

El Magnetismo y la materia



Nociones de Magnetismo

- Relación entre corriente y magnetismo
- Magnetización por unidad de volumen M
- La susceptibilidad magnética
- Los campos B y H

Ley de Biot-Savart

Toda corriente eléctrica genera un campo magnético. En un conductor rectilíneo, las líneas de campo son concéntricas con el conductor.

Corriente en conductor rectilíneo y campo magnético

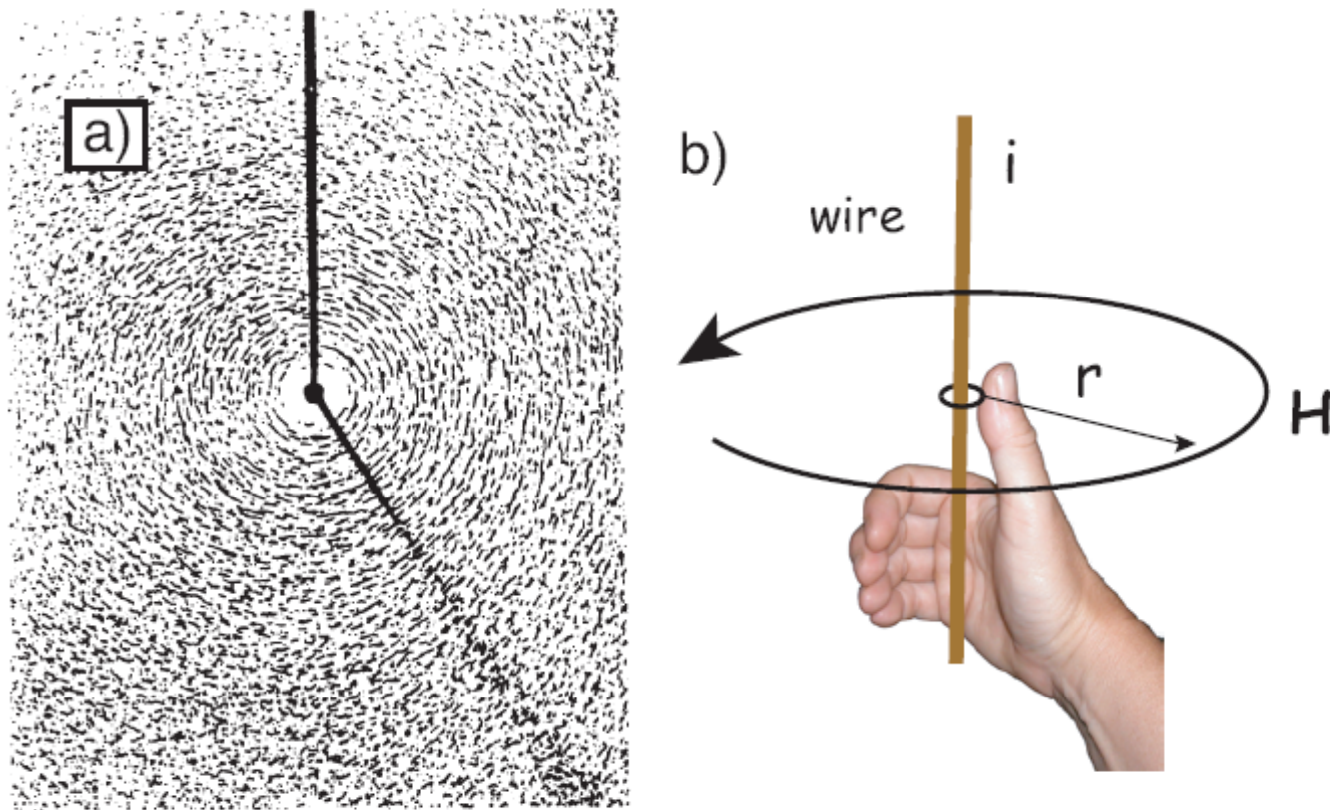
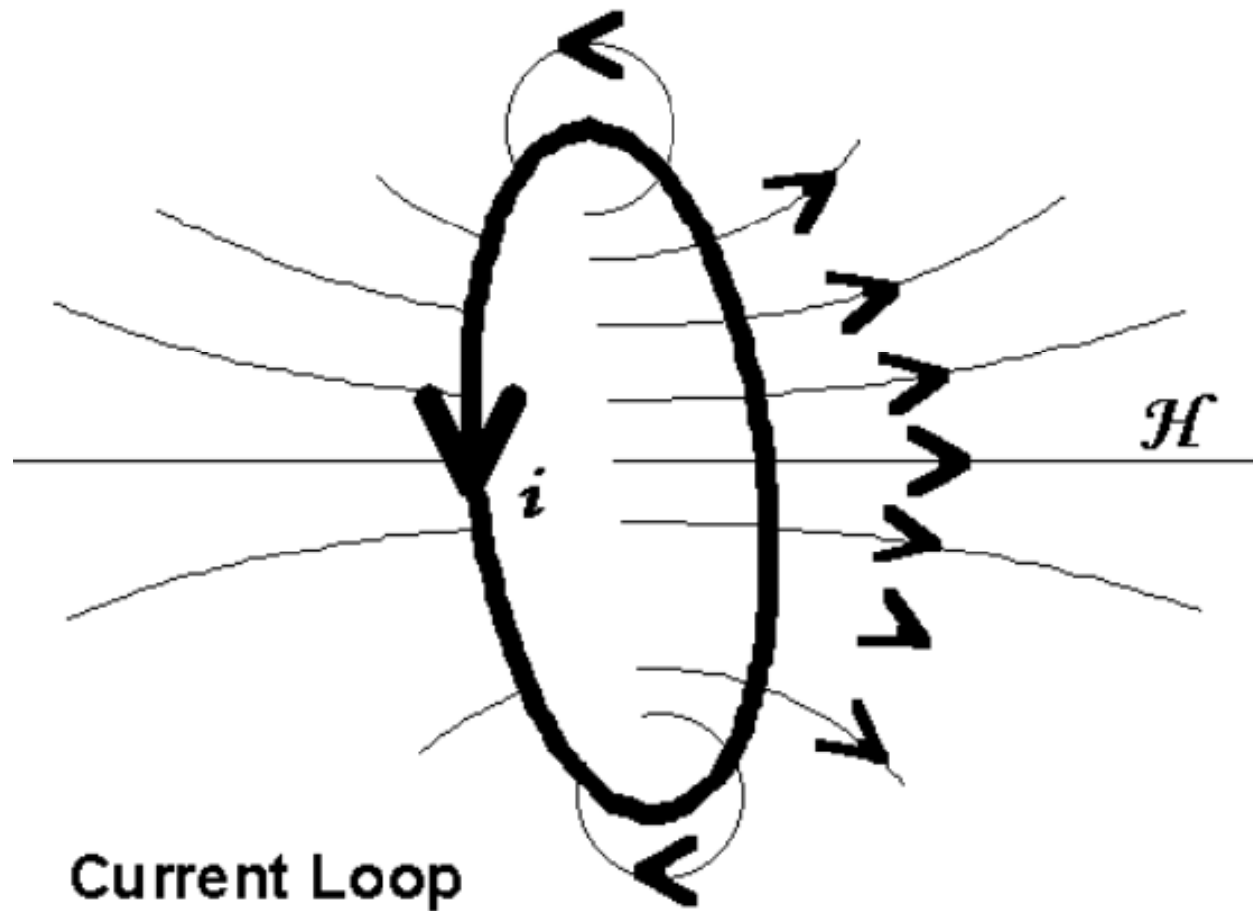


Figure 1.1: a) Distribution of iron filings on a flat sheet pierced by a wire carrying a current i . b) Relationship of magnetic field to current for straight wire. [Iron filings picture from Jiles (1992).]

Campo magnético de una espira de corriente



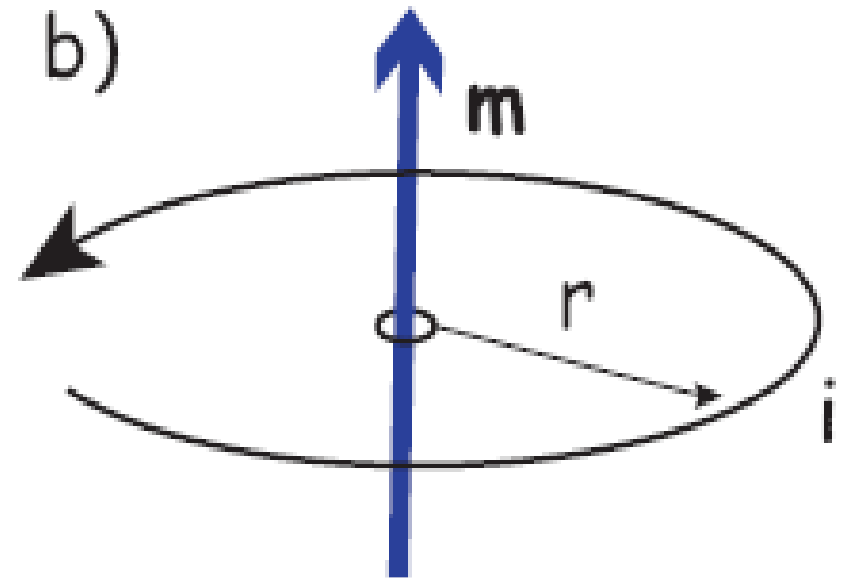
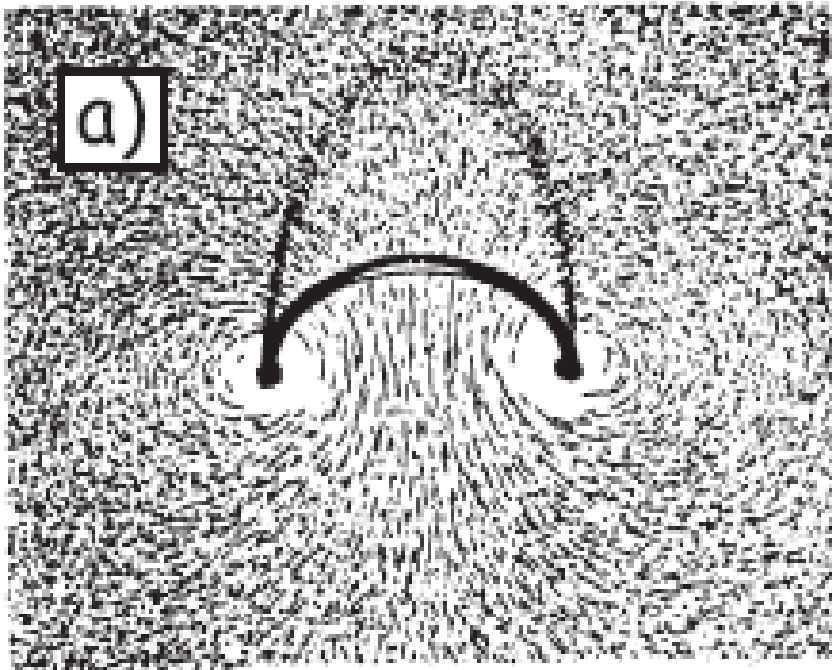
Campo H y corriente i

- Para una espira circular de radio r, por la que circula una corriente i, el campo magnético H es:

$$H = i / 2 \pi r$$

Las unidades de $[H] = A / m$

Dipolo magnético



Momento dipolar

- Una espira circular de radio r , por la que circula una corriente i , genera un campo igual que un imán con un momento magnético m .
- El momento dipolar:

$$m = i \pi r^2$$

$$[m] = A \, m^2$$

Magnetización volumétrica y másica

- Al momento dipolar por unidad de volumen o masa M , se le denomina magnetización:

$M = \text{momento dipolar} / \text{Volumen}$

$M = \text{momento dipolar} / \text{Masa}$

Unidades: $[M]_{\text{vol}} = [m] / [\text{vol}] = \text{A m}^2 / \text{m}^3 = \text{A m}^{-1}$

$[M]_{\text{masa}} = [m] / [\text{masa}] = \text{Am}^2 \text{ kg}^{-1}$

Susceptibilidad magnética y magnetización

- La relación entre la magnetización M inducida en un material y el campo magnético H , se denomina susceptibilidad magnética χ . La misma puede ser volumétrica o másica.

- $\chi = \text{Magnetización} / \text{Campo} = M / H$

Unidades:

$$[\chi]_{\text{vol}} = [M]_{\text{vol}} / [H] = (\text{A m}^{-1}) / (\text{A m}^{-1}) = \text{¡sin unidades! (SI)}$$

$$[\chi]_{\text{masica}} = [M]_{\text{masa}} / [H] = (\text{A m}^2 \text{ kg}^{-1}) / (\text{A m}^{-1}) = \text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Inducción magnética B y campo magnético H

- Debido a que en el interior de un material al campo magnético externo aplicado H, hay que sumarle el campo inducido por la magnetización M, se define la inducción magnética B.

- $$B = \mu_0 (H + M_{vol}) = \mu_0 (H + \chi H) =$$
$$= \mu_0 (1 + \chi) H = \mu H$$

μ : Permeabilidad;

$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ Newton/ A² : Permeabilidad del vacío.

Campos B y H en geofísica

- Por razones históricas, los diferentes autores llaman campo a uno u otro (B ó H), si bien B es “inducción magnética”.
- La dificultad está en que se miden en diferentes unidades. Las unidades de B son Tesla.
- 1 Tesla \rightarrow 795 774, 7155 A/m , en el vacío.
- 1 mT \rightarrow \sim 800 A/m ; 25000 nT \sim 20 A/m
(campo terrestre en Buenos Aires)

Campo en unidades cgs

- Campo magnético $H \rightarrow$ Oersted
- Inducción magnética $B \rightarrow$ Gauss
- En vacío $1 \text{ Oersted} = 1 \text{ Gauss}$
- $1 \text{ Tesla} = 10\,000 \text{ Gauss} \rightarrow 10\,000 \text{ Oe}$

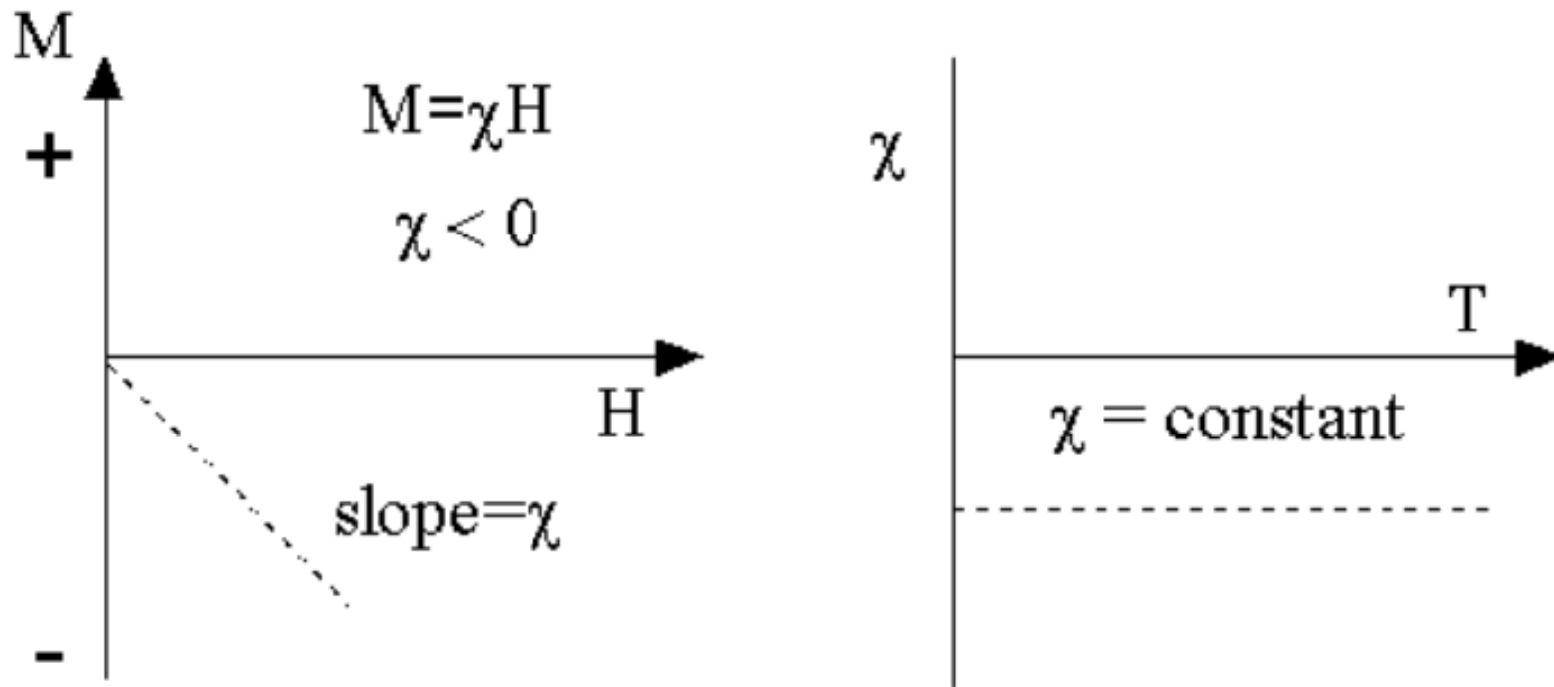
Magnetic Term	Symbol	SI unit	CGS unit	conversion factor
magnetic induction	B	Tesla (T)	Gauss (G)	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$
magnetic field	H	A/m	Oersted (Oe)	$1 \text{ A/m} = 4\pi/10^3 \text{ Oe}$
magnetization	M	A/m	emu/cm ³	$1 \text{ A/m} = 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$
mass magnetization	σ	Am ² /kg	emu/g	$1 \text{ Am}^2/\text{kg} = 1 \text{ emu/g}$
magnetic moment	m	Am ²	emu	$1 \text{ Am}^2 = 10^3 \text{ emu}$
volume susceptibility	κ	dimensionless	dimensionless	$4\pi(\text{SI}) = 1 (\text{cgs})$
mass susceptibility	χ	m ³ /kg	emu/Oe·g	$1 \text{ m}^3/\text{kg} = 10^3/4\pi \text{ emu/Oe} \cdot \text{g}$
permeability of free space	μ_0	H/m	dimensionless	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} = 1 (\text{cgs})$

A= Ampere
cm= centimeter

Comportamiento de los materiales magnéticos frente a un campo.

