

00323

68



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**ANALISIS Y FECHAMIENTO ARQUEOMAGNETICO
DE ESTUCOS DE ZONAS HABITACIONALES DE
TEOTIHUACAN (XALLA) Y TEMPLO MAYOR**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
FISICA

PRESENTA:

MARIA GUADALUPE RODRIGUEZ CEJA



FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM



DRA. ANA MARIA SOLER ARECHALDE

2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

PAGINACION DISCONTINUA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

DRA. MARÍA DE LOURDES ESTEVA PERALTA
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a Usted que hemos revisado el trabajo escrito:
"ANÁLISIS Y FECHAMIENTO ARQUEOMAGNETICO DE ESTUCOS DE ZONAS HABITACIONALES DE
TEOTIHUACAN (XALLA) Y TEMPLO MAYOR"

realizado por Rodríguez Ceja María Guadalupe con número de cuenta 9757612-9

quién cubrió los créditos de la carrera de Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

Ana M. Soler

Propietario

Dra. Ana María Soler Arechalde

Propietario

Dra. Linda Manzanilla Naim

Suplente

Dr. David Salas de León

Suplente

Dr. Avtandyl Gogichaishvili
M. en C. Jesús Armando Lara Velázquez

Consejo Departamental de Física



Patricia Goldstein Menache

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENACHE
Coordinadora de Licenciatura

B

A mis padres,
con todo mi amor y agradecimiento.

A Vicky y a Gaby,
por los caminos que hemos recorrido siempre juntas,
porque las quiero mucho.

C

Tu recuerdo vive en mi corazón.

**Por todo lo que tu presencia significó en mi vida,
para ti abue.**

D

Agradezco a la Dra. Ana María Soler, por tus enseñanzas, apoyo y guía durante la realización de esta tesis.

A mis sinodales, el M. en C. Armando Lara Velázquez, el Dr. David Salas de León y la Dra. Linda Manzanilla Naim, por el tiempo que dedicaron a la revisión de este trabajo y por sus sugerencias.

Y a Avto, gracias también por ser mi amigo.

Por tu amistad. Por la disposición, paciencia y generosidad que siempre tuviste para ayudarme. Gracias por todo Mouloud.

A mis amigos Miguel Ángel y Rolando, por estar siempre cerca.

Al Instituto de Geofísica y al personal del Departamento de Paleomagnetismo.

Por su valiosa ayuda y amistad, gracias a Gennaro, Martín, Lorenzo, Toño y a la señora Aída.

A todos mis compañeros, amigos y profesores de la Facultad de Ciencias, por las experiencias y conocimientos compartidos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A mis queridos tíos, primos y sobrinos de La Sauceda y Zamora. Gracias por su cariño y aliento.

E

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PALEOMAGNETISMO	2
3. EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE	4
3.1 Origen del campo magnético terrestre	5
3.2 El campo geomagnético actual	7
3.3 Variaciones en el campo geomagnético	9
4. MAGNETISMO DE LAS ROCAS	11
4.1 Estados magnéticos	11
4.2 Minerales magnéticos	13
4.3 Orígenes del magnetismo remanente natural	13
4.3.1 Dominio magnético	13
4.3.2 Tipos de magnetización	14
4.4 Métodos de desmagnetización	16
4.5 Medición de la magnetización: magnetómetros	17
5. REPRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS	19
5.1 Diagrama estereográfico	19
5.2 Diagrama de desmagnetización	19
5.3 Diagrama de Zijderveld	20
5.4 Análisis de las componentes principales	20
5.5 Métodos estadísticos: la distribución de Fisher	22
6. MUESTRAS	24
6.1 Sitios de muestreo	24
6.1.1 Teotihuacan: Xalla	24
6.1.2 Templo Mayor: Calle Apartado	25
6.2 Toma de muestras y su preparación	26
6.3 Medición de muestras	28

7. RESULTADOS	29
7.1 Sitio Teotihuacan: Xalla	28
7.2 Sitio Templo Mayor: Calle Apartado	33
7.3 Curvas de variación secular	34
7.3.1 Teotihuacan: Xalla	35
7.3.2 Templo Mayor: Calle Apartado	41
7.4 Fechas probables	43
7.4.1 Teotihuacan: Xalla	43
7.4.2 Templo Mayor: Calle Apartado	43
8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	44
9. BIBLIOGRAFÍA	46
ANEXO 1. DIAGRAMAS DE DESMAGNETIZACIÓN, ESTEREOGRÁFICO Y DE ZIJDERVELD DE MUESTRAS EJEMPLO	49
A.1 Sitio Teotihuacan: Xalla	49
A.2 Sitio Templo Mayor: Calle Apartado	61

1. INTRODUCCIÓN

La técnica de fechamiento por radiocarbono fue descubierta en 1949. En México sólo existe un laboratorio en el Instituto Nacional de Antropología e Historia, a donde son enviadas las muestras de los distintos proyectos arqueológicos nacionales. Aunque es un método directo, resulta muy caro y es por ello que se considera importante proponer el uso de técnicas alternativas de fechamiento.

El objetivo de este trabajo fue realizar fechamientos con métodos magnéticos a muestras arqueológicas de Teotihuacán y de una zona cercana al Templo Mayor en la Ciudad de México, aprovechando la propiedad ferrimagnética de los minerales magnéticos presentes en los estucos usados en las construcciones, que se orientan siguiendo la dirección del campo magnético terrestre durante el proceso de fraguado. Para ello, se comparan las direcciones magnéticas de los estucos con una curva de variación secular que registra el cambio del campo magnético. Ésta se calibra con fechas obtenidas por otras técnicas y se refuerza y mejora continuamente al aumentar el número de datos y repetir algunos sitios con mejores instrumentos para aumentar la precisión.

2. PALEOMAGNETISMO

El paleomagnetismo estudia el campo magnético terrestre del pasado grabado en las rocas, ya que éstas contienen minerales ferrimagnéticos que poseen la capacidad de orientarse en la presencia de un campo magnético y, bajo ciertas condiciones, guardarlo como vectores de magnetización. Este fenómeno tiene aplicaciones en distintos campos como arqueomagnetismo, evolución y estructura de la Tierra, Geología, tectónica de placas, etc., debido a que el campo magnético terrestre ha presentado un amplio rango de variación en el tiempo y en el espacio. Para entender este proceso, es necesario conocer ciertas definiciones básicas:

1) *Momento magnético*: se define como $M=IAn$, donde A es el área que atraviesa una corriente eléctrica I y n es un vector unitario perpendicular al plano del circuito. Se expresa en $A\ m^2$ (Figura 1).



Figura 1: Momento magnético (Butler, 1998).

2) *Campo magnético H*: es el que surge al hacer circular en un alambre una corriente de un ampere en un círculo de radio igual a un metro. Se expresa en A/m . $10^3 A/m = 1G = 10^{-4}T$. Un momento magnético libre de rotar, ante un campo magnético H , se alinearía con éste debido a la torca τ (Figura 2).



Figura2: Torca τ del momento magnético M en presencia de un campo magnético H (Butler, 1998).

3) *Intensidad magnética o magnetización J de un material*: es el momento magnético total por unidad de volumen. $J = \frac{\sum M_i}{\text{volumen}}$. Se expresa en A/m .

4) *Magnetización inducida* (J_i): es la que adquiere y graba un material cuando es expuesto a un campo magnético H .

5) *Susceptibilidad magnética* (χ): relaciona a la magnetización inducida (J_i) con el campo magnético H de la siguiente forma: $J_i = \chi H$, por lo tanto, se puede ver como la capacidad de una sustancia para adquirir magnetización en presencia de H . Puede ser negativa para ciertos materiales como los diamagnéticos, en los cuales J_i será de sentido opuesto al campo H aplicado, o positiva para los ferromagnéticos y paramagnéticos.

6) *Flujo magnético* (ϕ): Son las líneas del campo magnético que salen del polo norte de un imán y entran en el polo sur, pero no tienen origen ni extremo y forman circuitos continuos. Su unidad es el Weber (Wb).

7) *Inducción Magnética* (B): es el vector que caracteriza la densidad de flujo magnético de un cuerpo, es decir, el número de líneas en una región de un campo magnético que atraviesan perpendicularmente la unidad de área en dicha región:

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{Wb}{m^2} = 1T = 10^4 G.$$

La relación entre la magnetización J , el campo magnético H y la inducción magnética B es la siguiente: $B = \mu_0(H + J)$, donde μ_0 es la permeabilidad magnética del aire:

$\mu_0 = 4\pi / c^2$ y c es la velocidad de la luz.

TESIS CON:
FALLA DE ORIGEN

3. EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

La mejor aproximación del Campo Magnético Terrestre (CMT) es un dipolo axial geocéntrico (DAG) que resulta de promediar los datos paleomagnéticos sobre algunos millones de años y tiene una intensidad aproximada de 0.5 Gauss. En este modelo, el campo es producido por un dipolo magnético simple en el centro de la Tierra alineado con su eje de rotación. El campo H del DAG se puede expresar:

$$H_h = \frac{M \cos \lambda}{re^3} \quad \text{Componente vertical}$$

$$H_v = \frac{2M \operatorname{sen} \lambda}{re^3} \quad \text{Componente horizontal}$$

$$H = \frac{M}{re^3} \sqrt{1 + 3 \operatorname{sen}^2 \lambda} \quad \text{Magnitud}$$

donde M es el momento dipolar del DAG, λ es la latitud geográfica que está en un rango de -90° en el polo sur geográfico a $+90^\circ$ en el polo norte geográfico y re es el radio medio de la Tierra.

En cada punto de la superficie terrestre, el vector del campo magnético puede definirse indicando su intensidad y su dirección, expresada por los términos inclinación y declinación:

1) *Declinación (D)*: es el ángulo horizontal que forma el norte magnético con el norte geográfico. Varía en el intervalo $0^\circ < D < 360^\circ$.

2) *Inclinación (I)*: es el ángulo que forma el vector del campo magnético con el plano horizontal del sitio. En el ecuador magnético la inclinación es 0° y aumenta hacia el polo norte hasta llegar a $+90^\circ$. En el hemisferio sur disminuye hasta -90° en el polo sur. Una relación entre la inclinación y la latitud geográfica es la siguiente: $\tan I = 2 \tan \lambda$.

3) *Intensidad (H)*: es la magnitud del vector de campo magnético H . Sus unidades son Teslas en el SI, o Gauss en cgs (Figura 3).

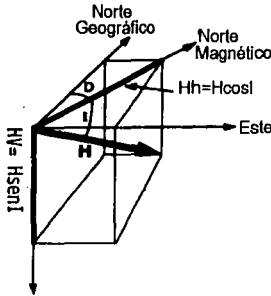


Figura 3: Diagrama del vector del campo magnético terrestre (H) con sus componentes declinación (D) e inclinación (I) (Modificado de Butler, 1998).

También pueden representarse en un sistema cartesiano donde:

x : componente alineada con el norte geográfico; $x = H \cos D \cos I$

y : componente hacia el este; $y = H \sin D \cos I$

z : componente vertical; $z = H \sin I$.

3.1 Origen del campo magnético terrestre

Un dínamo como el que se ilustra en la Figura 4(a) fue sugerido por Larmor en 1919 para explicar el origen del campo magnético de la Tierra (Butler, 1998). Se debe aplicar una torca que se asume constante, para que el disco conductor de cobre rote alrededor de un eje con velocidad angular ω , con lo que se induce entonces un campo magnético H en dirección perpendicular al disco. Los electrones en el disco de cobre experimentan una fuerza de Lorentz $F_L = qv \times B$ al pasar por este campo, donde q es la carga eléctrica de los electrones y v es su velocidad. La fuerza de Lorentz apunta hacia el eje del disco y resulta una corriente eléctrica I que se dirige hacia el exterior. El disco está unido por medio de un cable al eje de rotación por donde circula la corriente I , la cual genera un campo que realimenta al campo inductor. Éste es un modelo de un dínamo autoexcitable, ya que mientras el disco se mantenga rotando, la corriente eléctrica fluirá y el campo magnético estará presente.

En la Tierra, el núcleo líquido formado por metales conductores en movimiento como hierro y níquel podrían hacer las veces del disco en el modelo del dínamo. Este movimiento es la energía mecánica que posteriormente se transformará en energía del campo magnético. La interacción entre el campo magnético y los metales conductores

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

hierro y níquel permitiría al núcleo exterior producir retroalimentación positiva y el núcleo de la Tierra operaría entonces como un dínamo magnético autoexcitado.

Debido a la disipación de energía, hay un requerimiento energético para mantener en movimiento a los fluidos y por ende sostener al campo geomagnético.

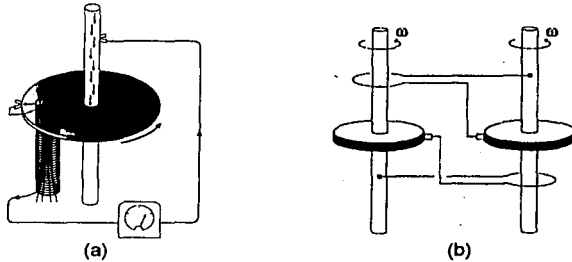


Figura 4: (a) Modelo del dínamo autoexcitado con un disco (Butler, 1998)
(b) Modelo del dínamo con 2 discos acoplados (McElhinny, 1997).

La potencia para generar el CMT es $10^{13}W$, que es aproximadamente $\frac{1}{4}$ del flujo geotérmico total. Se ha propuesto que esta energía surge del núcleo interno y fluye hacia el núcleo externo.

Aunque por los datos paleomagnéticos se sabe que el campo geomagnético ha tenido inversiones presentando una polaridad opuesta a la actual, los cálculos con este modelo muestran que un dínamo simple no produciría inversiones en H, a menos que la dirección de rotación se cambiara aplicando una torca externa del signo opuesto. Sin embargo, un dínamo con dos discos acoplados (Figura 4 (b)) resolvería este problema. El modelo de Rikitake de 1966 propone que aplicando torcas constantes a los discos se producirían campos variables, incluidos campos inversos (McElhinny, 1997). Este modelo explica la existencia de inversiones caóticas que presentan muchas de las propiedades observadas en el registro de las inversiones de la Tierra, aunque debe notarse que el modelo con un disco del dínamo autoexcitado también puede operar en cualquiera de las dos polaridades del dipolo y por lo tanto no contradice las inversiones del campo.

A pesar de que estos modelos explican los efectos observados en el campo magnético a través del tiempo, hasta ahora son meramente teóricos, ya que no

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

se ha podido comprobar cómo es que realmente se produce el campo magnético de la Tierra.

