



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DEL SEMINARIO DE TITULACIÓN:

**FECHAMIENTOS  
ARQUEOMAGNÉTICOS DE PISOS  
CON CONTROL ESTRATIGRÁFICO  
DE LA EXCAVACIÓN  
TEOPANCAZCO 2005,  
TEOTIHUACAN**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
FÍSICO

PRESENTA:

ESMERALDA ROMERO HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:  
DRA. ANA MARÍA SOLER ARECHALDE



2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Hoja de datos del Jurado

<p>1. Datos del alumno Romero Hernández Esmeralda 5290-3656 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Física 099290290</p>
<p>2. Datos del tutor Dra. Ana María Soler Arechalde</p>
<p>3. Datos del sinodal 1 M. en C. René Garduño López</p>
<p>4. Datos del sinodal 2 Dr. José Luis Ruvalcaba Sil</p>
<p>5. Datos del sinodal 3 Dra. Linda Manzanilla Naím</p>
<p>6. Datos del sinodal 4 Dr. Avto Gogichishvili</p>
<p>7. Datos del trabajo escrito Fechamientos Arqueomagnéticos de pisos con control estratigráfico de la excavación Teopancazco 2005, Teotihuacan. Obtención de fechas asociadas a pisos de Teopancazco. 50 p 2008</p>

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi tutora, la Dra. Ana María Soler, por haberme apoyado desde el servicio social hasta la culminación de este trabajo. Sin su comprensión y paciencia este trabajo no hubiera sido posible.

Al proyecto “ Teotihuacan élite y gobierno” que dirige la Dra. Linda Manzanilla Naim, por haber proporcionado las muestras de los pisos que aquí se fecharon.

Finalmente quiero agradecerle a mis padres, porque su confianza y consejos me llevaron hasta la realización de este deseo. Gracias a Julio por haber compartido la carrera conmigo.

## **Resumen**

En este trabajo se presenta una serie de estudios paleomagnéticos de pisos recopilados en Teopancazco, Teotihuacan con el objetivo de determinar las fechas de ocupación del sitio. A partir de la medición de propiedades magnéticas de roca y de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) se determinó que los minerales portadores de la magnetización en los pisos eran titanomagnetitas pobres en titanio y que su fábrica magnética es de tipo sedimentario.

Se encontró que la fecha de los pisos que presentaban señales de haberse quemado coinciden con el final de la etapa Tlamimilolpa (hacia 350 d. C.), mientras que los no quemados entran dentro del desarrollo de dicha etapa.

## ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>Introducción al magnetismo terrestre</b>	
1.1.	El magnetismo terrestre y sus orígenes .....	1
1.1.1	Características del campo magnético terrestre.....	1
1.1.2	Origen.....	2
1.1.3	Variación secular del campo magnético.....	3
1.2	Motivación del trabajo.....	4
1.3	Antecedentes históricos del sitio.....	4
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>Acerca de la magnetización de los materiales</b>	
2.1	Magnetización de un material.....	6
2.1.1	¿Qué es un dominio magnético?.....	6
2.1.2	La energía de interacción magnética.....	7
2.1.3	Campo de desmagnetización.....	7
2.1.4	Anisotropía magnética.....	8
2.2	Histéresis magnética.....	8
2.3	Susceptibilidad magnética.....	10
2.3.1	Clasificación magnética.....	10
2.4	Magnetización en las rocas.....	11
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>Tratamiento de muestras</b>	
3.1	Recopilación de muestras.....	13
3.2	Trabajo de laboratorio.....	15
3.3	Métodos para el análisis estadístico de las muestras.....	16
3.3.1	Diagrama de Zijderveld.....	17
3.3.2	Estadística de Fisher.....	17
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Análisis de las muestras medidas</b>	
4.1	Tratamiento estadístico.....	19
4.2	Fecha de fechamiento arqueomagnético.....	24
4.3	Propiedades magnéticas.....	31
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>32</b>
<b>APÉNDICE.....</b>		<b>33</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>46</b>

## CAPÍTULO 1: Introducción al magnetismo terrestre

### 1. 1. El magnetismo terrestre y sus orígenes

El primer artefacto que empleó las propiedades magnéticas terrestres fue la brújula. Su descubrimiento vino acompañado de una serie de preguntas acerca del campo magnético terrestre y su origen. Hoy en día, como resultado de los estudios paleomagnéticos, sabemos que el campo magnético no ha permanecido constante, sino que ha variado en diferentes épocas. En los siguientes apartados se describen las propiedades, el posible origen y las variaciones del campo magnético terrestre.

#### 1.1.1. Características del campo magnético terrestre

Se sabe que el 80% del campo magnético terrestre es dipolar y un 20% es no dipolar; por lo tanto se aproxima a un dipolo situado en el centro de la Tierra lo cual concuerda con el alineamiento Norte-Sur de las líneas magnéticas (figura 1). En períodos muy grandes de tiempo se puede asegurar que el campo es dipolar, debido a que los polos Norte magnéticos se agrupan alrededor del Norte Geográfico.

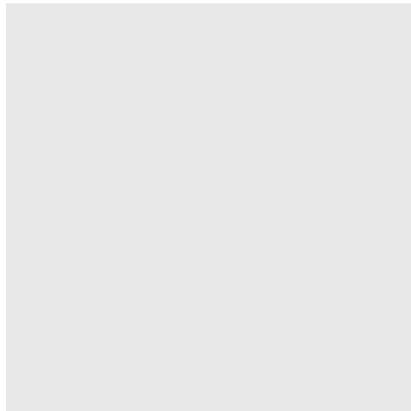


Figura 1. Aproximación dipolar del campo magnético terrestre (tomada de [17]).

En la actualidad el eje del dipolo está inclinado  $11.5^\circ$  con respecto del eje de rotación terrestre; esto quiere decir que el norte magnético no corresponde exactamente con el norte geográfico.

Para describir al campo magnético en algún punto de la superficie terrestre se usa un vector llamado vector magnético, el cual tiene una magnitud específica conocida como intensidad del campo magnético terrestre. Esta intensidad es del orden de  $3 \times 10^{-5}$  T en las proximidades del Ecuador y de  $7 \times 10^{-5}$  T en las regiones polares. La dirección del vector magnético se da con base en cuatro componentes principales (ver figura 2) que son la vertical, la horizontal, el Norte y el Este, las cuales se definen respectivamente como:

$$H_v = H \sin I \dots (1), \quad H_h = H \cos I \dots (2),$$

$$H_N = H \cos I \cos D \dots (3), \quad H_E = H \cos I \sin D \dots (4),$$

donde  $H$  es la intensidad,  $I$  es la inclinación y  $D$  la declinación; siendo  $I$  un ángulo medido de  $0^\circ$  a  $\pm 90^\circ$  a partir del Ecuador en la dirección Norte- Sur,  $D$  nos da el ángulo entre el norte geográfico y el norte magnético, y se encuentra en un rango  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

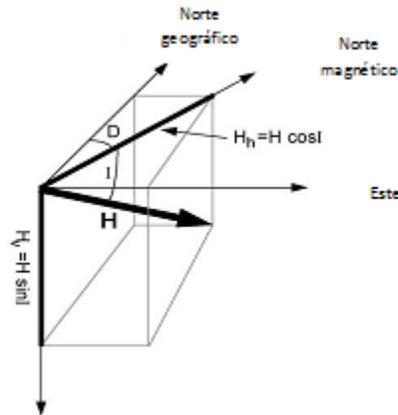


Figura 2. Componentes del vector magnético (tomada de [2]).

### 1.1.2. Origen

Existen dos maneras de producir un campo magnético: una es por medio de un cuerpo imantado (inducido), y la otra es a través de una corriente eléctrica (cargas en movimiento). La primera idea que se tuvo acerca del origen del campo terrestre fue que la Tierra tenía un gran imán en su centro compuesto de hierro y níquel. Se pudo corroborar que el centro de la Tierra contenía estos metales, pero estos materiales ya habrían perdido sus propiedades magnéticas debido a que ahí las altas temperaturas ( $\sim 2000^\circ\text{C}$ ) superan la temperatura de Curie<sup>1</sup> del hierro ( $770^\circ\text{C}$ ) y el níquel ( $360^\circ\text{C}$ ). Por lo tanto el núcleo terrestre no puede ser un imán permanente.

Posteriormente al estudiar las propiedades de las ondas sísmicas, se encontró que las ondas S (transversales) no eran capaces de atravesar completamente la Tierra mientras que las ondas P (longitudinales) sí; esto ayudó a proponer que el centro de la Tierra debía ser un fluido puesto que las ondas transversales sólo se propagan en medios sólidos. Con esta información se formularon nuevas teorías acerca del origen del campo; la más aceptada propone que el campo magnético se debe a corrientes eléctricas en el núcleo, generadas por los movimientos convectivos de electrones libres (provenientes del hierro y níquel ionizados por las altas temperaturas) combinados con los movimientos de rotación terrestre. Aún no se ha precisado el origen de estos movimientos de convección pero se ha especulado que se deben a un gradiente de temperatura entre el núcleo interno y el manto.

<sup>1</sup> Es la temperatura límite en la cual los materiales pierden sus propiedades magnéticas. Esta temperatura varía dependiendo del material.

Para tener el campo magnético total se necesita añadir la contribución de los materiales ferromagnéticos sobre la superficie y el campo externo (magnetosfera), aunque con menor intensidad también contribuyen.

### 1.1.3. Variación secular del campo magnético

El campo magnético de la Tierra no ha permanecido constante en el tiempo; ha variado en períodos que van desde miles hasta cientos de años a esta última se le conoce como *variación secular*. La prueba de esta variación está registrada en la orientación de los dominios magnéticos que guardan las rocas, de los cuales se hablará más adelante.

Por ello se ha medido la magnetización de las rocas situadas en estratos formados en periodos geológicos distintos, con lo cual se han elaborado mapas del campo magnético terrestre en diversas eras. Estos mapas muestran que ha habido épocas en las que el campo magnético terrestre se ha reducido a cero para luego invertirse, y otras en las que permaneció constante.

Las pruebas más contundentes de la variación secular son:

- Disminución de los momentos magnéticos.
- La deriva al oeste del campo no dipolar [16].
- Variación en intensidad del campo no dipolar.

No se puede predecir con exactitud cuándo ocurrirá la siguiente inversión del campo debido a que la secuencia no es regular, pero las últimas mediciones muestran que la intensidad del campo magnético ha disminuido; si se mantiene ese ritmo el campo volverá a invertirse. Por ejemplo en la figura 3 se observa que en los últimos cuatro siglos en Londres la declinación y la inclinación de los polos magnéticos han variado  $30^\circ$  y  $10^\circ$  respectivamente.

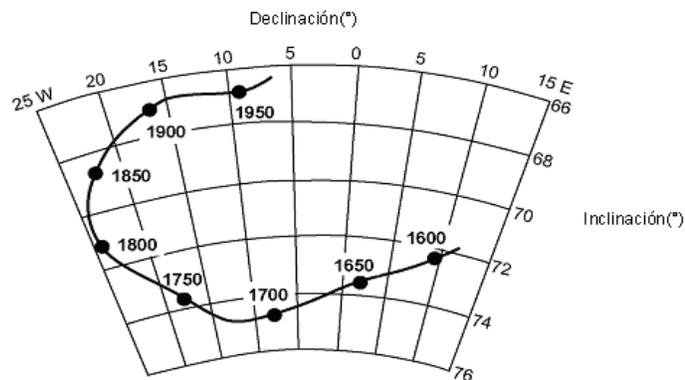


Figura 3. Variación secular de Londres en los últimos 4 siglos (tomada de [2]).

## 1.2. Motivación y objetivos del trabajo

La curva de variación secular para Mesoamérica no es muy precisa debido al empleo de diferentes métodos de fechamiento: estilísticos (tipo de arquitectura, escultura), estratigráficos y en algunos casos radiocarbono. Existe además el problema de la incongruencia de calendarios prehispánicos, además de que hay muy pocas muestras recopiladas y medidas. Por ello, como parte del proyecto “Teotihuacan élite y gobierno” de la Dra. Linda Manzanilla se busca fechar pisos recopilados en Teopancazco y con ello contribuir a que haya una mejor cronología. Esto empleando el método arqueomagnético, que consiste en una serie de mediciones como la desmagnetización mediante campos alternos, para obtener la dirección de la magnetización característica o primaria, y los de propiedades magnéticas de rocas (anisotropía de susceptibilidad magnética, histéresis, etc.). Se obtiene la dirección media de la muestra y se compara con la curva de variación secular del área. En algunos casos es posible la corroboración mediante los fechamientos del lugar hechos con  $^{14}\text{C}$ . Por lo tanto los objetivos de este trabajo son:

- Aprender las propiedades del campo magnético terrestre.
- Determinar las fechas de pisos con diferentes temporalidades del área de Teopancazco.
- En el caso de la existencia de fechamientos con otras técnicas contribuir a la mejora de la curva de variación secular para Mesoamérica.

Junto con el trabajo de laboratorio se llevaron a cabo una serie de seminarios, en los cuales se discutieron artículos relacionados con dataciones hechas en varios lugares del mundo. Con ello se afirmaron conocimientos acerca de las propiedades del campo magnético terrestre y la determinación de la curva de variación secular.

## 1.3. Antecedentes históricos del sitio

Teopancazco fue un centro de barrio Teotihuacano ubicado al sureste de la Ciudadela como se muestra en la figura 4. Un centro de barrio está constituido por patios de congregación y un linaje o “casa” fuerte que organizaba no sólo el ritual, sino actividades artesanales singulares, en este caso la confección de atavíos para la élite teotihuacana, con algunos materiales provenientes del estado de Veracruz [15]. En el sitio se encontraron flora y fauna provenientes de la Costa del Golfo, como peces, erizos y una garceta del Golfo. Los murales del sitio corroboran las evidencias encontradas. Este centro de barrio contaba con un pórtico, que era la entrada principal al lugar. En algunos cuartos fueron encontrados fogones de barro, que en este caso debieron usarse más en el ámbito ceremonial o artesanal, ya que los centros de barrio no eran conjuntos multifamiliares. Prueba de

ello es que no se han encontrado restos de cocinas, porque los metates sólo presentan restos de estuco, fibras y pigmentos, lo que indica que no eran usados para moler el maíz.

Toda esta información proviene del proyecto “Teotihuacan élite y gobierno” de la Dra. Linda Manzanilla del Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM [13]; este proyecto abarcó el estudio de los conjuntos arquitectónicos de Xalla y Teopancazco con el fin de recopilar el mayor número de evidencias acerca de cómo se regía el pueblo de Teotihuacan.

El sitio muestra varias etapas (fases) de ocupación que terminaban con un ritual consistente en “matar o sacrificar” piezas de cerámica seguido de un incendio. A continuación se describen las etapas de ocupación teotihuacanas (tabla 1).

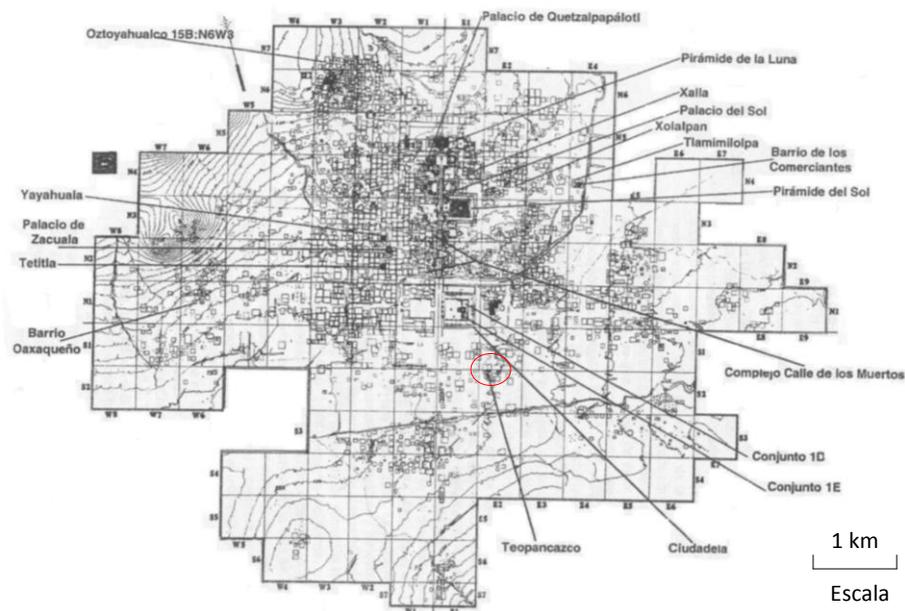


Figura 4. Mapa de Teotihuacan (tomado de [14]).

© René Millon 2008.

Etapa de Ocupación	Años d.C.	Acontecimientos
Tzacualli	1-100	Inicio del desarrollo urbano del Valle de Teotihuacan. Comienza la construcción de la Pirámide del Sol.
Miccaotli	100-200	Se traza la Calzada de los Muertos. Se construye la Pirámide de Quetzalcóatl.
Tlamimilolpa	200-350	Se da la planificación urbana del sitio: Traza de ejes y calles perpendiculares y paralelas, dividiendo la ciudad en 4 cuadrantes. Construcción de edificios públicos y administrativos, sistema de drenaje y abastecimiento de agua y la existencia de barrios.
Xolalpan	350-550	Etapa de renovación urbana y de máxima extensión, seguida del colapso e incendio.

Tabla 1. Etapas de Ocupación teotihuacana [12].

## **CAPÍTULO 2: Acerca del magnetismo en los materiales**

### **Magnetización de un material**

La magnetización es la suma de los momentos magnéticos atómicos en un material, el cual se magnetiza en presencia de un campo magnético, y dependiendo de sus características la magnetización puede o no ser permanente. La magnetización se expresa como la suma de los momentos magnéticos por unidad de volumen.

Existen dos tipos de magnetización: la remanente y la inducida. Cuando ponemos un material dentro de un campo magnético externo, las cargas dentro del material se alinean en la dirección del campo. Esta es la magnetización inducida ( $M_i$ ), que es directamente proporcional al campo magnético ( $H$ ) aplicado, y se expresa como:

$$M_i = \chi_b H \dots (5),$$

donde  $\chi_b$  es la susceptibilidad magnética. La susceptibilidad es propia del material y depende explícitamente de las características físicas de éste.

La magnetización remanente ( $M_r$ ) es aquella que queda después de que al material se le ha inducido una magnetización. Este tipo de magnetización sólo está presente en los materiales ferromagnéticos, ya que son los únicos capaces de guardar la magnetización durante mucho tiempo, debido a sus propiedades físicas.

### **¿Qué es un dominio magnético?**

Un dominio magnético es aquella región del material donde rige una sola dirección de la magnetización, o hay una magnetización uniforme. Supongamos que tenemos granos esféricos que tienen una magnetización uniforme ( $m$ ). El momento atómico magnético puede modelarse como pares de cargas, pero estas cargas junto con las de los átomos cercanos cancelan la carga interna del grano; por lo tanto, sólo hay una distribución superficial de carga.

La magnetización uniforme de un grano de material ferromagnético es  $m=m_s$ , estos granos dependiendo de su diámetro pueden tener múltiples dominios o uno solo [2].

Los granos con diámetros mayores a 10  $\mu\text{m}$  pueden contener varios dominios magnéticos, por lo que se les llama granos multidominios (DM). Los granos con diámetros menores sólo tienen un dominio magnético (DS) o dominio sencillo, aunque también depende del mineral magnético. Por ejemplo en la hematita, los granos tienen diámetros de  $d_0 = 15 \mu\text{m}$ , y la mayor parte de sus granos son de dominio sencillo.

También se definen los dominios pseudo-sencillos (DPS), que son aquellos cuyos diámetros de grano para un mineral dado son muy grandes para ser sencillos y muy pequeños para ser

multidominio. Su estudio es muy importante para comprender la magnetización portada por minerales como la magnetita y titanomagnetita.

### Energía de interacción magnética

Cuando aplicamos un campo magnético al material existe una energía de interacción  $e_H$  entre el campo  $H$  y la magnetización de los granos individuales ( $m$ ), o sea entre los momentos atómicos y el campo aplicado. Esto para materiales ferromagnéticos se escribe como:

$$e_H = \frac{-m \cdot H}{2} \dots (6)$$

Para granos de un solo dominio  $m=m_s$ , cuando aplicamos un campo magnético externo su magnetización no se altera en magnitud pero sí en dirección, se reorienta hacia el campo externo. Esto es, porque los dominios magnéticos cambian su dirección por medio de campos magnéticos externos; pero no es tan sencillo lograrlo debido a anisotropías del material. Esto quiere decir que existen direcciones preferenciales de magnetización dentro del dominio. Las anisotropías dominantes son las de forma y las magnetocristalinas.