- Diamagnetismo: Sin remanencia.
Repulsión
- Paramagnetismo: Sin remanencia.
Atracción
- Ferromagnetismo: Con remanencia
- Ferrimagnetismo: Con remanencia
- Antiferromagnetismo: Con remanencia

Diamagnetismo

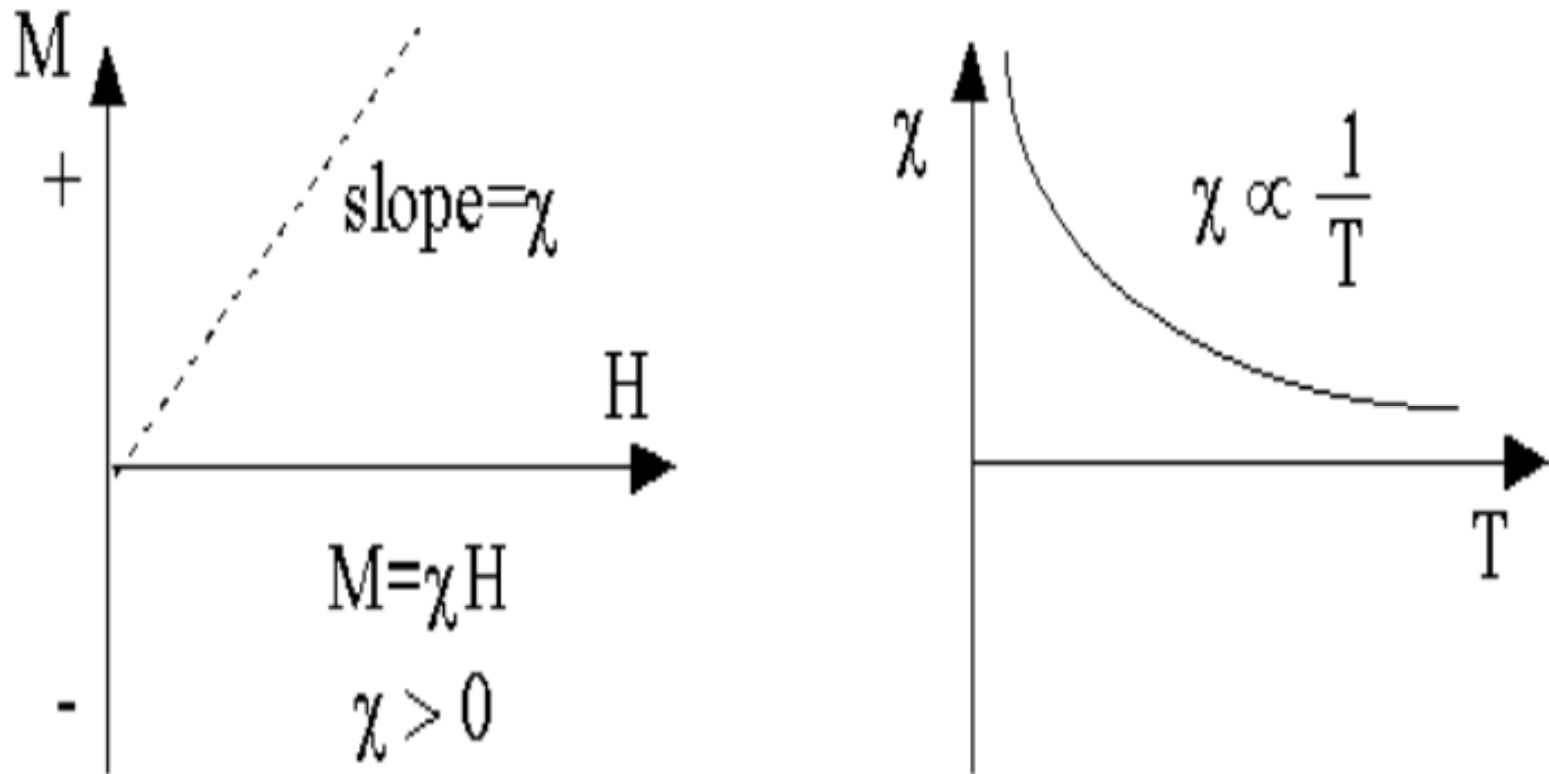


Diamagnetism

Levitación de la rana diamagnética



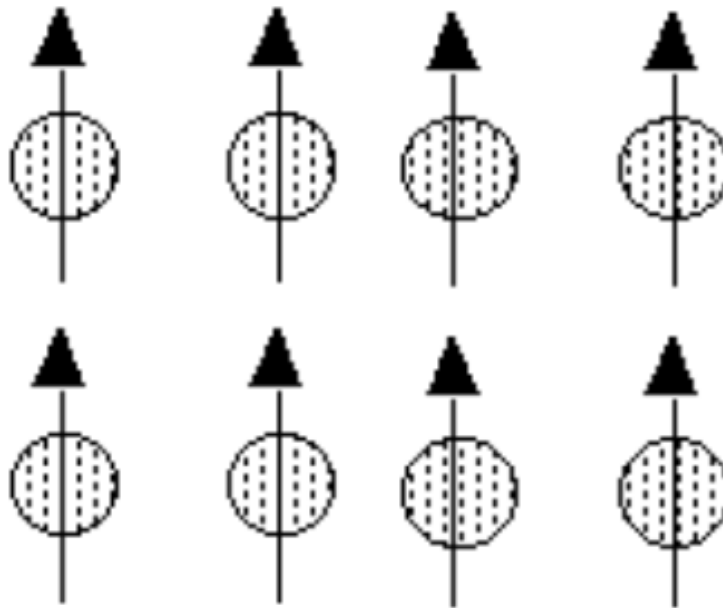
Paramagnetismo



Paramagnetism

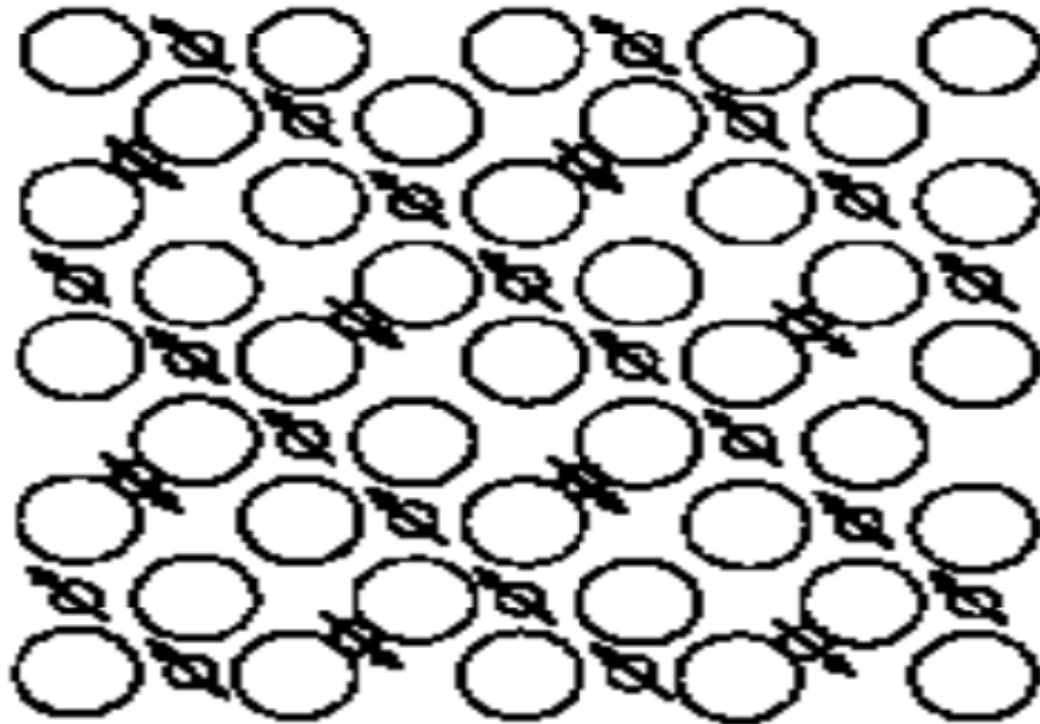
Ferromagnetismo

parallel alignment



Ferromagnetism

Ferrimagnetismo



Ferrimagnetism



Louis Neel(1904-2000)-Premio Nobel de Física 1970



Scanned at the American
Institute of Physics



merican

Estructura cristalina

- La magnetita, Fe_3O_4 , cristaliza con estructura espinel. Los grandes átomos de oxígeno están empaquetados en forma muy próxima en una red cúbica y los iones Fe, más pequeños, llenan los huecos. Estos “huecos” se encuentran en dos tipos diferentes:
- Sitios tetraédricos [A]: El ión Fe está rodeado por cuatro oxígenos.
- Sitios octaédricos [B]: El ión Fe está rodeado por seis oxígenos.

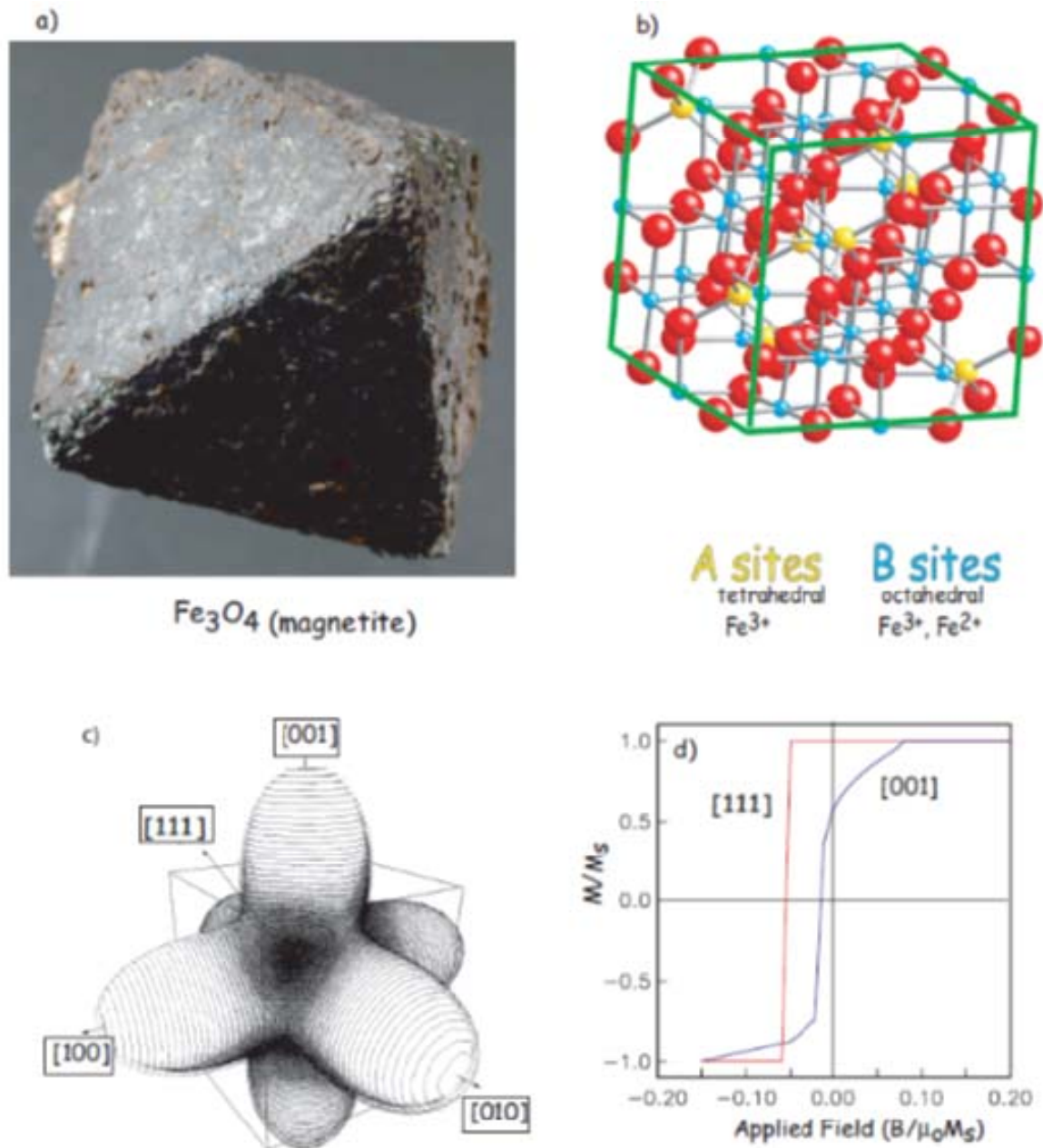
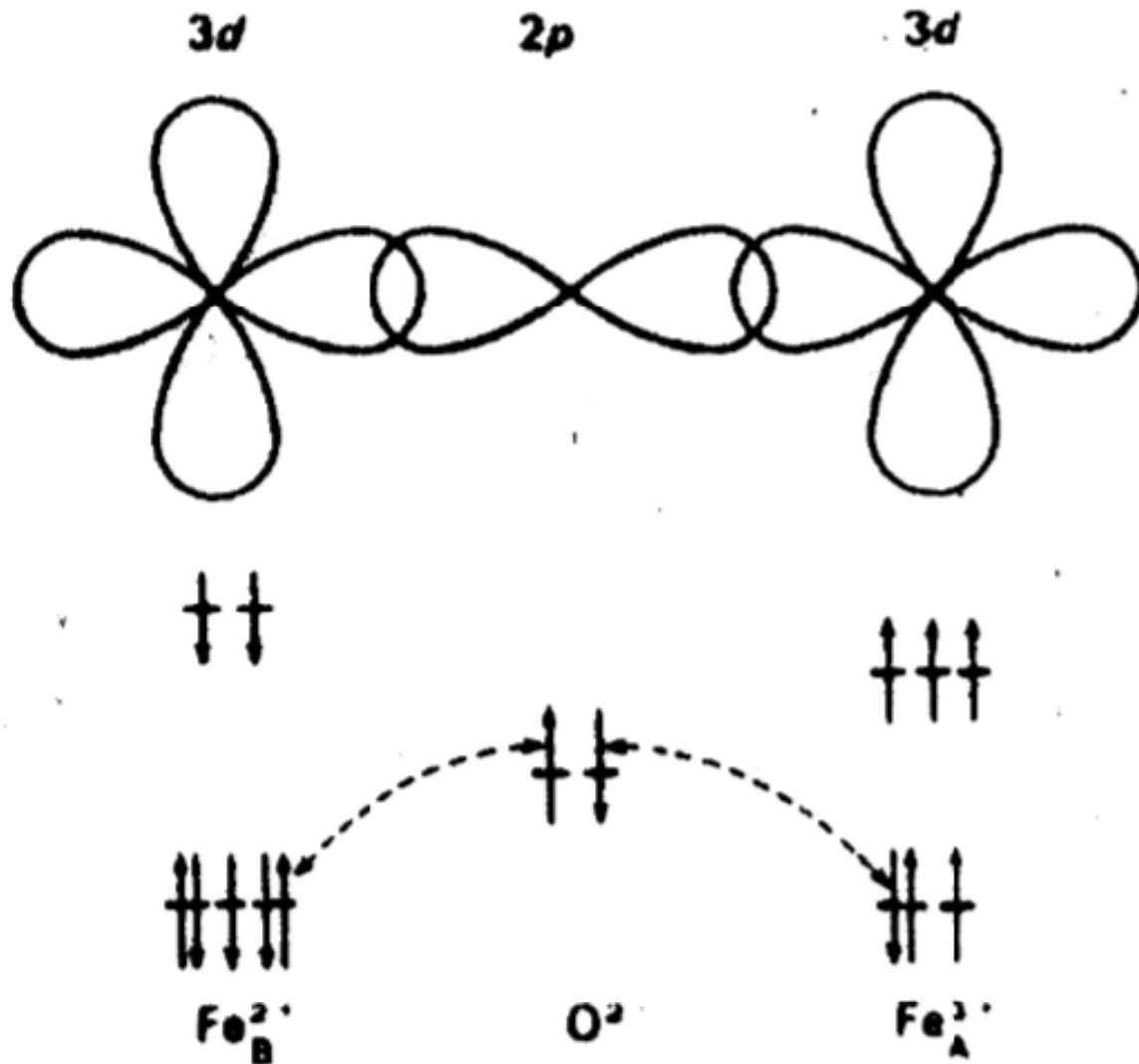


Figure 4.1: a) A magnetite octahedron. b) Internal crystal structure. Big red dots are the oxygen anions. The blue dots are iron cations in octahedral coordination and the yellow dots are in tetrahedral coordination. Fe^{3+} sits on the A sites and Fe^{2+} and Fe^{3+} sit on the B sites. c)

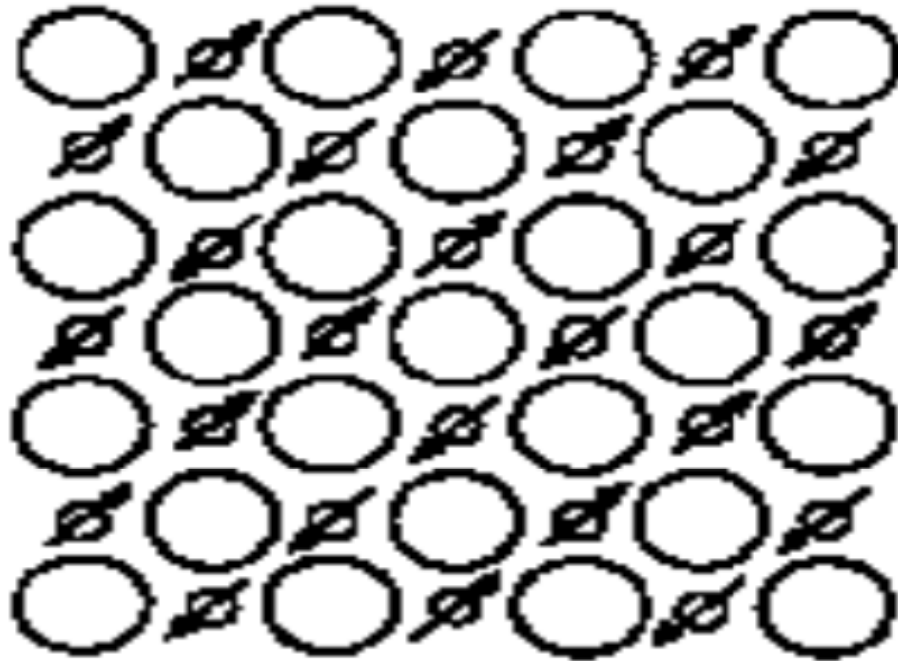
Interacciones entre redes

- Los sitios forman dos subredes magnéticas A y B. Los espines de la subred A, son antiparalelos a los de la subred B. Como los Fe^{3+} , tienen $5 \mu\text{B}$ (magnetones de Bohr) y los Fe^{2+} , $4\mu\text{B}$. En la magnetita la magnetización de saturación ($=M_s$) será : $M_s = M_B - M_A = (5+4-5) \mu\text{B} = 4\mu\text{B}$ por molécula, multiplicando por el número de Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$), la magnetización de saturación es $92 \text{ Am}^2/\text{kg}$.

