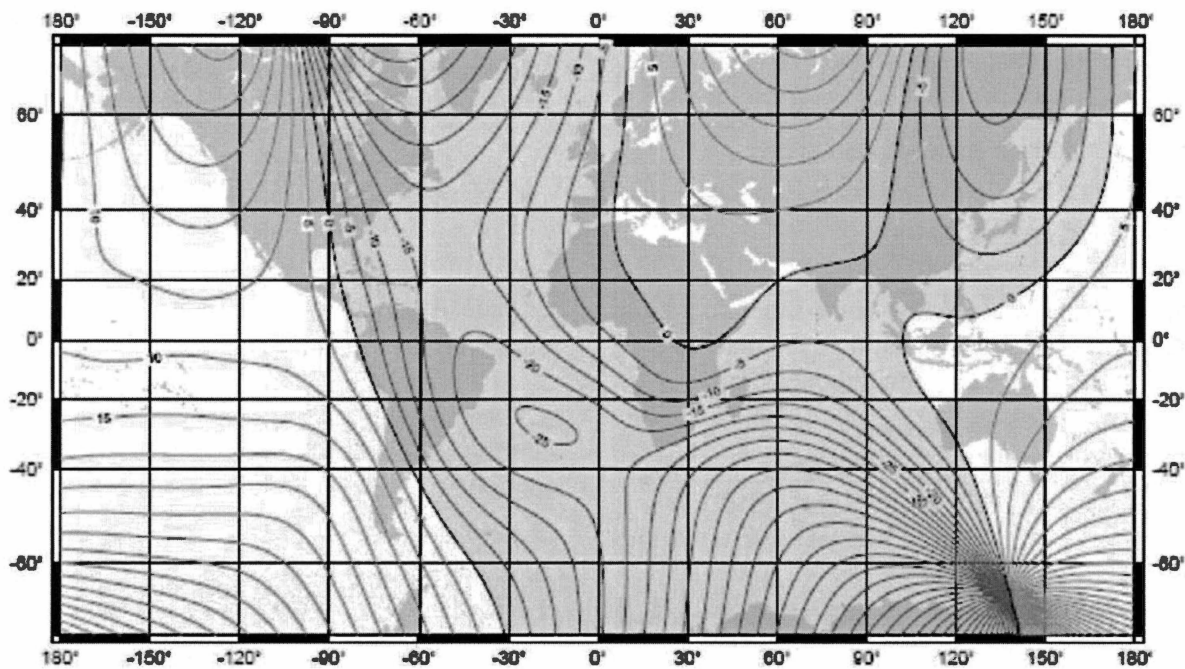


Fig. 8. Carta de igual declinación magnética o Isógona para el año 2005 del WMM (World Magnetic Model del IGRF). Proyección Mercator, curvas de nivel a 5°. Zonas sombreadas valores negativos - Oeste (Cred:British Geological Survey, NERC).

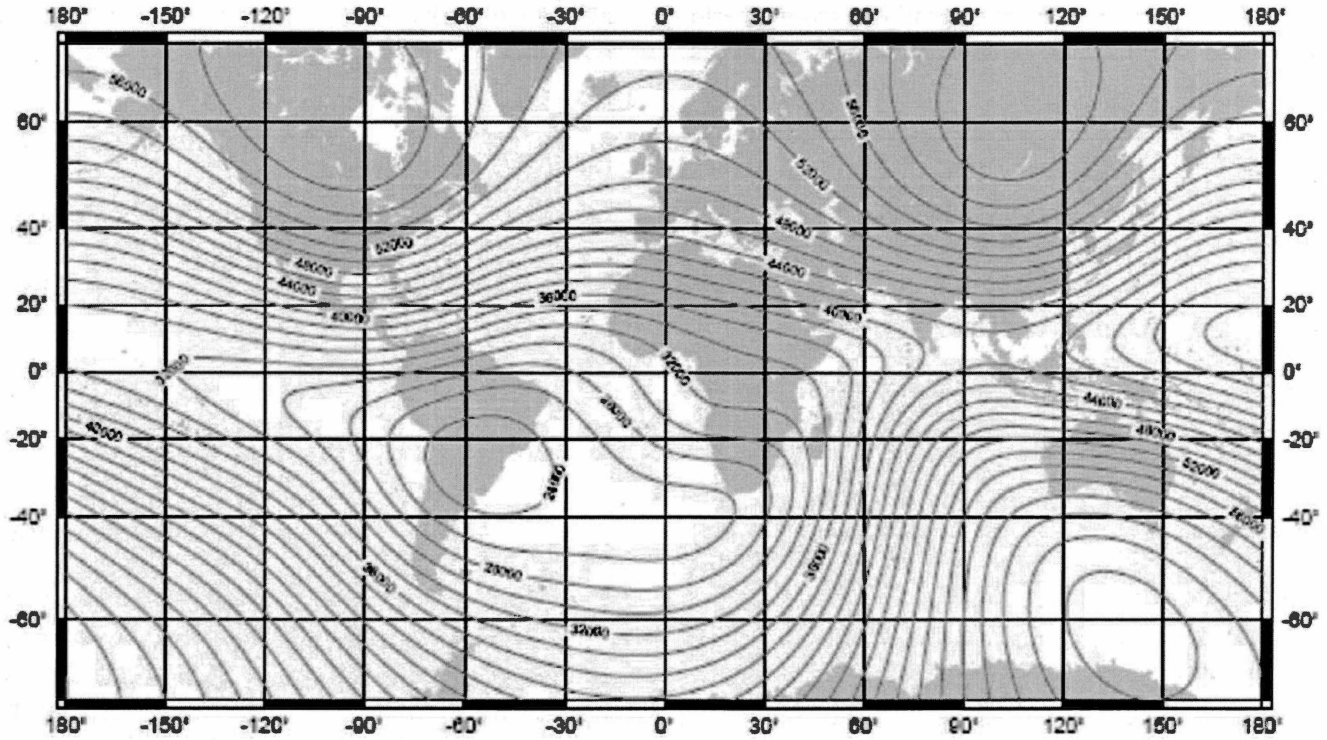


Fig. 9. Carta de igual intensidad de campo magnético (F) o Isodinámica para el año 2005 del WMM (World Magnetic Model del IGRF). Proyección Mercator, curvas de nivel a 2000 nT. (Cred: British Geological Survey , NERC)

Como $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ sobre la superficie terrestre donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$, (permeabilidad del vacío), y por tanto

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (7)$$

Y por tanto cumple la ecuación de Laplace

$$\nabla^2 \psi = 0, \quad (8)$$

que en coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) , donde r es la distancia al centro de la Tierra, θ es la colatitud (90° menos la latitud) y ϕ es la longitud quedaría:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\psi) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} = 0 \quad (9)$$

que en el caso de no existir dependencia longitudinal, su solución por separación de variables es:

$$\psi(r, \theta) = \sum_{l=0}^{\infty} \left(A_l r^l + \frac{B_l}{r^{l+1}} \right) P_l(\cos \theta), \quad (10)$$

donde A_l y B_l son constantes y P_l son los Polinomios de Legendre.

Sustituyendo en la ecuación de Laplace

$$\psi(r, \theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left[A_{lm} r^l + B_{lm} r^{-(l+1)} \right] Y_l^m(\theta, \phi), \quad (11)$$

donde A_{lm} y B_{lm} son constantes y $Y_l^m(\theta, \phi)$ son los armónicos superficiales de grado l y orden m

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \left[\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!} \right]^{\frac{1}{2}} P_{l,m}(\cos \theta) e^{im\phi}, \quad (12)$$

donde $P_{l,m}$ son las funciones asociadas de Legendre dadas por la fórmula de Rodrigues

$$P_{l,m}(x) = \frac{1}{2^l l!} (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{d^{l+m}}{dx^{l+m}} (x^2-1)^l \quad (13)$$

y no dependen de r , como los armónicos esféricos.

Esta expresión del campo permite descomponerlo en fuentes internas $B_{l,m}$ ya que si no existen fuentes externas la componente radial del campo $-\frac{\partial\psi}{\partial r}$ desaparecerá en infinito y por tanto no pueden existir potencias positivas de r.

En el caso de que no hay fuentes internas entonces $-\frac{\partial\psi}{\partial r}$ debe ser infinito en el interior y por tanto no deben existir potencias negativas de r en ψ y por tanto los coeficientes $A_{l,m}$ debe representar las fuentes externas.

Si se emplean las funciones de Schmidt parcialmente normalizadas P_l^m , normalizando con $r = a = 6371$ kmy que no existen los monopolos magnéticos, ψ el potencial escalar magnético quedará:

$$\psi = \frac{a}{\mu_o} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l P_l^m(\cos\theta) \left\{ \left[C_l^m \left(\frac{r}{a} \right)^l + (1 - C_l^m) \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} \right] g_l^m \cos m\phi + \left[S_l^m \left(\frac{r}{a} \right)^l + (1 - S_l^m) \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} \right] h_l^m \text{sen} m\phi \right\}, \quad (14)$$

donde C_l^m, S_l^m son números positivos entre 0 y 1, asociados a las fuentes externas $r > a$ y $(1 - C_l^m)$ y $(1 - S_l^m)$ es la fracción asociada a las fuentes internas $r < a$.

Las componentes g_l^m y h_l^m se calculan de observaciones.

En coordenadas cartesianas las componentes del campo magnético

$$X = \frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \quad Y = -\frac{1}{r \text{sen}\theta} \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \quad Z = -\frac{\partial\psi}{\partial r} \quad (15)$$

se pueden obtener de los polinomios de Schmidt. Los coeficientes de la ecuación 11 se obtienen de múltiples observaciones de (X, Y, Z) , limitando l y graficando C_l^m, S_l^m contra $(1 - C_l^m), (1 - S_l^m)$ se puede determinar las proporciones entre las fuentes internas y externas. Los coeficientes así determinados cambian con el tiempo, cambios debidos a corrientes ionosféricas, cambios en las corrientes inducidas en la corteza y manto superior, corrientes en el núcleo terrestre que llevan a cambios en el campo magnético de la superficie. Si se realizan valores promedios de varios

años se observa que C_l^m, S_l^m no difieren significativamente de 0 y por tanto la ecuación 11 queda:

$$\psi = \frac{a}{\mu_o} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} P_l^m(\cos\theta) (g_l^m \cos m\phi + h_l^m \text{sen} m\phi) \quad (16)$$

los coeficientes g_l^m y h_l^m son los coeficientes de Gauss para los polinomios de Schmidt P_l^m .

Los coeficientes con $l=1, g_1^0, g_1^1$ y h_1^1 representan el campo dipolar, $l=2$ es el cuadrupolo geocéntrico, $l=3$ el octupolo geocéntrico.

La gráfica a continuación muestra en el espectro de potencia el orden de los coeficientes armónicos las componentes del campo magnético, donde las longitudes de onda del campo de origen interno tienen armónicos de grado 14 o menores, atribuidos a fuentes en el núcleo terrestre. Las fuentes corticales tienen longitudes de onda máximas del orden de decenas de km, que son menores a las menores que las del modelo de grado 14.

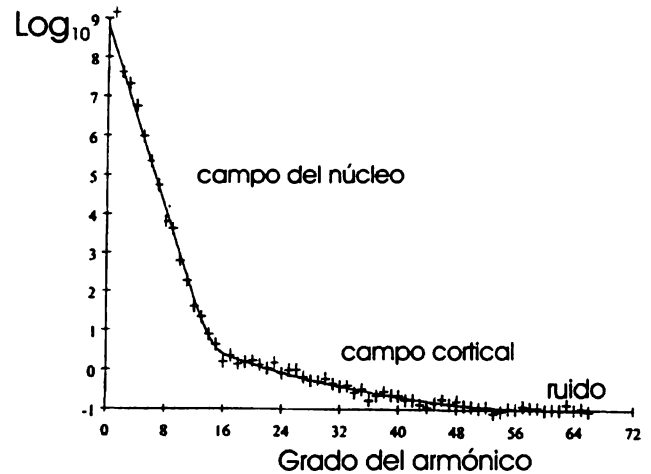


Fig. 10. Espectro normalizado de los armónicos componentes del campo geomagnético interno a una altitud de 420 km (modificado de Cain *et al.*, 1974).

c) Variación secular

Las observaciones del astrónomo chino Yi-Xing en el 720 dC de la declinación de la brújula junto con las subsecuentes a lo largo de siglos permitieron a Henry Gellibrand en 1634 determinar que la declinación magnética cambiaba con el tiempo como lo muestra la gráfica a continuación.

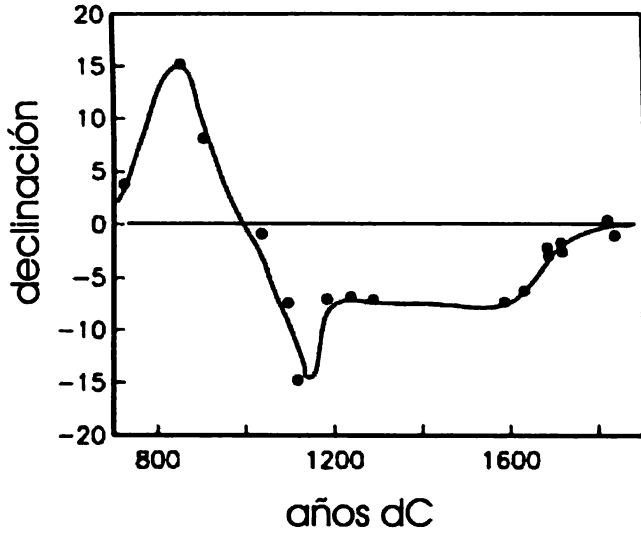


Fig. 11. Variación de la declinación magnética con el tiempo en China desde el año 720 dC hasta 1829. (modificado de Smith & Needham, 1967).

También se presentan cambios en la inclinación y en la intensidad del campo, denominada variación secular que fue descrita por el matemático y astrónomo inglés H. Gellibrand en 1634.

En la Figura 12 mostramos la variación secular en la declinación para varias ciudades del hemisferio Norte entre ellas: Londres, París y Roma. En la Figura 13 para Londres y Hobart, Tasmania.

Observamos como hay diferencias claras entre Hobart y Londres y no así entre Londres, París y Roma. Lo que podemos notar es que aunque el fenómeno de variación secular es a nivel global, también presenta diferencias regionales, por lo que deben realizarse curvas de variación secular por áreas o bloques tectónicos.

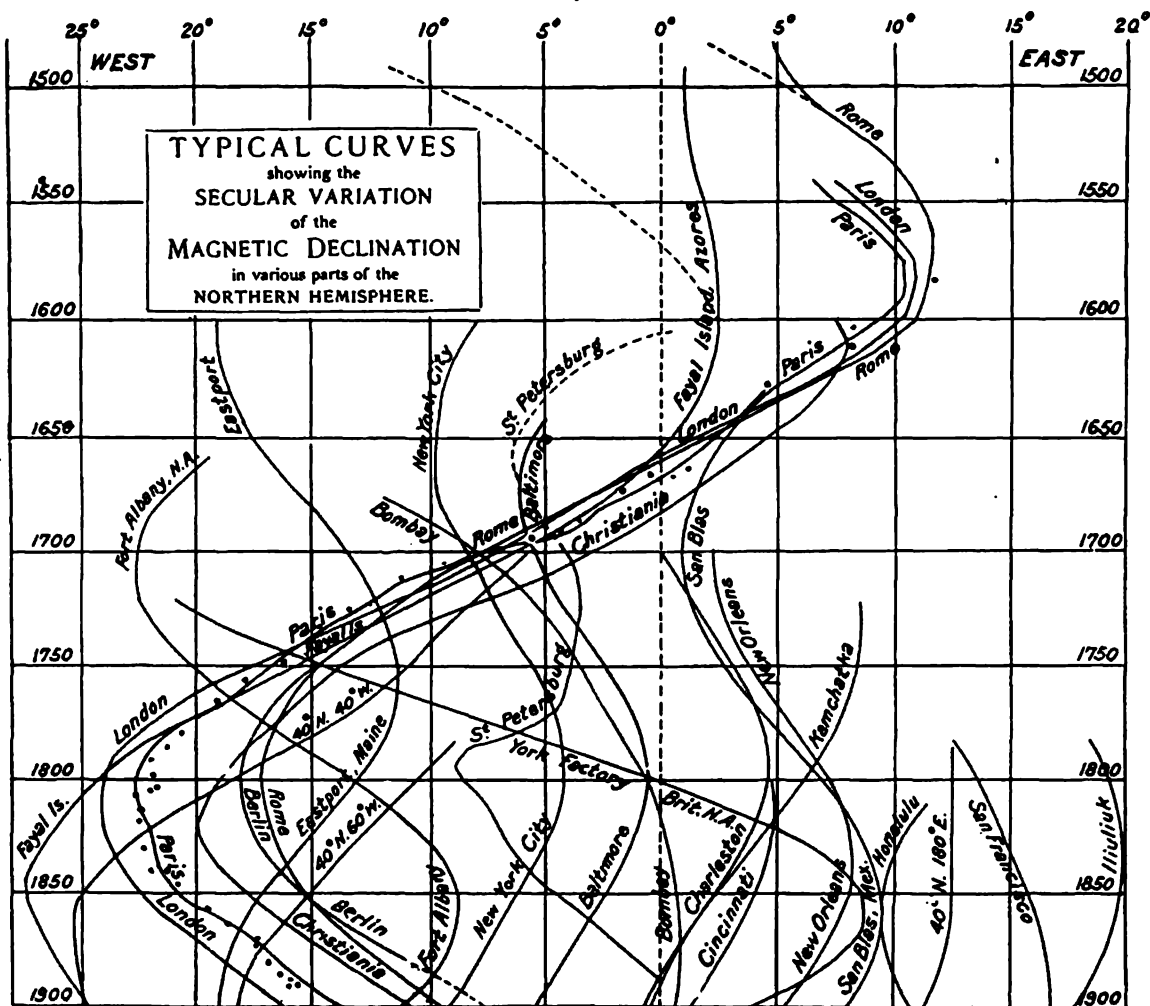


Fig. 12. Variación secular entre Londres y París.

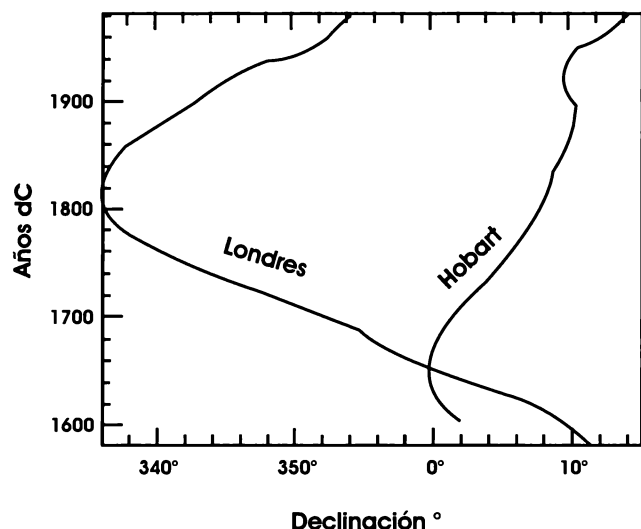


Fig. 13. Variación secular de Londres y Hobart, Tasmania (Merrill *et al.*, 1998).

Las variaciones en el campo geomagnético observado en la superficie terrestre suceden en escalas de tiempo desde milisegundos a millones de años. En la tabla a continuación se enuncian las variaciones tanto temporales como espaciales del campo magnético, sus períodos y la causa de los mismos.

Aquí observamos que hay variaciones muy rápidas (del orden de milisegundos) y cambios más lentos (años a millones de años); estos últimos son los conocidos como variación secular y están asociados a cambios en el interior del planeta, fuentes internas y los de períodos menores a un año son de origen externo.

Dos componentes claramente se pueden determinar de la variación secular, la deriva al oeste del campo no dipolar a razón de $0.18^\circ/\text{año}$. Por tanto un circuito completo de la Tierra le toma 2000 años, y que en ocasiones es considerado erróneamente como el período sobre el cual promediar para eliminar los efectos de la variación secular. Véase la Figura 14.

Otra fuente de la variación secular es la deriva hacia el polo del campo no dipolar del orden de 0.01° de latitud por año, como también a cambios al azar del campo no dipolar.

Dentro de los cambios en intensidad de la variación secular está un patrón prácticamente lineal de 8% de disminución del momento dipolar durante los últimos 150 años.

Tabla 1

Variaciones temporales y espaciales del campo geomagnético

NOMBRE	TIEMPO EN SEGS	CAUSA
Muy cortas Micropulsaciones Variaciones subacústicas	$3.0 \text{ E}-1$ a $3.0 \text{ E}+1$	Asociadas al campo externo
Tormentas magnéticas Variación Diurna	$1.0 \text{ E}+2$	Asociadas al campo externo
Variación secular	$3.0 \text{ E}+9$ a $3.0 \text{ E}+10$	Campo no dipolar*
Variación en el momento dipolar geomagnético	$3.0 \text{ E}+9$ a $3.0 \text{ E}+10$	Campo dipolar*
Excursiones	$1.0 \text{ E}+14$	Inversiones abortadas
Variaciones en Intensidad	$3.0 \text{ E}+11$	Campo dipolar
Paleovariación secular	$3.0 \text{ E}+12$	Campo no dipolar y variaciones en el dipolo
Cambios de polaridad	$3.0 \text{ E}+14$	Campo dipolar y no dipolar interno

* Turbulencias en el núcleo.

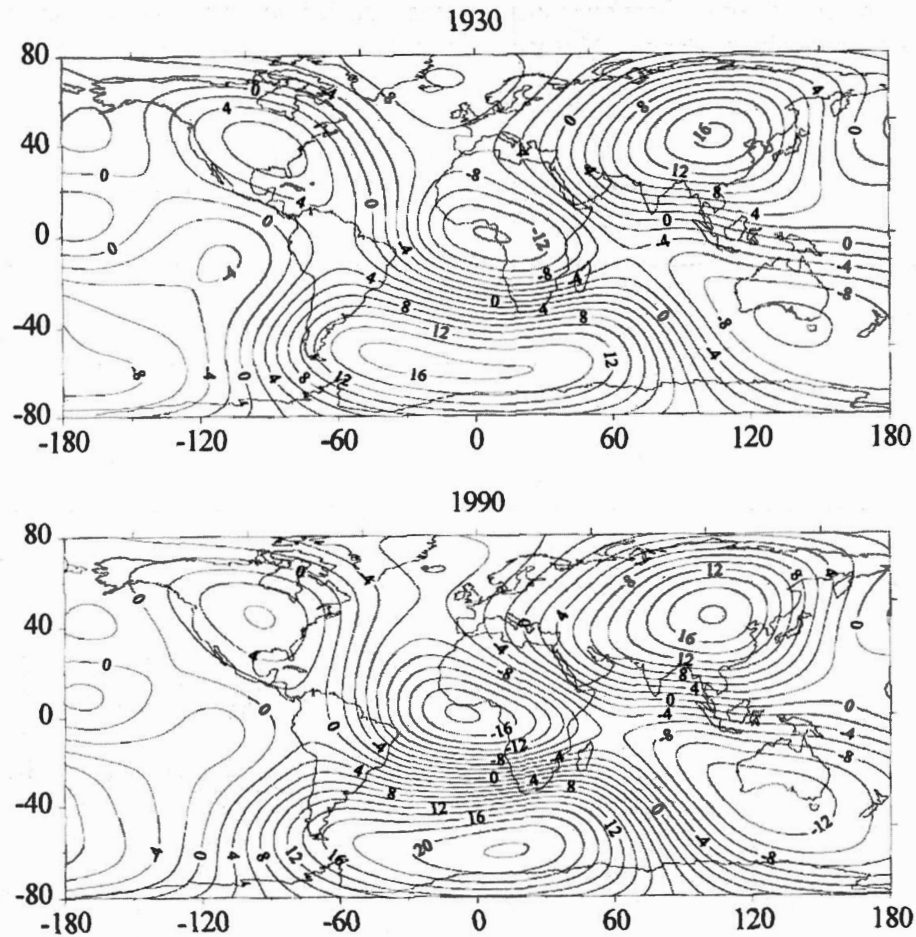


Fig. 14. Componente vertical del campo no dipolar para 1930 y 1990. Los contornos están en mT. (Merrill *et al.*, 1998).

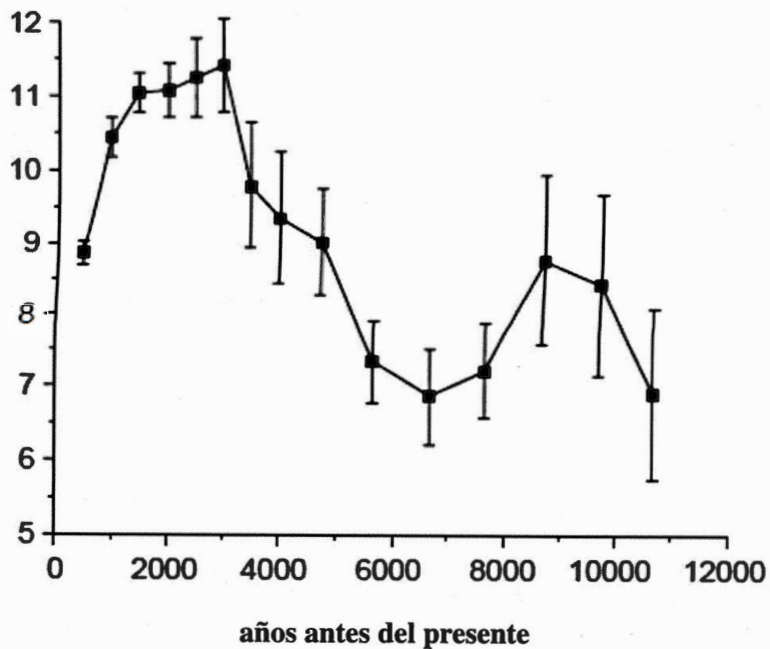


Fig. 15. Momento dipolar geomagnético para los últimos 10 000 años. Valores promedios para intervalos de 500 años, se muestran desde el año 4000 años antes del presente. Valores promedios para intervalos de 1000 años, se muestran desde el año 4000 aP hasta el 10 000 aP. Las incertidumbres corresponden a un 95% de confianza (Merrill and McElhinny(1983).

A continuación se muestran dos gráficas que ilustran la cantidad de información con que se cuenta para elaborar la curva de referencia de variación secular para Mesoamérica en cuanto a direcciones y en cuanto a paleointensidades.

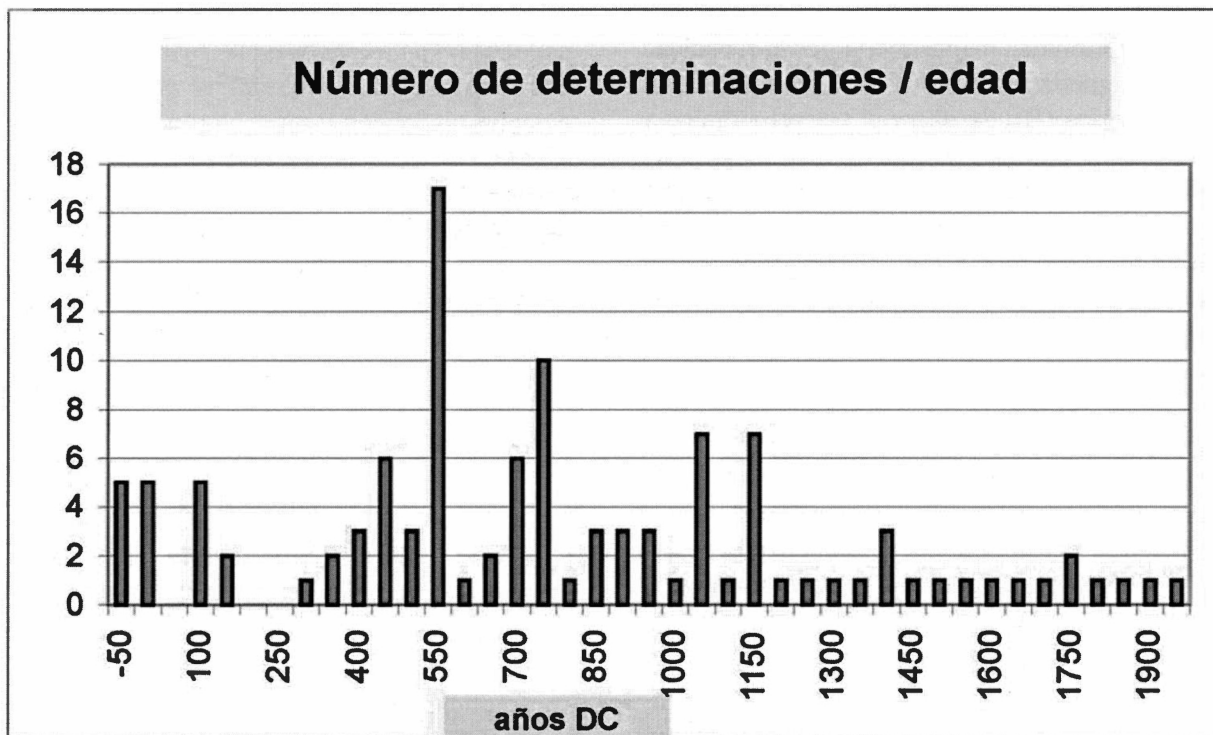


Fig. 16. Número de determinaciones de la dirección del campo geomagnético del año 50 aC al 1925 dC en Mesoamérica (modificado de Wolfman,1990, Latham,1986 y Urrutia,1996).

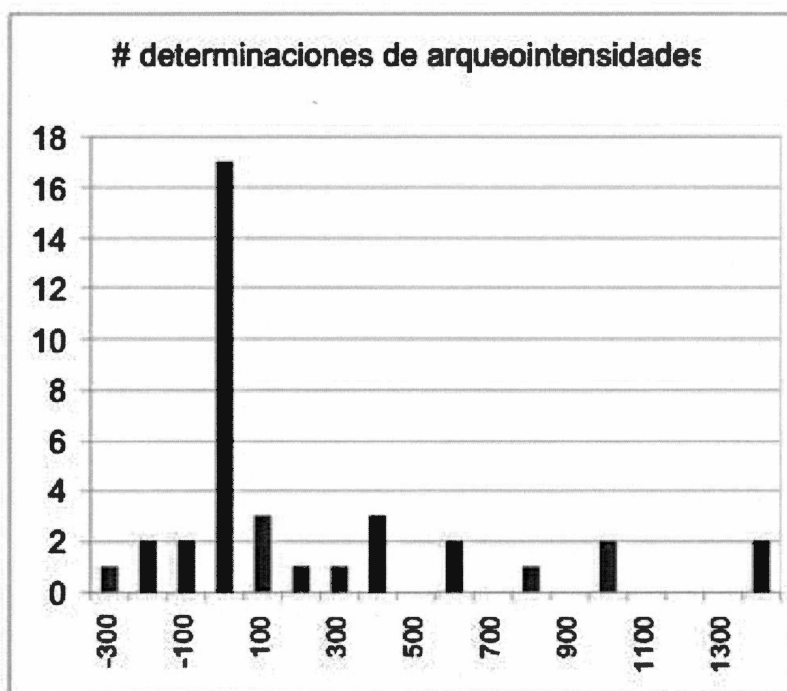


Fig. 17. Número de determinaciones de intensidades del Campo geomagnético para México del año 300 aC al 1400 dC, de muestras de alfarería y de rocas volcánicas (modificado de Nagata *et al.*,1965 y Bucha *et al.*, 1970).

2. BASES DEL MÉTODO PALEOMAGNÉTICO

a) La susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética, χ_m , es la capacidad con que se magnetiza un material en la presencia de un campo magnético (B). Se observa a nivel atómico y está asociado al espín del electrón y a su movimiento alrededor del núcleo.

En numerosas sustancias, la magnetización es proporcional a la intensidad del campo magnético H, por lo que se puede definir a χ_m mediante

$$M = \chi_m H = \chi_m (B/\mu_0), \quad (17)$$

donde χ_m es una cantidad adimensional puesto que M y H tienen las mismas unidades [amperios/m], B es el campo magnético y μ_0 la permeabilidad magnética en el vacío [$4\pi \times 10^{-7}$ henry/m]. La permeabilidad es la facilidad que ofrece un cuerpo al paso del flujo magnético.

La representación matemática de la susceptibilidad magnética es un tensor de segundo grado χ_{ij} , que al ser diagonalizado, los eigenvalores y eigenvectores proporcionan las magnitudes y direcciones de las susceptibilidades principales χ_1, χ_2, χ_3 .

De acuerdo con su comportamiento frente a un campo magnético, los materiales se clasifican en:

Tabla 2

Propiedades magnéticas de acuerdo con el comportamiento frente a un campo magnético

NOMBRE	SUSCEPTIBILIDAD	PERMEABILIDAD
paramagnéticas	$0 < \chi_m \ll 1$	$\mu > \mu_0$
diamagnéticas	$\chi_m < 0$ y $\chi_m \ll 1$	$\mu < \mu_0$
ferromagnéticas	$\chi_m > 0$ y $\chi_m \rightarrow \infty$	$\mu \gg \mu_0$

La característica esencial de los materiales paramagnéticos es que presentan una susceptibilidad magnética positiva, pero pequeña; ésta disminuye con la temperatura y proviene de la existencia de dipolos magnéticos permanentes que son capaces de orientarse bajo la influencia de un campo externo.

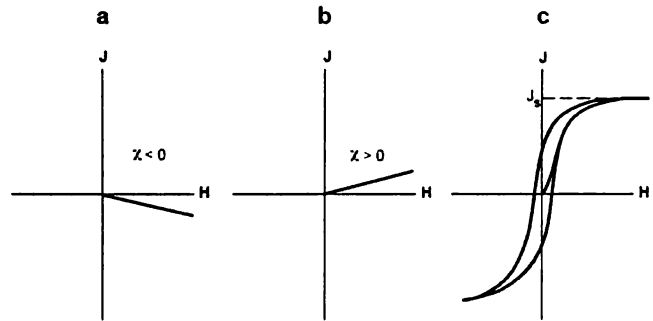


Fig. 18. Gráfica de Magnetización (M) contra campo aplicado (H) para una sustancia a) diamagnética, b) paramagnética, c) ferromagnética.

A temperaturas ordinarias, las vibraciones térmicas en el sólido aseguran una orientación al azar de los dipolos, con lo que la magnetización media es cero, pero cuanto mayor sea el campo magnético aplicado, mayor será el momento magnético neto por unidad de volumen.

El diamagnetismo resulta de los momentos magnéticos negativos inducidos en todas las sustancias por aplicación de un campo magnético externo, se caracteriza por una susceptibilidad negativa y porque es independiente de la temperatura. El momento diamagnético inducido es el mismo cualquiera que sea la orientación de la órbita con respecto al campo; esto implica que las vibraciones térmicas no afectan a las susceptibilidades diamagnéticas.

El ferromagnetismo es el efecto magnético que se observa más fácilmente y es llamado así porque aparece en ciertos compuestos del hierro. Se caracteriza por una susceptibilidad positiva y grande. El valor de la susceptibilidad depende no sólo del campo aplicado, sino también de la historia previa de la muestra. En muchos casos, una muestra puede retener su magnetización aun en ausencia de un campo externo; esto se debe a que la sustancia presenta una gran tendencia a desdoblarse en dominios (regiones en las que todos los dipolos están alineados) cada uno con una dirección de magnetización distinta, de modo que macroscópicamente resulta una magnetización cero. Esta es la base de los imanes permanentes. El origen de los momentos magnéticos en las sustancias ferromagnéticas resulta ser de los momentos magnéticos asociados al espín de los electrones. En las sustancias ferromagnéticas existen interacciones tan fuertes entre espines que les hacen alinearse paralelamente unos a otros.

Existen sustancias antiferromagnéticas en las cuales unos espines son paralelos a la alineación del campo y otros en dirección opuesta a la aplicación del mismo, donde si el acoplamiento entre unos y otros momentos magnéticos, el resultado es una magnetización nula. En ellas la susceptibilidad magnética es relativamente baja a temperaturas por debajo del punto de Curie y sube con la temperatura acercándose a la T_c característica para el material en cuestión. Pertenecen entre otros la hematita (Fe_2O_3), los óxidos de manganeso, de hierro, cobalto y níquel.

Los materiales ferrimagnéticos tienen dos subredes de iones metálicos con momentos magnéticos orientados antiparalelamente, pero de magnitud diferente dando lugar a un momento resultante diferente de cero, incluso en ausencia de un campo externo. La magnetita (Fe_3O_4), es un material ferrimagnético y el mineral más importante en contribuir al magnetismo de las rocas.

b) Magnetización

Los fenómenos magnéticos son debidos a la existencia de dipolos magnéticos atómicos en el material. Estos dipolos magnéticos son el resultado:

- a) del movimiento de los electrones en las órbitas atómicas
- b) de los momentos magnéticos de los núcleos atómicos.

El efecto del campo exterior es la tendencia a alinear los dipolos magnéticos del material con la dirección del campo. Podemos caracterizar el grado de alineación por el momento magnético total por unidad de volumen del material, siendo éste la suma vectorial de los momentos individuales.

A esta magnitud se le denomina magnetización M del material (i.e. el grado de alineación de los dipolos magnéticos) y sus unidades son amperes/m.

c) Dominios magnéticos

El material ferromagnético está constituido por dominios o zonas locales dentro de los cuales existe un perfecto ordenamiento de los momentos magnéticos atómicos, es decir, que es la región del cristal en la cual la magnetización es uniforme y equivalente a la magnetización de saturación (M_s). El primer modelo del dominio fue propuesto por Landau y Lifschitz, y explica cómo se equilibra la fuerza magnetostática en un cristal.

Existen tres tipos de dominios (Dunlop, 1995):

- i) Dominio sencillo (DS): contiene un solo dominio, los cambios en la magnetización ocurren por la rotación simultánea de los espines atómicos.
- ii) Dominio pseudo-sencillo (DPS): se caracteriza por una magnetización que no es uniforme ya que ocurre en granos más grandes que los del sencillo; presenta comportamientos del dominio sencillo como alta remanencia de saturación (M_r) y alta fuerza de coercitividad (H_c).
- iii) Dominio múltiple (MD): contiene más de un dominio, los cambios de magnetización ocurren por el movimiento de las paredes o por la formación/deformación de dominios.

Las zonas de transición o de discontinuidad entre dominios magnéticos vecinos se denominan paredes de Bloch. A través de dichas paredes la dirección de los espines de los electrones no apareados cambia continuamente como lo muestra la Figura 20.