3.2 El campo geomagnético actual

Los polos magnéticos donde $I = \pm 90^\circ$, tampoco coinciden con los polos geográficos, ya que el dipolo geocéntrico está inclinado un ángulo de -11.5° con respecto al eje de rotación. Los polos que mejor se ajustan a este dipolo se llaman polos geomagnéticos y son los puntos donde las extensiones del dipolo intersectan con la superficie de la Tierra (Figura 5).

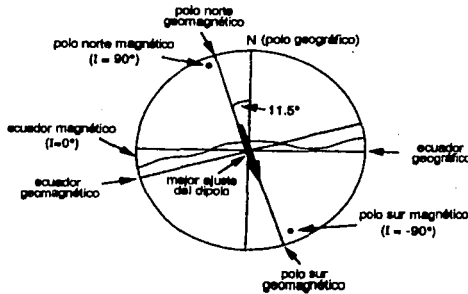


Figura 5: Esquema del modelo del dipolo terrestre (Modificado de Butler, 1998).

Debido a que las placas continentales se desplazan entre sí y con relación al eje de rotación, el polo geomagnético ha presentado a lo largo del tiempo variaciones que se representan en una curva de deriva polar, ya que su posición vista desde un mismo punto de la Tierra no es constante.

En la mayor parte de la superficie terrestre, el dipolo geocéntrico no describe con exactitud al campo geomagnético, lo cual indica la presencia de un campo no dipolar que es dinámico. Este hecho podría explicarse por la presencia de corrientes en la interfase del núcleo líquido con el manto, ya que los trazos del campo no dipolar son dinámicos y con movimientos similares a remolinos de corrientes en fluidos con turbulencia.

El campo actual se ilustra con mapas isomagnéticos, donde las isogonas son líneas de sitios que tienen la misma declinación en la superficie del CMT (Figura 6a)). Las líneas con igual inclinación se llaman isoclinas (Figura 6 b)) y las de igual intensidad son las isodinámicas (Figura 6 c)).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

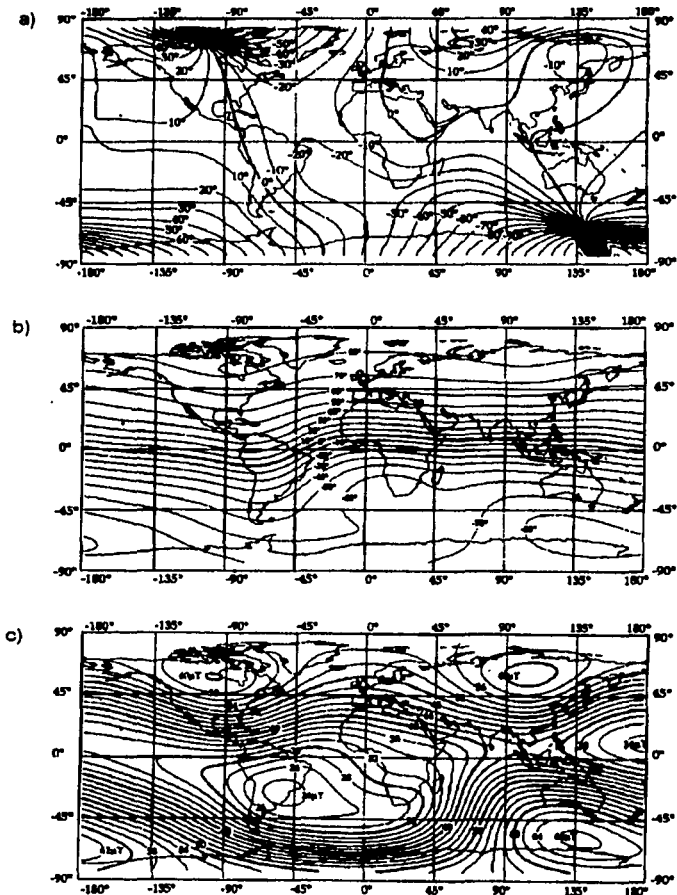


Figura 6: Cartas de referencia del modelo del dipolo magnético terrestre del año 1995.

- a) Líneas de igual declinación: isogonas. b) Líneas de igual inclinación: isoclinas.
- c) Líneas de igual intensidad: isodinámicas (García, 1996).

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

3.3 Variaciones en el campo geomagnético

El campo geomagnético sufre variaciones con el tiempo, que son rápidas en comparación con otros procesos geológicos. La Tabla 1 presenta las más importantes.

Tabla 1: Variaciones del campo geomagnético

Tipo	Duración en segundos	Causa
Muy cortas	3.0×10^{-1} a 3.0×10^1	Campo externo
Micropulsaciones	3.0×10^{-1} a 3.0×10^1	Campo externo
Variaciones subacústicas	3.0×10^{-1} a 3.0×10^1	Campo externo
Tormentas magnéticas	1.0×10^2	Campo externo
Variación secular	3.0×10^7 a 3.0×10^{12} (1 a 1×10^5 años)	Campo dipolar y no dipolar
Excursiones	1.0×10^{14} (3×10^6 años)	Inversiones abortadas
Variaciones en intensidad	3.0×10^{11} (9.5×10^3 años)	Campo dipolar
Cambios de polaridad	3.0×10^{14} (9.5×10^6 años)	Campo dipolar y no dipolar

Se llama variación secular geomagnética a la fluctuación temporal del campo interno que sucede dentro de un intervalo de tiempo entre un año y 10^5 años. Sus orígenes pueden dividirse en 2 contribuciones con periodicidades que se traslapan:

- 1.- Cambios no dipolares en periodos cortos (menores a 3000 años)
- 2.- Cambios en el dipolo en periodos más largos

Con el promedio de los registros de valores del campo magnético en las estaciones de monitoreo, se observa que los cambios seculares no son constantes (Figura 7).

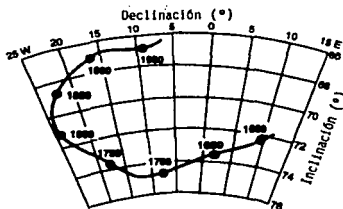


Figura 7: Variación secular desde 1600 registrada en el observatorio geomagnético de Londres (Butler, 1998).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los últimos 150 años corresponden a cambios del orden de 0.25° en la dirección y de 0.05% en la intensidad anual. Los patrones de esta variación son similares en otras regiones de Europa, pero cambian de un continente a otro, lo cual probablemente refleja que el tamaño de las fuentes no dipolares en el núcleo de la Tierra son diferentes.

La variación secular no tiene una periodicidad temporal definida. Hay momentos en que el campo estuvo relativamente en calma, mientras que en otros estuvo mucho más agitado, llegando a presentar excursiones de gran amplitud y corta duración.

Además de estos cambios en la orientación, el dipolo geomagnético tiene cambios en la amplitud o magnitud del momento dipolar. En los últimos 10^4 años, el momento dipolar promedio es de $8.75 \times 10^{25} \text{ G cm}^3$ ($8.75 \times 10^{22} \text{ A m}^2$), presentando cambios con una periodicidad aproximada de 10^4 años, con oscilaciones de $\pm 50\%$ del valor medio (Butler, 1998).

En escalas de tiempo mayores, el campo magnético invierte su polaridad. La configuración actual con el campo en dirección del polo sur geográfico es la polaridad normal, mientras que la opuesta es la polaridad reversa y produce un cambio de 180° en la superficie geomagnética en dirección de todos sus puntos.

Hay muchos lugares de donde no se tiene registro de la variación secular, pero ésta puede ser determinada por medio de estudios arqueomagnéticos o paleomagnéticos, usando los vestigios dejados por culturas antiguas, que han sido fechados por algún método directo. Una vez que se conoce la curva de la variación secular del campo magnético en un lugar, es posible proponer una o varias fechas para una muestra arqueológica dada, midiendo sus direcciones magnéticas y comparándolas con dicha curva.

En el caso de Mesoamérica, diversos estudios han contribuido a crear una curva de variación secular. La mayor contribución fue hecha por Wolfman, ya que comparó las fechas aportadas por estudios previos hechos en diversos sitios mesoamericanos, donde se usaron varias técnicas de fechamiento como la del ^{14}C , con direcciones magnéticas de muestras de los mismos sitios (Wolfman, 1973, 1990). Otra fuente de datos la aportaron Latham et al (1989), fechando por medio de ^{230}Th y de ^{234}U muestras de estalagmitas de cuevas de San Luis Potosí y Chiapas, que abarcan un periodo de 1259 años. Posteriormente obtuvieron su variación secular con métodos paleomagnéticos, es decir, la fluctuación temporal del campo interno en esos sitios y en fechas determinadas. Comparando la dirección de la variación secular de una muestra arqueológica proveniente de ese sitio con esta curva, se pueden obtener una o diversas fechas probables.

4. MAGNETISMO DE LAS ROCAS

4.1 Estados magnéticos

El magnetismo de la materia es el resultado de los momentos magnéticos elementales creados por el movimiento de los electrones de los átomos (momento magnético de espín) y el desplazamiento orbital (momento magnético orbital).

En un mineral, el momento magnético depende de la naturaleza de los átomos que lo forman y de su arreglo en la red cristalina. Antes de la aplicación de un campo magnético, la materia que no tiene momento magnético atómico es diamagnética, pero si lo tiene puede ser paramagnética, ferromagnética, ferrimagnética o antiferromagnética (Tabla 2).

Tabla 2: Tipos de respuesta magnética (Compilada por Gogutchaiçhvili, 1995)

<i>Tipo de magnetismo</i>	<i>Existencia de un momento magnético atómico</i>	<i>Naturaleza de la interacción entre los momentos atómicos</i>	<i>Esquema de la distribución del momento (H=0)</i>
Diamagnético	No	-----	-----
Paramagnético	Si	muy débil	aleatoria
Ferromagnético	Si	fuerte, orientación paralela	▲ ▲ ▲ ▲
Antiferromagnético	Si	fuerte, orientación antiparalela	▲ ▲ ▼ ▼ ▲ ▲
Ferrimagnético	Si	fuerte, orientación antiparalela, momentos diferentes	▼ ▲ ▼ ▼ ▲ ▼

La Figura 8 ilustra los tipos de propiedades magnéticas, donde se observa la magnetización J adquirida al aplicar un campo magnético H .

En los materiales diamagnéticos, la susceptibilidad magnética χ es una constante negativa y es cero cuando no hay campo (Figura 8a). En los paramagnéticos es positiva y cero en ausencia de campo (Figura 8b). Para los ferromagnéticos el camino de magnetización exhibe histéresis, es decir, es irreversible y χ no es una constante simple (Figura 8c).

En el ciclo de histéresis, la magnetización J en presencia de un campo magnético H alcanza una magnetización de saturación (J_s). Al disminuir el campo aplicado, la

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

magnetización disminuye por una curva diferente a la que originó la saturación. Además, en campo cero el material conserva cierta magnetización.

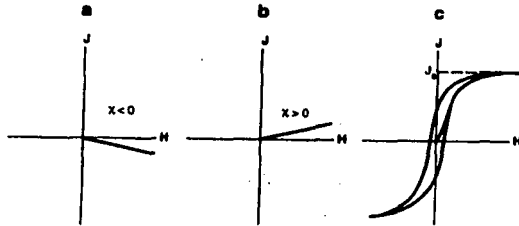


Figura 8: Magnetización J contra campo magnético H.

- a) Sustancia diamagnética: χ es negativa. b) sustancia paramagnética: χ es positiva.
c) sustancia ferromagnética: χ exhibe histéresis (Butler, 1998).

Los sólidos ferromagnéticos tienen átomos con momentos magnéticos, pero a diferencia del caso paramagnético, los momentos atómicos adyacentes interactúan fuertemente entre sí, provocando magnetizaciones más grandes.

Para un determinado material ferromagnético y una temperatura dada, hay una magnetización máxima llamada magnetización de saturación j_s , que decrece al aumentar la temperatura, y llega a cero en la temperatura de Curie (T_c), la cual es característica de cada material ferromagnético. Por encima de la T_c , el material se convierte en paramagnético, debido a que la agitación térmica es mayor que los efectos de acoplamiento magnético y a que las distancias interatómicas han aumentado. Cuando el cuerpo se enfría por debajo de la T_c , el orden magnético se reestablece y el cuerpo vuelve a ser ferromagnético.

Además de la fuerte intensidad de magnetización, la propiedad fundamental de los materiales ferromagnéticos es la capacidad de guardar la dirección de un campo magnético aplicado, ya que al removerlo, la magnetización no regresará a cero sino que permanecerá orientada. Se pueden distinguir tres tipos principales de ferromagnetismo:

1) *Ferromagnetismo*: todos los iones son idénticos y el acoplamiento es positivo. Los momentos magnéticos son paralelos y en el mismo sentido. Un ejemplo es el Hierro.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2) *Ferrimagnetismo*: los iones no son idénticos y ocupan sitios cristalográficos distintos, los acoplamientos son de signo negativo y los momentos magnéticos son paralelos pero de sentido contrario. Un ejemplo es la magnetita (Fe_3O_4).

3) *Antiferromagnetismo*: los iones son idénticos y los acoplamientos negativos. Se alternan dos en sentido positivo y dos en sentido inverso. Un ejemplo es la hematita (Fe_2O_3).

4.2 Minerales magnéticos

Las rocas son conglomerados de granos finos de forma irregular donde los minerales ferrimagnéticos están presentes en pequeñas cantidades. Los principales materiales portadores de magnetización remanente son los óxidos de hierro y de titanio. Éstos se representan en el diagrama ternario $\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ (Figura 9). Algunos ejemplos son la magnetita (Tc: 858°C), la hematita (Tc: 675°C) y la titanomagnetita. Son también buenos portadores el hierro puro (Tc: 770°C), la mayoría de los aceros y algunos sulfuros e hidróxidos de hierro.

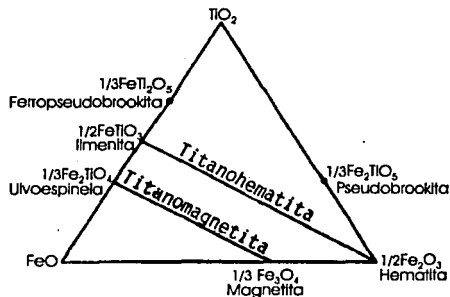


Figura 9: Diagrama ternario $\text{TiO}_2-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$, mostrando los compuestos minerales más importantes de Fe-Ti-O y las series de titanomagnetita y titanohematita (Modificado de Butler, 1998).