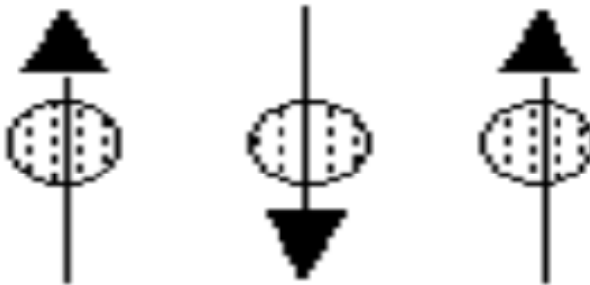
Interacción de superintercambio entre espines



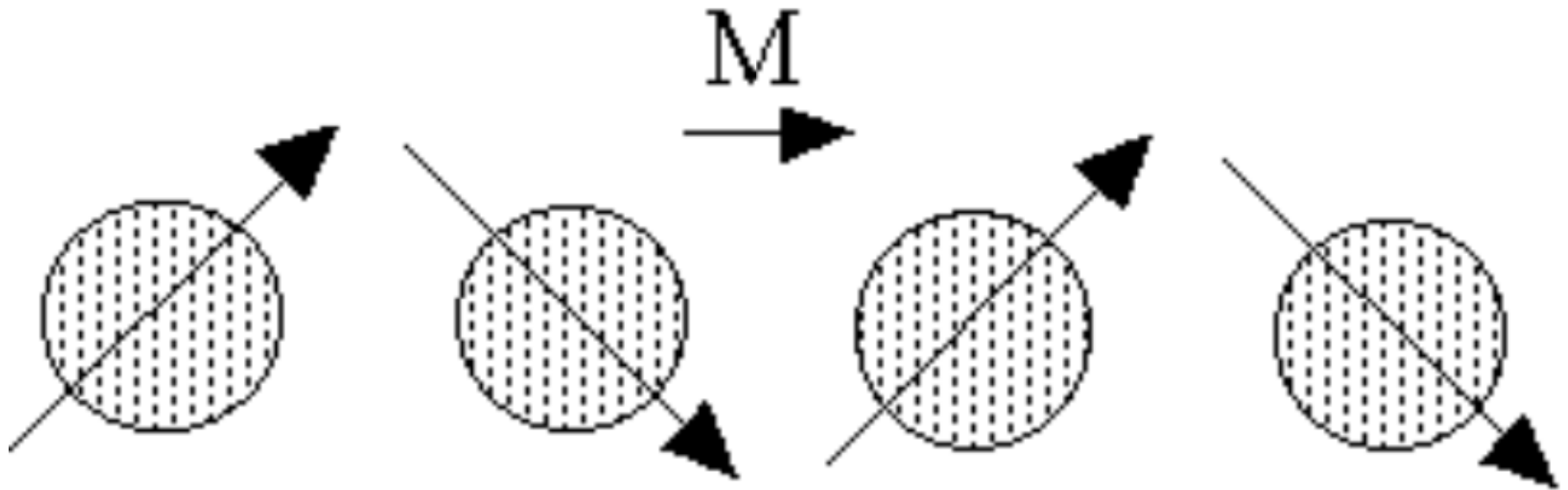
Antiferromagnetismo



Antiferromagnetism



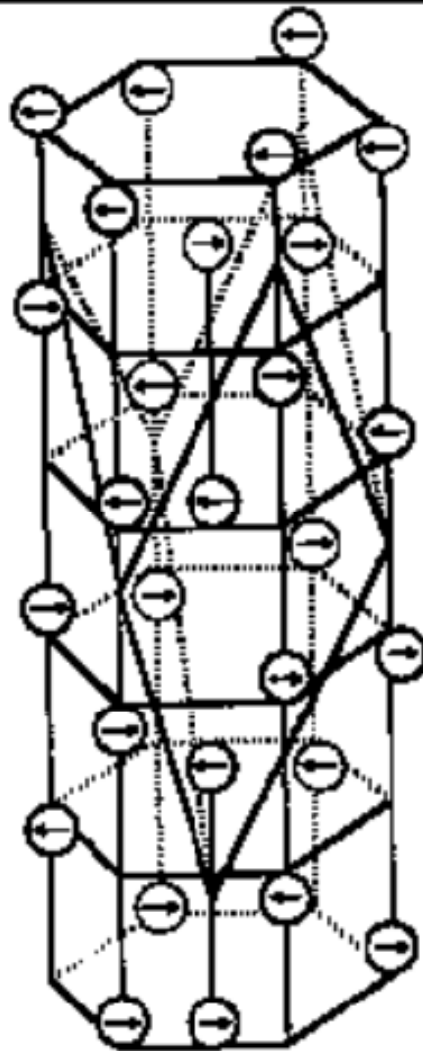
Antiferromagnetismo cantedo



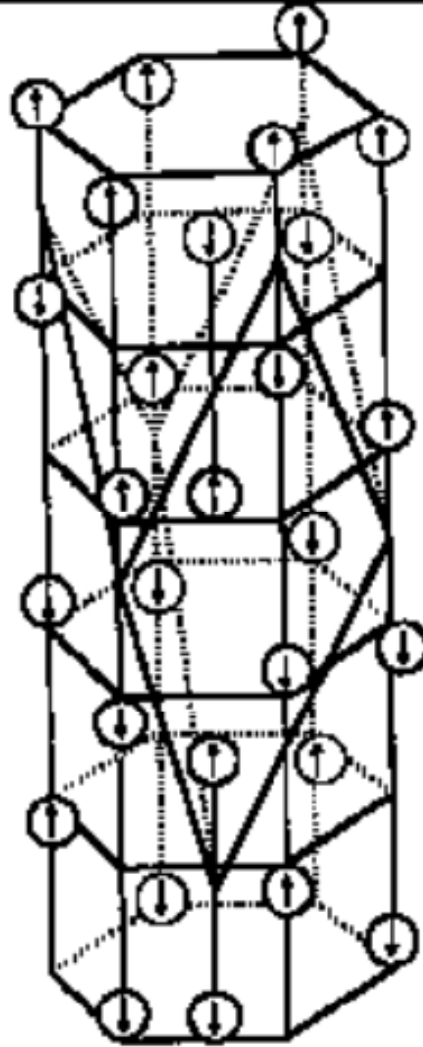
Canted Antiferromagnetism

Hematite

Crystal Structure of Hematite



$T > -10^{\circ}\text{C}$

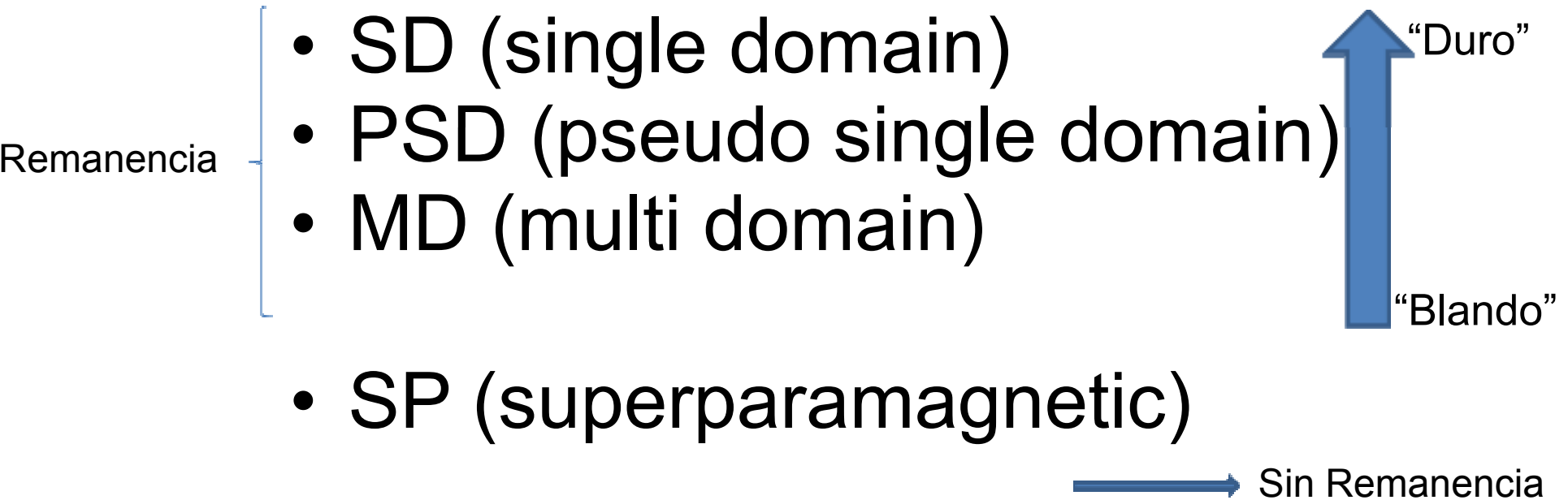


$T < -10^{\circ}\text{C}$

○ Fe^{3+} ion

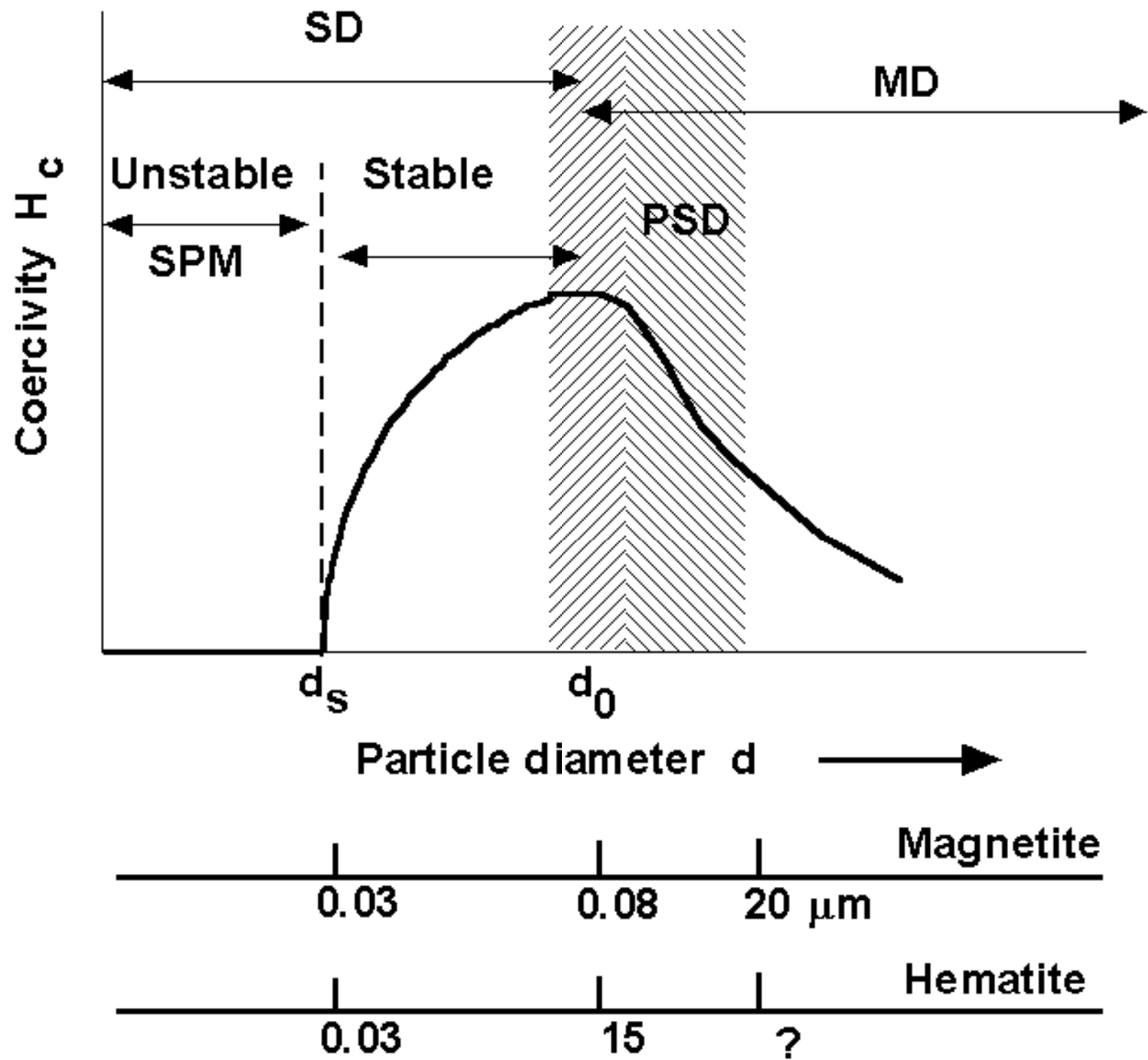
after Fuller (1987)

Dominios Magnéticos



. Superparamagnetismo

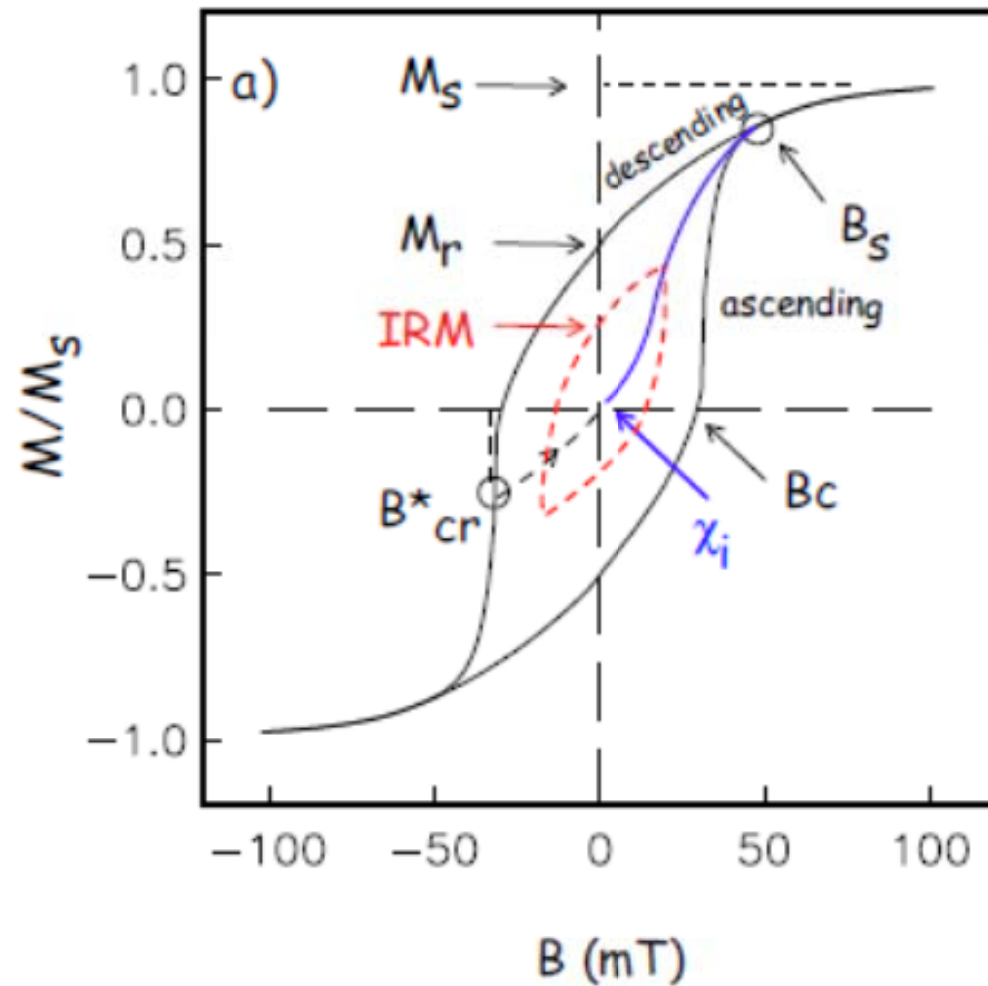
- Por debajo de cierto tamaño crítico, los dominios magnéticos desaparecen y la magnetización del grano responde a cualquier variación del campo magnético externo.
- El tamaño depende de la temperatura, esta temperatura se denomina Temperatura de bloqueo TB.
- A diferencia del paramagnetismo, hay saturación a campos relativamente bajos (menores a 1 Tesla).