### Campo de desmagnetización

En un grano DS esférico la distribución superficial de cargas produce un campo magnético externo igual al de un dipolo, pero también dentro del grano crea un campo magnético  $H_D$ , el cual es conocido como campo de desmagnetización interna debido a que está en dirección opuesta a la magnetización del grano.

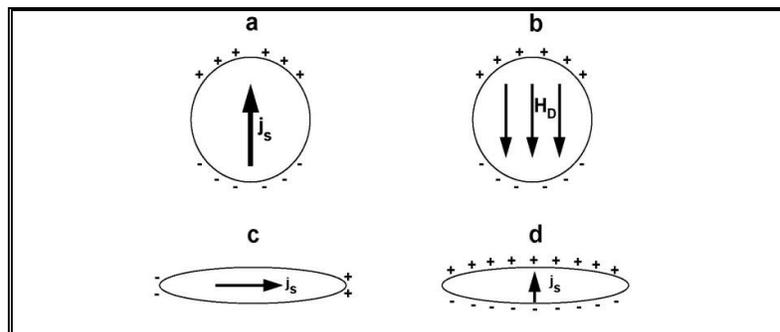


Figura 5. a) Magnetización dipolar. b) Campo de desmagnetización interna. c) Magnetización paralela a la elongación. d) Magnetización perpendicular a la elongación.

Para un elipsoide uniformemente magnetizado el campo de desmagnetización es:

$$H_D = -N_D \cdot m_s \dots (7),$$

donde  $N_D$  es el factor de desmagnetización, este factor se mide a lo largo de cada uno de los ejes cartesianos y debe sumar  $4\pi$ . En el caso del grano esférico el factor de cada eje es:

$$N_{Dx} = \frac{4\pi}{3} = N_{Dy} = N_{Dz} \dots (8)$$

Por lo tanto, el campo de desmagnetización interna es:

$$H_D = -\frac{4\pi}{3} \cdot m_s \dots (9)$$

Con este resultado podemos obtener la energía de magnetización del grano, la cual está relacionada con el campo de desmagnetización y la magnetización. Para el elipsoide magnetizado uniformemente tenemos que la energía de magnetización es:

$$e_m = -\frac{m \cdot H_D}{2} = \frac{m_s^2 N_D}{2} \dots (10)$$

### **Anisotropía magnética**

Una de las características más importantes del material es su configuración atómica, ya que de ella dependen sus propiedades físicas; por ejemplo en algunos cristales cúbicos los momentos magnéticos tienden a alinearse en ciertas direcciones, o dependiendo de la dirección cristalográfica tienen conductividad o no, etc., esto es a lo que se conoce como anisotropía del material. Como se mencionó anteriormente existen dos tipos principales de anisotropía: la de forma y la magnetocristalina.

La anisotropía magnetocristalina es aquella en la cual la magnetización del material depende de las direcciones principales del cristal ( $\langle ij \rangle$ ). Esto quiere decir que existe una dirección en la cual el cristal se magnetiza fácilmente y otras en las que se necesita invertir mayor energía.

En la anisotropía de forma, la magnetización depende de la forma y el tamaño del grano. Esto es, porque al magnetizarse se crea una distribución superficial de cargas, entonces si tenemos un grano elongado (elipsoidal) la magnetización es más grande si está en dirección perpendicular a la elongación (ver figura 5).

### **Histéresis magnética**

Este fenómeno se presenta en los materiales ferromagnéticos después de ser sometidos a un campo magnético. Ya se había mencionado que cuando un material es sometido a la acción de un campo magnético, se induce sobre él una magnetización. Cuando se anula el campo, es de esperarse que la magnetización desaparezca; sin embargo, cuando el campo se hace cero el material ferromagnético se resiste a regresar a su estado natural, este fenómeno es lo que se

conoce como histéresis magnética. Gracias a este fenómeno los materiales ferromagnéticos son capaces de retener la información magnética por un largo período de tiempo.

Se puede construir una curva de histéresis graficando la magnetización inducida ( $M$ ) contra el campo magnetizante aplicado ( $H$ ), para estudiar las propiedades magnéticas del material.

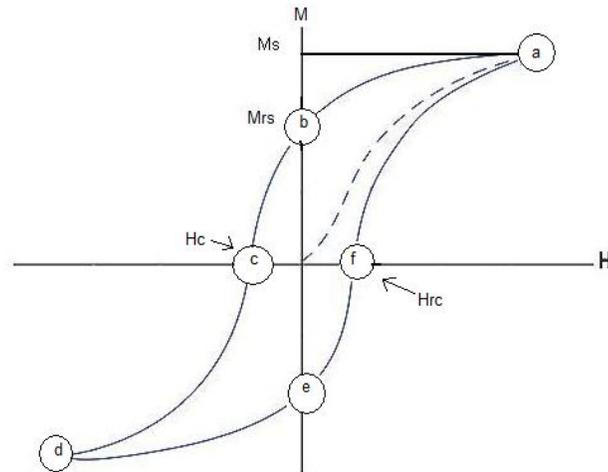


Figura 6. Ciclo de histéresis.

La curva es generada midiendo la magnetización inducida en el material conforme el campo aplicado cambia. En la figura 6 se ha graficado un ciclo de histéresis, en el punto "a" de la curva casi todos los dominios magnéticos están alineados y un incremento en el campo magnetizante producirá un pequeño incremento en la magnetización. Entonces el material alcanza el punto de saturación magnética ( $M_s$ ); el valor de la magnetización en este punto es igual a la suma de todas las magnetizaciones individuales del material [18], o sea que es la magnetización neta. Cuando  $H$  es reducido a cero; la curva pasa del punto "a" al "b". Este punto es conocido como punto de retención ya que a pesar de que el campo magnetizante es cero en el material aún queda un remanente magnético ( $M_{rs}$ ). Después se invierte el sentido del campo  $H$  y la curva se mueve al punto "c", aquí  $M$  es reducido a cero; este punto es llamado punto de coercitividad. El campo requerido para remover el magnetismo residual del material es llamado campo coercitivo ( $H_c$ ), por lo tanto este campo se aplica en dirección contraria a la magnetización. Como el campo es incrementado en la dirección negativa en el punto "d" el material llegará a ser de nuevo magnéticamente saturado. Reduciendo  $H$  a cero la curva pasa al punto "e". En este punto el material tendrá un remanente magnético igual al que tenía en la otra dirección. Incrementando  $H$  regresamos a la dirección positiva donde  $M$  vuelve a ser cero.

Es importante resaltar que la gráfica no regresa al origen debido a que se invierte el campo para contrarrestar el magnetismo residual. La curva toma un camino diferente, a partir del punto "f" regresa al punto de saturación donde cierra la gráfica.

Con la curva de histéresis se calcula la magnetización de saturación ( $M_s$ ), el campo coercitivo ( $H_c$ ) y la magnetización remanente de saturación ( $M_{rs}$ ). Dependiendo de la forma de la curva se puede saber si el material es un DS, DM o DPS, y deducir los minerales ferromagnéticos del material. También se puede saber graficando la razón de la magnetización remanente de saturación con la magnetización de saturación ( $M_{rs} / M_s$ ) contra la razón campo remanente coercitivo con el campo coercitivo ( $H_{rc}/H_c$ ). Esta gráfica es conocida como diagrama de Day [4], y es un método usado para clasificar el tipo de dominio magnético y tamaño de grano.

Otra forma de encontrar la magnetización remanente de saturación de un material es con la gráfica de IRM (Isothermal Remanent Magnetization - Magnetización Remanente Isotermal), en donde la muestra es expuesta a campos magnéticos intensos ( $H$ ) sin incrementar la temperatura. De aquí también se calcula la coercitividad de la remanencia ( $H_{rc}$ ), que da información sobre la naturaleza de los minerales ferromagnéticos presentes en el material. Por lo general, cuando la composición de la muestra es titanomagnetita adquiere la IRM en campos  $< 3000$  Oe (300 mT) [2].

### **Susceptibilidad Magnética**

Al poner un material en presencia de un campo éste puede o no magnetizarse; la susceptibilidad es una propiedad del material que nos dice que tan fácil o no puede magnetizarse el material, y como puede verse en la ecuación 5, la magnetización depende directamente de ella. Por ello, si su valor es positivo la magnetización está en la dirección del campo y cuando es negativa la magnetización se opone al campo, esto influye directamente en la clasificación magnética de los materiales: diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos [1].

La susceptibilidad es un tensor simétrico, cuyas direcciones principales son  $\chi_{11}$ ,  $\chi_{22}$  y  $\chi_{33}$  (o  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  como se citan en varios libros). Geométricamente la susceptibilidad puede verse como un elipsoide cuyos ejes son las direcciones principales de la susceptibilidad, señaladas como la máxima, la intermedia y la mínima susceptibilidad. La forma del elipsoide depende de la fábrica magnética (*acomodamiento de los minerales magnéticos*) de los minerales ferromagnéticos que se encuentran en el material. El elipsoide de susceptibilidad puede ser representado usando la gráfica de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM).

### **Clasificación magnética**

Según las propiedades magnéticas existen tres tipos de materiales: diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos. A continuación se hace una breve descripción de cada uno.

- *Diamagnéticos.*- Todos los materiales bajo ciertas condiciones se comportan como diamagnéticos; esto es porque cuando actúa un campo magnético externo reaccionan magnetizándose en dirección opuesta a éste. Esta magnetización es muy pequeña y desaparece cuando el campo externo es cero. Lo que diferencia a los materiales diamagnéticos es que sus átomos no tienen momento magnético. Debido a su comportamiento atómico su susceptibilidad magnética es negativa.
- *Paramagnéticos.*- En un material a nivel atómico los electrones que orbitan al núcleo generan un campo magnético debido a que está girando alrededor del núcleo y sobre su eje; este último movimiento se conoce como espín. En el caso de los materiales paramagnéticos estos campos magnéticos están orientados al azar, por ello el campo magnético total es cero.

Los campos magnéticos de los electrones también conocidos como dipolos, se alinean ante un campo externo en el material paramagnético, y en ese momento el material está magnetizado. Pero cuando el campo externo deja de actuar la magnetización inducida desaparece y todos los dipolos regresan a su estado original. Esto quiere decir que este tipo de materiales nunca guardan información magnética.

- *Ferromagnéticos.*- Al contrario de los materiales paramagnéticos, los ferromagnéticos guardan permanentemente la información magnética. Esto se debe a que sus dipolos sí están alineados y al aplicar un campo magnético los espines experimentan una torca que pone al vector de magnetización en la dirección del campo y su norma puede ser medida. Además como ya se mencionó, estos materiales guardan su magnetización debido al fenómeno de histéresis. Debido a este comportamiento la susceptibilidad magnética de estos materiales es positiva.

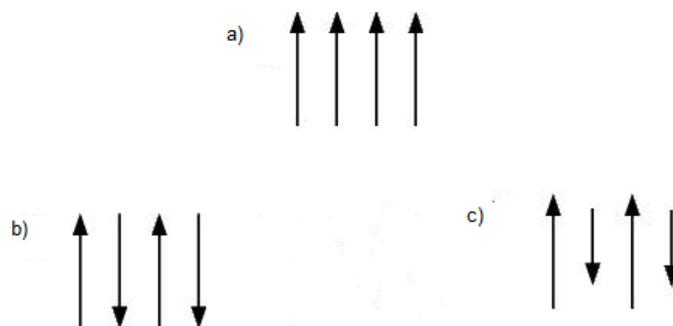


Figura 7. a) ferromagnetismo, b) antiferromagnetismo, c) ferrimagnetismo.

## Magnetización de rocas

El paleomagnetismo hace uso de los materiales ferromagnéticos, ya que es una ciencia que se encarga de estudiar las propiedades magnéticas de las rocas. Sabemos que el campo magnético

terrestre se puede simular como un dipolo magnético muy grande, es por ello que todo material magnético que se encuentre dentro de éste se orienta en dirección del campo.

En el caso de las rocas, la magnetización es la suma de dos magnetizaciones: la magnetización inducida que resulta de la exposición de la muestra a un campo magnético, y la magnetización remanente natural (MRN) que es aquella que guarda la roca desde el momento de su formación.

La MRN depende del campo geomagnético y de los procesos geológicos de formación de la roca, pero también la afectan las condiciones posteriores. Por ello esta magnetización tiene dos componentes: MRN primaria o característica y MRN secundaria. La primera es la más importante para los fines arqueológicos, ya que se da en el momento de la formación, mientras que la secundaria se adquiere por procesos posteriores. La MRN primaria se da de dos formas: 1) termorremanente y 2) detrítica, las cuales se mencionan a continuación.

#### 1) Magnetización termorremanente

La magnetización remanente térmica (MRT) se adquiere al enfriarse el material después de ser calentado por arriba de la temperatura de Curie. Las rocas volcánicas (ígneas) son un ejemplo representativo, ya que guardan la información de la orientación e intensidad del campo magnético justo en el momento en que se enfrían por debajo de la temperatura de Curie.

#### 2) Magnetización Detrítica (MRD)

Esta magnetización es propia de las rocas sedimentarias, que están formadas principalmente por lutitas y limolitas (de radio  $\sim 0.5\text{mm}$ ) que guardan la dirección del campo magnético en el momento de la compactación de la roca. En la figura 8 se muestra cómo van cayendo los detritos con una dirección de magnetización, pero por acción de la gravedad son colocados de tal manera que su vector de magnetización es horizontal; por lo tanto al ser medidas presentan inclinaciones pequeñas.

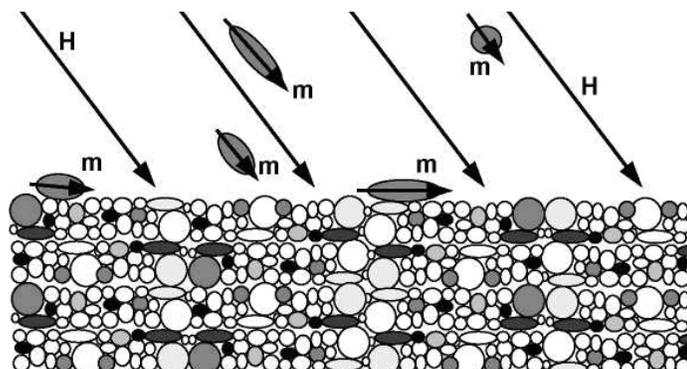


Figura 8. Magnetización detrítica.

## **CAPÍTULO 3: Tratamiento de muestras**

### **Recopilación de muestras**

Una **unidad de roca** está formada por una secuencia de estratos. Cada uno de estos estratos una vez expuestos (por una excavación) se denomina **sitio**. Las **muestras** son pedazos de roca que se extraen de un sitio, las cuales tienen orientaciones diferentes entre sí. Los **especímenes** son las piezas de las muestras preparadas a las dimensiones apropiadas para la medición de MRN (ver la sección siguiente), por lo general se identifican mediante letras pero esto depende directamente de la persona que recopila las muestras. Un **piso** es una parte de suelo que ya fue procesado por el hombre, y los **muros** son paredes más anchas que construidas actualmente.

Cuando se va al sitio donde se desea recopilar muestras es necesario llevar consigo una brújula para orientar las muestras, tapas de madera que se pegan sobre toda la muestra (testigos), algodón para cubrirlas y evitar que se fragmenten, y bolsas para depositarlas cuidando etiquetarlas correctamente. Lo primero que se hace es elegir el sitio; para ello se toma en cuenta que no haya humedad, que las paredes o suelos no hayan sido removidos, etc. En el caso de los sitios arqueológicos como Teopancazco, se busca recopilar muestras que presenten señales de haberse quemado (por lo general son de color rojizo), ya que presentan magnetizaciones más intensas y estables. Pero también se toman las no quemadas, ya que cuando su magnetización es intensa es posible obtener la fecha de elaboración del piso o muro.

La muestra debe ser limpiada antes de pegar los testigos; posteriormente se procede a orientarla. Sosteniendo la brújula paralelamente sobre el testigo, se traza una línea cuando la brújula queda horizontal, esto se hace checando que el ojo de buey (burbuja del nivel) de la brújula este centrado. También se marca una punta de flecha que coincide con la punta de la pínula (flecha imantada que apunta hacia el Norte) de la brújula. En esta posición se toma la lectura de la declinación (azimut), luego se coloca la brújula perpendicularmente a la flecha horizontal y se mueve el clinómetro (pequeña regla, tipo vernier) hasta que quede centrado, en ese momento se procede a tomar el valor de inclinación.

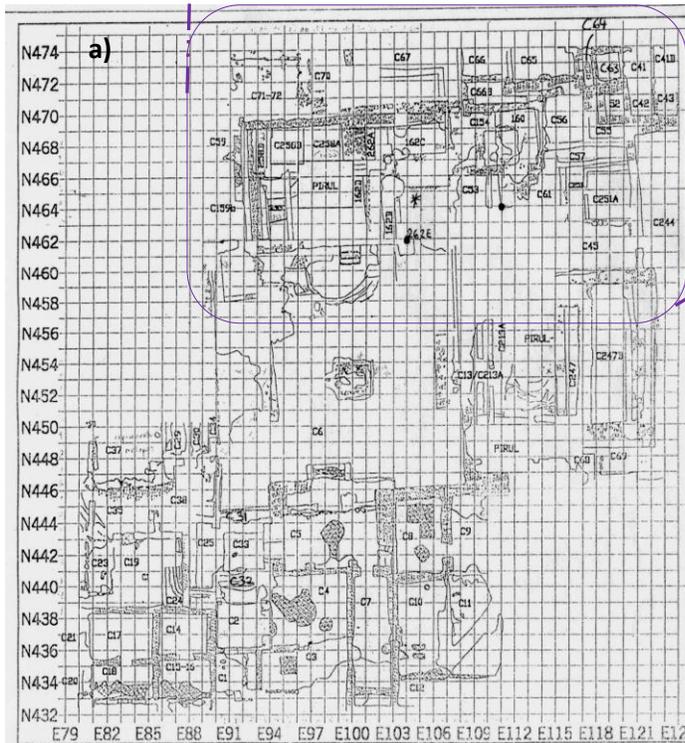
En Teopancazco se recopilaron muestras de pisos y/o muros, pero en este trabajo solo se reportan muestras obtenidas de pisos. Las muestras Tp30, Tp31, Tp32, Tp33 y Tp34 fueron tomadas por la Dra. Soler el 9 de Diciembre de 2005. Las muestras Tp74, Tp75 y Tp77 fueron entregadas por la Dra. Linda Manzanilla, estas muestras eran fragmentos de piso orientados, obtenidos durante la excavación de diversas áreas de actividad (figura 9). Durante mi servicio social aprendí a orientar y tomar las muestras en junio de 2006 durante la recopilación de los pisos de Chapultepec de la tesis de Verónica López.

Cuarto 167

Cuarto 162C

Cuarto 181

Cuarto 262E



c)

	Coordenadas	Lugar
Tp30	N464 ; E111	Piso 4, quemado
Tp31	N464 ; E112	Piso 4, quemado
Tp32	N463 ; E114	Piso 4, no quemado
Tp33 y 34	N464 ; E114	Piso 4, no quemado
Tp74	N470 ; E105	Piso 2, fogón de barro interior
Tp75	N467 ; E106	Piso 2, área del pórtico
Tp77	N462 ; E104	Piso 2

Figura 9. a) Mapa completo de Teopancazco (Manzanilla, informe técnico), con coordenadas geográficas, b) ampliación de la zona de toma de muestras, c) tabla de ubicación de las muestras.

En la figura 9 b), superficialmente no hay cuarto 167 esto es porque la estratigrafía de la excavación enumera los cuartos piso por piso de 100 en 100 en orden descendente. Eso quiere decir que el cuarto 167 se encuentra debajo del 67. En algunos pisos no se encontró un cuarto correspondiente y por ello en el mapa algunos cuartos comienzan en 100 ó 200. Cabe aclarar que este tipo de numeración en la estratigrafía depende mucho del arqueólogo, por lo que no existe una numeración estándar.

### **Trabajo de laboratorio**

Al recopilar muestras de pisos en un sitio, éstas no están listas para ser analizadas; antes tienen que pasar por un proceso de preparación para luego ser medidas en el magnetómetro<sup>2</sup>.

Sobre la superficie de los pisos a analizar se pega una serie de tapas de madera de 1 pulgada de diámetro y 5 milímetros de espesor; usando pegamento epóxico que no tiene componentes magnéticos que puedan influir en la magnetización de la muestra; en cada una ellas se indica con una flecha la orientación del campo magnético terrestre medida con la brújula. Estas tapas son retiradas cuidadosamente llevando consigo un pedazo de piso; cada una es marcada con un número dependiendo del piso que se tomó y llevadas en bolsas al laboratorio para su preparación y medición.