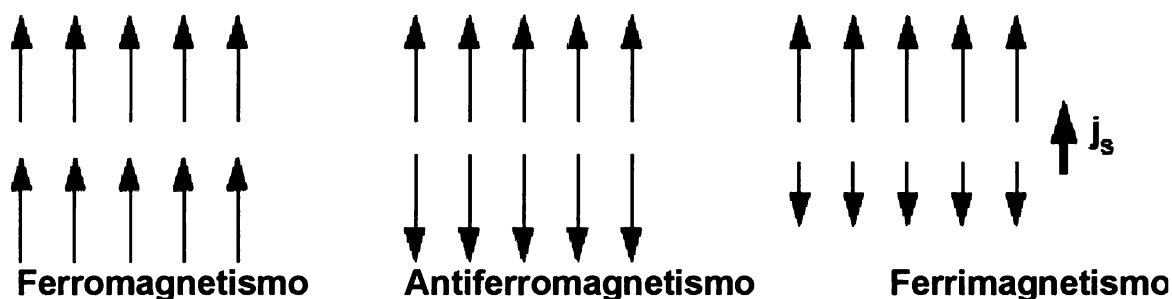


Fig. 19. Acoplamiento de los espines de los electrones de acuerdo con el tipo de respuesta del material al campo magnético.

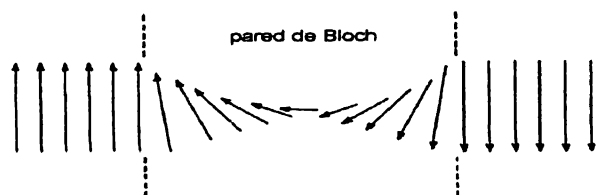


Fig. 20. Comportamiento de los momentos magnéticos en la transición de un dominio a otro, a través de la pared de Bloch (Tarling, 1983).

Cuando un material ferromagnético, sobre el cual ha estado actuando un campo magnético, cesa la aplicación de éste, el material no anula completamente su magnetización, por lo que permanece una magnetización residual.

Las curvas de magnetización de los materiales ferromagnéticos no son iguales cuando se aumenta el campo aplicado que cuando se disminuye, a esta falta de reversibilidad se le conoce como histéresis que quiere decir, inercia o retardo. El ciclo de histéresis (Figura 21) permite definir las características de magnetización de los minerales ferromagnéticos y mediante el análisis de estas curvas, es posible inferir el tipo de dominio magnético.

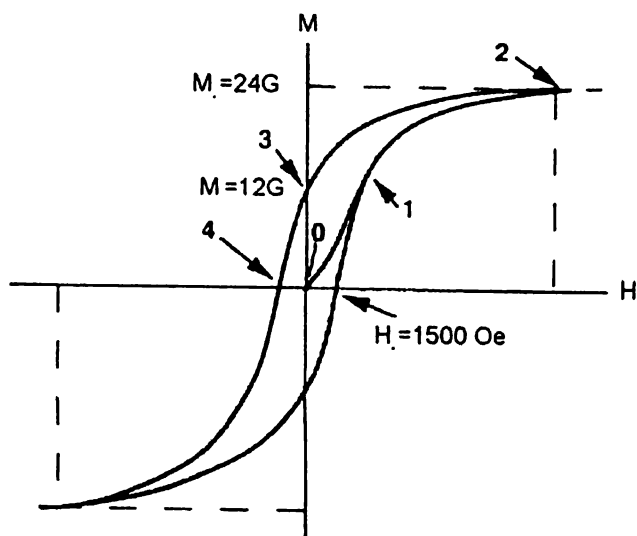


Fig. 21 Diagrama del ciclo de histéresis. 1) La dirección de magnetización de los granos de dominio simple empieza a alinearse con la dirección de H; 2) Punto de saturación M_s , la dirección se alinea completamente con la dirección de H; 3) Punto en el cual la magnetización remanente ($M=M_r$) es la magnetización de la muestra; el campo H ha sido retirado y los granos vuelven a alinearse ligeramente con el campo magnético de saturación; 4) La muestra tiene magnetización cero ($M=0$), se invierte la dirección de H y los granos se alinean ligeramente hacia éste (Modificado de Butler, 1992).

Esta histéresis, que en algunos materiales es muy grande, es la que permite la existencia de imanes permanentes muy potentes. Las sustancias ferromagnéticas con mucha histéresis se llaman duras y las que presentan poca se denominan blandas.

- a. La coercitividad (H_c), es el campo requerido para mover las paredes del dominio y el que mantiene la magnetización.
- b. La magnetización de saturación (M_s), es la magnetización en el interior del dominio que se produce por el intercambio de los espines atómicos.
- c. La magnetización remanente (M_r), es la magnetización de la red bajo un campo aplicado igual a cero.
- d. La remanencia de saturación (M_{rs}), es la que queda después de remover un campo suficiente para la saturación.

d) Tipos de magnetización

- Magnetización remanente anhisterética (ARM): si hay un campo magnético al momento en que una muestra está siendo desmagnetizada por campos alternos, ciertas partículas serán magnetizadas en una dirección preferencial dada.
- Magnetización remanente química (CRM): esta magnetización también es posterior a la deposición, por la formación de un nuevo mineral con otras características magnéticas.
- Magnetización remanente detrítica (DRM): si los sedimentos se depositan en aguas tranquilas adquieren magnetización, se alinean con respecto al campo magnético terrestre.
- Magnetización remanente isothermal (IRM): adquirido en un tiempo corto, a temperatura constante (generalmente temperatura ambiente) en presencia de un campo magnético externo (generalmente fuerte).
- Magnetización remanente post-deposicional (PDRM): esta magnetización es adquirida después de la deposición, cuando el sedimento se encuentra en forma de lodo, antes de la consolidación.

- Magnetización remanente por esfuerzo o impacto (SRM): magnetización adquirida cuando un material es sujeto a esfuerzos o a choques.
- Magnetismo termorremanente (TRM): se adquiere al enfriarse los minerales magnéticos cuando han sido sujetos a temperaturas mayores de las de Curie o Neel, en presencia de un campo magnético.
- Magnetismo remanente viscoso (VRM): los materiales adquieren la magnetización de manera gradual, durante un largo periodo de tiempo, cuando están expuestos a campos magnéticos externos.

La magnetización remanente natural (NRM) es la suma de la magnetización primaria (adquirida al momento de la formación), las secundarias y la inducida.

En el caso que nos incumbe dos magnetizaciones son las fundamentales: las termorremanentes y las detriticas.

e) Magnetización termorremanente (TRM)

Es la magnetización adquirida al enfriarse lentamente un mineral magnético que ha sido sujeto a

altas temperaturas en presencia de un campo magnético. La temperatura a la cual los momentos de los granos ferromagnéticos serán estables en el tiempo es la temperatura de bloqueo, por debajo de la cual el grano incrementa su tiempo de relajación y cambia su comportamiento de superparamagnético a un estable dominio sencillo. La temperatura de bloqueo depende del tamaño del grano, su forma y su composición mineral (Aitken, 1990).

El modelo más simple es el propuesto por Néel, donde considera granos idénticos, uniformemente magnetizados sin interacción y anisotropía uniaxial y el campo aplicado H a lo largo del eje fácil de anisotropía. Como los granos están magnetizados de manera uniforme, sólo existen 2 posibles estados de equilibrio magnético, el de más baja energía $-V\mu_o M_s H$ y el de máxima energía $V\mu_o M_s H$. Empleando la estadística de Boltzman para n partículas iguales, el número de granos en el estado de máxima energía (n_x) y de mínima energía (n_m) está dado por:

$$n_x = \frac{ne^{-(V\mu_o M_s H)/kT}}{e^{(V\mu_o M_s H)/kT} + e^{-(V\mu_o M_s H)/kT}} \quad (18)$$

$$n_m = \frac{ne^{+(V\mu_o M_s H)/kT}}{e^{(V\mu_o M_s H)/kT} + e^{-(V\mu_o M_s H)/kT}}, \quad (19)$$

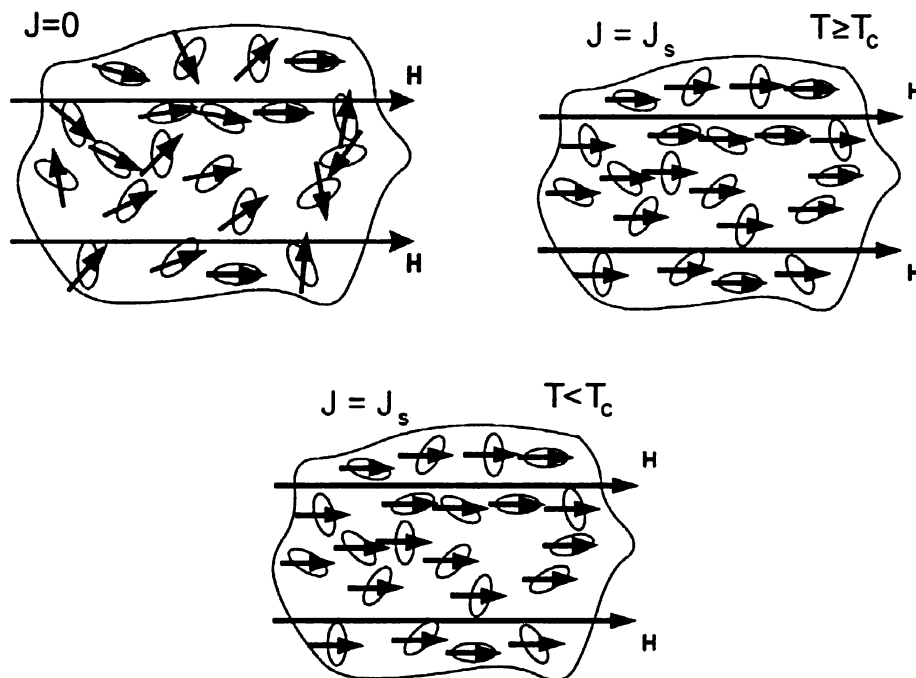


Fig. 22. Adquisición de la magnetización termorremanente (modificado de Butler, 1992).

donde k es la constante de Boltzman y T la temperatura, por tanto, la magnetización es

$$M = n_x VM_s - n_m VM_s = nVM_s \tanh . \quad (20)$$

Néel asume que existe una temperatura de bloqueo a la cual el ensamble de granos está en equilibrio, pero debajo de ésta, la magnetización se encuentra encerrada en la muestra. La magnetización termorremanente a temperatura ambiente M_T es

$$M_T = nVM_s \tanh \left(\frac{V\mu_o M_s H}{kT} \right)_{T=T_b} . \quad (21)$$

Néel también explicó que en ocasiones la magnetización remanente térmica podía ser estable en grandes períodos de tiempo.

f) Temperatura de Curie

Ciertas propiedades de esas magnetizaciones remanentes como temperatura de Curie y magnetización de saturación, dependen únicamente de la composición química de los minerales ferri o ferromagnéticos; pero otras como susceptibilidad magnética o el ciclo de histéresis, dependen además de la forma de los granos magnéticos, de su anisotropía, de la cantidad de minerales por unidad de volumen y de la posible interacción entre minerales adyacentes.

La Temperatura de Curie (T_C) es la temperatura a la cual un material pierde la capacidad de retener el magnetismo, esto es, cambia de una condición ferromagnética a una paramagnética. Debajo de esta temperatura, los átomos interactúan de tal manera que sus momentos magnéticos se acoplan y actúan en forma colectiva en dirección del campo magnético aplicado; la T_C de la mayoría de las rocas es menor de 600°C y el punto análogo a los materiales antiferromagnéticos es el punto de Néel.

g) Magnetización remanente detrítica (DRM)

La magnetización remanente detrítica es adquirida durante la deposición y litificación de las rocas sedimentarias. En la mayoría de los ambientes sedimentarios el mineral magnético que domina generalmente es la magnetita o titanio-magnetita pobre en titanio (Butler, 1992).

El modelo clásico de la adquisición de la DRM, donde se considera que únicamente las partículas ferromagnéticas son afectadas por el campo magnético, permitiendo su alineación. Los granos ferromagnéticos elongados con el momento magnético en el eje mayor tienden a rotar hacia el plano horizontal, resultando en una menor inclinación, como se muestra en el siguiente esquema:

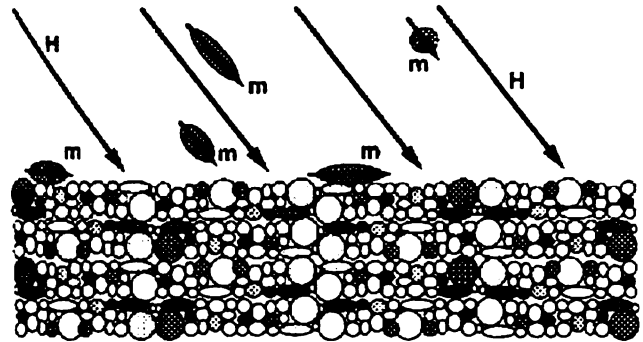


Fig. 23. Representación esquemática de granos ferromagnéticos, con momentos magnéticos m depositándose bajo la influencia de un campo magnético H (Butler, 1992).

Las desviaciones de la dirección que pueden sufrir los sedimentos se manifiestan en errores de inclinación. Las fuentes de error pueden ser (Butler, 1992).

1. Error de inclinación deposicional: generalmente se da en sedimentos de grano grueso.
2. Compactación: puede ser inducida por la compactación y probablemente tiene un efecto mayor en sedimentos de grano fino.
3. Deformación: el plegamiento de estratos sedimentarios implica deformaciones que pueden realinear granos magnéticos produciendo anisotropía magnética.
4. Cementación: puede evitar la inclinación inducida por la compactación siempre y cuando la cementación sea rápida.

Si se supone un grano esférico de diámetro d (volumen $\pi d^3/6$) con remanencia M que cae a través del agua con viscosidad η en presencia de un campo B . Existe una torca L , que afecta al momento magnético del grano dirigiéndolo hacia la orientación del campo.

$$L = -Asen\theta = -\left(\frac{\pi d^3}{6}\right)MBsen\theta, \quad (22)$$

donde θ es el ángulo entre M y B, despreciando la inercia, la torca puede igualarse al dragado viscoso sobre la rotación del grano

$$L = C \frac{d\theta}{dt} = \pi d^3 \eta \frac{d\theta}{dt}. \quad (23)$$

Si el ángulo θ es igual a θ_0 cuando $t=0$, entonces para ángulos pequeños

$$\theta = \theta_0 \exp(-t/t_0), \quad (24)$$

donde $t_0 = \frac{C}{A} = \frac{6\eta}{MB}$

es el tiempo que le toma para que el ángulo θ_0 disminuir a 1/e su valor.

Si este proceso es completado prácticamente, la partícula debe caer a través del agua por al menos un tiempo t_0 . Stacey(1963) mostró empleando la Ley de Stokes que el tiempo de caída t de un grano esférico, una distancia h , a través del agua era

$$t = \frac{18\eta h}{d^2(\rho - \rho_0)g}, \quad (25)$$

donde $(\rho - \rho_0)$ es la diferencia de densidades entre el grano y el agua y g es la aceleración de la gravedad. Por tanto existe una profundidad de agua crítica h_0 para la que en un tiempo t_0 pueda ser orientado.

$$h_0 = \frac{d^2(\rho - \rho_0)g}{3MB} \quad (26)$$

y con valores medios como $B = 0.05$ mT, $(\rho - \rho_0) = 4 \times 10^3$ kg/m³ y $M=10^3$ A/m para granos pseudosencillos de diámetros de 10 μ m, da un h_0 del orden de 20 μ m y entonces t_0 es del orden de 0.1 s, por lo que el alineamiento es casi instantáneo, y tanto la altura como el tiempo serán aun menores para granos más pequeños.

Al momento de llegar al fondo los granos experimentan una torca que hará que decrezca la

inclinación. Resultados de experimentación muestran que la inclinación del sedimento I_s será invariablemente menor que la del campo aplicado I_b , donde $\tan I_s = f \tan I_b$ donde f es del orden de 0.4 (King, 1955; Griffiths *et al.*, 1960). Estudios en sedimentos marinos profundos han mostrado que guardan la dirección del campo sin un error significativo en la inclinación. La compactación también disminuye la inclinación en los sedimentos, por lo que se atribuye a estos procesos los errores en inclinación, más que a las torcas mecánicas de los granos al depositarse.

3. PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS

a) Medición de la magnetización

Una vez obtenidas las muestras y preparadas como se explica ampliamente en el Apéndice 2, pueden ser medidas.

En el Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica contamos con magnetómetros de giro que miden la oscilación del campo magnético producida por la rotación del momento magnético de las muestras originado por la rotación de la muestra. En el caso de las muestras arqueológicas se empleó un magnetómetro JR6 con una resolución de (10^{-10} Am²).

Las mediciones obtenidas por estos instrumentos son (M_x , M_y , M_z) del momento magnético del espécimen en coordenadas de la muestra. Estos datos normalmente alimentan un programa de computadora y se obtiene la declinación, inclinación y magnitud de la magnetización remanente. Estos programas de computadora también calculan las correcciones geográfica y de rumbo y echado.

b) Correcciones

Para representar estas direcciones, primero se debe de efectuar la *corrección geográfica*, o sea transformar las coordenadas de la muestra a coordenadas geográficas. Supongamos que tenemos a) la orientación de la muestra (medida en campo), b) su volumen v , y c) las componentes del momento magnético en coordenadas de la muestra (medidas en el laboratorio).

Así el momento magnético total M de la muestra es:

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \quad (27)$$

y la intensidad de la magnetización remanente natural (NRM)

$$NRM = \frac{M}{V} \quad (28)$$

La inclinación I_s y la declinación D_s , en coordenadas de la muestra estarán dadas por:

$$I_s = \tan^{-1} \left(\frac{M_z}{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}} \right) \quad (29)$$

$$D_s = \tan^{-1} \left(\frac{M_y}{M_x} \right). \quad (30)$$

Después debe efectuarse la corrección de *rumbo y echado*, que consiste en rotar la dirección de la NRM alrededor del eje local del rumbo o en su caso del azimuth medido, por un monto igual al del echado. A continuación se presenta la matriz de rotación necesaria para efectuarla.

$$\begin{bmatrix} \cos A & -\text{sen}A \cos B & \text{sen}A \text{sen}B \\ \text{sen}A & \cos A \cos B & -\text{sen}B \cos A \\ 0 & \text{sen}B & \cos A \end{bmatrix}, \quad (31)$$

donde A es el rumbo y B el echado.

Con estas direcciones ya corregidas y graficadas por cada sitio en una red estereográfica, se puede observar si las muestras poseen más de una componente de magnetización, esto es magnetizaciones secundarias. Ya que por ejemplo las NRM de un sitio pueden encontrarse a lo largo de un círculo mayor, lo que es el resultado de la suma de dos vectores de diferente magnitud pero dirección constante, que conecta ambos vectores. O en otros casos mostrar mucha dispersión, por lo que el proceso de laboratorio tendrá que ser con más cuidado y con un mayor número de pasos.

Ahora se elige una o varias muestras que serán tomadas como pilotos y a las que se efectuará el tratamiento. Básicamente existen dos tipos de tratamientos para obtener la magnetización primaria o característica y la o las secundarias: *Térmico* y *el de Campos Alternos*.

Como sólo se empleó el segundo, es de él que se hará una breve descripción.

c) Representación de los datos

Los vectores de dirección en Paleomagnetismo son descritos en términos de inclinación, I , con respecto a la horizontal (del sitio en que se colectó) y la declinación, D , (con respecto al norte geográfico), véase Figura 24. Para desplegar visualmente esta información se usan dos tipos de proyecciones: igual-ángulo, estereográfica o de Wulff y de igual-área o de Lambert o Schmidt.

La primera tiene la propiedad de que un cono definido por vectores alrededor de uno central, se representan como un círculo, cuyo tamaño cambia de acuerdo con la inclinación, más pequeño a mayor inclinación, o sea más cerca del centro de la proyección.

La de *igual área* 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. La proyección de este cono será una elipse, a menos que el vector central sea vertical. Esta es la proyección más usada para el caso de datos de análisis de direcciones en paleomagnetismo.

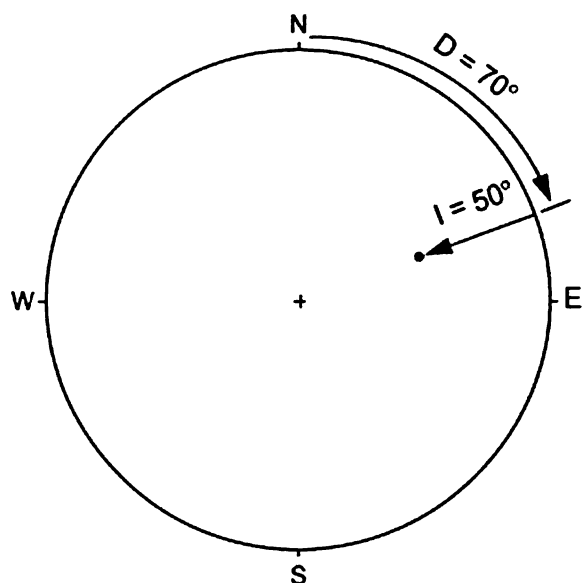


Fig.24. Gráfica de la dirección $D=70^\circ$ y $I=50^\circ$ en una red de igual área.

d) Desmagnetización mediante campos alternos

Esta técnica es la recomendada para el tratamiento de rocas ígneas, ya que la magnetización remanente térmica (componente original de las rocas ígneas) es muy resistente al lavado, mientras que las viscosas y las isotérmicas son muy sensibles.

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.

Incrementos sucesivos en el campo aplicado, midiendo la remanencia después de cada incremento,

permite obtener el espectro de coercitividad, al graficarla contra el campo aplicado (por ejemplo, la magnetización remanente de la magnetita, titanomagnetita y pirrotita desaparece entre los 0 y 1000 Oe, en cambio la serie de las ilmenos-hematitas requieren de campos mayores).

Como también se mide su dirección es posible representarla en una red estereográfica, usualmente la de Schmidt, empleándose círculos rellenos en el caso de inclinaciones positivas.

e) Desmagnetización térmica

El método consiste en calentar la muestra a temperaturas por debajo de la temperatura de Curie de los minerales ferromagnéticos contenidos en ella y dejarla que se enfríe a la temperatura ambiente en un campo magnético nulo. Lo anterior causa que los granos con temperaturas de bloqueo menores que la temperatura a la que fue expuesta adquieran magnetización termorremanente en $H=0$, y por tanto se borra la MRN que portan esos granos.

Este método es efectivo para rocas donde la hematita es el mineral ferromagnético dominante.

Al igual que en la desmagnetización mediante campos alternos las direcciones pueden ser graficadas en una red de Schmidt.

f) Obtención de las componentes de magnetización

Una herramienta muy utilizada son los diagramas de Zijdeveld DZ , que combinan en el mismo diagrama intensidad y cambios en la dirección. El punto final del vector de desmagnetización es proyectado como dos puntos en dos planos ortogonales, el plano horizontal que contiene el vector $\sqrt{x^2 + y^2}$ y el vertical $x\sqrt{x^2 + y^2}$ o $y\sqrt{y^2 + z^2}$,

donde x, y, z son las componentes referidas a los ejes coordenados.

$$x = M \cos I \cos D \quad (32)$$

$$y = M \cos I \sin D \quad (33)$$

$$z = M \sin I \quad (34)$$

y normalmente x representa el Norte, $-x$ el Sur, y el Este y $-y$ el Oeste (véase Figura 25).

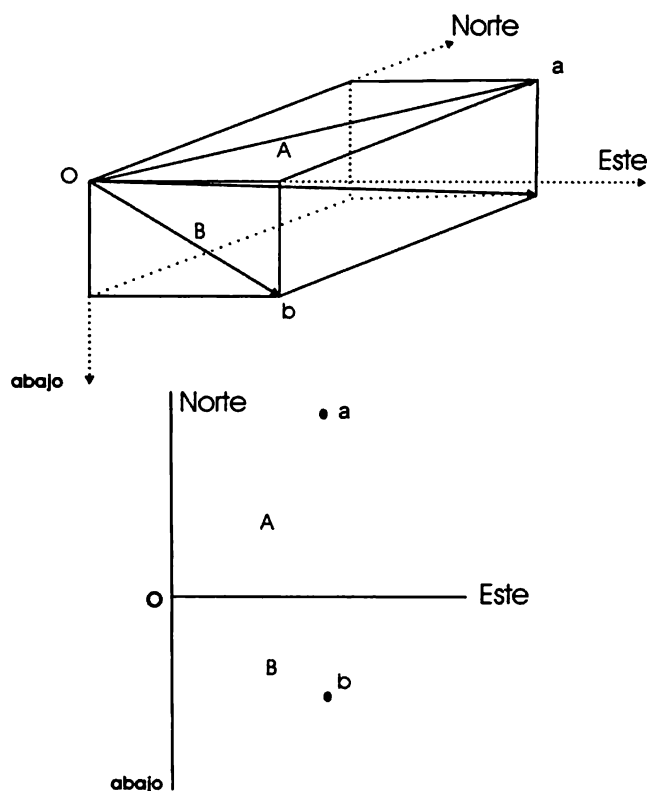


Fig.25. Construcción del Diagrama de Zijderveld.

La distancia al origen es proporcional a la intensidad, por lo que en el proceso de desmagnetización se formarán trayectorias sobre los dos planos de acuerdo con los cambios en declinación, inclinación e intensidad. La proyección sobre el plano horizontal se representa comúnmente por puntos y sobre el plano vertical por cruces.

El caso más simple que es el de remover una magnetización secundaria J_s sin alteración de la primaria J_p , o sea cuando los espectros de coercitividad no coinciden (véase Figuras 26 a y b), la trayectoria serán dos líneas rectas como se observa en el dibujo, y la primaria es la que finalmente se dirige al origen. La dirección e intensidades de las componentes primarias y secundarias se pueden obtener de los ángulos que las rectas forman con los ejes del diagrama.

Este caso es prácticamente ideal, lo más común es que presenten traslape de los espectros de coercitividad, véanse Figuras 26c y 26e, en el caso de un traslape parcial (caso c) es posible determinar las

dos componentes, extendiendo las líneas rectas y tomando como referencia su intersección.

Las líneas rectas representan una magnetización constante que está siendo removida, y no necesariamente se está removiendo la magnetización secundaria.

El problema general de resolver las direcciones de dos magnetizaciones superpuestas se encuentra en varios estados de complejidad. Si un punto final estable es observado, o sea una dirección de remanencia sobre un cierto campo o temperatura, las dos direcciones en principio pueden ser resueltas, lo que también es posible si hay un rango en temperaturas o campos sobre los cuales J_p es constante (véase Figura 27).

Aunque normalmente en los estudios paleomagnéticos la dirección de J_p es la de principal interés, hay casos en los que es importante documentar la J_s . En el caso más simple que es el de una magnetización primaria con una secundaria superpuesta, el procedimiento anterior falla para establecer la J_s en gran variedad de circunstancias, por ejemplo si ambos espectros de coercitividad tienen el mismo límite inferior pero J_s tiene un límite superior mayor, si el nivel de ruido del magnetómetro se alcanza antes que un punto final estable ha sido alcanzado o si los espectros de coercitividad cubren el mismo rango.

En estos casos se recomienda el uso de círculos de remagnetización. Si J_p y J_s están siendo desmagnetizadas simultáneamente los vectores resultantes después de cada desmagnetización definen un círculo mayor en la red estereográfica, el círculo de remagnetización. Mientras que las direcciones primarias y secundarias pueden ser definidas en forma única si un punto final estable es encontrado, con rangos de coercitividad apropiados, ellos no están definidos por el círculo de remagnetización, pero deben encontrarse en algún lugar sobre de ellos.

Si un estrato rocoso o estuco están magnetizados uniformemente, y poseen una magnetización remanente natural primaria y secundaria, los círculos de remagnetización obtenidos al desmagnetizar diferentes muestras coincidirán. Pero si existe dispersión en alguna de las componentes de la magnetización, los círculos no coincidirán, pero tenderán a converger en un punto o polo. Dicho punto o su antipolo indica la dirección de una de las magnetizaciones.

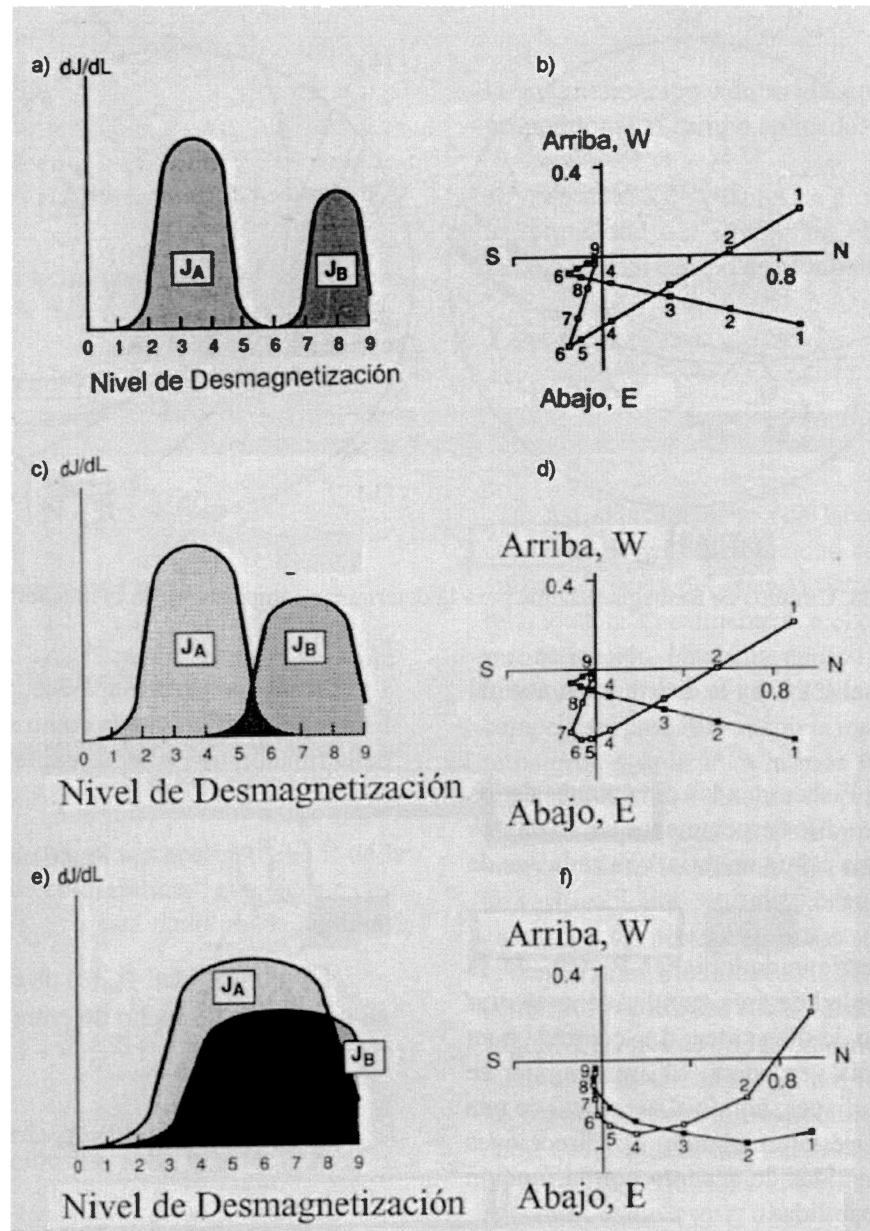


Fig. 26. Representación esquemática de traslape de espectros de desmagnetización (modificado de Butler, 1992).

g) Métodos estadísticos en paleomagnetismo

Dada la naturaleza de los datos paleomagnéticos es necesario el empleo de técnicas estadísticas para su análisis. La estadística empleada para determinar direcciones medias en los vectores de magnetización como en los polos paleomagnéticos es de tipo bidimensional. La más utilizada es la de Fisher (1953), basada en suponer a los vectores de magnetización distribuidos en la superficie de una esfera. Dado que en este trabajo empleamos esta última, haremos de ella una breve descripción, pero existen otros métodos como

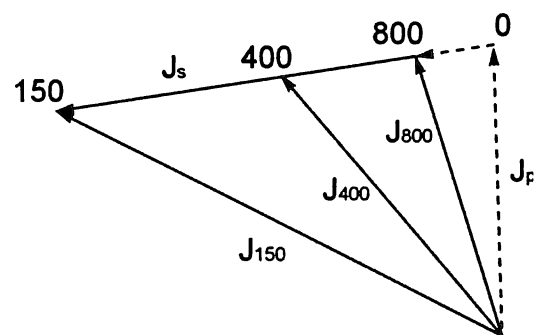


Fig. 27. Determinación de la dirección e intensidad de una magnetización secundaria cuando la primaria es constante en un rango del campo alterno aplicado.

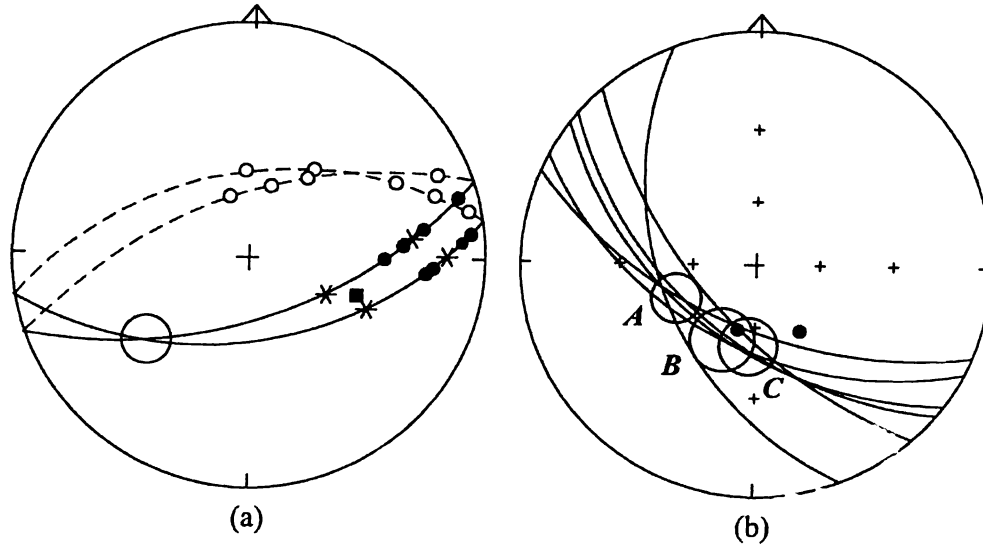


Fig. 28. Círculos de Remagnetización para la determinar componentes de la magnetización.

los de Roberts y Ursell(1960) y la distribución normal bidimensional.

La distribución Fisher ve a las direcciones de los vectores de MRN de varios especímenes como puntos en la superficie de una esfera unitaria, con cada una de las direcciones con peso unitario.

La función de densidad Fisher $P_{dA}(\theta)$, da la probabilidad por unidad de área angular de encontrar una dirección dentro de dicha área, dA , centrada a un ángulo θ de la media verdadera. El área angular se expresa en estereoradianes, donde el área total de una esfera unitaria son 4π estereoradianes. Las direcciones se encuentran distribuidas de acuerdo con la función de densidad de probabilidad:

$$P_{dA}(\theta) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh(\kappa)} \exp(\kappa \cos \theta) , \quad (35)$$

donde θ es el ángulo a la dirección verdadera, (osea cero en este caso) y κ es el parámetro de precisión; esto es una medida de la concentración de la distribución alrededor del valor medio, creciendo a mayor concentración.

Si ξ se toma como el ángulo azimutal alrededor de la dirección media verdadera, la probabilidad de una dirección dentro de un área angular dA , puede expresarse:

$$P_{dA}(\theta)dA = P_{dA}(\theta) \sin \theta d\theta d\xi. \quad (36)$$

El término $\sin \theta$ aparece, ya que el área de una banda de ancho $d\theta$ varía como \sin . La normalización de la función de Fisher se expresa:

$$\int_{\xi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} P_{dA}(\theta) dA = P_{dA}(\theta) \sin \theta d\theta d\xi = 1.0 \quad (37)$$

La probabilidad $P_{d\theta}(\theta)$ de encontrar una dirección en una banda de ancho $d\theta$ entre θ y $\theta + d\theta$ están dadas por:

$$\begin{aligned} P_{d\theta}(\theta) &= \int_{\xi=0}^{2\pi} P_{dA}(\theta) dA = 2\pi P_{dA}(\theta) \sin(\theta) d\theta = \\ &= \frac{\kappa}{2 \sinh(\kappa)} \exp(\kappa \cos \theta) \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad (38)$$

y los ángulos de porcentaje, donde la dirección media verdadera se encuentra en ese margen puede calcularse y algunos de los más comunes se muestran a continuación:

$$\theta_{50} = \frac{67.5^\circ}{\sqrt{\kappa}}, \theta_{63} = \frac{81^\circ}{\sqrt{\kappa}}, \theta_{95} = \frac{140^\circ}{\sqrt{\kappa}}. \quad (39)$$

La dirección media puede calcularse mediante las siguientes expresiones:

$$D = \tan^{-1} \frac{\sum m_i}{\sum l_i} \quad (40)$$

$$I = \frac{\text{sen}^{-1} \sum n_i}{R} \quad (41)$$

$$R = \sqrt{\left(\sum l_i\right)^2 + \left(\sum m_i\right)^2 + \left(\sum n_i\right)^2} \quad (42)$$

y donde l_i, m_i, n_i son los cosenos directores de la i ésima dirección.

Fisher demostró que la estimación del parámetro de precisión κ es:

$$\kappa = \left(\frac{N-1}{N-R} \right) \quad (43)$$

cuando se conoce la dirección verdadera, o

$$\kappa' = \frac{N}{N - R \cos \varpi} \quad (44)$$

donde ϖ es el ángulo entre la dirección verdadera y las medias estimadas.