Técnicas usuales

- Histéresis
- IRM (Isothermal Remanent Magnetization)
- Desmagnetización por campos alternos
- Susceptibilidad magnética
- Variación de susceptibilidad con campo
- Variación de susceptibilidad con frecuencia
- Variación de susceptibilidad con temperatura

El Ciclo de histéresis



Gráficos IRM

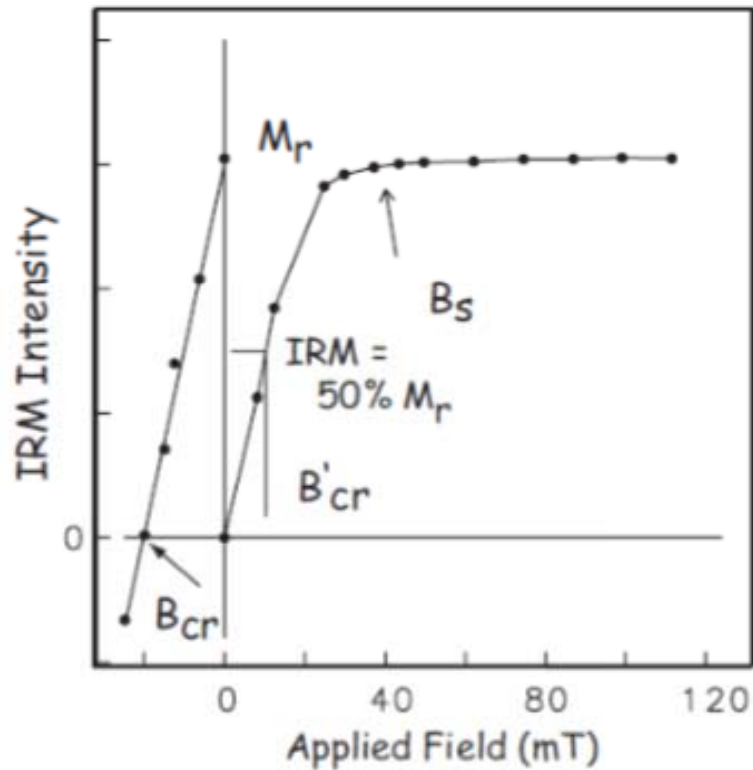


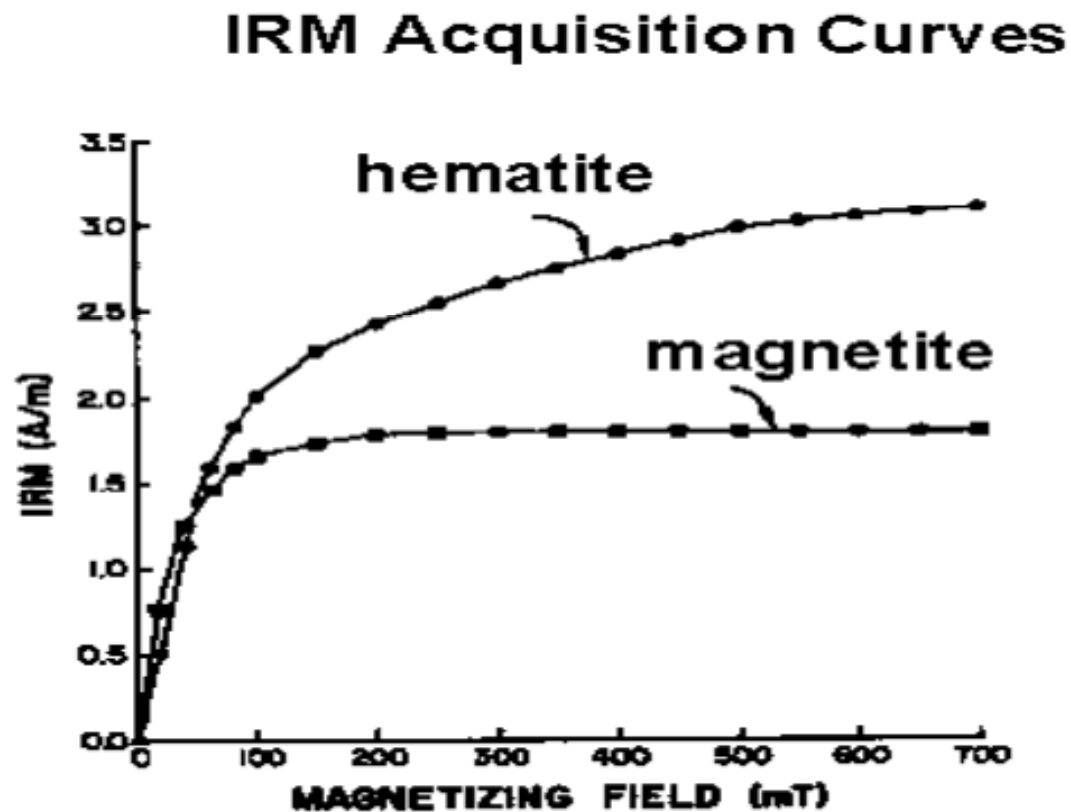
Figure 5.15: Acquisition of IRM by exposure to large magnetic fields. After saturation, the remanence remaining is M_r . One can then turn the sample around and applied smaller fields in the opposite direction to determine the field necessary to reduce the net remanence to zero. Two methods of estimating B_{cr} are shown.

Parámetros de Histéresis e IRM

- Bc: Campo coercitivo
- Ms: Magnetización de saturación
- Mrs: Magnetización remanente de saturación
- Bcr: Coercitividad de la remanencia

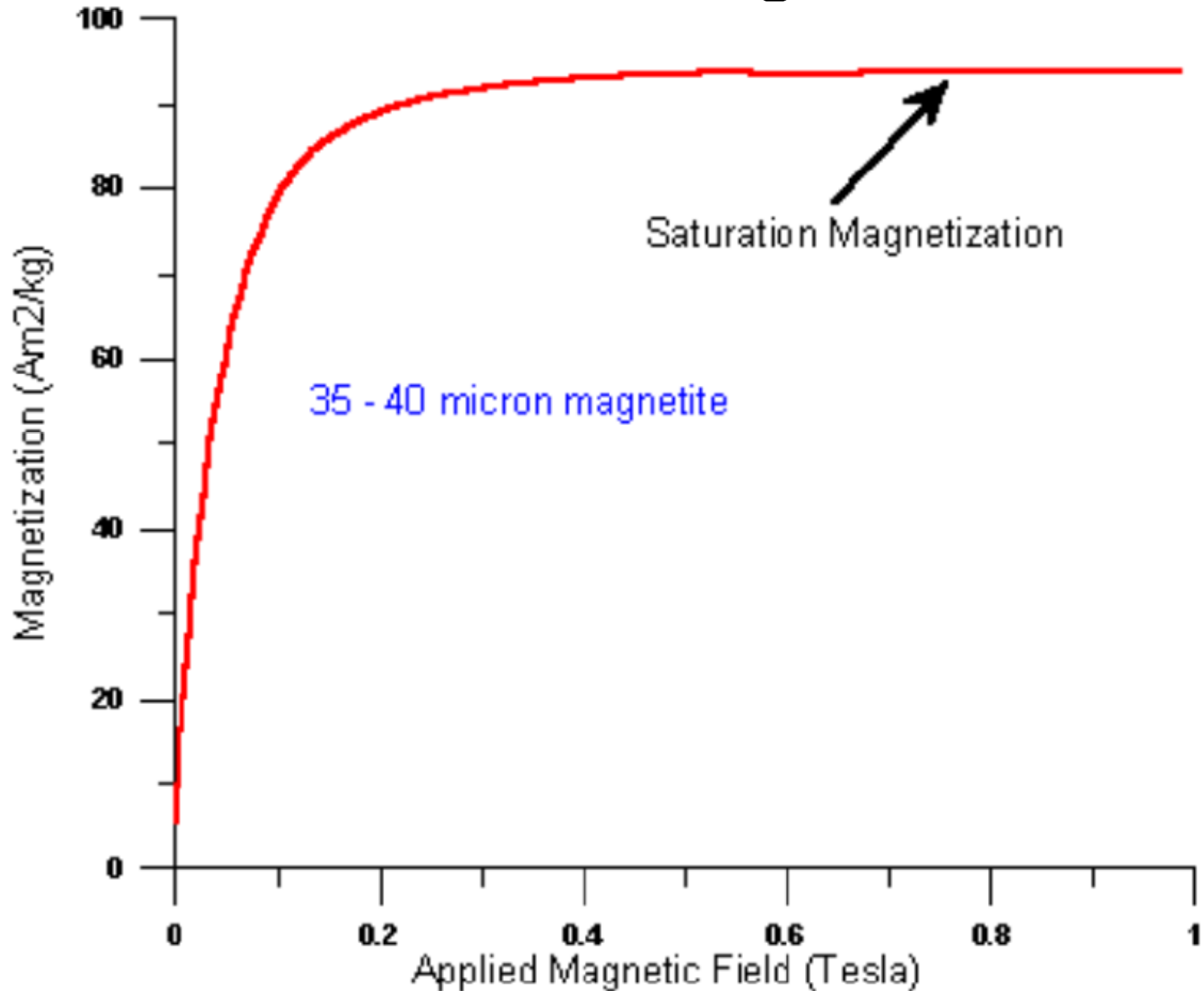
χ a campo alto { Paramagnética
Antiferromagnética

Curvas de adquisición de IRM para Magnetita y Hematita

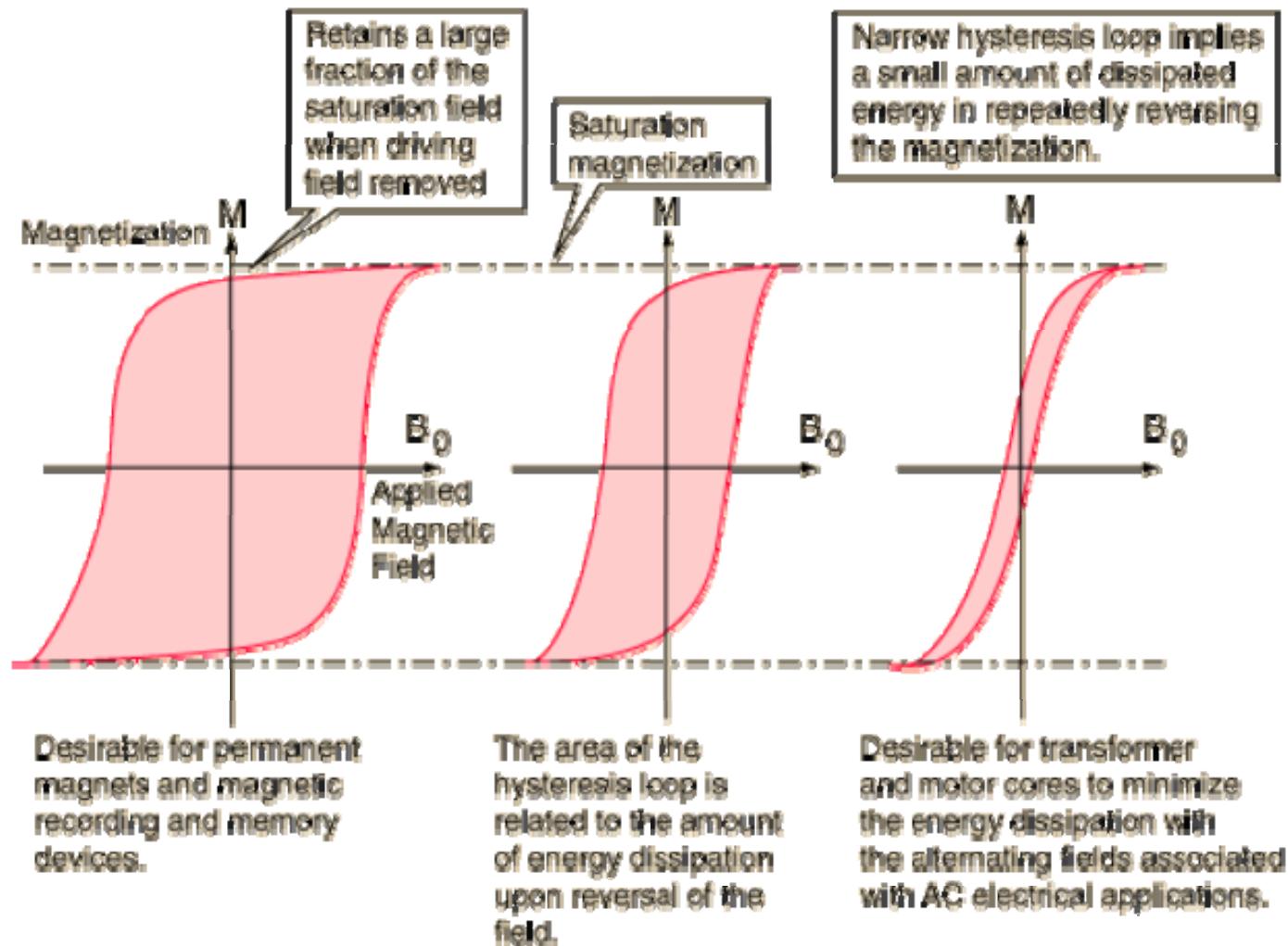


after Bulter (1982)

Curva IRM magnetita



Diferentes formas del ciclo de histéresis



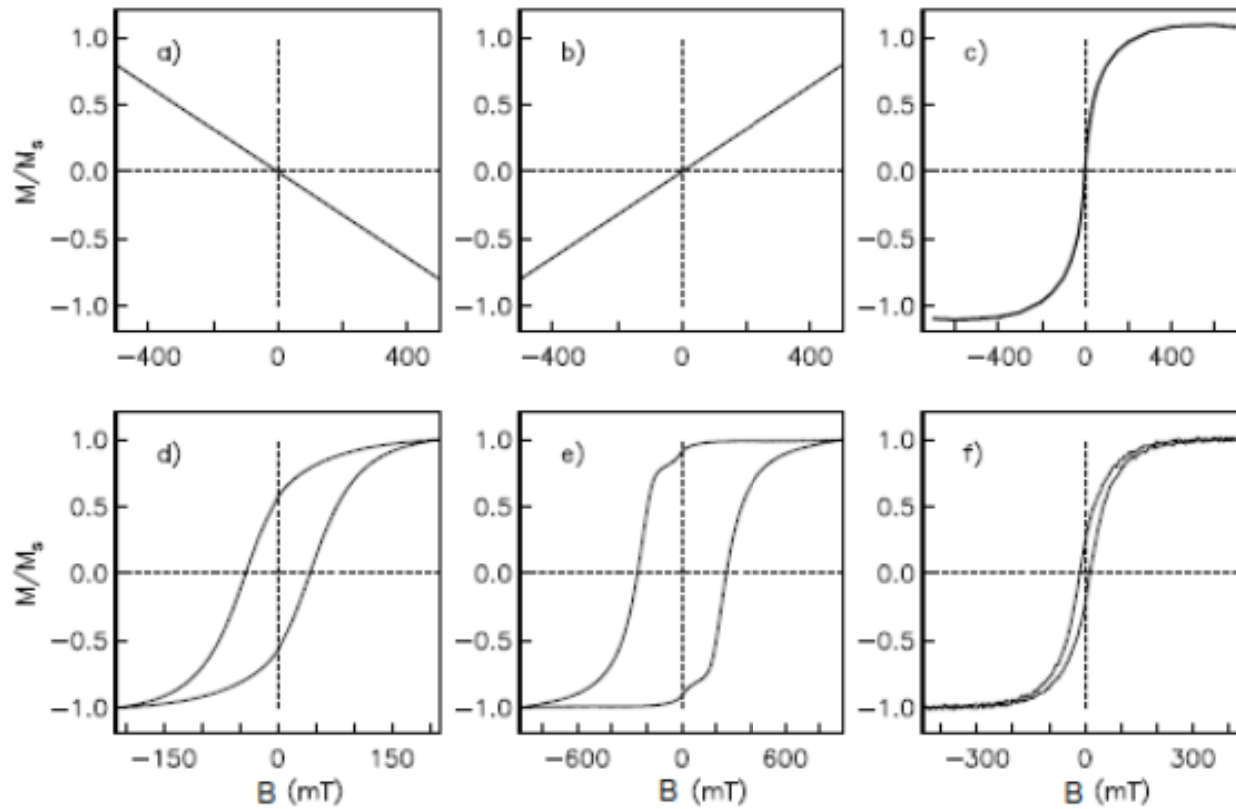


Figure 8.6: Hysteresis loops of end-member behaviors: a) diamagnetic, b) paramagnetic, c) superparamagnetic (data for submarine basaltic glass), d) uniaxial, single domain, e) magnetocrystalline, single domain, f) "pseudo-single domain".

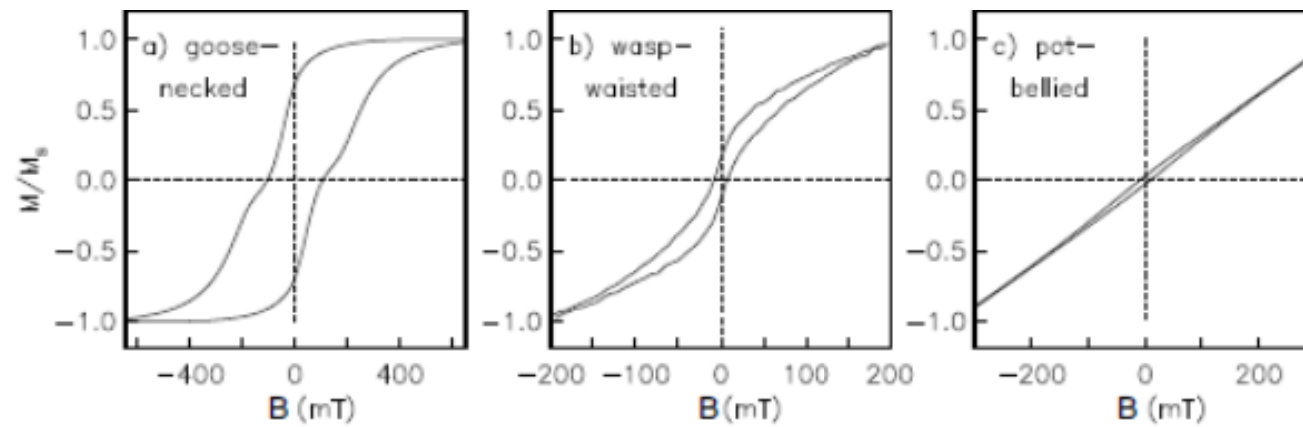


Figure 8.7: Hysteresis behavior of various mixtures: a) magnetite, and hematite, b) SD/SP magnetite (data from Tauxe et al. 1996), c) another example of SD/SP magnetite.