En el laboratorio, lo primero que se hace es quitar el exceso de material a manera de que nuestra muestra tenga una forma cilíndrica, para ello se usan cinceles y brochas o si el material es muy duro, un esmeril. Se debe cuidar que la altura del cilindro no sea mayor a la del porta-muestras (2.54 cm) del magnetómetro. Es importante rellenar los huecos con el pegamento epóxico para evitar los cabeceos en el interior del magnetómetro que le dañan, y hay que dejar secar muy bien. Con esto aseguramos una buena medición.

Como la mayoría de las rocas ferromagnéticas sufren varias magnetizaciones a lo largo del tiempo (magnetizaciones secundarias), es necesario desmagnetizarlas, ya que para el fechamiento de un sitio sólo nos interesa la magnetización primaria que es la más intensa.

En este caso se usó la desmagnetización por campos magnéticos alternos decrecientes (cmad); aquí las muestras de roca son sometidas a la acción de cmad, cuya intensidad se va aumentando progresivamente (usualmente de 20 a 1000 Oersted). En la figura 10 se observa cómo cambia la dirección del vector magnético de la muestra conforme aumenta el campo de desmagnetización. Después de este proceso solo sobrevive la magnetización más intensa que es la primaria.

---

<sup>2</sup> Instrumento utilizado para medir la intensidad y dirección del campo magnético que magnetizó la muestra.

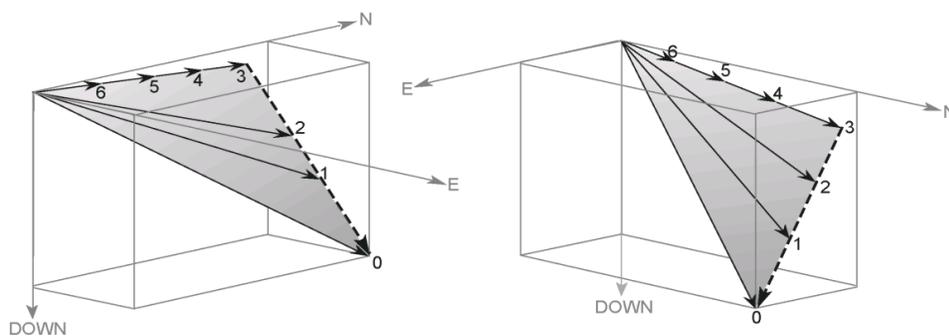


Figura 10. Desmagnetización por campos alternos.

La magnetización de cada muestra se mide en un magnetómetro de giro JR6. La muestra se tiene que medir en las cuatro direcciones perpendiculares que maneja el magnetómetro, tomando como referencia la flecha que tiene cada muestra. Cuando se miden las cuatro direcciones se obtiene el valor de la componente Norte, Este, horizontal y vertical del campo, y el programa del instrumento REMA6 nos da finalmente la declinación, la inclinación y la intensidad.

En este tratamiento hay errores debido a que las rocas no tienen una composición mineralógica homogénea; esto implica que no están magnetizadas uniformemente, aparte hay que agregar los errores asociados con la recolección de muestras y la medición en el laboratorio. Por ello es de suma importancia analizar un número de muestras considerable (se recomiendan entre 6 y 8 muestras) y emplear métodos estadísticos para estimar con mayor precisión los valores de declinación, inclinación e intensidad de las componentes del MRN; entre más muestras se analicen la fecha será más precisa. Además con ayuda de los diagramas vectoriales y las proyecciones estereográficas, se hace la comparación y el análisis de los resultados.

También se determinó la anisotropía de susceptibilidad magnética. Para medirla se utilizó un Kappabridge, el cual requiere poner la muestra en 15 posiciones distintas para una medición completa (figura 1 del apéndice).

De especímenes seleccionados por piso fue extraída una micromuestra (no mayor a 40 mg) para realizar los ciclos de histéresis y de magnetización remanente isoterma (IRM) en el Magnetómetro Micromag. Además a las muestras después de haber sido desmagnetizadas, también se les estudió su IRM, mediante un magnetizador de pulsos y un magnetómetro Molspin.

### **Método para el análisis estadístico de muestras**

Existen diferentes métodos para fechar muestras de roca. En este caso se calculó estadísticamente la inclinación y la declinación medias de cada muestra. Posteriormente la dirección media se

comparó con la curva de variación secular para Mesoamérica, obteniendo con ello las intersecciones asociadas con las fechas probables de ocupación del sitio.

Es importante resaltar que no en todas las muestras es posible encontrar la dirección media, ya que no se pudo determinar su dirección de magnetización primaria. En el siguiente apartado se menciona como usar el diagrama de Zijdeveld para encontrar las direcciones características.

Para analizar las direcciones medidas en el laboratorio se usó la estadística de Fisher con la cual se determinó la dirección media. Más adelante se describe brevemente.

### Diagrama de Zijdeveld

En el diagrama de Zijdeveld se gráfica la componente Este contra la componente Norte y Vertical del campo magnético, por eso se obtienen dos curvas. En la figura 11 se muestran las dos gráficas que conforman el diagrama de Zijdeveld. De la primera se obtiene la declinación del campo y de la segunda la inclinación, tal como lo indica la figura.

Debido a que la dirección de la magnetización característica es la que apunta hacia el origen, cuando la gráfica tiene varias direcciones es necesario aproximar una recta que tienda al origen (por mínimos cuadrados). Existen casos en los cuales es necesario quitar algunos puntos porque se salen completamente de la dirección primaria, esto significa que provienen de magnetizaciones secundarias, que en este estudio no son de utilidad.

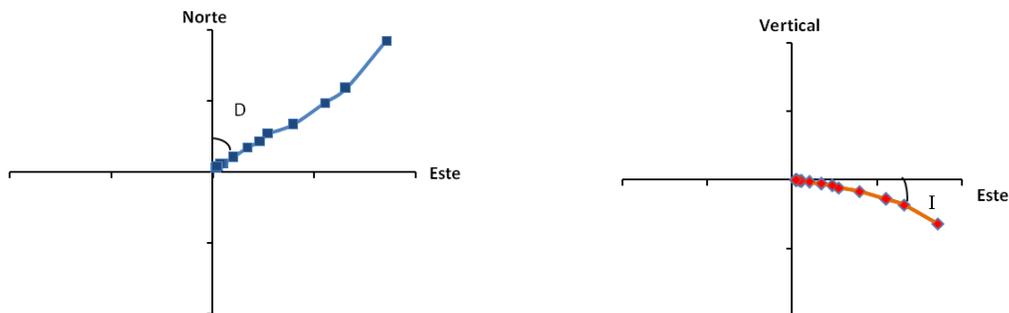


Figura 11. Gráficas de las componentes del campo magnético.

### Estadística de Fisher

Los métodos estadísticos generalmente usan una función de densidad de probabilidad como por ejemplo la distribución de Gauss. En este caso la función de densidad que se usó es la distribución de Fisher [8], la cual le asigna a cada dirección un peso y la ubica en un punto sobre una esfera unitaria. Está definida como la probabilidad por unidad de área angular de encontrar una “dirección” dentro de cierta área  $dA$ , que forma un ángulo  $\theta$  que corresponde al valor medio verdadero.

$$P_{dA}(\theta) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh(\kappa)} \exp(\kappa \cos \theta) \dots (11),$$

donde  $\kappa$  es el parámetro de precisión que mide la contribución a lo largo de la dirección del valor medio verdadero; vale 0 cuando las direcciones se distribuyen uniformemente sobre la esfera de radio unitario y es  $\infty$  cuando se concentran en un punto.

Para encontrar la distribución de Fisher es necesario calcular la inclinación y la declinación medias empleando los cosenos directores (l,m,n):

$$D_m = \tan^{-1}\left(\frac{m}{l}\right) \dots (12)$$

$$I_m = \sin^{-1}(n) \dots (13)$$

Luego se estima la dispersión de los datos ( $\kappa$ ), que nos va a dar la precisión de la distribución de Fisher, en este caso la mejor aproximación que se hace es el valor k:

$$k = \frac{N-1}{N-R} \dots (14)$$

donde N es el número de muestras y R es la norma de los cosenos directores. Finalmente para asegurar que la dirección media verdadera cae dentro de las bandas de error se calcula el límite de confiabilidad ( $\alpha_{95}$ ).

$$\cos \alpha_{(1-P)} = 1 - \frac{N-R}{R} \left\{ \left( \frac{1}{P} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right\} \dots (15),$$

siendo  $1 - P = 0.95$

Con esto se asegura en un 95% que la declinación ( $D_m$ ) e inclinación ( $I_m$ ) medias están dentro del área dA.

La estadística de Fisher se realizó usando el software SphereStat 2.0, el cual nos gráfica en la esfera unitaria las direcciones de la muestra, estimando la dirección principal o promedio junto con los parámetros k y  $\alpha_{95}$ .

## CAPÍTULO 4: Análisis de las muestras medidas

### Tratamiento estadístico

Las muestras TP30 y TP31 corresponden al Piso 4 del Cuarto 181 B-261. Los especímenes de la muestra TP30 presentaban dos componentes de la magnetización, y los de la TP31 sólo una. Ambas muestran una dirección tendiente al origen clasificada como característica que pudo ser obtenida mediante el ajuste de líneas.

Los espectros de coercitividad muestran que todas las muestras fueron desmagnetizadas notablemente entre 300 y 400 Oe (30 y 40 mT) por lo que los minerales portadores de la magnetización son titanomagnetitas pobres en Titanio.

Mediante la estadística Fisher se obtuvo la dirección media, que como puede observarse en la figura 10 c) presenta un  $\alpha_{95}$  menor de 10, lo que significa que el agrupamiento es aceptable.

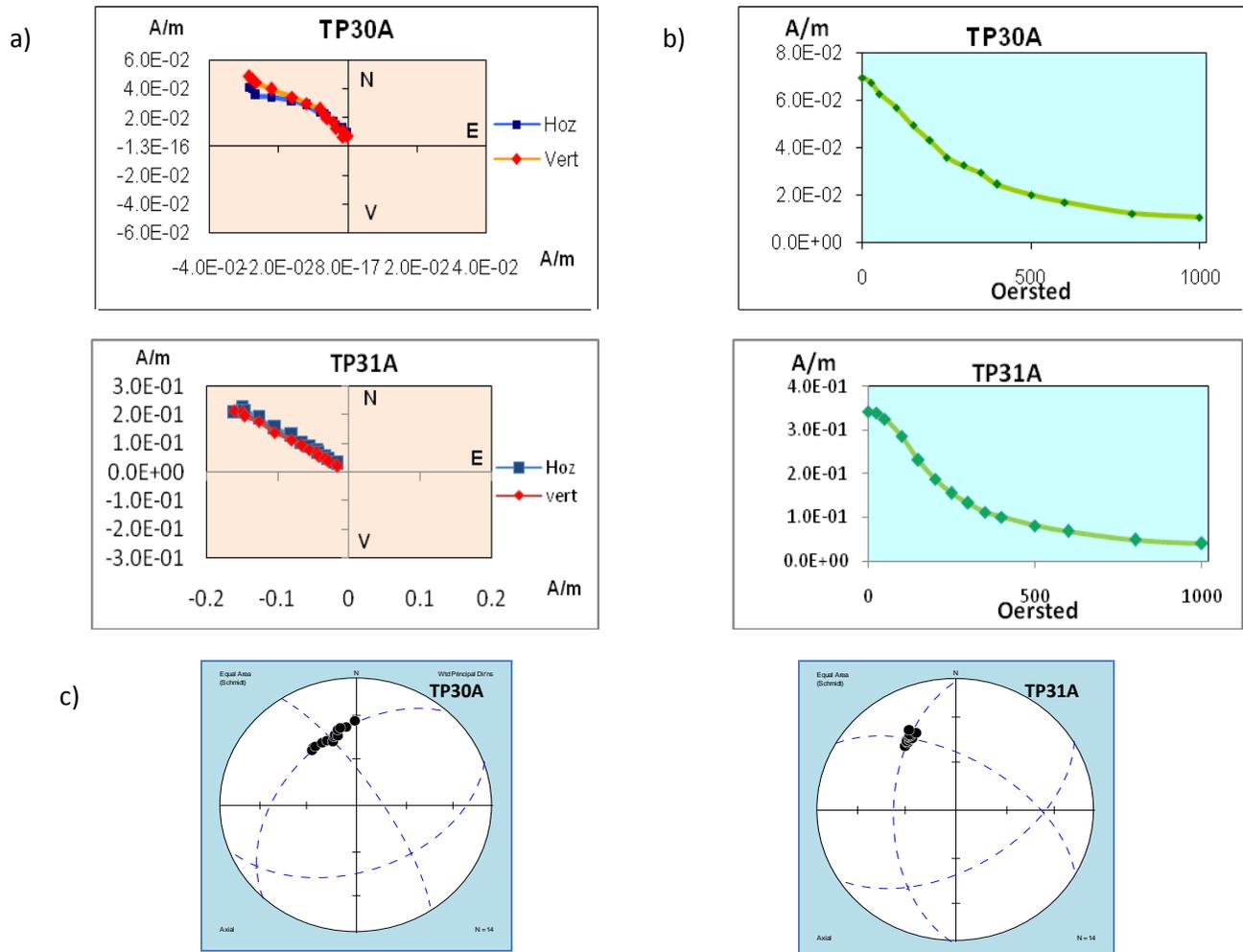


Figura 12. a) Diagrama de Zijderveld, b) Gráfica de desmagnetización, c) Diagrama de Fisher del Piso 4 Cuarto 181 B 261.

Los especímenes TP32, TP33 y TP34, al igual que las anteriores provienen del Piso 4 cuarto 181 B 261, pero no muestran evidencias de quemado. El espécimen TP32 muestra una magnetización unidireccional tendiente al origen que fue ajustada mediante línea. En el caso de TP33 se observa que muestra dos componentes por lo que se toma la última dirección en el proceso de desmagnetización (figura 3 del apéndice). En el caso del espécimen TP34 también presenta dos componentes y es ajustada mediante un plano. La presencia de más de una componente con coercitividad que compite con la característica es atribuible a que la magnetización que presentan estas muestras es la original de manufactura del suelo; y por tanto detrítica y de menor dureza magnética.

Al igual que en el caso anterior, los espectros de coercitividad muestran desmagnetización entre 300 y 400 Oe (30 y 40 mT), debida a titanomagnetitas pobres en Titanio.

La estadística de Fisher es empleada para obtener la dirección media, que presenta un agrupamiento cuya alfa es mayor a 10.

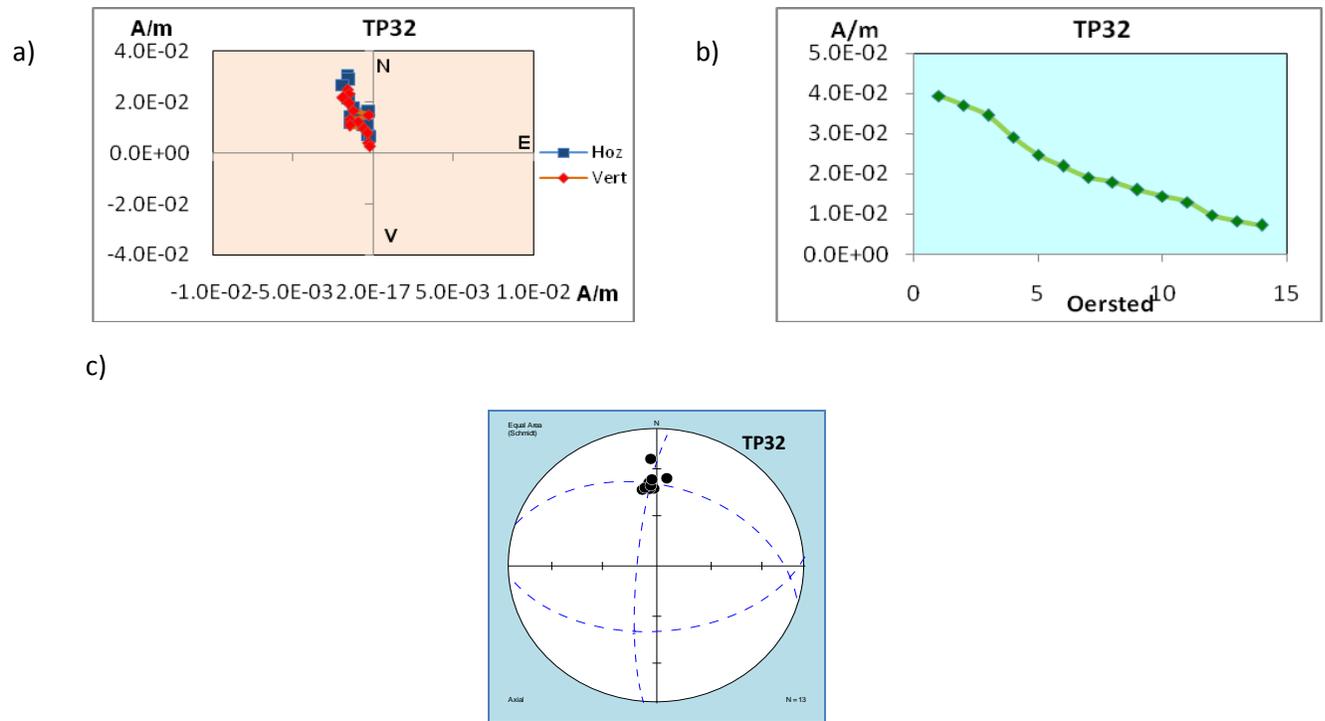


Figura 13. a) Diagrama de Zijderveld, b) Gráfica de desmagnetización, c) Diagrama de Fisher del Piso 4 Cuarto 181 B 261.

Las muestras TP54, TP55 y TP56 pertenecen al piso 4 Cuarto 367. Como puede observarse la magnetización remanente natural de estos especímenes es de más de una componente. Muestran inclinaciones anómalamente bajas y en el caso de TP55 y 56 negativas, por lo que no fue posible obtener una dirección media.

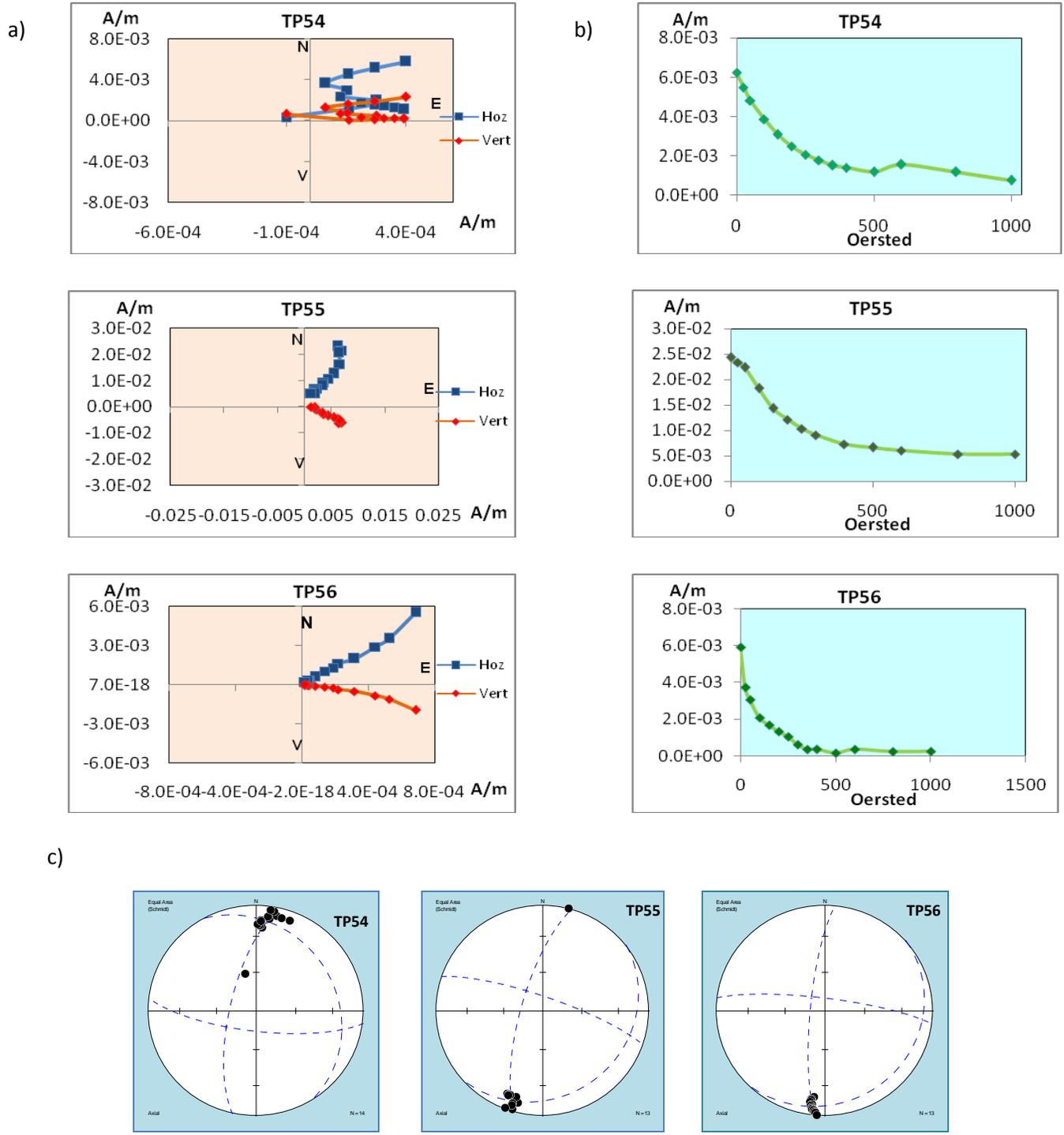


Figura 14. a) Diagrama de Zijderveld. b) Gráfica de desmagnetización. c) Diagrama de Fisher del Piso 4 Cuarto 367.