Para darse ya una dirección media, debe ir de la mano con un límite de confiabilidad, que en este caso es el llamado $\alpha_{95} = \alpha_{(1-p)}$ y está dado por la siguiente expresión:

$$\cos \alpha_{(1-p)} = 1 - \frac{N-R}{N} \left\{ \left(\frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right\} \quad (45)$$

una buena aproximación si $\kappa \geq 10, N \geq 10$.

h) Determinación de paleointensidades

De igual forma que en el método de determinación de direcciones es posible determinar la intensidad del campo magnético en el pasado, ya que los mecanismos por los cuales adquieren la magnetización primaria se pueden relacionar de manera lineal con el campo aplicado, en el caso de remanencias térmicas y cuando el campo es de baja intensidad como es el caso del campo terrestre, así

$$M_{MRN} = \alpha_0 B_0, \quad (46)$$

esto es la Magnetización remanente natural de la muestra que es proporcional a la intensidad del campo en el pasado

$$M_{lab} = \alpha_{lab} B_{lab} \quad (47)$$

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

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

Y por tanto

$$B_0 = \frac{M_{MRN}}{M_{lab}} B_{lab} \quad (48)$$

Así, si la remanencia del laboratorio tiene la misma constante de proporcionalidad con respecto al campo aplicado que la del pasado, las remanencias estarían relacionadas linealmente con el campo aplicado y si la magnetización remanente natural tiene una sola componente, todo lo que se necesitaría hacer para obtener el campo en el pasado es medir la magnetización remanente natural, y aplicar a la roca una remanencia en el laboratorio para obtener la proporcionalidad entre ambos campos (ec.48). Pero en la práctica no es tan simple y debe verificarse. Un método empleado es el de verificaciones con calentamientos parciales, esto es calentar las muestras en pasos sucesivos aumentando la temperatura, modificando la MRN con magnetizaciones térmicas parciales con el fin de establecer la relación M_{MRN}/M_{lab} , antes de que se presente una alteración. Este método es el Thellier-Thellier(1959), que asume que las remanencias térmicas adquiridas por enfriamiento entre cualesquiera dos intervalos son independientes de aquellas adquiridas entre otros dos cualesquiera, (Ejemplo. Entre 450°C y 500°C y entre 100°C y 150°C) como también que la remanencia térmica total es la suma de todas las parciales.

La modificación de R.S. Coe (1967) al método de Thellier sustituye el enfriamiento en campo cero por el primer paso de calentamiento permitiendo la medida directa de la MRN después de cada paso. Así

$$M_{inicial} = M_{MRN} \quad (49)$$

$$M_{secundaria} = M_{MRN} + M_{pTRM} \quad (50)$$

Así por simple resta de vectores el pTRM puede ser obtenido (Figura 29) y al graficarse contra la MRN se obtiene un diagrama de Arai (Figura 30).

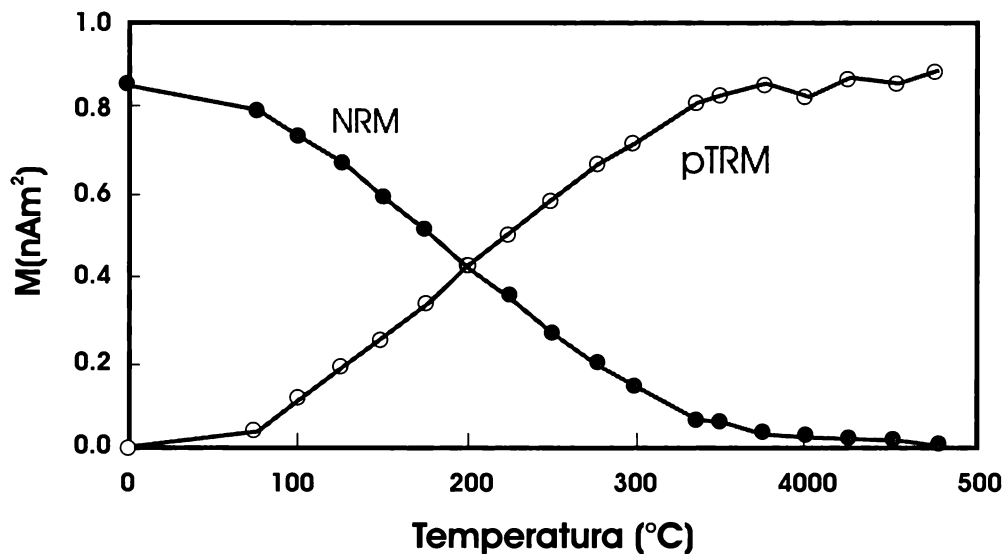


Fig.29. Ejemplo del método Thellier-Thellier para la determinación de paleointensidades. a)Proceso de desmagnetización de una muestra (NRM –círculos relleno negro) y de adquisición de magnetizaciones térmicas parciales (pTRM-círculos relleno blanco) (Tauxe,2005).

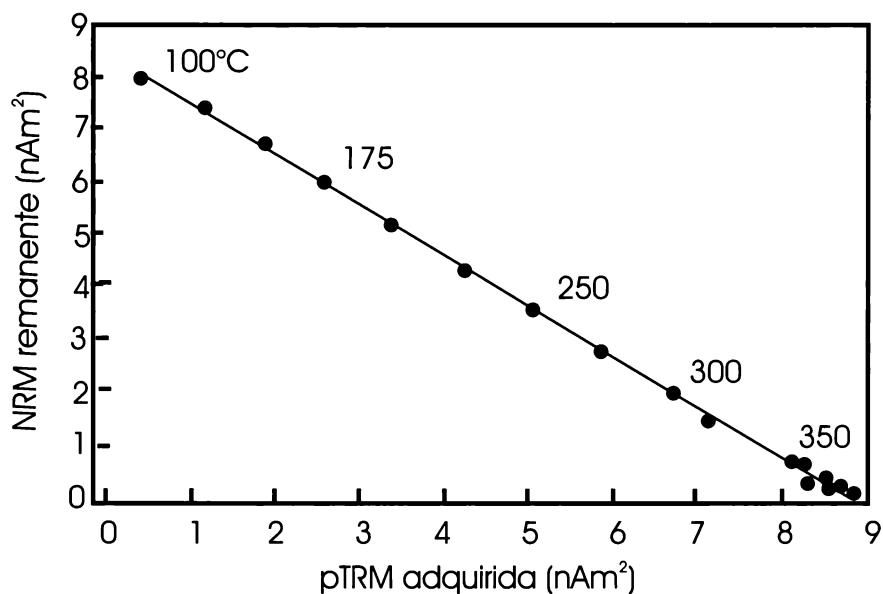


Fig. 30. Gráfica de Magnetización remanente vs adquisición de magnetización térmica parcial (pTRM) o de Diagrama de Arai (Tauxe,2005).

Al repetirse el proceso a diversas bajas temperaturas podemos determinar cuando la capacidad de guardar remanencia de la muestra ha cambiado y con ello la elección de las muestras para ser empleadas, ya que aquéllas que presentan cambios deben de ser eliminadas pues no muestran reversibilidad y los puntos en los diagramas de Arai no serán líneas rectas.

4. ARQUEOMAGNETISMO

a) Fundamentos

El arqueomagnetismo es el estudio de materiales arqueológicos que contienen óxidos de hierro y por tanto pueden registrar la variación del campo geomagnético o ser caracterizados mediante experimentos de propiedades magnéticas.

Las investigaciones arqueomagnéticas pueden ser:

- 1) estudios de las variaciones espacio-temporales del campo geomagnético en el área de interés
- 2) fechamiento de estructuras y eventos
- 3) identificación de instrumentos que indicarían el conocimiento del campo geomagnético por diversas culturas
- 4) el estudio de orientaciones de construcciones
- 5) propiedades magnéticas de materiales empleados para la elaboración de objetos con el objetivo de identificación de fuentes

b) Variaciones espacio-temporales del campo geomagnético en sitios arqueológicos

En el caso de los materiales arqueológicos como hornos, fogones, comales, temazcales, pisos, techos y muros expuestos al fuego, guardan al momento de su última exposición la dirección e intensidad del campo magnético presente, como lo ilustra la Figura 31.



Fig. 31. Ilustración del proceso de adquisición de magnetización termorremanente en la pared de un horno.

También es posible el empleo de indicadores estratigráficos como flujos de lava, piroclásticos y de caída que cuenten con fechamientos.

En ambos casos la magnetización adquirida es de tipo termorremanente y es posible obtenerla mediante los métodos paleomagnéticos. Es importante contar con un número suficiente de muestras, limitante principal en los estudios arqueomagnéticos, como también contar con fechamientos de buena calidad y en número suficiente.

Los estudios de variación secular nos permiten establecer un marco de referencia temporal y por tanto un método de fechamiento. Cox y Doell (1960) observaron que los polos virtuales geomagnéticos de observatorios en todo el mundo son cercanos al polo geomagnético actual. La mayoría de los datos arqueomagnéticos están concentrados en Europa. Se sugiere que una ventana de 100 años para polos recientes puede promediar los efectos de las variaciones del campo no dipolar (Barbetti, 1977).

Para ello se construye una curva de variación secular en el caso de cambios en dirección, como la que se muestra en la Figura 32, para Teopancazco (Wolfman, 1990), pues como ya se mencionó la dirección del campo es dependiente de la posición geográfica.

Los estudios de variaciones de la intensidad del campo geomagnético en tiempos arqueológicos pueden efectuarse sobre una gran cantidad de materiales, como fragmentos de cerámica, ya que no se necesita que estén orientados. El método fue desarrollado por Thellier en

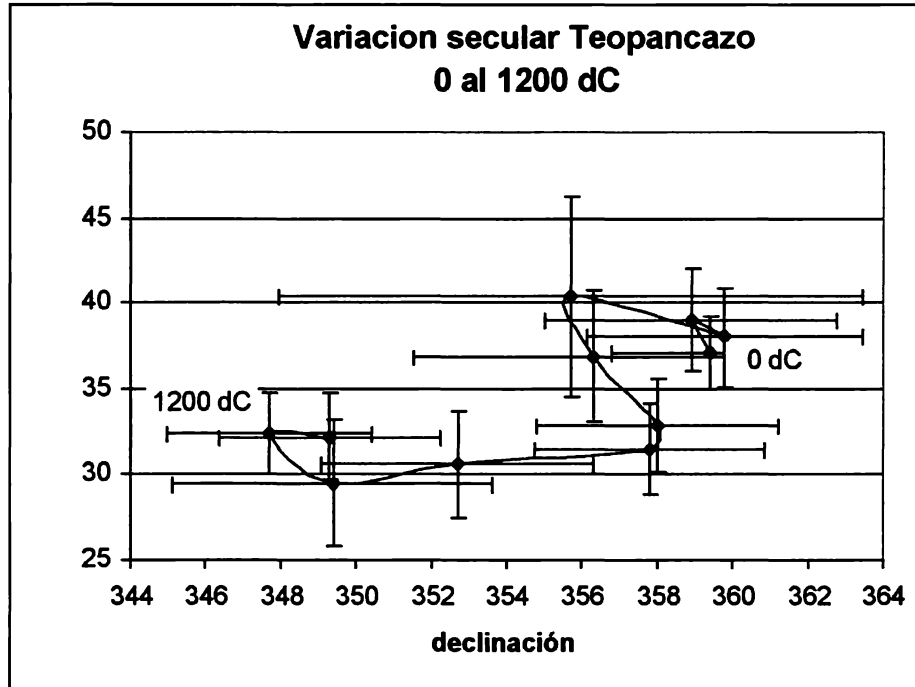


Fig. 32. Variación secular para Teopancazco, utilizando promedios móviles con una ventana de 100 años utilizando datos de Wolfman, 1990 y Hueda *et al.*, 2004.

1959 (a,b). La hipótesis de que el campo es dipolar, geocéntrico y axial, establece que las mediciones de la intensidad del campo geomagnético pasado son función sólo de la latitud y de la magnitud del momento dipolar de la Tierra. Por tanto las mediciones de paleointensidades sobre todo el mundo pueden ser normalizadas calculando un momento dipolar

equivalente o momento dipolar virtual (VDM). De igual manera que en el caso de los VGP para arqueomagnetismo los momentos virtuales dipolares pueden ser promediados en intervalos de cientos de años. A continuación en la Figura 33 se muestra la desarrollada por McElhinny y Senayake (1982) para los últimos 10 000 años con una ventana de 500 años.

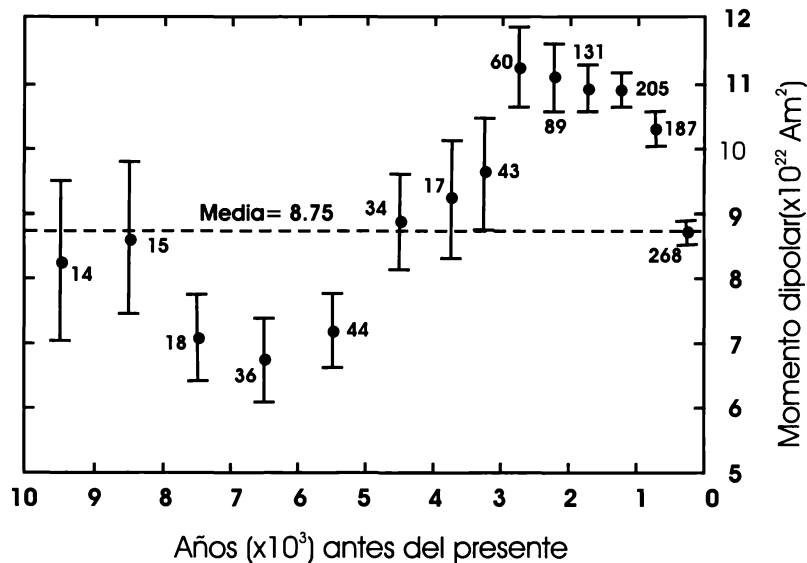


Fig. 33. Variación en el tiempo del momento dipolar global en promedios de 500 años del año 0 al 4000 años antes del presente y después en promedios de 1000 años del 4000 a 10 000 años antes del presente. En cada punto se muestra el número de medidas promediadas y el α_{95} correspondiente (McElhinny y Senayake, 1982).

El valor promedio para los últimos 10 000 años en intervalos de 1000 años es de $8.75 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ con una desviación estándar del 18%, que puede ser atribuida a fluctuaciones de la intensidad del dipolo. Cox (1968) denotó que las variaciones en el momento dipolar muestra una periodicidad entre 8000 y 9000 años con un máximo de 1.5 y un mínimo de 0.5 veces el valor del momento dipolar actual.

Pero los datos disponibles anteriores a 10 000 años antes de presente no muestran periodicidad, como tampoco los disponibles para el intervalo de 0-5 millones de años (Kono, 1972; McFadden y McElhinny, 1982; Merrill *et al.*, 1998).

Otra aplicación en arqueología de la remanencia térmica es para reconstruir piezas, ya que cada fragmento guarda la dirección del campo y como en un rompecabezas debe coincidir (Figura 34).

Recientemente fue descrita la remanencia pictórica o PiRM (Chiari y Lanza, 1997), ésta se debe a que en la antigüedad los pigmentos se realizaban con minerales con altos contenidos de óxidos de hierro, como la hematita que era molida y disuelta en líquido. Estos minerales pueden orientarse con el campo magnético

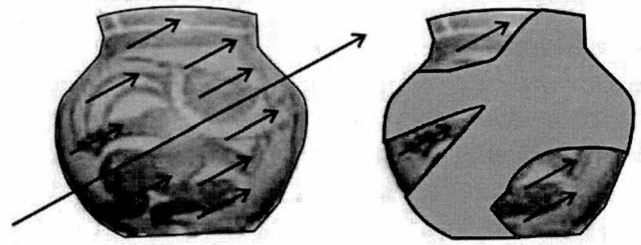


Fig. 34. Esquema de posible reconstrucción de pieza por métodos arqueomagnéticos.

al momento de aplicarse y guardar dicha información al momento de secarse.

El registro de la dirección de la magnetización depende de la viscosidad, contenido de hematita y tamaño del grano, como también de las características de la superficie en que fue aplicada, como rugosidad y porosidad. Errores sistemáticos pueden esperarse debido a la interacción entre granos y por el hecho de que es una capa muy fina. Las direcciones obtenidas para los mismos sitios con otros métodos arqueomagnéticos muestran precisiones similares, y se amplía la cantidad de datos que pueden ser obtenidos.

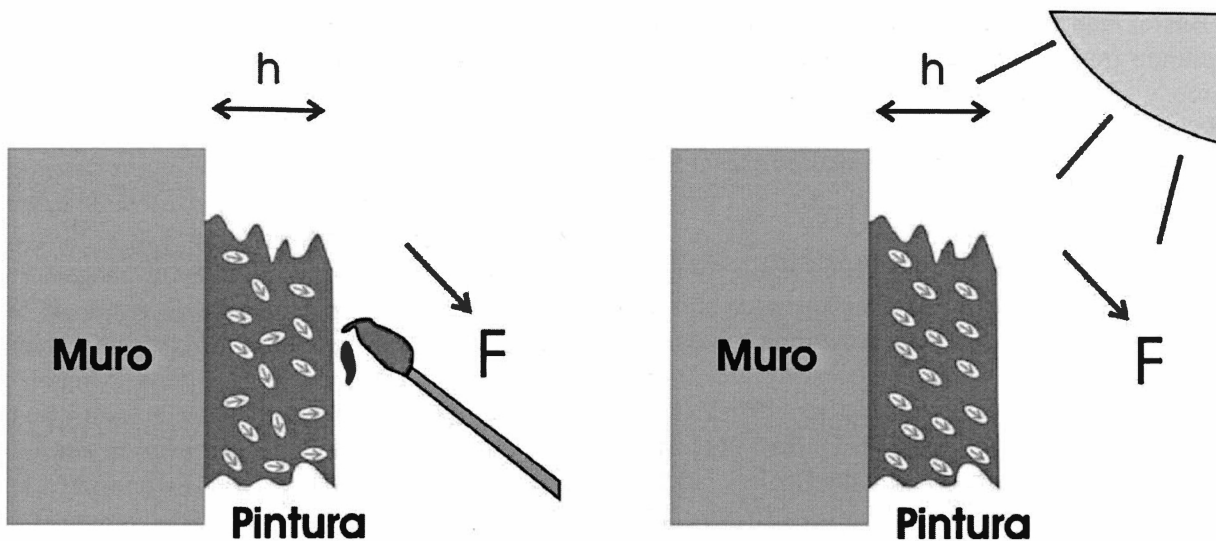


Fig. 35. Esquema que muestra el proceso de la adquisición de la magnetización pictórica remanente (modificado de Chiari y Lanza, 1997).

5. INVESTIGACIONES ARQUEOMAGNÉTICAS EN MÉXICO

a) Antecedentes

Mesoamérica es un área comprendida por el centro y sur de México, Guatemala, Belice, El Salvador y oeste de Honduras donde la civilización se desarrolló entre los años 2000 aC y 1521 dC. La frontera norte comprende los estados de Michoacán, Hidalgo, México y Veracruz.

La cronología en Mesoamérica ha estado basada en secuencias estratigráficas ajustadas mediante cerámica y estilos arquitectónicos y fechamientos absolutos mediante C^{14} . Las diversas correlaciones entre los calendarios mayas y cristianos, fechamientos anómalos de C^{14} , el mejoramiento de las técnicas de C^{14} y el desarrollo de otras técnicas de fechamiento como la hidratación de obsidiana y termoluminiscencia conducen a una revisión de dicha cronología, aunque existe consenso de varias fronteras bien delimitadas. En las investigaciones arqueológicas se está empleando cada vez más al arqueomagnetismo ya que es una herramienta que puede proveer de una precisión no alcanzada aún por los métodos radiométricos.

Básicamente la cronología de Mesoamérica comprende tres grandes períodos: el Preclásico, el Clásico y el Posclásico. El Preclásico comienza alrededor del 2000 aC y termina alrededor del 300 dC. El Clásico del 300 al 900 dC y el Posclásico que termina en el 1521 dC.

Nagata y colaboradores en 1965 realizaron las primeras investigaciones arqueomagnéticas en México (Urrutia, 1975), que consistieron en determinaciones de paleointensidad del campo geomagnético sobre alfarería de Cuicuilco en el sur de la ciudad de México y, como también de basaltos y rocas piroclásticas del Xitle (Tabla A.1a Apéndice 1). Bucha y colaboradores en 1970 también realizaron determinación de paleointensidades en siete sitios arqueológicos (A.1b, Apéndice 1).

Coe en 1967 reporta que un fragmento denotado M-160 podría ser una brújula flotante. El fragmento fue encontrado en San Lorenzo Tenochtitlan, Veracruz, sitio olmeca del Formativo temprano (C^{14} 1400 al 1000 aC), tiene 34 mm de longitud máxima y 28 de mínimo.

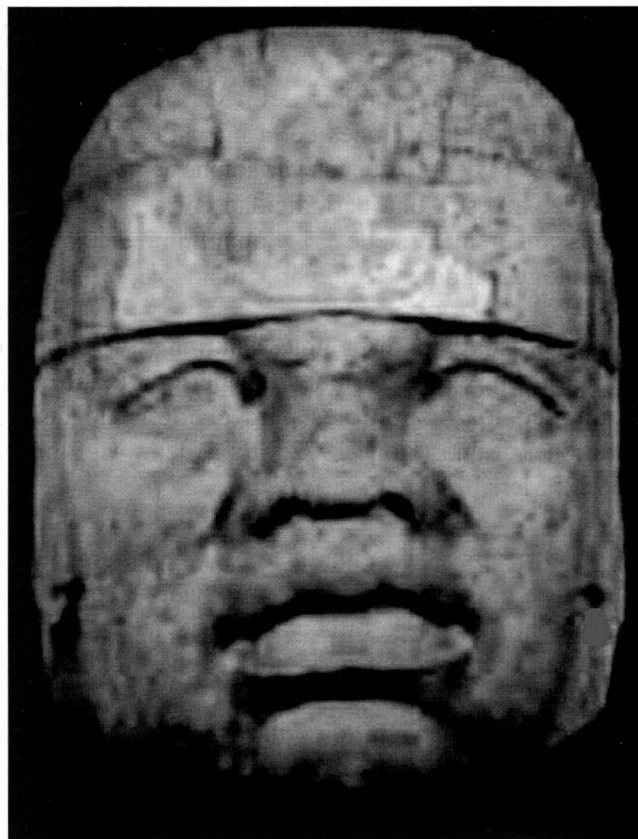


Fig. 36 Cabeza Olmeca.

Su cara lateral es un trapecio con 9 mm de lado superior y 8.5 mm de inferior, laterales de 4 mm y 3 mm.

Carlson (1975) realiza un análisis más detallado del fragmento M-160 que incluye experimentos de flotación en mercurio y en una estera de corcho sobre agua, espectroscopia Mössbauer y determinaciones del momento magnético. Mediante un magnetómetro de giro SM2, encontrándose que el vector de momento magnético cae cercano al plano de flotación del artefacto. Los valores medios de las componentes del vector magnético $m_x = 0.139$ emu, $m_y = -0.637$ y $m_z = 0.887$ enu. EL arco tangente (m_y/m_z) da un azimuth geomagnético de 35.7° , que es consistente con las determinaciones en flotación y espectroscopia Mössbauer. El arco tangente (m_x/m_z) da un ángulo de 8.9° por debajo del plano de flotación y-z.

La espectroscopia sin ser concluyente identificó a rocas del valle de Oaxaca como las posibles fuentes para la elaboración de estos artefactos. Por tanto Carlson concluye que es una brújula de primer orden, esto es que siempre muestra una misma orientación,

en este caso 35.5° al NW del norte magnético, que la pieza fue elaborada de manera tal que el momento magnético se encuentra en el plano de flotación y que la pieza completa, del doble de longitud, probablemente apuntaría al Norte-Sur magnético.

Malmstrom habiendo leído los reportes de Coe y Carlson, durante sus trabajos de excavación en Izapa, Chiapas encontró evidencias de que del conocimiento del magnetismo en el Formativo tardío y de su asociación con el instinto de anidamiento de las tortugas marinas. La evidencia es una escultura realizada en basalto que representa la cabeza de una tortuga y que al moverse con una brújula Brunton alrededor de la misma, siempre se desvía indicando la punta de la nariz del quelonio. También encontró otra pieza de basalto en el extremo oeste del centro ceremonial que

constituye un altar y que es una tortuga y a pocos metros al sur del mismo otra pieza basáltica de un solo bloque que corresponde con un caparazón de tortuga que podía ser llenado con agua en las estaciones de lluvia y constituir el recipiente de una brújula flotante. EL uso de tortugas en este tipo de esculturas muestra que los habitantes de Izapa estaban impresionados por las habilidades para navegar de las tortugas (Carr, 1967). Debe mencionarse que otras esculturas como la cabeza de una serpiente también se encontraban cercanas a la de tortuga y no mostraba tales características.

Daniel Wolfman en 1969 tomó las primeras muestras para fechamiento arqueomagnético como parte de su trabajo doctoral que publicó en 1973, donde revaluó la cronología de Mesoamérica entre el año 1 y el 1200 dC, claro que como él mismo menciona el

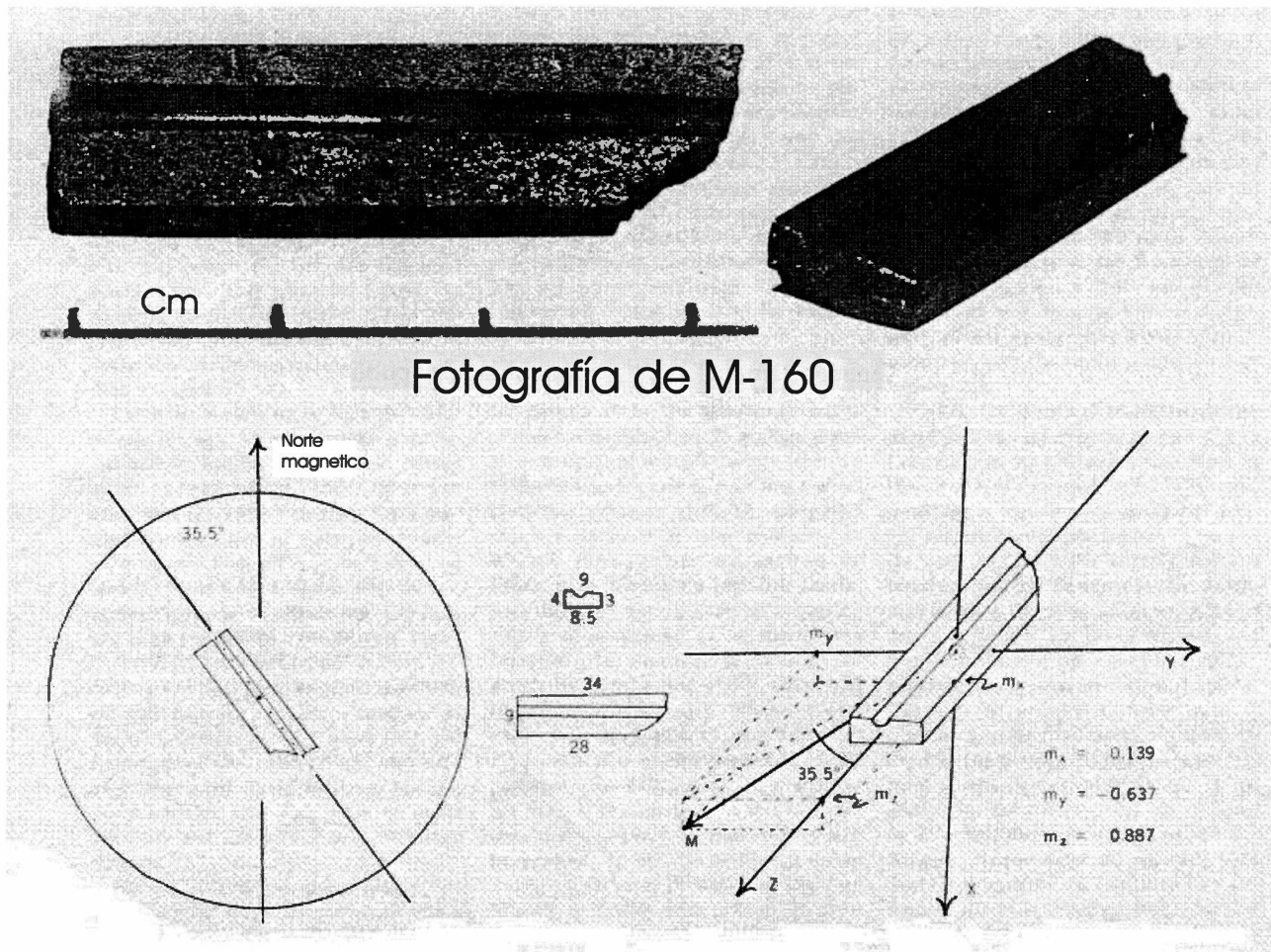


Fig. 37. Vistas de Pieza M-160, dimensiones en cm. Parte inferior de la figura: A la izquierda diagrama de experimento de flotación mostrando las orientaciones observadas de 35.5° W del norte magnético. Centro: Esquema de vista superior y lateral de M-160 con dimensiones en mm. Derecha: Momento magnético total M y sus componentes. La dirección de M es tal que y - z está en el plano de flotación, y el eje z es paralelo a la incisión de la pieza. El dibujo no se encuentra a escala (Carlson, 1975).



Fig. 38. Cabeza de tortuga con la aguja de la brújula apuntando hacia el Sur (tomado de Malmstrom, 1976).

método arqueomagnético es dependiente de los resultados de radiocarbono.

Los sitios muestreados por Wolfman fueron en el centro de México: Teotihuacan, Tenango, Huapalco, Tula, Manzanillo, Cerro Zapotecas. Del valle de Oaxaca: Monte Albán, Lambityeco, Tierras Largas, Tomaltepec y Brawbehl; El Zapotal de la Costa del Golfo, del centro y occidente de Chiapas Chachi, Mirador, Ocozocoautla y Panteón. En Guatemala Kaminaljuyú y El Portón, de Honduras Copán y de El Salvador: Tazumal, San Andrés y Trapiche.

Wolfman se basó en la distribución y orden cronológico de los polos virtuales geomagnéticos por estratigrafía, estilo de cerámica y arquitectónico y los fechamientos de C^{14} disponibles, reconociendo que son insuficientes para una descripción adecuada de la variación secular del campo geomagnético.

En la primera etapa del trabajo tomó 96 muestras a las que les determinó su magnetización remanente natural (NRM) y únicamente a dos especímenes se les desmagnetizó mediante campos alternos, con el fin de corroborar que las direcciones no sufrían cambios que pudiesen afectar la curva.

A partir de 1973 obtuvo 14 muestras más, las que fueron procesadas mediante campos alternos para obtener la magnetización característica. Comparaciones entre estos resultados y los previos mostraron concordancia, publicándose así una curva de deriva polar para Mesoamérica (Tabla A.2, Apéndice 1).

Urrutia y colaboradores (1981, 1986) investigaron las orientaciones de los edificios de ciudades prehispánicas, como parte de un proyecto de cooperación entre el Instituto de Geofísica y la Universidad de Sternwarte en Bonn, Alemania. El autor reporta que en varios sitios olmecas, entre ellos La Venta, Tabasco presentan ejes mayores orientados unos 8 grados al NW y de manera similar están algunas estructuras de la etapa formativa del Valle de Oaxaca. Ambos desarrollos corresponden a períodos entre 1000 aC y el año cero. También reporta que para el centro de Teotihuacan y en la zona maya Chichen-Itzá, Uxmal y Labná; las estructuras forman hasta 20 grados hacia el NE, pero que aún es aventurado asegurar que los cambios en las orientaciones corresponden a cambios en el campo debidos a la variación secular.

En el año 2000 gracias a los excelentes resultados de una tesis de Licenciatura en arqueología (Hueda,

2000) se reimpulsó la investigación de los materiales arqueológicos y el mejoramiento de una curva de variación secular para Mesoamérica (Hueda *et al.*, 2004). Ya se han concluido tres tesis de licenciatura en Física y se encuentran en proceso dos más.

b) Investigaciones recientes

Dado que una gran cantidad de construcciones en Mesoamérica están cubiertas por estucos realizados con cal, líticos y agua, era de gran interés realizar estudios de su contenido de minerales magnéticos que pudiesen guardar la orientación del campo geomagnético al momento de ser aplicado y secarse, como también que los instrumentos pudiesen medir la magnetización remanente.

Cuando estos estucos son expuestos al fuego adquieren una magnetización termorremanente que ha sido ampliamente empleada en fechamientos arqueomagnéticos. Uno de los objetivos de las investigaciones que iniciaron en 1999 sobre estucos era que dada la similitud con las rocas en el proceso de sedimentación, al momento del fraguado de los estucos, sí era posible que guardasen la orientación del campo magnético y que si dicha magnetización remanente podía ser medida. Pruebas fueron realizadas en estucos de la zona maya y del centro de México (Hueda Y., 2000). Se

encontró que las muestras del Templo Mayor tenían un mayor contenido de insolubles (50-70%), principalmente escoria volcánica que las de Playa del Carmen (20-30%), por la disolución con HCL al 10%. La medición de propiedades magnéticas de las muestra mostró que dado el mayor contenido de óxidos de hierro en las muestras de Templo Mayor presentaban una mayor señal magnética y magnetizaciones remanentes consistentes.

Se obtuvieron muestras en los sitios arqueológicos de Cacaxtla, Templo Mayor, Teopancazco y Xochicalco (Figura 39).

Durante el segundo muestreo en Teotihuacan fuimos acompañados por el Dr. Tarling de la Universidad de Plymouth (Figura 40).

Las muestras fueron tomadas adhiriendo un botón de madera mediante pegamento epóxico al sitio y orientándolo con brújula Brunton y Solar (Figura 41).

c) Teotihuacan 1999

Teotihuacan fue una ciudad mesoamericana caracterizada por un asentamiento denso, pluriétnico, centro artesanal, foco de una gran red de comercio y destino final de peregrinaciones religiosas. Su grandeza



Fig. 39 Ubicación de sitios en los que se han realizado investigaciones arqueomagnéticas.

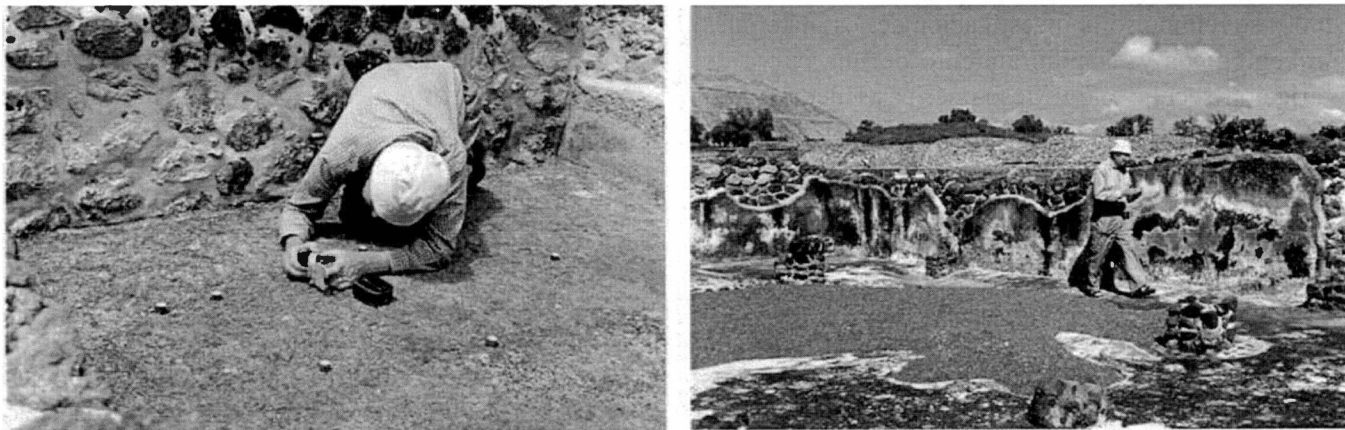


Fig. 40. Dr. Tarling orientando muestras en el conjunto Plaza Oeste de Teotihuacan.



Fig. 41. Adhesión de núcleos de madera para su orientación sobre paredes de horno en Guachimontones, Jalisco.

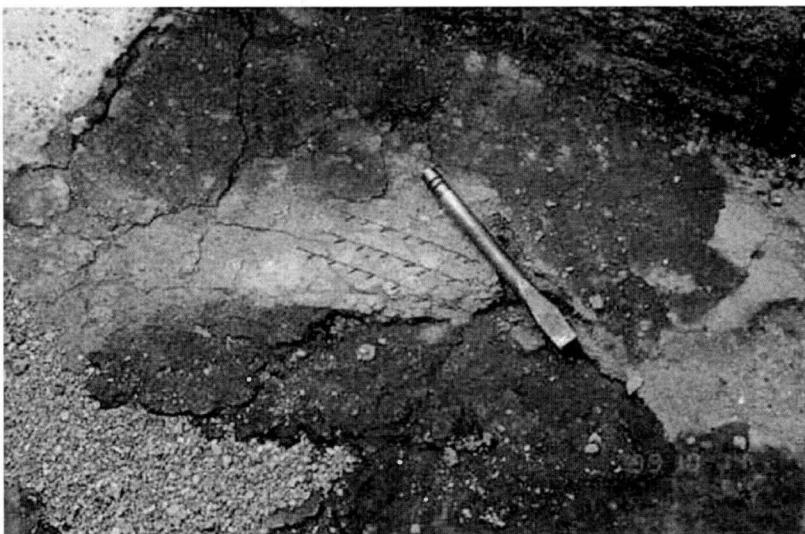


Fig. 42. Marcado de piso sobre su superficie para su orientación.