4.3 Orígenes del magnetismo remanente natural

4.3.1 Dominio magnético

El dominio magnético es una zona del grano donde el material tiene una dirección de magnetización predominante. Para una partícula esférica de un material ferromagnético con magnetización uniforme, los momentos magnéticos atómicos pueden modelarse como

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

pares de cargas magnéticas. Estos pares en átomos adyacentes se cancelan en el interior, pero producen una distribución de carga magnética en la superficie de la partícula.

Debido a la repulsión entre las cargas adyacentes se almacena energía magnetostática. Cuando se forman dominios magnéticos, la energía magnetostática disminuye, ya que el porcentaje de superficie cubierto con cargas magnéticas se reduce y cargas con signos opuestos se encuentran adyacentes en vez de separadas.

A los granos con varios dominios se les llama granos de multidominio (MD) y a los de un dominio granos de dominio simple (SD) (Figura 10).



Figura 10. a) Grano con dominio simple (SD) . b) Grano con dos dominios. c) Grano con cuatro dominios(MD). (Westphal, 1986)

Los dominios están separados por regiones llamadas Paredes de Bloch, en las que los espines cambian gradualmente de la dirección de un dominio a la del adyacente (Figura 11). La pared tiene energía y anchura finitas, por ejemplo, en la magnetita es del orden de $0.1\mu\text{m}$.

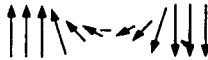


Figura 11: Pared de Bloch (Butler, 1998).

Si un grano es tan pequeño que la energía requerida para hacer una pared es mayor que el decrecimiento de la energía magnetostática que resulta de dividir el grano en dos dominios, energéticamente no es favorable, por lo que tendrá sólo un dominio. Estos granos suelen ser portadores de magnetización remanente muy eficientes.

El paso de grano ferromagnético con SD de gran tamaño a un grano MD pequeño es continuo, en una distribución llamada pseudo dominio sencillo (PSD). Se caracteriza porque el número de dominios es pequeño y éstos pueden tener momentos magnéticos importantes.

4.3.2 Tipos de magnetización

La Magnetización Remanente Natural (NRM) es la que tiene una roca antes de cualquier tratamiento en el laboratorio. Depende del campo geomagnético y de los procesos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

geológicos que le han ocurrido a la roca desde su formación. Generalmente tiene más de una componente, siendo la adquirida durante su formación la NRM primaria y objetivo de las investigaciones paleomagnéticas. La NRM secundaria, puede ser adquirida después de su formación, entonces, $NRM = NRM \text{ primaria} + NRM \text{ secundaria}$.

El campo geomagnético local H produce una magnetización inducida: $J_i = \chi H$, la cual es usualmente paralela al campo geomagnético y puede ser la componente dominante para muchos tipos de rocas. Las formas principales de adquirir NRM primaria son:

1) *Magnetización termorremanente (TRM)*: es la NRM adquirida al enfriar un material ferromagnético desde un punto mayor a su temperatura de Curie hasta la temperatura ambiente, en presencia de un campo magnético. La roca adquiere una magnetización paralela y en el mismo sentido que el campo. Se da en la mayoría de las rocas ígneas, es fuerte y estable a través del tiempo. Esta magnetización puede destruirse por medio de un calentamiento hasta la T_c , seguida de un enfriamiento en un campo nulo.

2) *Magnetización Remanente Química (CRM)*: se provoca la alteración de un mineral preexistente no ferromagnético hacia uno ferromagnético debido a reacciones químicas. Ocurre principalmente en las rocas sedimentarias.

3) *Magnetización remanente detrítica (DRM)*: Se adquiere durante la deposición y litificación de las rocas sedimentarias, luego de que las partículas magnéticas se depositan en el fondo de un mar o lago y se orientan paralelamente al campo magnético guardando esa dirección. Un proceso similar ocurre en los estucos, cuyas partículas ferrimagnéticas se orientan hasta antes de perder el agua. Los procesos postdeposicionales (pDRM) suceden antes de la consolidación, cuando las partículas se encuentran en un medio viscoso. La proporción del alineamiento deposicional o postdeposicional depende de varios factores como el tamaño del grano y la tasa de deposición. Los granos dentro de los rangos de SD o PSD presentan una magnetización relativamente fuerte. Estas partículas finas se alinean más eficientemente con el campo geomagnético (principalmente por pDRM), pero partículas mayores tienen menor intensidad de magnetización y es menos fácil que se muevan libremente dentro de los espacios de los sedimentos, por lo que no son alineadas con efectividad ni por procesos deposicionales ni postdeposicionales. La DRM se detiene cuando el agua sale y la consolidación restringe el movimiento de las partículas. El rango

de tiempo estimado es mayor a 10^3 años, dependiendo del ambiente de los sedimentos. En el caso de los estucos esto ocurre en un tiempo de 1 a 2 días.

Algunos tipos de magnetización remanente secundaria son:

1) *Magnetización remanente viscosa (VRM)*: se obtiene gradualmente durante la exposición a campos magnéticos débiles. Resulta de la acción del campo geomagnético mucho tiempo después de la formación de la roca. Desde el punto de vista del paleomagnetismo es un ruido indeseable. Para una VRM naturalmente adquirida, el tiempo de adquisición puede ser del orden de 10^9 años o mayor.

2) *Magnetización remanente isotérmica (IRM)*: resulta de la exposición durante un corto periodo de tiempo a un campo magnético fuerte a temperatura constante. En la naturaleza ocurre por la exposición transitoria a los campos magnéticos de los relámpagos.

3) *Magnetización piezorremanente (SRM)*: es la adquirida por la acción de un esfuerzo o un impacto.

Dependiendo de la forma en que la roca haya adquirido la NRM secundaria, pueden aplicarse procedimientos parciales de desmagnetización para aislar la NRM primaria.

4.4 Métodos de desmagnetización

a) *Campos Alternos*: La muestra se expone a campos magnéticos alternos y se destruye la magnetización (componentes secundarias) progresivamente por medio de la aplicación de campos alternados positivos y negativos que van creciendo en amplitud.

Para producirlos, se utiliza una bobina sin núcleo que se alimenta con un autotransformador o con una fuente electrónica. La muestra a desmagnetizar se coloca en el centro de la bobina, la cual gira a alta velocidad en una secuencia que abarca todos sus ejes, lo cual permite la desmagnetización de todos ellos (Figura 12). Al aplicar un campo débil, los granos con momentos magnéticos menores a éste se alinearán y los momentos magnéticos de las partículas que se han orientado en los sentidos positivo y negativo de este campo aplicado se destruirán entre ellas, permaneciendo sólo las NRM contenidas en granos cuyo momento magnético sea mayor al campo aplicado.

Una desmagnetización completa se obtiene aumentando paulatinamente el campo y midiendo la magnetización residual cada vez para obtener las direcciones primarias. Luego

se hace un análisis de los datos para mostrar los cambios progresivos que tuvo la NRM en dirección y magnitud.

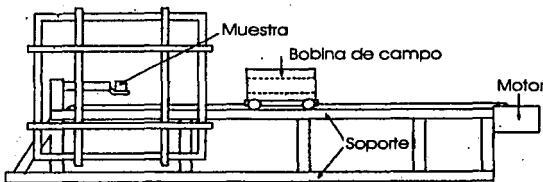


Figura 12: Desmagnetizador de campos alternos (Modificado de Westphal, 1986).

b) *Desmagnetización Térmica*: La muestra se calienta a una temperatura elevada T_{demag} menor a la T_c del mineral ferromagnético y se deja enfriar a temperatura ambiente en un campo magnético nulo. El proceso permite la remoción de magnetizaciones secundarias y que los granos con temperatura de bloqueo (temperatura a la que el dominio puede revertir su dirección) menor o igual a la T_{demag} pierdan progresivamente la magnetización terromeramente en un campo igual a cero. La T_{demag} se va incrementando paulatinamente, hasta llegar a la T_c . En cada paso se mide la magnetización remanente.

4.5 Medición de la magnetización: magnetómetros

Como ya se ha dicho, la base de los estudios paleo y arqueomagnéticos es la determinación de la NRM y debe obtenerse a partir de la intensidad y la dirección del campo magnético de las muestras. Para ello, se asume que este campo es dipolar, lo cual sería cierto si se tratara de una esfera uniformemente magnetizada, hecho que no ocurre en la realidad.

Para medir la magnetización las muestras se cortan en cilindros. Como un campo así no es dipolar, se minimiza el error eligiendo una longitud y un radio para el cilindro cuya razón tenga la mayor similitud con un dipolo. Esta razón longitud/radio es igual a 1.7.

Para conocer la magnetización de una muestra, deben hacerse 2 mediciones por eje, una en dirección positiva y la otra en dirección negativa, es decir, 6 posiciones en total.

Los magnetómetros actuales miden la variación del flujo magnético producido por el desplazamiento de la muestra en un circuito eléctrico. Los especímenes de rocas rotan a una velocidad angular constante dentro de un par de bobinas aisladas, en las cuales se induce un voltaje de corriente alterna, cuya amplitud y fase dependen de la magnitud y dirección del vector de magnetización remanente del espécimen. El voltaje se amplifica, se

filtra y se digitaliza. Por análisis de Fourier, la computadora calcula dos componentes rectangulares de la proyección de la magnetización remanente. Los datos se muestran al final de cada medición.

El magnetómetro JR5A usado en este estudio funciona con base en estos principios. Requiere muestras que pueden ser cubos de 8 cm^3 o cilindros de 25.4 mm de diámetro por 22 mm de largo, es decir, 11.15 cm^3 . Su velocidad de rotación es de 89.3 rev/s (Figura 13).

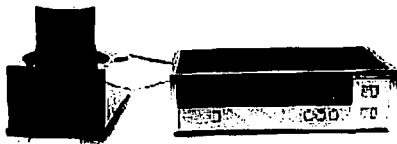


Figura 13: Magnetómetro JR5A

Para desmagnetizar se empleó un desmagnetizador de campos alternos MOLSPIN con giro y rango de 0 a 100 mT.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5. REPRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS

5.1 Diagrama estereográfico

Una representación de este tipo permite graficar la dirección (declinación e inclinación) de la magnetización de una muestra pero no su magnitud. Se usa una circunferencia donde las declinaciones son medidas alrededor del perímetro de la proyección en el sentido de las manecillas del reloj, desde 0° hasta 360° . La inclinación se mide desde cero en el perímetro del círculo hasta 90° en el centro (Figura 14).

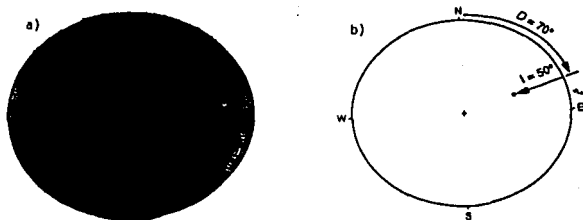


Figura 14: Diagrama estereográfico: a) red estereográfica. b) ejemplo: $D = 70^\circ$, $I = 50^\circ$. (Modificado de Butler, 1998).

5.2 Diagrama de desmagnetización

Muestra las variaciones en la intensidad de magnetización contra los grados de desmagnetización aplicados a una muestra. El primer punto donde la magnetización es más alta y la desmagnetización cero, es la NRM (Figura 15).

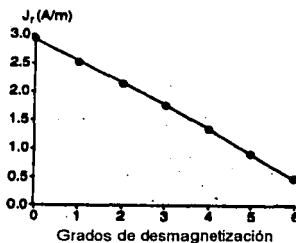


Figura 15: Diagrama de desmagnetización (Modificado de Butler, 1998).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.3 Diagrama de Zijdeveld

Es una proyección ortogonal que permite visualizar la desmagnetización progresiva de la magnetización remanente. A diferencia del estereograma, esta representación muestra la intensidad de la magnetización. 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: $x = H \cos D \cos I$; $y = H \sin D \cos I$; $z = H \sin I$.

La distancia al origen es proporcional a la intensidad. En el proceso de desmagnetización los cambios en declinación, inclinación e intensidad formarán trayectorias sobre los planos. La proyección en el plano horizontal se refiere a la declinación magnética y en el plano vertical a la inclinación magnética (Figura 16).

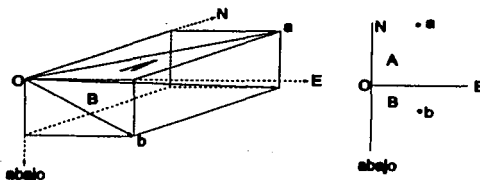


Figura 16: Diagrama de Zijdeveld (Modificado de Butler, 1998).

5.4 Análisis de las componentes principales

Frecuentemente, los diagramas de las trayectorias de los vectores de magnetización muestran una considerable dispersión, por lo cual es útil obtener la línea que matemáticamente ajuste mejor a los puntos dados mediante el análisis de componentes principales (PCA), que puede hacerse forzando a la línea a que pase por el origen, o usando el origen como uno de los puntos.

Al remover una magnetización secundaria, el caso más simple es cuando los espectros de las magnetizaciones primaria y secundaria no coinciden, por lo que una gráfica del proceso de desmagnetización mostrará dos líneas rectas, siendo la primaria la que se dirige al origen (Figura 17, a) y b)). Aunque este es el caso ideal, lo más común es que los espectros de las magnetizaciones primaria y secundaria se traslapen parcialmente (Figura 17, c y d)). En este caso es posible determinar las dos componentes, extendiendo las líneas rectas y tomando como referencia su intersección.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuando las componentes se presentan sobrepuestas (Figura 17, d) y e)), los vectores resultantes después de la desmagnetización definen un círculo mayor o círculo de remagnetización en la red estereográfica y las direcciones primarias y secundarias se encuentran en algún punto sobre el círculo. Los círculos obtenidos al desmagnetizar diferentes muestras podrían coincidir, pero si hay dispersión en alguna de las componentes de la magnetización, no coincidirán y tenderán a converger en algún punto o polo. Dicho punto o su antipolo indica la dirección de la magnetización.