El diagrama de Day

- Mediante la combinación de los parámetros H_c , M_s , M_{rs} y B_{cr} , se identifica el estado de dominios para la magnetita.
- Algunos autores la extienden a TM pobres en titanio.
- Debido a la combinación de varios estados de dominios en las muestras naturales, es muy común que se observe en la zona PSD.

Diagrama de Day

24 2 Basic Magnetism

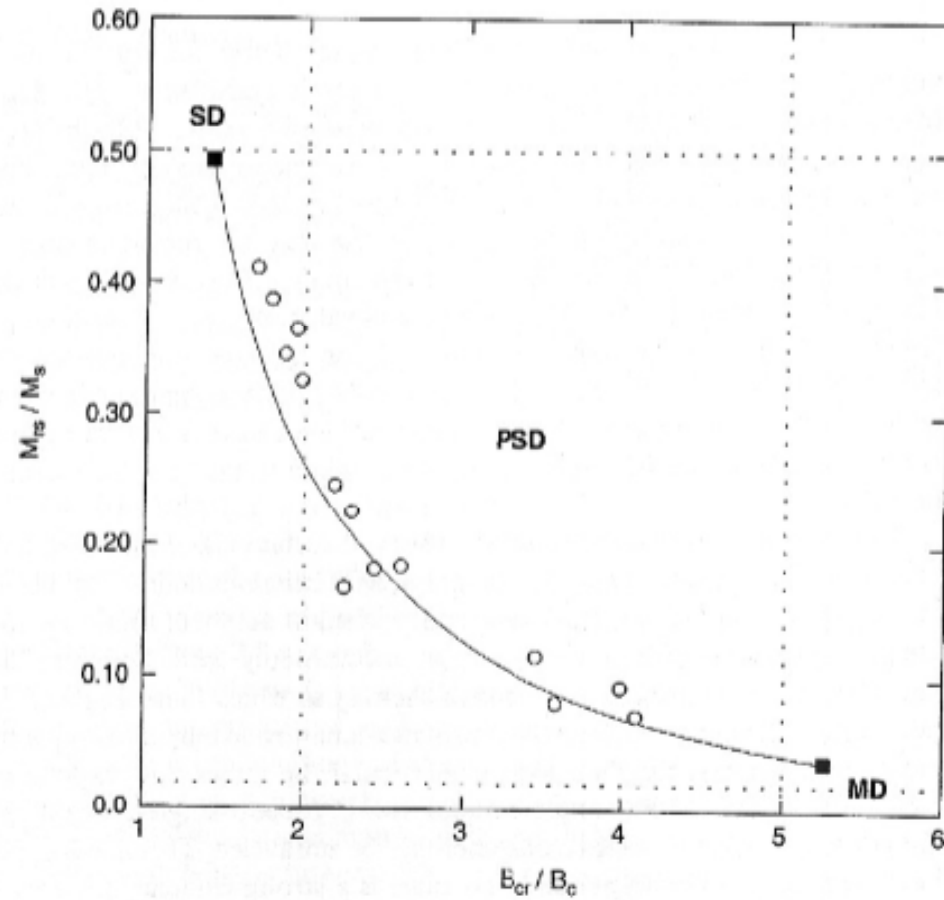


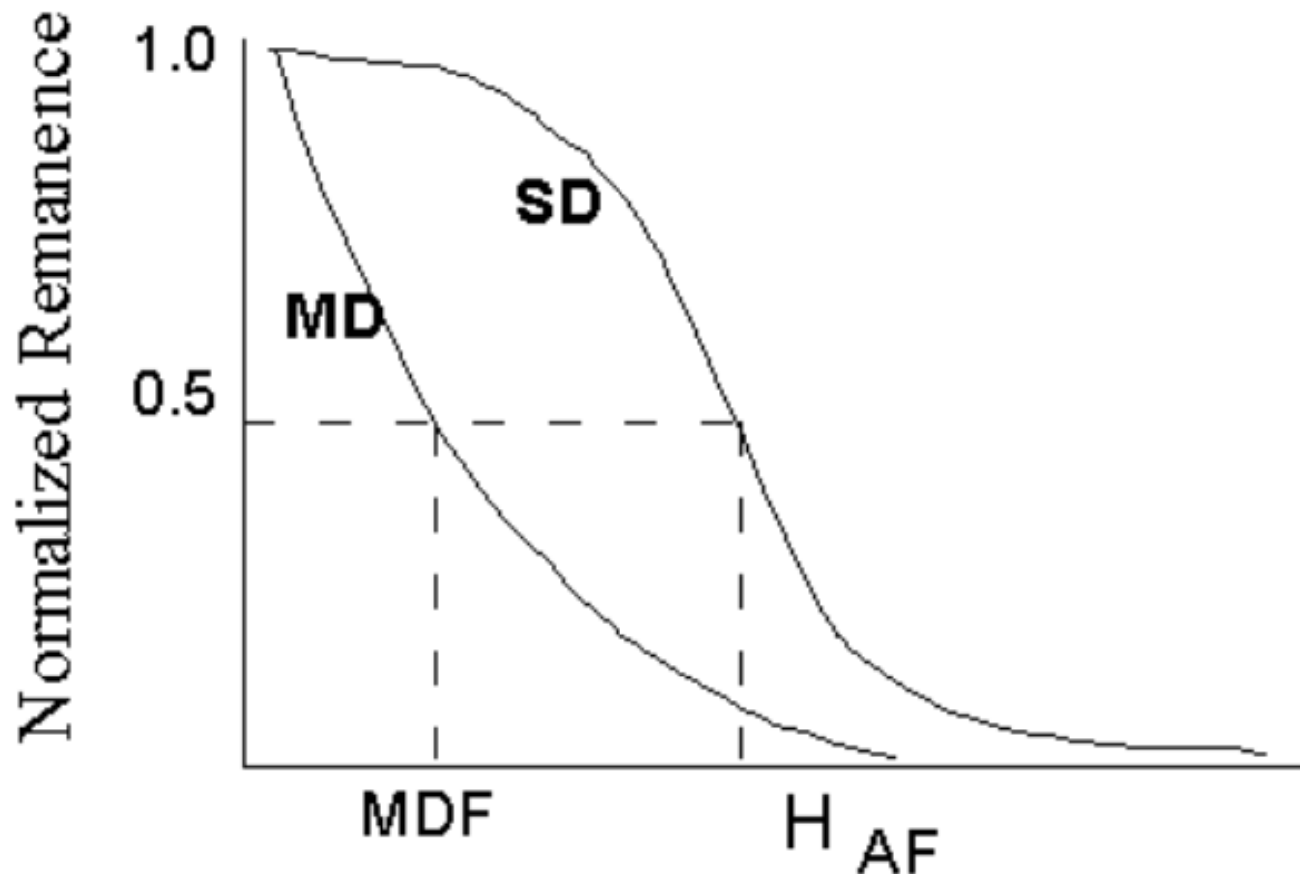
Figure 2.7 Day plot illustrating the effect of a binary mixture of single-domain (SD) and multi-domain (MD) particles. The samples involved are lake sediments from Minnesota. (Modified from Dunlop, 2002b.)

Desmagnetización por campos alternos

- La muestra es sometida a un campo alterno de amplitud máxima H_{AF} . El campo magnético alterno se hace crecer y decrecer en forma lineal hasta su valor máximo H_{AF} .
- Se comienza por campos pequeños y se van aumentando progresivamente. Luego de cada desmagnetización la muestra es medida.

Curvas de desmagnetización AF para magnetita

- MDF : Median Destructive Field= Campo para que la magnetización disminuya a la mitad



Desmagnetizacion AF

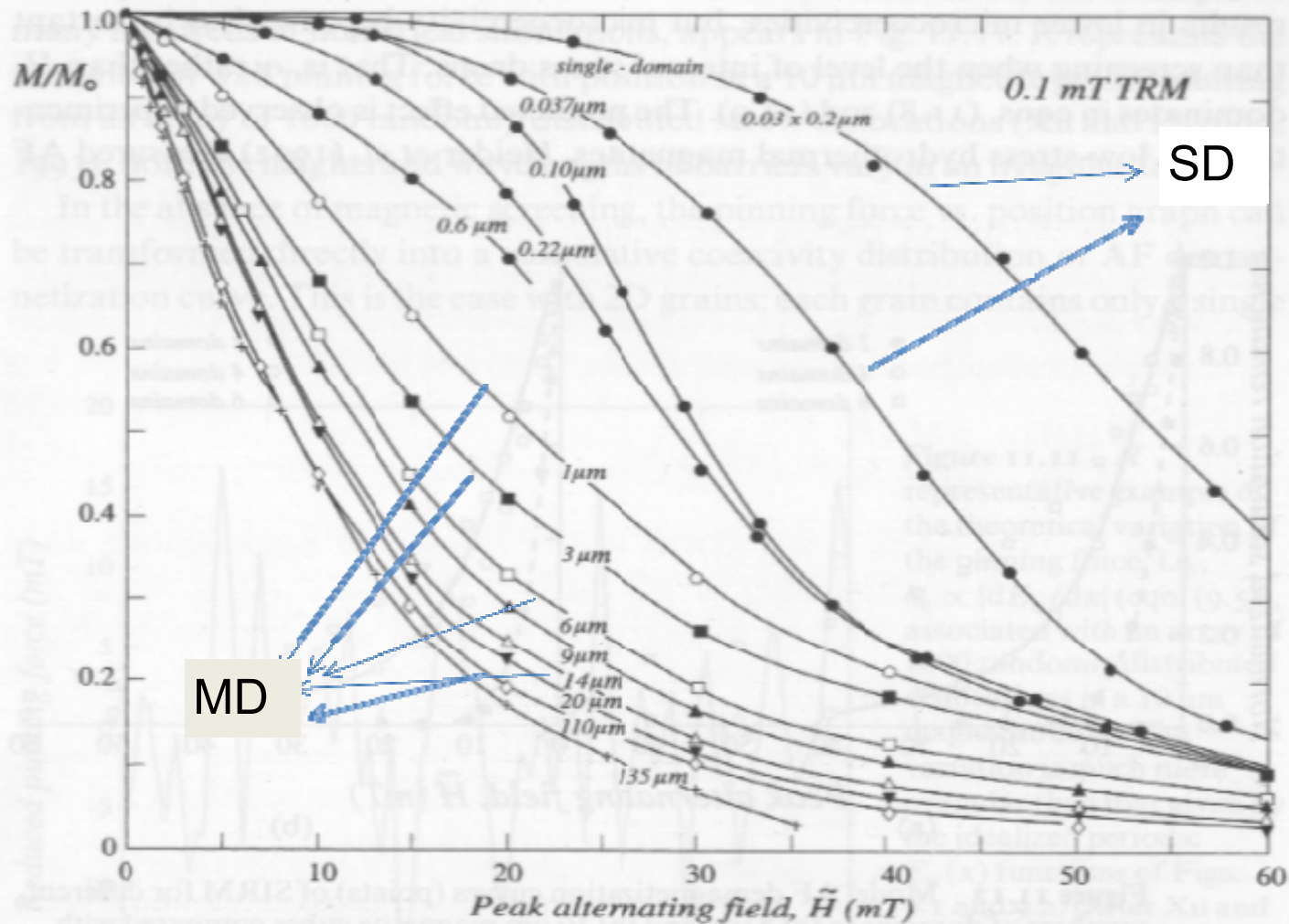


Figure 11.13 Comparison of AF demagnetization curves of a 0.1 mT TRM in magnetites with widely varying grain sizes. The shape of the demagnetization curve changes from sigmoid (S-shaped, with an initial plateau of no demagnetization and an inflection point at intermediate fields) to exponential as grain size increases from SD to large MD. [After Argyle *et al.* (1994) © American Geophysical Union, with the permission of the authors and the publisher.]

Susceptibilidad Magnética

- Susceptibilidad inicial
- Susceptibilidad a altos campos:
Antiferromagnéticos y Paramagnéticos
- Valores de susceptibilidad para diferentes minerales
- Propiedades que controlan la susceptibilidad

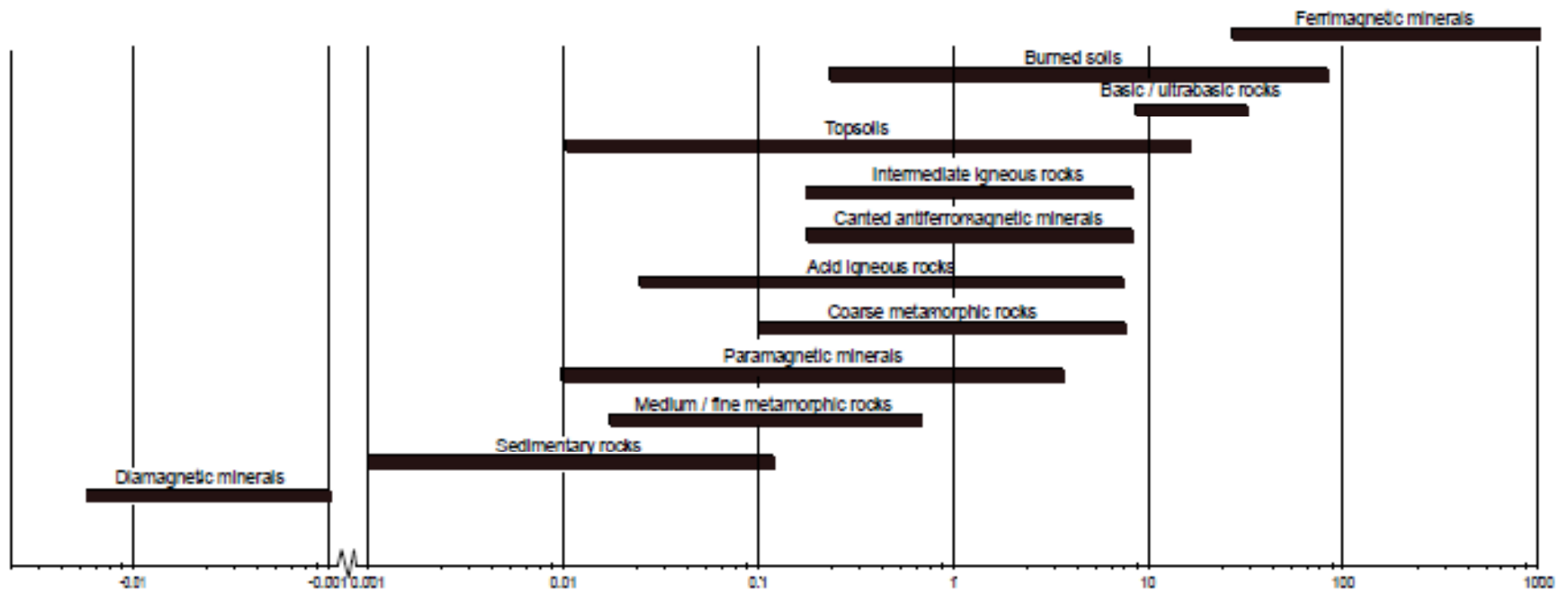
Susceptibilidad inicial

- Es la medida habitualmente a campos bajos , típicamente 200 A/m.
- La variación con frecuencia, temperatura o campo da indicios de la mineralogía magnética.
- Variación frecuencia → Superparamagnéticos
- Variación temperatura → Paramagnéticos, Transición de Verwey, Transición de Morín, Puntos de Curie, pico Hopkinson.
- Variación campo → Pirrotina, Titanomagnetita

Susceptibilidad magnética de los diferentes componentes de un suelo

1	2	3	4	5
Mineral/material	Fraction	χ_{f} $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	Component χ_{f} $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	% Fraction total χ_{f}
Magnetite	0.001	500	0.5	85.4
Goethite	0.099	0.5	0.0495	8.5
Paramagnetic minerals	0.75	0.05	0.0375	6.4
Organics, quartz, sand and water	0.15	-0.01	-0.0015	-0.3
Total	1.0	500.54	0.5855	100.0

Escala relativa de susceptibilidades



Mineral/Material	Formula	Iron (%)	Mass specific magnetic susceptibility ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1}$)
Ferromagnetic metals			
Iron	αFe	100	276000
Cobalt	Co		204000
Nickel	Ni		68850
Ferrimagnetic			
Magnetite	Fe_3O_4	72	513-1116
(0.012-0.069 μm)			500-1000
(0.09-2000 μm)			596 \pm 77
(1-250 μm)			440-716
			390-580
Maghemite	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	70	410, 440
			286-371
Titanomagnetite	$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{TiO}_4$		169-290
Titanohaematite	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeTiO}_3$		281-315
Pyrrhotite	Fe_7S_8		50, 53
Greigite	Fe_3S_4		
(Canted) antiferromagnetic			
Hematite	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	70	1.19-1.69
			0.58-0.78
			0.49-0.65
			0.27, 0.31, 0.6, <0.63
Goethite	αFeOOH	63	0.35, 0.38, 0.7, <1.26
Paramagnetic (20 °C)			
Ilmenite	FeTiO_3	37	1.7, 2
Ulvospinel	Fe_2TiO_4		
Olivine	$4[(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4]$	<55	0.01-1.3
Siderite	FeCO_3	48	1.0
Biotite	Mg,Fe,Al silicate	31	0.05-0.95

Variación de la susceptibilidad con frecuencia

$$\chi_{fd} \% = 100 \times [(\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}]$$

Diferencia porcentual de Susceptibilidad con la frecuencia.

lf = low frequency (460 Hz)

hf = high frequency (4600 Hz)

La variación de
susceptibilidad con la
frecuencia , permite
identificar granos
ferrimagnéticos
ultrafinos SP (< 0.03
 μm)