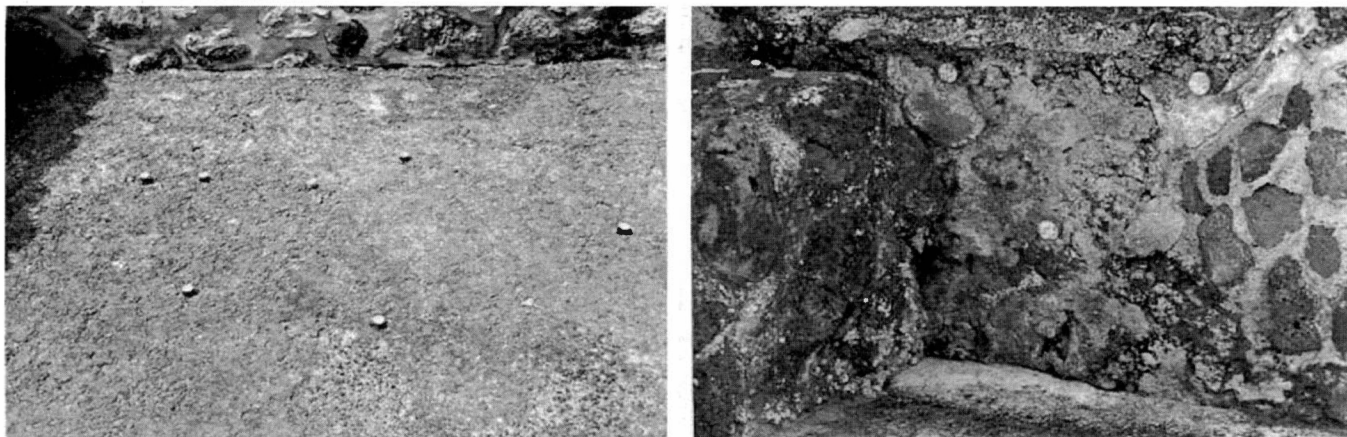


Fig. 43. Adhesión de núcleos de madera en pisos y muros en Teotihuacan, Conjunto Plaza Oeste.

y supremacía datan de principios de nuestra era y perduraron hasta el siglo VII (Manzanilla y López Luján, 2001). “La destrucción de la gran urbe fue por fuego, dismantelamiento, destrucción ritual, desmembramiento y saqueo” (Manzanilla, 2000a). Existen evidencias de fuego en la parte central de la ciudad, como son las estructuras de la Calzada de los Muertos (Millon, 1988). Vigas y morrillos carbonizados han sido encontrados en La Ciudadela (Jarquín y Martínez, 1982 y Jarquín, 2002), en Xalla (Manzanilla y López Luján, 2001), Teopancazgo (Manzanilla, 1998, 2000, 2000a) sobre el último piso de ocupación teotihuacana. Wolfman en 1969 y en 1973 tomó muestras para fechamientos arqueomagnéticos en Teotihuacan. Con el fin

de corroborar sus resultados debido al avance de los instrumentos de medida y de desmagnetizar muestras para obtener las direcciones características, ya que Wolfman únicamente había realizado algunos pasos de desmagnetización en 1 ó 2 especímenes se repitieron algunos sitios de muestreo. Las muestras tomadas en el centro de Teotihuacan por Wolfman reportan una media de 475 dC (Wolfman, 1990).

En el centro de Teotihuacan se obtuvieron cuatro muestras de estucos quemados (Figura 44) (Tabla A.3, Apéndice 1) y 26 muestras fueron procesadas mediante campos alternos y medidas por la Universidad de Plymouth. Los resultados se muestran en la Tabla 3.



Fig. 44. Muestreo de paredes y pisos quemados en el Complejo Plaza Oeste Teotihuacan.

Tabla 3

Direcciones características medias por muestra de Teotihuacan

MUESTRA	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
TE1	10	3.8	38.7	5.75	9.8740	71
TE2	7	147.2	-68.6	68.55	3.5357	2
TE3	3	2.4	43	15.18	2.9701	7
TE4	6	6.0	38.6	8.26	5.924953	67

A pesar de ser muestras quemadas, dos de ellas presentaron gran dispersión, una de ellas hubo de ser eliminada (TE2). Las restantes mostraron concordancia con la cronología del sitio y la curva de variación secular, Tabla 4.

La media de las fechas obtenidas 550 +/- 25 dC, para Ciudadela (TE1), Pirámide de la Luna (TE3) y Complejo Plaza W (TE4) corresponden a la fecha del gran incendio para Teotihuacan, obtenida de madera carbonizada (Beta 115497, Manzanilla, 2003).

Tabla 4

Fechas obtenidas mediante arqueomagnetismo (probables) fechas elegidas de acuerdo con la información de C¹⁴

Muestra	Fechas probables dC	Fechas elegidas dC
TE1	50-100, 350-425 525 - 575	525-575
TE3	425-513, 525-575	525-575
TE4	50-100, 425-430 513-525 550-575	525-575

d) Teopancazco 1999

Teopancazco es un conjunto residencial ubicado al sureste de la Ciudadela (Figura 45). Fue excavado en 1896 por Leopoldo Batres y actualmente ha sido excavado por la Dra. Linda Manzanilla dentro del proyecto: "Teotihuacan: elite y gobierno". Fechamientos arqueomagnéticos previos realizados por

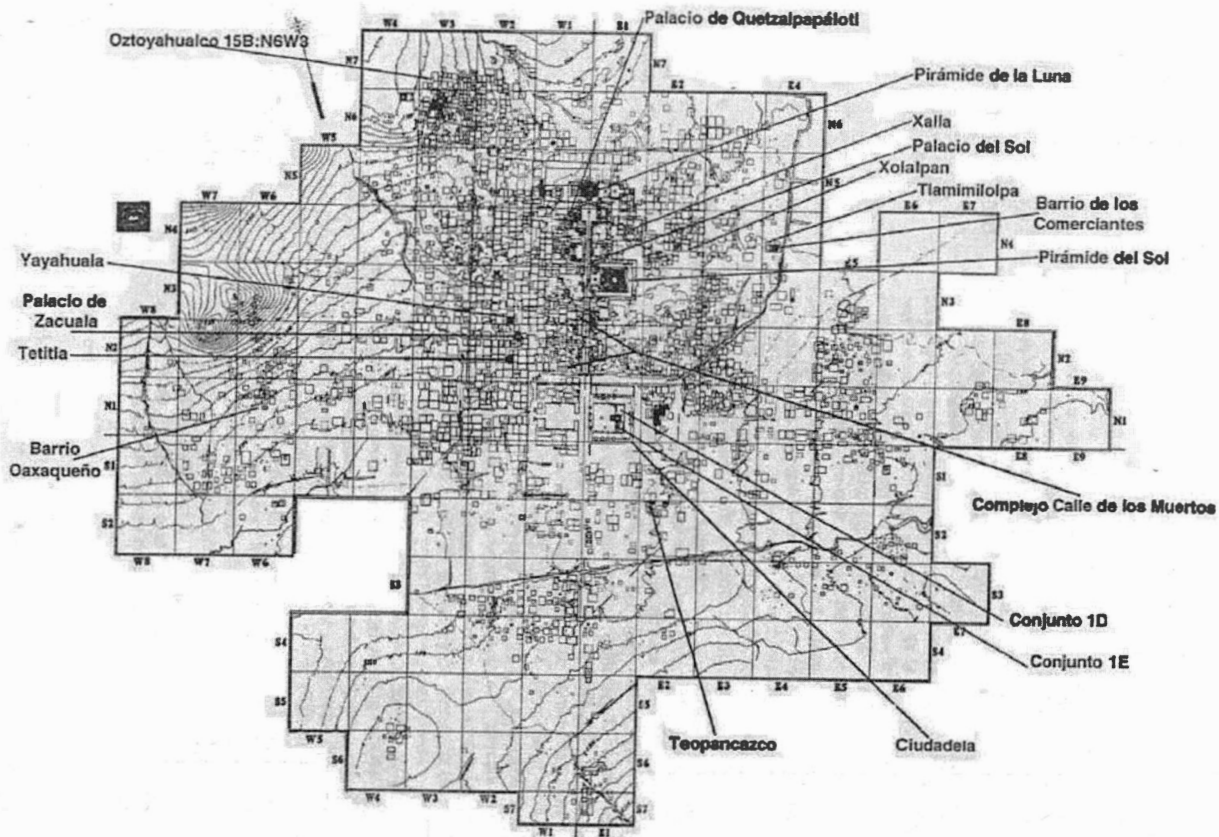


Fig. 45. Mapa de Teotihuacan (Manzanilla, 2003).

Wolfman (1990), se concentran en 475 dC, esto es Xolalpan Temprano, pero fechamientos de radio-carbono sobre madera carbonizada arrojan una fecha de 555 dC (Beta 115496, Manzanilla.2003).

Ocho muestras, 38 especímenes de muestras quemadas y no quemadas (Apéndice 1, Tabla A.4) fueron procesados mediante campos alternos, mostrando direcciones tendientes al origen o características, que pudieron ser determinadas mediante el método de componentes principales. Los resultados se muestran en la Tabla 5 y Figura 46.

Tabla 5

Direcciones características medias por muestra de Teopancazco

Muestra	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
TP2	1	351.7	34	-	-	-
TP6	35	359.8	43	15.18	2.9701	7
TP3	20	4.0	38.6	8.26	5.9245	67
TP7	5	353.9	41.1	32.08	4.1289	5
TP8	4	356.83	36.92	2.17	3.9983	1786

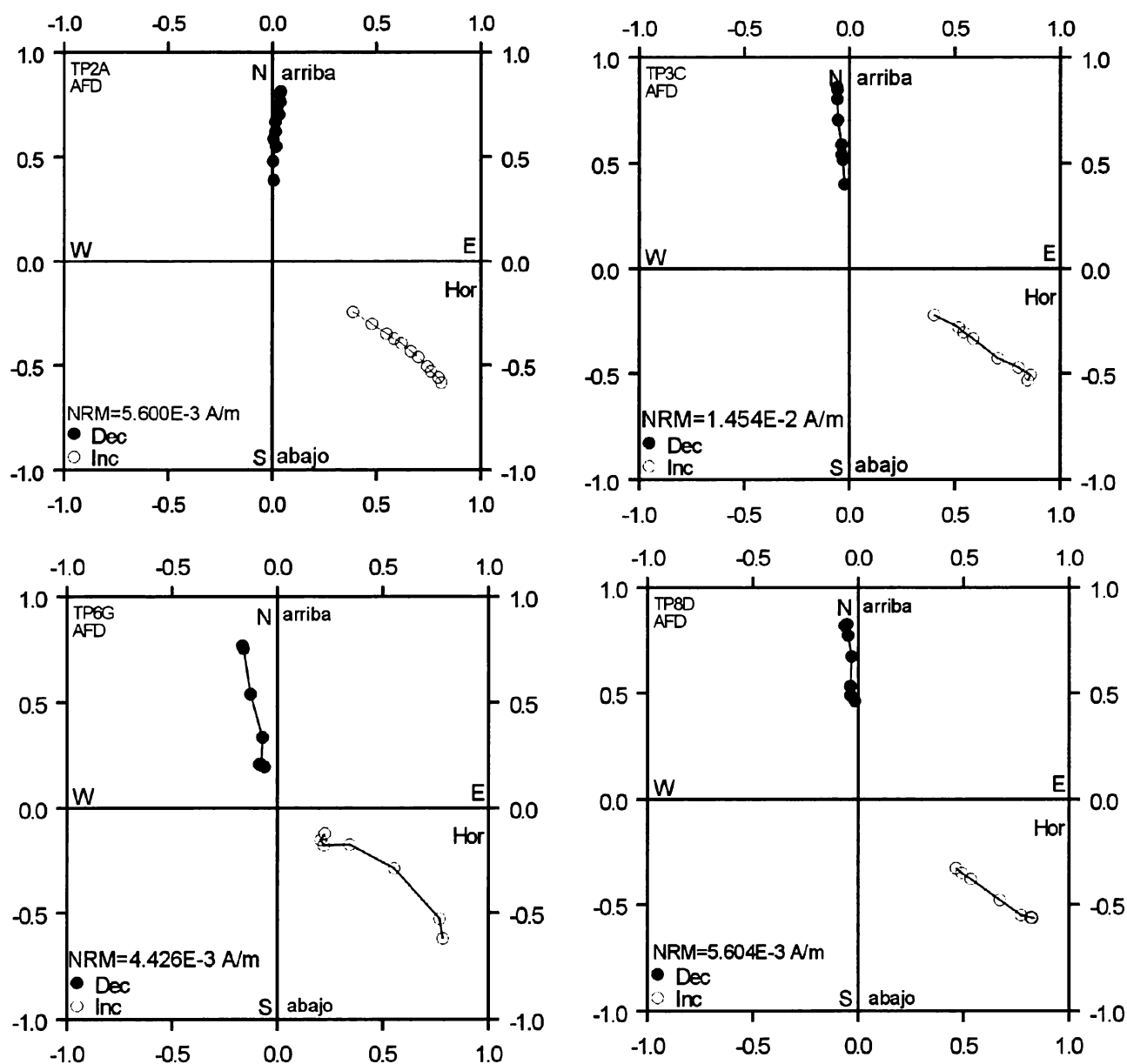


Fig. 46. Diagramas de Zijderveld de muestras de Teopancazco 1999.

También se realizaron estudios de propiedades magnéticas como susceptibilidad, anisotropía de susceptibilidad, ciclos de histéresis e IRM, en algunos casos a todos los especímenes o a un espécimen por muestra. Véanse las Figuras 47, 48, 49 y 50.

Los resultados mostrados en la Figura 48 y similares obtenidas para Teopancazco denotan que la mineralogía portadora de la magnetización son fundamentalmente titanomagnetitas; los experimentos de PIXE confirman la presencia de Titanio y Hierro.

La Figura 49 denota la mezcla de dominios sencillos y múltiples, a excepción de TP6.

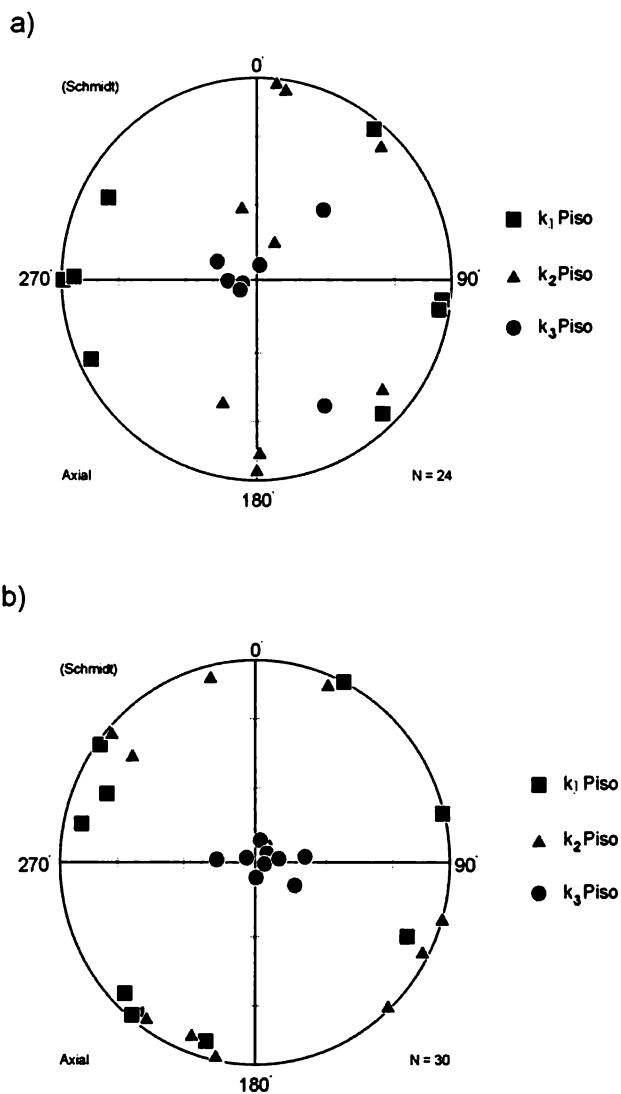


Fig. 47. Resultados de anisotropía de susceptibilidad magnética Teopancazco 1999.

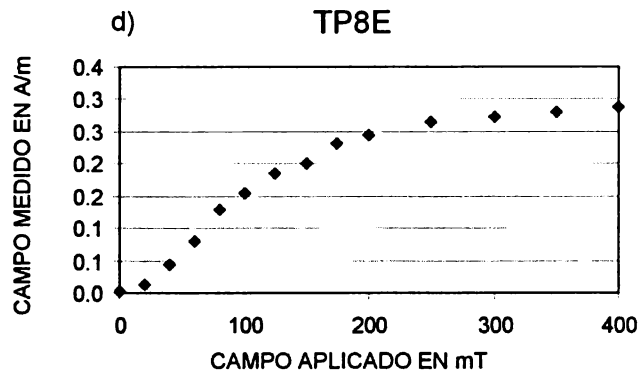
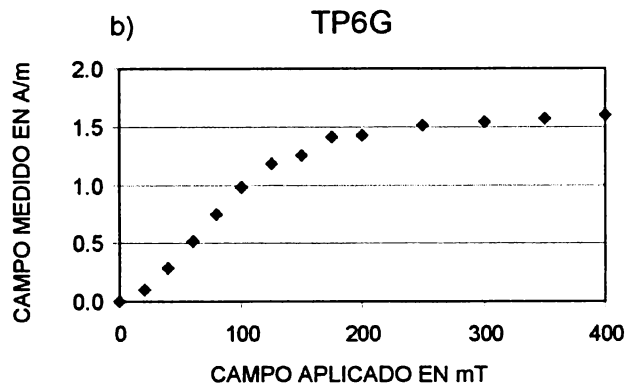


Fig. 48. Experimentos de IRM para muestras de Teopancazco 1999.

Muestras seleccionadas de Teopancazco y Templo Mayor fueron analizadas mediante PIXE para determinar las proporciones Fe/Ca, Ti/Ca y Ti/Fe. Estas proporciones junto con la susceptibilidad a baja frecuencia se muestran en la Figura 50. Podemos observar la correlación entre los valores de susceptibilidad y las proporciones determinadas mediante PIXE.

En la Tabla 6 se muestran las fechas probables obtenidas al comparar las direcciones medias de la Tabla 5 con la curva de variación secular.

Tabla 6

Fechas probables obtenidas mediante arqueomagnetismo

Muestra	Edades dC
TP2	350,550,850,1150
TP6	-25,425,850,1635
TP3	430,575,1675
TP7	550,850,950, 1200 ¿?
TP8	750,761,850,1240,1375, 1415

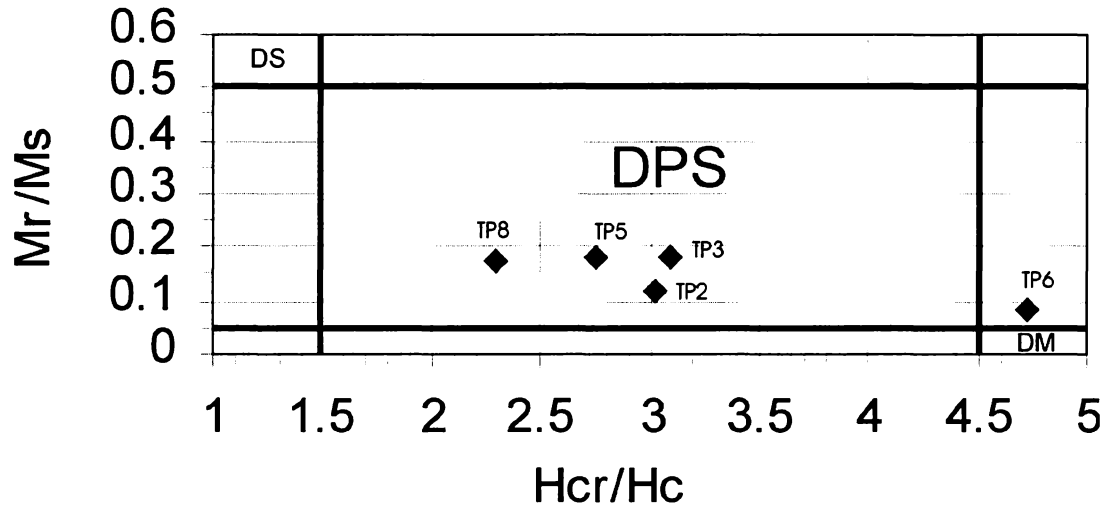


Fig. 49. Diagrama de Day para muestras de Teopancazco 1999.

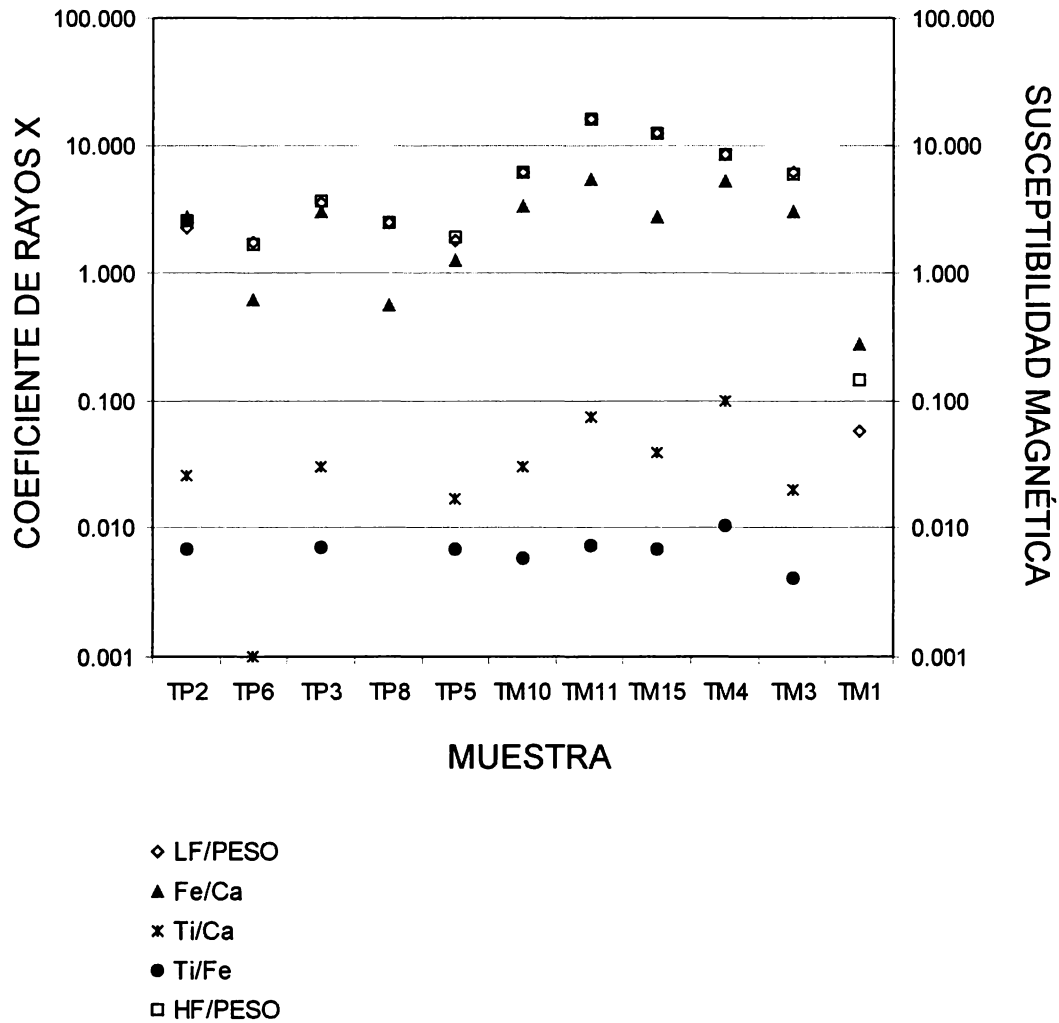


Fig. 50. Resultados de Pixe y susceptibilidad magnética para muestras de Teopancazco 1999 (TP) y Templo Mayor 1999 (TM).

A continuación muestro las fechas seleccionadas por la Dra. Manzanilla y fechamientos C¹⁴ del proyecto de Teotihuacan que hablan de la confiabilidad de los resultados obtenidos (Tabla7).

Tabla 7

Comparación de fechas obtenidas mediante arqueomagnetismo y datos de C¹⁴ o estratigráficos

Muestra	Edades dC	
TP2	350	C ¹⁴ intercept date 350 dC (Beta-132605)
TP6	425	Ocupación teotihuacana
TP3	575	C ¹⁴ intercept date 555 dC (Beta-115496)
TP7	850,950 ¿?	Posible reocupación Mazapa ¿?
TP8	1375, 1415	Reocupación Azteca

Las muestras TP7 y TP8 como puede verse en la Tabla A.4 del apéndice 1, corresponden a un mismo nivel dentro de un mismo cuarto, pero se tienen 2 agrupamientos de direcciones perfectamente distinguibles, lo que se atribuye a que uno no está quemado (TP7) y el otro sí (TP8), por lo que la primera se atribuye a la fecha de elaboración del piso y la segunda a la reocupación azteca. Los resultados se reportaron más ampliamente en la tesis de Arqueología de Hueda, 2000 y en el artículo de Hueda *et al.*, 2004.

e) Xalla 2001

Xalla es un conjunto que se encuentra al norte de la pirámide del Sol, pero alejado de la Calzada de los Muertos y se considera un posible Palacio de los Gobernantes (Manzanilla y López Luján, 2001). El conjunto tiene grandes dimensiones (174 m N-S y 213 m E-W), se encuentra amurallado, y cuenta con 29 edificaciones y 8 amplias plazas y probablemente cuente con gran antigüedad y prolongada historia constructiva (Manzanilla y López Luján, 2001). Existen fechamiento por radiocarbono de vigas y morrillos carbonizados que evidencian la reutilización de maderas cortadas en la Fase Tlamimilolpa temprana (200-250 dC, Ratray, 1981), época en que probablemente fue edificado Xalla, mientras que otras corresponden a Xolalpan temprana (350-550 dC, Ratray, 1981), probable época del último nivel constructivo (Manzanilla y López Luján, 2001).

En octubre de 2001 y bajo la dirección de la Dra. Manzanilla fueron colectadas muestras en el barrio de Xalla perteneciente a la ciudad de Teotihuacan. Quince muestras de las que se obtuvieron 84 especímenes, fueron procesadas mediante campos alternos (Tabla A.5 Apéndice 1, Figura 51). Los resultados se reportaron en la tesis de Física de Rodríguez (2003) (Tabla 8).

Los sitios fueron agrupados por etapas constructivas y calculadas las direcciones medias, véase la Tabla 9.



Fig. 51. Muestreo en Xalla 2001.

Tabla 8

Resultados por muestra de Xalla 2001

Muestra	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
Xa1	7	340.6	41.1	9.47	6.716	21
Xa2	8	336.8	42.6	7.33	7.802	35
Xa3	7	7.5	33.4	11.89	6.638	15
Xa4	9	359.3	38.8	5.91	8.834	48
Xa5	9	359.2	38.6	5.93	8.833	48
Xa6	9	332.6	38.7	8.29	8.687	26
Xa7	7	341.0	41.3	13.36	6.876	48
Xa8	6	-	-	-	-	-
Xa9	5	-	-	-	-	-
Xa10	5	---	---			
Xa11	4	47	39.3	20.42	3.784	14
Xa12	6	336.8	48.4	20.1	5.380	8
Xa13	4	350.0	66.2	28.93	3.596	7
Xa14	6	1.8	51.1	19.42	5.611	19
Xa15	6	359.3	41.4	29	3.592	7

Tabla 9

Resultados por etapa de Xalla 2001

ETAPA	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
PISO 1 NQ E4	2	345.9	39.4	32.69	1.967	31
PISO1 Q E4	4	352.4	40.5	10.8	3.928	45
Piso 1 NQ E2	1	341.0	41.3	8.8	6.876	48
PISO2 ROJ	1	47.0	39.3	20.42	3.784	14
PISO3	1	336.8	48.4	20.1	5.380	8
PISO4	1	350.0	66.2	28.93	3.596	7
PISO PZA	1	1.8	51.1	19.42	5.611	19

Observamos las grandes α_{95} correspondientes a muestras de pisos no quemados (1,2,3,4 y plaza), por tanto fue imposible determinar el fechamiento. Las edades obtenidas son correspondientes con el período de ocupación de la Ciudad. El piso 1 no quemado E4 (PISO 1 NQ E4, Tabla 9) que correspondería con la última etapa constructiva no fue posible determinarle

la edad y el quemado (PISO 1 Q, Tabla 10) al incendio ya sea debido a una revuelta interna o al acto ritual antes del abandono de la urbe (Manzanilla, 2003). Las fechas obtenidas para el piso 1 no quemado de la estructura 2, no corresponden con la estratigrafía.

f) Xalla 2003

En noviembre de 2003 de nuevo fuimos invitados a la temporada de excavación del proyecto de

Tabla 10

Resultados de edades para Xalla 2001

ETAPA	Fechas probables dC	Fechas elegidas dC
Piso 1 Q E4	550-575 575-650 1155 1375-1454 1460-1494	550-575
Piso 1 nQ E2	250-350 575-650 1155-1195	

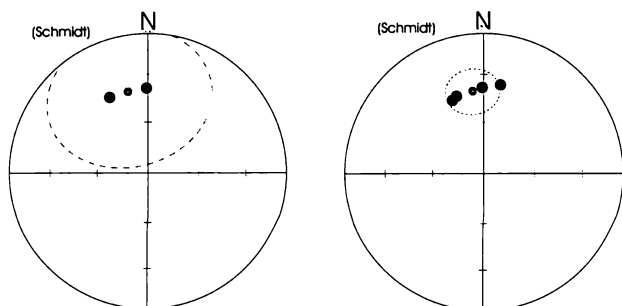


Fig. 52. Direcciones medias de las muestras PISO 1 No Quemado y Piso 1 Quemado en Xalla 2001.

Teotihuacan: elite y gobierno por parte de la Dra. Manzanilla. En compañía del Dr. Villalaín de la Universidad de Burgos (Figura 53) se tomaron 11 muestras de las que se obtuvieron 27 especímenes (Tabla A.6, Apéndice 1).

Los diagramas vectoriales mostraron direcciones tendientes al origen en su mayoría (Figura 54), por lo que las direcciones características fueron determinadas y los resultados se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11

Resultados por muestra de Xalla 2003

Muestra	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
X1	4	355.5	38.4	3.95	3.994	541
X2	4	354.7	36.1	4.88	3.991	355
X3	3	4.3	41.9	11.7	2.982	112
X4	1	353.5	41.2	-	-	-
X5	2	356.5	34.6	2.24	1.999	12373
X6	-	-	-	-	-	-
X7	1	343.5	39.3	-	-	-
X8	4	356.3	45.8	2.89	3.997	1006
X9	8	355.1	42.6	2.09	7.990	700
X10	-	-	-	-	-	-
X11	-	-	-	-	-	-

Las muestras como puede observarse en la Figura 54 presentaron claras tendencias al origen y dispersiones in situ α_{95} menores de 5.

Se obtuvieron las direcciones promedio por nivel con muy buenas agrupaciones (Figura 55, Tabla 12).

Tabla 12

Resultados por nivel Xalla 2003

ETAPA	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
PISO 1 NQ	5	356.8	38.5	3.57	4.988	331
Muros rojos	3	351.4	42.7	8.11	2.988	172

Tabla 13

Resultados de edades para Xalla 2003

ETAPA	Fechas probables dC	Fechas elegidas dC
PISO 1 NQ	350-425 525-575 750-850	525-575
Muros rojos	250-350 550-575 575-650 650-750 850-900	550-575

Un fechamiento 550 +/- 25 dC, que corresponde con la época del incendio y no la constructiva, por lo que es muy posible que a pesar de reconocerse como no quemado, si lo estuviera, ya que es coincidente con los resultados obtenidos en 2001, sobre el mismo piso, pero con evidencias de quemado.

Los resultados de ciclos de histéresis se muestran en la Figura 59, donde se observa predominancia de dominios pseudosencillos.

Los resultados se reportan más ampliamente en la tesis de Física de Sánchez-López (2005).

g) Teopanazco 2003

También Invitados por la Dra. Linda Manzanilla en noviembre de 2003 tomamos muestras nuevas en la Excavación de Teopanazco (Figura 56).

En total se obtuvieron 4 muestras, 17 especímenes (Tabla A.7, Apéndice 1) que fueron procesados mediante campos alternos.

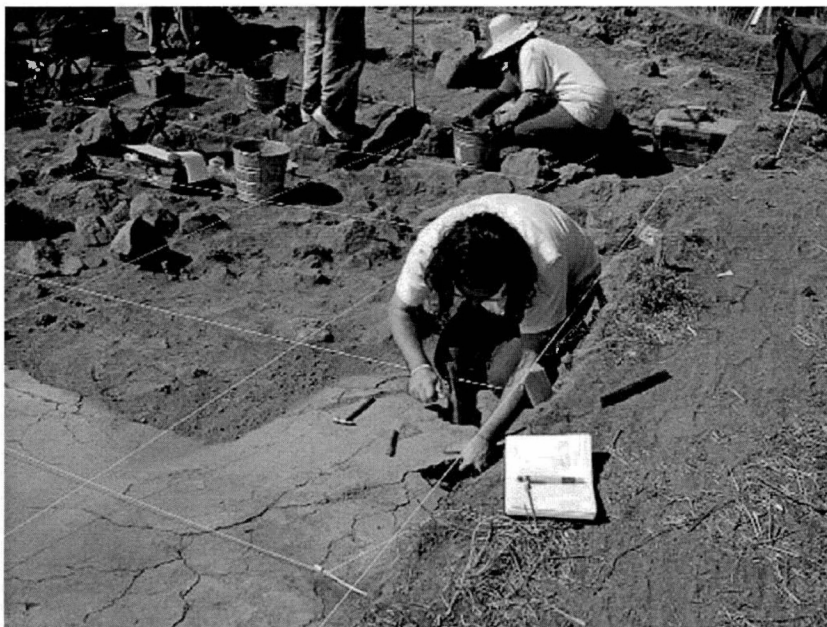


Fig. 53. Dr. Villalaín tomando muestra de piso en la excavación de Xalla.

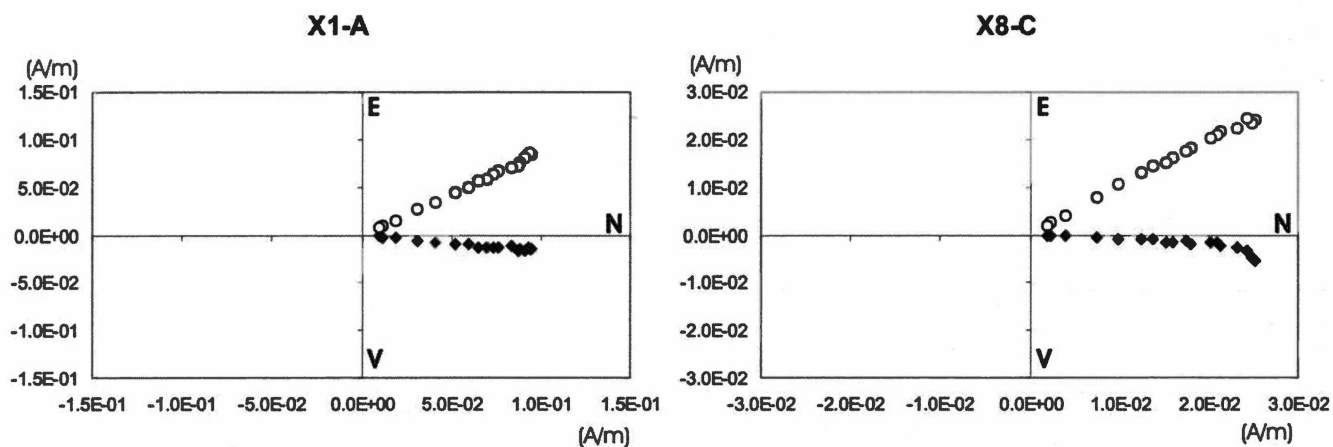


Fig. 54. Diagramas de Zijderveld de Xalla 2003.

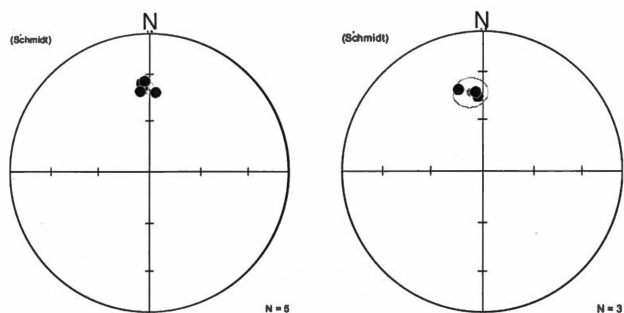


Fig. 55. Direcciones medias de Piso 1 No Quemado y de Muros Rojos en Xalla 2003

Se obtuvieron Diagramas de Zijderveld con tendencias al origen (Figura 57) y dos de ellas tuvieron direcciones medias con α_{95} menores de 10 (Tabla 14).

Tabla 14

Resultados por muestra de Teopanazgo 2003

Muestra	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
T1	6	353.9	46.3	4.23	5.9801	251
T2	4	346.2	41.0	20.24	3.8609	22
T3	2	346.9	31.5	103		
T4	5	354.2	35.2	2.07	4.9971	1360

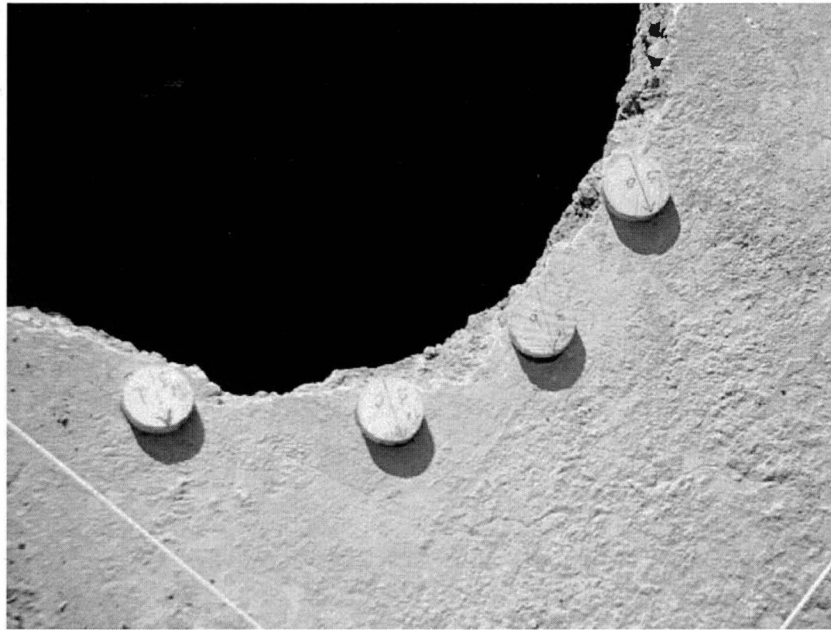


Fig. 56. Muestras de Piso de Teopancazco 2003.