La muestra TP74 proviene del piso 2 Estructura 1 Cuarto 167. Se obtuvieron 8 especímenes que muestran básicamente dos comportamientos: una componente unidireccional tendiente al origen (TP74 A, E y F, figura 4 del apéndice) y dos componentes, trayectorias del proceso de desmagnetización sobre planos (figura 15), y que puede ser obtenida la característica y empleada

en el ajuste. El comportamiento de trayectorias sobre planos es atribuido a la naturaleza detrítica de la magnetización.

Los espectros de coercitividad muestran que todas las muestras fueron desmagnetizadas notablemente entre 300 y 400 Oe (30 y 40 mT), por lo que los minerales portadores de la magnetización son titanomagnetitas pobres en Titanio. En este caso la intersección de planos fue empleada para obtener la dirección media.

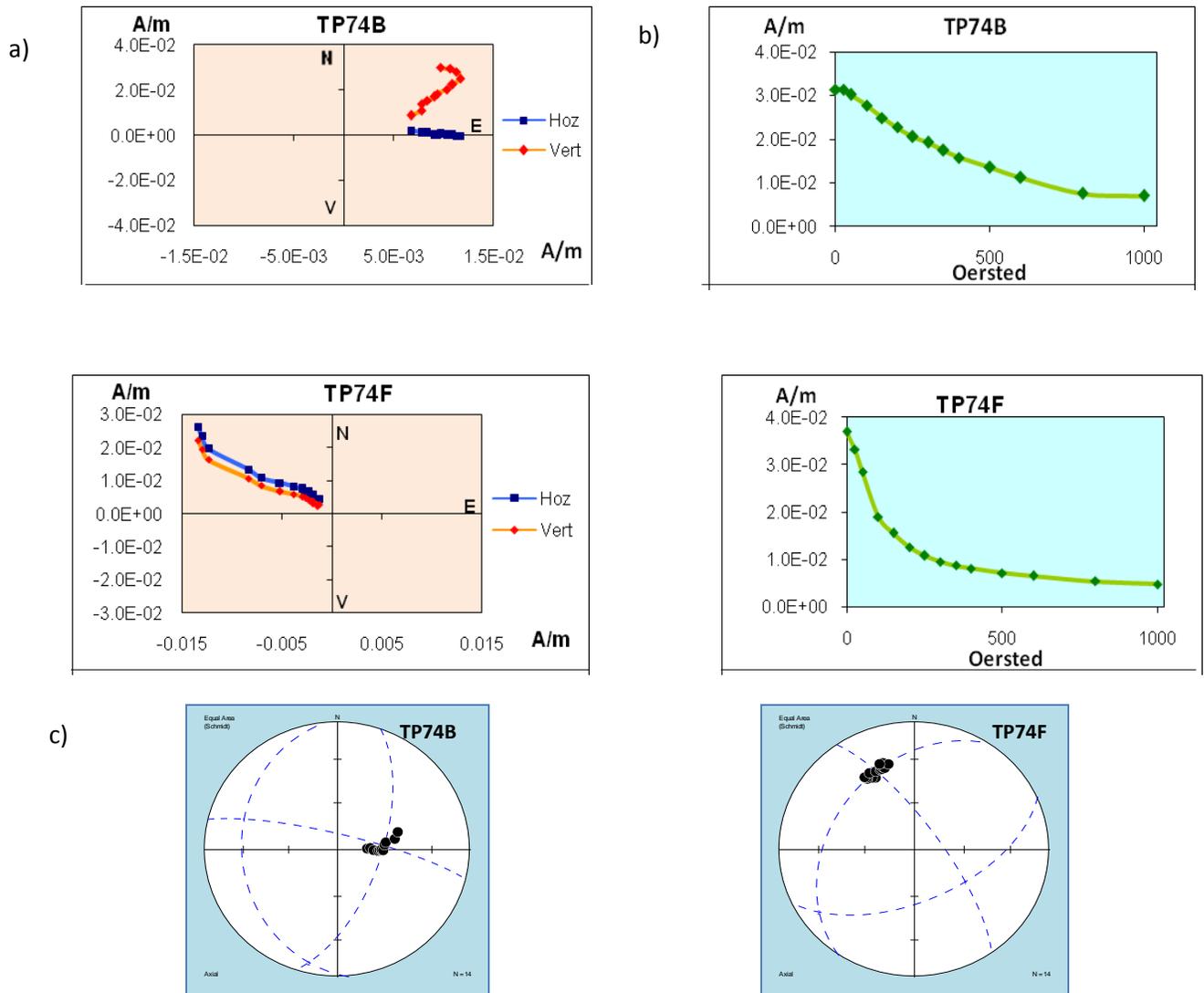


Figura 15. a) Diagrama de Zijderveld, b) Gráfica de desmagnetización, c) Diagrama de Fisher del Piso 2 Cuarto 167.

La muestra TP75 fue tomada del piso 2 Estructura 1 cuarto 162 área del Pórtico. Los especímenes muestran más de una componente en su magnetización (TP75C y K), y una bien definida y tendiente al origen para H y M (figura 16). El espécimen K fue retirado del ajuste de la dirección media puesto que la dirección de su magnetización característica dista mucho del promedio

obtenido con los otros especímenes. Los espectros de coercitividad también muestran titanomagnetitas pobres en titanio como minerales portadores.

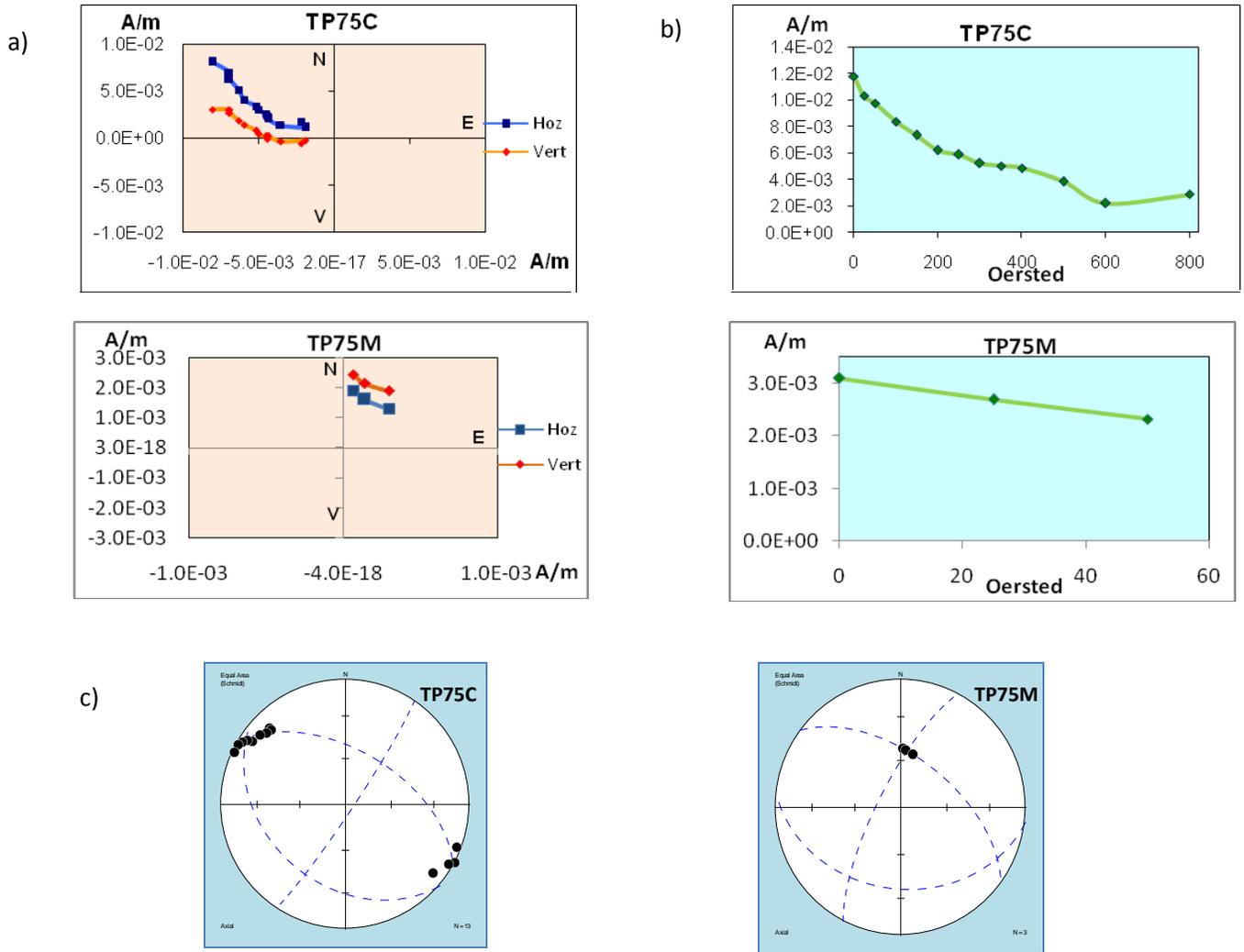


Figura 16. a) Diagrama de Zijderveld, b) Gráfica de desmagnetización, c) Diagrama de Fisher del Piso 2 Estructura 1 Cuarto 162 C.

La muestra 77 proviene del Piso 2 Estructura 1 Cuarto 262E. Todos los especímenes muestran una componente unidireccional estable tendiente al origen que fue ajustada mediante rectas en los diagramas de Zijderveld (figura 15). Al igual que en los otros pisos muestreados en Teopancazco los minerales portadores de la magnetización son titanomagnetitas pobres en Titanio. Este comportamiento unidireccional de gran estabilidad se reflejó en que la dirección media mediante Fisher mostró un buen agrupamiento con una  $\alpha_{95} = 4.758$ .

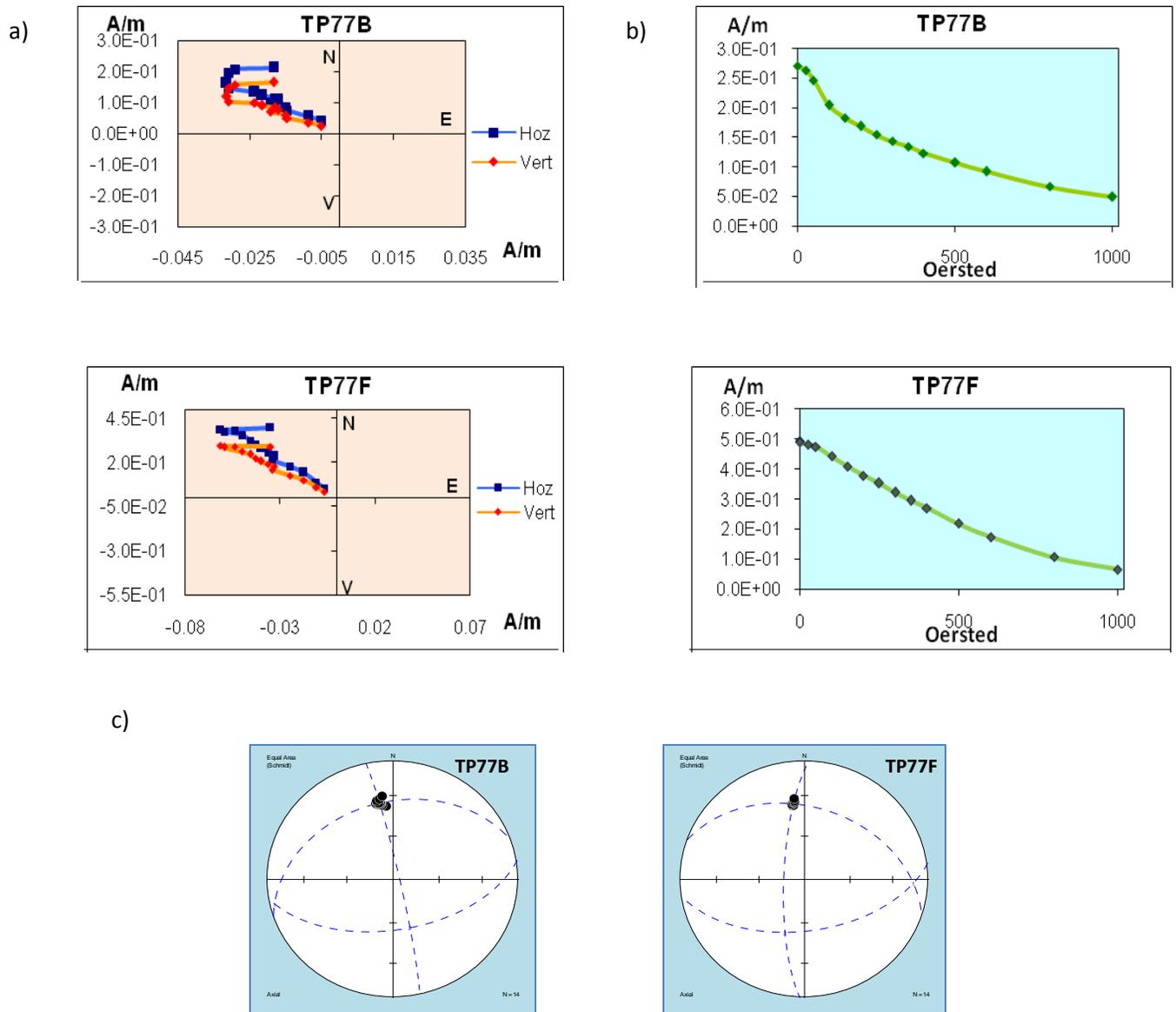


Figura 17. a) Diagrama de Zijderveld, b) Gráfica de desmagnetización, c) Diagrama de Fisher del Piso 2 Estructura 1 Cuarto 262 E.

## FECHAMIENTO ARQUEOMAGNÉTICO

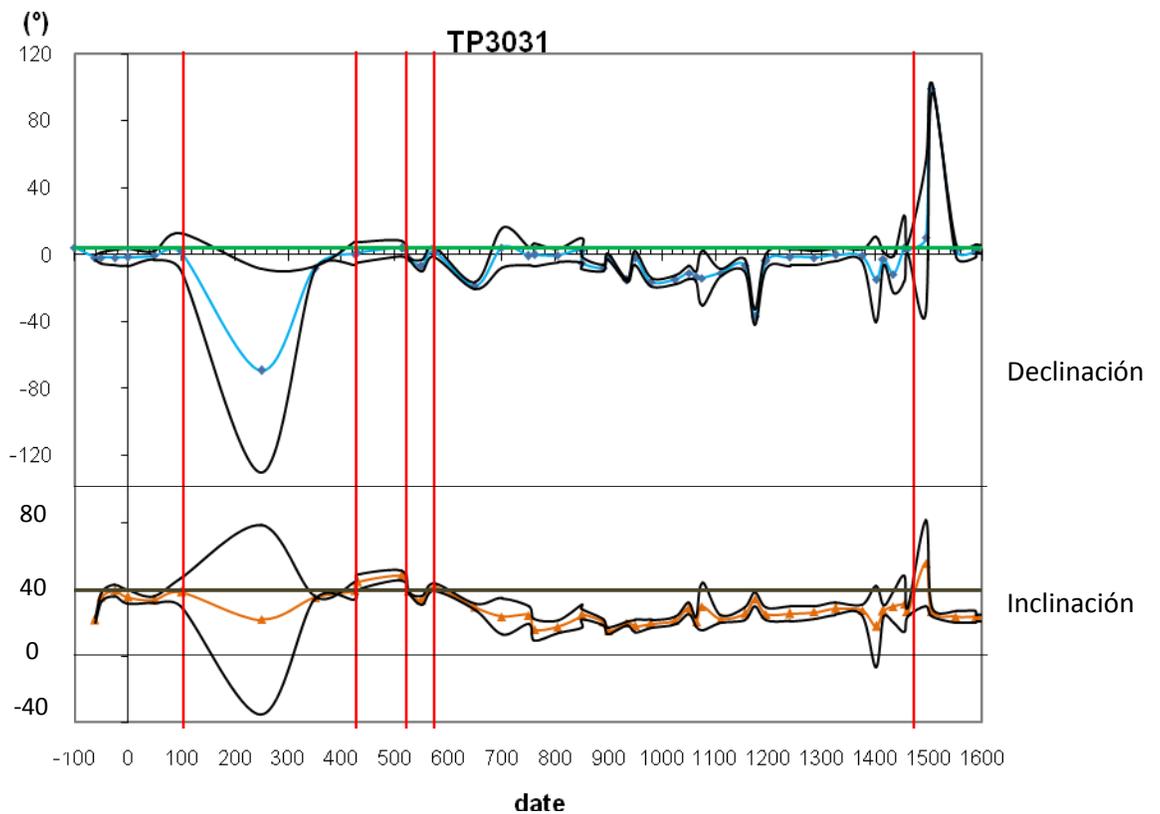
En las siguientes tablas se muestran las direcciones principales de cada uno de los especímenes y la dirección media de la muestra con sus parámetros estadísticos, en cada caso se aplicó la corrección de Demarest [5]. La dirección media obtenida se compara con la curva de variación secular para Mesoamérica [18] en declinación e inclinación (gráficas).

Especímenes	Declinación (°)	Inclinación (°)
Tp30A	340	43
Tp30B	10.9	36.2
Tp31A	356.9	37.0
TP31B	356.6	39.2
Media con ccd <sup>3</sup>	4.2	39.4
$\alpha_{95}=11.8*0.79=9.322$	$R=3.952$	$K=63.02$

Agrupamiento de las direcciones primarias	Intersección de la media con la curva de variación secular

Tabla 2. Análisis estadístico de la muestra Tp30 y Tp31.



Gráfica 1. Intersección de la dirección media con la curva de variación secular en declinación e inclinación.

<sup>3</sup> Sumando la corrección de la deriva al Oeste (ccd), cuyo valor es 7.5°.