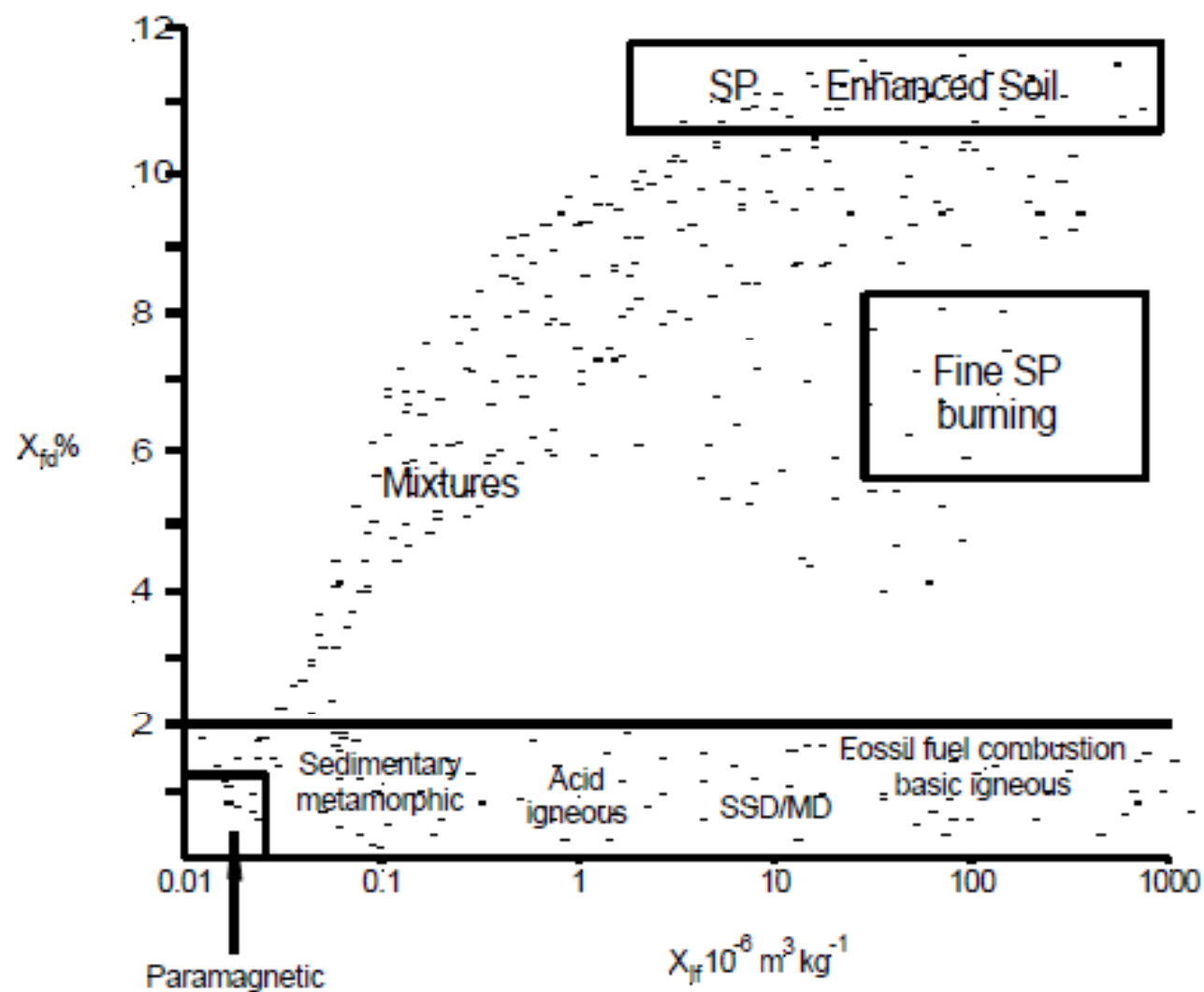


Figure 2.4 A schematic χ_{if} - χ_{fd} % scattergram showing typical positions of samples dominated by various domains and sources.

Table 2.6 Interpretation of frequency dependent susceptibility values. Where $\chi_{fd} \% > 10\%$ use χ_{fd} (mass specific) as an estimate of SP concentration.

Low $\chi_{fd} \%$	< 2.0	virtually no (< 10%) SP grains
Medium $\chi_{fd} \%$	2.0-10.0	admixture of SP and coarser non-SP grains, or SP grains <0.005 μm
High $\chi_{fd} \%$	10.0-14.0	virtually all (>75 %) SP grains
Very high $\chi_{fd} \%$	>14.0	rare values, erroneous measurement, anisotropy, weak sample or contamination

En la mayoría de los suelos de Argentina, a temperatura ambiente, se observa una pequeña variación de la susceptibilidad en función de la frecuencia

ARM= Magnetización remanente anhistérica

- Es la magnetización adquirida “sin histéresis”. La muestra es sometida simultáneamente a un campo AF y a un campo constante del orden de magnitud del campo terrestre. Se define entonces la susceptibilidad ARM:

$$\chi_{ARM} = M_{ARM} / \text{Campo Constante}$$

Es muy sensible para las partículas SD y Superparamagnéticas.

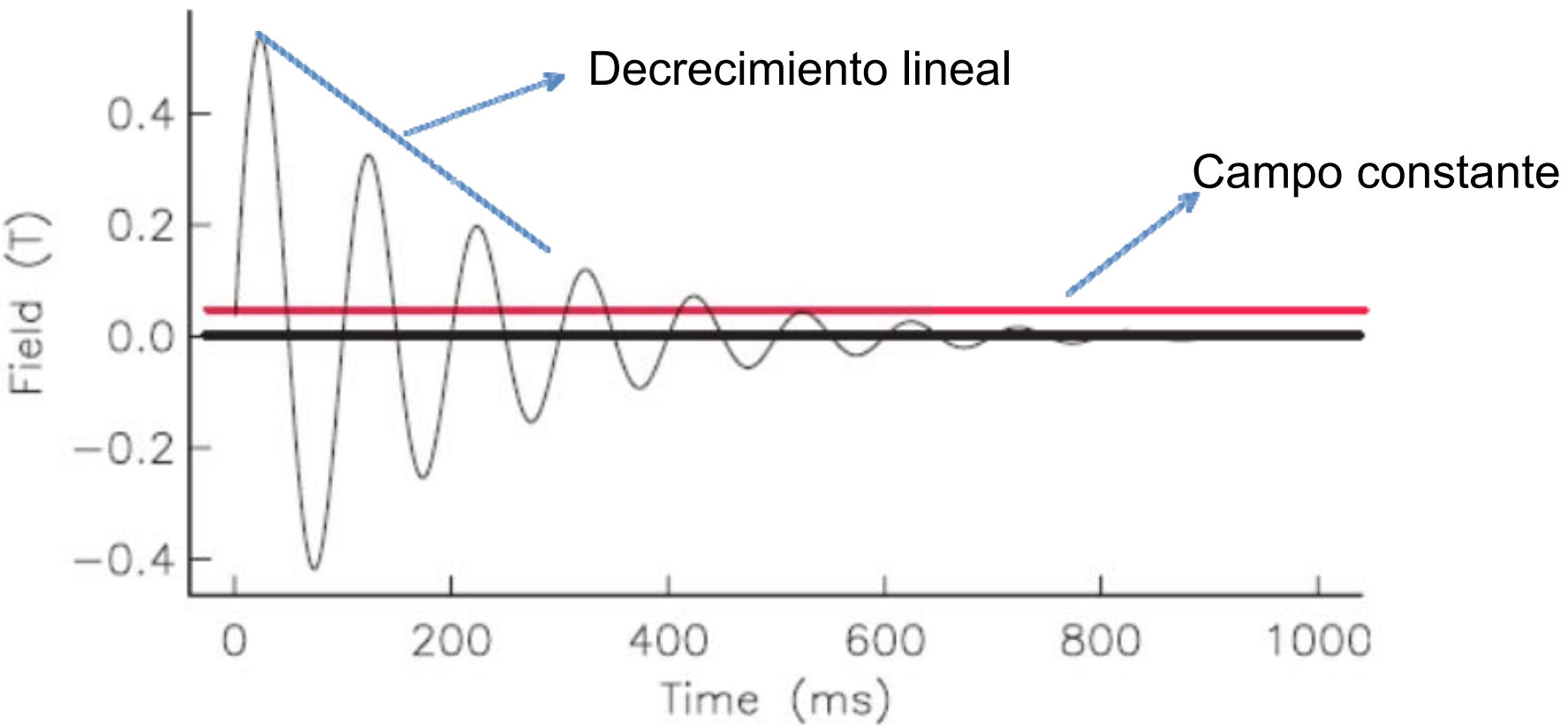


Figure 5.16: Acquisition of ARM in alternating magnetic field.

Ejemplo de Bi-Plot : ARM vs Susceptibilidad

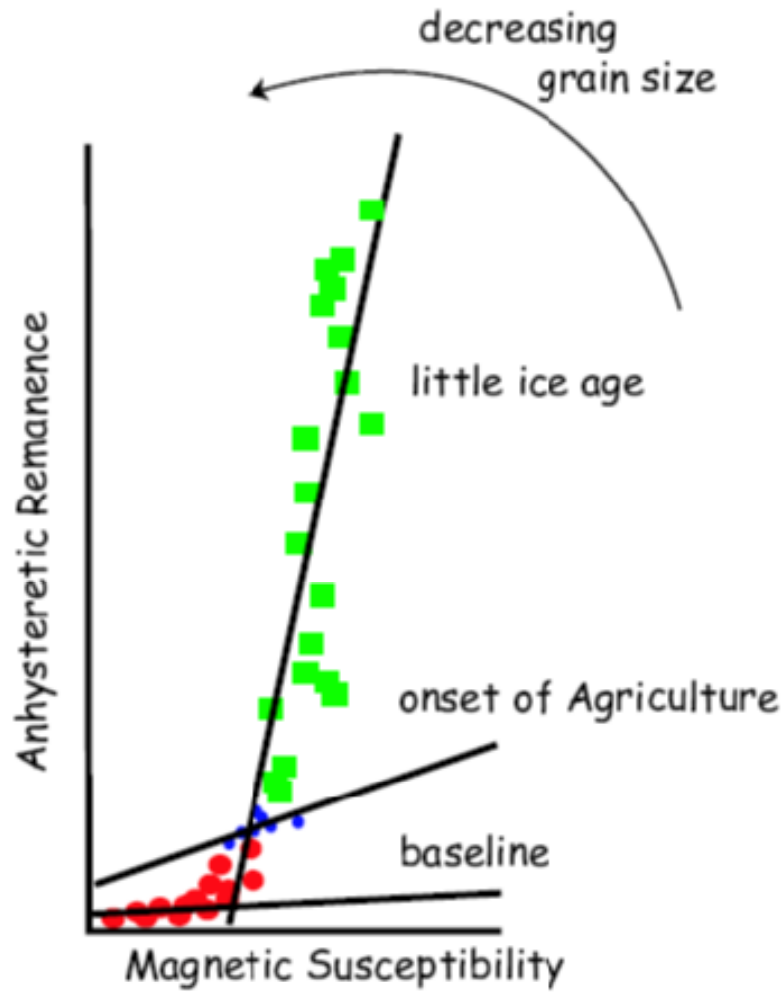


Figure 8.16: Plot of ARM versus magnetic susceptibility for a core from Minnesota. The different slopes are correlated with major climatic and anthropogenic events during the Holocene. (Redrawn from Banerjee et al., 1981).

Susceptibilidad de ARM

- Se denomina susceptibilidad de ARM:
- $\chi_{\text{ARM}} = \text{Magnetización} / \text{Campo DC}$

Tamaño de grano, Susceptibilidad y Susceptibilidad ARM

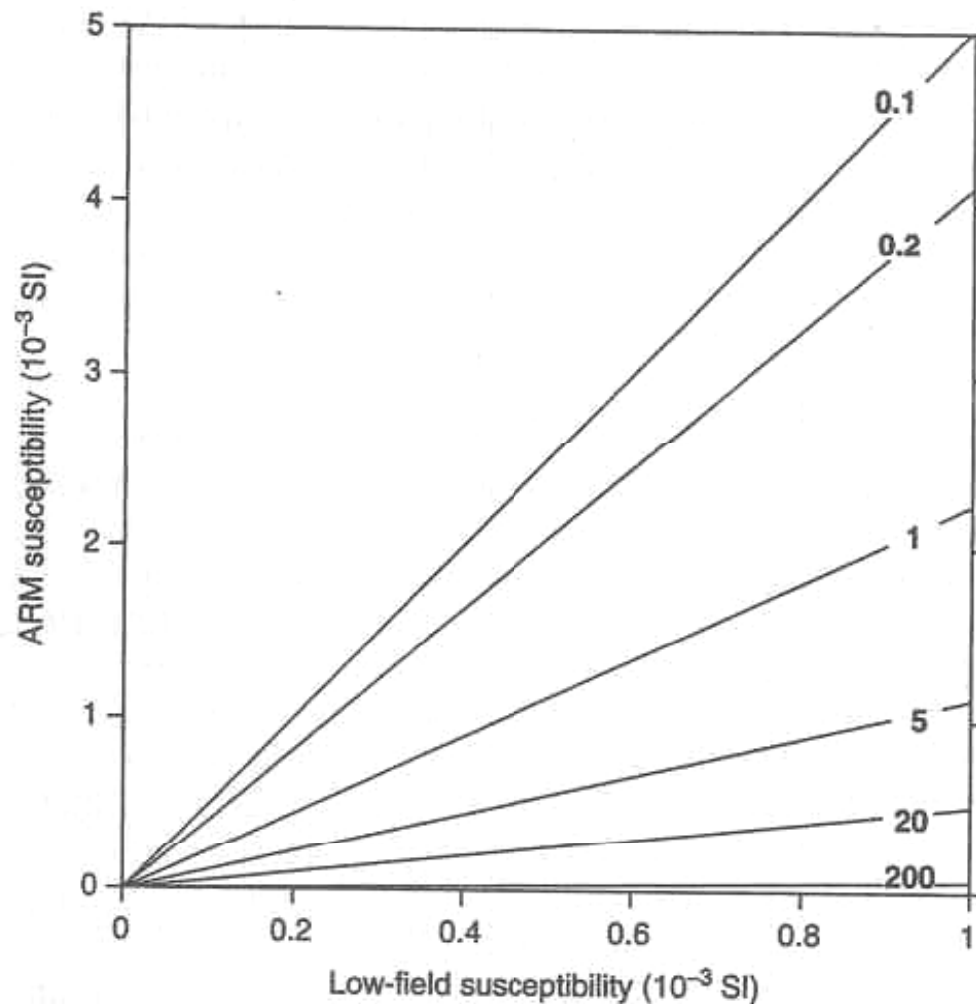


Figure 2.8 Relationship between ARM susceptibility (κ_{ARM}) and low-field susceptibility (κ_{lf}) for magnetite particles of different size (given in microns). (Adapted from King *et al.*, 1982.) © Elsevier Science, with permission of the publishers.

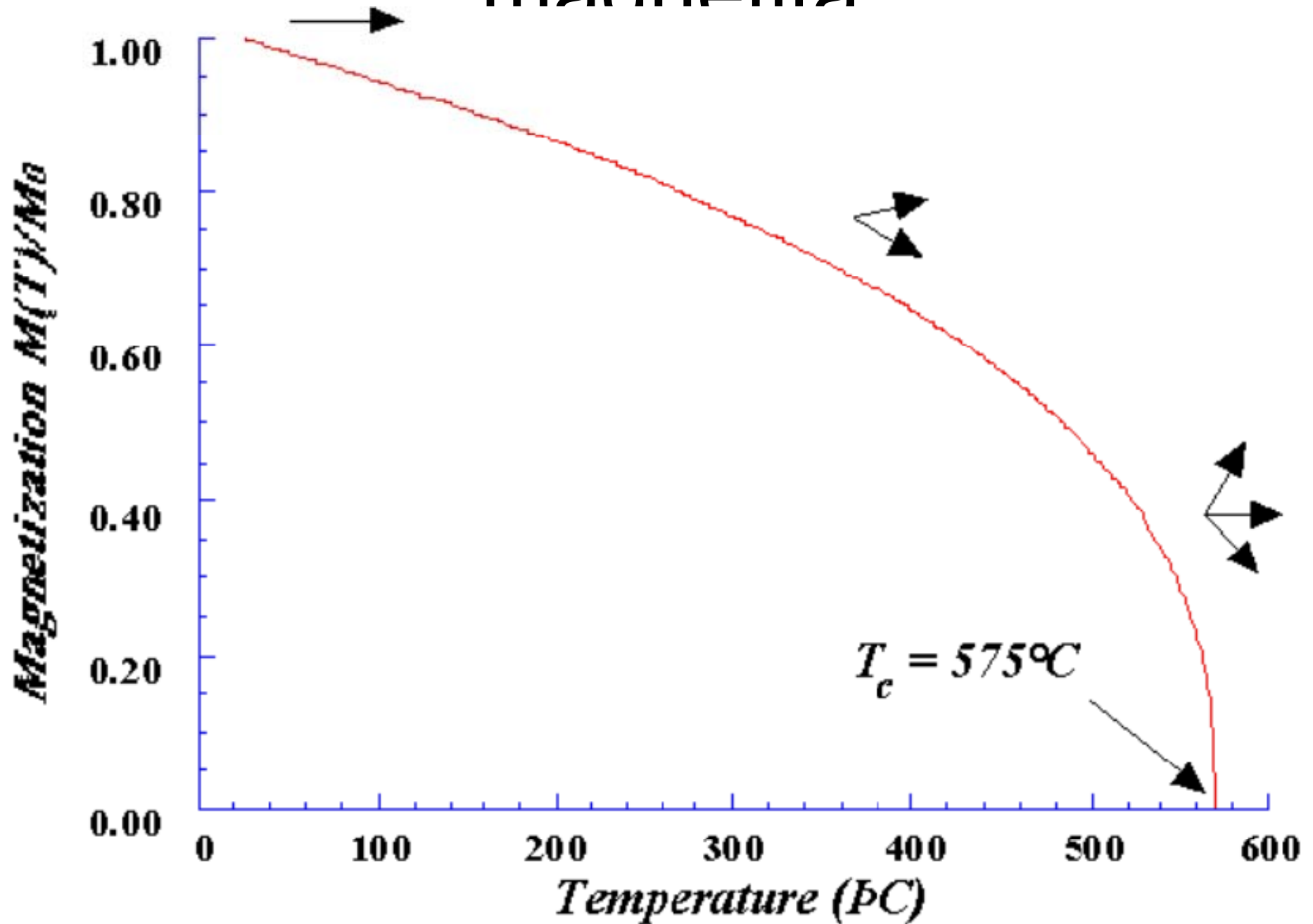
Temperatura de Curie y temperatura de bloqueo

- La temperatura de bloqueo es aquella para la cual los granos SD pasan a ser superparamagnéticos. En los SD depende del volumen de las partículas. En los MD, si bien el proceso es más complejo, también se observa. Las temperaturas de bloqueo se asocian al espectro de fuerzas coercitivas. A mayor “dureza” (alta fuerza coercitiva) mayor T bloqueo. La temperatura de Curie es única para una dada sustancia, a esta temperatura todas las partículas se vuelven paramagnéticas.