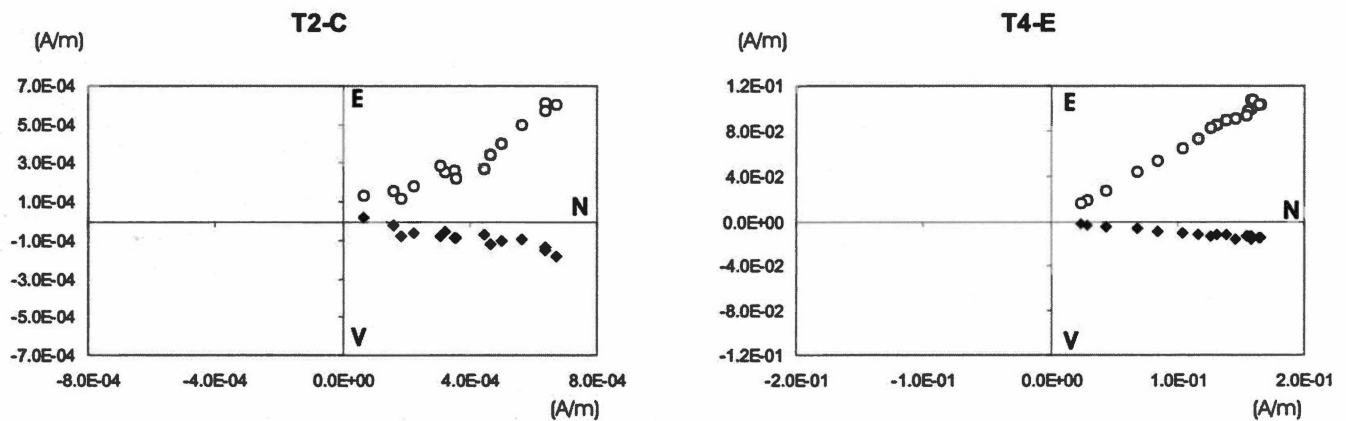


Fig. 57. Diagramas de Zijderveld de Teopancazco 2003.

Se agruparon por piso y se calcularon las direcciones medias (Figura 58, Tabla 15), con las que se realizaron los fechamientos arqueomagnéticos (Tabla 16).

Tabla 15

Resultados por piso de Teopancazco 2003

ETAPA	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
PISO 2	2	350.0	46.1	9.36	1.998	456
PISO 1 NQ	5	354.2	35.2	2.07	4.9971	1360

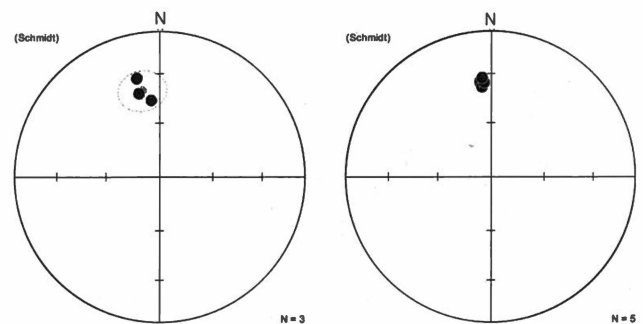


Fig. 58. Diagrama de direcciones promedio Tepancazco 2003, a) Piso 2, b) Piso 1 no quemado.

Tabla 16

Resultados de fechas por piso de Teopancazco 2003

ETAPA	Fechas probables dC	Fechas elegidas dC
PISO 2	575-600 650-750	575-600
PISO 1 NQ	350-425 550-575 575-600 650-750	350-425

Los resultados de ciclos de histéresis denotan titanomagnetitas de dominio pseudo sencillo (Figura 59).

Los resultados se reportan más ampliamente en la tesis de Física de Sánchez-López (2005).

Al finalizar este muestreo participamos con el Grupo de Excavación en la ceremonia del Fuego Nuevo como se muestra en las fotos a continuación.

h) Templo Mayor 1999

La zona arqueológica de Templo Mayor se ubica en el centro de la ciudad de México, en la esquina de

las calles de R. de Guatemala y R. de Argentina, al este de la Catedral metropolitana. Existe un conflicto al asignar la cronología a las etapas constructivas, ya que arqueológicamente hay siete y las fuentes sólo mencionan unas cuatro o cinco. El fechamiento arqueológico es complicado por la escasa presencia de tepalcates y al poco tiempo entre una etapa y otra. Otra forma de describir el desarrollo ha sido por la asignación de etapas por gobernante sin distinción entre ampliaciones totales o parciales.

Dieciséis muestras fueron obtenidas de seis de las siete etapas constructivas del Templo Mayor (Figura 61). Cuarenta y un especímenes (Apéndice 1, Tabla A.8) fueron procesadas mediante campos alternos. Las muestras aunque en su mayoría presentaban direcciones tendientes al origen Figura 62, sólo fue posible obtener las direcciones promedio de cuatro etapas constructivas de acuerdo a la cronología propuesta por Matos-Moctezuma (Tablas 17 y 18).

Podemos observar que la única fecha con un α_{95} aceptable es la de la etapa III, la etapa IV muestra un α_{95} muy grande, pero hay que tomar en cuenta que son pisos no quemados, por lo que fue la única que con reserva se le asignó un fechamiento arqueomagnético. De las etapas V y VII no fue posible determinar dirección alguna. Las grandes incertidumbres pueden deberse a levantamientos y hundimientos diferenciales que

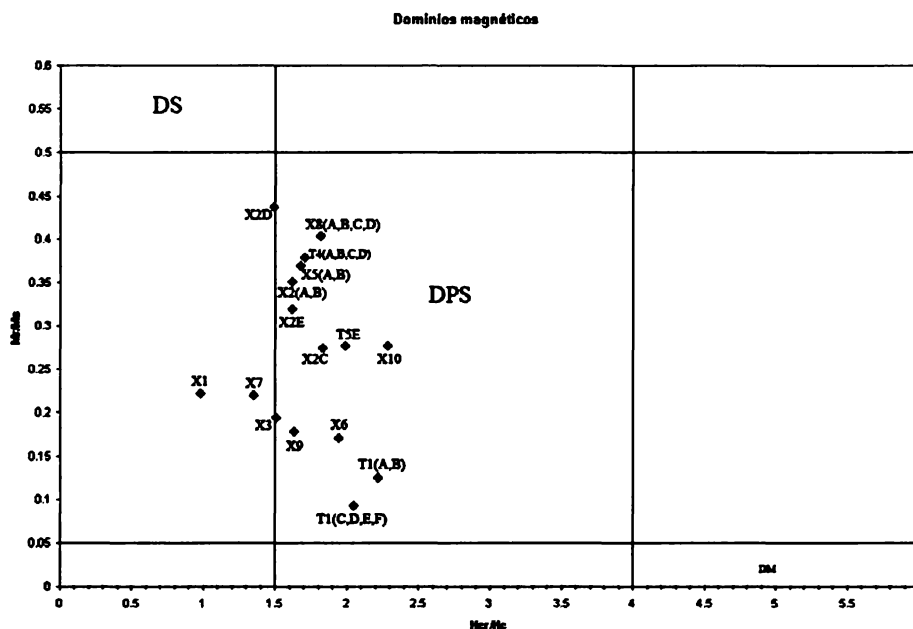


Fig. 59. Diagrama de Day para muestras de Xalla (X) y Teopancazco (T) 2003.

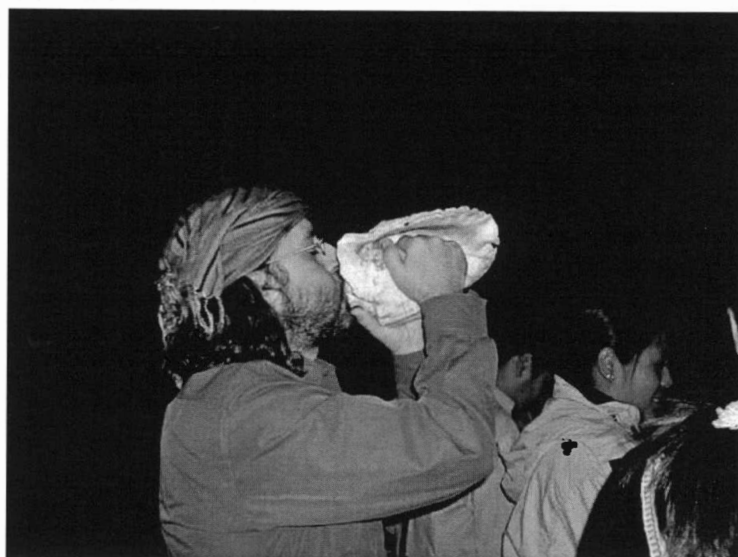


Fig. 60. Ceremonia del Fuego Nuevo en Teopancazco 2003.

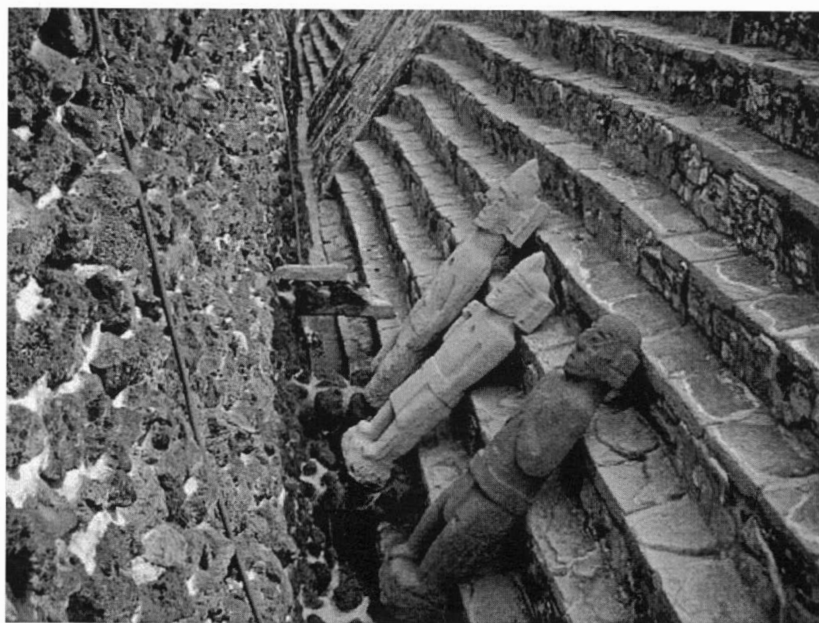


Fig. 61. Escalinatas del Templo Mayor.

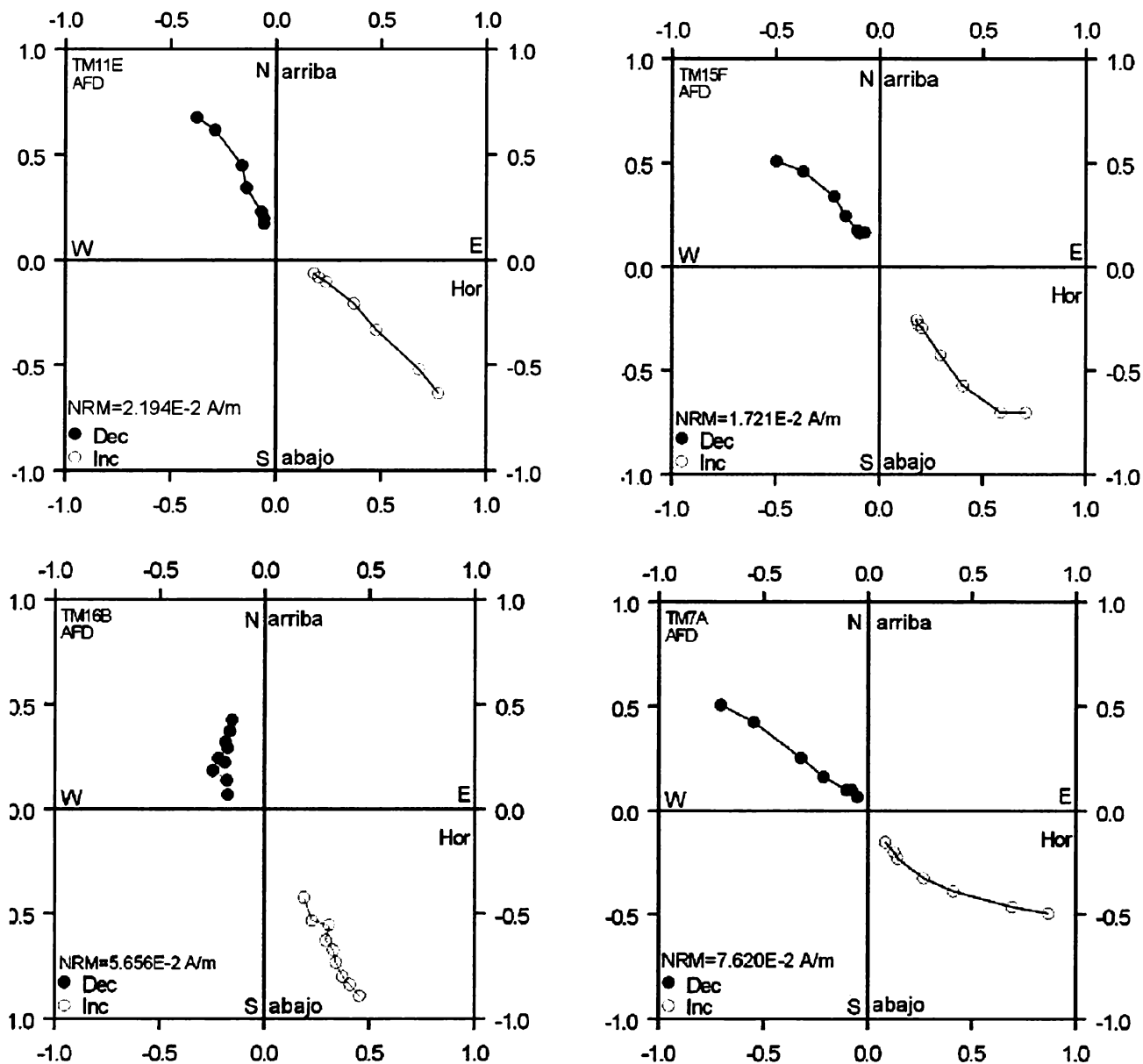


Fig. 62. Diagramas de Zijderveld de muestras del Templo Mayor.

Tabla 17

Resultados arqueomagnéticos de muestras del Templo Mayor

ETAPA	FECHA	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
II	1375-1427	8	340.8	25.3	24.11	6.8765	6
III	1427-1440	8	339.64	36.16	9.6	7.7995	34
IV	1440-1481	8	354.69	30.68	16.84	7.4049	12
VI	1486-1502	7	6.64	52.28	25.89	6.0723	6

Fechas por etapa constructiva de acuerdo con Matos Moctezuma(1981).

Tabla 18

Resultados arqueomagnéticos de muestras del Templo Mayor

ETAPA	FECHA	N	DEC	INC	FECHA ARQUEOMAGNETICA dC
II	1375-1427	8	340.8	25.3	---
III	1427-1440	8	339.64	36.16	--
IV	1440-1481	8	354.69	30.68	1433-1454
VI	1486-1502	7	6.64	52.28	-----

Fechas por etapa constructiva de acuerdo a Matos-Moctezuma (1981).

ha sufrido el sitio (Sprajc,1999), como también a ser muestras no quemadas. La estimación de edades es bastante pobre debido a la escasez de datos en la curva de variación secular para el Posclásico tardío (Figura 63).

i) Templo Mayor 2001 (Apartado)

Durante los meses de marzo y abril de 2001 en la calle de Apartado nos. 14,16 y 18 (Figura 64) se realizó una excavación arqueológica por parte de la Dirección de Salvamento Arqueológico. Los terrenos se encontraban ubicados en los límites donde se ubicaba la isla de México-Tenochtitlan. Los vestigios

encontrados entre 4 y 5 m de profundidad corresponden al Posclásico Temprano (1325 a 1403 dC) (Tabla A.9, Apéndice 1). Un segundo momento de ocupación comienza en 1449, encontrado entre los 3 y 4 m de profundidad (Sq3,Sq6 y Sq7) y un nuevo nivel después de la inundación de 1499 se asentó entre los 1.70 y 2.9 m de profundidad (Sq1). El último momento de ocupación fue en 1517 durante el Posclásico tardío, los vestigios de esta etapa se ubican entre 1 y 1.70 m de profundidad. Se discutieron los resultados (Tabla 19 y 20) con la Arqlga. Janis Rojas de la Dirección de Salvamento Arqueológico y eligieron las fechas (Tabla 20).

**TEMPLO MAYOR
1325-1590 d.C.**

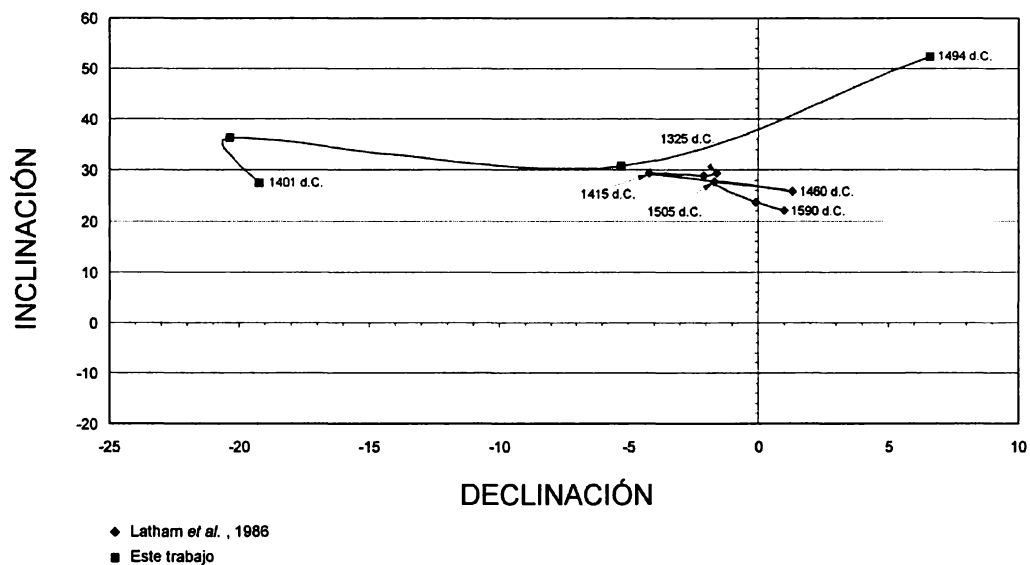


Fig. 63. Comparación de los datos de declinación-inclinación para el Templo Mayor de Hueda (2000) con los datos de Latham *et al.* (1986).

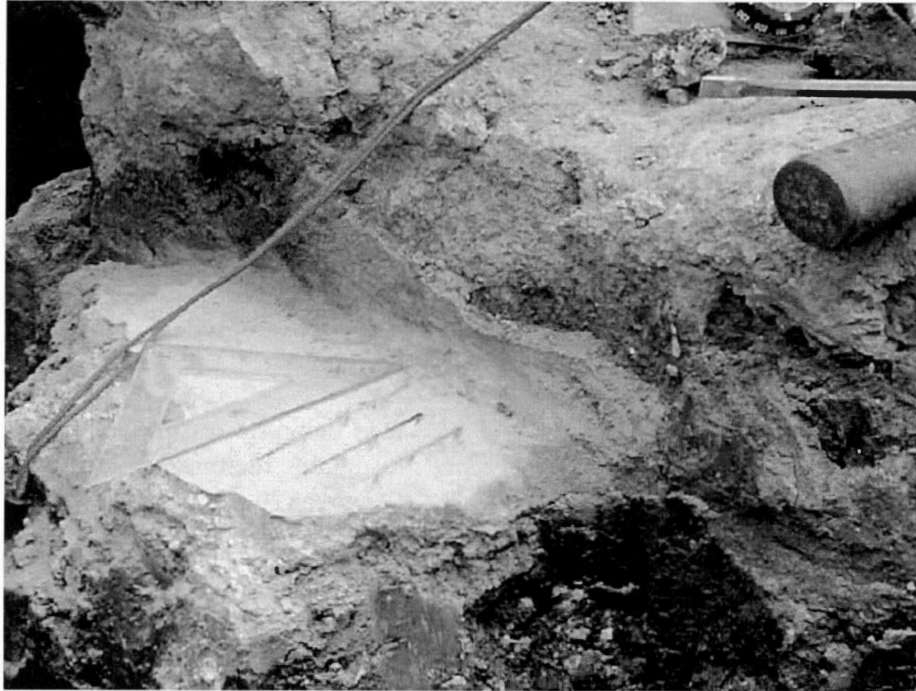


Fig. 64. Muestreo en la calle de Apartado.

Tabla 19

Resultados de Templo Mayor 2001 (Apartado)

Muestra	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
Sq1	5	338.6	23.7	15.89	4.774	18
Sq3	4	355.4	21.7	25.92	3.643	9
Sq6	10	333.8	27.4	10.7	9.486	18
Sq7	10	345.3	29.4	28.1	4.841	5

Vemos que los α_{95} son muy grandes con excepción de Sq6, pero son especímenes no quemados y el área ha estado sujeta a desplazamientos diferenciales. Pero

podemos observar que la muestra Sq6, que es la de menor dispersión, es de la que obtuvo un fechamiento confiable.

Tabla 20

Resultados del Templo Mayor 2001

Muestra	Fechas probables dC	Fechas elegidas dC
Sq1	---	---
Sq3	1050,1110,1433	1433¿?
Sq6	1175,1460	1460
Sq7	980,1454	1454¿?

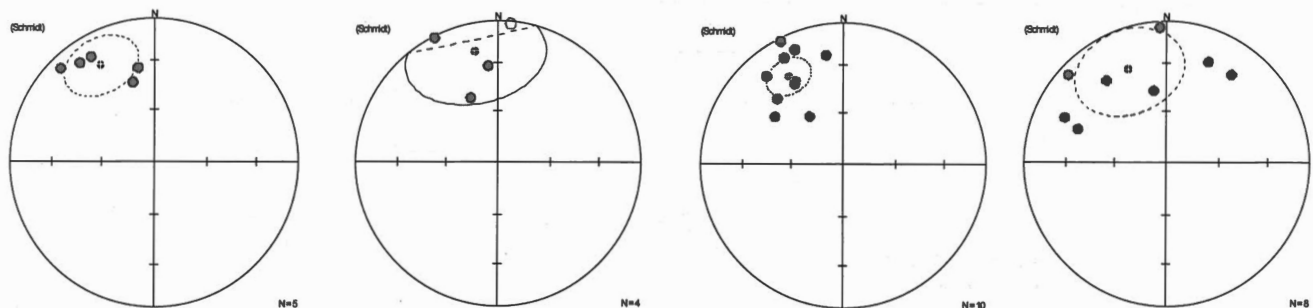


Fig. 65. Direcciones medias de las muestras Sq1, Sq3, Sq6 y Sq7.

j) Tlatelolco 2002

En el predio de Paseo de la Reforma 250 se encontraron estructuras correspondientes al período Azteca III del período Posclásico (1403 al 1521 dC), correspondientes a una zona habitacional del Barrio de Tlatelolco.

Se tomaron 13 muestras y 31 especímenes (Tabla A.10, Apéndice 1) tratados mediante campos alternos. Los resultados se muestran en las Tablas 21 y 22.

Tabla 21

Resultados de Tlatelolco 2002

Muestra	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
Cui-1	3	335.9	26.5	23.6	2.9294	28
Cui-4 a	5	352.2	48.0	6.22	3.98631	219
Cui-9						
Cui-11	3	359.9	64.4	22.4	2.9362	31
Cui-13	4	339.6	24.6	4.77	3.9919	371

Se puede observar que los valores de α_{95} en Cui-4 a 9 y Cui-13 son muy buenos y corresponden a tlecuiles, hornos que probablemente alcanzaban temperaturas suficientes para obtener una buena magnetización. Además al contrario de lo que sucede en el Templo Mayor se observa que al estar fuera del centro del Lago no sufrió movimientos diferenciales, por lo que el sitio a pesar de haber estado a la orilla del

Tabla 22

Resultados de edades para Tlatelolco 2002

Muestra	Fechas probables dC	Fechas elegidas dC
Cui1	1066,1401,1433.1460	1460 dC ¿?
Cui 4 a 9	525,1460,1494	1460 – 1494
Cui-11	1454,1494	1454 dC¿?
Cui-13	650-700,1401-1433	1401 – 1433

lago debió de ser una lengua de tierra firme. Estos resultados fueron obtenidos en la tesis de Guerrero-Sandoval(2003).

k) Xochicalco 1999

Xochicalco es una de los grandes sitios del Epiclásico que floreció con la caída de Teotihuacan, es considerado ciudad-Estado, esto es centro urbano con fuerte presencia militar y profunda estratificación social (Garza T. y González C., 1995). Es una ciudad fortificada con circulación interna controlada. El desarrollo y repentino abandono de Xochicalco se dio entre el 700 y el 900 dC. Rastros de incendio, hallazgo de objetos suntuarios fragmentados y dispersos, como también el abandono de todo tipo de objetos en habitaciones, llevan a pensar que el fin de Xochicalco fue violento, con un gran saqueo e incendio (Garza T. y González C.,1995).



Fig. 66. Muestreo sobre paredes de horno – tlecuil.

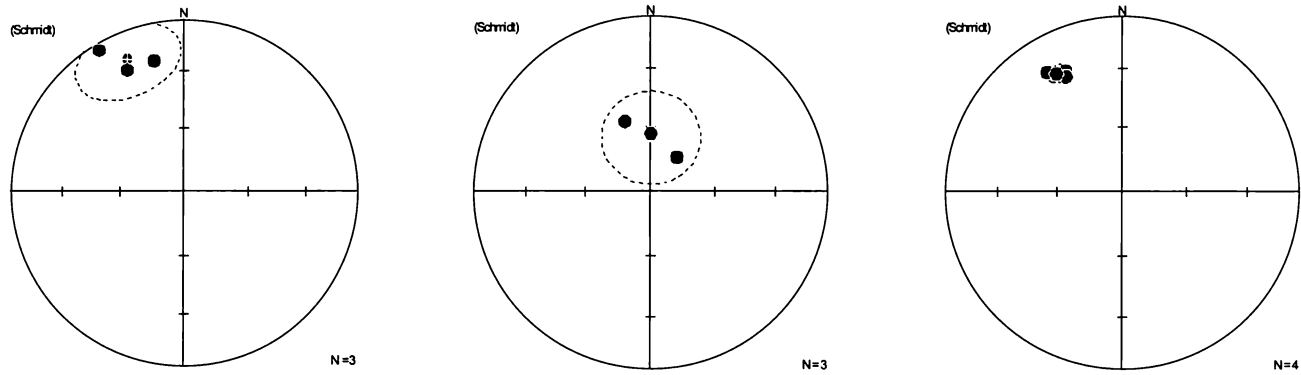


Fig.67. Direcciones medias de las muestras Cui1, Cui11 y Cui13.

En el sitio arqueológico de Xochicalco (Figura 68 a y b) se colectaron 16 muestras, de las que se procesaron 60 especímenes mediante campos alternos, muestras XO, (Figura 69) (Tabla A.11 apéndice1). Las muestras XC1 y 2 fueron procesadas en el Laboratorio de la Universidad de Plymouth.

Las direcciones promedio obtenidas se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23

Resultados por nivel de Xochicalco 1999

ETAPA	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
XO 1-4	9	352.8	24.3	5.28	8.871	62
XC1	8	87.8	42.8	45.92	5.0957	2
XO5-6	6	341	59	--	--	--
XC2	5	6.4	15.7	6.73	4.9693	130
XO7-8	8	340	19	--	--	--
XO11	6	3.6	31.1	8.96	5.863	36
XO12-13	4	358.5	34.3	8.5	3.8958	29
XO14	3	352.2	25.5	14.5	2.9304	29

Tabla 24

Resultados edades por nivel Xochicalco 1999

ETAPA	Fechas probables dC	Fechas elegidas dC
Xo1-4	850-890	
Xo 7-8	980-1025	980-1025
Xo14	650-700850-890	

Podemos observar las grandes incertidumbres obtenidas, aun en el caso de muestras quemadas obtenidas directamente de los temazcales como es el caso de XC1. Estos resultados al ser presentados a los directores del proyecto no mostraron concordancia con sus datos de C^{14} , a excepción de Xo7 y Xo8. Estas muestras fueron tomadas y medidas por Y. Hueda en 1999, pero ya no incluidas en su trabajo de tesis. Los datos actualmente presentados son resultado de un nuevo análisis.

l) Xochicalco 2004

Se tomaron 7 muestras, se obtuvieron 48 especímenes (Figura 70, Tabla A.12, Apéndice. 1) Las direcciones medias se muestran en la Tabla 25 y las edades en la Tabla 26.

Tabla 25

Resultados por muestra Xochicalco 2004

Muestra	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
XO20	3	345.5	20.3	5.1	2.994	361
XO23	5	4.7	24.4	1.2	4.997	1529

Tabla 26

Resultados de edades para muestras Xochicalco 2004

Muestra	Fechas probables dC	Fechas elegidas dC
XO20	1025-1065	
XO23	650-700	650-700
	805 - 850	

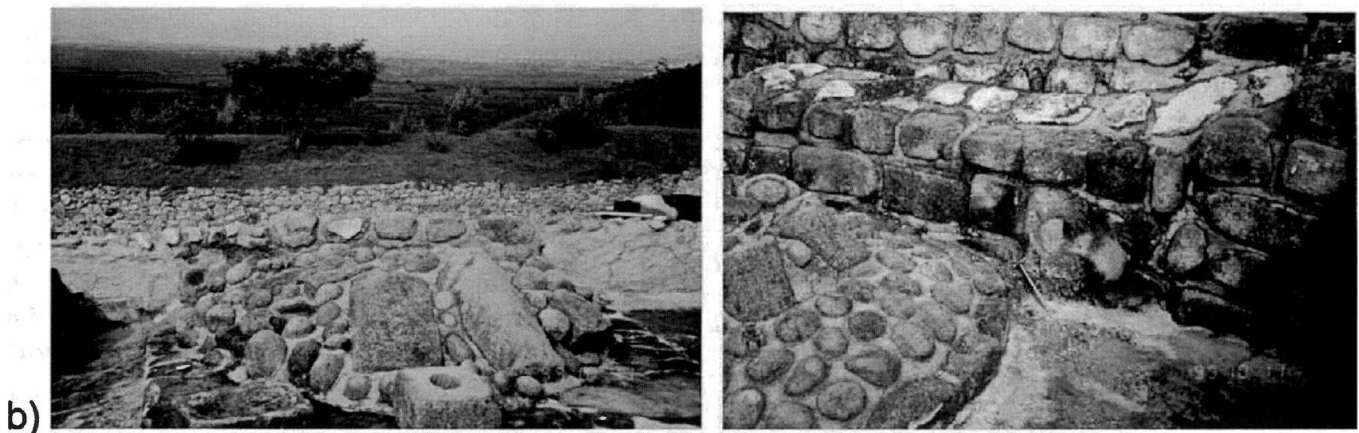
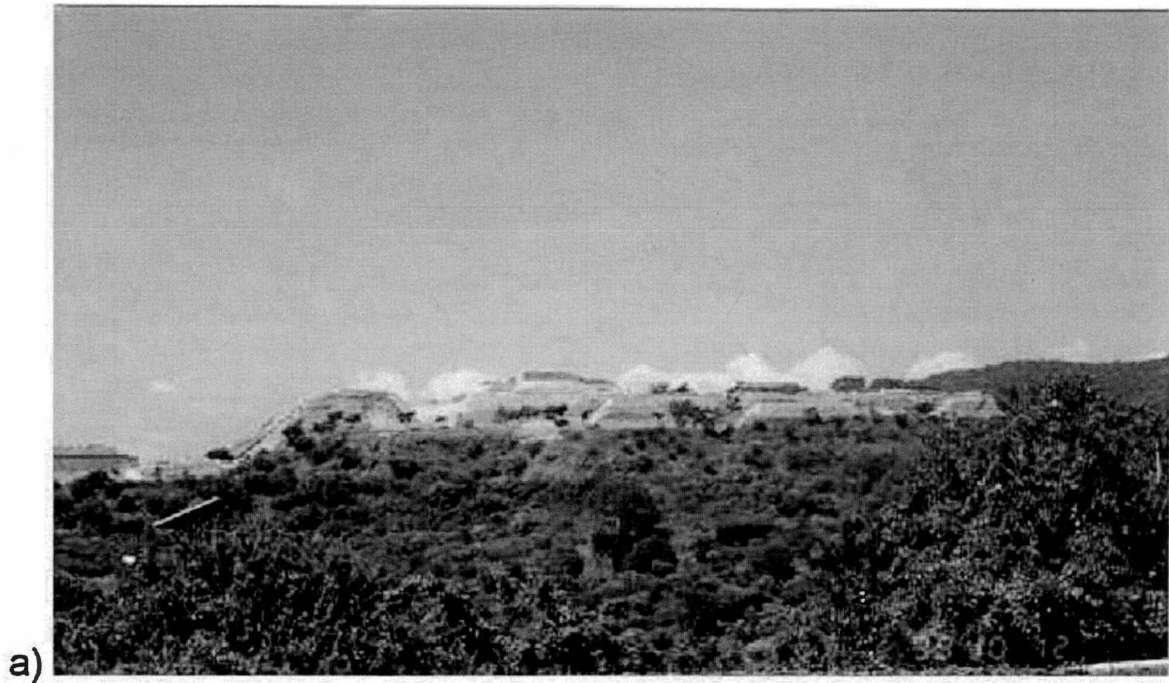


Fig. 68. a) Sitio arqueológico de Xochicalco, b) Temazcales de Xochicalco.

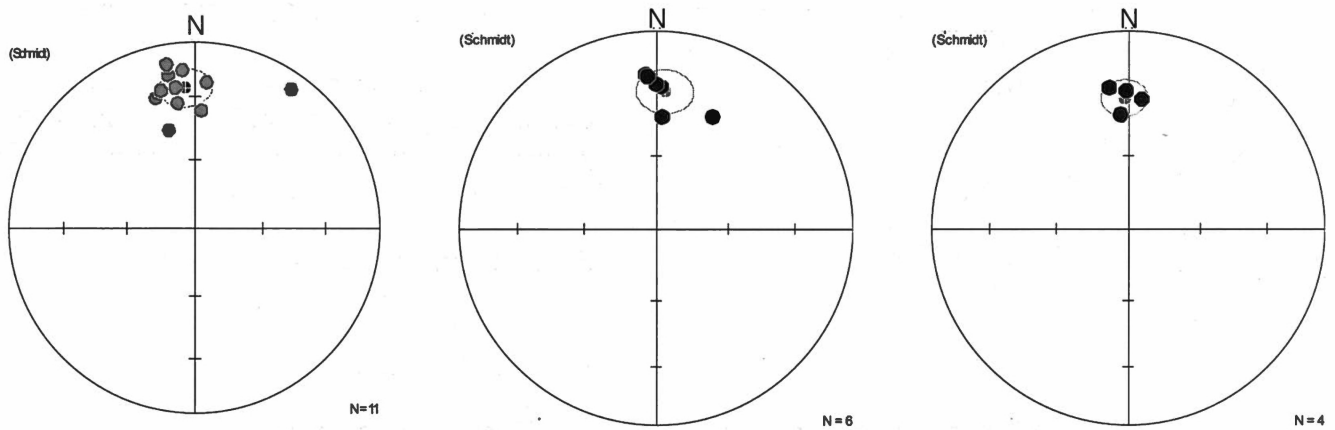


Fig. 69. Direcciones medias de las muestras XO1 a XO4, XO11 y XO12 y XO13.



Fig. 70. Muestreo en Xochicalco 2004.

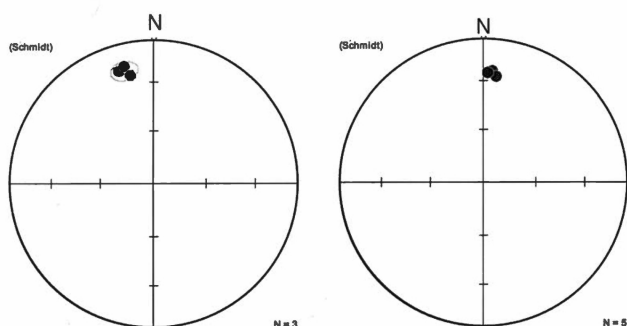


Fig. 71 Diagrama de direcciones promedio para XO20 y XO23.

Los resultados de las muestras de XO23 son coincidentes con un fechamiento existente de 652-675 dC. Para el caso de XO20 no existen datos radiométricos y la edad obtenida no corresponde al tiempo de ocupación del sitio.

Nuevamente los resultados de Xochicalco no son aceptables por parte de los arqueólogos del proyecto, por lo que es muy probable que se realice un nuevo muestreo en los sitios quemados que cuentan con fechamientos de carbono 14.

m) Cacaxtla 1999

Centro del Epiclásico enclavado en una colina, contemporáneo con Xochicalco y probablemente su rival. Sus murales policromados son de gran admiración

y eclecticismo que los vincula con culturas del altiplano como Teotihuacan, Cholula y Oaxaca, como también con Tajín en el Golfo y la Zona maya. No cuenta como Xochicalco con grandes murallas y fosos, pero el tema fundamental de los murales es militar. Al igual que Xochicalco su período de ocupación y desarrollo corresponde al Epiclásico, del 650 al 900 dC, caracterizado por ser estados de segunda generación, esto es con capitales más pequeñas, de menor extensión territorial y con estados vecinos tan poderosos como ellos.

Catorce muestras de las que se obtuvieron 26 especímenes (Apéndice 1, Tabla A.13) procesadas mediante campos alternos. Todas ellas mostraron una gran dispersión, por lo que no fue posible determinar magnetizaciones características (Figura 72).