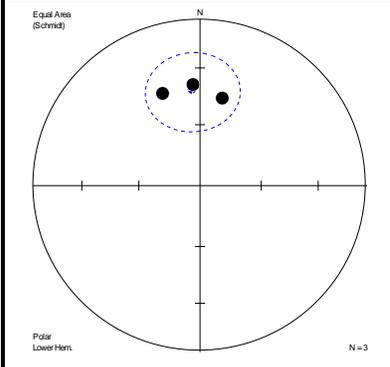
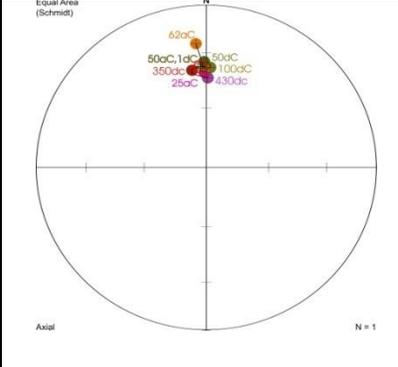
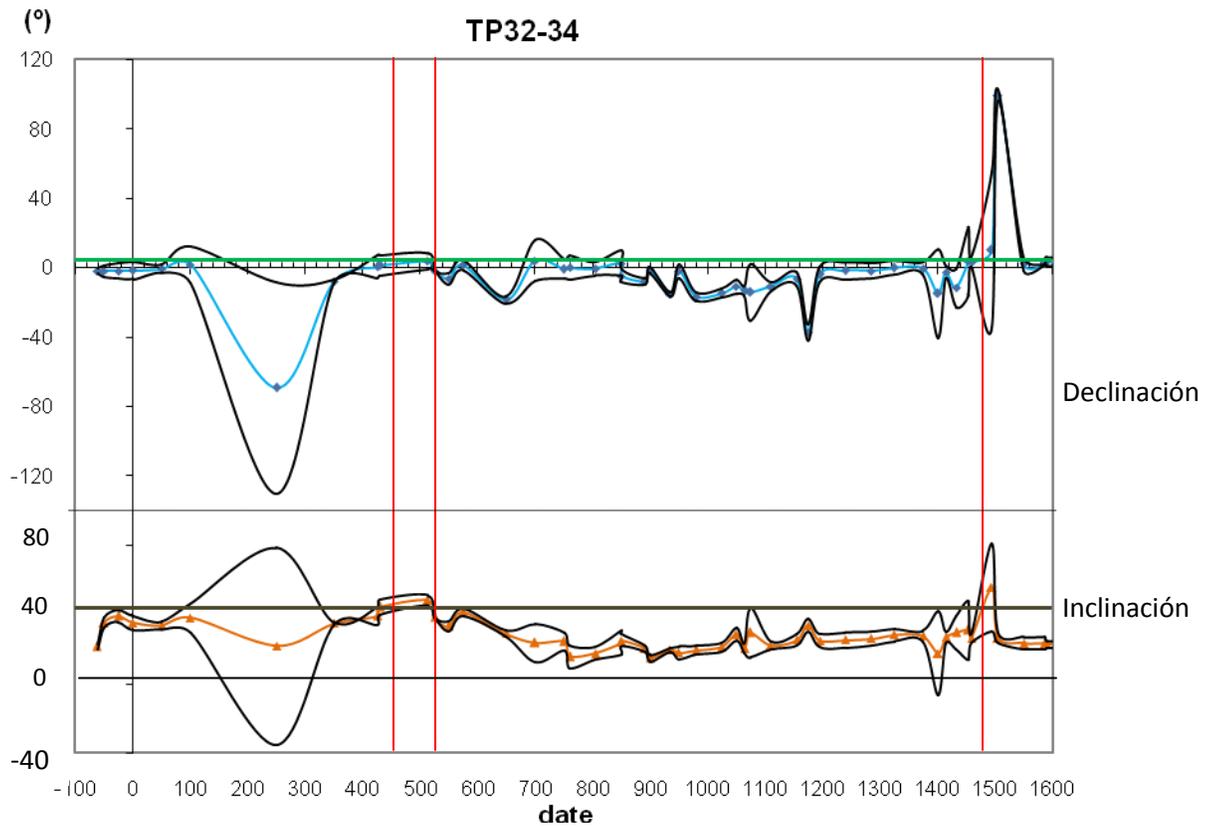
Especímenes	Declinación (°)	Inclinación (°)
Tp32	356.5	41.6
Tp33	14.2	44.9
Tp34	340	43.7
<b>Media con ccd</b>	4.3	44.3
$\alpha_{95}=19.7*0.75=14.775$	R=2.949	K=39.14
		
Agrupamiento de las direcciones primarias	Intersección de la media con la curva de variación secular	

Tabla 3. Analisis estadístico de Tp32, Tp33 y Tp34.



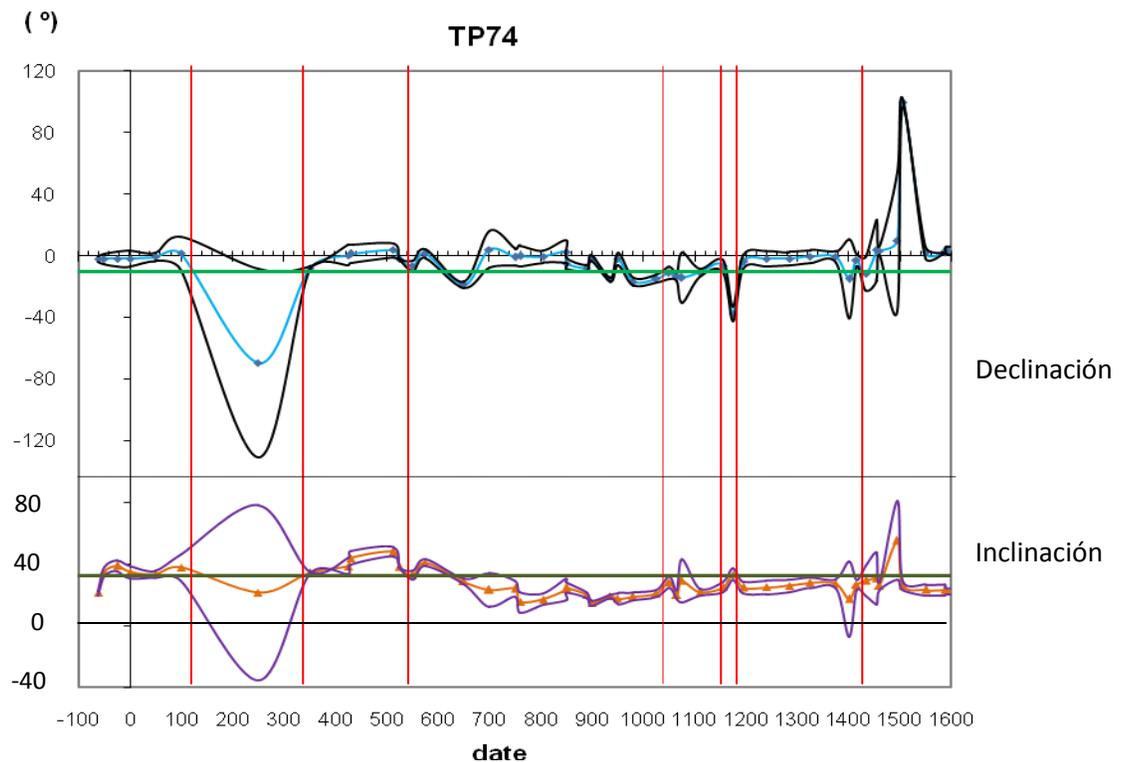
Gráfica 2. Intersección de la dirección media con la curva de variación secular en declinación e inclinación.

Especímenes	Declinación (°)	Inclinación (°)
Tp74A	354.3	21.5
Tp74B	345.7.2	5.6
Tp74C	318	27
Tp74D	318	1
Tp74E	10	41
Tp74F	335	33
Tp74G	325	54
Tp74H	41	55
<b>Media con ccd</b>	350.2	32.2
	R=7.075	K=7.570

Agrupamiento de direcciones primarias	Intersección de la media con la curva de variación secular

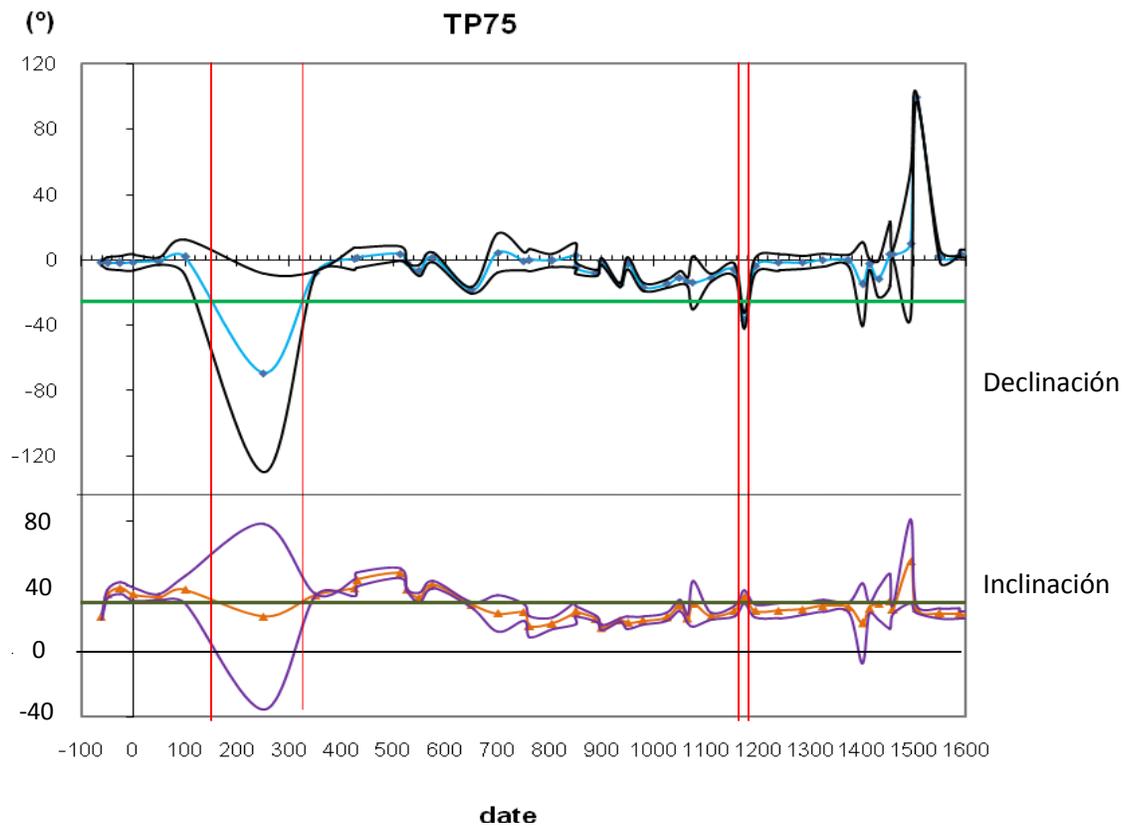
Tabla 4. Analisis estadístico para la muestra Tp74.



Gráfica 3. Intersección de la dirección media con la curva de variación secular en declinación e inclinación.

Especímenes	Declinación (°)	Inclinación (°)
Tp75C	304	5
Tp75H	329	26
Tp75K	250	72
Tp75M	7	53
<b>Media con ccd</b>	335.2	30.2
	R=2.634	K=5.458
Agrupamiento de direcciones primarias	Intersección de la media con la curva de variación secular	

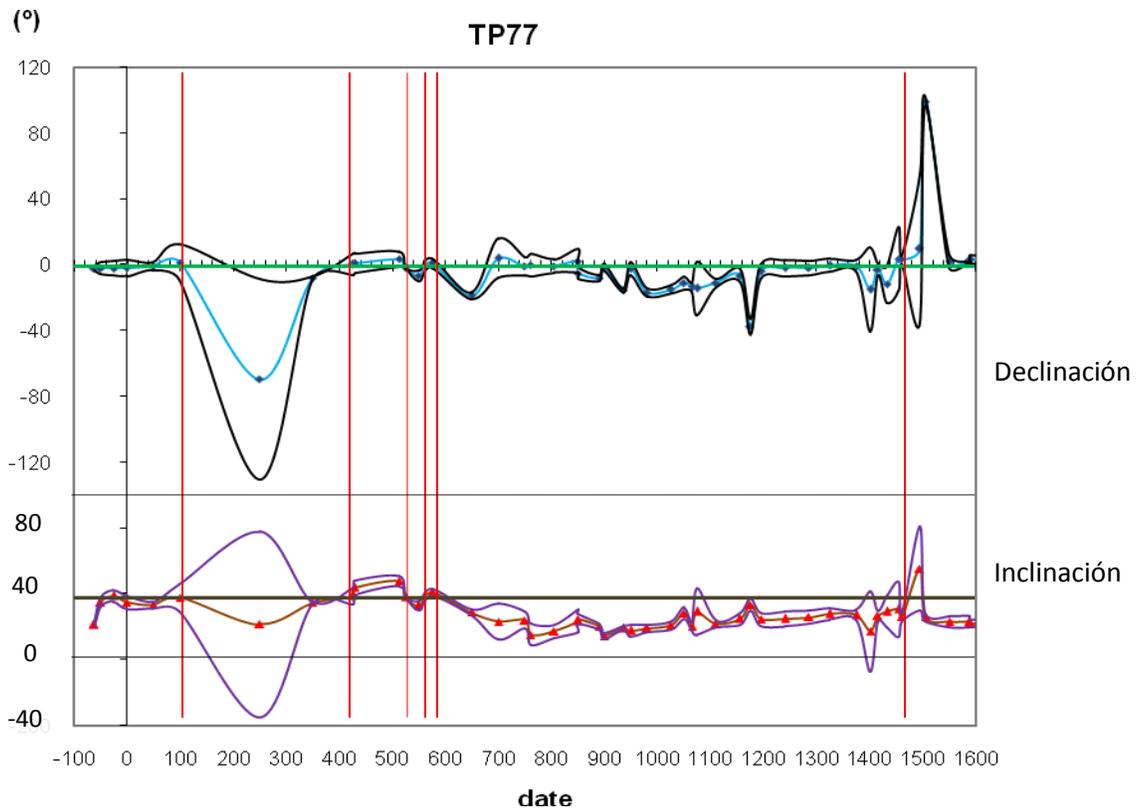
Tabla 5. Análisis estadístico de la muestra Tp75.



Gráfica 4. Intersección de la dirección media con la curva de variación secular en declinación e inclinación.

Especímenes	Declinación (°)	Inclinación (°)
Tp77A	347	45
Tp77B	351	35
Tp77C	356	33
Tp77D	0	35
Tp77F	352	36
Tp77G	5	27
Tp77I	339	42
Tp77K	6	42
Tp77L	22	19
<b>Media con ccd</b>	359.5	37.5
$\alpha_{95}=6.1*0.78=4.758$	R=5.958	K=119.8
Agrupamiento de direcciones primarias	Intersección de la media con la curva de variación secular	

Tabla 6. Análisis estadístico de la muestra Tp77.



Gráfica 5. Intersección de la dirección media con la curva de variación secular en declinación e inclinación.

En el análisis de la muestra TP77 se omitieron los especímenes G, K y L para calcular la dirección media. En las gráficas se obtuvieron varias intersecciones entre la dirección media y la curva de variación secular, las cuales corresponde a las fechas arqueomagnéticas de la siguiente tabla:

Muestra	Ubicación	Dec (°)	Inc (°)	$\alpha_{95}$	Fechas arqueomagnéticas probables	Fechas calculadas mediante $^{14}\text{C}$
Tp30 y Tp31	Piso 4 Cuarto 181 B 261	4.2	39.4	9.322	85 ± 20 d.C. <b>420 ± 20 d.C.</b> 495 ± 20 d.C.	316.5 ± 59.5 d.C.
Tp32, Tp33 y Tp34	Piso 4 Cuarto 181 B 261 sin evidencias de quemado	4.3	44.3	14.775	<b>375 ± 20 d.C.</b> 518 ± 20 d.C.	288 ± 49 d.C.
Tp54, Tp55 y Tp56	Piso 4 Cuarto 367	-----	-----	-----	No fue posible determinar la dirección promedio	
Tp74	Piso 2 Estructura 1 Cuarto 167	350.2	32.2	*	120 ± 20 d.C. <b>345 ± 20 d.C.</b> 520 ± 20 d.C.	298 ± 61 d.C.**
Tp75	Piso 2 Estructura 1 Cuarto 162 C	335.2	30.2	*	150 ± 20 d.C. <b>320 ± 20 d.C.</b>	298 ± 61 d.C.
Tp77	Piso 2 Estructura 1 Cuarto 262 E	359.5	37.5	4.758	80 ± 20 d.C. 105 ± 20 d.C. 425 ± 20 d.C.	245 ± 77 d.C.

\* direcciones obtenidas por intersección de planos

\*\* fecha obtenida de una muestra cercana

Tabla 7. Fechas de pisos.

Cabe señalar que las fechas arqueomagnéticas resaltadas son las más probables después de hacer la comparación con las fechas de radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ).

Tomando en cuenta la estratigrafía debemos entender que entre más superficial sea el piso más actual es. En la tabla 7 se observa que en el piso 4 las muestras quemadas son más actuales; esto es consistente, ya que los pisos quemados guardan su magnetización después de la quema, que en el contexto histórico está asociada con la terminación de una etapa, que en este caso corresponde a Tlamimilolpa (tabla 1). La muestra no quemada debe darnos la fecha de fabricación del piso (magnetización detrítica), la cual entra también dentro de la etapa Tlamimilolpa.

La muestra Tp74 fue obtenida de un fogón de barro, por lo tanto la fecha 345 ± 20 d.C. corresponde a la última vez que fue utilizado, esto es, hacia finales de la etapa Tlamimilolpa.

Tp75 se extrajo del área del pórtico, su fecha arqueomagnética 320 ± 20 d.C., entra dentro del rango de incertidumbre de la fecha de radiocarbono. Para la muestra Tp77 el fechamiento es inexacto, ya que comparando con la fecha de radiocarbono ninguna fecha cae dentro del rango. El error en las fechas se debe a que la curva de variación secular sólo tiene un punto entre 100 y 350 d.C., lo que implica que su comportamiento en ese rango no está bien determinado.

## Propiedades magnéticas

A todas las muestras les fue medida la susceptibilidad magnética en un Kappa Bridge Kly-3 de Princeton Instruments (tabla 1 del apéndice). También les fue medida la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM), los resultados se muestran en la figura siguiente.

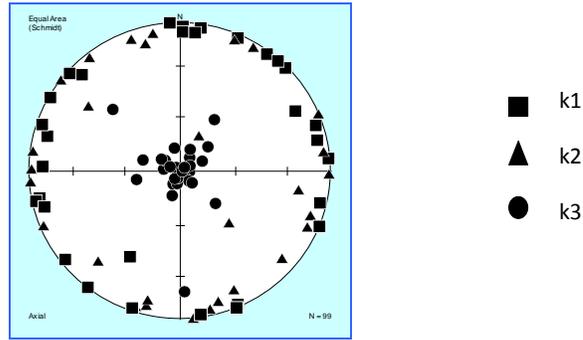


Figura 18. Diagrama de Fisher de las direcciones de anisotropía de susceptibilidad magnética.

Podemos observar que la mayoría de los k3 o ejes menores de susceptibilidad están agrupados alrededor del eje vertical y k1 y k2 sobre el plano horizontal. Esta forma de fábrica magnética es característica de las rocas sedimentarias, por lo que podemos inferir este tipo de fábrica para los pisos muestreados.

Se realizaron ciclos de histéresis y de magnetización remanente isoterma (figuras 10 a 16 del apéndice), para estimar el tipo de dominio magnético, sencillo DS, múltiple DM o pseudosencillo DPS [4]. Como puede observarse en la figura 19, la mayoría corresponde a dominios pseudo sencillos.

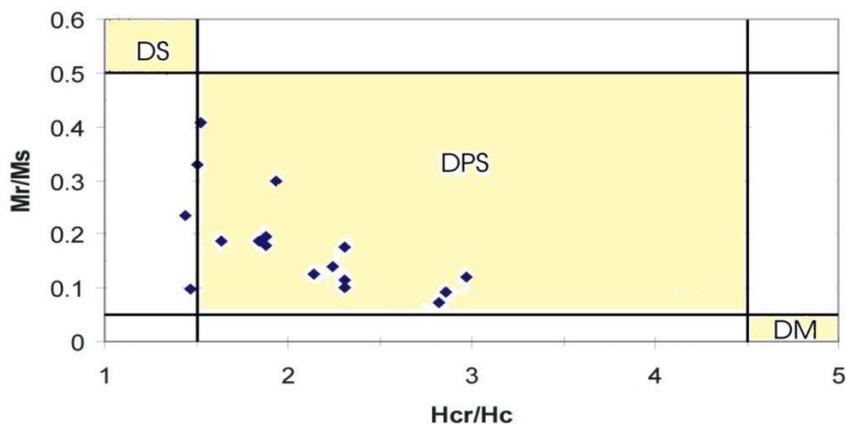


Figura 19. Diagrama de Day.

## Conclusiones

El fechamiento arqueomagnético depende de varios factores tales como la buena preservación del sitio de donde se van a recopilar las muestras, ya que para obtener una medida del campo magnético, los sitios no deben haber sido removidos debido a que esto altera la orientación. La elección de las muestras también influye, que no presenten señas de intemperismo y en el caso de quemadas que mostrasen claras evidencias de ello, lo que implica un mayor ordenamiento de los minerales magnéticos y por tanto un mejor registro de la magnetización.

Las muestras presentadas en este trabajo fueron previamente desmagnetizadas como muestran las gráficas de las figuras 12 a 17, con el fin de asegurar que la dirección de la magnetización que se analizó sea la primaria, con excepción los especímenes 54, 55, 56 del piso 4 Cuarto 367, en las cuales aún después de haberlas desmagnetizado no fue posible identificar la dirección de magnetización primaria (figura 14). Esto se asocia a que las muestras de este cuarto no estaban quemadas y que por tanto el ordenamiento de sus minerales magnéticos fuese pobre. En general con los métodos usados es más fácil fechar muestras quemadas, ya que presentan una magnetización con mayor estabilidad.

Las direcciones calculadas con la estadística de Fisher presentaron un  $\alpha_{95}$  menor a 10, salvo por la muestra Tp32, Tp33 y Tp34, por lo que los resultados de la tabla 7 tienen una alta confiabilidad. Los estudios de las propiedades magnéticas denotan en el diagrama de Day a las titanomagnetitas pobres en Titanio de grano fino como los minerales portadores de la magnetización. Además los estudios de ASM mostraron que los pisos presentaban una fábrica magnética similar a la de las rocas sedimentarias, concordante con la técnica de elaboración del piso.