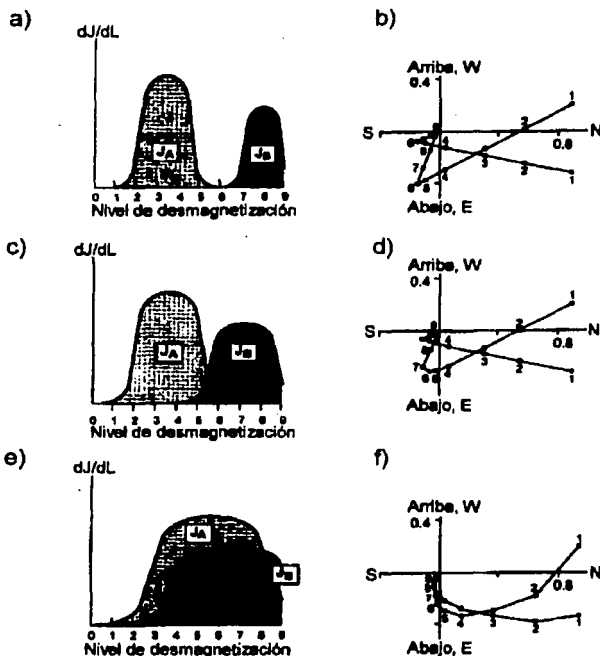


Figura 17: Representación esquemática de los efectos del traslape de las magnetizaciones y su diagrama de Zijderveld. a) Espectros de magnetizaciones primaria y secundaria separados; b) Diagrama de Zijderveld. c) Espectros de magnetizaciones que se traslapan; d) Diagrama de Zijderveld y e) Espectros de magnetizaciones sobrepuestas; f) Diagrama de Zijderveld. (Modificado de Butler, 1998).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.5 Métodos estadísticos: la distribución de Fisher

Debido a la naturaleza de los datos paleomagnéticos, es necesario el empleo de técnicas estadísticas para su análisis. Fisher desarrolló una función de densidad de probabilidad $P_{di}(\theta)$ que es una distribución normal para las direcciones paleomagnéticas. Se basa en suponer que los vectores de magnetización están distribuidos en la superficie de una esfera y las direcciones tienen un peso unitario. $P_{di}(\theta)$ da la probabilidad por unidad de área angular

de hallar una dirección dentro de dicha área dA , centrada en un ángulo θ desde la media real. dA se expresa en estereo radianes y el área total de la esfera es 4π estereo radianes. Entonces, las direcciones se distribuyen mediante la siguiente función:

$$P_{di}(\theta) = \frac{k}{4\pi \sinh(k)} \exp(k \cos \theta)$$

donde θ es el ángulo desde la dirección media y k es el parámetro de precisión, o sea, es una medida de la concentración de la distribución alrededor de la dirección media, por lo tanto, $k=0$ en una distribución de direcciones que es uniforme sobre una esfera, y se aproxima a infinito cuando las direcciones se concentran en un punto.

Sea ζ el ángulo alrededor de la dirección media. La probabilidad de hallar una dirección dentro de un área angular dA es:

$$P_{di}(\theta) dA = P_{di}(\theta) \sin(\theta) d(\theta) d\zeta$$

La normalización de la función de Fisher es:

$$\int_{\zeta=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} P_{di}(\theta) dA = P_{di}(\theta) \sin \theta d\theta d\zeta = 1.0$$

La probabilidad $P_{di}(\theta)$ de hallar una dirección en una banda de ancho $d\theta$ entre $(\theta, \theta + d\theta)$ está dada por:

$$P_{db}(\theta) = \int_{\zeta=0}^{2\pi} P_{di}(\theta) dA = 2\pi P_{di}(\theta) \sin \theta d\theta = \frac{k}{2 \sinh(k)} \exp(k \cos \theta) \sin \theta d\theta$$

El ángulo alrededor de la media dentro del cual caen un cierto porcentaje de direcciones también se calcula con la distribución de Fisher. Un ángulo de interés es el que contiene 95% de las direcciones y está dado por:

$$\theta_{95} = \frac{141^\circ}{k^{1/2}}$$

Usualmente para un grupo de muestras se tiene el conjunto de sus direcciones, a las cuales se les quiere calcular la dirección media, la estadística de la dispersión de las

direcciones y el límite de confianza para la dirección media calculada. Usando la distribución de Fisher, se obtienen de la siguiente manera:

1) *Dirección media*: puede calcularse a partir de las siguientes expresiones:

$$D = \tan^{-1} \frac{\sum m_i}{\sum l_i} \quad I = \frac{\text{sen}^{-1} \sum n_i}{R}$$

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

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

2) *Estimación de la dispersión*: una medida de la dispersión de las direcciones de las muestras se obtiene calculando el parámetro k de la siguiente forma:

$$k = \frac{N-1}{N-R}$$

3) *Límite de confianza de la dirección media*: se expresa como un radio angular desde la dirección media calculada. Una aproximación conveniente, razonablemente exacta para

$k \geq 10$ y $N \geq 10$ es:

$$\alpha_{95} = \frac{140^\circ}{(kN)^{1/2}}$$

donde α_{95} da una medida de la precisión con la cual ha sido estimada la dirección media, es decir, se tiene una certeza del 95% de que la dirección media real del conjunto de muestras cae dentro del α_{95} de la media calculada. Como α_{95} depende de $1/N^{1/2}$, a mayor cantidad de muestras individuales en un conjunto, mayor será la precisión y menor el valor de α_{95} . Un criterio general para considerar que las direcciones son aceptables, es que $k > 30$ y $\alpha_{95} < 15^\circ$.

6. MUESTRAS

6.1 Sitios de muestreo

6.1.1 Teotihuacán: Xalla

Dada la gran importancia de la Ciudad de Teotihuacán, en 1997 dio inicio el proyecto "Teotihuacán: elite y gobierno" del Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM, bajo la dirección de la Dra. Linda Manzanilla, con el fin de obtener evidencias sobre los grupos que la gobernaron.

Se sabe que en Teotihuacán el poder no era mantenido por parentesco sino por linajes nobles de tipo urbano, detentado, según algunos autores como Paulinyi, Pasztory, López Austin, Kubler y Manzanilla, por un grupo colegiado o co-gobierno. George Kubler sugirió en 1967 que la organización se dividía en cuatro sectores territoriales y Paulinyi propuso un gobierno con una co-regencia de dos a siete señores (Manzanilla, 2001).

Para conocer la organización y gobierno de una ciudad sin registros históricos escritos, es necesaria la excavación de los palacios donde vivieron sus gobernantes y de los palacios multifuncionales, dedicados también a labores administrativas, de producción artesanal, impartición de justicia y otros.

En una primera etapa del proyecto, se efectuaron 6 temporadas de campo en Teopancazco, conjunto residencial ubicado al sur-este de la Ciudadela en San Sebastián Xotlalpa. Los datos arqueomagnéticos obtenidos de esta localidad se encuentran en Hueda (2000).

Un candidato a ser palacio de los gobernantes de Teotihuacán es el conjunto de Xalla en el centro de la ciudad, con una superficie aproximada de 35,554m², delimitado por un muro perimetral e integrado por 29 edificaciones y 8 plazas.

En las dos primeras etapas de excavación durante los años 2000 y 2001, el trabajo se centró en la plaza central, la cual presenta cuatro etapas constructivas. De ahí se tomaron las muestras para su fechamiento arqueomagnético, bajo la supervisión de la Dra. Manzanilla. Vigas y morillos carbonizados indican la fase Tlamimilolpa temprana (200-250dc, según Rattray 1981), época en la que probablemente fue edificado Xalla. En cambio, otras fueron cortadas en la fase Xotalpan (350-550 dC, según Rattray 1981), que podría corresponder al último nivel constructivo (Tabla 3).

Tabla 3 : Fases constructivas en Teotihuacán . Tomada de Hueda, 2000.

<i>Fase</i>	<i>Fechas</i>	<i>Eventos y construcciones</i>
Tzacualli	0-100 dC	Inicio del desarrollo urbano. Pirámide del Sol
Miccaotli	100-200 dC	Calzada de los Muertos. Pirámide de Quetzalcóatl, Agricultura.
Tlamimilolpa	200-350 dC	Planificación urbana, edificios públicos como los Templos de la Agricultura y de Quetzalpapálotl. Drenaje y agua potable.
Xolalpan	350-550 dC	Renovación urbana en dos etapas constructivas

6.1.2 Templo Mayor: Calle Apartado

Entre los meses de marzo y abril de 2001 se realizaron labores de excavación arqueológica en los predios marcados con los números 14, 16 y 18 de la calle Apartado en la Colonia Centro, Delegación Cuauhtémoc, por un equipo de investigadores comisionados por la Dirección de Salvamento Arqueológico, en los límites donde se ubicaba la isla de México Tenochtitlan.

Se encontraron una serie de cuartos habitacionales con muros de tezontle y pisos estucados en muy buen estado de conservación, de los cuales se tomaron muestras para este estudio, en diversos niveles de pisos de las unidades de excavación 11, 13 y 14.

El área se localizó en terrenos ganados al lago de México, mediante la construcción de pilotes y rellenos de arcilla para consolidarlos. Los materiales asociados a este primer momento de ocupación, recuperados entre los 4m y 5m de profundidad corresponden al Periodo Posclásico Temprano (cronología de 1325 a 1403 d. C) en el cual se establecieron asentamientos temporales. Posteriormente en la época en que gobernaba Acamapichtli, se elevó el nivel del piso, y comenzó una ocupación definida por tres momentos.

El primero de ellos es el segundo momento que inicia en el año 1449 bajo el reinado de Moctezuma. Se asocia a crecidas del lago y fue detectado entre los 3m y 4m de profundidad, con cuartos delimitados por muros donde se usó basalto, tezontle y estucos. En el tercer momento, debido a una inundación en 1499 por el desbordamiento del manantial de Acuecuéxcatl cuando reinaba Ahuizotl, se elevó el piso nuevamente a una altura entre 1.70m y 2.90m de profundidad (Tabla 4).

En el año 1517, bajo el reinado de Moctezuma II en el periodo Posclásico Tardío, la ciudad de Tenochtitlan sufrió inundaciones, época que se relaciona con el cuarto momento,

momento, cuya profundidad está entre 1m y 1.70 m, donde nuevas construcciones, principalmente restos de muros, cubrieron la etapa anterior (Tabla 4).

Al segundo momento de ocupación corresponden las muestras Sq3, Sq6 y Sq7. Sq1 corresponde al tercero.

Aunque no existe un acuerdo en la cronología de las etapas constructivas en el Templo Mayor, se presenta la de Matos Moctezuma (Tabla 4).

Tabla 4: Cronología para el Templo Mayor propuesta por Matos Moctezuma. Modificada de Hueda, 2000.

<i>Gobernante</i>	<i>Fechas de gobierno</i>	<i>Etapas constructivas</i>	<i>Momentos de ocupación</i>
Acamapichtli	1375-1395	Etapa II	Primer momento
Huitzilihuitl	1396-1417	Etapa II	
Chimalpopoca	1417-1427	Etapa II	
Itzcóatl	1427-1440	Etapa III	
Moctezuma I	1440-1469	Etapa IV	Segundo momento
Axayácatl	1469-1481	Etapa IVb	
Tizoc	1481-1486	Etapa V	
Ahuízoatl	1486-1502	Etapa VI	Tercer momento
Moctezuma II	1502-1520	Etapa VII	Cuarto momento

6.2 Toma de muestras y su preparación

Las muestras paleomagnéticas son fragmentos de rocas orientadas. Es recomendable sacar varias muestras de un mismo sitio, las cuales se dividen en especímenes que se preparan apropiadamente para medirles la NRM.

Las muestras de los pisos de nuestros sitios son de estuco, que es una pasta viscosa de cal, piedra volcánica y agua, en la cual las partículas ferromagnéticas tuvieron la posibilidad de orientarse con el campo magnético y adquirir una magnetización deposicional antes de secarse. El objetivo fue conocer esta magnetización para determinar la variación secular del campo magnético y luego compararla con las curvas maestras de variación secular de estos lugares, y así poder determinar las fechas en las que el estuco fue colocado y por lo tanto, la edad de esa etapa constructiva. En cada sitio se realizó un recorrido previo a la toma de muestras, con el objetivo de evaluar ciertas condiciones para obtener mejores resultados:



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

- 1.- Que el estuco estuviera bien adherido al piso o muro
- 2.- Estucos con partículas pequeñas
- 3.- Existencia previa de grietas en los aplanados, para facilitar la toma de muestras
- 4.- Lugares donde se hiciera el menor daño posible a las estructuras.

Una vez elegido el sitio, se midió y se marcó la orientación de la muestra con ayuda de una brújula, un inclinómetro y un marcador, para posteriormente extraerlas de la estructura que las contenía. Las muestras arqueológicas a diferencia de otras como las volcánicas, son muy frágiles, por lo que para obtenerlas se utilizaron espátulas, cinceles y martillos en vez de perforadoras. Luego se llevaron al laboratorio, donde se hicieron más marcas de la dirección obtenida en el campo en varias partes de las muestras. Los cortes se hicieron con un cortador eléctrico *mototool*. Se obtuvieron cilindros de tamaño adecuado para medirlos en el magnetómetro JR5A. Las muestras más delgadas fueron adheridas a cilindros de madera con una resina epóxica, para conseguir el volumen necesario para el magnetómetro.

Por facilidad y para evitar desperdiciar el material, algunas muestras fueron cortadas en forma cúbica, ya que es otra de las posibilidades de medición en el magnetómetro JR5A.

Se obtuvieron 15 muestras del sitio Xalla en Teotihuacan con un total de 107 especímenes y 5 de la calle Apartado, con un total de 23 especímenes (Tabla 5)

Tabla 5: Muestras de los sitios Xalla y Apartado

SITIO XALLA (TEOTIHUACAN)		SITIO APARTADO (TEMPLO MAYOR)	
Muestra	Especímenes	Muestra	Especímenes
Xa1	a, b, c, d, e, f, g	Sq1	a, b, c, d, e, f
Xa2	a, b, c, d, e, f, g, h, i, j	Sq3	a, b, c, d
Xa3	a, b, c, d, e, f, g	Sq5	a, b, c, d, e
Xa4	a, b, c, d, e, f, g, h, i, j	Sq6	a, b, c, d
Xa5	a, b, c, d, e, f, g, h, i	Sq7	a, b, d, c
Xa6	a, b, c, d, e, f, g, h, i, j,		
Xa7	a, b, c, d, e, f, g, h		
Xa8	a, b, c, d, e, f		
Xa9	a, b, c, d, e, f		
Xa10	a, b, c, d, e		
Xa11	a, b, c, d		
Xa12	a, b, c, d, e, f		
Xa13	a, b, c, d		
Xa14	a, b, c, d, e, f, g, h		
Xa15	a, b, c, d, e, f, g		

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

6.3 Medición de muestras

Se inicia midiendo la NRM de cada espécimen en el magnetómetro JR5A, se grafican en una red estereográfica y se toman las muestras pilotos, las cuales se desmagnetizan aplicando campos alternos (CA) en varios pasos, aumentando el campo paulatinamente y midiendo cada vez la magnetización residual, con el objetivo de conocer, para cada uno de los valores de CA, las variaciones en la dirección (declinación e inclinación) que sufrió la muestra al ir adquiriendo su magnetización. Los valores aplicados de CA fueron los siguientes: 2, 4, 6, 9, 10, 13, 15, 17, 20, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 90, y 100 mT.