La gran dispersión encontrada se atribuye al bajo contenido de minerales magnéticos (bajas intensidades) y también a que fueron tomados en el área de la pirámide principal cubierta por el techo, que claramente está sufriendo desplazamientos diferenciales. Se llevará a cabo un nuevo muestreo en una zona que no esté afectada por este tipo de desplazamientos.

n) Santa Cruz Atizapán

El sitio se encuentra en el valle de Toluca, directamente relacionado con actividades lacustres en la Ciénaga de Chignahuapan. Evidencias tempranas de

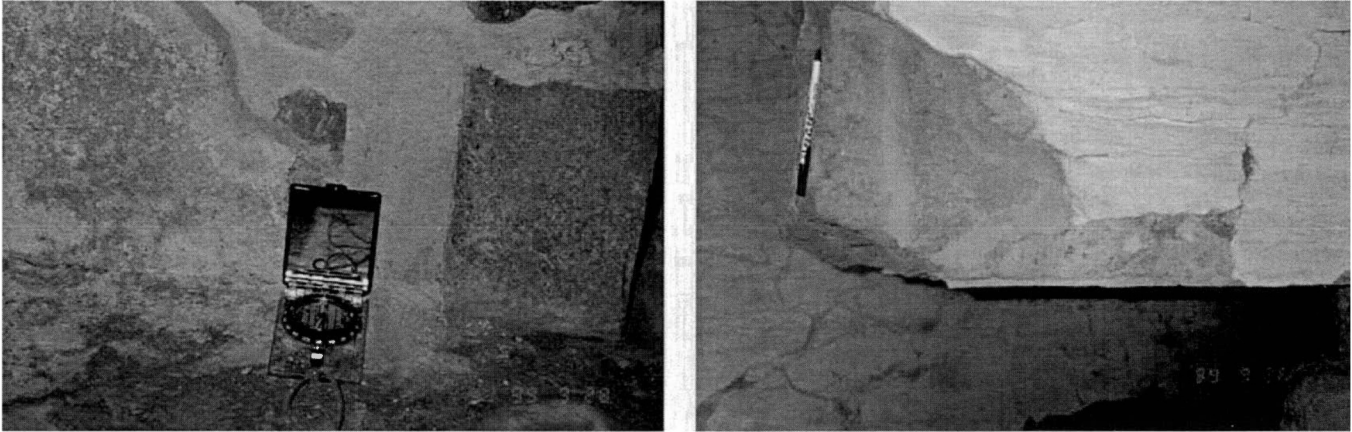


Fig. 72. Estucos de Cacaxtla.

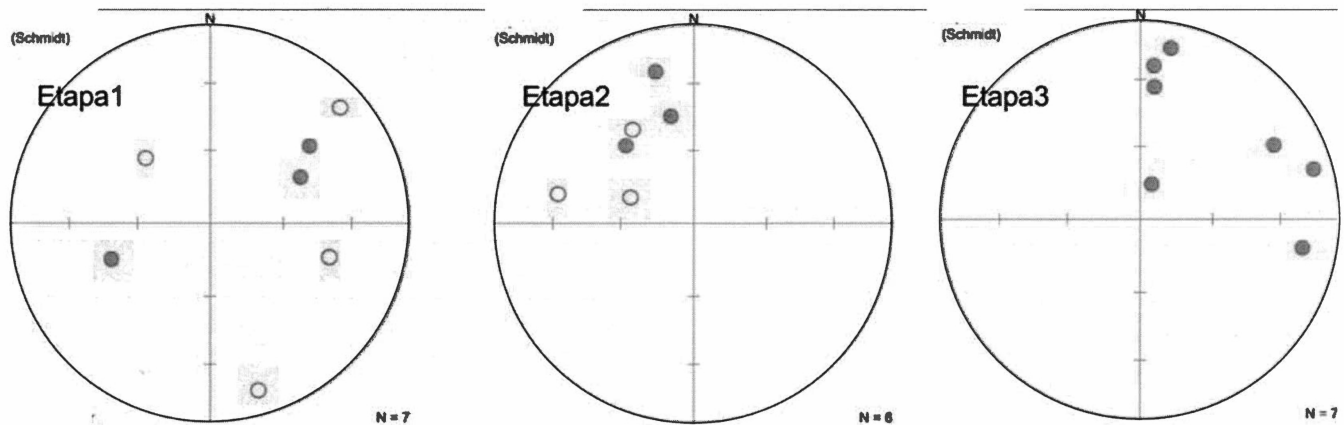


Fig. 73. Direcciones características por etapa donde puede observarse la gran dispersión de los datos.

asentamientos que se encontraron corresponden al período Formativo Temprano (fases Ocotitlán y Mextepec, alrededor de 1200-1000 a.C.). Se registra una expansión durante el Formativo Medio (fase Cuauhtenco, 1000-500 a.C.) y la población continuó creciendo a lo largo de la subsiguiente fase Azcapotzalongo (400-600 d.C.), que corresponde a la fase Xolalpan de Teotihuacán. La construcción de islas artificiales en las ciénagas de Chignahuapan y Chimaliapán, montículos bajos hoy conocidos en la zona como *bordos*, comenzaron durante esta fase y llegaron a su máxima extensión durante el período Epiclásico (ca. 650-900 d.C.). Al acercarse el cierre del período Epiclásico, la construcción de nuevos *bordos* quedó interrumpida, los que estaban ocupados fueron abandonados, y el área nunca más fue vuelta a ocupar. Aparentemente, fueron muchas las causas que tuvieron que ver con el fenómeno del abandono. Los cambios climáticos que comenzaron a fines del Clásico,

continuaron a lo largo del Epiclásico y probablemente principios del subsecuente período Posclásico, y que afectaron gravemente la ecología lacustre en la región, están marcados en los análisis de diatomeas de los sedimentos de las ciénagas. Sin embargo, la zona cenagosa continuó representando una importante fuente de recursos para los pobladores de la región, desde los Matlazinca durante el Posclásico y hasta nuestros días (McClung y Sugiura, 1999).

Se tomaron muestras de un tlecuil en la parte central del asentamiento (Tabla A.14, Apéndice 1), cuyos especímenes fueron desmagnetizados mediante campos alternos (Tabla 27), donde se obtuvo un fechamiento de 550-650 dC, que es el que mejor corresponde con la ocupación del sitio, pero que al discutirse con la Arqueóloga Sugiura, la advierte muy temprana. El fechamiento tiene un muy amplio margen de incertidumbre debido a la escasez de datos en la curva.



Fig.74. Asentamiento de Sta Cruz Atizapan, Edo de México.

Tabla 27

Resultados de tlecuil de Sta Cruz Atizapan

Espécimen	Declinación	Inclinación
1	347	26
2	352	32
3	356	28
4	344	41
5	15	47
6	19	46
MEDIA	DEC=356.3 INC=38.8	R=6.818 K=33.0 $\alpha_{95}=8.2$

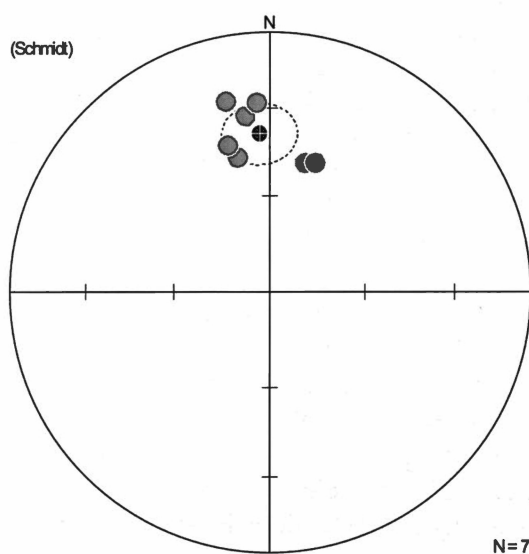


Fig. 75. Dirección media de tlecuil de Sta. Cruz Atizapán.

Tabla 28

Resultados de fechamiento de tlecuil de Sta. Cruz Atizapán

Muestra	Fechas probables	Fechas elegidas
tlecuil	25 aC – 0 aC 550-575 dC 575-650 dC	550-650 dC

o) Pañhu 2003

El sitio de Pañhu se encuentra ubicado cerca del Cerro Xajay, límite entre los estados de Querétaro e Hidalgo. Las investigaciones con fundamento en fechamientos C¹⁴, correlaciones arquitectónicas,

iconográficas y cerámicas, establecen que los Centros ceremoniales Xajay del Mezquital, surgen cerca del Siglo V y su abandono debió efectuarse alrededor del Siglo X (Morett, 1996).

“El Desarrollo Regional Xajay fue coetáneo al clímax y contracción Teotihuacano, antecedente asimismo del surgimiento de Tula. Ambas circunstancias le confieren un extraordinario valor para entender la dinámica de las interacciones entre Metrópoli y la frontera norte centro occidental de Mesoamérica durante el Clásico, proceso de interacciones que debió ser concomitante a la dinámica

particular de los Centros ceremoniales Xajay, cuyo colapso y abandono hacia el Siglo X, está aportando datos muy importantes para entender mejor fenómenos como la pluriétnicidad y surgimiento de Tula Chico” (Morett, 1996).

Las muestras fueron tomadas por Luis Morett y enviadas al Laboratorio de Paleomagnetismo para su análisis.

Sólo se cuenta con un espécimen por sitio (Tabla A.15, Apéndice 1) y los resultados fueron discutidos y las fechas aceptadas se muestran en la Tablas 29 y 30.

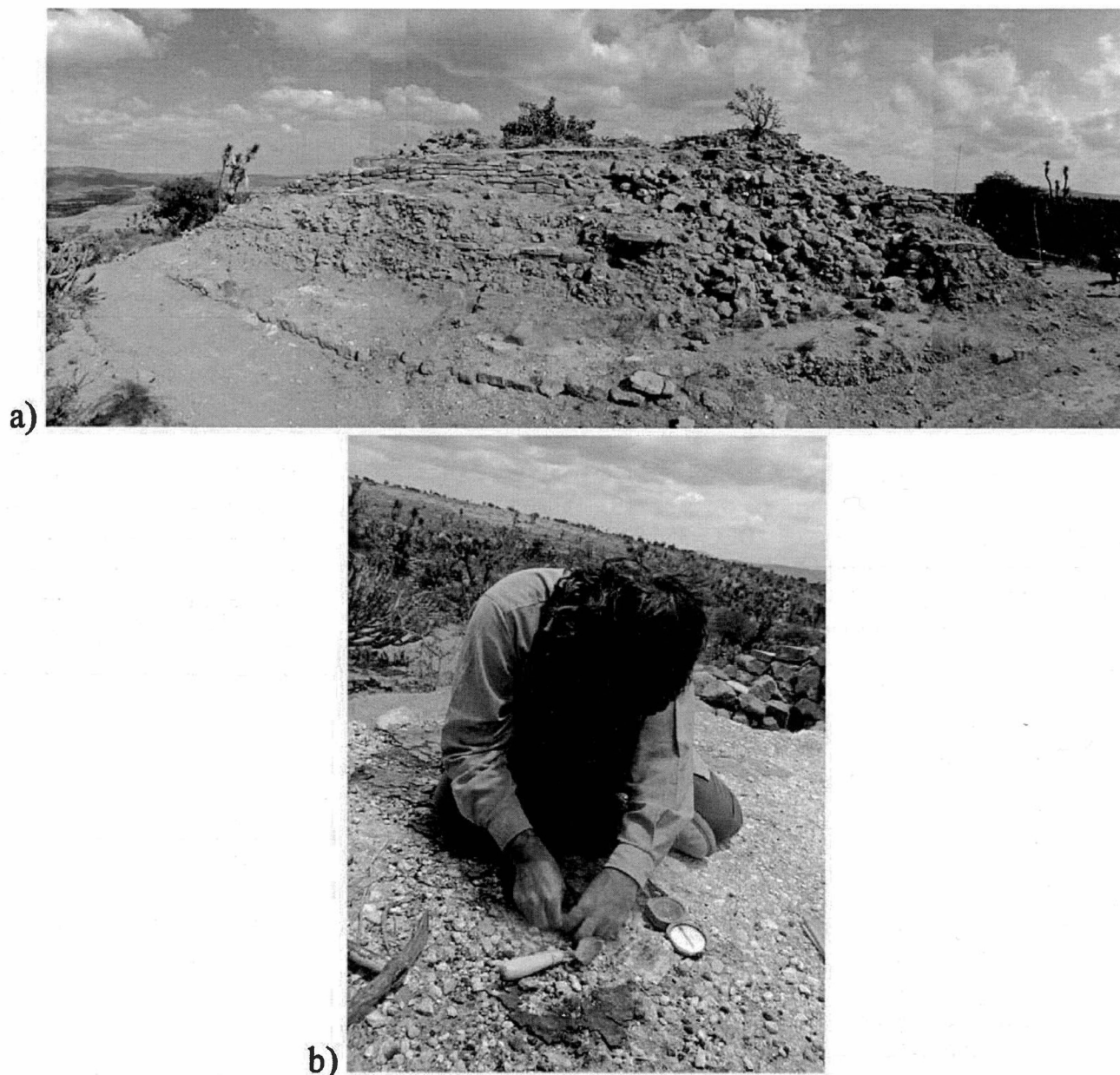


Fig. 76. a) Vista oeste del montículo de Pañhu. b) L. Luis Morett tomando las muestras de pisos quemados.

Tabla 29

Resultados de Pañhu 2003

Muestra	N	DEC	INC	α_{95}	R	K
02-01	1	356.3	44.1	-	-	-
02-02	1	5.7	31	-	-	-
02-03	1	5.9	32.6	-	-	-
02-04	1	354.7	25.4	-	-	-
02-05	1	342.7	23	-	-	-

Tabla 30

Resultados de fechas para Pañhu 2003

Muestra	Fechas probables dC	Fechas elegidas dC
02-01	512, 550,600, 670,900,950,	512 – 600
02-02	512,670,700	512
02-03	512,670,700	512
02-04	850	850
02-05	936,950	936

Como se observa en la Tabla 30 las edades obtenidas son coincidentes con las cronologías esperadas por los encargados del proyecto y cuyas quemas no son atribuidas a incendios de tipo accidental, sino rituales para el inicio de una nueva etapa constructiva o el último momento en que fueron utilizadas.

p) Investigaciones en proceso (estucos)

En la Tabla 31 se muestran investigaciones que ya se encuentran en proceso y el estado de las mismas.

q) Estudios de Magnetización Pictórica Remanente

Goguitchaichvili y colaboradores (2004) realizaron estudios de magnetización remanente pictórica (PiRM) en cuatro murales en los sitios arqueológicos de Cacaxtla, Cholula y Templo Mayor (Figura 77).

En ellos se encontró que la mezcla de granos de magnetita y hematita son los portadores de la magnetización. Los murales estudiados fueron: el Templo de Venus en Cacaxtla, Chapulines y Estrellas en Cholula y Templo Rojo en el Templo Mayor de Tenochtitlán. Los resultados se muestran en la Tabla 32 y Figura 78.

Tabla 32

Magnetizaciones características promedio de murales prehispánicos de México

MURAL	N	DEC	INC	α_{95}	K
Templo de Venus	6	348.7	35.1	10	46
Chapulines	7	339.8	47.1	7.5	65
Estrellas	10	351.8	48.3	10.4	63
Templo Rojo	5	16.8	44.1	5.3	209

Tabla 31

Nuevos sitios muestreados y estado de proceso

Sitio	Situación
Huachimontones, Jalisco	de medición e interpretación de datos por una tesis de Licenciatura en Arqueología
El Tejar, Veracruz	Período de medición.
Bosque de Chapultepec, DF	Preparación
Ex Convento de Churubusco, DF	Preparación
Xochicalco, Morelos	Revisión de nuevos datos de C ¹⁴ y posible remuestreo
Cacaxtla, Tlaxcala	Revisión de datos obtenidos y toma de nuevas muestras

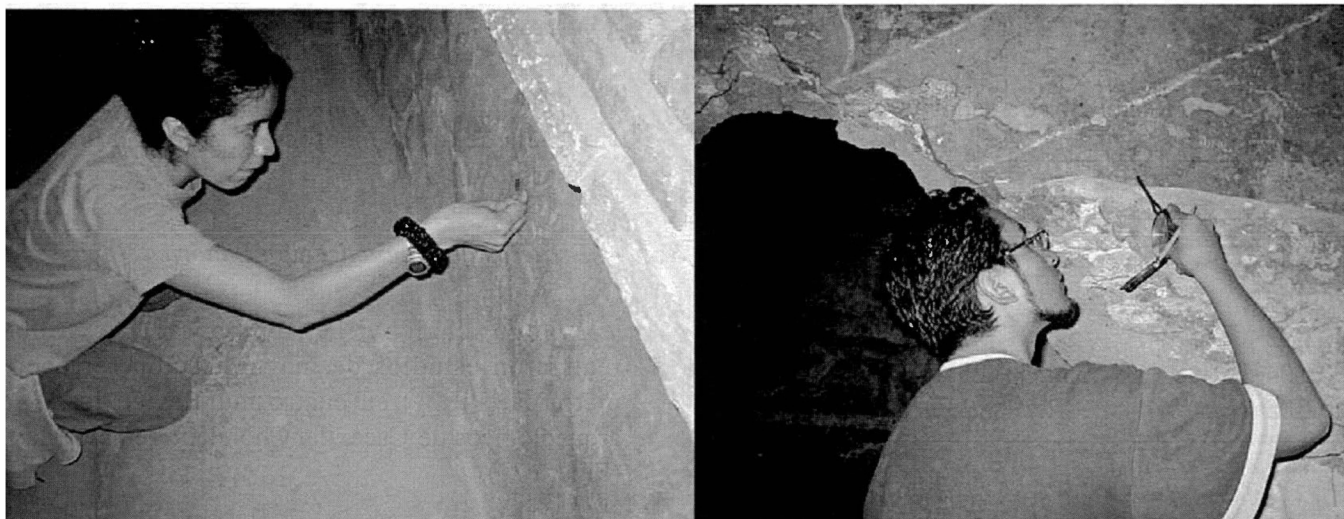


Fig. 77. Muestreo de murales en Cholula, Pue. efectuado por los estudiantes de Posgrado Keren Mendoza y Francisco Rodríguez.

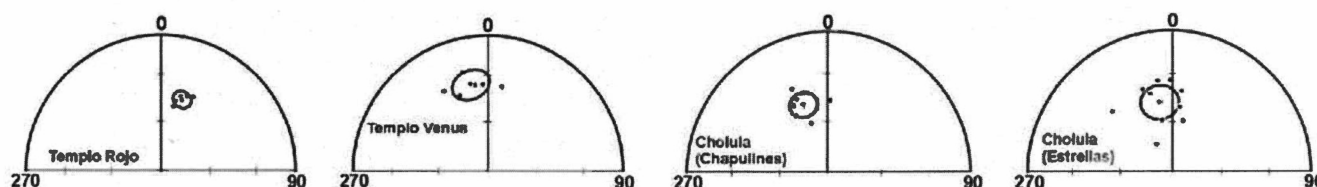


Fig. 78. Proyecciones igual área de las magnetizaciones características de los murales. Elipse corresponde al α_{95} y la estrella es la dirección del campo actual en la Cd. de México. (Goguitchaishvili *et al.*, 2004).

La comparación con la curva de variación secular de Hueda *et al.* (2004) muestra que las direcciones obtenidas para los murales del Templo de Venus, Estrellas y Chapulines corresponden al intervalo entre 1000 y 1200 dC. Dado el amplio uso del color rojo en las pinturas prehispánicas cuyos pigmentos provienen de óxidos de hierro molidos se constituyen en una fuente invaluable de información de la variación secular.

A finales de 2004 se muestrearon pinturas rupestres en el Cañón del Sumidero, en la foto (Figura 79) se muestra al Dr. Goguitchaishvili tomando las muestras.

r) Determinación de paleointensidades en rocas y materiales en tiempos correspondientes a las culturas de Mesoamérica

Con respecto a paleointensidades en las figuras 81 y 82 se muestran los resultados de la determinación de la paleointensidad para un flujo de lava del volcán Jorullo, que tuvo actividad entre 1749 y 1754 (Gratton

et al., 2005) y para el volcán Parícutín, con actividad entre 1943 y 1948 (Goguitchaichvili *et al.*, 2005).

En la actualidad se están procesando un importante número de fragmentos de cerámica de Xalla y Teopancazco, para la determinación de paleointensidades que cuentan además con fechamientos de C^{14} con el fin de construir la curva de variación para el período comprendido entre 0 y 1200 dC.

El Dr. Juan Julio Morales desarrolló una técnica de encapsulamiento en sales (Figura 83) para los fragmentos de cerámicas, para facilitar su manejo y disminuir los errores en la medición.

s) Estudios de magnetismo de rocas sobre obsidianas empleadas en las civilizaciones Mesoamericanas

Urrutia (1999) realizó un estudio de propiedades magnéticas en obsidianas provenientes de 18 localidades en ocho estados del país. A ellas se les determinó su susceptibilidad, su magnetización

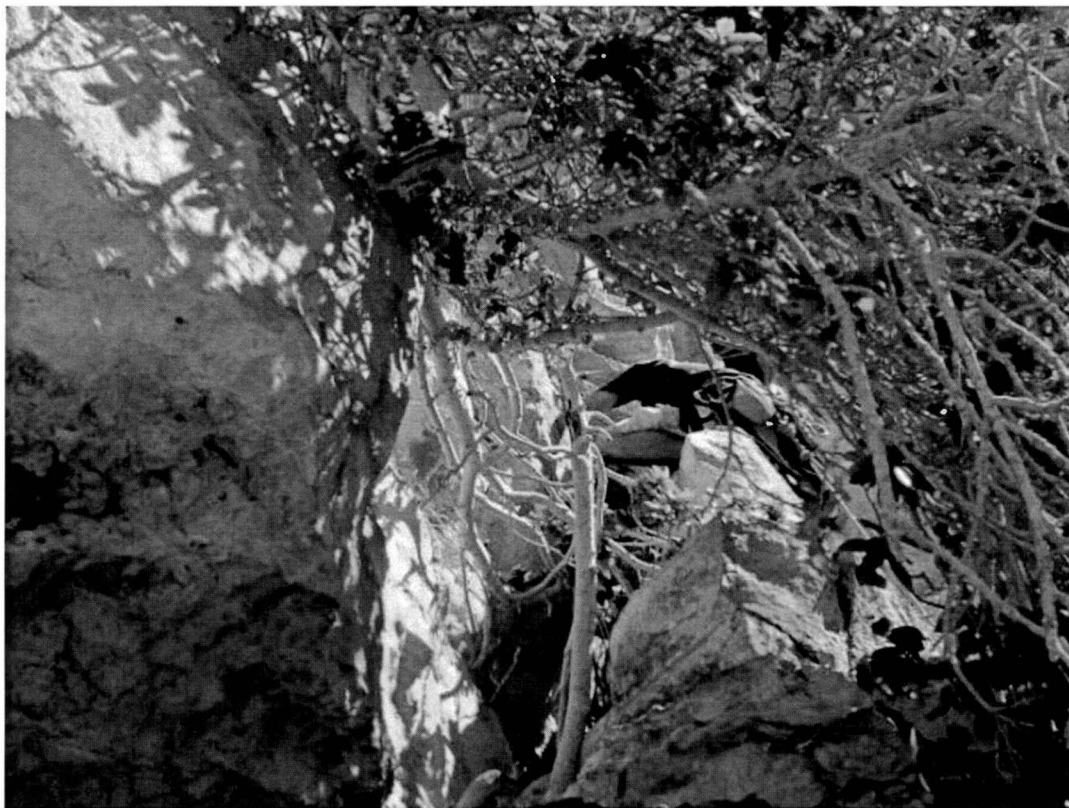


Fig. 79. Dr. Goguichaishvili escalando para obtener las muestras de pinturas rupestres del Cañón del Sumidero, Chiapas.

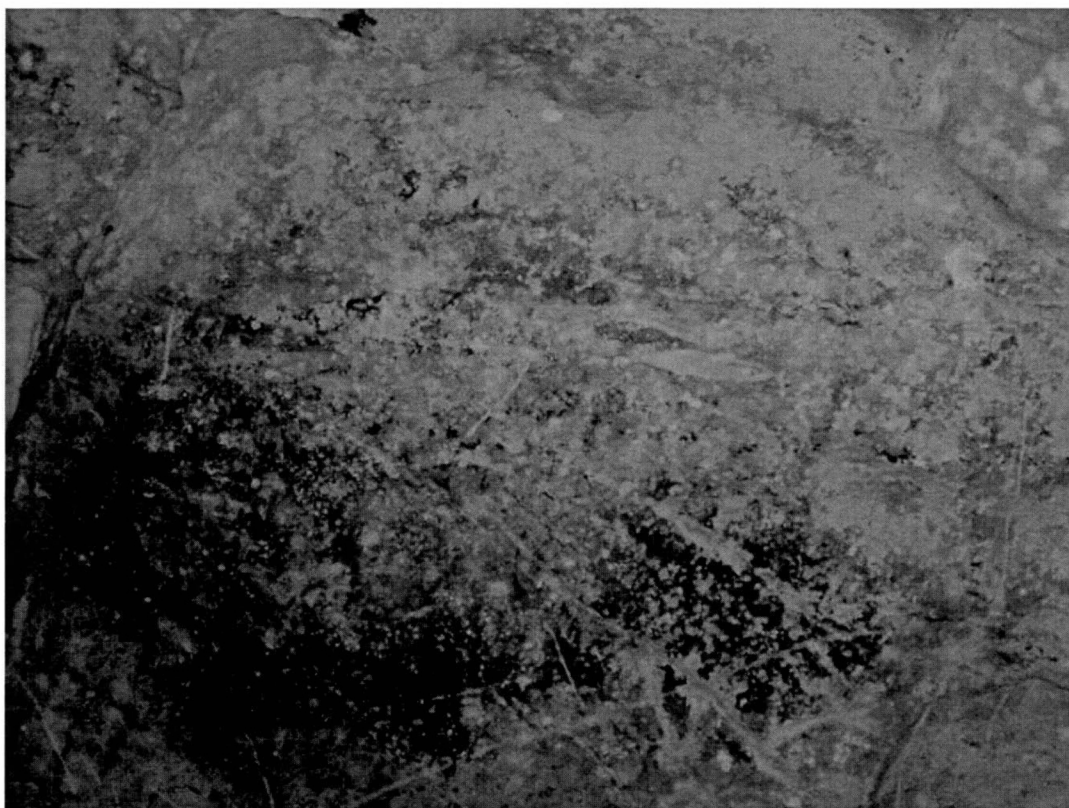


Fig. 80. Pinturas rupestres del Cañón del Sumidero, Chiapas.

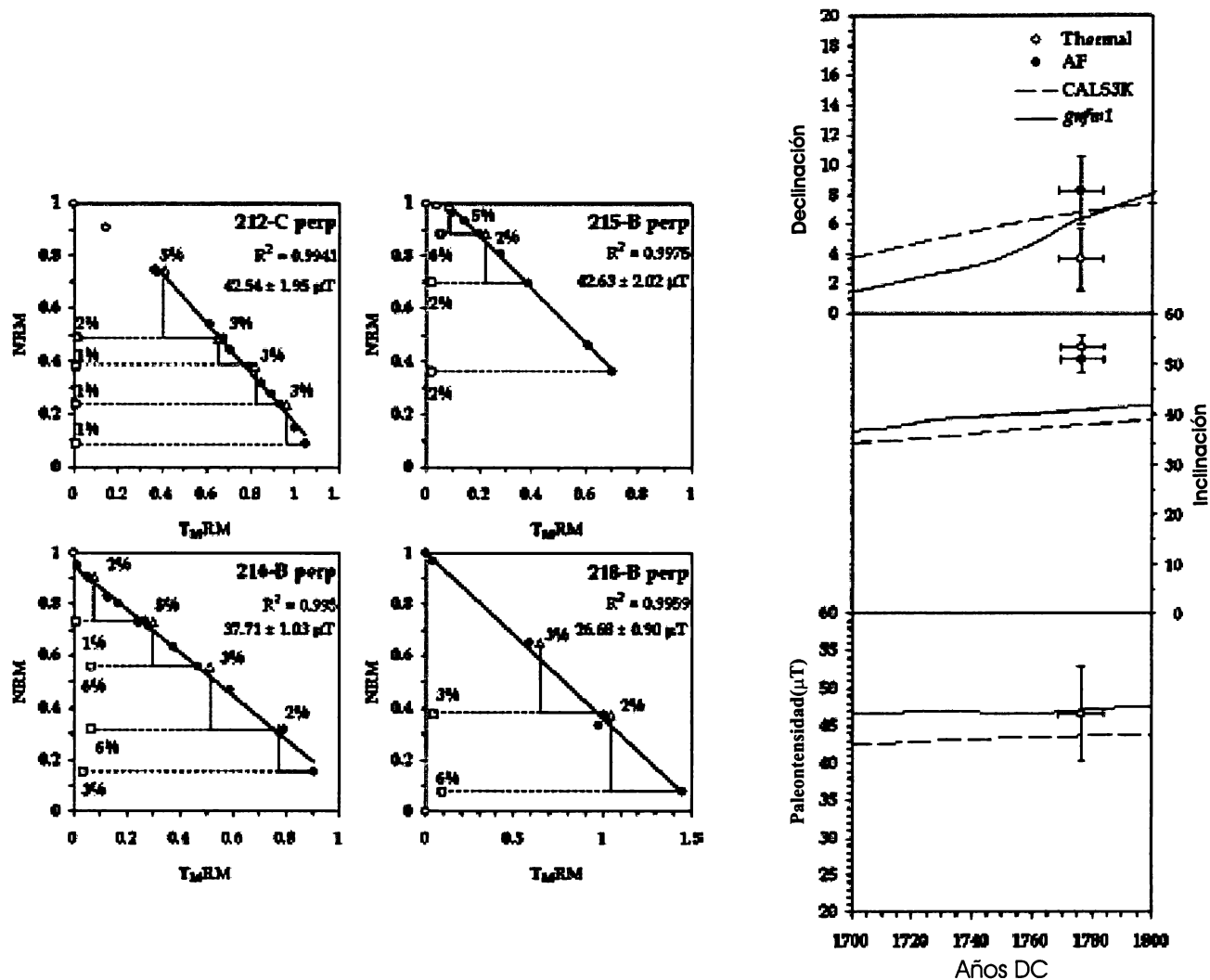


Fig. 81.a.) Diagramas de Arai de muestras del volcán Jorullo, b) Comparación de las direcciones e intensidades con los modelos CALS3K.1 (línea discontinua) y GUFM1 (línea continúa) entre el 1700 y 1800 dC (Gratton *et al.*, 2005).

remanente natural, su magnetización remanente isothermal y el campo medio destructivo (Tabla 33).

Urrutia concluye que a través de la susceptibilidad magnética y las intensidades de la magnetización remanente natural y la de saturación se pueden distinguir claramente dos grupos con altas y bajas propiedades magnéticas (Figura 84).

Pero se menciona que dadas las grandes variaciones en dichas propiedades aun en un mismo sitio es necesaria información adicional para su identificación (Urrutia, 1999).

Pacheco en 2004 realizó un estudio detallado de muestras de flujos de obsidiana de Sinaloa, Durango y

Otumba, Edo. de México caracterizándolos mediante propiedades magnéticas (Tablas 34 y 35, Figuras 86 a 90), que comprendió su trabajo de tesis de Física de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Las muestras de Sinaloa y Durango en primer caso fueron entregadas por el Arqlgo. Grave de la Dirección de Salvamento Arqueológico del INAH (Tabla A.16, Apéndice 1). Son 24 muestras de 13 sitios.

Las muestras de Otumba las colectamos *in situ* con la ayuda de Luis Morett, realizando un perfil conforme subíamos por el yacimiento. Se denotaron 7 grupos por sus características como color, bandeo e inclusiones, de las que se obtuvieron 31 especímenes (Tabla A.17, Apéndice 1)

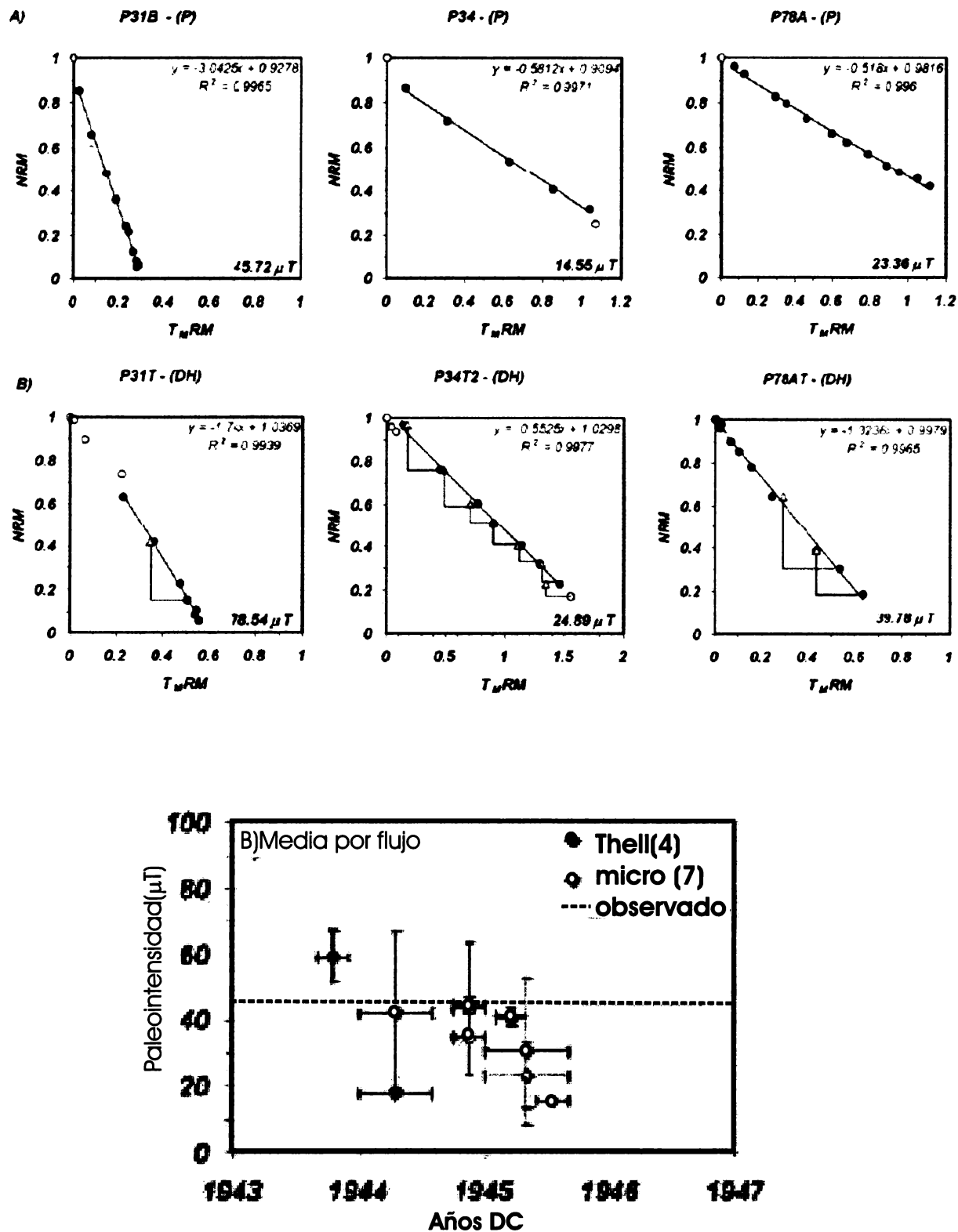


Fig. 82. a) Diagrama de Arai de muestras del volcán Parícutín, b) Resultados de paleointensidad de flujos del volcán Parícutín.

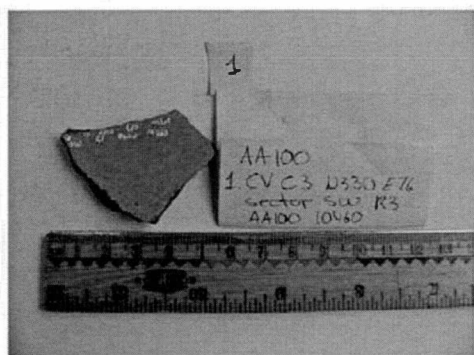


Fig. 83. Fragmento de cerámica teotihuacana y su correspondiente encapsulamiento.

Tabla 33

Propiedades magnéticas de obsidiasnas Sus-susceptibilidad magnética 10^{-6} SI. NRM e IRM mA/m, Hs – coercitividad en mT. MDF campo medio destructivo en mT

Locality	Symbol	Sus	NRM	IRM	Hs	MDF
Altotonga, Veracruz	AL1	136	360.4	13519.6	>500	61
Altotonga, Veracruz	AL2	63.7	135.4	6495.8	400	
Atempan, Puebla	AT1	42.5	38.9	3287.5	450	61
Atempan, Puebla	AT2	40.2	42.1	3565.2	400	58
Buenavista, Mexico	BV1	127.8	158.2	10301.3	>400	57
Buenavista, Mexico	BV2	137.5	75.3	7586.7	500	52
Cerro de las Navajas,Hgo	CN	11.3	0.09	3.8	300	15
El Colorado, Qro	EC	15.3	0.72	24.4	450	44
Guadalupe Victoria,Pue	GV	325.8	2139	15623	250	10
Jacal, Pico Orizaba,Ver	JC	221.3	101.6	6679.3	250	18
Jocotepec, Jalisco	JO	16.2	19.9	718.7	>700	>100
La Primavera,Jal	LP	18	26.4	495.2	>300	112
Mesa de las Salvias, Jal	MS	247.5	1657.4	23884.7	500	64
San José El Rincón, Mich	JR	121.5	226.7	13578.9	500	60
Teuchitlán, Nayarit	TH	11.9	2.7	136.2	500	76
Tequila, Jalisco	TQ	259.5	581.6	8554.5	800	13
Tequila Magdalena,Jal	TM	104.7	117.9	5812.2	600	100
Ucareo, Michoacán	UC	115.7	45.1	6135.8	>400	80
Zacualtipan, Hidalgo	ZH	133.1	7133.1	15386	>500	67
Zináparo, Mich	ZI1	814.7	112.7	1370	500	31
Zináparo, Mich	ZI2	1449.8	87.3	1936.6	>500	34
Zaragoza, Puebla	ZZ	66.7	86.9	3367.1	>500	11

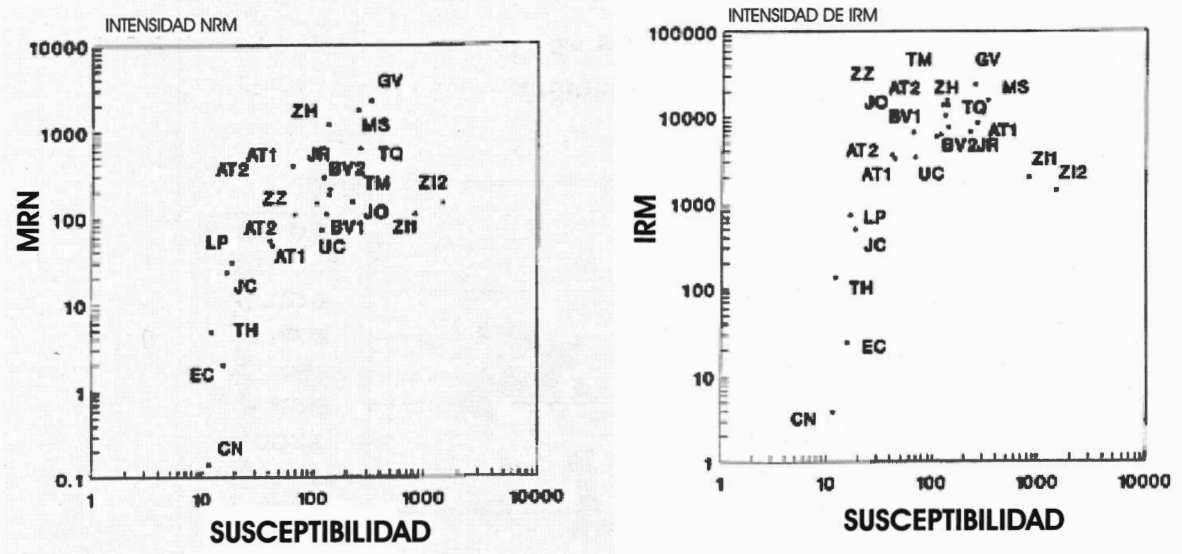


Fig. 84. Magnetización remanente natural vs susceptibilidad y Magnetización remanente isotermal vs susceptibilidad de muestras de obsidias de la Faja Volcánica Transmexicana (Urrutia, 1999) (Nomenclatura ver Tabla 33).