Para el piso 4, las fechas arqueomagnéticas asociadas no entran dentro de la incertidumbre de la fecha encontrada por radiocarbono; sin embargo se observa que los especímenes Tp32, Tp33 y Tp34, cuya fecha más probable es  $375 \pm 20$  d.C. son más antiguas que las muestras quemadas Tp30 y Tp31. Esto concuerda con los acontecimientos históricos, ya que las muestras no quemadas corresponden a la fecha de elaboración del piso, mientras que las quemadas al período de terminación de la etapa Tlamimilolpa. El fechamiento arqueomagnético de las muestras Tp74 y Tp75 sí entra dentro de la incertidumbre de las fechas halladas con radiocarbono, y corresponden con la etapa Tlamimilolpan.

Las fechas de algunas muestras no pueden cotejarse con las de radiocarbono, pero esto no indica que la muestra no tenga una magnetización dominante porque en el caso de Tp77 su diagrama de Fisher tienen una dirección primaria única con un  $\alpha_{95}=4.758$ . La discrepancia en las fechas puede deberse a que la curva de variación secular para Mesoamérica sólo cuenta con un punto entre el año 100 y 350 d.C, con lo cual no se puede asegurar el comportamiento de la curva.

# APÉNDICE

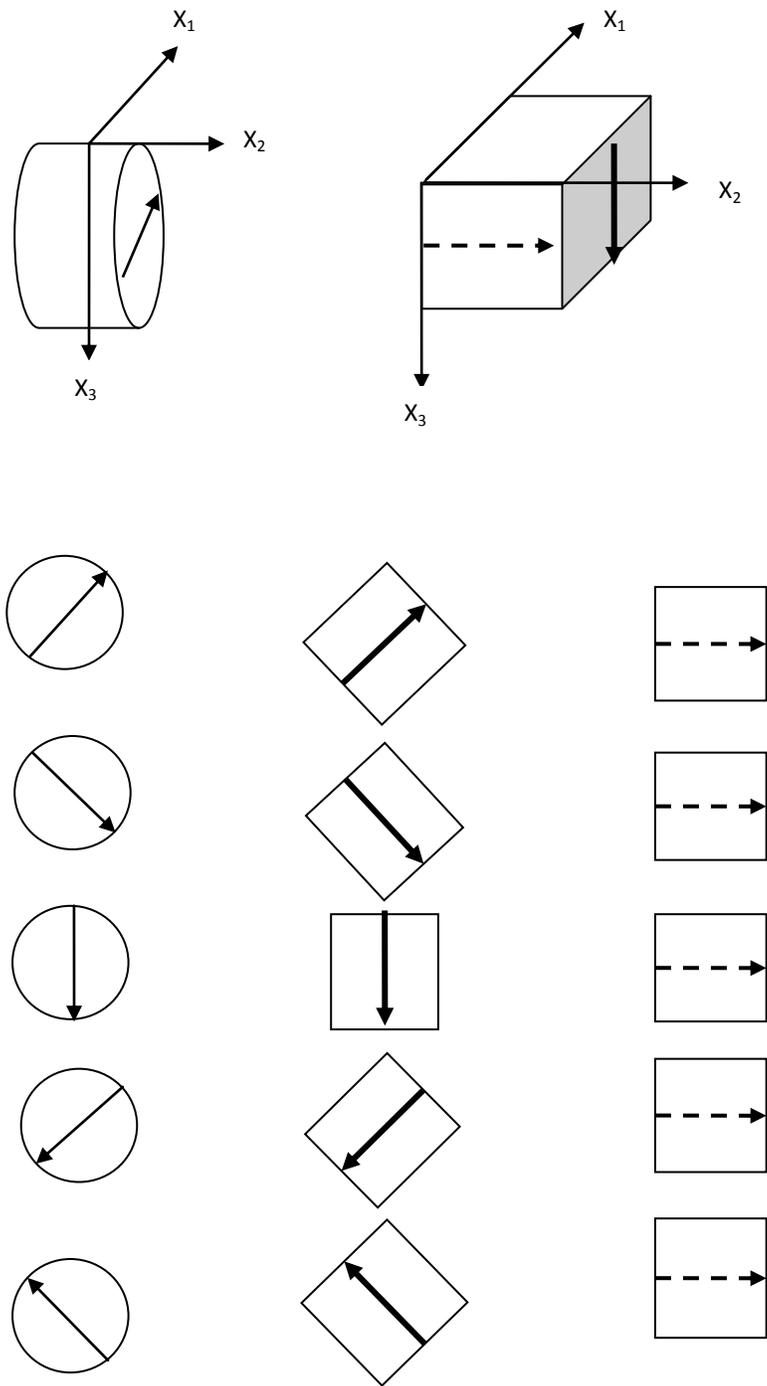


Figura 1. Posiciones de medición del instrumento Kappa Bridge

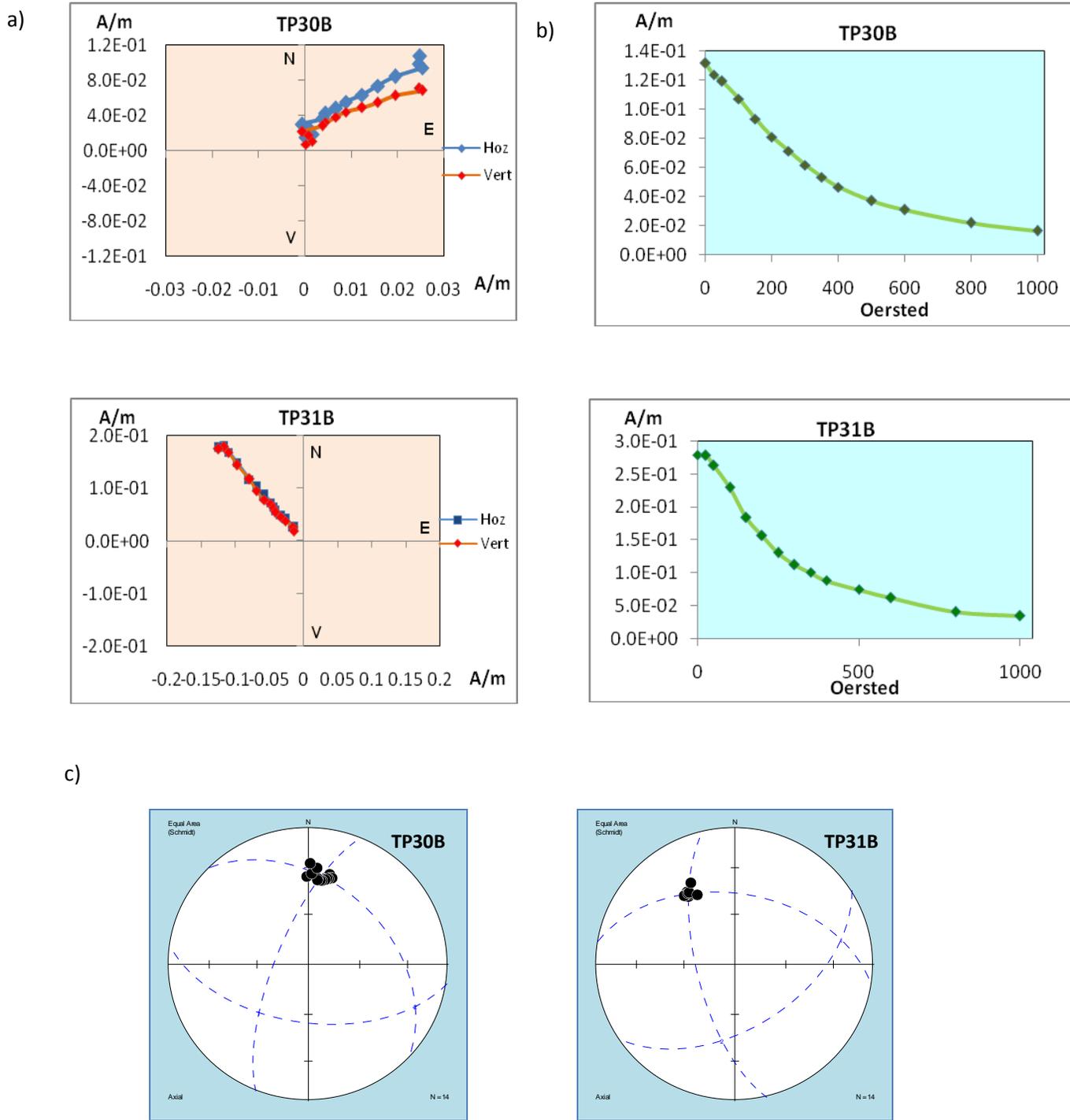


Figura 2.a) Diagrama de Zijderveld. b) Gráfica de desmagnetización. c) Diagrama de Fisher del piso 4 Cuarto 181B 261.

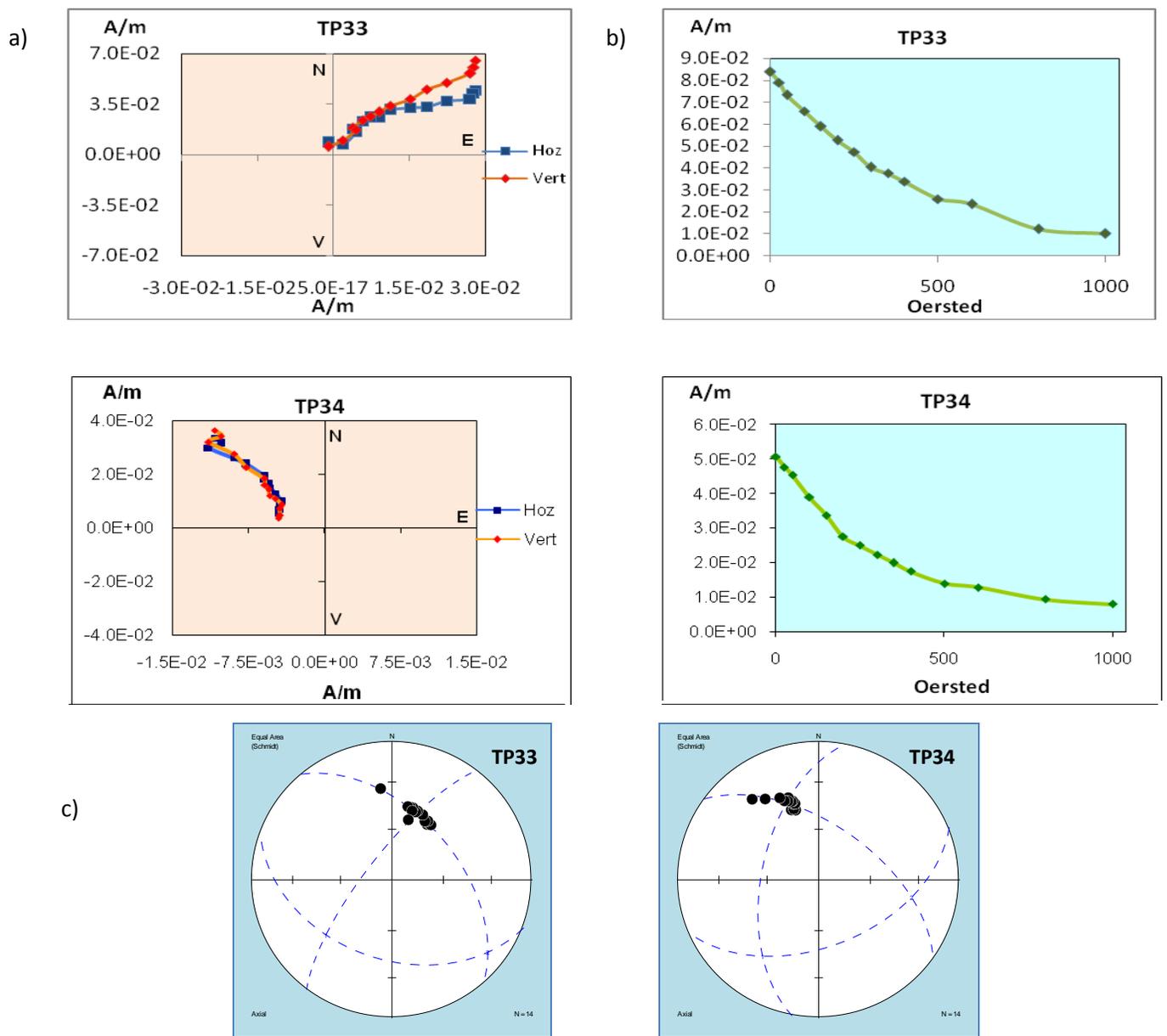


Figura 3. a) Diagrama de Zijderveld. b) Gráfica de desmagnetización. c) Diagrama de Fisher del piso 4 Cuarto 181B 261.

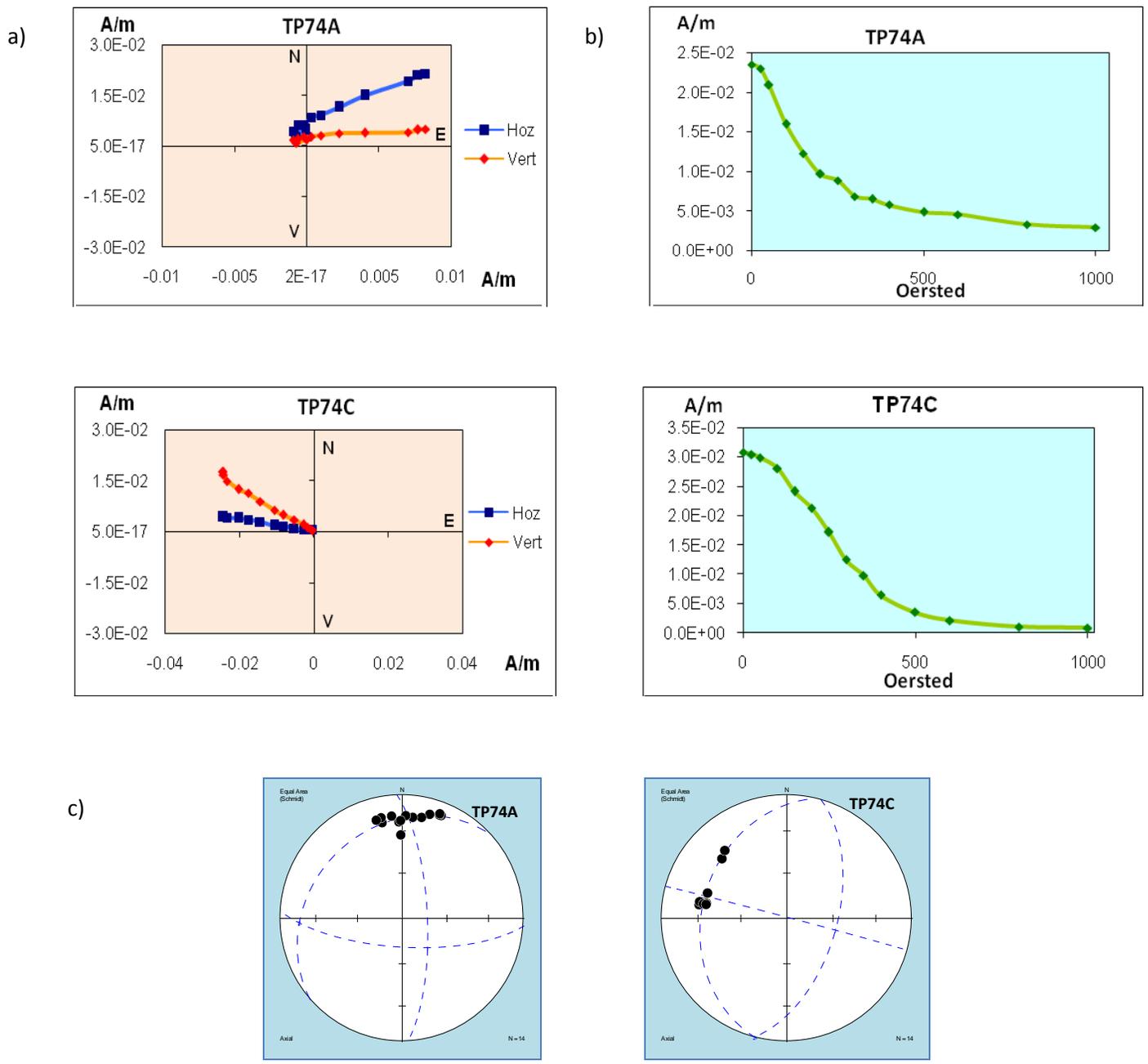


Figura 4. a) Diagrama de Zijderveld. b) Gráfica de desmagnetización. c) Diagrama de Fisher del Piso 2 Estructura 1 Cuarto 167.

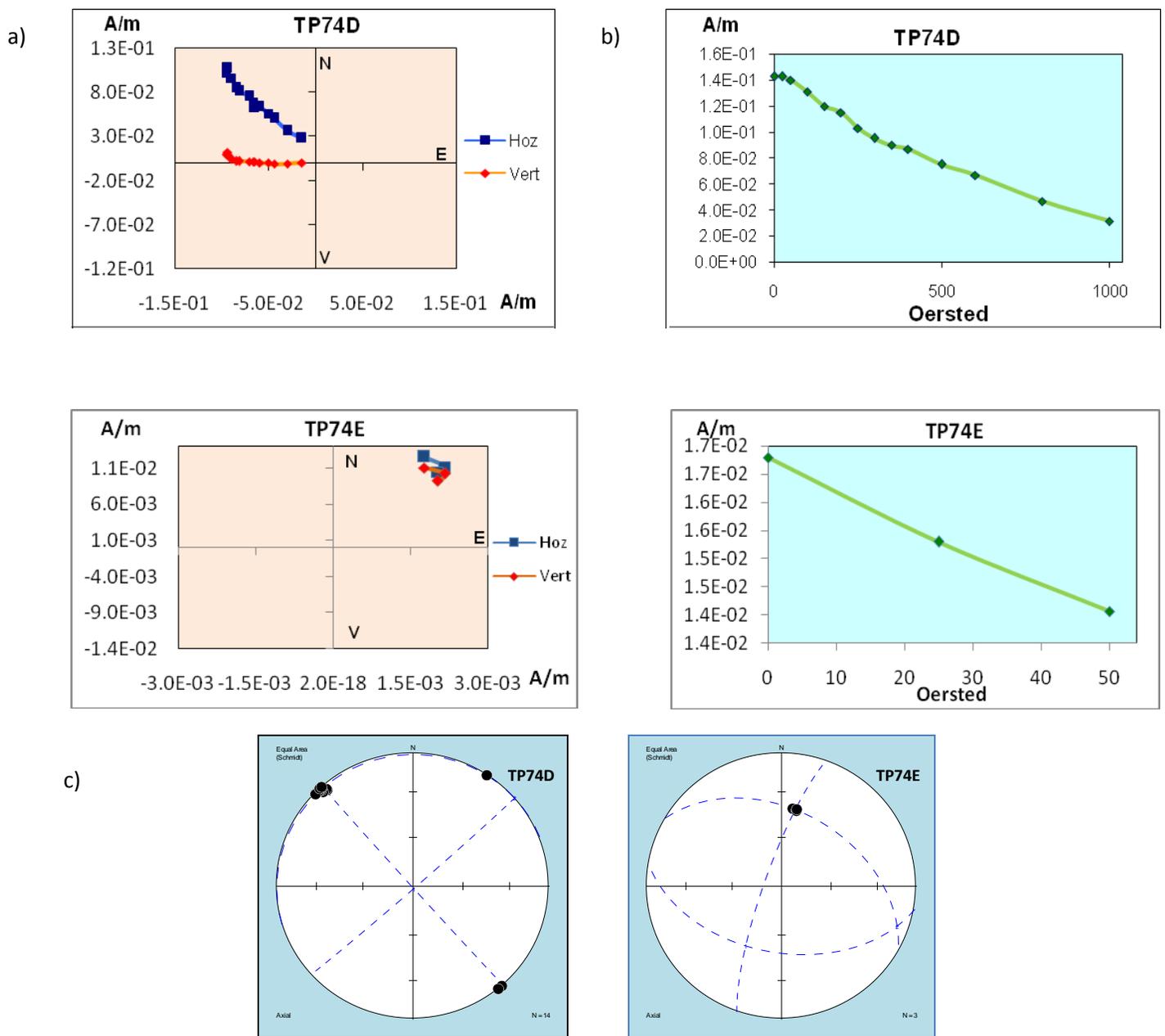


Figura 5. a) Diagrama de Zijderveld. b) Gráfica de desmagnetización. c) Diagrama de Fisher del Piso 2 Estructura 1 Cuarto 167.