Una computadora registró todos los datos, y posteriormente fueron procesados en el programa Paleo96 de la Universidad de Montpellier, Francia, que proporciona la curva de desmagnetización, el diagrama de Zijderveld y el estereograma de cada espécimen (Anexo 1).

Con estas herramientas, se analizaron las distintas componentes de magnetización y se obtuvo la dirección de la NRM primaria, es decir, la adquirida en el momento de la deposición, para después procesarlos en el programa SpheriStat, con el cual se obtuvieron las direcciones (declinación e inclinación) de la magnetización. Como se tienen varios especímenes de una misma muestra, se aplicó la estadística de Fisher usando el programa SpheriStat para encontrar la dirección media que se buscaba, que finalmente da la variación secular a partir de la cual se pudieron obtener una o varias fechas probables.

7.- RESULTADOS

Las tablas 6 a 21 resumen los resultados de las muestras de cada sitio. Presentan la dirección del vector de magnetización (declinación e inclinación) de cada espécimen y si los puntos se agruparon en un plano o en una recta. Posteriormente usando la estadística de Fisher, se dan los datos promedio de declinación e inclinación por muestra, y la declinación corregida por la deriva al oeste. También se dan los parámetros número de muestras (N), dispersión (k) y límite de confianza de la dirección media (α_{95}). En el sitio Xalla, las muestras Xa8, Xa9 y Xa10 mostraron una gran dispersión, por lo que fue imposible determinar una dirección. Lo mismo ocurrió con la muestra Sq5 del sitio Apartado. De todas ellas no se muestran resultados.

7.1 Sitio Teotihuacan: Xalla

Tabla 6: Resultados de la muestra Xa1

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Xa1a	325.0	49.0	P
Xa1b	319.0	40.0	P
Xa1c	315.0	45.0	P
Xa1d	311.0	54.0	L
Xa1e	353.0	34.0	P
Xa1f	344.0	38.0	P
Xa1g	351.0	19.0	L
Promedio	334.8	40.8	
Corrección	341.3	40.8	
Fisher	N=7, k=26.24, α_{95} =6.56		

Tabla 7: Resultados de la muestra Xa2

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Xa2a	353.0	34.0	P
Xa2b	318.0	37.0	P
Xa2c	307.0	41.0	P
Xa2d	317.0	43.0	P
Xa2e	346.0	51.0	P
Xa2f	36.0	45.0	P
Xa2g	325.0	53.0	P
Xa2h	336.0	40.0	P
Xa2i	332.0	34.0	L
Promedio	347.3	46.1	
Corrección	354.8	46.1	
Fisher	N=8, k=75.67, α_{95} =7.12		

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 8: Resultados de la muestra Xa3

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Xa3a	12.4	29.0	L
Xa3b	348.9	47.6	P
Xa3c	340.6	34.7	P
Xa3d	21.7	14.9	P
Xa3e	337.6	40.7	P
Xa3f	12.4	49.9	L
Xa3g	20.2	24.2	L
Promedio	360.0	33.4	
Corrección	367.5	33.4	
Fisher	N=7, k=15.34, $\alpha_{95}=12.73$		

Tabla 9: Resultados de la muestra Xa4

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Xa4a	4.7	40.2	L
Xa4b	358.3	47.2	P
Xa4c	352.7	35.8	P
Xa4d	334.1	46.2	P
Xa4e	352.3	17.1	L
Xa4f	345.7	41.5	L
Xa4g	358.8	36.5	L
Xa4h	355.5	45.4	L
Xa4i	341.4	35.0	P
Promedio	351.8	38.8	
Corrección	359.3	38.8	
Fisher	N=9, k=49.46, $\alpha_{95}=5.91$		

Tabla 10: Resultados de la muestra Xa5

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Xa5a	4.7	40.2	P
Xa5b	358.3	47.2	L
Xa5c	353.0	36.4	P
Xa5c	352.7	35.8	P
Xa5d	334.1	46.2	L
Xa5e	352.3	17.1	P
Xa5f	345.7	41.5	L
Xa5g	358.8	36.5	L
Xa5h	355.5	45.4	P
Xa5i	341.4	35.0	P
Promedio	349.3	34.2	
Corrección	356.8	34.2	
Fisher	N=10, k=56.57, $\alpha_{95}=5.93$		

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 11: Resultados de la muestra Xa6

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Xa6a	341.7	34.7	P
Xa6b	313.6	30.3	L
Xa6c	324.3	35.6	P
Xa6d	318.8	42.0	P
Xa6e	320.3	55.6	P
Xa6f	300.4	44.3	P
Xa6g	343.9	39.2	P
Xa6h	344.9	19.8	P
Xa6i	311.3	37.2	P
Xa6j	107.0	17.3	P
Promedio	325.1	38.7	
Corrección	332.6	38.7	
Fisher	N=9, k=25.27, α_{95} =8.29 (sin j)		

Tabla 12: Resultados de la muestra Xa7

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Xa7a	344.0	41.0	L
Xa7b	324.0	34.0	L
Xa7c	318.0	49.0	L
Xa7d	350.0	38.0	L
Xa7e	328.6	2.1.0	L
Xa7f	321.0	40.0	L
Xa7g	29.0	50.0	P
Xa7h	344.6	33.6	L
Promedio	329.0	29.0	
Corrección	336.5	29.0	
Fisher	N=8, k=11.99, α_{95} =13.36		

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 13: Resultados de la muestra Xa11

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Xa11a	25.0	44.0	L
Xa11b	16.0	29.0	L
Xa11c	46.0	46.0	L
Xa11d	71.0	30.0	P
Promedio	39.5	39.3	
Corrección	47.0	39.3	
Fisher	N=4, k=13.91, α_{95} =20.42		

Tabla 14: Resultados de la muestra Xa12

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Xa12a	344.0	69.0	P
Xa12b	13.0	45.0	P
Xa12c	301.0	31.0	L
Xa12d	302.0	50.0	P
Xa12e	311.0	61.0	L
Xa12f	342.0	13.0	L
Promedio	329.3	48.4	
Corrección	336.8	48.4	
Fisher	N=6, k=8.060, $\alpha_{95}=20.1$		

Tabla 15: Resultados de la muestra Xa13

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Xa13a	358.3	68.6	P
Xa13b	230.3	67.2	P
Xa13c	6.7	63.1	P
Xa13d	347.5	33.0	L
Promedio	342.5	66.2	
Corrección	350.0	66.2	
Fisher	N=4, k=7.424, $\alpha_{95}=28.93$ (sin a)		

Tabla 16: Resultados de la muestra Xa14

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Xa14a	339.2	23.0	P
Xa14b	339.0	53.1	L
Xa14c	11.3	54.3	P
Xa14d	22.9	34.5	P
Xa14e	332.8	56.1	P
Xa14h	2.6	74.9	P
Promedio	354.3	51.5	
Corrección	361.8	51.1	
Fisher	N=6, k=12.85, $\alpha_{95}=19.42$		

**TESIS CON
FALTA DE**

Tabla 17: Resultados de la muestra Xa15

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P)/recta(L)
Xa15a	5.1	21.8	P
Xa15b	307.3	56.2	P
Xa15c	83.2	75.8	P
Xa15e	18.4	26.7	P
Xa15f	351.3	14.3	L
Xa15g	351.7	58.0	L
Promedio	351.8	41.4	
Corrección	359.3	41.4	
Fisher	N=6, k=7.353, α_{95} =29.09		

7.2 Sitio Templo Mayor: Calle Apartado

Tabla 18: Resultados de la muestra SQ1

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P)/recta(L)
Sq1a	323.0	15.0	P
Sq1b	315.0	9.0	P
Sq1c	350.0	34.0	L
Sq1d	329.0	16.0	P
Sq1e	345.0	42.0	L
Sq1g	206.0	26.0	P
Sq1h	226.0	56.0	P
Promedio	331.1	23.7	
Corrección	338.6	23.7	
Fisher	N=5, k=17.72, α_{95} =18.7 (sin g ni h)		

Tabla 19: Resultados de la muestra Sq3

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Sq3a	5.0	-2.0	P
Sq3b	354.0	32.0	L
Sq3c	337.0	49.0	P
Sq3d	333.0	2.0	L
Promedio	347.9	21.7	
Corrección	355.4	21.7	
Fisher	N=4, k=9.03, α_{95} =32.4		

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 20: Resultados de la muestra Sq6

Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Sq6a	333.0	3.0	P
Sq6b	331.0	15.0	P
Sq6c	315.0	35.0	P
Sq6d	330.0	33.0	p
Sq6a1	337.0	13.0	P
Sq6b1	351.0	23.0	p
Sq6e1	319.0	19.0	P
Sq6g1	305.0	41.0	P
Sq6h1	325.0	56.0	p
Sq6i1	166.0	20.0	p
Sq6l1	329.0	34.0	P
Promedio	317.7	25.8	
Corrección	325.2	25.8	
Fisher	N=10, k=18.16, α_{95} =11.64 (sin i1)		

Tabla 21: Resultados de la muestra Sq7

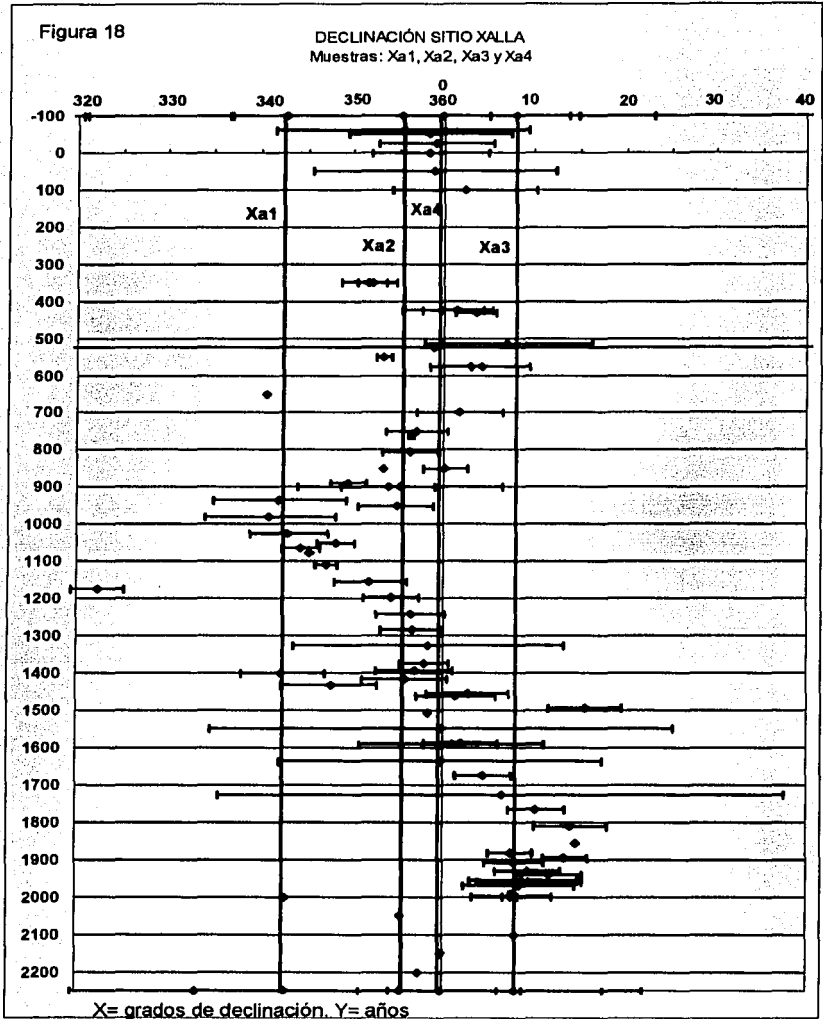
Especimen	Declinación	Inclinación	Plano(P) o recta(L)
Sq7a	294.0	23.0	P
Sq7b	291.0	34.0	P
Sq7c	324.0	29.0	P
Sq7e	312.0	8.0	P
Sq7f	22.0	24.0	L
Sq7g	357.0	5.0	L
Sq7a1	350.0	47.0	P
Sq7d1	36.0	24.0	P
Sq7f1	210.0	10.0	P
Sq7l1	102.0	5.0	P
Promedio	337.8	29.4	
Corrección	345.3	29.4	
Fisher	N=10, k=4.838, α_{95} =28.1 (sin f1 ni i1)		

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

7.3 Curvas De Variación Secular

Las figuras 18 a 25 muestran las gráficas de las curvas de variación secular de declinación e inclinación, que se contruyeron con los datos de Wolfman (1990), Latham et al (1989), Urrutía (1996) y Hueda (2000). Los puntos de intersección de la declinación y la inclinación con la curva respectiva, son las fechas probables en que la muestra adquirió su magnetización.