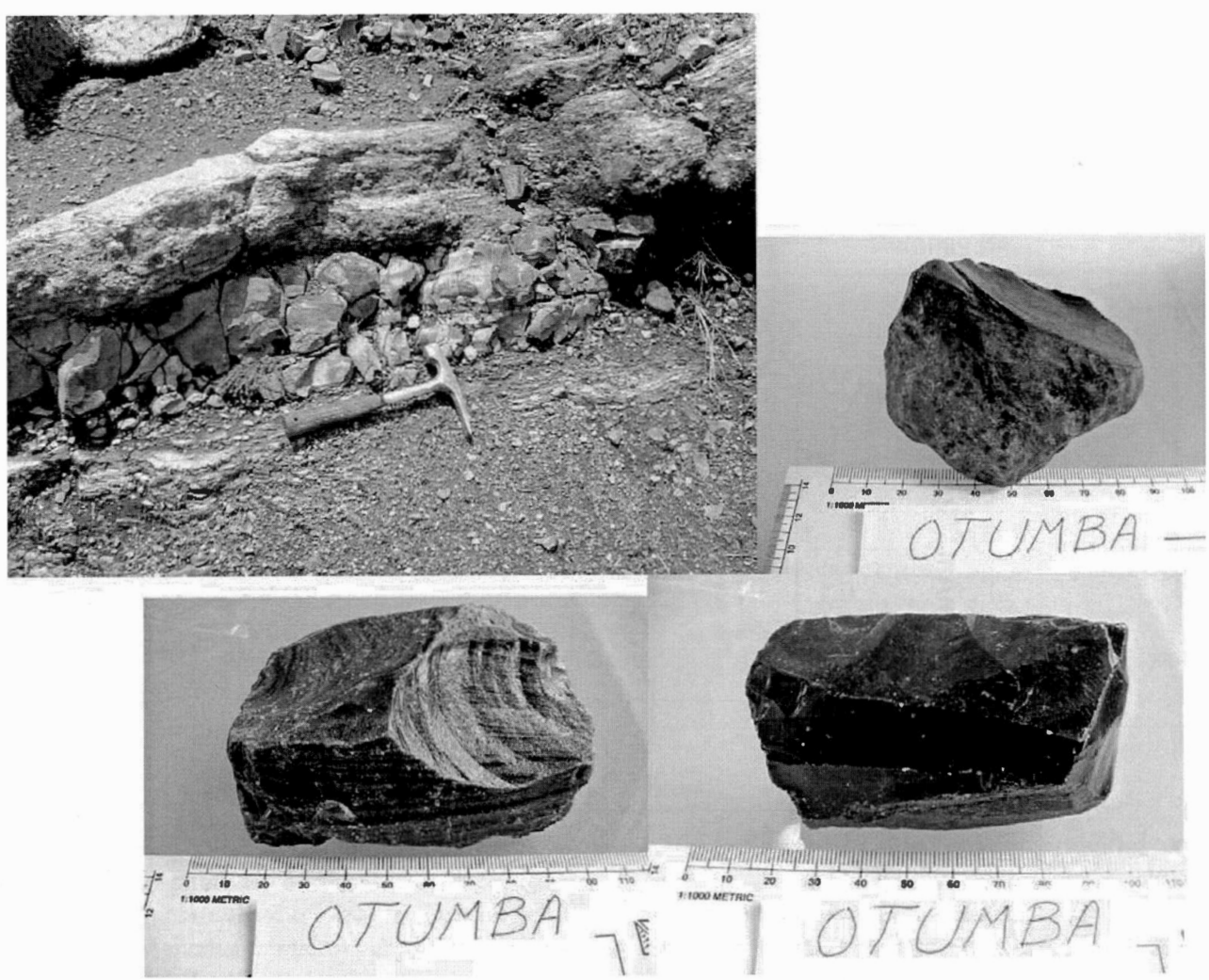


Fig. 85 Flujo de obsidiana de Otumba, edo. de México. Muestras de los distintos tipo de obsidiana del depósito.

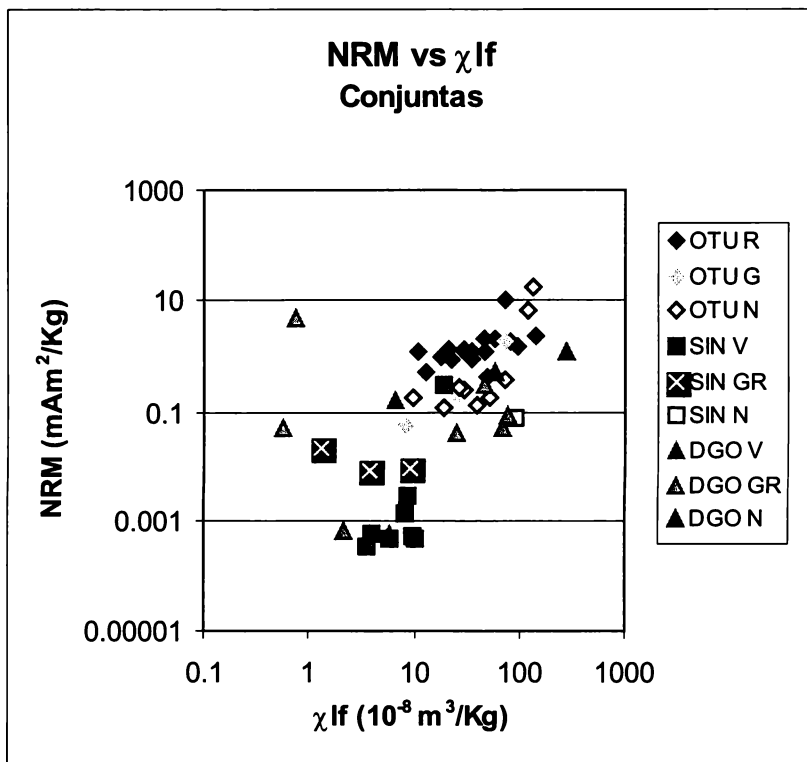


Fig. 86. Magnetización remanente natural vs susceptibilidad a bajas frecuencias de muestras de obsidianas de Otumba (OTU), Durango (DGO) y Sinaloa (SIN).

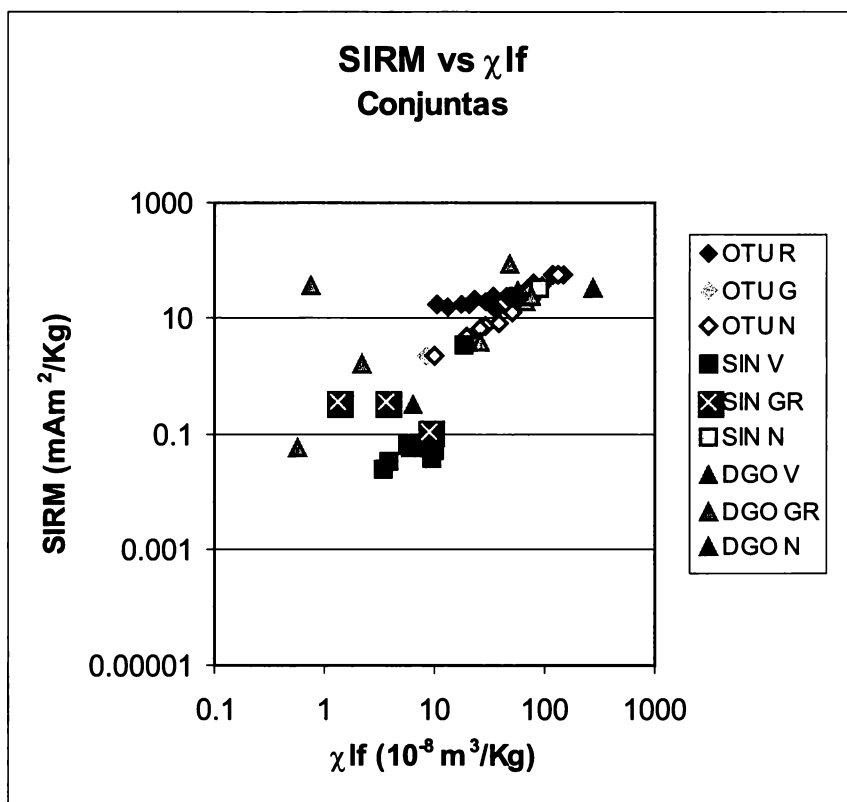


Fig. 87. Magnetización de saturación (1T) vs susceptibilidad a bajas frecuencias de muestras de obsidianas de Otumba (OTU), Durango (DGO) y Sinaloa (SIN).

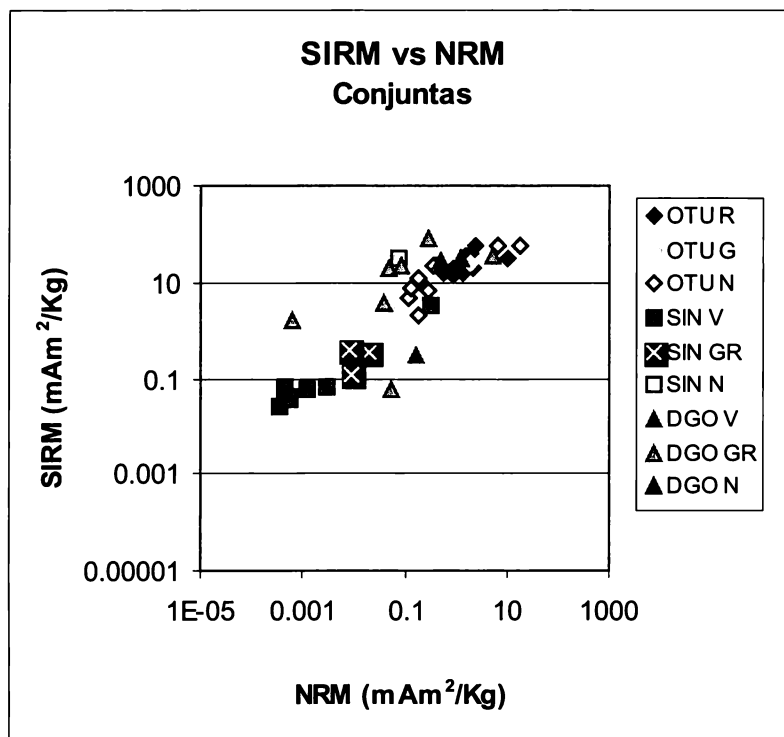


Fig. 88. Magnetización de saturación (1T) vs magnetización remanente natural de muestras de obsidias de Otumba (OTU), Durango (DGO) y Sinaloa (SIN).

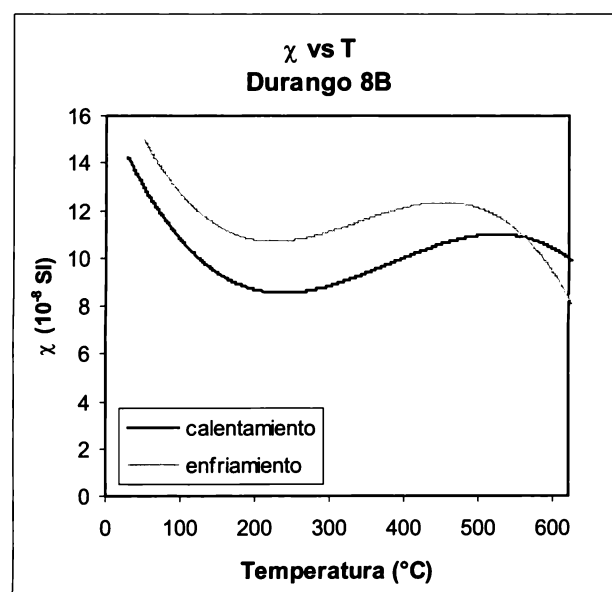
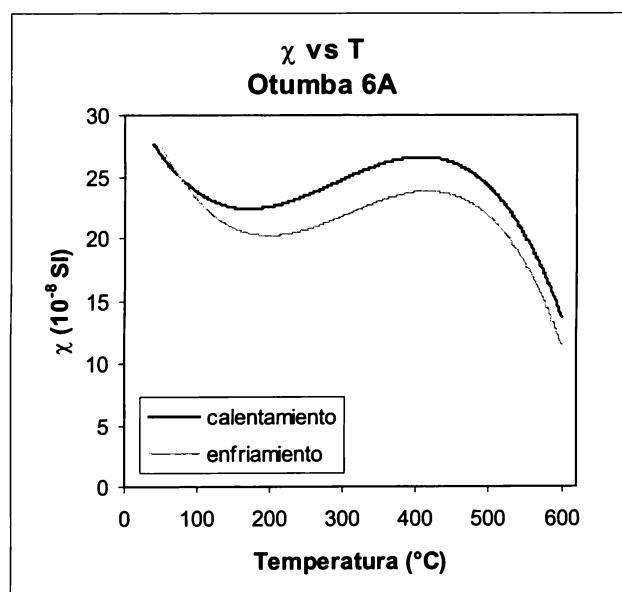


Fig. 89. Variaciones de susceptibilidad magnética vs temperatura para muestras de obsidias.

A continuación se muestran los resultados de las medidas de susceptibilidad a bajas y altas frecuencias, variación de susceptibilidad con temperatura, ciclos de histéresis e IRM mediante micromag e impartición de magnetizaciones escalonadas hasta llegar a una saturación de 1T.

En las Tablas 34 y 35 se muestran los valores medios por color de parámetros como: susceptibilidad a bajas frecuencias, magnetización remanente natural (NRM) y magnetización isoterma de saturación (1T) de las muestras de Sinaloa y Durango y de Otumba.

Tabla 34

Valores medios de parámetros magnéticos de Durango y Sinaloa

Coloración y procedencia	$\chi_{lf}(10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg})$	NRM (mAm ² /Kg)	SIRM(mAm ² /Kg)
Verde (Sinaloa)	8.57E3	4.01E-2	4.51E-1
Verde (Durango)	1.15E4	8.37E-2	1.91E-1
Gris rojizo (Sinaloa)	4.67E3	1.27E-2	2.82E-1
Gris rojizo (Durango)	3.15E4	7.89E-1	2.47E1
Negro (Sinaloa)	8.86E4	7.99E-2	3.27E1
Negro (Durango)	1.63E5	8.47E-1	3.03E1

Tabla 35

Valores medios de parámetros magnéticos de Otumba, Edo. Méx.

Coloración	χ_{lf} (10 ⁻⁸ m ³ /Kg)	NRM (mAm ² /Kg)	SIRM (mAm ² /Kg)
Rojo	4.75E4	1.84E0	2.48E1
Gris	3.44E4	6.90E-1	1.05E1
Negro	5.52E4	2.84E0	1.95E1

Se concluye que en general se observan tendencias en las propiedades que corresponden con las diferentes fuentes y los colores y que deben realizarse otros análisis dada la gran cantidad de depósitos de este tipo existentes en la Faja Volcánica Transmexicana (Pacheco,2004).

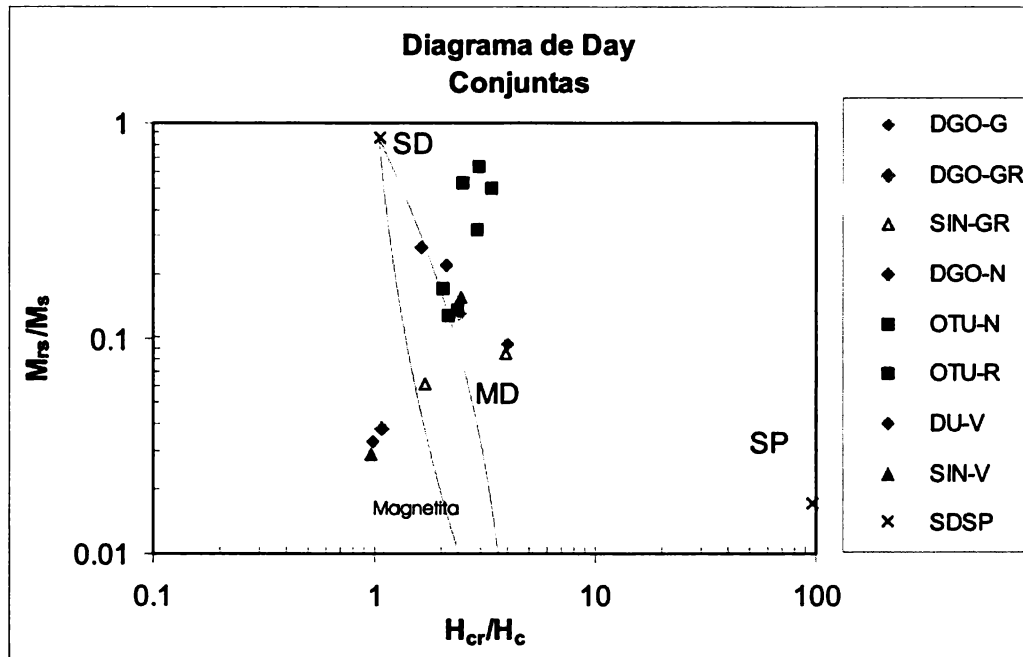


Fig. 90. Diagrama de Day modificado por Dunlop(2002). Muestras clasificadas por localidad y color G-gris, GR-gris rojizo, N- negro, V-verde.

6. APENDICE 1. TABLAS

Tabla A.1a.

Resultados de paleointensidades de Nagata *et al.*, 1965 (tomado de Urrutia, 1975)

Tipo de espécimen	Localidad	Edad	Método de fechamiento	Tc°C	Js (emu/g)	Js/Js'	Jn x 10 ³ (emu/g)	Jw/Js x 10 ³	Jw/J _T	(F/F ₀)	Observaciones
alfarería	Cuicuilco	300 aC- 0 dC		590	0.45	0.90	16.0	35.6	1.15	1.46	Fo= 44 735 gammas (Teoloyucan,Mex)
alfarería	Cuicuilco	300 aC- 0 dC		575	0.24	1.00	1.15	4.79	0.95	1.21	
Lava basáltica	Sur Cd. México			300	1.32	1.11	3.94	0.78			
Lava basáltica	Sur Cd. México			520							
Lava basáltica	Sur Cd. México			505	2.70	0.97	2.10	9.94			
Lava basáltica	Sur Cd. México			500	3.63	0.88	6.63				
Lava basáltica	Sur Cd. México			130	0.43	1.10	4.27	9.00	0.93	1.18	
Lava basáltica	Sur Cd. México			400							
Roca piroclástica	Sur Cd. México			570	0.90	0.99	8.06	2.05	0.84	1.06	
Roca piroclástica	Sur Cd. México			540	2.70	0.98	5.54	2.19	1.07	1.35	
Zona de contacto con lava	Sur Cd. México			530	1.31	1.00	2.87			1.14	
Roca piroclástica	Sur Cd. México			560	0.71	1.09					
Roca piroclástica	Sur Cd. México			550	1.02	0.95	3.13				
Lava basáltica	Sur Cd. México			450	0.09	1.06	1.95	21.62			
Lava basáltica	Sur Cd. México			300	0.15	1.02	2.06	13.72	1.00	1.27	
Lava basáltica	Sur Cd. México			570							
Lava basáltica	Sur Cd. México			300	0.39	1.58	1.30	3.34	1.07	1.36	
Lava basáltica	Sur Cd. México			530							
Lava basáltica	Sur Cd. México					2.60					

Tabla A.1b

Resultados de paleointensidades de Bucha *et al.*, 1970 (tomado de Urrutia, 1975)

Tipo de espécimen	Localidad	Edad	Método de fechamiento	Tc°C	Js (emu/g)	Js/Js'	Jn x 10 ³ (emu/g)	Jw/Js x 10 ³	Jw/J _T	(F/F ₀)	Observaciones
W-D	Morett, Colima 19°N, 104°W	830 +/- 280 aC	C ¹⁴							1.067 0.987 1.157	Fo= 44 500 gammas (Teoloyucan, Mex)
		825 +/- 225 aC	C ¹⁴							1.140 1.153	
		1 +/- 170 dC	C ¹⁴							1.404	
cerámica		100 +/- 200 dC	C ¹⁴							1.808 1.870	
		325 +/- 100 dC	C ¹⁴							1.568	
		500-700 dC	ET							1.038 1.148 22	
		500-700 dC	ET							0.990 1.222	
		1-100 dC	E							1.200	
		150-750 dC	E							1.644	
		300 aC - 100 dC	E							1.098	
		300 aC - 100 dC	E							1.085	
	Cuauttlán	100 - 300 aC	E							1.142 1.250	
	Tula, Hgo 20.6°N, 99.3°W	800 +/- 900 dC	ET							1.192 1.190	
	Tizapán, el Alto, Jal., 19.8°N, 103.1°W	900 - 1100 dC	ET							1.258 1.248	
		900 - 1100 dC	ET							1.383	
	Amapa, Nay. 22.1°N, 105.3°W	1000-1100 dC	ET							1.593	
		1200-1590 dC	ET							1.468 1.380	
	Playa del Tesoro 18.4°N, 103.8°W	1300-1500 dC	ET							1.225	
		150-750 dC	ET								
		300 aC	ET							1.644	
		100 dC	E							1.950	

C¹⁴ determinación con Carbono 14
 E determinación con estratigrafía
 ET determinación con estratigrafía estilística

Tabla A.2

Datos de Wolfman 1990

# mta	LOCALIDAD	N ₁ /N ₂	Plat	Plong	Dp	Dm	Edad estimada por evidencias cronológicas		Edad Arqueomagnética	
408	BRAWBEHL	8/6	86	224.2	1.9	3.3	250 aC	200 dC	60 dC	120 dC
749	TOMALTEPEC	8/8	84.8	265.8	1.8	2.9	250 aC	200 dC	245 dC	305 dC
754	TOMALTEPEC	8/6	87.6	250.5	1.1	1.9	250 aC	200 dC	55 dC	85 dC
587	KAMINALJUYU	8/8	88	212.1	1.7	3.1	200 aC	100 dC	35 dC	95 dC
776	EL PORTON	8/8	86.7	122.6	0.7	1.4	200 aC	200 dC	15 dC	40 dC
458	KAMINALJUYU	7/7	87.8	136.4	1.1	2.1	200 aC	400 dC	25 dC	55 dC
777	KAMINALJUYU	8/8	76.7	308.5	1.9	3.1	200 aC	400 dC	370 dC	420 dC
777	KAMINALJUYU	8/7	86.7	308.5	1.9	3.1	600 dc	900 dC	370 dC	420 dC
778	KAMINALJUYU	8/8	81.9	313.3	0.5	0.8	200 aC	400 dC	335 dC	355 dC
778	KAMINALJUYU	8/6	81.9	313.3	0.5	0.8	600 dc	900 dC	335 dC	355 dC
569	PANTEON	8/8	81.9	114.3	0.8	1.6	125 aC	1 dC	25 aC	1 dC
569	PANTEON	8/8	81.9	114.3	0.8	1.6	400 aC	125 aC	25 aC	1 dC
768	TRONCONERA 3	8/6	86.7	224.2	0.5	0.9	100 aC	100 dC	65 dC	95 dC
770	TRONCONERA 1	8/8	87.7	262.1	1.3	2.3	100 aC	100 dC	50 dC	90 dC
771	MANGO	9/8	87.6	215.2	0.9	1.7	100 aC	100 dC	45 dC	85 dC
478	KAMINALJUYU	9/9	8.9	192.2	1.7	3.2	100 dC	400 dC	--	--
480	KAMINALJUYU	8/8	38.4	196	2.5	4.2	100 dC	400 dC	--	--
482	KAMINALJUYU	8/7	82.2	192	0.5	0.9	100 dC	600 dC	--	--
787	TAZUMAL	8/7	87.5	159.2	0.3	0.6	300 dC	600 dC	565 dC	580 dC
783	MANZANILLO	8/8	87.3	258.6	1.8	3.1	350 dC	500 dC	245 dC 470 dC	315 dC 530
784	MANZANILLO	8/8	86	302.5	0.6	1.0	350 dC	500 dC	295 dC 475 dC	325 dC 495 dC
471	KAMINALJUYU	9/9	33.3	193	6.5	11.3	400 dC	500 dC	--	--
476	KAMINALJUYU	8/7	-1.9	198	1.2	2.1	400 dC	500 dC	--	--
580	KAMINALJUYU	6/6	10.7	188.7	0.8	1.6	400 dC	500 dC	--	--

Tabla A.2 (Continuación)

541	MONTE ALBAN	16/14	84.8	166.7	1.6	2.9	400 dC	700 dC	270 dC o 565 dC	350 dC o 600 dC
744	MONTE ALBAN	8/8	84.8	193.9	1.9	3.4	400 dC	700 dC	510 dC	575 dC
773	KAMINALJUYU	12/12	71.8	181	1.8	3.3	400 dC	900 dC	--	--
317	TEOTIHUACAN	9/9	79.4	296.9	2.5	3.8	425 dC	600 dC	360 dC	455 dC
540	TEOTIHUACAN	9/9	85.2	309.1	2.4	4.0	425 dC	725 dC	270 dC 455 dC	350 dC 510 dC
564	TEOTIHUACAN	8/8	84.5	284.1	2.3	3.7	425 dC	725 dC	250 dC 435 dC	345 dC 495 dC
786	TEOTIHUACAN	8/8	85.7	287.4	2.3	3.8	425 dC	725 dC	260 dC 450 dC	340 dC 520 dC
584	KAMINALJUYU	8/8	86.8	242.4	1.2	2.2	500 dC	550 dC	490 dC	525 dC
772	KAMINALJUYU	8/7	86.9	244.2	0.4	0.8	500 dC	550 dC	500 dC	520 dC
470	KAMINALJUYU	8/8	84	211.1	0.7	1.2	500 dC	600 dC	535 dC	555 dC
474	KAMINALJUYU	8/7	84.6	184.7	0.3	0.6	500 dC	600 dC	525 dC	545 dC
477	KAMINALJUYU	9/9	86.2	206.8	0.2	0.3	500 dC	600 dC	515 dC 530 dC	530 dC o 565 dC
481	KAMINALJUYU	7/7	74.6	175	1.5	2.8	500 dC	600 dC	--	--
483	KAMINALJUYU	8/6	85.1	196.5	0.5	0.9	500 dC	600 dC	525 dC o 550 dC	545 dC o 570 dC
585	KAMINALJUYU	8/7	83.3	154.6	1.1	2.1	500 dC	600 dC	585 dC	610 dC
596	CERRO ZAPOTECAS	8/8	87.3	66.9	1.2	2.1	500 dC	900 dC	785 dC	820 dC
766	SAN ANDRES	8/7	80.1	70.8	0.6	1.3	600 dC	800 dC	715 dC	745 dC
767	SAN ANDRES	8/8	79.8	66.3	1.2	2.4	600 dC	800 dC	705 dC	755 dC
469	KAMINALJUYU	10/9	79.6	95.6	0.3	0.6	600 dC	900 dC	670 dC o 880 dC	695 dC o 900 dC
472	KAMINALJUYU	9/9	77.5	159.2	1.6	3.0	600 dC	900 dC	--	--
473	KAMINALJUYU	8/8	62.8	186.2	2.3	4.1	600 dC	900 dC	--	--
479	KAMINALJUYU	8/7	84.9	118.8	0.2	0.5	600 dC	900 dC	820 dC	840 dC
583	KAMINALJUYU	11/11	81.5	78.8	0.8	1.6	600 dC	900 dC	700 dC	735 dC
586	KAMINALJUYU	8/8	83.7	100.1	2.1	4.0	600 dC	900 dC	745 dC 825 dC	795 dC 875 dC
774	KAMINALJUYU	8/8	87.2	346.4	0.9	1.7	600 dC	900 dC	--	--
775	KAMINALJUYU	8/7	81.5	144.0	0.9	1.8	600 dC	900 dC	595 dC	615 dC
318	LAMBITYECO	8/7	80.8	77.5	0.7	1.3	700 dC	800 dC	700 dC	730 dC

Tabla A.2 (Continuación)

527	TIERRAS LARGAS	8/8	79.7	109.4	1.1	2.1	700 dC	1200 dC	645 dC o 895 dC	680 dC o 940 dC
529	TIERRAS LARGAS	8/8	80.2	114.9	1.0	2.0	700 dC	1200 dC	635 dC o 900 dC	670 dC o 945 dC
539	HUAPALCALCO	8/8	82.5	90.4	1.1	2.1	750 dC	950 dC	850 dC	880 dC
563	HUAPALCALCO	9/9	83.4	67.1	1.4	2.7	750 dC	950 dC	745 dC	785 dC
570	CHACHI	8/8	78.5	105.9	1.0	1.9	800 dC	1000 dC	885 dC	930 dC
319	LAMBITYECO	8/7	79.1	163.8	1.7	3.1	900 dC	1200 dC	1045 dC	1090 dC o 1200 dC
321	LAMBITYECO	8/7	78.7	170.7	1.6	3.0	900 dC	1200 dC	1055 dC	1100 dC o 1200 dC
407	LAMBITYECO	8/8	78.5	179.6	2.1	3.8	900 dC	1200 dC	1070 dC	1155 dC o 1200 dC
488	TULA	8/8	76.9	188.0	1.4	2.3	950 dC	1200 dC	1095 dC	1140 dC
598	TULA	9/9	74.9	170.2	1.6	2.8	950 dC	1200 dC	1140 dC	1190 dC
415	TULA	8/8	54.5	196.8	3.5	5.2	1150 dC	1200 dC	--	--
440	TULA	8/8	75.8	158.2	0.9	1.6	1150 dC	1200 dC	--	--
611	TULA	8/8	75.8	169.4	0.8	1.4	1150 dC	1200 dC	--	--
612	TULA	8/8	78.0	173.5	0.8	1.3	1150 dC	1200 dC	--	--
613	TULA	9/7	77.2	172.5	1.7	2.9	1150 dC	1200 dC	--	--
785	TULA	9/9	72.9	189.4	2.6	4.2	1150 dC	1200 dC	--	--
AL85	ALTAMIRA	10/10	83.5	219.4	1.3	2.4	119 dC	119 dC	75 dC	135 dC
CO186	COPAN	8/8	86.9	287.4	1.2	2.1	300 dC	300 dC	275 dC	325 dC
C0102	COPAN	6/6	86.8	144.7	1.0	1.8	300 dC	600 dC	560 dC	585 dC
TE170	TEOTIHUACAN	8/8	85.7	291.9	1.1	1.9	425 dC	725 dC	285 dC 465 dC	330 dC 505 dC
TE171	TEOTIHUACAN	8/8	86.3	309.3	0.4	0.7	425 dC	725 dC	295 dC 475 dC	325 dC 495 dC
TE172	TEOTIHUACAN	8/8	86.8	277.9	0.7	1.2	425 dC	725 dC	285 dC 480 dC	310 dC 510 dC
TE173	TEOTIHUACAN	8/8	85.9	291.5	0.7	1.1	425 dC	725 dC	290 dC 465 dC	315 dC 495 dC
TE176	TEOTIHUACAN	6/6	82.5	302.0	2.8	4.5	425 dC	725 dC	300 dC 375 dC	375 dC 480 dC
CO188	COPAN	8/8	84	168.0	1.5	2.8	600 dC	600 dC	575 dC	600 dC
SA158	SAN ANDRES	9/9	86.4	146.6	1.5	2.8	600 dC	600 dC	560 dC	590 dC
CO100	COPAN	5/5	87.1	219.1	1.2	2.2	600 dC	740 dC	510 dC	570 dC
CO183	COPAN	8/7	83.8	96.5	0.8	1.5	600 dC	800 dC	835 dC	865 dC
CO185	COPAN	8/8	85.0	235.4	1.7	2.9	600 dC	800 dC	495 dC	570 dC
SA159	SAN ANDRES	10/10	83.1	82.2	0.7	1.4	600 dC	800 dC	740 dC 850 dC	765 dC 875 dC

Tabla A.3

Datos muestras de Teotihuacan 1999

Muestra	N		Observaciones
TE1	10	muro	Ciudadela, quemado
TE2	7	piso	Atetelco, quemado
TE3	3	talud	Pirámide de la Luna, quemado
TE4	6	muro	Complejo Plaza Oeste, quemado

Tabla A.4

Datos muestras de Teopancazco 1999

Muestra	N		Ubicación	Observaciones
TP1		piso	E1C58 R7 N468E93	Movido
TP2	1	piso	E1C206P13 N458E91	Quemado
TP3	10	piso	E1C14 N435E87	Quemado
TP4	2	piso	E1C14 N435E87	
TP5	7	piso	E1C28 N439E91	Ocupación Batres
TP6	8	piso	E1C25 N440E90	
TP7	5	piso	E1C53 P1 N464E108	
TP8	5	piso	E1C53 P1 N464E107	Quemado

Tabla A.5

Datos muestras de Xalla 2001

Muestra	N	Características	Ubicación
Xa1	7	Piso 1 q	E4C1 N349 E331
Xa2	8	Piso 1 q	E4C1 N347 E339
Xa3	7	Piso 1 q	E4C1 N348 E339
Xa4	9	Piso 1 q	E4C1
Xa5	10	Piso 1 no q	E4C1 N335 E333
Xa6	9	Piso 1 no q	E4C1 N346 E333
Xa7	8	Piso 1 no q	E2C3 N352 E397
Xa8		Piso 1 no q	E2C1 N349 E397
Xa9		Muro Sur	E2C3 N344 E399
Xa10		Piso1 no q	E9 Edif 1 N350 E368
Xa11	4	Piso 2 rojo	E9 Edif 2 N350 E368
Xa12	6	Piso 3	E9 Edif 3 N350 E363
Xa13	4	Piso 4	E9 Edif 4 N356 E370
Xa14	6	Piso Pza. Edif.rojo	E9 Edif 4 N356 E370
Xa15	6	Piso 1	E9 plaza1 Edif 5 N346 E359

Tabla A.6

Datos muestras de Xalla 2003

Muestra	N	Características	Ubicación
X1	4	Piso1 no q	E1 N385 E369
X2	4	Piso1 no q	E1 N380 E370
X3	3	Piso1 no q	E1 N378 E370
X4	1	Piso1 no q	E1 N378 E369
X5	2	Piso1 no q	E1 N380 E369
X6	-	Muros rojos	N 361 E378
X7	1	Muros rojos	N 380 E361
X8	4	Muros rojos	N 380 E361
X9	8	Muros rojos	N 380 E361
X10	—		E12 C1 N411 E317
X11	—		E12 C1 N411 E317

Tabla A.7

Datos muestras de Teopancazco 2003

Muestra	N	Características	Ubicación
T1	6	Piso 2	C154-160
T2	4	Piso 2	C153 E108 N464
T3	2	Piso 2	C153 E108 N462
T4	5	Piso 1 nq	Piso del templo

Tabla A.8

Datos muestras del Templo Mayor 1999

Muestra	N	Etapa	Observaciones
TM1	1	VII	
TM2	2	VI	muro
TM3	2	VI	muro
TM4	2	V	muro
TM5	1	V	muro
TM6	2	II	muro Templo Norte
TM7	1	II	muro Templo Norte
TM8	2	II	muro Templo Norte
TM9	2	II	muro Templo Norte
TM10	2	II	piso Templo Norte
TM11	5	III	escalón
TM12	1	III	escalón
TM13	3	III	talud
TM14	4	IV	escalón
TM15	6	IV	escalón
TM16	5	VI	muro

Tabla A.9

Datos muestras del Templo Mayor (Apartado 2001)

Muestra	N	Características	Observaciones
Sq1	6	Muro	Etapa 1
Sq3	4	Muro	Debajo de etapa 2
Sq5	5	Piso	Patio hundido
Sq6	4	Piso	Unidad 14
Sq7	4	Piso	Unidad 13 pozo A

Tabla A.10

Datos muestras de Tlatelolco 2002

Muestra	N	Características	Ubicación
Cui-1	6	Piso quemado	
Cui-2	2	Muro	
Cui-3	4	Muro	
Cui-4	2	Muro	tlecuil o horno
Cui-5	1	Muro	tlecuil o horno
Cui-6	1	Muro	tlecuil o horno
Cui-7	1	Muro	tlecuil o horno
Cui-8	-	Muro	tlecuil o horno
Cui-9	1	Muro	tlecuil o horno
Cui-10	3	Piso	
Cui-11	4	Piso	tlecuil o horno
Cui-12	2	Piso	
Cui-13	4	Piso	tlecuil o horno

Tabla A.11

Datos muestras de Xochicalco 1999

Muestra	N		Observaciones
XO1	4	muro	Temazcal oeste
XO2	3	muro	Temazcal oeste
XO3	1	muro	Temazcal oeste
XO4	2	muro	Temazcal oeste
XC1	8	muro	Temazcal oeste, quemado
XO5	5	piso	Temazcal norte
XO6	2	piso	Temazcal norte
XC2	7	muro	Temazcal norte, quemado
XO7	6	piso	Altar al W de chimenea del observatorio, quemado
XO8	4	piso	Altar al W de chimenea del observatorio, quemado
XO9		muro	Acrópolis, frente Pirámide de Serpientes Emplumadas
XO10		muro	Acrópolis, frente Pirámide de Serpientes Emplumadas
XO11	8	muro	Acrópolis, frente Pirámide de Serpientes Emplumadas
XO12	3	talud	Acrópolis
XO13	2	talud	Acrópolis
XO14	3	talud	Acrópolis
XO15		talud	Acrópolis
XO16	1	talud	Acrópolis

Tabla A.12

Datos muestras de Xochicalco 2004

Muestras	N		Ubicación
XO20	4	piso	Sector I estructura 4 esq NE
XO21		talud	Acrópolis
XO22		piso	Acrópolis
XO23	5	piso	Acrópolis patio 2 cuarto N
XO24		piso	Pirámide de Serpientes Emplumadas 1ª etapa const
XC25		talud	Pirámide de Serpientes Emplumadas 2ª etapa const
XO26		piso	Pirámide de las Estelas cuarto S esq NE

Tabla A.13

Datos muestras de Cacaxtla 1999

Muestra	N		Observaciones
CA1	1	guardapolvo	Atrás del Edificio A
CA2	2	muro	Atrás del Edificio A
CA3	1	guardapolvo	Atrás del Edificio A
CA4	1	guardapolvo	Atrás del Edificio A
CA5	1	guardapolvo	Atrás del Edificio A
CA6	2	guardapolvo	Atrás del Edificio A
CA7		escalón	Patio Hundido (escalinata sur)
CA8		escalón	Patio Hundido (escalinata sur)
CA9		muro	Patio Hundido (escalinata oeste)
CA10	1	guardapolvo	Edificio E
CA11	5	muro	Edificio E
CA12	2	guardapolvo	Edificio E
CA13	3	muro	Pórtico al sur del Templo de Venus
CA14	7	guardapolvo	Piso intermedio

Tabla A.14

Datos muestras de Sta. Cruz Atizapán 2000

Espécimen	Características	Observaciones
1	Tlecuil	
2	Tlecuil	
3	Tlecuil	
4	Tlecuil	
5	Tlecuil	
6	Tlecuil	

Tabla A.15

Datos muestras de Pañhú, Valle del Mezquital 2003

Muestra	N	Características	Ubicación	Cronología tentativa
02-01	1	Piso de barro quemado	Subestructura Templo Principal	ca 450 dC
02-02	1	Piso de barro quemado	Subestructura Templo Principal	ca 450 dC
02-03	1	Piso de barro quemado	Estructura Templo de Tlálóc	ca 900 dC
02-04	1	Piso de cal	Estructura Templo de Tlálóc	ca 900 dC
02-05	1	Piso de barro quemado	Estructura L	ca 900 dC

Tabla A.16

Colores de las obsidianas de Sinaloa y Durango

Sinaloa		
<i>Muestra</i>	<i>Color Munsell</i>	<i>Descripción</i>
1b	5y 4/3	olivo
2a	5y 4/3	olivo
2b	5y 5/6	olivo
3a	5y 4/2	gris olivo
3b	5y 4/2	gris olivo
4a	5y 4/2	gris olivo
4b	2.5yr 4/1	rojo débil
5a	2.5yr 4/1	rojo débil
5b	5y 2.5/1	negra
12a	5y 4/1	gris oscuro
12b	5y 5/4	olivo
13a	2.5yr 4/1	rojo débil
Durango		
<i>Muestra</i>	<i>Color Munsell</i>	<i>Descripción</i>
6a	5y 5/2	gris olivo
6c	5y 4/2	gris olivo
7a	10yr 4/1	gris oscuro
7b	2.5yr 5/1	gris rojizo
7b	2.5 yr 4/4	café olivo
7C	2.5yr 5/1	gris rojizo
8a	2.5 yr 6/1	gris rojizo
8b	gley1 2.5 N	negro
9a	2.5yr 5/1	gris rojizo
9b	2.5 yr 6/1	gris rojizo
10a	2.5 yr 6/1	gris rojizo
10b	gley1 2.5 N	negro
11a	2.5 yr 4/1	gris rojizo

Tabla A.17

Colores de las obsidianas de Otumba

Otumba		
<i>Muestra</i>	<i>Color Munsell</i>	<i>Descripción</i>
1a	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con manchas muy negras pequeñas e irregulares
1c	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con grandes franjas negras
1d	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con pequeñas zonas negras
1f	2.5 YR 3/4	Café oscuro rojizo con regiones negras
1g	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con manchitas negras
2a	2.5 YR 3/4	Café oscuro rojizo con manchas negras
2b	2.5 YR 2.5/4	Café oscuro rojizo con manchas negras
2c	2.5 YR 2.5/4	Café oscuro rojizo con zona negra
2d	7.5 YR 2.5/2	Café muy oscuro casi homogéneo
2e	5 YR 3/3	Café rojizo oscuro con zonas negras
3a	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con manchas y regiones negras
3b	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con manchas negras
3c	2.5 YR 2.5/4	Café oscuro rojizo con zona negra
3d	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con manchas negras
3e	2.5 YR 3/4	Café oscuro rojizo con regiones negras
4a	7.5 YR 2.5/2	Café muy oscuro con manchas negras
4c	5 YR 3/3	Café rojizo oscuro con zonas negras
4da	5 YR 3/4	Café rojizo oscuro con zonas negras
4e	7.5 YR 2.5/3	Café muy oscuro con manchas negras
5a	GLE Y1 3/N	Gris muy oscuro
5b	GLE Y1 3/N	Gris muy oscuro con marcas de burbujas, en algunas regiones translúcidas
5c	GLE Y1 3/N	Gris muy oscuro
5d	GLE Y1 2.5/N con GLE Y1 3/N	Negra con bandas gris muy oscuro
5e	GLE Y1 2.5/N con 10 YR 6/6	Negra con una cara ligeramente color café amarillento
5f	GLE Y1 2.5/N con GLE Y1 7/N	Negra con bandas en color gris claro

7. APENDICE 2. OBTENCIÓN DE MUESTRAS

Una muestra en arqueomagnetismo se constituye de 10 a 12 especímenes de acuerdo con el tipo de muestra que sea: un horno, un piso quemado o no quemado, una pintura, etc.