Variación de susceptibilidad con temperatura

- Altas temperaturas: Puntos de Curie – Pico Hopkinson (SD: Magnetita- Hematita).
Paramagnéticos ($1/T$)
- Bajas temperaturas: Transición de Verwey (Magnetita MD)- Transición de Morín (hematita especularita)- Paramagnéticos ($1/T$)

Temperatura de Curie en magnetita



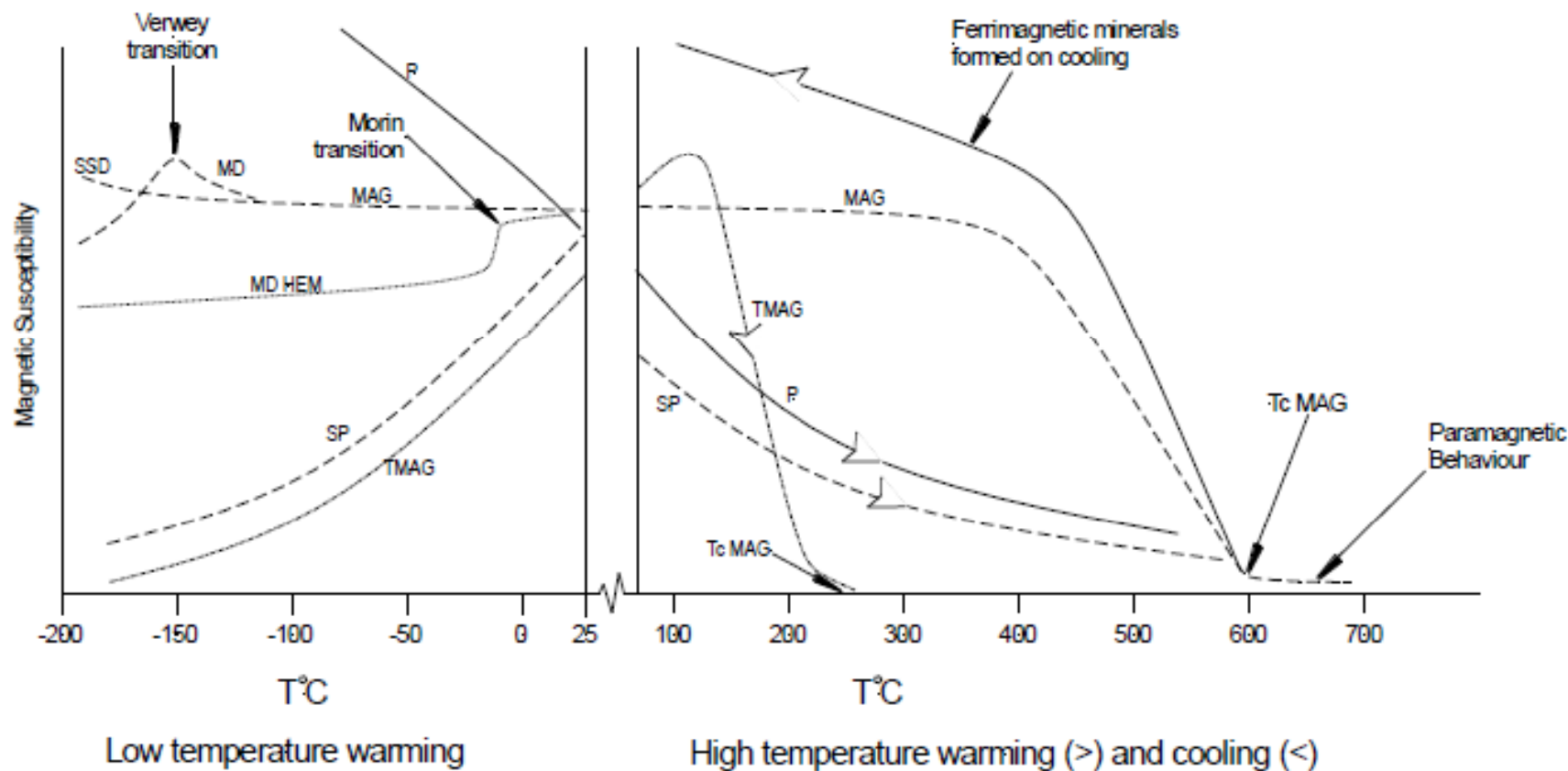


Figure 2.6 Schematic trends and transitions of κ_f values from -196°C (liquid nitrogen) to +700°C for different minerals and domains; superparamagnetic (SP), stable single domain (SSD), multidomain (MD), paramagnetic (P), magnetite (MAG: T_c 580°C), titanomagnetite (TMAG: T_c 250°C); haematite (HEM). Susceptibility axis not to scale. (based on Thompson and Oldfield 1986).

Table 2.7 Curie and Néel temperatures of iron and common Fe-bearing minerals

Curie temperatures (T_C) (ferro -para)	
Iron	770°C
Magnetite	580°C
Maghemite	600°C
Titanomagnetites	580°C (magnetite) to -153 °C (ulvospinel)
Pyrrhotite	320°C
Greigite	330°C
Néel temperatures (T_N) (antiferro-para)	
Goethite	120°C (60-170°C)
Haematite	675°C
Titanohaematites	675°C (haematite) to -218°C (ilmenite)
Lepidocrocite	-196°C

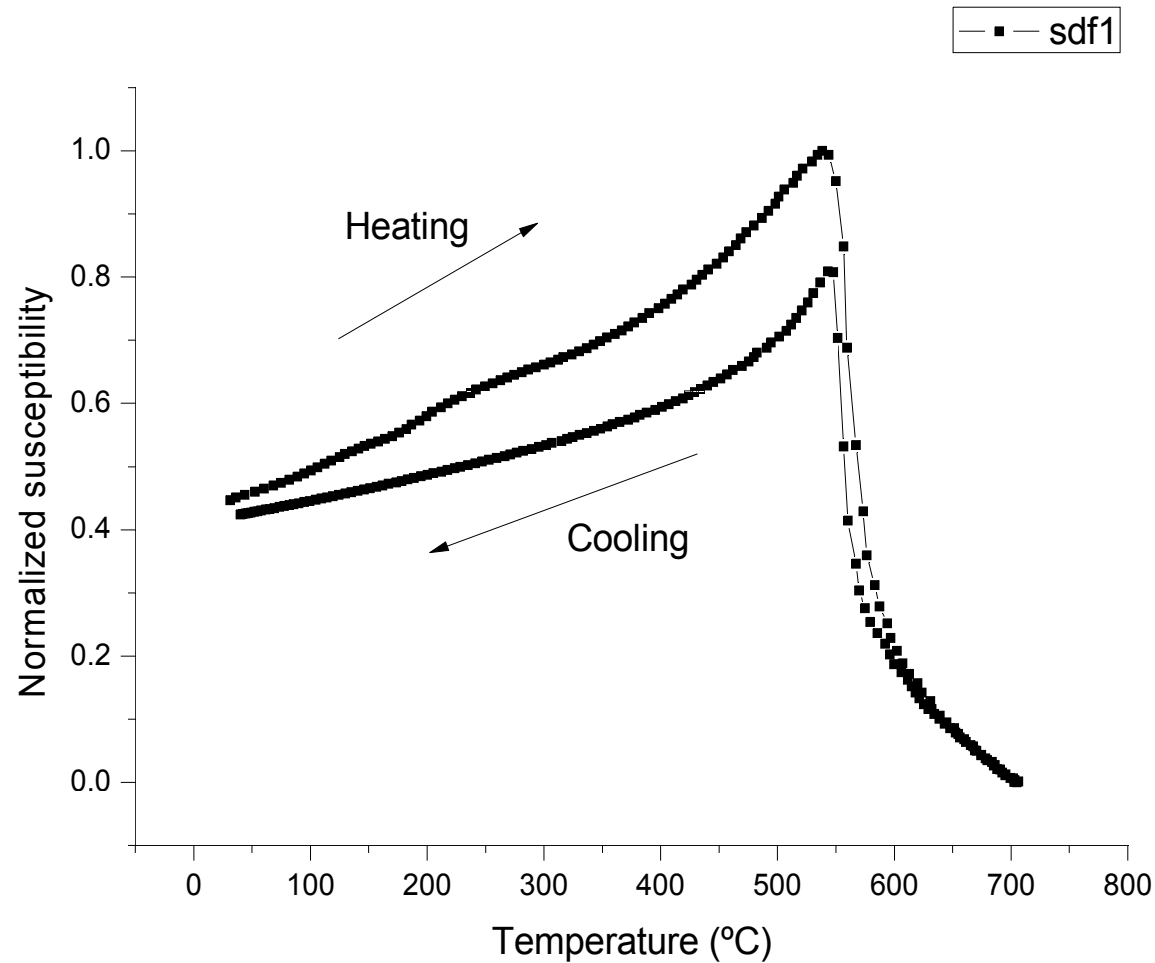
Table 2.8 Common high temperature mineral transformations

Maghemite	Changes to haematite at ~300°C (loss of susceptibility)
Lepidocrocite	Changes to maghemite at 250-350°C (gain of susceptibility)
Goethite	Dehydrates to haematite at 300-400°C (little change in susceptibility)
Para-antiferro	Reduction/oxidation to magnetite/maghemite on cooling from ~600°C (gain in susceptibility)

El Pico Hopkinson

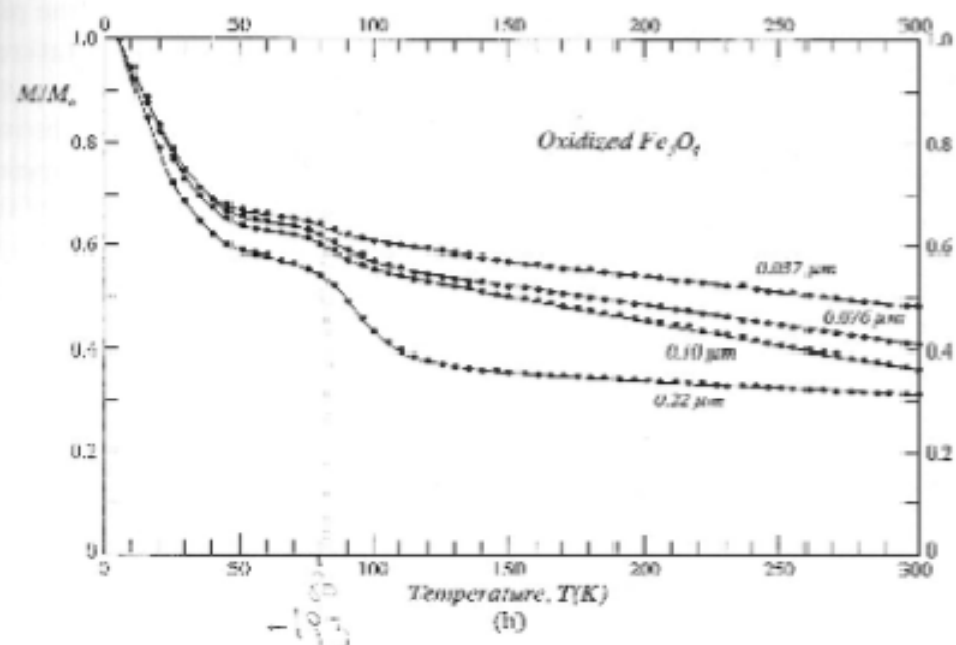
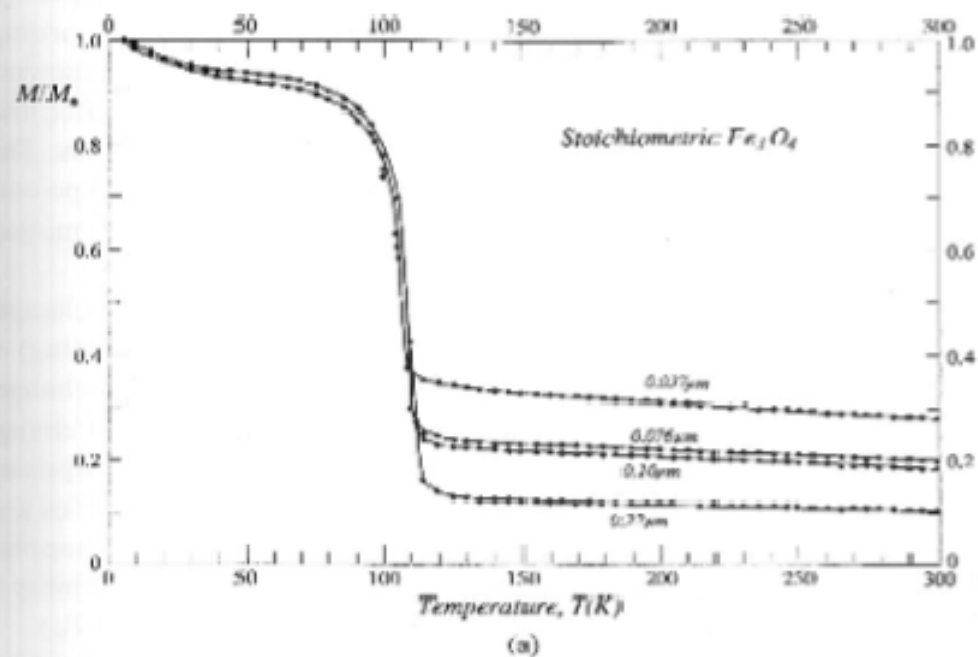
- El pico Hopkinson se produce debido a una disminución más rápida a cero de la magnetización que el de la anisotropía magnética a medida que aumenta la temperatura. Se observa justo antes de la temperatura de Curie para las sustancias magnéticas dominio simple.

Ejemplos de pico Hopkinson Magnetita SD



Transición de Verwey

- Sólo se observa en la magnetita MD. Es un indicador claro de la presencia de este mineral.
- Aparece alrededor de los ~ 120 K ($\sim (-153^{\circ}\text{C})$).
- La oxidación (maghemitización) “ensancha” la señal.
- Aparece tanto en las curvas de variación de susceptibilidad con la temperatura como en las de magnetización versus temperatura.



Dependencia de T_c de Titanohematitas con composición

40 3 Enviromagnetic Minerals

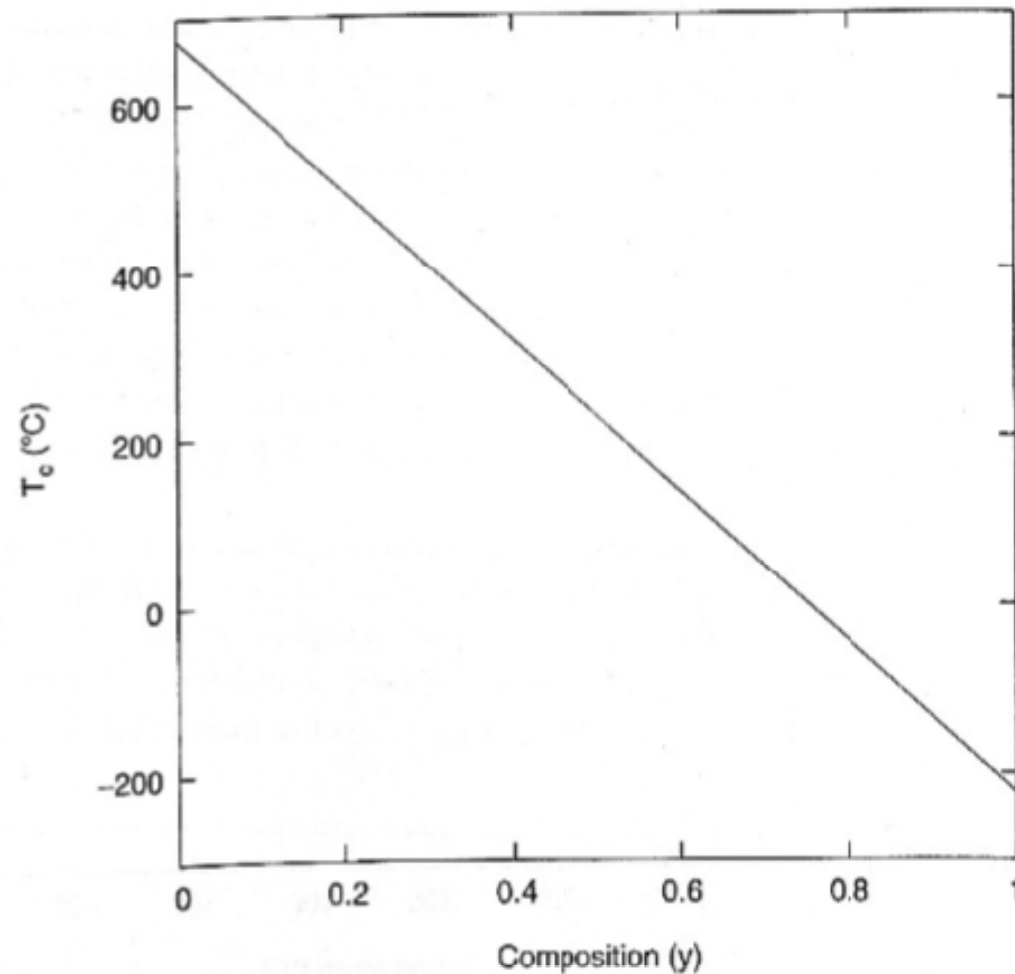


Figure 3.7 Curie point dependence on Ti content (y) in the titanohematites.