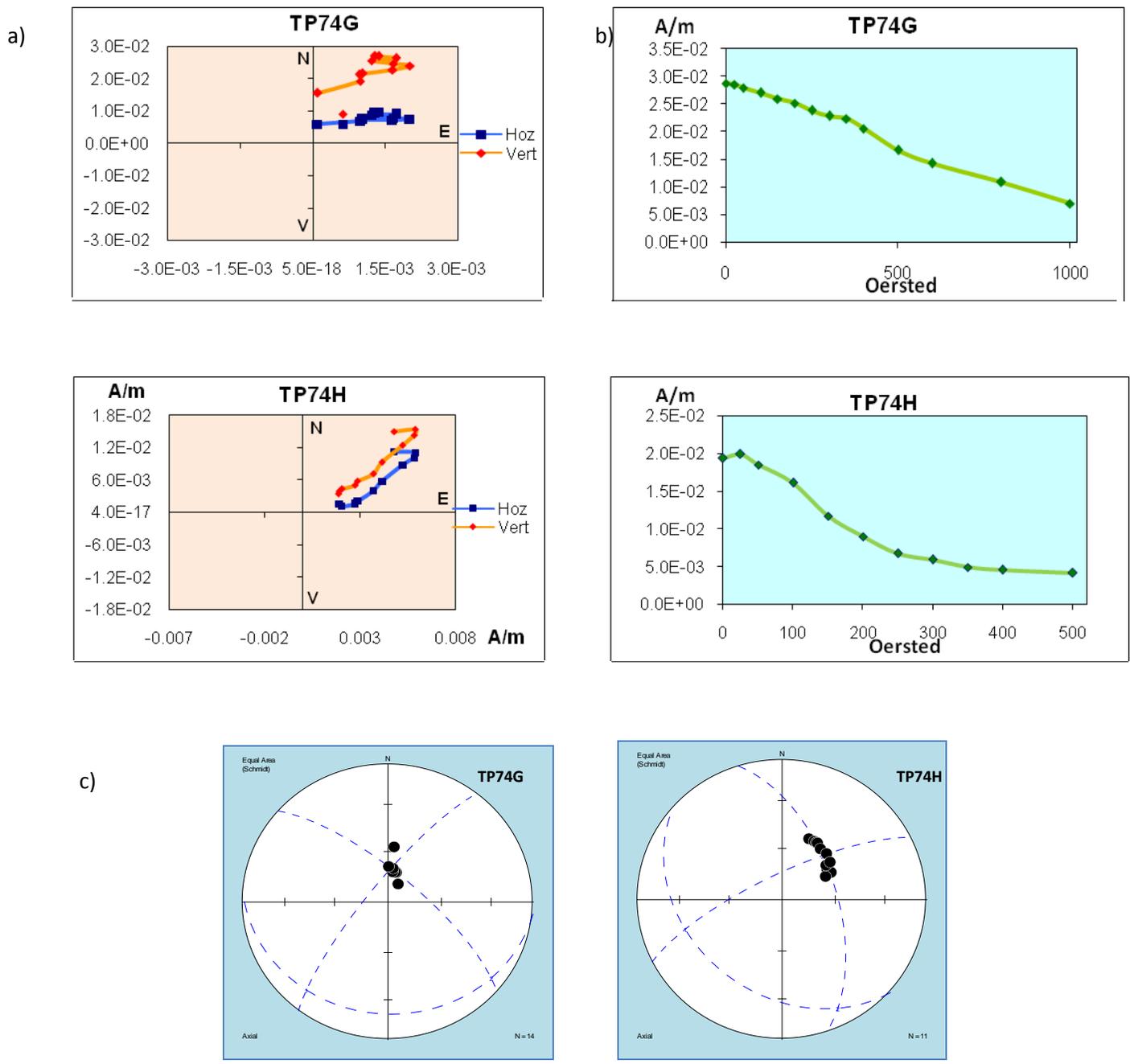


Figura 6. a) Diagrama de Zijderveld. b) Gráfica de desmagnetización. c) Diagrama de Fisher del Piso 2 Estructura 1 Cuarto 167.

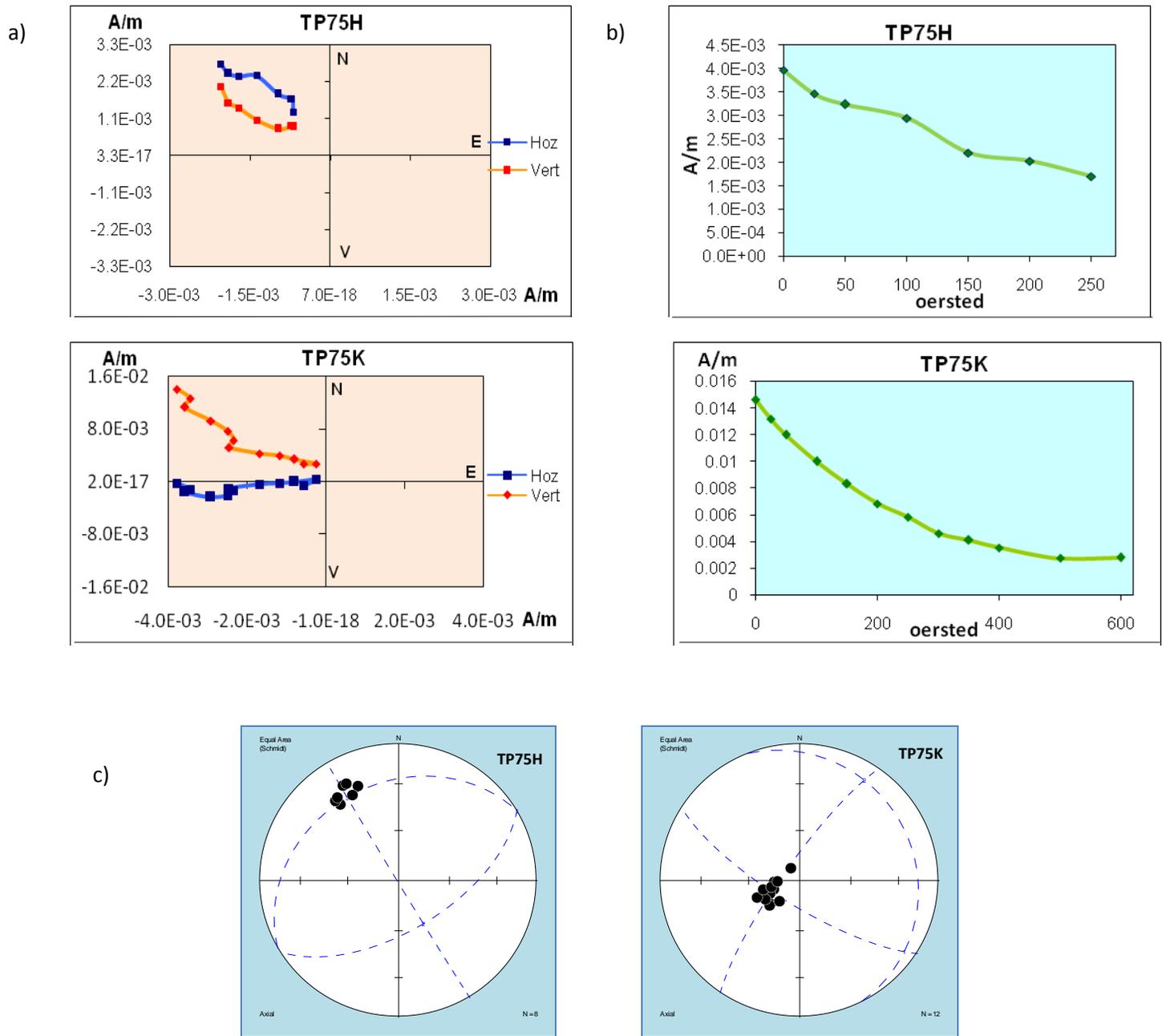


Figura 7. a) Diagrama de Zijderveld. b) Gráfica de desmagnetización. c) Diagrama de Fisher del Piso 2 Estructura 1 Cuarto 162 C.

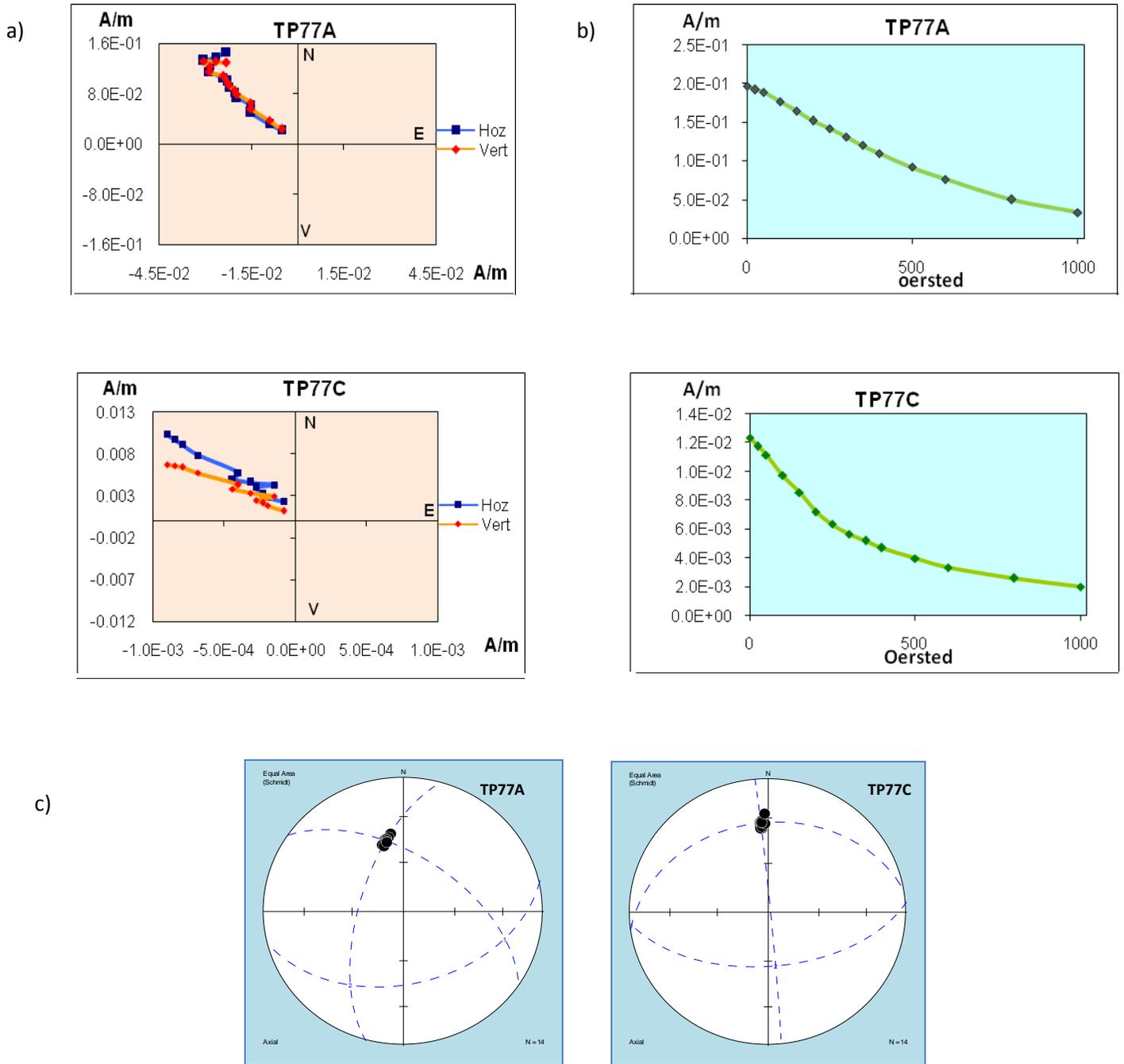


Figura 8. a) Diagrama de Zijderveld. b) Gráfica de desmagnetización. c) Diagrama de Fisher del Piso 2 Estructura 1 Cuarto 262 E.

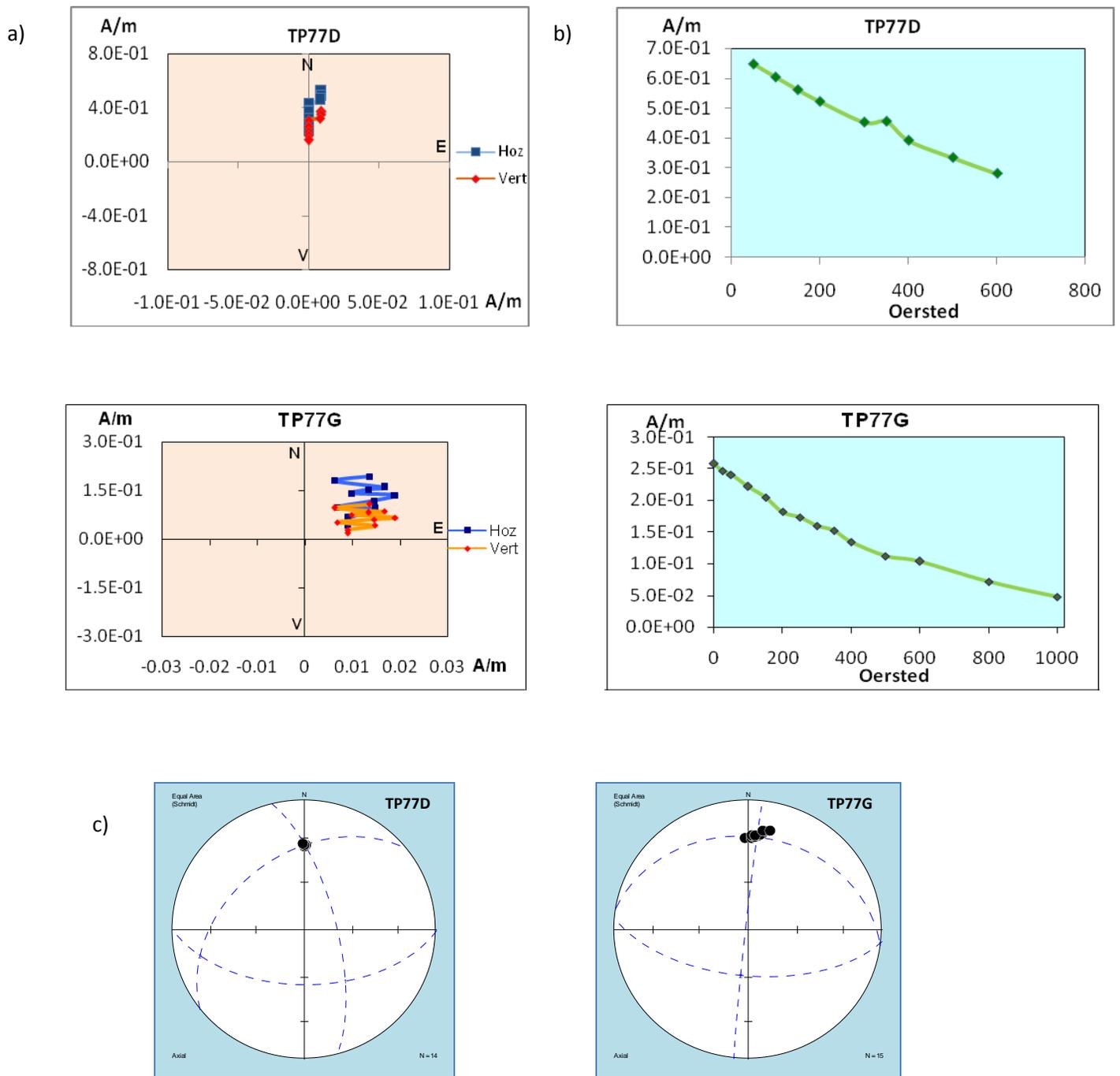


Figura 9. a) Diagrama de Zijderveld. b) Gráfica de desmagnetización. c) Diagrama de Fisher Piso 2 Estructura 1 Cuarto 262 E.

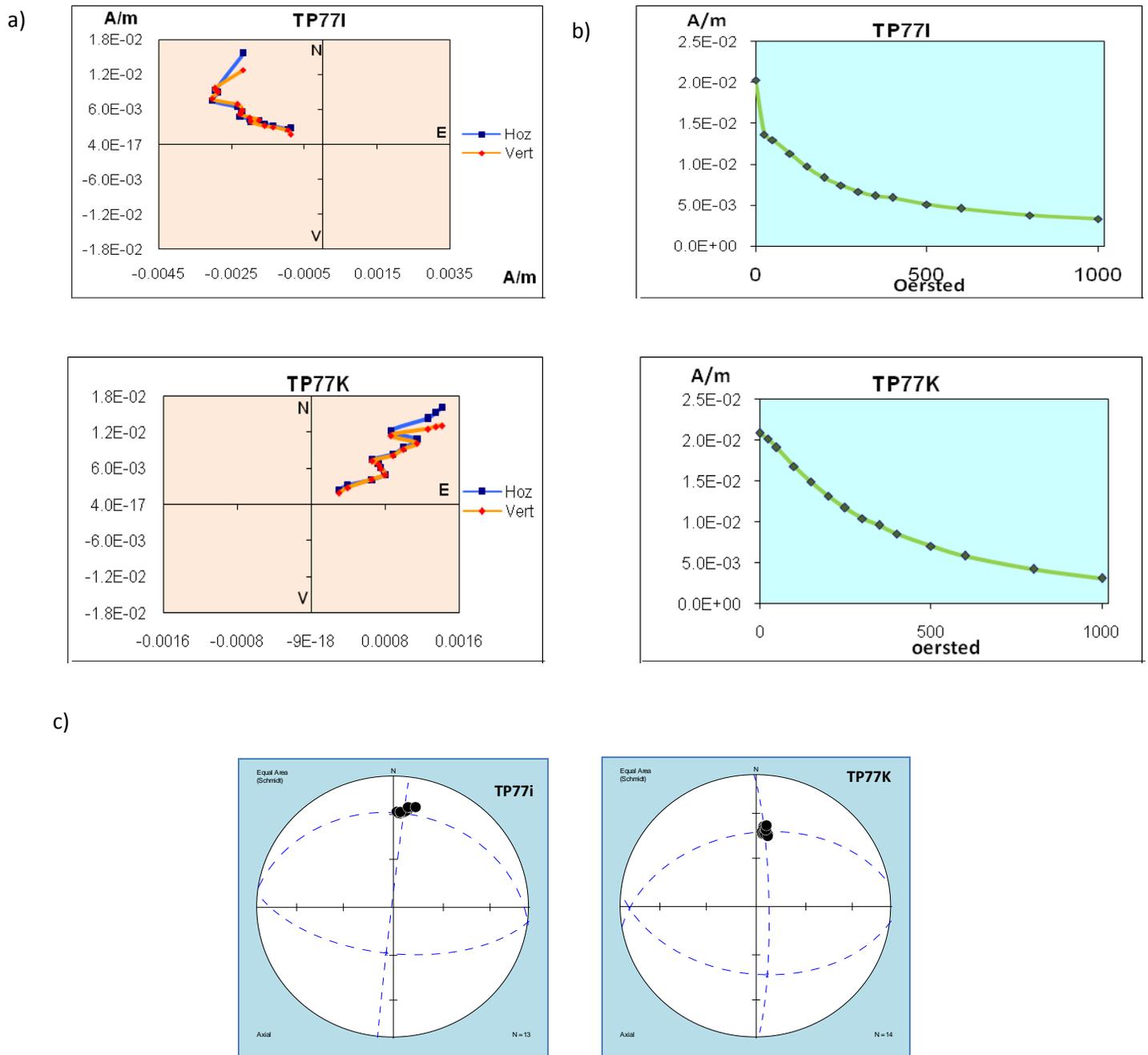


Figura 10. a) Diagrama de Zijderveld. b) Gráfica de desmagnetización. c) Diagrama de Fisher del Piso 2 Estructura 1 Cuarto 262 E.