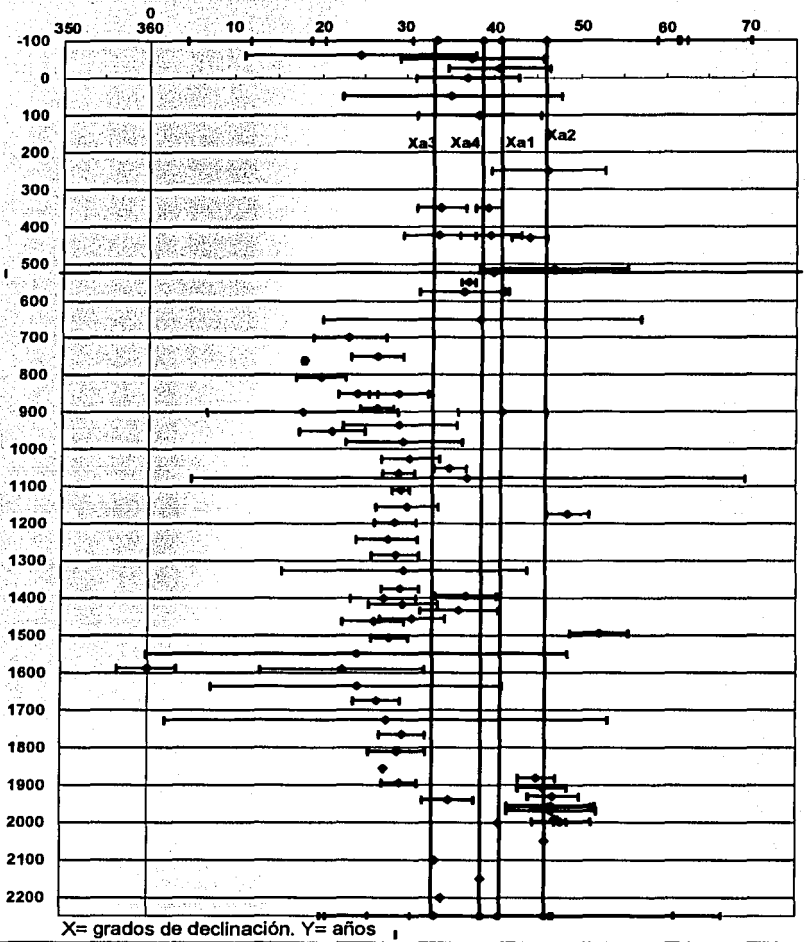
7.3.1 Teotihuacan: Xalla



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 19

INCLINACIÓN SITIO XALLA
Muestras: Xa1, Xa2, Xa3 y Xa4

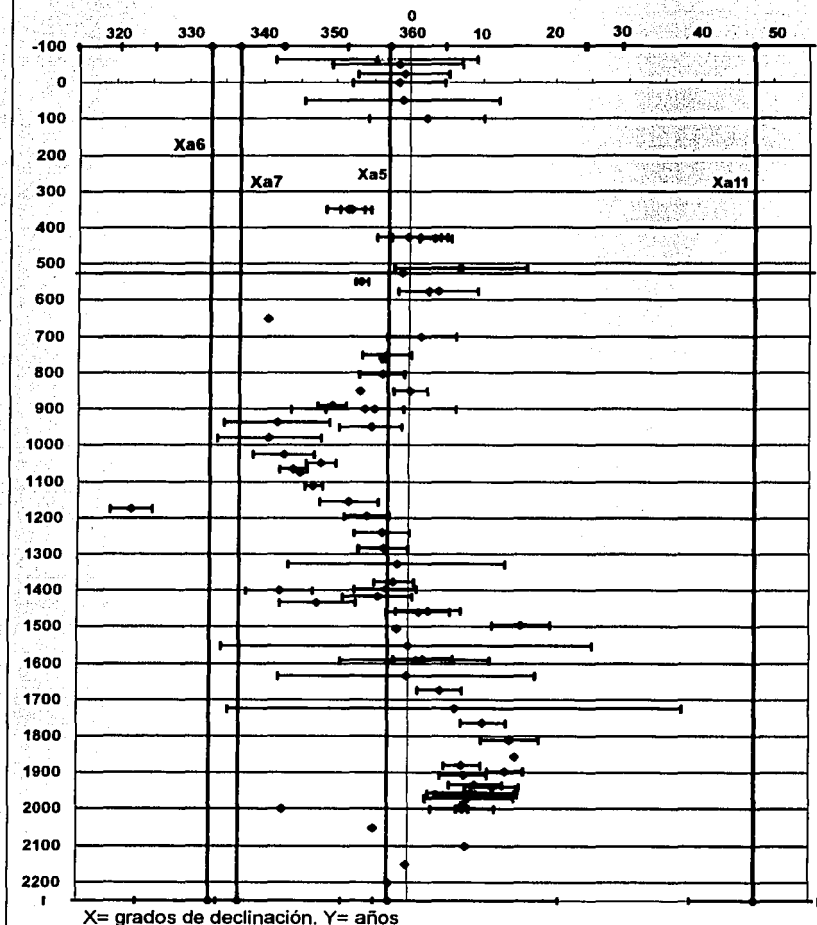


X= grados de declinación. Y= años

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 20

DECLINACIÓN SITIO XALLA
Muestras: Xa5, Xa6, Xa7 y Xa11



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 21

INCLINACIÓN SITIO XALLA
Muestras: Xa5, Xa6, Xa7, Xa11

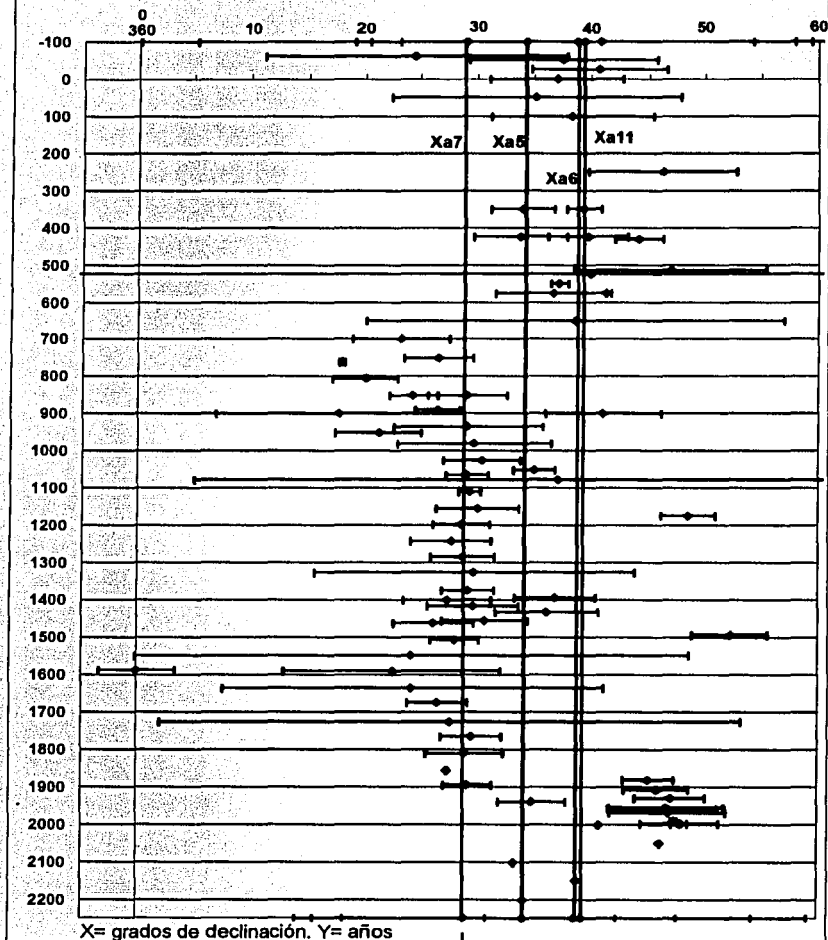
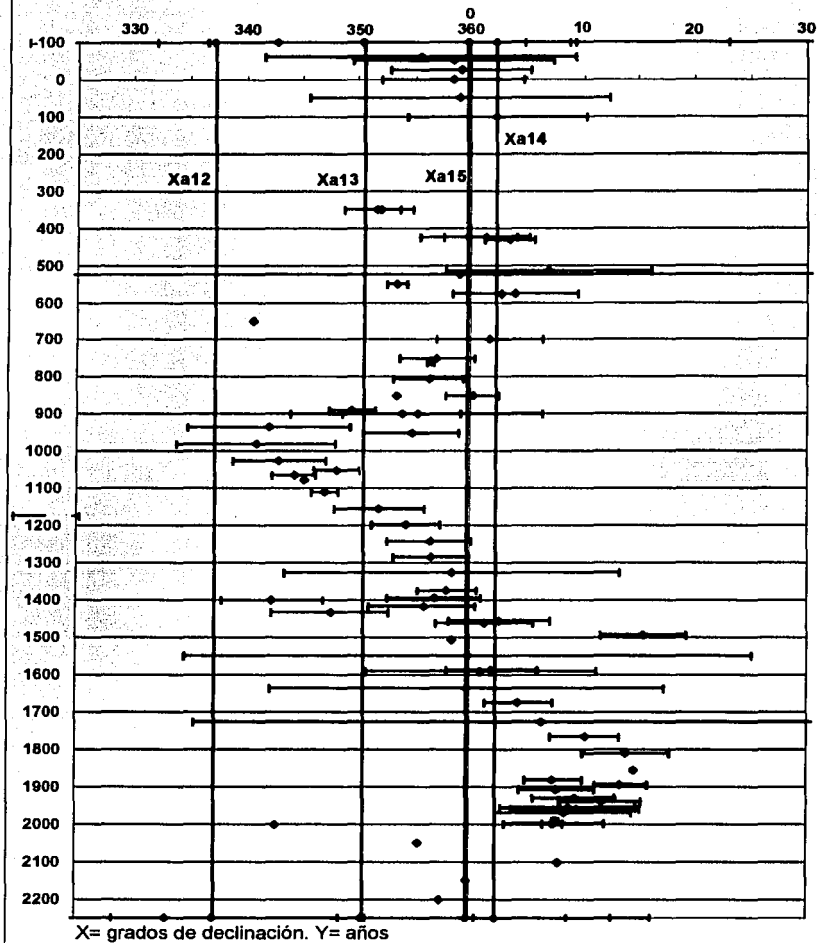


Figura 22

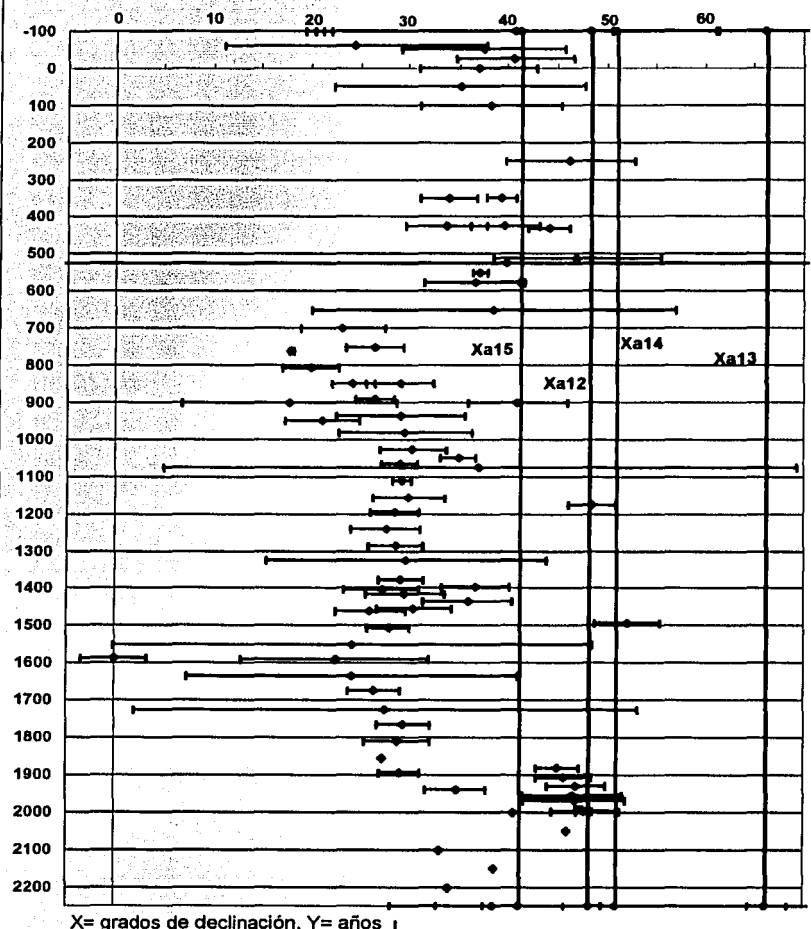
DECLINACIÓN SITIO XALLA
Muestras: Xa12, Xa13, Xa14 y Xa15



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 23

INCLINACIÓN SITIO XALLA
Muestras: Xa12, Xa13, Xa14, Xa15



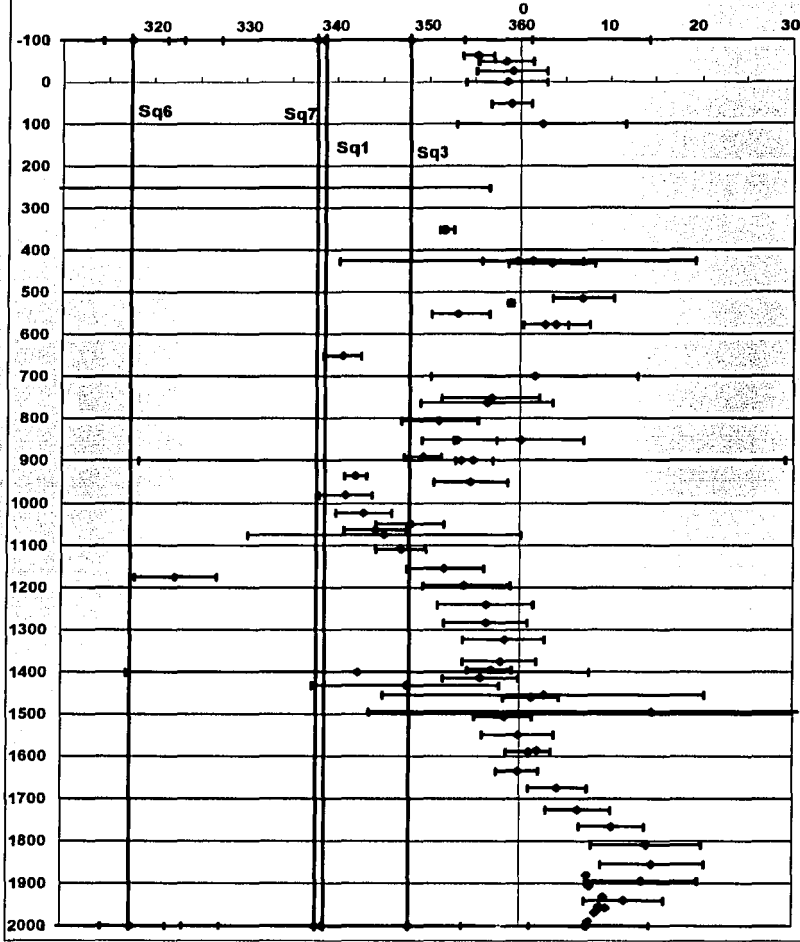
X= grados de declinación. Y= años

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7.3.2 Templo Mayor: Calle Apartado