Dependencia Tc titanomagnetitas con composición

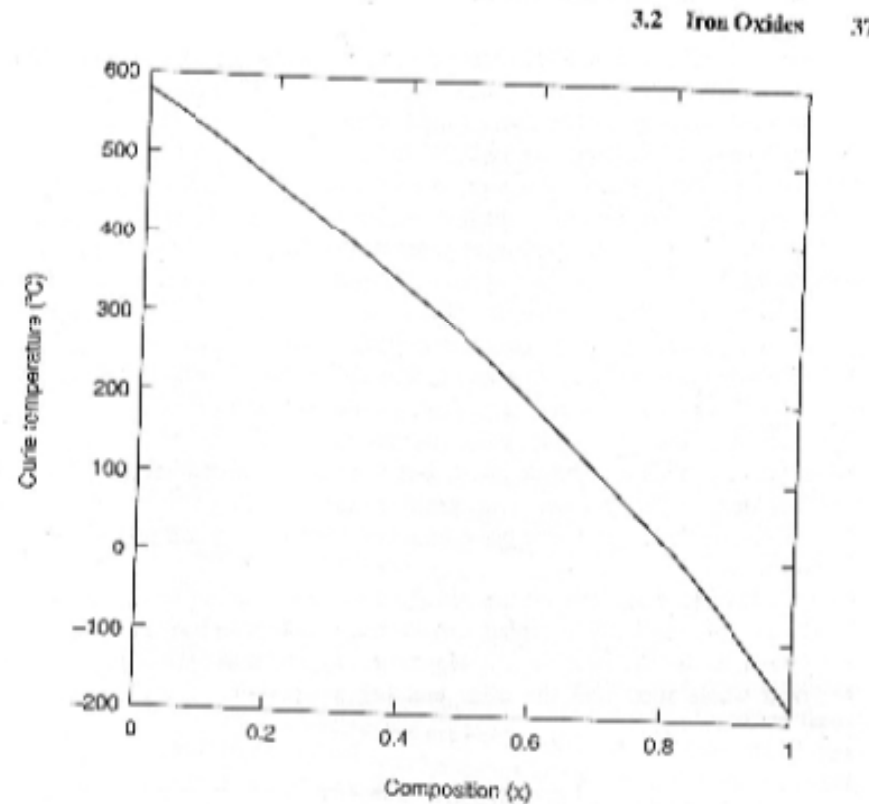


Figure 3.4 Curie point dependence on Ti content (x) in the titanomagnetites.

4. Curie point dependence on Ti content (x) in the titanomagnetites.

Propiedades magnéticas de minerales

Mineral	Composition	Magnetic Order	T _c (°C)	M _s (Am ² /kg)
Magnetite	Fe ₃ O ₄	ferrimagnetic	575-585	90-92
Ulvospinel	Fe ₂ TiO ₂	AFM	-153	
Hematite	□Fe ₂ O ₃	canted AFM	675	0.4
Ilmenite	FeTiO ₂	AFM	-233	
Maghemite	□Fe ₂ O ₃	ferrimagnetic	~600	~80
Pyrrhotite	Fe ₇ S ₈	ferrimagnetic	320	~20
Greigite	Fe ₃ S ₄	ferrimagnetic	~333	~25
Troilite	FeS	AFM	305	

Identificación mineralógica

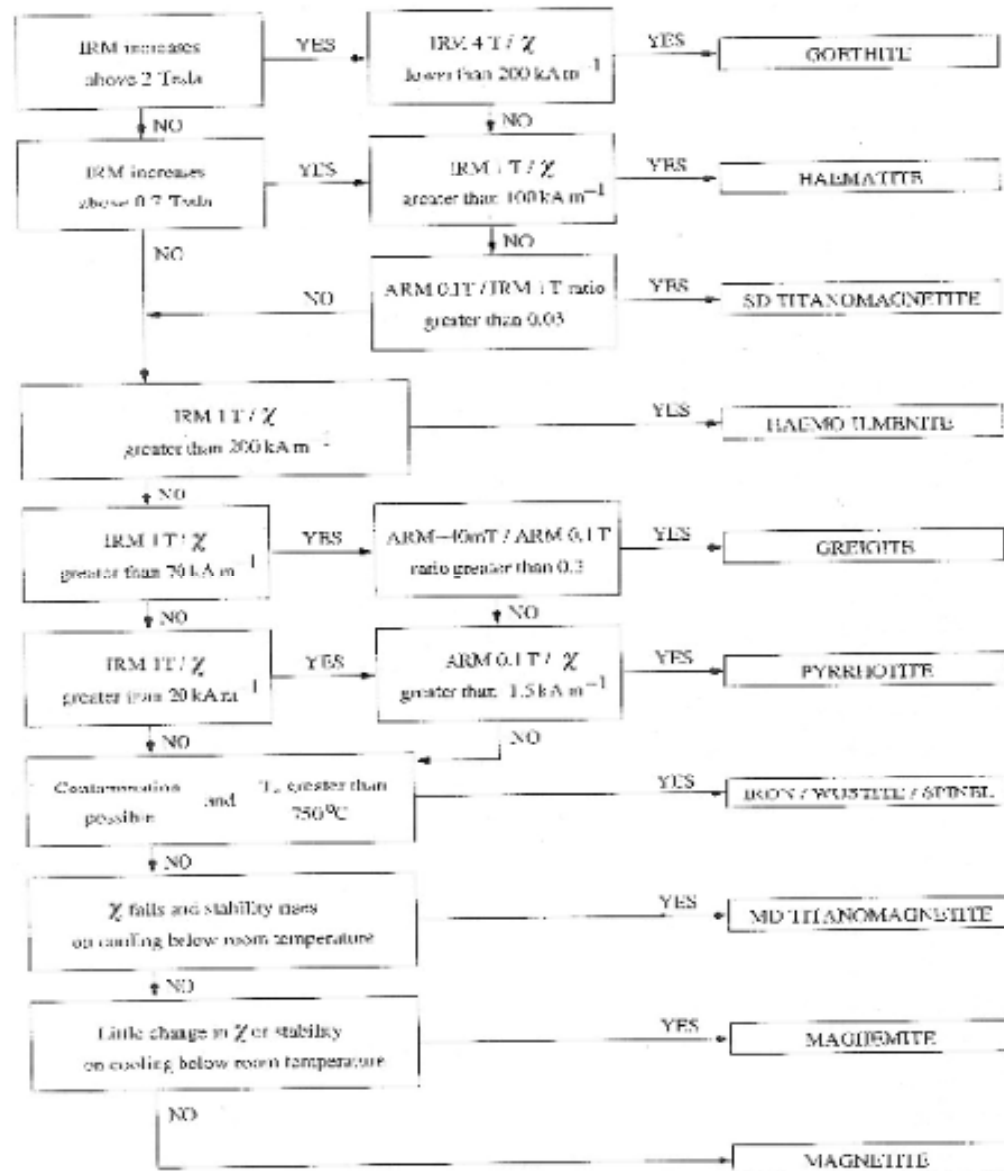
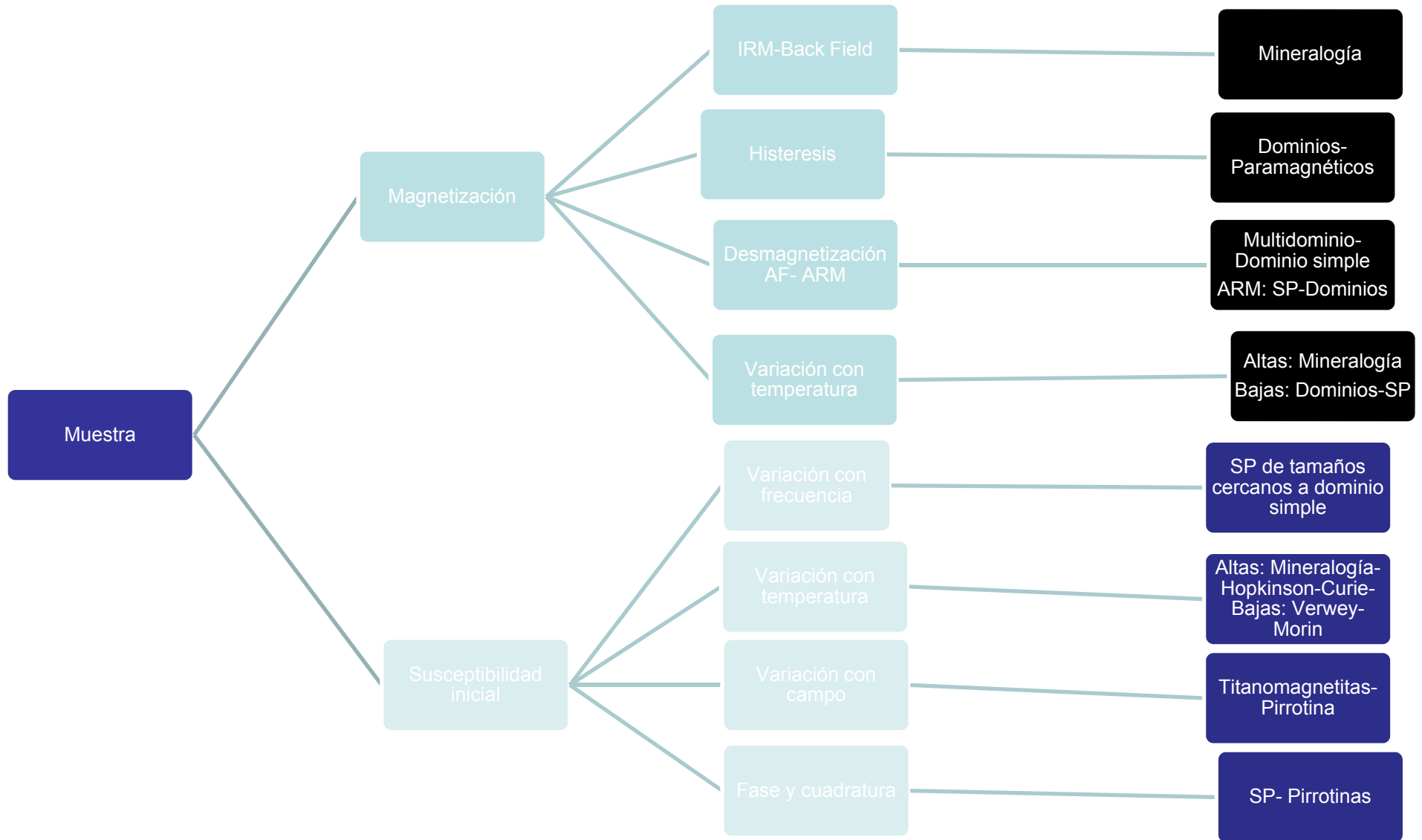


Figure 1.7. A flow chart showing how a small number of magnetic measurements can be used to discriminate between the main magnetic minerals found in most natural samples.

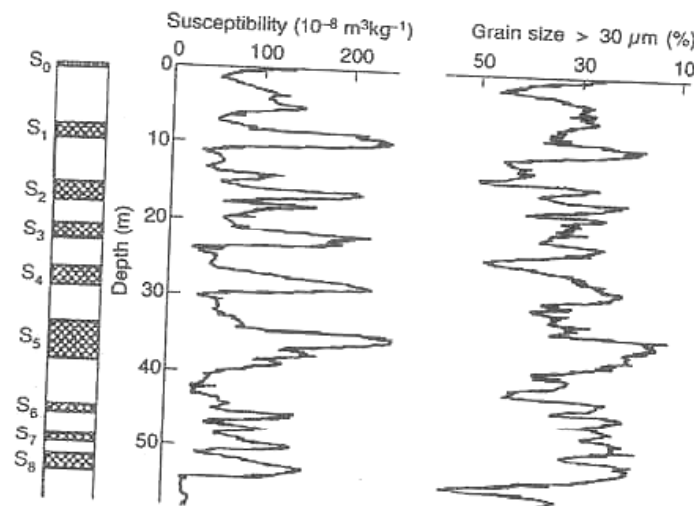
Propiedades magnéticas



Susceptibilidad en Suelos

Box 5.4 Magnetic Enhancement

The accompanying figure illustrates the increase in magnetic susceptibility caused by the formation of a soil from a preexisting substrate. In this particular case, the starting material is windblown silt (loess, white fields in lithology column) in China. The entire package of sediments is constituted by an alternation of loess and soil layers; the soils are covered by younger loess and hence are called paleosols (hatched areas in lithology column). Also plotted is the stratigraphic variation in sediment grain size, which is also diagnostic, loess being systematically coarser than paleosol. The grain size gives information about the wind regime during deposition, whereas susceptibility reflects detrital magnetic input *and* influence of alteration processes after deposition of the eolian material.



Loess/paleosol section at Luochuan (from Lu *et al.*, 1999b).
© John Wiley & Sons Limited. Reproduced with permission.

Presentación de parámetros magnéticos en suelos

70 4 Measurement and Techniques

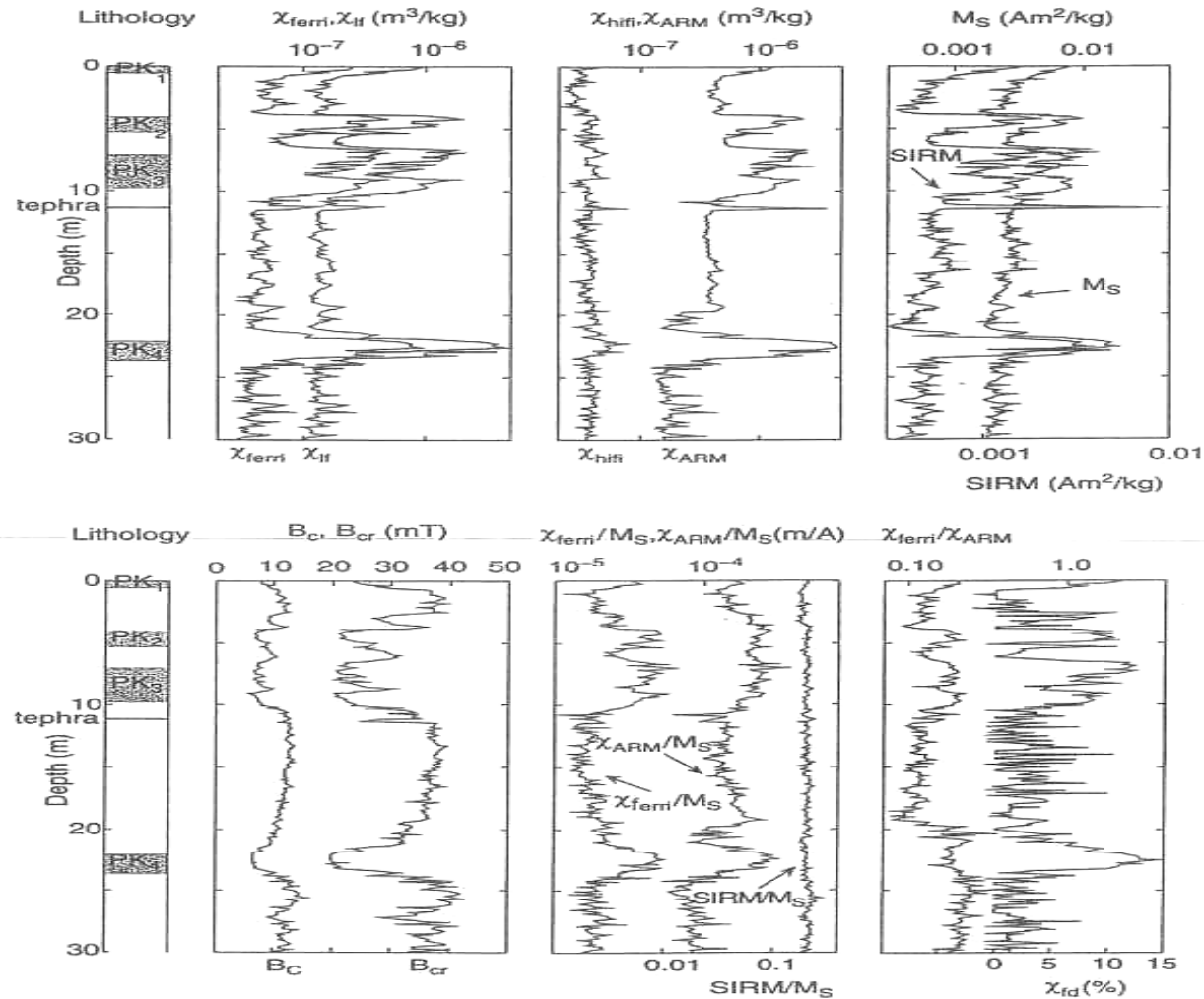


Figure 4.13 Magnetic parameters measured throughout the upper 30 m of the loess section of Roxolany (Black Sea, Ukraine). Lithological variations between loess (white) and paleosols or pedocomplexes (PK, gray) are shown schematically. (Top) Concentration-dependent parameters: low-field susceptibility

(χ_{lf} , measured at 470 Hz using a Bartington MS2 meter), high-field susceptibility (χ_{hif} , measured using the induction coercivity meter described in Fig. 4.11), ferrimagnetic susceptibility χ_{ferri} , ARM susceptibility χ_{ARM} , saturation magnetization M_s , and saturation isothermal remanent magnetization SIRM (acquired in a field of 0.3 T). (Bottom) Concentration-independent coercive force B_c and coercivity of remanence B_{cr} and normalized magnetization ratios such as ferrimagnetic susceptibility over saturation magnetization χ_{ferri}/M_s , anhysteretic susceptibility over saturation magnetization χ_{ARM}/M_s , saturation isothermal remanent magnetization over saturation magnetization $SIRM/M_s$, ferrimagnetic susceptibility over ARM susceptibility χ_{ferri}/χ_{ARM} , and frequency-dependent low-field susceptibility $\chi_{fd} = 100(\chi_{470\text{ Hz}} - \chi_{4.7\text{ kHz}})/\chi_{470\text{ Hz}}$. These ratios indicate variations in type and grain size of the carrier minerals.

Las máquinas

- Susceptibilímetros
- Magnetómetros
- Magnetómetros de Ciclos de histéresis
- Magnetómetros de ultrabajas temperaturas

Susceptibilimetro-AMS



Susceptibilímetro-variación temperatura



Magnetómetro rotativo



Desmagnetizador AF-ARM



Susceptibilímetro Bartington

- MS2



Magnetómetro criogénico 2G

- 755SRM



MPMS: Magnetic Property Measurement System

- Quantum Design



LakeShore

- VSM



MicroMag (Princeton Measurements Corporation): VSM y AGM

- Dos en uno: Magnetómetro de muestra vibrante y de gradiente de campo.