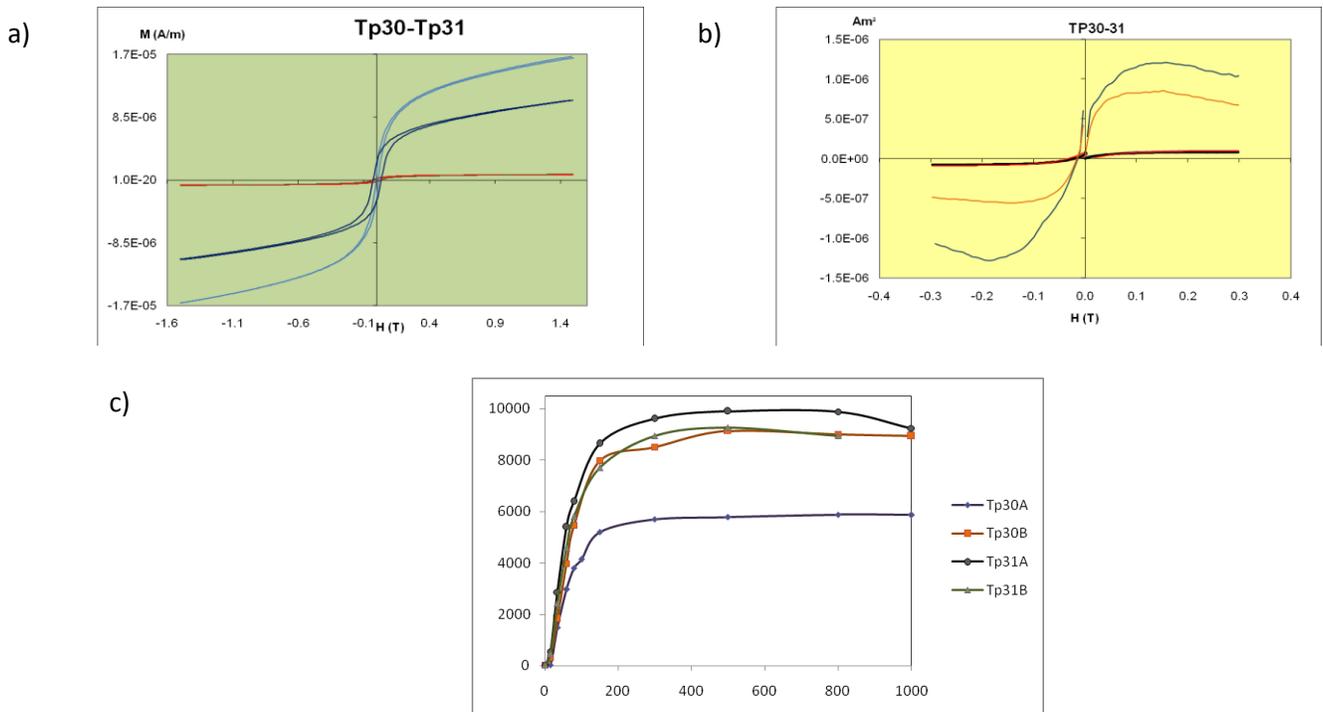


Figura 11. a) ciclo de histéresis, b) ciclo de la IRM, c) gráfica de IRM inducida mediante el magnetizador de pulsos de las muestras Tp30 y Tp31.

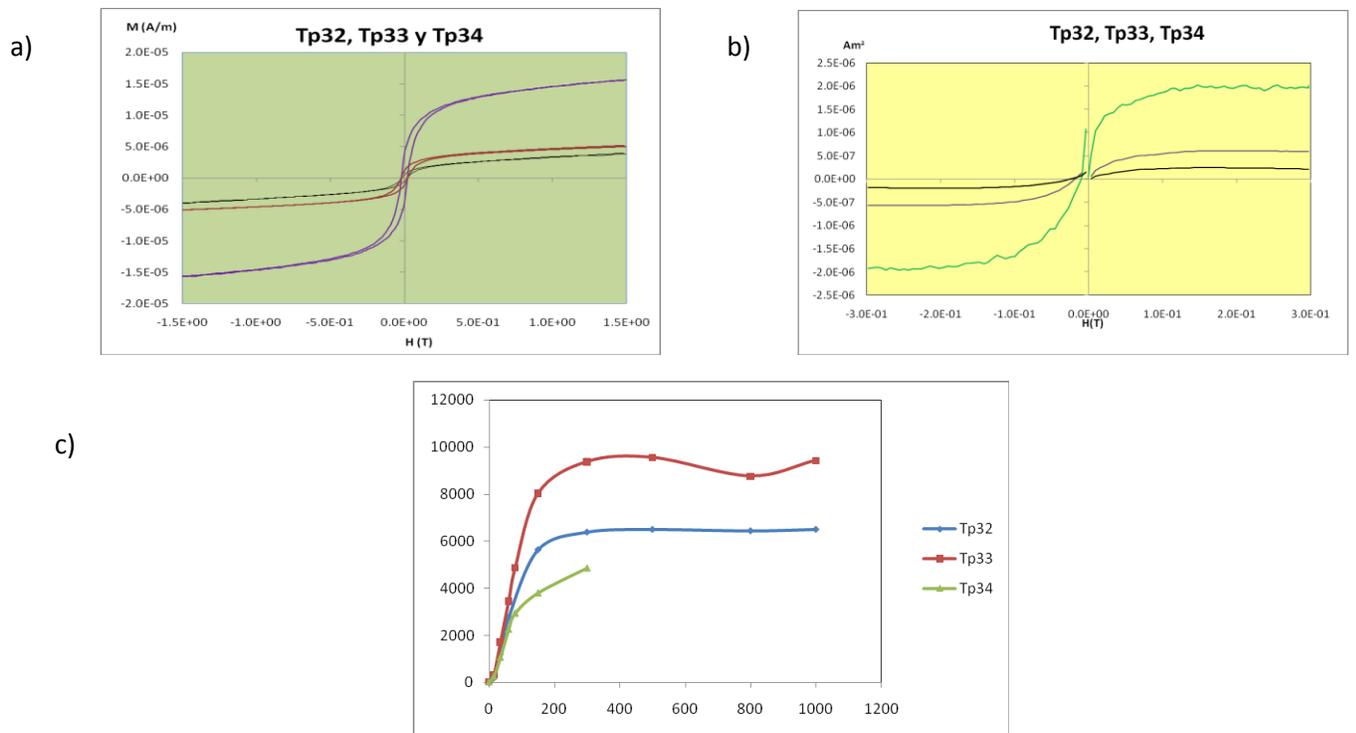


Figura 12. a) ciclo de histéresis, b) ciclo de la IRM, c) gráfica de IRM inducida mediante el magnetizador de pulsos de los especímenes Tp32, Tp33 y Tp34 .

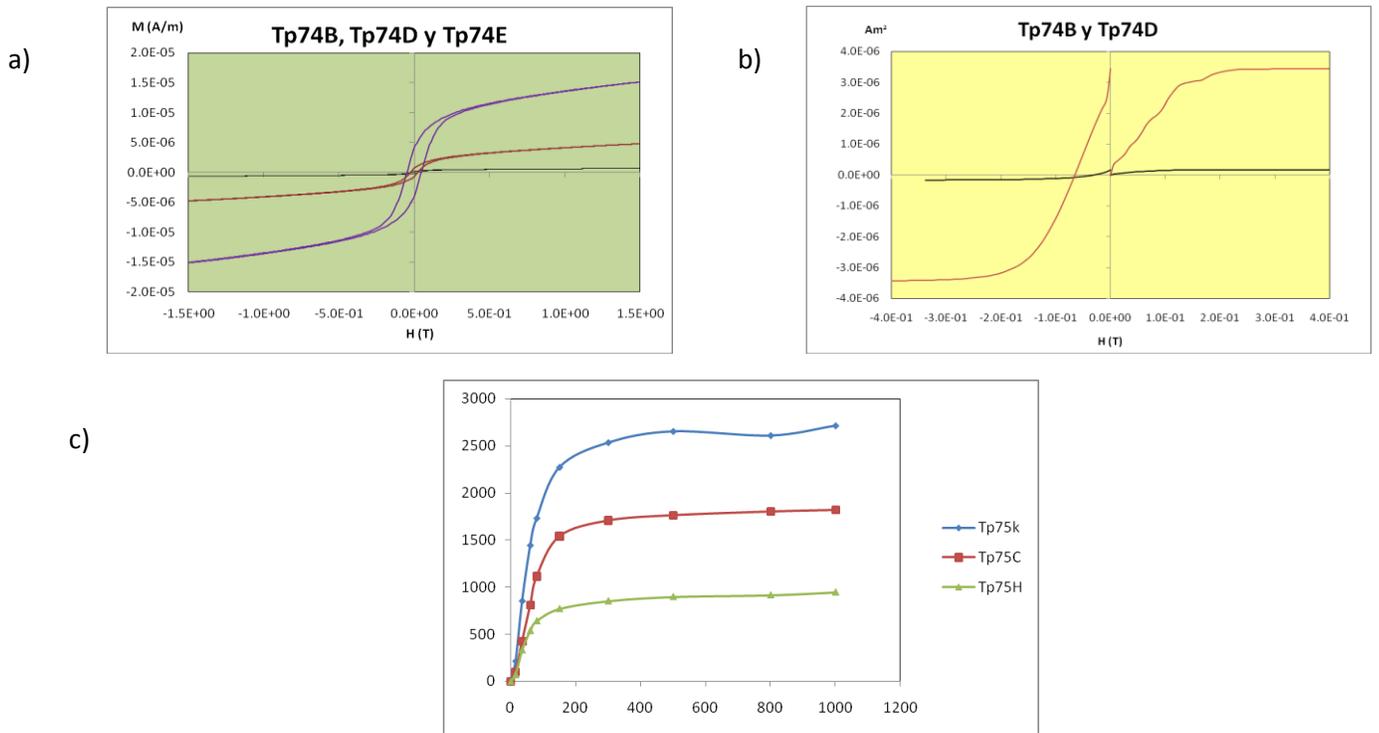


Figura 13. a) ciclo de histéresis, b) ciclo de la IRM, c) gráfica de IRM inducida mediante el magnetizador de pulsos de la muestra Tp74.

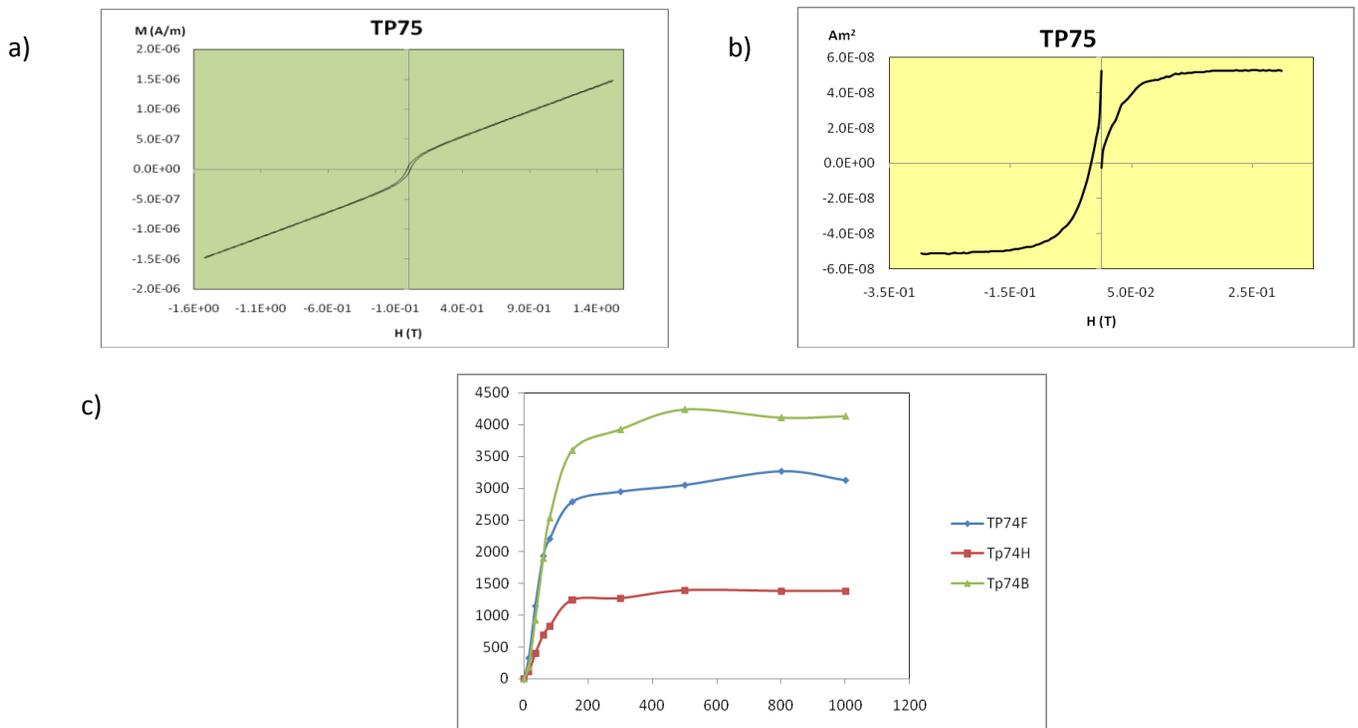


Figura 14. a) ciclo de histéresis, b) ciclo de la IRM, c) gráfica de IRM inducida mediante el magnetizador de pulsos de la muestra Tp75.

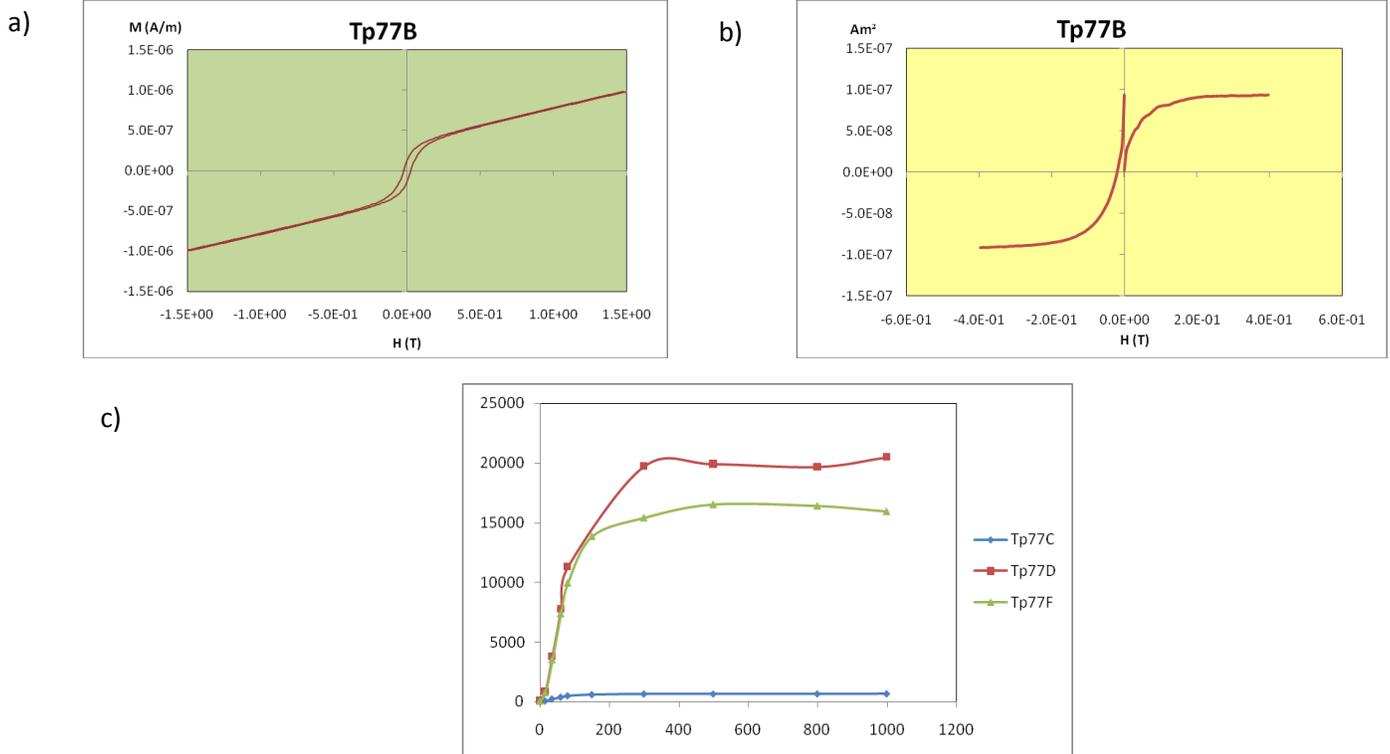


Figura 15. a) ciclo de histéresis, b) ciclo de la IRM, c) gráfica de IRM inducida mediante el magnetizador de pulsos de la muestra Tp77.

Espécimen	Valor Medio de Susceptibilidad (10e-6 Am <sup>2</sup> )
TP30A	1391.00
TP30B	2961.72
TP31A	1944.26
TP31B	2369.87
TP32	1062.04
TP33	2849.70
TP34	1401.32
TP54	112.00
TP55	858.00
TP56	391.18
TP74A	318.23
TP74B	500.08
TP74C	54.20
TP74D	579.98
TP74E	294.56
TP74F	401.19

TP74G	117.40
TP74I	106.74
TP74H	141.21
TP75C	255.69
TP75H	96.34
TP75K	482.61
TP75M	45.87
TP77A	494.15
TP77B	673.28
TP77C	68.47
TP77D	1018.88
TP77F	728.44
TP77G	549.23
TP77H	84.74
TP77I	144.34
TP77J	120.40
TP77K	134.74
TP77L	223.22

Tabla 1. Valores de la susceptibilidad media.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALONSO, M.; FINN, E., 1986. FÍSICA. Volumen III: Fundamentos de electromagnetismo, Estados Unidos, pp.
- [2] BUTLER, R., 1992. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Blackwell Scientific Publications, 238 pp.
- [3] DALY L. y LE GOFF M., 1996. An updated and homogeneous world secular variation data base. 1.- Smoothing of the archaeomagnetic results. Phys. Earth. Planet Int., Vol. 93, pp. 159 – 190.
- [4] DAY, R., FULLER, N. y SCHMIDT, V. A., 1977. Hysteresis properties of Titanomagnetites: grains size and compositional dependence. Phys. Earth Planet. Int., vol. 13, pp. 260 – 267.
- [5] DEMAREST, H., 1983. Error analysis of the determination of tectonic rotation from paleomagnetic data. Journal Geophysical Research, vol. 88, pp. 10593 – 10609.
- [6] DUNLOP, D. y ÖZDEMİR, Ö., 1997. Rock – Magnetism fundamental and frontiers, Cambridge University Press, pp.
- [7] FEYNMAN, R ; LEIGHTON, R; SANDS M., 1964. Lectures on Physics. Vol. 2, Addison Wesley, 2a. edición, Estados Unidos, pp. 36-1 a 36-6.
- [8] FISHER, R., 1953, Dispersion on a sphere. Proceedings Royal Society of London, Series A, vol. 217, pp. 295 – 305.
- [9] GRIFFITHS, D. 1999. Introduction to Electrodynamics. Prentice Hall, Estados Unidos, pp. 255 – 278.
- [10] HROUDA, F., 1982. Magnetic anisotropy and its application in geology and geophysics. Geophysical Survey, vol. 5, pp. 37 – 82.
- [11] MANZANILLA, L., 2000. La Zona del Altiplano Central, en Historia Antigua de México. Vol. II. El horizonte Clásico. Editores: L. Manzanilla y L. López Luján, INAH, Miguel Angel Porrúa, Coordinación de Humanidades e Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM, México, pp. 203 – 233.
- [12] MANZANILLA, L. En prensa, “Nuevos datos sobre la cronología de Teotihuacan. Correlación de técnicas de fechamiento”. En : Cronología y Periodización de Mesoamérica y el Norte de México. V Coloquio Bosch Gimpera, Annick Daneels (ed.), Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM.
- [13] MANZANILLA, L.; LÓPEZ, L., 2001. Exploraciones en un posible palacio de Teotihuacan: El proyecto Xalla. Mexicon, Vol. XXIII, núm. 3, junio, pp. 51 - 58.
- [14] MANZANILLA, L., 2003. The Abandonment of Teotihuacan, in The Archaeology of Settlement in Middle America. Inomata, Takeshi y R. W. Webb editors, Foundation of Archaeological Inquiry, The University of Utah Press, pp. 91 – 101.
- [15] MANZANILLA, L., 2006. Estados corporativos arcaicos, Organizaciones de excepción en escenarios excluyentes. Cuicuilco, vol. 13, No. 36, México, ISSN 1405-7778, pp.13 – 45..
- [16] MERRILL R. T., McELHINNY M.W. and McFADDEN P. L., 1983. The Magnetic Field of the Earth. Academic Press, New York, pp. 1 - 68.
- [17] NAVA, A. 1993. La inquieta superficie terrestre. Fondo de Cultura Económica, 1ª edición, México.
- [18] SOLER A. M., et al., 2006. Archeomagnetic investigation of oriented pre-Columbian lime-plasters from Teotihuacan, Mesoamerica. Earth Planets Space, 58, pp 1-7.
- [19] TAUXE, L., 2005. Lectures in Paleomagnetism.  
<http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/2005/>
- [20] UDIAS VALLINA A y MEZCUA RODRIGUEZ, J., 1997. Fundamentos de Geofísica. Editorial Alianza, Madrid España, pp. 306 – 320.
- [21] WOLFMAN, D., 1990. Mesoamerican Chronology and Archaeomagnetic Dating, A.D 1-1200. in Archaeomagnetic Dating, Eghmy J. L. y R. S. Steingberg editors, University of Arizona Press, Tucson, pp. 261 – 308.