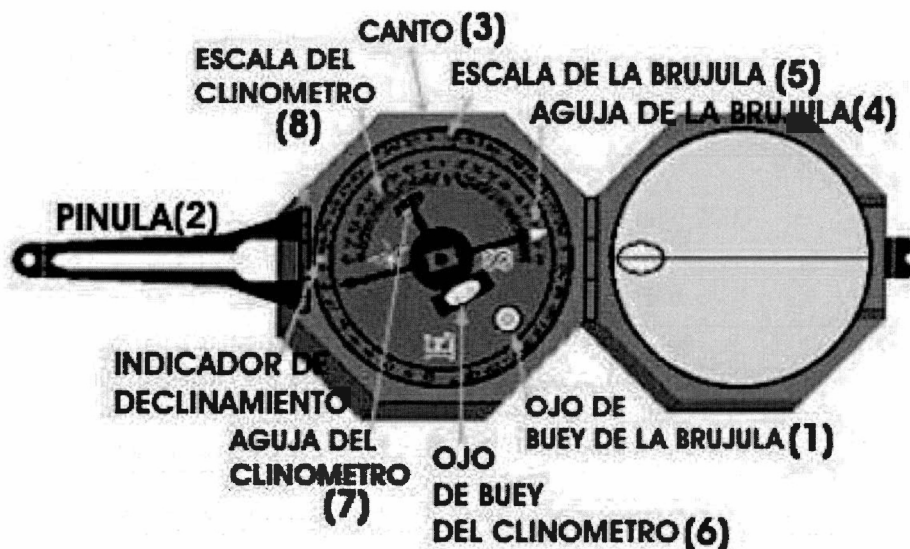
El número de especímenes garantiza una media estadística que homogenice la composición o en su caso el estado de exposición al fuego.

Las muestras para estudios de paleodirecciones se deben encontrar “in situ” y deben de ser orientadas antes de ser removidas, utilizando de preferencia una brújula Brunton que **debe ser presentada** en el Laboratorio al momento de entregar las muestras, para cotejar su calibración.

Material necesario

1. Brújula Brunton
2. Escuadras
3. Un cincel de acero inoxidable
4. Martillo
5. Espátulas
6. Libreta
7. GPS
8. Plumones permanentes
9. Bolsas
10. Cajas
11. Algodón
12. Masking tape
13. Cinta métrica
14. Cutter
15. Brocha
16. Testigos de madera (en el caso de obtención mediante testigos (A.2.2 y A.2.4)
17. Pegamento Epóxico de secado rápido (RESIEPOXI)
18. Guantes

PARTES DE LA BRÚJULA



ORIENTACIÓN DE PISOS

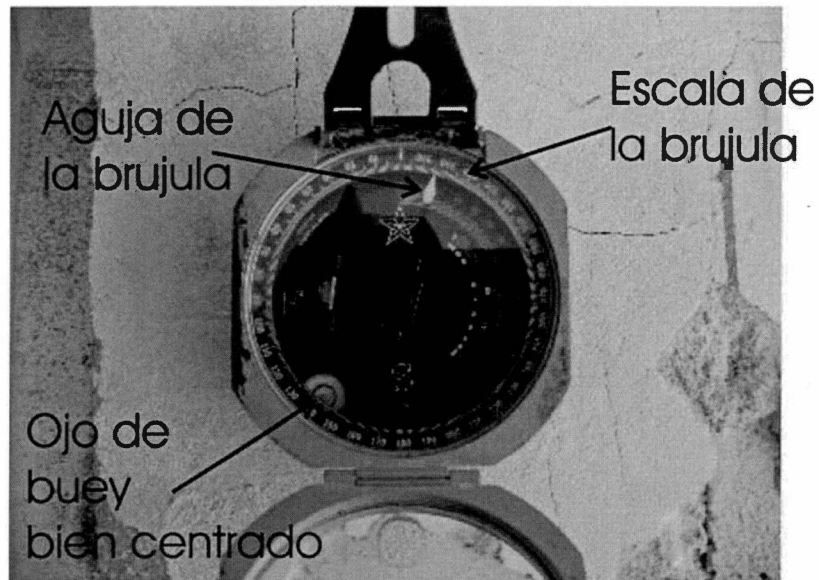
A.2.1) Obtención de fragmentos de piso

Material

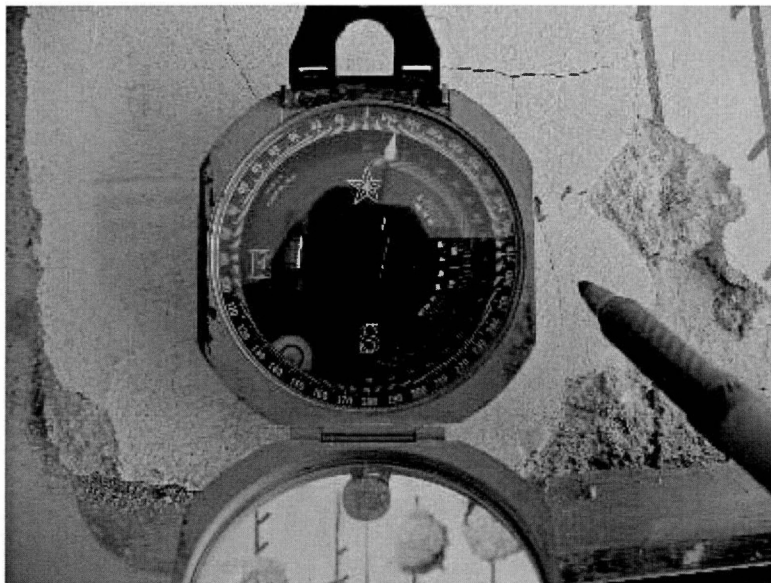
Del 1 al 15

Procedimiento

- a) Coloque la brújula sobre el piso y busque la posición en la que el ojo de buey (1) quede bien centrado.

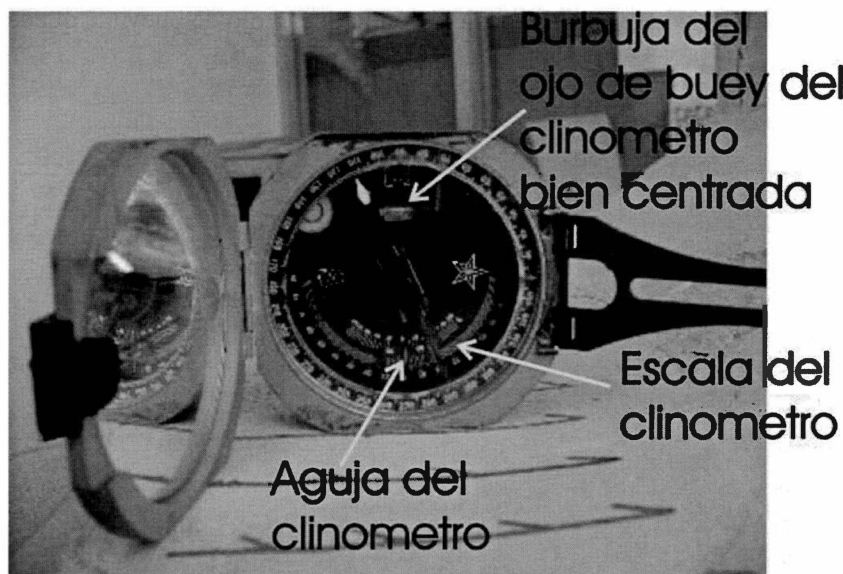


- b) Con el plumón permanente trace una recta con ayuda del canto (3) derecho de la brújula y hacia donde apunta la pínula(2), como se muestra en la figura.



- c) La punta de la flecha debe de coincidir con la dirección que apunta la pínula(2).

- d) Anote en su libreta la dirección que corresponde al **AZIMUT** de esta línea, que es la dirección que muestra la aguja de la brújula (4) sobre la escala de la misma(5).
- e) Ahora coloque el canto de la brújula sobre la línea trazada como se muestra en la figura, de nuevo la punta de la flecha y la pínula deben coincidir.
- f) Ahora mueva el control del nivel que se encuentra detrás de la brújula hasta lograr que la burbuja del ojo de buey del clinómetro(6) esté en la posición central.



- g) Anote el valor de la escala del clinómetro (8) que apunta la aguja del mismo(7) en su libreta como **INCLINACIÓN**.
- h) Trace con ayuda de la escuadra paralelas a esta línea.



- i) Con ayuda del cincel y martillo vaya golpeando alrededor del área hasta separar el fragmento del piso.

A.2.2) Método de colocación de testigos sobre pisos

Material

Del 1 al 15 y

- Cilindros de madera de .5 cm de alto y 1 pulgada - 2.54 cm de diámetro (normalmente un palo de escoba tiene este diámetro).
Las tapas de los cilindros deben haber sido lijadas con lija de agua para tener una superficie bien lisa.
- Pegamento epóxico
RESI EPOXI de secado rápido
Es necesario el uso de estas marcas ya que han sido probadas en el laboratorio de que no contienen materiales magnéticos.
- Guantes.

Procedimiento

- a) Limpie la superficie en la que va a adherir el testigo.
- b) Coloque el pegamento en la superficie de madera.

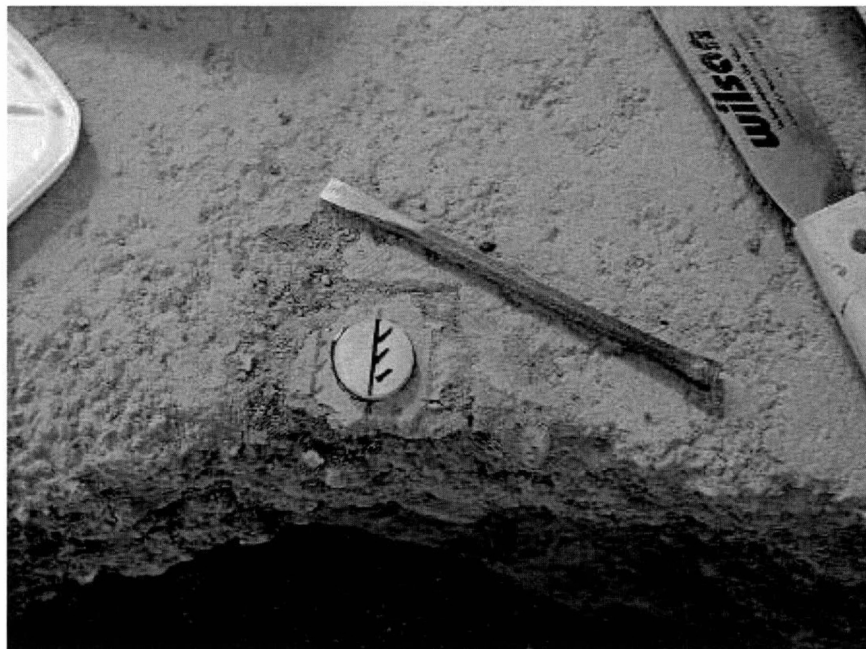


- c) pegue al piso y



A. M. Soler-Arechalde

- d) *Espera a que seque*. Si es posible coloque los testigos (8-10) en diferentes partes del mismo.
- e) Coloque el canto de la brújula(3) sobre el testigo y mueva hasta que logre que el ojo de buey (1) esté centrado.
- f) Marque con el plumón la recta sobre el testigo, la punta de la flecha debe coincidir con la de la pínula (2) .
- g) Anote la dirección de la brújula (4) que apunta sobre la escala de la brújula (5) como **AZIMUT**.
- h) Ahora coloque el canto (3) de la brújula sobre la línea trazada como se muestra en el dibujo, de nuevo la punta de la flecha y la pínula (2) deben coincidir.
- i) Y mueva el control del nivel que se encuentra detrás de la brújula hasta lograr que la burbuja del ojo de buey del clinómetro (6)esté en la posición central.
- j) Anote el valor que marca la aguja del clinómetro(7) sobre la escala del mismo(8) en su libreta como **INCLINACIÓN**.
- k) Con ayuda del cincel y martillo vaya golpeando alrededor del área hasta separar el fragmento del piso.



ORIENTACIÓN DE MUROS o TALUDES

A.2.3) Obtención de fragmentos de muro

Material

Del 1 al 15

Procedimiento

- a) Coloque el canto de la brújula (3) sobre el muro y busque la posición en la que el ojo de buey (1) quede bien centrado.



- b) Con el plumón permanente trace una recta con ayuda del canto de la brújula (3) y la punta de la flecha debe de ser hacia donde apunta la pínula (2), como se muestra en la figura.



- c) Anote en su libreta la dirección (5) que indica la aguja (4) que corresponde al **AZIMUT** de esta línea.
- d) Ahora coloque el canto de la brújula (3) sobre la superficie del muro o talud perpendicularmente a la línea trazada como se muestra, en este caso la pínula(2) debe estar a la derecha de la punta marcada.
- e) Mueva el control del nivel que se encuentra detrás de la brújula hasta lograr que la burbuja del clinómetro (6) esté en la posición central.



- f) Anote en su libreta el valor que indica la aguja del clinómetro (7) sobre la escala (8) como **INCLINACIÓN**.
- g) Con las escuadras trace paralelas a la línea marcada.
- h) Con ayuda del cincel y martillo vaya golpeando alrededor del área hasta separar el fragmento del muro.

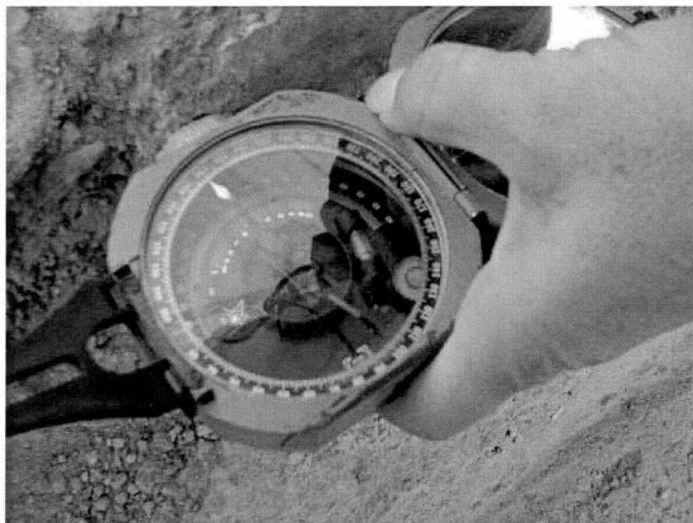
A.2.4) Método de colocación de testigos sobre muros

Material

Del 1 al 15 y

- Cilindros de madera de .5 cm de alto y 1 pulgada - 2.54 cm de diámetro (normalmente un palo de escoba tiene este diámetro).
Las tapas de los cilindros deben haber sido lijadas con lija de agua para tener una superficie bien lisa.
- Pegamento epóxico.
RESI EPOXI de secado rápido
Es necesario el uso de estas marcas ya que han sido probadas en el laboratorio de que no contienen materiales magnéticos.
- Guantes.

- a) Limpie la superficie en la que va a adherir el testigo.
- b) Coloque el pegamento en la superficie del testigo de madera y pegue al muro. Si es posible coloque entre 8 y 10 testigos en diferentes partes del mismo. *Espere a que seque.*
- c) Coloque el canto derecho de la brújula (3) sobre el testigo y mueva hasta que logre que el ojo de buey (1) esté centrado.
- d) Marque con el plumón la recta sobre el testigo, la punta de la flecha debe coincidir con la de la pínula(2).
- e) Anote la dirección que apunta la aguja de la brújula (3) sobre la escala (4) como **AZIMUT**.



- f) Ahora coloque el canto derecho de la brújula (3) sobre la superficie del testigo perpendicularmente a la línea trazada como se muestra; en este caso la pínula (2) debe estar a la derecha de la punta marcada.



- g) Mueva el control del nivel que se encuentra detrás de la brújula hasta lograr que el ojo de buey (6) quede en la posición central.
- h) Anote el valor que indica la aguja del clinómetro sobre su escala (7 y 8) en su libreta como **INCLINACIÓN**.
- i) Con ayuda del cincel y martillo vaya golpeando alrededor del área hasta separar el fragmento del muro.

8. APÉNDICE 3. DETERMINACIÓN DE POLOS Y DIRECCIONES ESPERADAS DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO

A.3.1) Determinación del polo magnético de la Dirección del Campo Magnético

De la Figura A.3.1, sean (λ_s, ϕ_s) la latitud y longitud de un sitio dado y las del polo (λ_p, ϕ_p) , por tanto se forma un triángulo esférico con ápices (λ_s, ϕ_s) , (λ_p, ϕ_p) y el norte geográfico N. La colatitud (distancia angular desde el norte geográfico) del sitio es p_s , y la colatitud del polo magnético p_p .

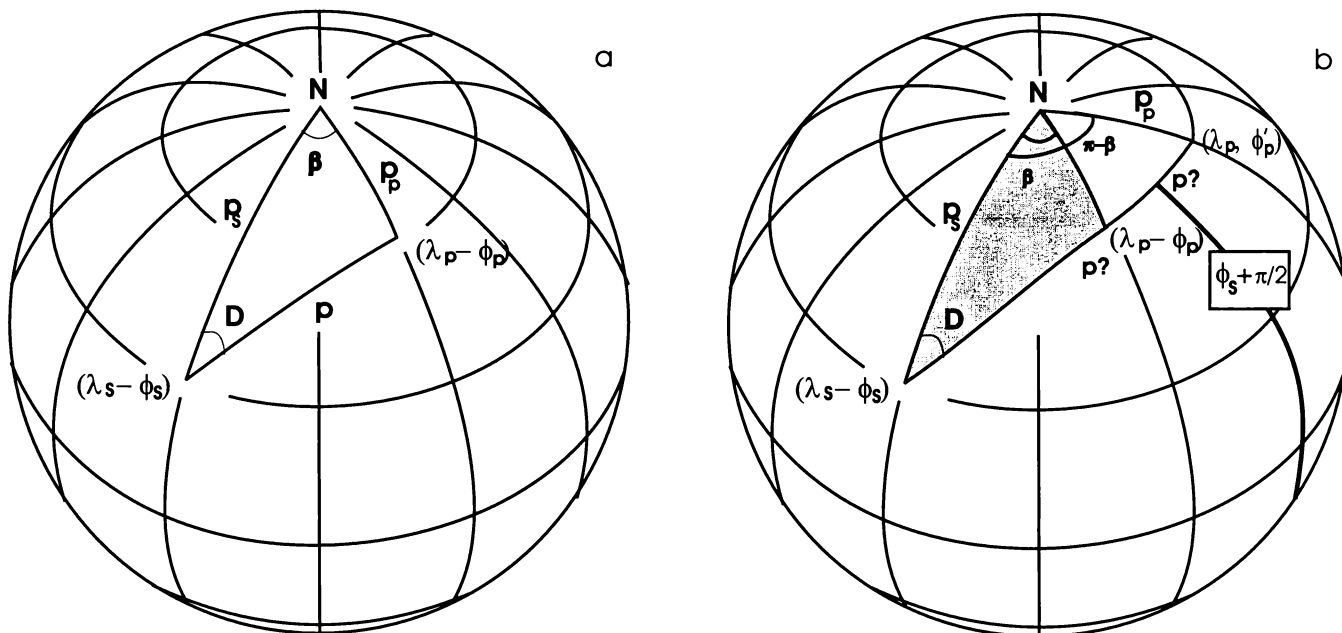


Fig. A.3.1. Determinación del polo magnético a través de la dirección del campo (tomado de Butler, 1992).

La colatitud magnética p es la distancia angular sobre círculo mayor, del sitio al polo magnético. La distancia angular se determina de la fórmula del dipolo:

$$p = \cot^{-1}\left(\frac{\tan I}{2}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2}{\tan I}\right) \quad (\text{A.1})$$

utilizando la ley de los cosenos y las definiciones de colatitud, se obtiene:

$$\text{sen} \lambda_p = \text{sen} \lambda_s \text{cosp} + \text{cos} \lambda_s \text{senp} \cos D \quad (\text{A.2})$$

donde

$$\phi_p = \phi_s + \beta \quad \text{si } \text{cosp} \geq \text{sen} \lambda_s \text{sen} \lambda_p \quad (\text{A.3})$$

o

$$\phi_p = \phi_s + \pi - \beta.$$

El siguiente paso es determinar el ángulo β , que es la diferencia en longitud entre el polo y el sitio. Aplicándose la ley de los senos, tenemos:

$$\frac{\text{sen} p}{\text{sen} \beta} = \frac{\text{sen} p_p}{\text{sen} D} \quad (\text{A.4})$$

de donde se puede despejar $\text{sen} \beta$, sustituyendo la colatitud de p , finalmente queda:

$$\beta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\text{sen} p \text{sen} D}{\text{cos} \lambda_p}\right), \text{ con } -\pi/2 \leq \beta \leq \pi/2 \quad (\text{A.5})$$

En el caso de que la dirección media D_m, I_m es convertida a polo paleomagnético, el círculo de

9. BIBLIOGRAFÍA

- AITKEN, M. J., 1990. Science-based Dating in Archaeology. Longman Archaeology Series. 225-259.
- BARBETTI, M., 1977. Measurements of recent geomagnetic secular variation in southeast Australia and the question of dipole wobble. *Earth. Planet. Sco. Lett.*, 36, 207-218.
- BUCHA, V., R. E. TAYLOR, R. BERGEN y E. W. HAURY, 1970. Geomagnetic Intensity: Changes during the Past 3000 years in Western Hemisphere. *Science*, 168, 111-114.
- BUTLER, R. F., 1992. Paleomagnetism: Magnetic Domains to geologic Terranes. Blackwell, Boston, 319 pp.
- CAIN, J. C., W. M. DAVIS y R. D. REGAN, 1974. An $n=22$ model of the geomagnetic field. EOS, Trans. Amer. Geophys. Union, 56, 1108.
- CARLSON, J. B., 1975. Loadstone compass Chinese or Olmec primacy? *Science*, 189, 753-760.
- CARR, A. 1967. So Excellent a Fish, Natural History Press, Garden City, 166, 171.
- CHIARI, G. y R. LANZA, 1997. Pictorial remanent magnetization as an indicator of secular variation of the Earth's magnetic field. *Phys. Earth Planet. Int.*, 101, 79-83.
- COE, M. D., 1967. *Science*, 155, pp. 1399.
- COX, A. y R. R. DOELL, 1960. Review of Paleomagnetism. *Geol. Soc. AM. Bull.*, 73, 645-768.
- COX, A., 1968. Lengths of geomagnetic polarity intervals. *J. Geophys. Res.*, 73, 3247-3260.
- DUNLOP, D. J., 1995. Magnetism in rocks. *J. Geophys. Res.*, 100, 2161-2174.
- DUNLOP, D. J., 2002. Theory and application of the Day plot (M_s/M_c versus H_{cr}/H_c) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth* 107, (10 MAR 2002) 5-1-5-15
- FISHER, R. A., 1953. Dispersion on a sphere. Proceedings of the Royal Society, A.217, London, 295-305.
- GARZA TARAZONA, S. y N. GONZÁLEZ CRESPO, 1995. Xochicalco, en La Acrópolis de Xochicalco, Instituto de Cultura de Morelos, México, 89-143.
- GOGUITCHAICHVILI, A., G. CONTE, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, L. ALVA-VALDIVIA, J. MORALES y T. GONZÁLEZ, 2005. Microwave palaeointensity analysis of historic lavas from Parícutín volcano, Mexico. *Geofís. Int.*, 44, 3, 231-240.
- GOGUITCHAICHVILI, A., A. M. SOLER, E. ZANELLA, G. CHIARI, R. LANZA, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI y T. GONZÁLEZ, 2004. Pre-Columbian mural paintings from Mesoamerica as geomagnetic field recorders. *Geophys. Res. Lett.*, 31, 12, L12607
- GRATTON, M. N., A. GOGUITCHAICHVILI, G. CONTE, J. SHAW y J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, 2005. Microwave palaeointensity study of the Jorullo volcano (Central Mexico). *Geophys. J. Int.*, 161, 627-634.
- GRIFFITHS, D. H., R. F. KING, A. I. REES y A. E. WRIGHT, 1960. The remanent magnetism of some recent varved sediments. Proc. R. Soc. London. A256, 359-383.
- GUERRERO-SANDOVAL, X., 2003. Análisis arqueomagnético de estucos del valle de México. Tesis de Física. Fac. Ciencias, UNAM. 31 pp.
- HUEDA, Y., 2000. Fechamiento arqueomagnéticos de estucos de los sitios de Teopancázco, Teotihuacán y Templo Mayor, Tenochtitlan. Tesis de Licenciatura en Arqueología, ENAH, México, 128 pp.
- HUEDA, Y., A. M. SOLER-ARECHALDE, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, L. BARBA, L. MANZANILLA, M. REBOLLEDO y A. GOGUITCHAISHVILI, 2004. Arqueomagnetic studies in central Mexico – dating of Mesoamerican lime-plasters. *Phys. Earth Planet. Int.* 147, 269-283.

- JARQUÍN, A. M., 2002. El Conjunto Norte y Lado Este de la Ciudadela, análisis de contextos arqueológicos del período Clásico desde la perspectiva de la etnohistoria. Tesis de Doctorado en Estudios Mesoamericanos. Fac. de Filosofía y Letras, UNAM, México, 2 Vols.
- JARQUÍN, A. M. y E. MARTÍNEZ, 1982. Las excavaciones en el conjunto 1D. *En*: Cabrera-Castro, R., I. Rodríguez, G. Y N. Morelos G. (eds.) Memoria del Proyecto Arqueológico Teotihuacan 80-82. Col. Científica Arqueología 132, INAH, México, 89-126.
- KING, R. F., 1955. The remanent magnetism of artificially deposited sediments. *Mon. Not. R. Astron. Soc., Geophys. Suppl.*, 7, 115-134.
- KONO, M., 1972. Mathematical models of the Earth's magnetic field. *Phys. Earth Planet Int.*, 5, 140-150.
- LATHAM, A. G., H. P. SCHWARZ and D. C. FORD, 1986. The paleomagnetism and U-Th dating of Mexican stalagmite, DAS2. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79, 195-207.
- LATHAM, A. G., D. C. FORD, H. P. SCHWARZ y T. BIRCHALL, 1989. Secular variation from mexican stalagmites: their potential problems. *Phys. Earth Planet. Int.*, 56, 34-48.
- MALMSTROM, V., 1976. Knowledge of magnetism in pre-Columbian Mesoamérica. *Nature*, 259, 390-391.
- MANZANILLA, L., 1998. Informe de la Segunda y Tercera temporadas de campo en Teopancazco, Teotihuacan, Consejo de Arqueología del INAH, México.
- MANZANILLA, L., 2000. Noticias. Hallazgo de dos vasijas policromas en Teopancazco, Teotihuacan. *Arqueología Mexicana* VIII, 80.
- MANZANILLA, L., 2000a. Living with the ancestors and offering to the gods: Domestic ritual at Teotihuacan. *En*: Plunket, P. (ed.). Domestic ritual in Ancient Mesoamerica, Monograph 46. The Cotsen Institute of Archaeology, University of California at Los Angeles, Los Angeles, 43-52.
- MANZANILLA, L., 2003. El proceso de abandono de Teotihuacan y su reocupación por grupos epiclásicos. *Trace. Abandono de asentamientos prehispánicos. CEMCA. México, Junio, 43, 70-76.*
- MANZANILLA, L. y L. LÓPEZ LUJÁN, 2001. Exploraciones en un posible palacio de Teotihuacan: El Proyecto Xalla (2000-2001). *Mexicon*, XXIII(3), Junio, 2001, pp. 58-61.
- MARYLAND GEOLOGICAL SURVEY, 1897, vol. 1, Archives of Maryland Online, vol. 423, pp.469. <http://www.mdarchives.state.md.us/megafile/msa/speccol/sc2900/sc2908/000001/000423/html/am423-469.html>.
- MATOS-MOCTEZUMA, E. 1981. Una visita al Templo Mayor de México, SEP-INAH, México. 77pp.
- MCCLUNG DE TAPIA E. y Y. SUGIURA, 1999. La vida prehispánica en un habitat insular construido por el hombre en la Ciénaga de Chignahuapan, Santa Cruz Atizapan, Estado de México, México. Informe FAMSI.
- MCFADDEN, P. L. y M. W. MCELHINNY, 1982. Variations in the geomagnetic dipole 2: Statistical analysis of VDMs for the past 5 million years. *J. Geomag. Geoelectr.*, 34, 163-189.
- MERRILL, R. T. y M. W. MCELHINNY, 1983. The earth's magnetic field. Academic Press, New York.
- MCELHINNY, M. W. y W. E. SENAYAKE, 1982. Variations in the geomagnetic dipole 1: The past 50 000 years. *J. Geomag. Geoelectr.*, 34, 39 - 51.
- MERRILL, R. T., M. W. MCELHINNY y P. L. MCFADDEN, 1998. The magnetic field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle. Academic Press, San Diego, 531pp.
- MILLON, R., 1988. The last years of Teotihuacan dominance. *En*: Yoffee, N. y G.L. Cowgill (eds.)

- The Collapse of Ancient States and Civilizations , University of Arizona Press, Tucson, 102-164.
- MORETT ALATORRE, L., 1996. El Desarrollo Regional Xajay en el poniente del Valle del Mezquital, II Coloquio de Historia Regional-Julio 1996, Pachuca, Hidalgo.
- NAGATA, T., K. KOBAYASHI y E.J. SCHWARZ, 1965. Archeomagnetic intensity studies of South and Central America. *J. Geomag. and Geoelec.*, 17, 3-4, 399-405.
- PACHECO, M., 2004. Estudio de Magnetismo de Rocas de obsidianas utilizadas en México Prehispánico. Tesis de Física, Fac. Ciencias, UNAM, 64 pp.
- RATRAY, E. CH., 1981. Fechamientos por radiocarbono en Teotihuacan. *In: Arqueología* 6, segunda época, 3-18.
- ROBERTS, P. H. y H. D. URSELL, 1960. Random walk on a sphere and on a Riemmanian manifold. *Phil. Trans, R. Soc., Lond.*, A252, 317-356.
- RODRÍGUEZ CEJA, M., 2003. Análisis y Fechamiento Arqueomagnético de estucos de zonas habitacionales de Teotihuacan (Xalla) y Templo Mayor. Tesis de Física, Fac. Ciencias, UNAM. 64 pp.
- SÁNCHEZ,-LÓPEZ, F. 2005. Nuevos fechamientos arqueomagnéticos de Xalla y Teopanczco, zonas habitacionales de Teotihuacan. Tesis de Física, Fac. Ciencias, UNAM. 90 pp.
- SMITH, P. J. y J. NEEDHAM, 1967. Magnetic declination in medieval China. *Nature*, 214, 1213-1214.
- SPRAJC, I., 1999. Alineamientos astronómicos en el Templo Mayor de Tenochtitlán. *Arqueología*. 2ª época, 21, enero-junio, Coordinación Nacional de Arqueología, INAH, México, pp.73-98.
- STACEY, F. D., 1963. The physical theory of rock magnetism. *Adv. Phys.*, 12, 45-133.
- TAUXE, L. 2005. Lectures in Paleomagnetism, <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/2005/>, Chap. 10. 18 pp.
- TARLING, 1983. Paleomagnetism. Principles and application in geology, geophysics and archaeology. Chapman and Hall, London.
- THELLIER, E. y O. THELLIER, 1959a. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Geophys.*, 15, 285-376.
- THELLIER, E. y O. THELLIER, 1959b. The intensity of the geomagnetic field in the historical and geological past. *Akad. Nauk. SSR. Izv. Geophys. Ser.*, 1296-1331.
- URRUTIA, J., 1975. Investigaciones Paleomagnéticas y arqueo-magnéticas en México. *Anal. Inst. Geofís.* 21, UNAM, 27-34.
- URRUTIA, J., 1999. Preliminary results of a rock-magnetic study of obsidians from central Mexico. *Geofís. Int.*, 38, 2, 83-94.
- URRUTIA, J., 1996. Palaeomagnetic study of the Xitle-Pedregal de San Angel lava flow, southern Basin of Mexico. *Phys. Earth and Planet. Int.* 97, 177-196.
- URRUTIA, J., L. MAUPOME y P. BROSCHE, 1981. Archaeomagnetic research programme , I. An introduction to the knowledge of magnetism in pre-Columbian Mesoamerica. *Int. Rep., Inst. Geofís.*, UNAM, Mexico & Obs. Hoher List der Univ. Sternwarte, Bonn, Germany, 25 pp.
- URRUTIA, J., L. MAUPOME y P. BROSCHE, 1986. El compás magnético en China y Mesoamérica. *Bol. GEOS*, 6, 3, 5-7.
- WOLFMAN, D., 1973. A re-evaluation of Mesoamerican chronology : AD 1-1200. Tesis de Doctorado, Colorado University, 293 pp.
- WOLFMAN, D., 1990. Mesoamerican chronology and archaeomagnetic dating, AD 1-1200. *En: Archaeomagnetic dating* Eghmy, J. L. y R. S. Sternberg editors, University of Arizona Press, Tucson.