Figura 24

DECLINACIÓN SITIO CALLE APARTADO
Muestras: Sq1, Sq3, Sq6, Sq7



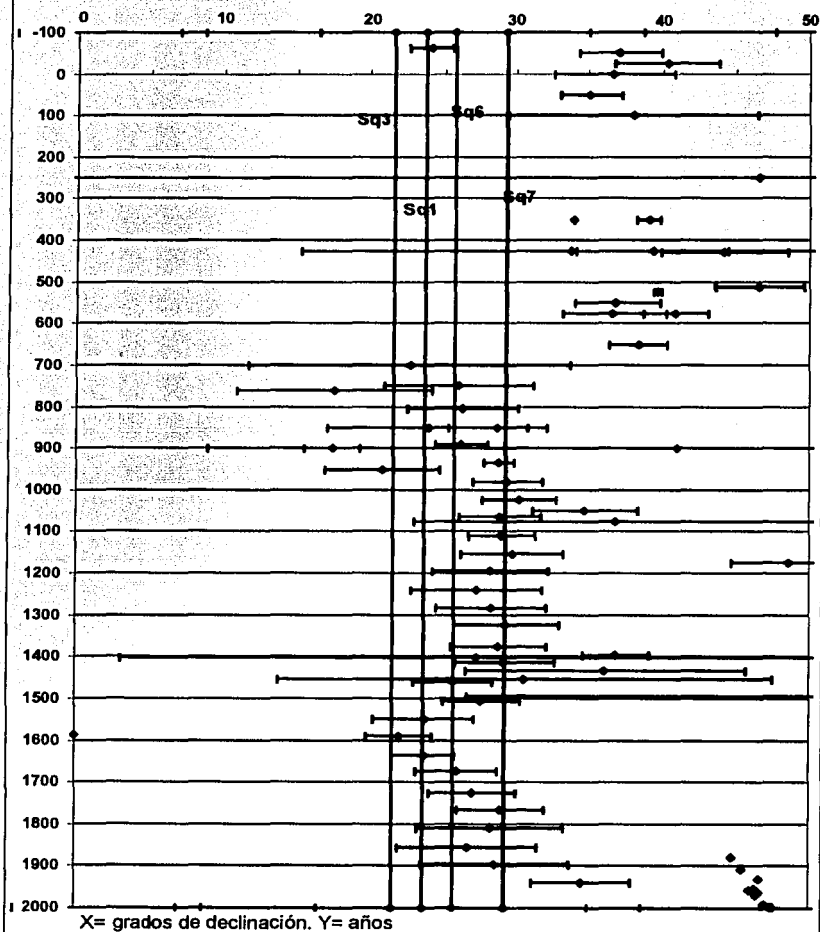
X= grados de declinación. Y= años

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 25

INCLINACIÓN SITIO CALLE APARTADO

Muestras: Sq1, Sq3, Sq6, sq7



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7.4 Fechas Probables

Luego de obtener la declinación e inclinación de cada muestra, se comparó con la curva de variación secular para Teotihuacan en el caso del sitio Xalla, y con la del Templo Mayor en el caso del sitio de la calle Apartado. Cada punto de intersección es una fecha probable y las fechas en obscuro son las elegidas por los arqueólogos.

7.4.1 Teotihuacan: Xalla

Tabla 22: Fechas probables por declinación e inclinación

Muestra	Declinación	Fechas probables por declinación	Inclinación	Fechas probables por inclinación
Xa1	341.3	935, 1025, 1400	40.8	-25, 425-430 , 513, 525-575, 650, 900
Xa2	354.8	550, 761, 805, 950, 1195, 1415	46.1	250, 513, 1175, 1907
Xa3	7.5	513, 1880	33.4	425, 650-700, 1025-1050
Xa4	359.3	425, 525, 700, 850, 1460	38.8	100, 350, 425, 550-575, 650, 1075
Xa5	356.8	525-550, 750-800, 1240	34.2	350, 425, 1050, 1433
Xa6	332.6	***	38.7	100, 350, 425, 650
Xa7	336.5	***	29.0	850, 935, 1065
Xa11	47.0	***	39.3	350, 425, 520, 650, 900
Xa12	336.8	***	48.4	1175
Xa13	350.0	350, 890, 1155	66.2	***
Xa14	1.8	100, 425, 575, 1454	51.1	210, 510, 1175, 1494
Xa15	359.3	425, 525, 700, 850, 1460	41.4	100, 425, 650, 575, 900

7.4.2 Templo Mayor: Calle Apartado

Tabla 23: Fechas probables por declinación e inclinación

Muestra	Declinación	Fechas probables por declinación	Inclinación	Fechas probables por inclinación
Sq1	338.6	980, 1401	23.7	-62, 700, 850, 1550, 1635
Sq3	355.4	1050, 1110, 1433	21.7	950, 1600
Sq6	325.2	1175	25.8	750, 890, 1460, 1675
Sq7	345.3	980, 1401	29.4	850, 980, 1065, 1110, 1155, 1325, 1375, 1415, 1454

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En general las muestras de Xalla denotaron direcciones tendientes al origen en los diagramas de Zijderveld y sus direcciones promedio por muestra poseen α_{95} menores que los de Apartado, ya que el número de especímenes que se obtuvieron por muestra fue menor, debido a la escasez del material.

En el sitio Xalla, 12 de las 15 muestras aportaron resultados. En ellas, los valores de α_{95} son considerablemente buenos, ya que sólo Xa13 tiene un $\alpha_{95}=29^\circ$, que se considera grande. Las otras presentan valores aceptables. A simple vista se observa que el tamaño del grano es menor en las muestras de este sitio que en las de Apartado, por lo que posiblemente las partículas tuvieron oportunidad de orientarse mejor, lo que denota la importancia del tamaño del grano en este tipo de muestras.

Las muestras arqueológicas muestran una desventaja con respecto a las volcánicas o sedimentarias, ya que su obtención es muy restringida, y generalmente no se dispone de una gran cantidad de material para realizar los estudios, lo que hace que la dispersión que muestran los resultados sea mayor que la de otro tipo de estudios. Por ejemplo, de cinco muestras, cuatro presentaron resultados con posibilidades de aplicárseles la estadística de Fisher. De ellas, Sq1 y Sq6 tienen un α_{95} aceptable (menor a 20), pero para Sq3, $\alpha_{95}=32.4$ y para Sq7, $\alpha_{95}=28.1$. Estos valores no se consideran adecuados, ya que tienen mucha dispersión. En el caso de Sq3, la cantidad de especímenes fue muy pequeña, ya que sólo se contó con 4, por lo que realizar una estadística adecuada es muy difícil. Es por esta misma razón que los valores de k no son muy grandes, lo que implica que el agrupamiento mostró una gran dispersión.

Las fechas elegidas por la arqueóloga Janis Rojas del proyecto del Templo Mayor fueron: para la muestra Sq1 no correspondió ninguna fecha. Para Sq3 la fecha más probable es 1433, pues se esperaba una fecha dentro del intervalo de 1440 a 1469, periodo de la etapa IV del segundo momento de ocupación. Para Sq6 se eligió el año 1460, correspondiente a la misma etapa y momento de ocupación. La muestra Sq7 coincidió con el año 1454 de la misma fase constructiva.

Las fechas elegidas por la Dra. Linda Manzanilla del proyecto Xalla fueron: para Xa1 el intervalo de los años 425-430 y el año 513. Para Xa2 el año 550. Para Xa3 el año 513. Xalla 11 coincide con el año 520, Xa13 con el 350, Xalla14 con los años 100 y 210 y Xalla 15 con el año 100.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La orientación de las partículas magnéticas de los estucos con el campo magnético de la Tierra depende de factores como la cantidad de agua empleada en su preparación, el tiempo de secado, la forma de colocación, etc, y no está al alcance de quien realiza el fechamiento conocerlos, por lo que algunas muestras guardan mejor la información magnética, hecho que no se conoce *a priori*, sino hasta después de realizar las mediciones.

Se necesitaría un mayor número de direcciones con fechamientos para mejorar la curva de variación secular y de ahí la calidad de los fechamientos.

Es notoria la utilidad de la técnica del paleomagnetismo para fechar muestras provenientes de sitios arqueológicos dada su economía, rapidez y el no ser un método destructivo.

Debido a que no se obtiene un único resultado, es necesaria la aportación de profesionales en arqueología que puedan discriminar y elegir los datos más probables mediante estratigrafía, restos o algún índice de fechamiento.

9.- BIBLIOGRAFÍA

1. Butler R. F. 1998. *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes*. Department of Geosciences. University of Arizona Tucson, Arizona. Electronic Edition. USA.
2. Childs R. E. 1991. *Fechaientos por radiocarbono en Teotihuacan*. Arqueología. Julio-Diciembre, Vol. 6. 3-18. Dirección de Arqueología del INAH. México.
3. García, Y. 1996. *Variation de l'intensité du champ magnetique en France durant le deux demieres millénaires*. Tesis de doctorado de la Universidad de RennesI, Francia.
5. Goguitchaichvili, A. 1995. *Inversión géomagnétique en Géorgie du Sud en étude d'un exemple d'auto-inversion (Pinatubo)*. Mémoire de DEA. Academie de Montpellier. Université de Sciences et Techniques du Languedoc.
5. Hueda T. Y. 2000. *Fechaiento arqueomagnético de estucos de los sitios de Teopancazco, Teotihuacán y Templo Mayor, Tenochtitlan*. Tesis de Licenciatura. ENAH. México.
6. Latham A. G., Ford D. C., Schwarcz H. P. y Birchall T. 1989. *Secular variation from mexican stalagmites: their potential problems*. Physics of the Earth and Planetary Interiors. Vol. 56. P. 34-48. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. Netherlands.
7. McElhinny, M.W. 1997. *Paleomagnetism and plate tectonics*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
8. Manzanilla L. y López Luján L. 2001. *Exploraciones en un posible palacio de Teotihuacán: El Proyecto Xalla (2000-2001)*. Mexican, Aktuelle informationen und studien zu Mesoamerika. Volumen 23. Número 3.
9. McFadden, P.L. and McElhinny, M.W. 1988. *The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in paleomagnetism*. Earth planet Science. Letters, 87.

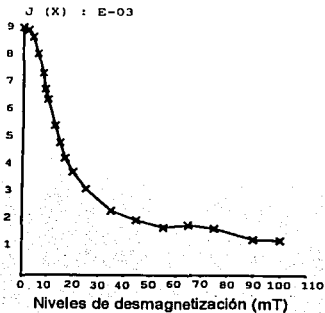
10. Merrill R. T., McElhinny M. W., McFadden P. L. 1996. *The magnetic field of the earth. Paleomagnetism, the core and the deep mantle*. Academic Press, International Geophysics Series, Volume 63. USA.
11. Reitz J. R., Milford F. J., Christy R. W. 1996. *Fundamentos de la teoría electromagnética*. Addison Wesley Iberoamericana, S. A. México.
12. Riisager P. 1997. *Paleomagnetic investigations*. Department of Earth Sciences. University of Aarhus. Denmark.
13. Rojas Gaytán J. Mena Cruz A. Octubre 2003. *Rescate Arqueológico en Apartado 14, 16 y 18 y Nicaragua 55, 59 y 61*. Dirección de Salvamento Arqueológico. INAH.
14. Soler Arechalde A. M. 1997. *Paleomagnetismo y neotectónica de la región de Acambay-Morelia, Faja Volcánica Mexicana*. Tesis de doctorado. Instituto de Geofísica. UNAM. México.
15. Soler Arechalde A. M. 1990. *Paleomagnetismo de la región de Acambay. Tesis de Maestría*. Instituto de Geofísica. UNAM. México.
16. Tarling D. H. 1983. *Paleomagnetism. Principles and applications in geology, geophysics and archaeology*. Chapman and Hall. London.
17. Tarkling D. H. 1975. *Archaeomagnetism: the dating of archaeological materials by their magnetic properties*. World Archaeology. Vol. 7, no. 2, pp 185-197. Oxon, Gran Bretaña.
18. Tippens E. P. 1992. *Física. Conceptos y aplicaciones*. Mc Graw-Hill. México.
19. Urrutia Fucugauchi J. 1996. *Paleomagnetic Study of the Xitle-Pedregal de San Ángel lava flow, southern Basin of Mexico*. Physics of the Earth and Planetary Interiors. Vol 97. Ed. Elsevier Science. Amsterdam.
20. Urrutia Fucugauchi J. 1975. *Investigaciones paleomagnéticas y arqueomagnéticas en México*. Anales del Instituto de Geofísica. Núm. 21, UNAM. México.

21. Westphal M., Pfaff H. 1986. *Paleomagnetisme et magnetisme des roches*. Doin éditeurs-paris. France.
22. Wolfman D. 1990. *Mesoamerican chronology and archaeomagnetic dating, a.d. 1-2000*. Archaeomagnetic Dating. University of Arizona, Tucson. USA.
23. Wolfman D. 1973. *A re-evaluation of Mesoamerican chronology: AD 1-2000*. Tesis de doctorado. Colorado University. USA.
24. Wolfman D. 1971. *Secular variation and archaeomagnetism*. The Researcher. Vol 12, no 2. USA.

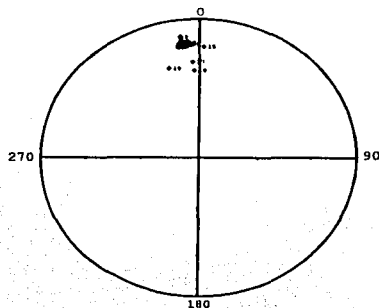
ANEXO 1. DIAGRAMAS DE DESMAGNETIZACIÓN, ESTEREOGRÁFICO Y DE ZIJDERVELD DE ALGUNAS MUESTRAS EJEMPLO

**A.1 SITIO TEOTIHUACAN: XALLA
Especimen Xa1g**

A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



C) Diagrama de Zijderveld

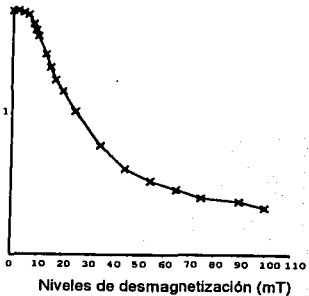


**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

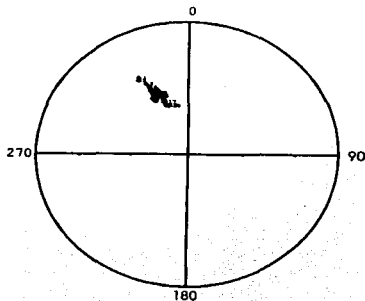
Especimen Xa2h

A) Diagrama de desmagnetización

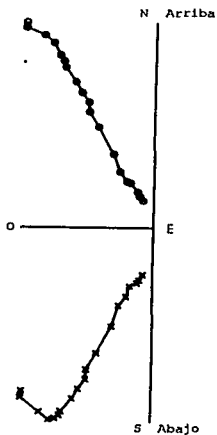
$J (X) : E-02$



B) Diagrama estereográfico



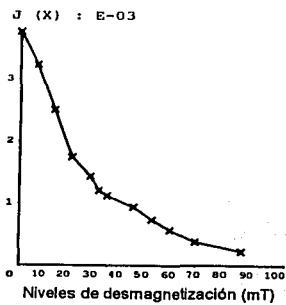
C) Diagrama de Zijderveld



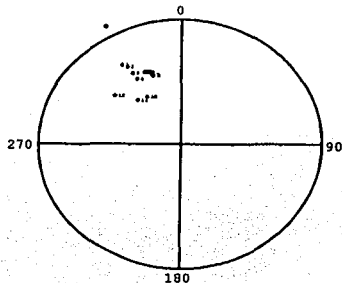
TESIS C
FALLA DE ORIGEN

Especimen Xa3e

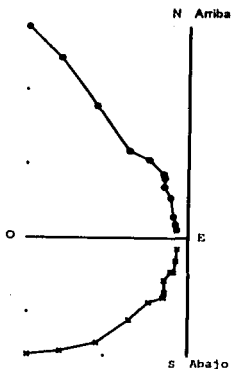
A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



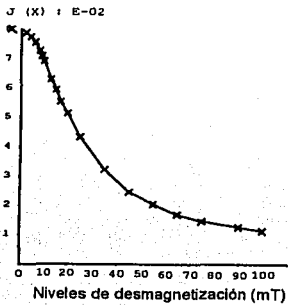
C) Diagrama de Zijderveld



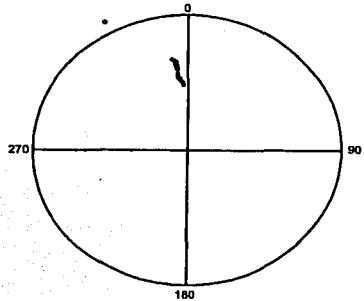
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Especimen Xa4c

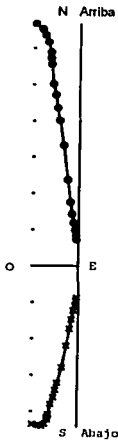
A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



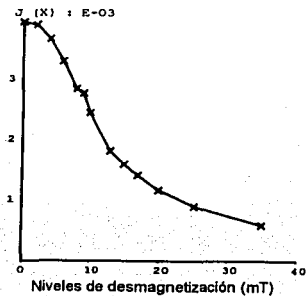
C) Diagrama de Zijderveld



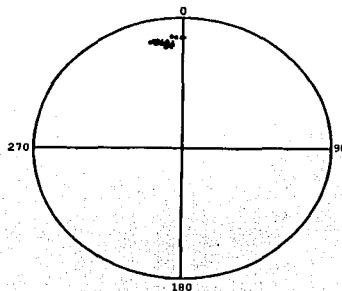
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Especimen Xa5c

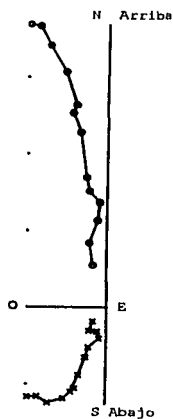
A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



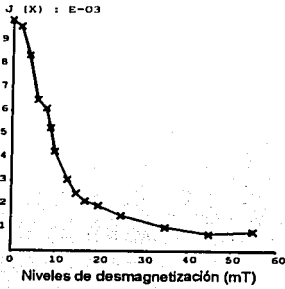
C) Diagrama de Zijderveld



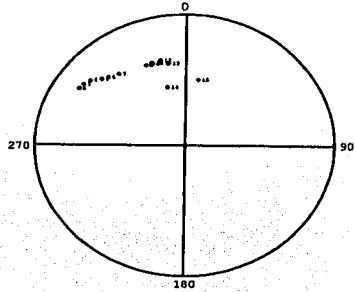
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Especimen Xa6a

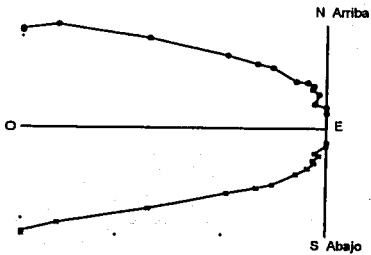
A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



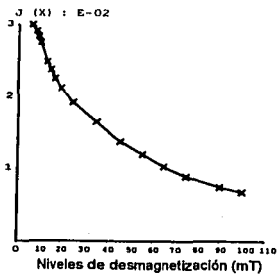
C) Diagrama de Zijderveld



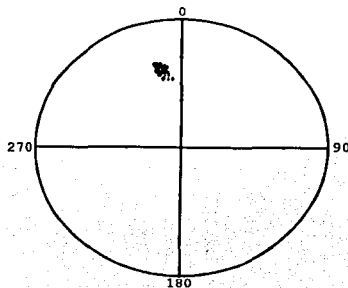
TESIS DE
FALLA DE ORIGEN

Especimen Xa7h

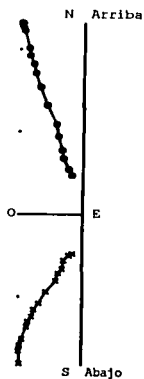
A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



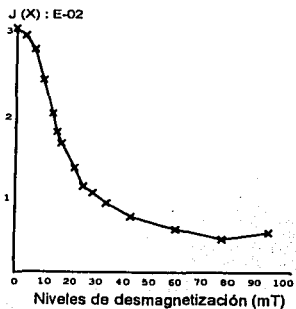
C) Diagrama de Zijderveld



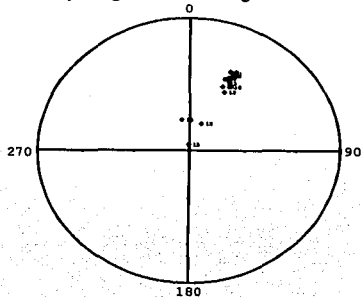
TES'S C
FALLA DE ORIGEN

Especimen Xa11a

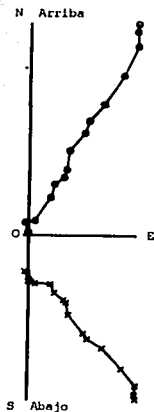
A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



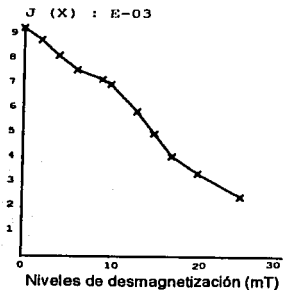
C) Diagrama de Zijderveld



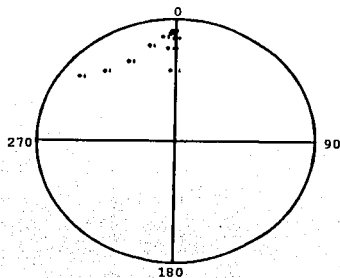
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Especimen Xa12b

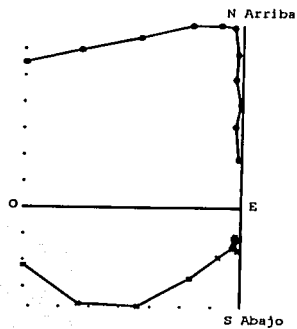
A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



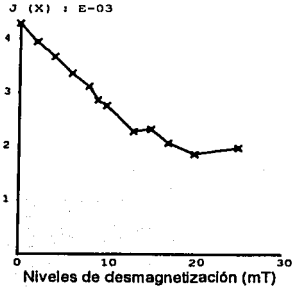
C) Diagrama de Zijderveld



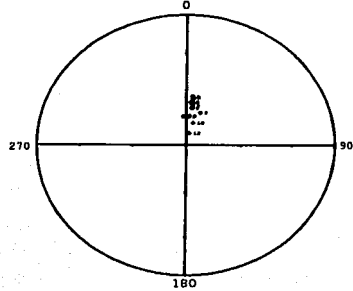
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Especimen Xa13c

A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



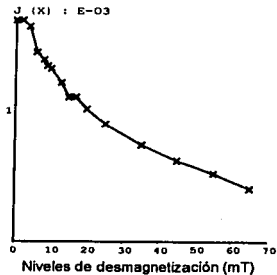
C) Diagrama de Zijderveld



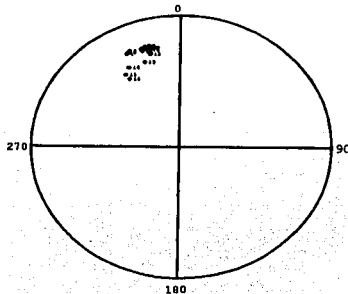
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Especimen Xa14a

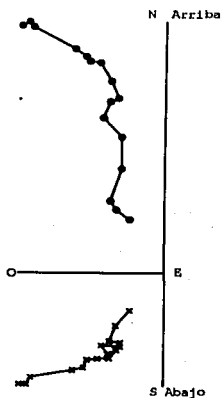
A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



C) Diagrama de Zijdeveld

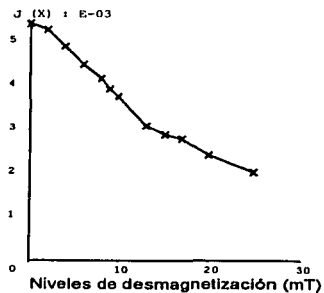


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

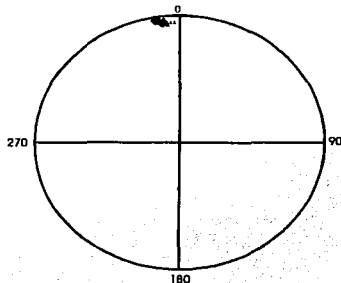
NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Especimen Xa15f

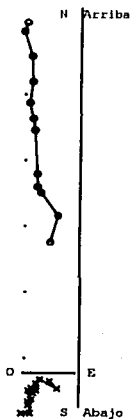
A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



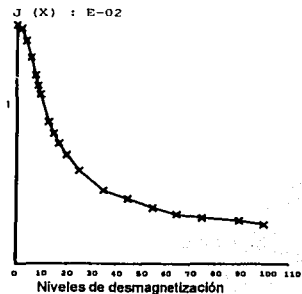
C) Diagrama de Zijderveld



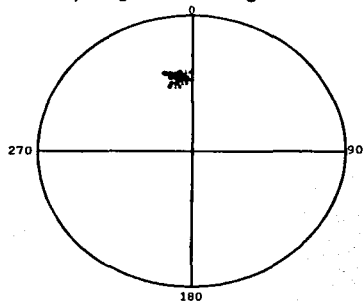
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A.2 SITIO TEMPLO MAYOR: CALLE APARTADO
Especimen Sq1e

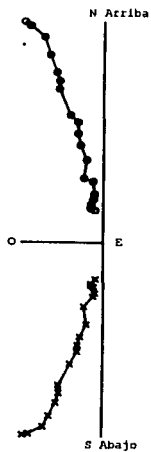
A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



C) Diagrama de Zijderveld

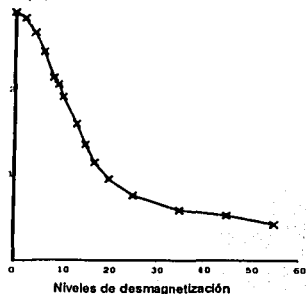


**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**

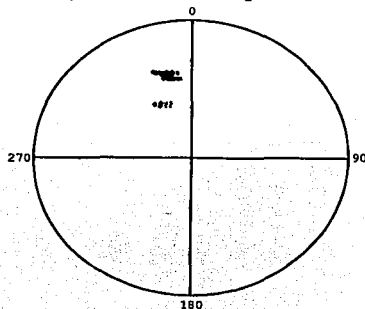
Especimen Sq3c

A) Diagrama de desmagnetización

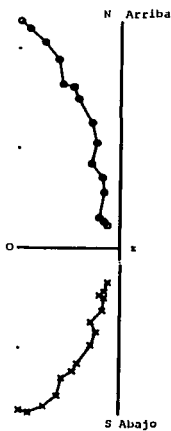
$J (X) : E-03$



B) Diagrama estereográfico



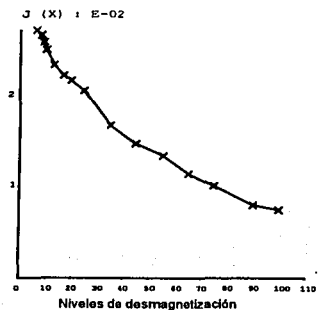
C) Diagrama de Zijderveld



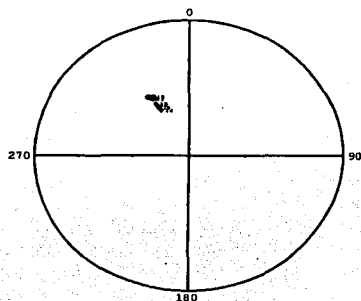
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Especimen Sq6h1

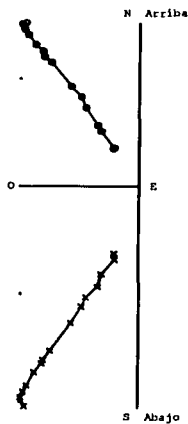
A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



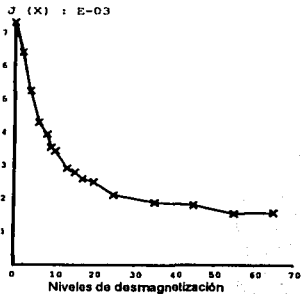
C) Diagrama de Zijderveld



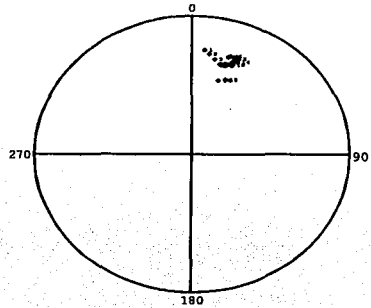
TESIS DE
FALLA DE ORIGEN

Especimen Sq7d1

A) Diagrama de desmagnetización



B) Diagrama estereográfico



C) Diagrama de Zijderveld



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN