

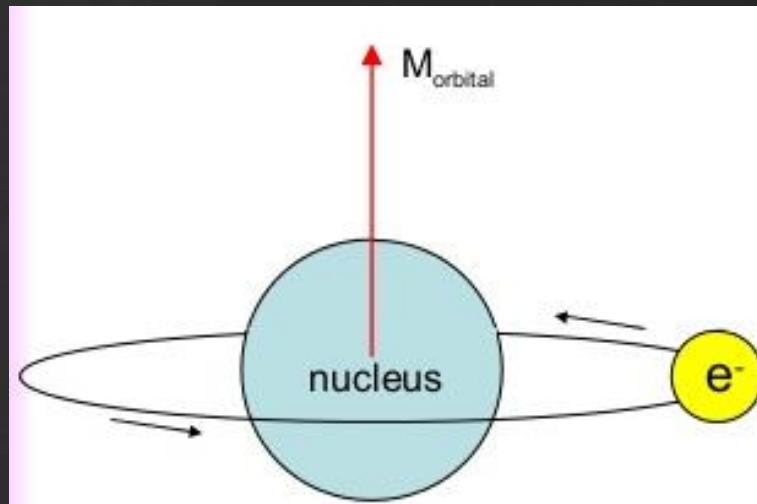
# O que é magnetismo de Rochas?

{ Uma breve introdução

- **Geomagnetismo**
  - Estudo do campo magnético da Terra, variações de período curto e suas origens.
- **Paleomagnetismo**
  - Estudo do campo magnético da Terra em escala geológica, registrado na magnetização natural, presente em minerais com propriedades magnéticas.
- **Magnetismo de Rochas**
  - Estudo dos princípios físicos e químicos do paleomagnetismo.
  - Caracterização das estruturas cristalinas das rochas/sedimentos, mineralogia magnética e distribuição de grãos.

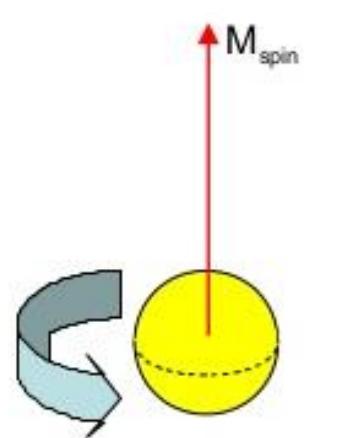
# Definições Básicas

## Momento magnético orbital



Orbital magnetic moment

## Momento magnético do Spin



Spin magnetic moment

Momento atômico = momento orbital + momento magnético do spin

# Magnetismo em materiais sólidos

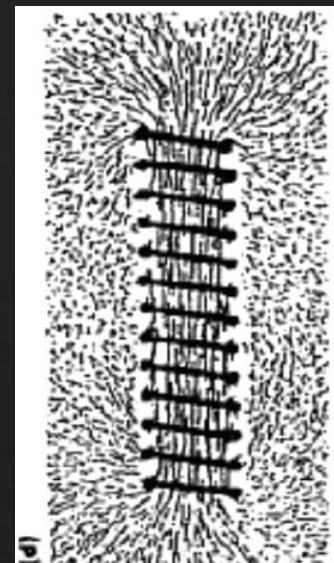
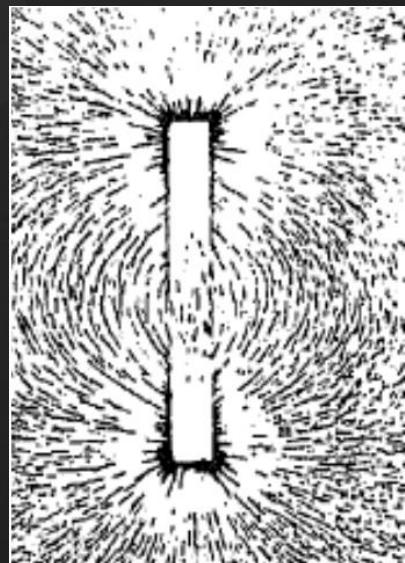
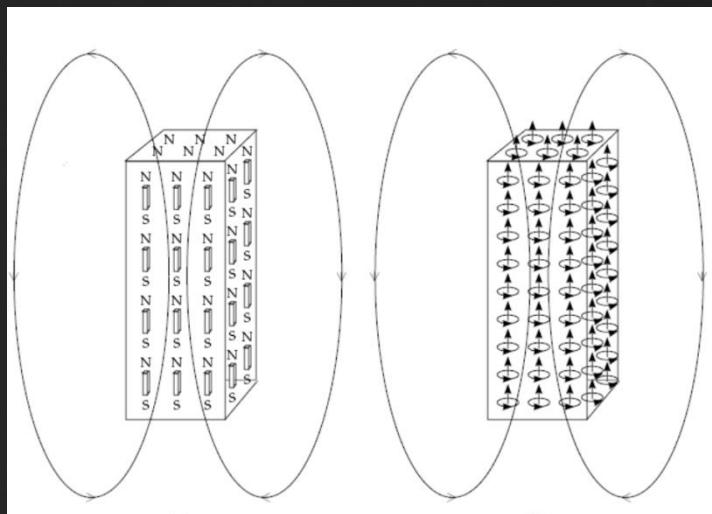
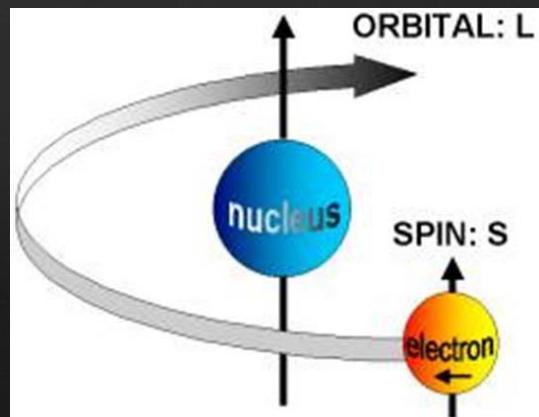
## Momentos de dipolos atômicos

Loops de corrente microscópicas.

$$\mathbf{m} = i\mathbf{A}$$

Momento magnético orbital é produzido por correntes elétricas associadas com o movimento do elétron em torno do núcleo.

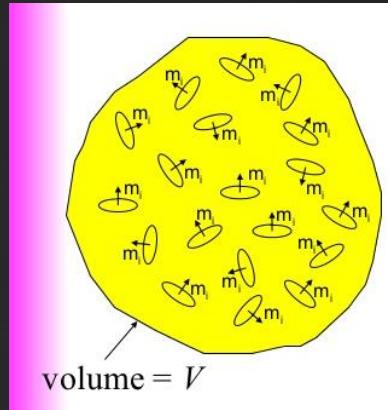
Momento magnético do spin é produzido por correntes elétricas associadas com o movimento de rotação do elétron em torno de si mesmo.



# Magnetização

É definida como a soma dos momentos magnéticos de um determinado volume.

$$M = \frac{\sum m}{V}$$

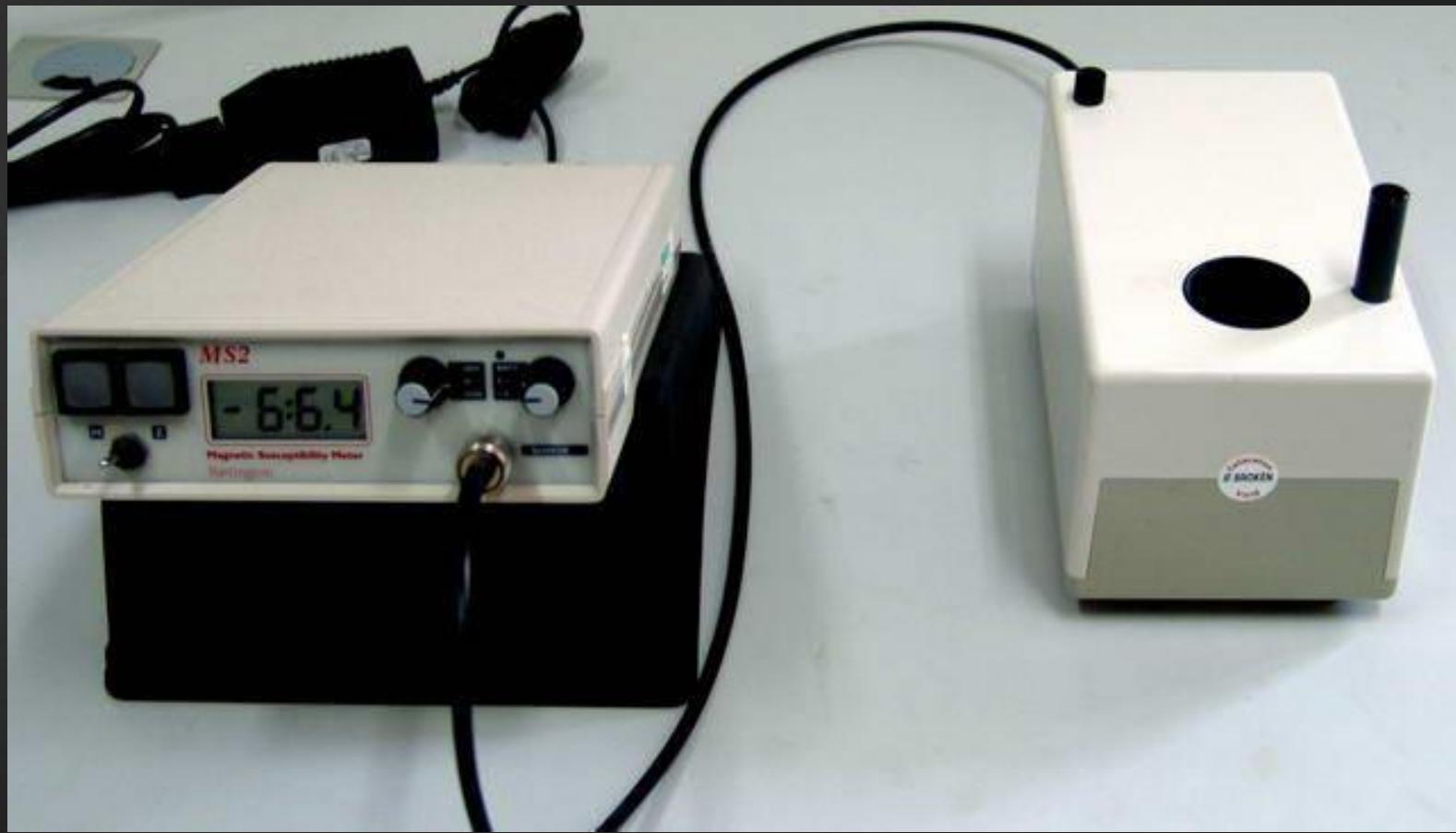


# Susceptibilidade Magnética

A aplicação de um campo magnético  $H$  em um material induz uma magnetização  $m$  neste material, a qual pode ser expressa pela relação:

$$M = \chi H$$

Onde  $\chi$  é uma propriedade física do material e é denominado susceptibilidade magnética. Ela representa a facilidade com que o material é magnetizado.



# O que torna o paleomagnetismo possível?

O ferro é o 4º elemento mais abundante da crosta.

O ferro tem a propriedade de magnetismo permanente.

## 1. Formas de registro

O ferro forma óxidos e sulfetos, dos quais alguns são minerais com propriedades magnéticas.

Óxidos de ferro são minerais acessórios comuns em rochas, sedimentos e solos (<1% do volume total)

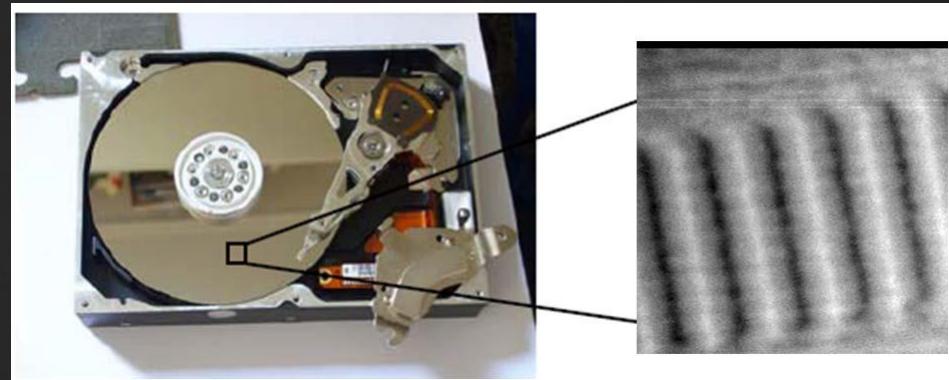
## 2. Processos de registro

O campo magnético da Terra pode ser registrado durante vários processos geológicos (magnetização química, deposicional, termoremanente, pós-deposicional)

# Como o magnetismo de rocha difere do estudo dos registradores magnético e imãs permanentes?

## 1. Disco Rígido (HD)

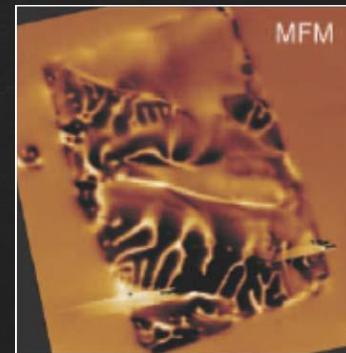
**Sistema magnético altamente ordenado desenvolvido para levar o conteúdo de informação máxima no menor espaço possível.**



## 2. Rochas

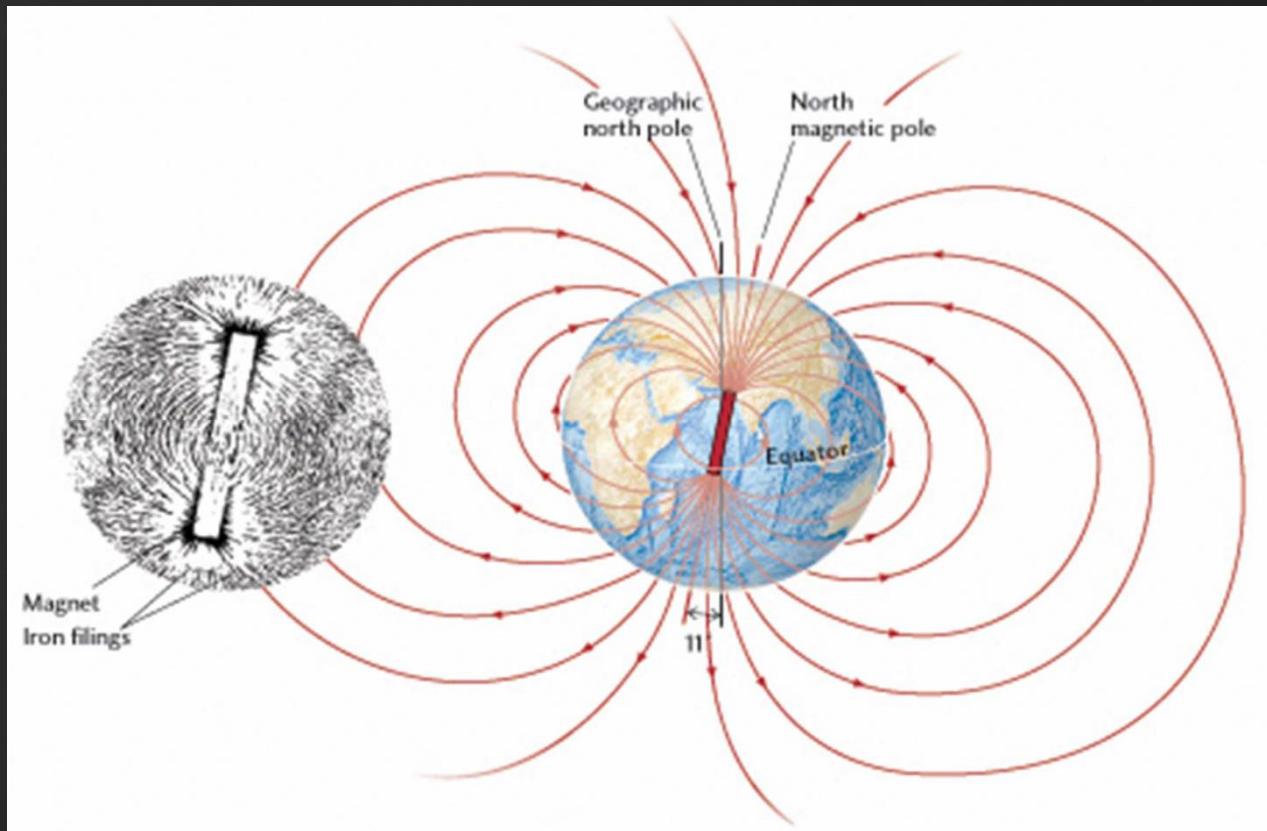
**Sistema desordenado de forma irregular com composição complexa, geometria e defeitos na rede cristalina.**

**Minerais magnéticos formal uma pequena fração na maioria das rochas (<1%).**



# Terra como um imã

O campo geomagnético na superfície é similar a um dipolo magnético.



# Classificação dos minerais magnéticos

1. Diamagnetismo
2. Paramagnetismo
3. Ferromagnetismo

# Classificação dos minerais magnéticos

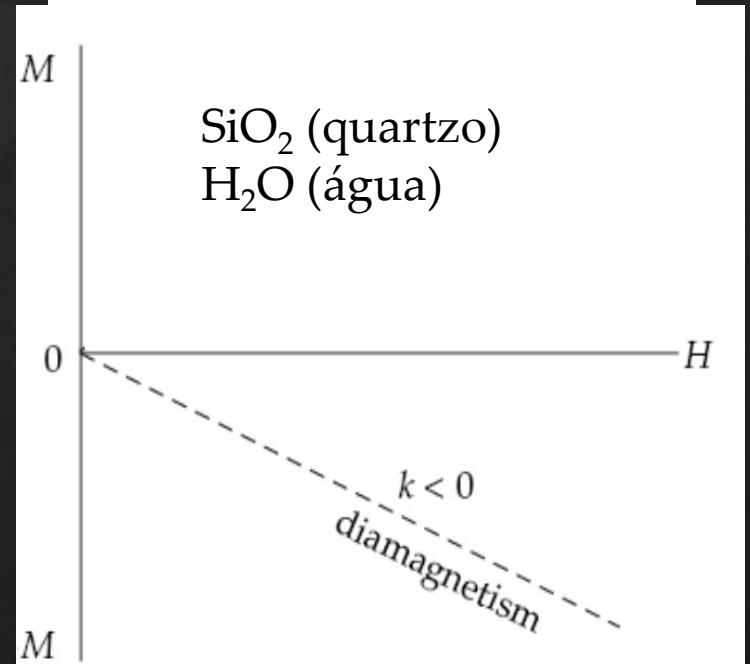
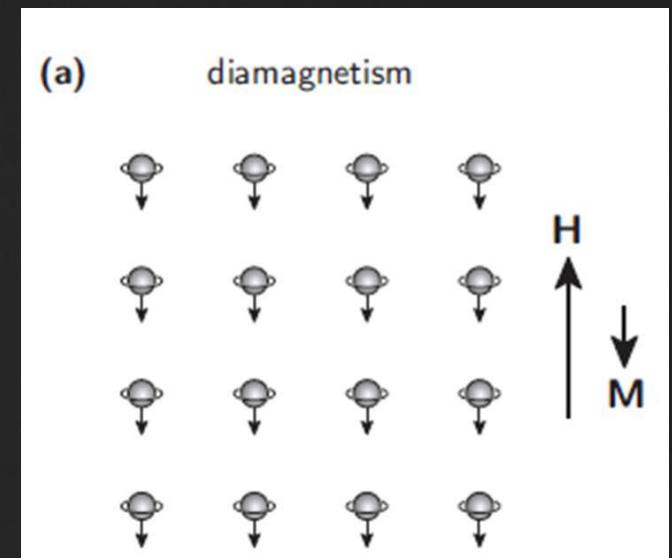
## 1. Diamagnetismo

Está associado ao movimento orbital dos elétrons.

Quando uma barra de ímã é aproximada de uma espira de corrente, surge uma corrente na espira, a qual cria um campo magnético que se opõe ao campo indutor do ímã. (Lei de Lenz)

Do mesmo modo, quando aplicamos um campo magnético  $H$  a um material a órbita do elétron é perturbada de modo a criar um campo que se opõe ao campo indutor.

Surge então, uma fraca magnetização que é oposta e proporcional ao campo aplicado.



## 2. Paramagnetismo

Os átomos tem momento de dipolo magnético intrínsecos, mas não interagentes entre si.

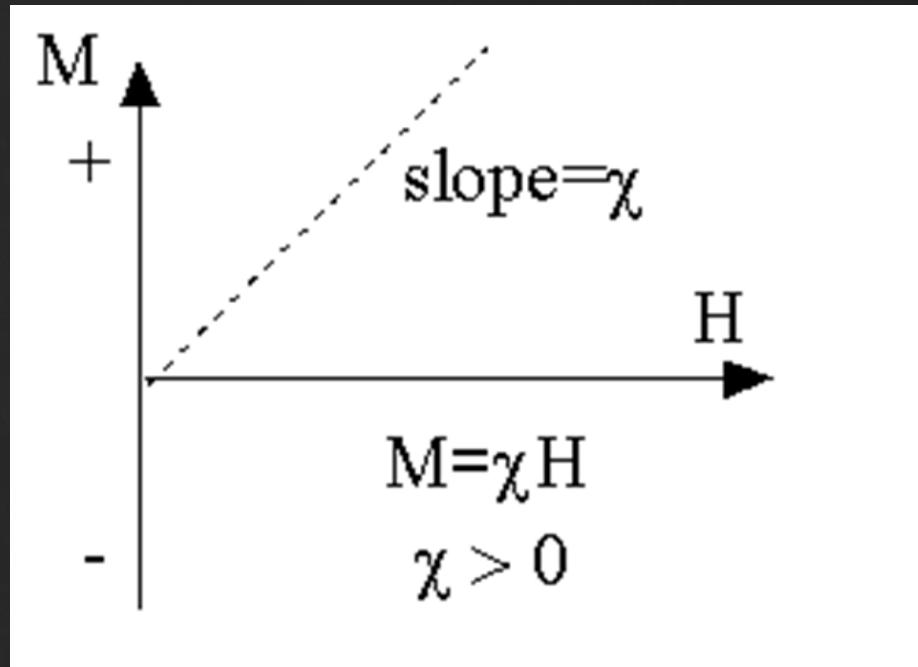
Essa propriedade ocorre em função da existência de átomos com momentos magnéticos, gerados pelos spins, que sofrem um torque na presença de um campo indutor, alinhando-se com o mesmo.

O que resulta num alinhamento com o campo externo e magnetização nula quando retira-se o campo indutor.



# Exemplos de Minerais

- Biotita  
 $(K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2$
- Piritita ( $FeS_2$ )
- Siderita ( $FeCO_3$ )



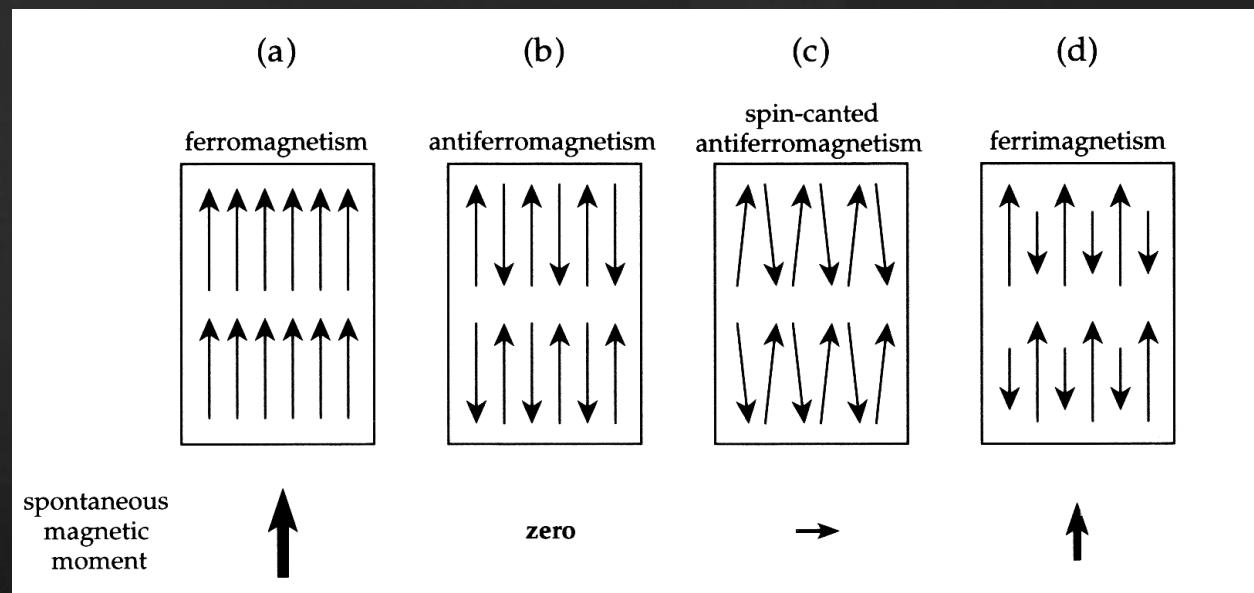
### 3. Ferromagnetismo

Os átomos ocupam posições próximas o suficiente para permitir uma forte interação de troca entre os átomos vizinhos – chamada de energia de troca.

Esta interação de troca produz um forte campo molecular dentro do material, o qual alinha os momentos magnéticos atômicos e produz uma magnetização espontânea ( $M_s$ ).

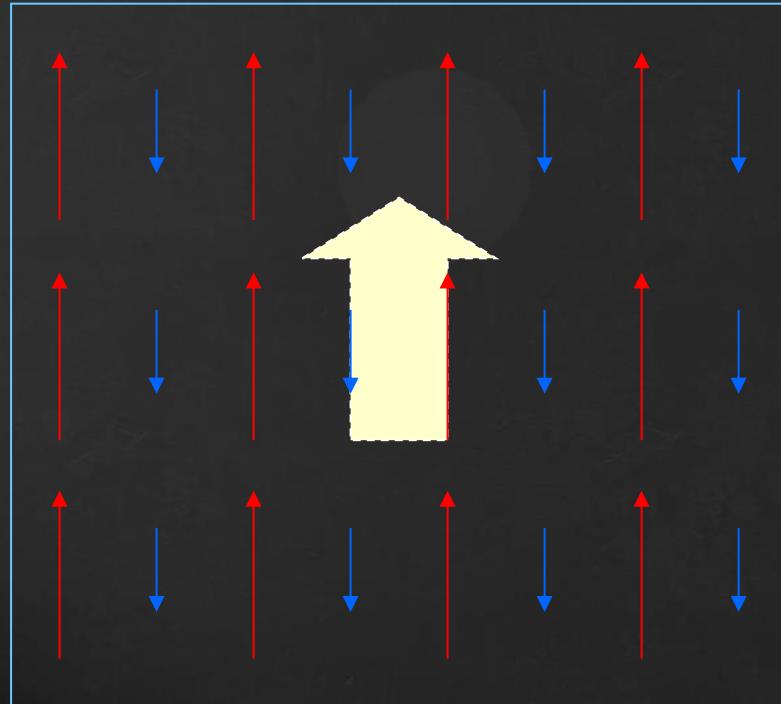
Estes materiais são chamados de **Ferromagnéticos** e interagem fortemente com campos magnéticos externos

Nos materiais ferromagnéticos, a interação de troca faz com que os momentos magnéticos se alinhem paralelamente (Fe)., Não existem minerais ferromagnéticos na natureza.



# Ferrimagnetismo

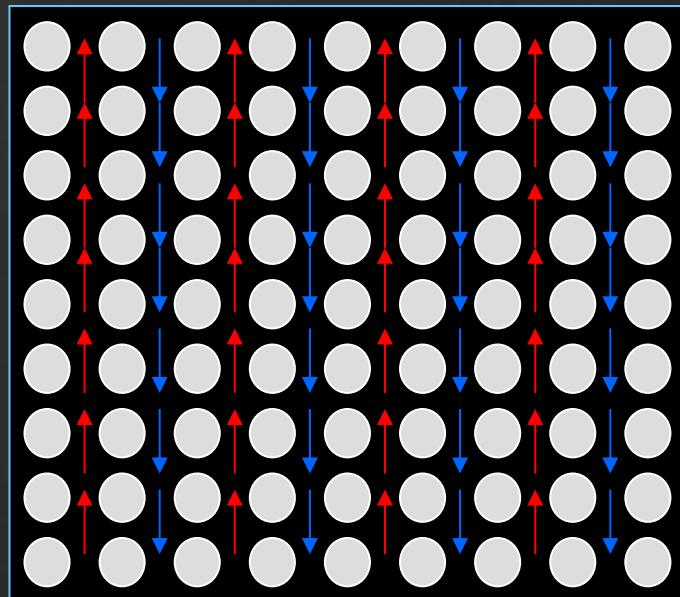
Átomos magnéticos interagindo fortemente com direções dos momentos magnéticos opostos e com uma magnetização espontânea não nula.



Magnetita

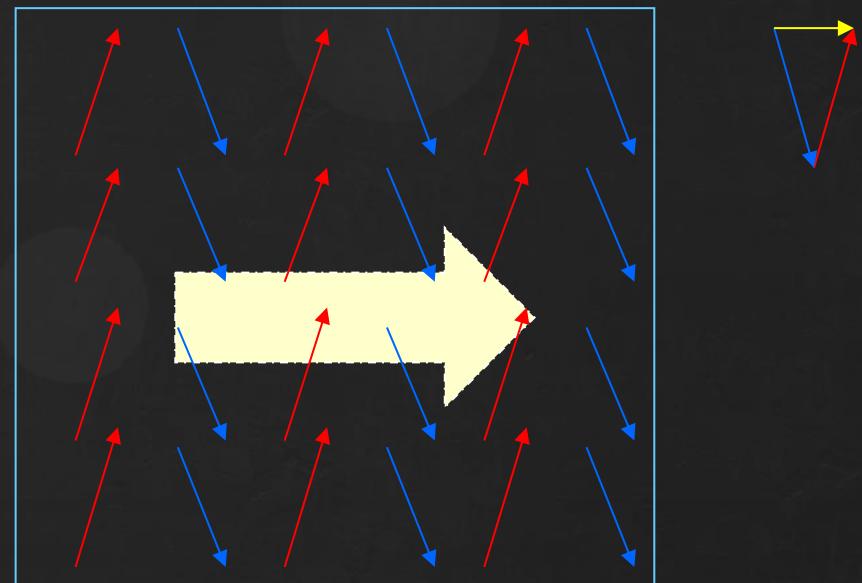
# Antiferromagnetismo

Átomos magnéticos  
interagindo fortemente com uma  
magnetização espontânea nula.

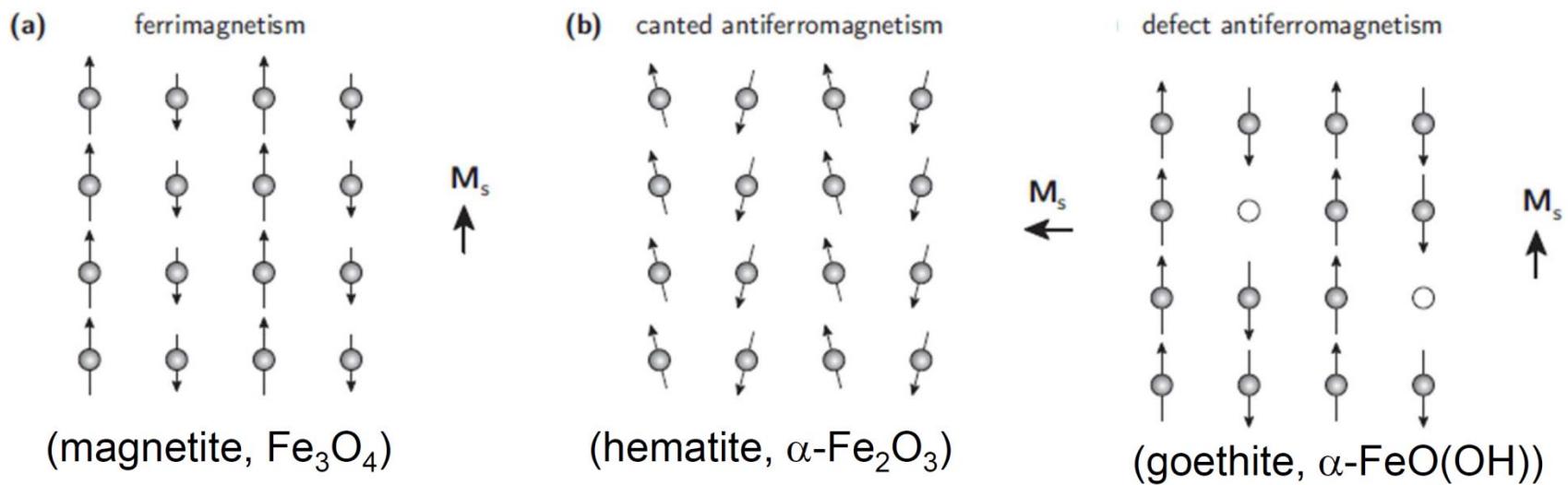


# Antiferromagnetismo Spin-canted

Defeito na cristalografia  
deste mineral antiferromagnético.



# Resumo



Como diminuir a energia de troca?

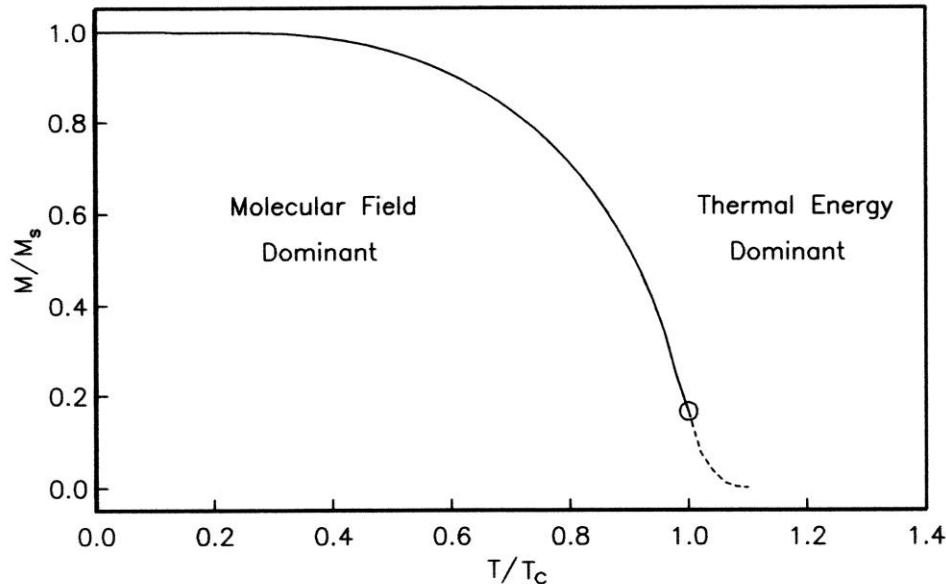
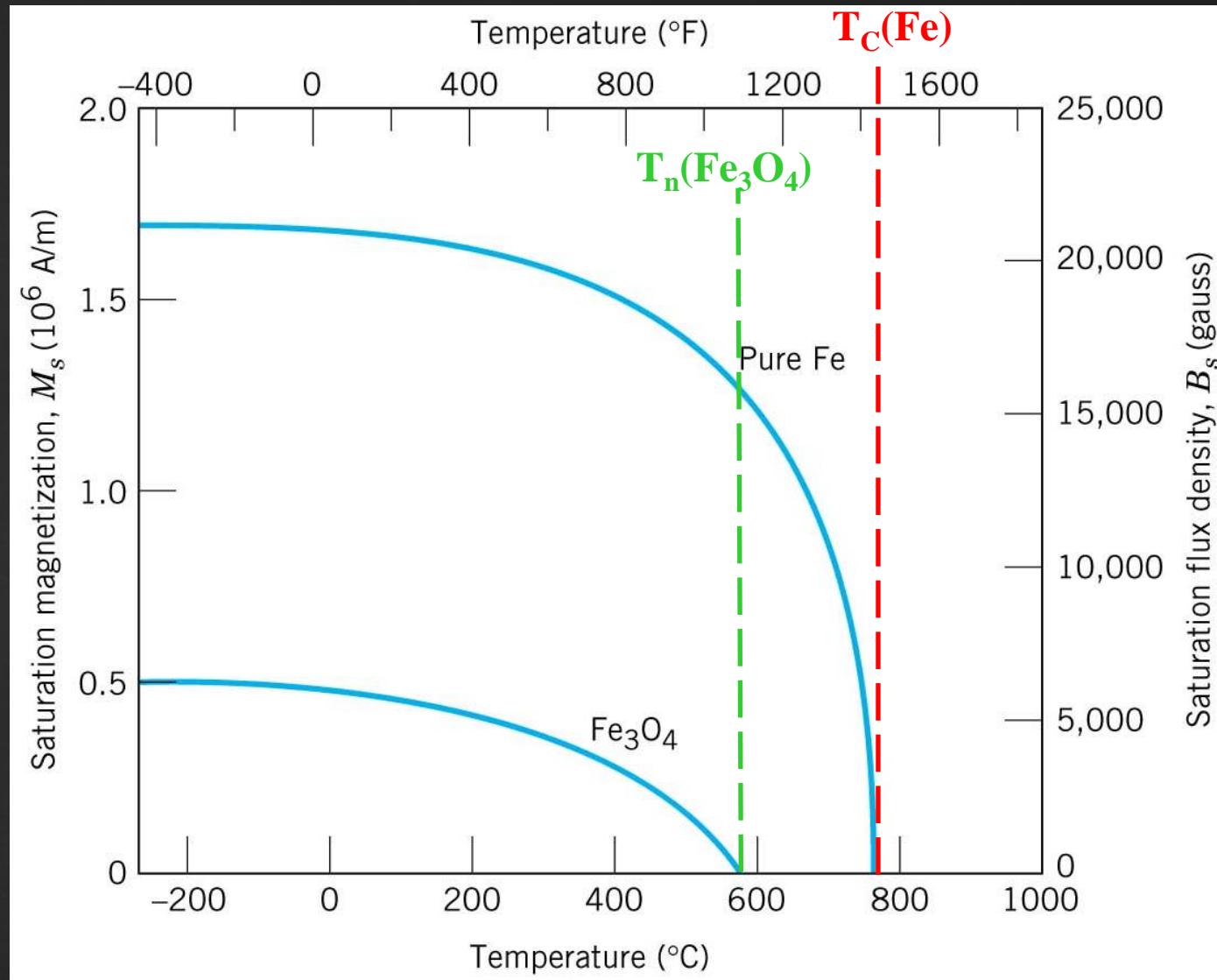


Figure 3.7: Behavior of magnetization versus temperature of a ferromagnetic substance.

Abaixo da temperatura de Curie ( $T_c$ ), as interações de troca são fortes e predominam.

Para temperaturas acima de  $T_c$ , a energia térmica é dominante e o mineral se torna paramagnético.



Cada mineral tem a temperatura de Néel específica (uma das formas de se identificar).



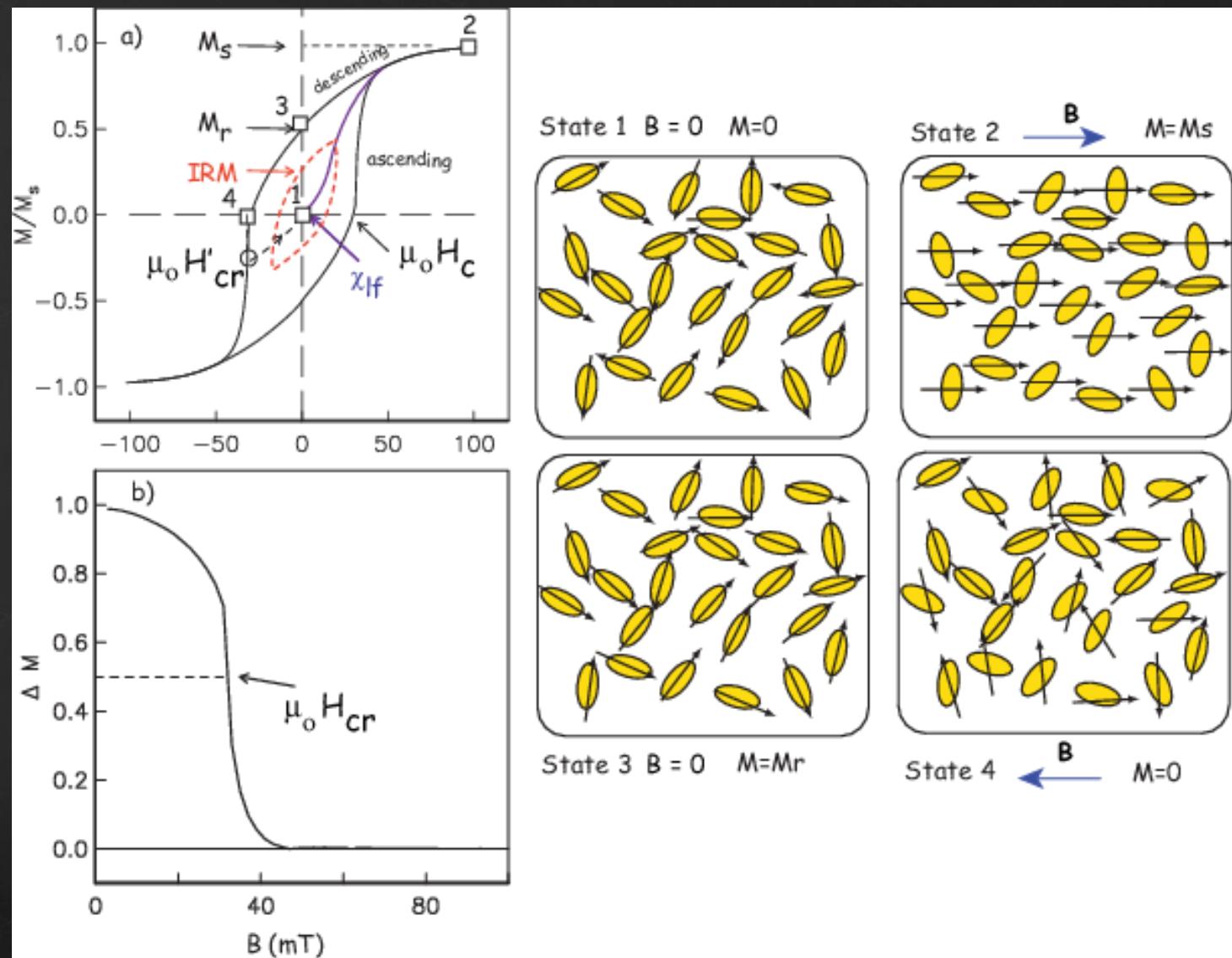
<https://www.youtube.com/watch?v=RWrTvB-oK94>

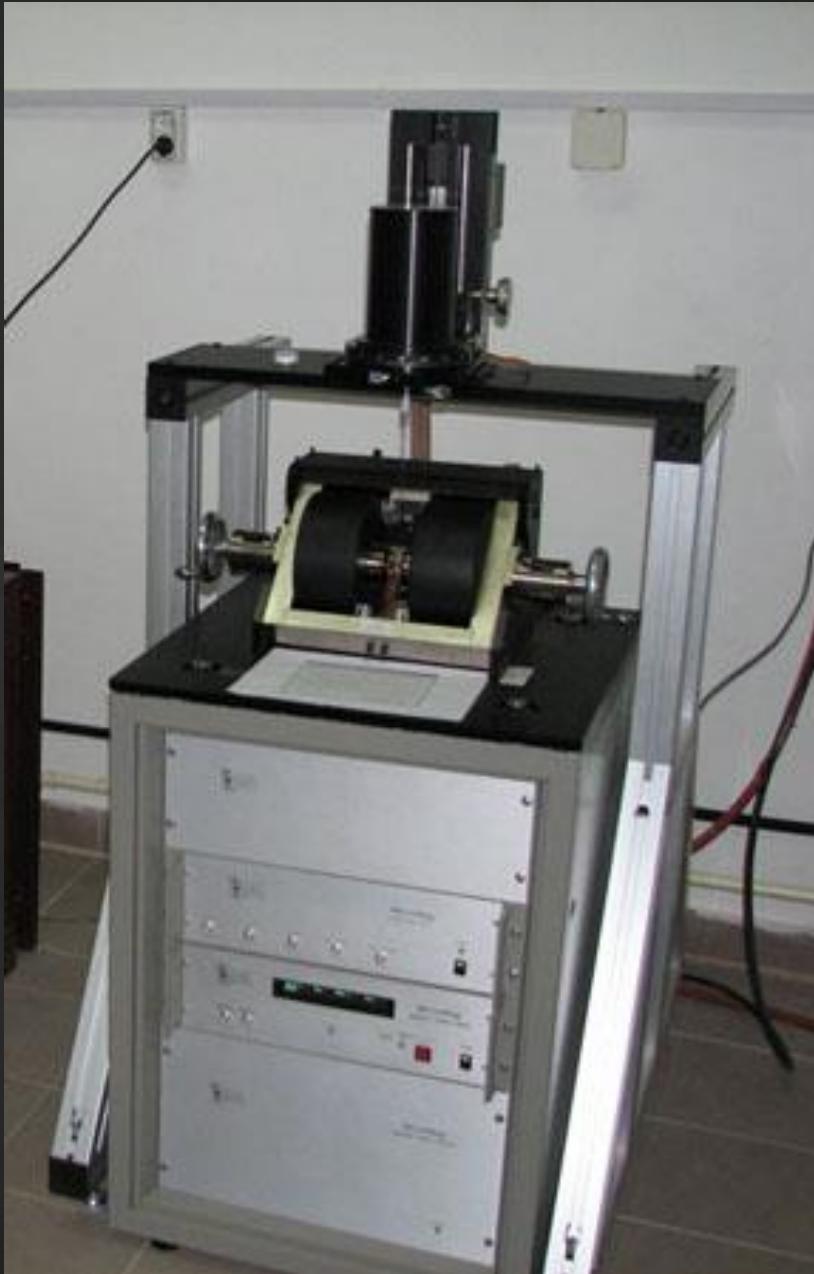
# Histerese

Todo material ferromagnético apresenta histerese. Quando um campo magnético é aplicado a um material ferromagnético com magnetização inicial nula, ele adquire uma magnetização remanente quando o campo é retirado.

A coercividade, como a temperatura de Curie, é uma característica de cada mineral magnético.

# Histerese





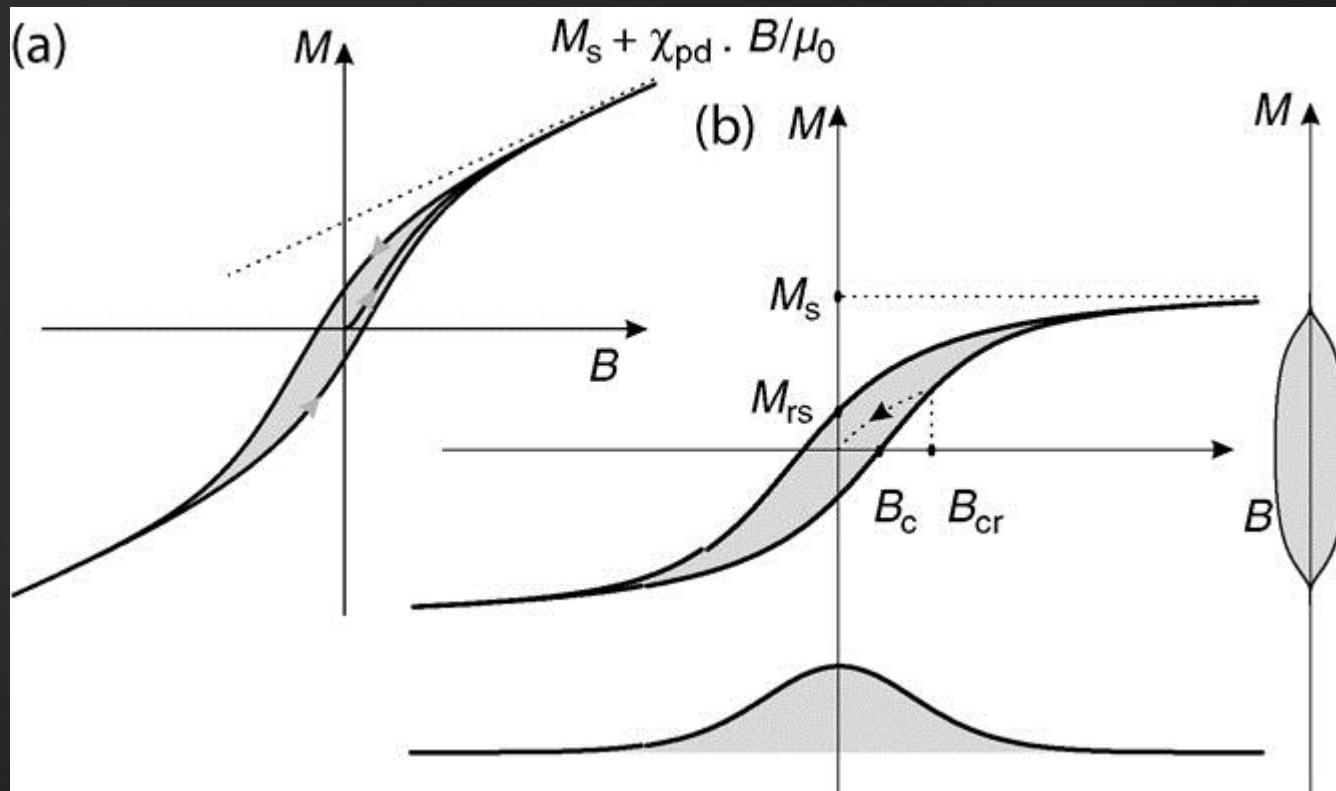
A magnetização das rochas é a soma da magnetização dos minerais magnéticos formadores destas.

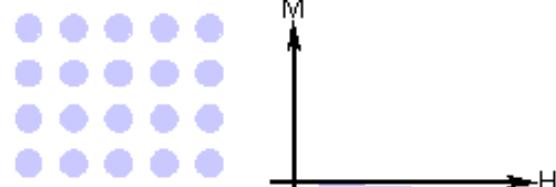
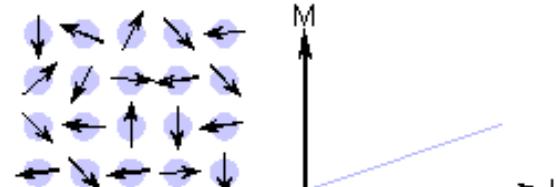
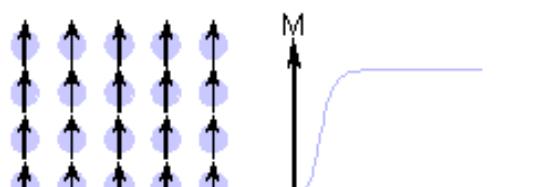
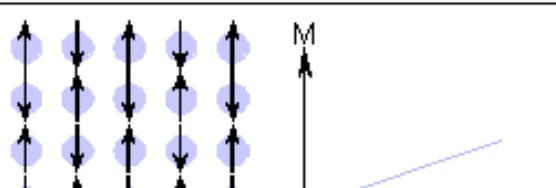
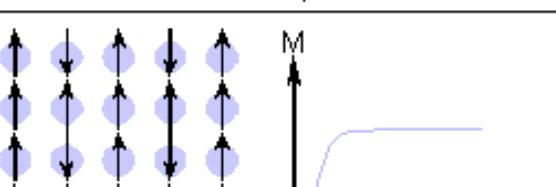
A distribuição dos minerais afeta na magnetização resultante.

$$\text{ROCHA} = \chi_{\text{dia}} + \chi_{\text{para}} + \chi_{\text{ferro}}$$

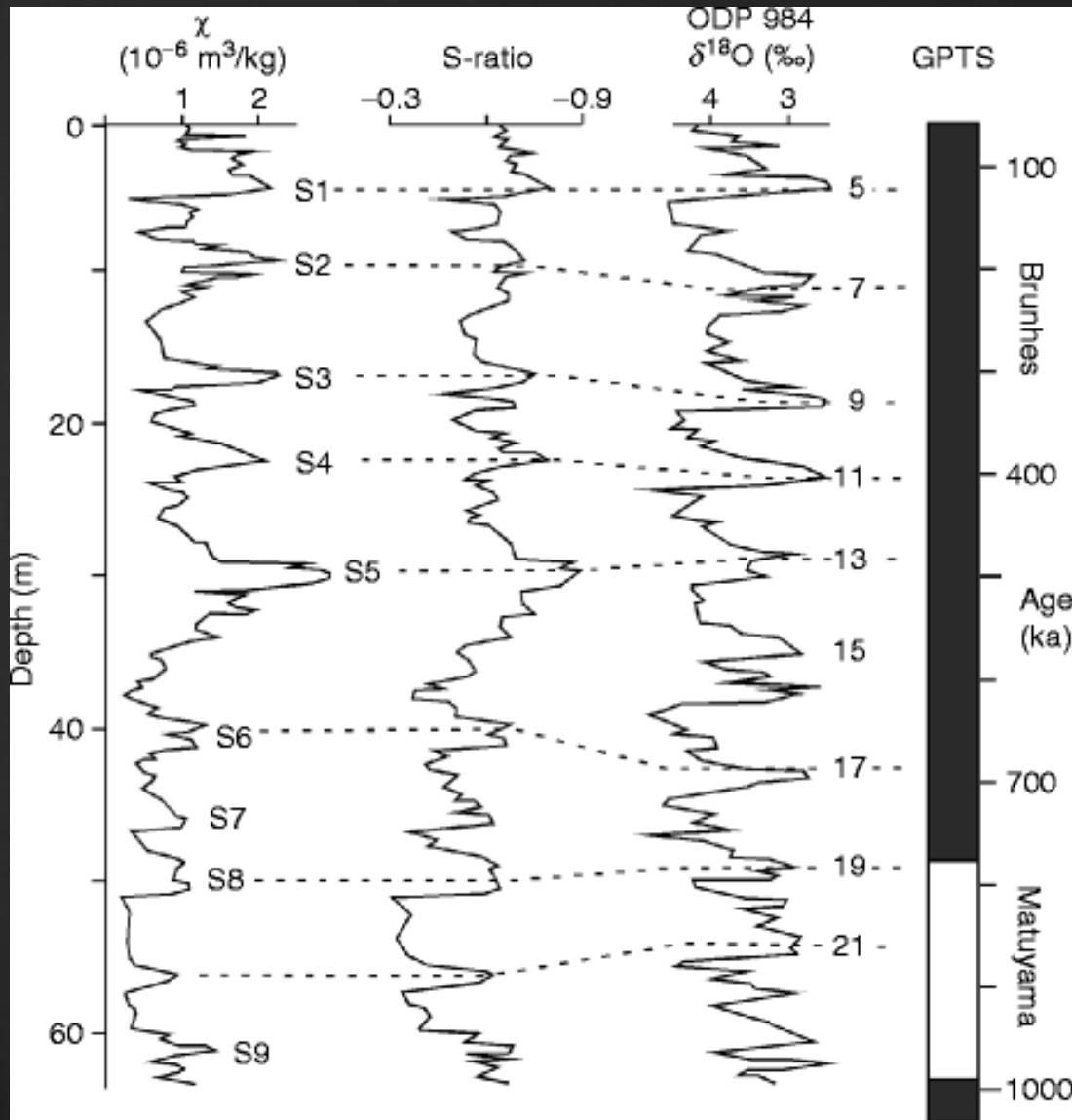
# Mistura

## Paramagnetismo + Ferromagnetismo

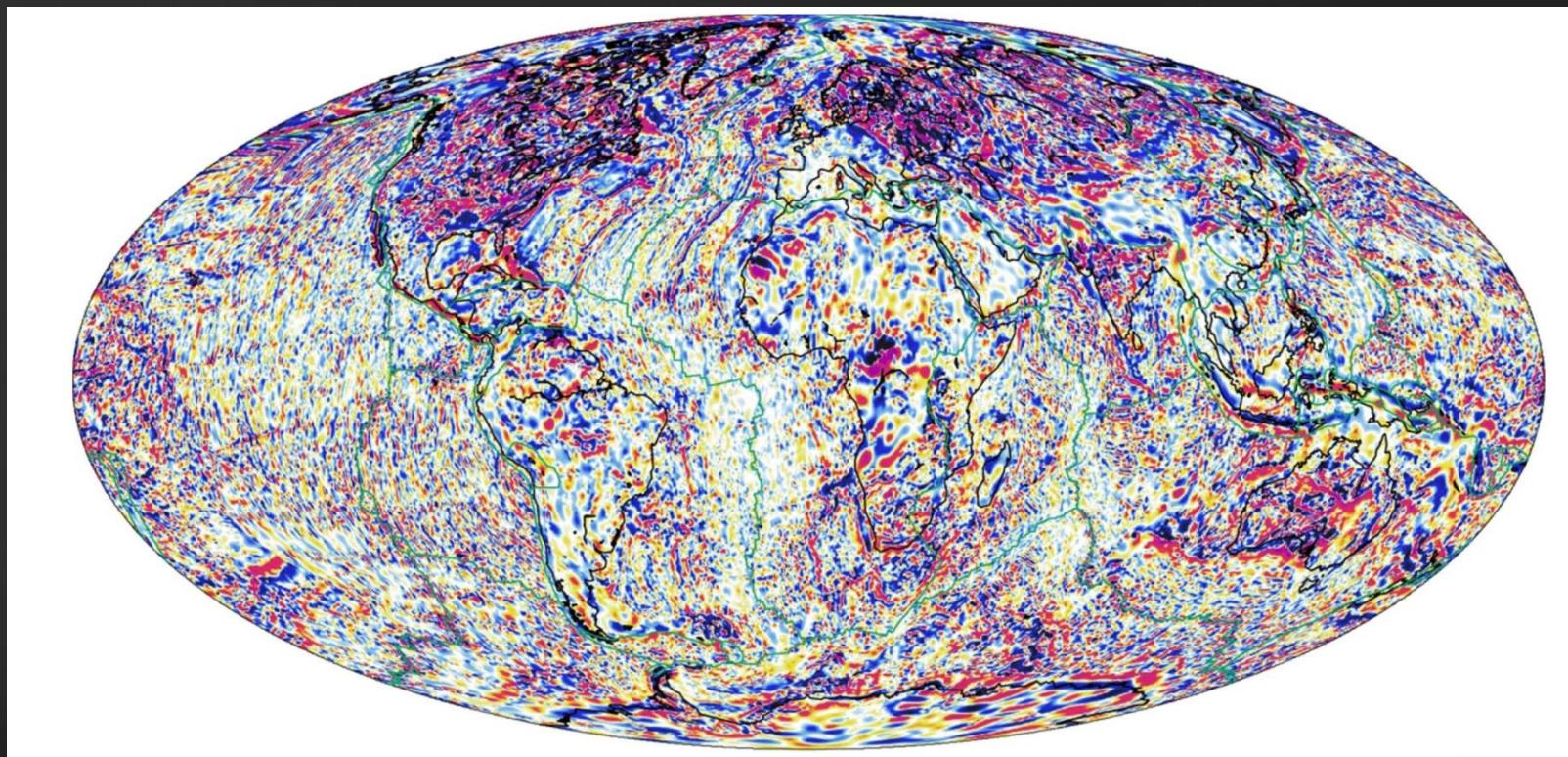


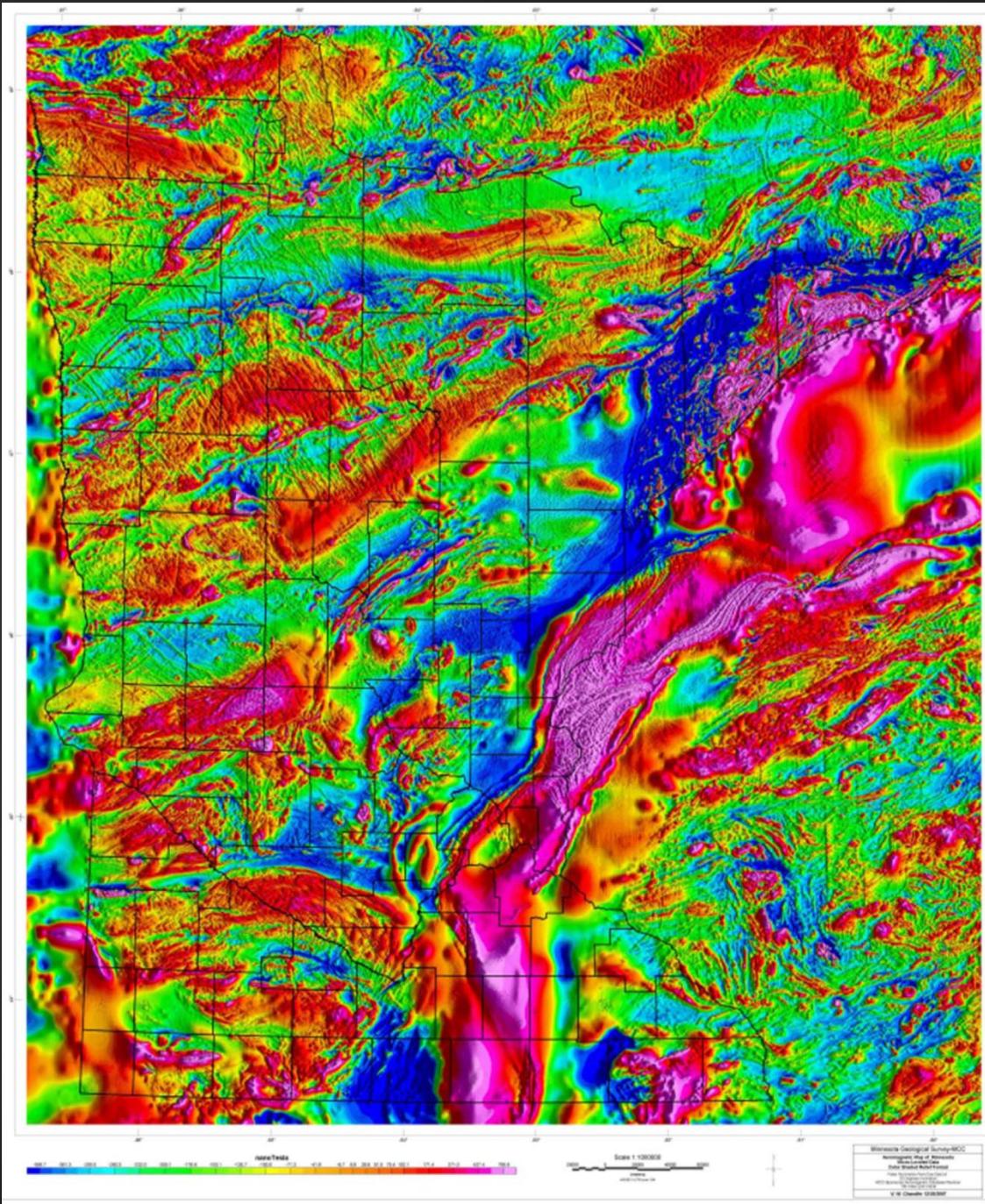
Type of Magnetism	Susceptibility	Atomic / Magnetic Behaviour		Example / Susceptibility	
Diamagnetism	Small & negative.	Atoms have no magnetic moment		Au Cu	$-2.74 \times 10^{-6}$ $-0.77 \times 10^{-6}$
Paramagnetism	Small & positive.	Atoms have randomly oriented magnetic moments		$\beta$ -Sn Pt Mn	$0.19 \times 10^{-6}$ $21.04 \times 10^{-6}$ $66.10 \times 10^{-6}$
Ferromagnetism	Large & positive, function of applied field, microstructure dependent.	Atoms have parallel aligned magnetic moments		Fe	$\sim 100,000$
Antiferromagnetism	Small & positive.	Atoms have mixed parallel and anti-parallel aligned magnetic moments		Cr	$3.6 \times 10^{-6}$
Ferrimagnetism	Large & positive, function of applied field, microstructure dependent	Atoms have anti-parallel aligned magnetic moments		Ba ferrite	$\sim 3$

# Exemplos

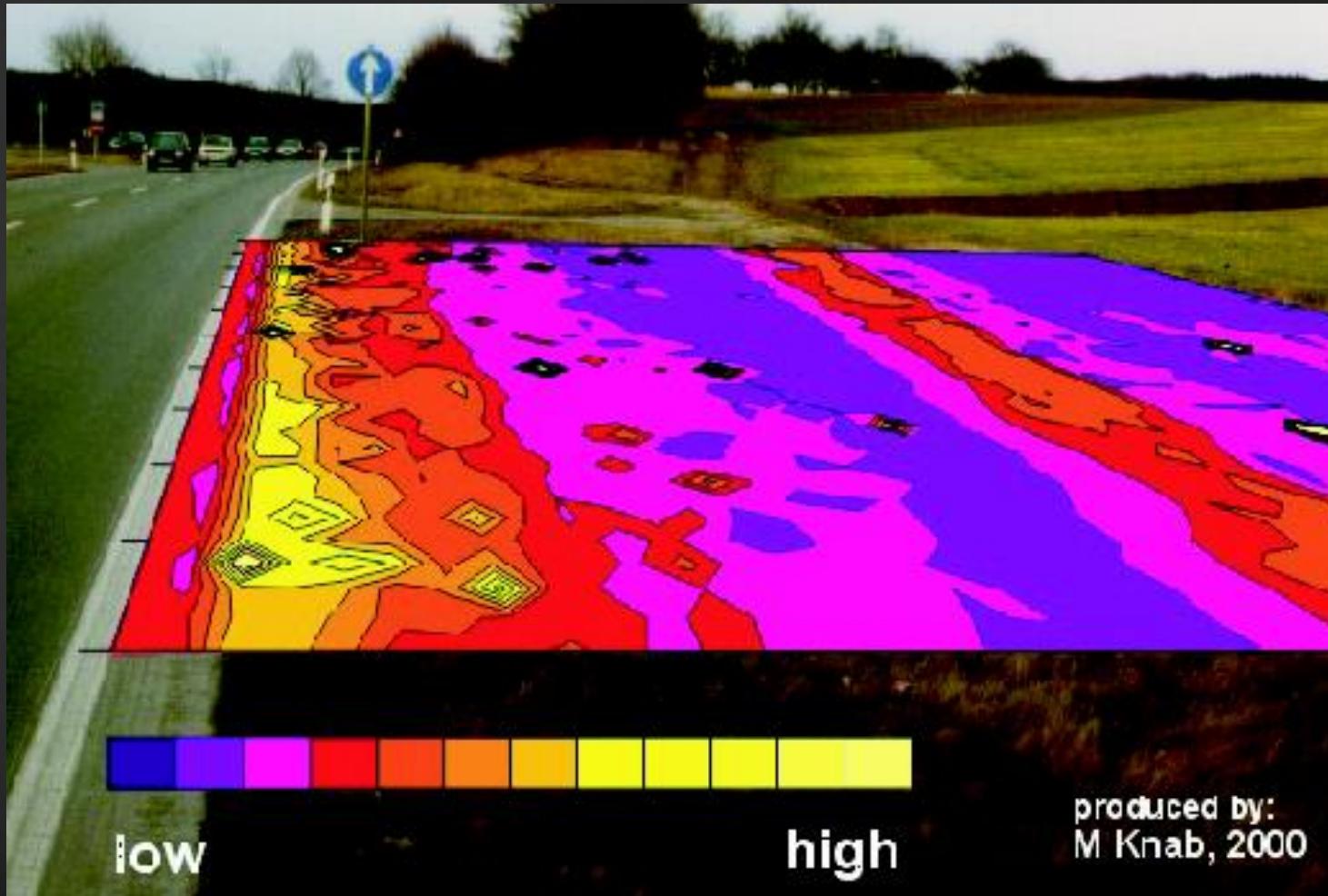


# Campo crustal da Terra

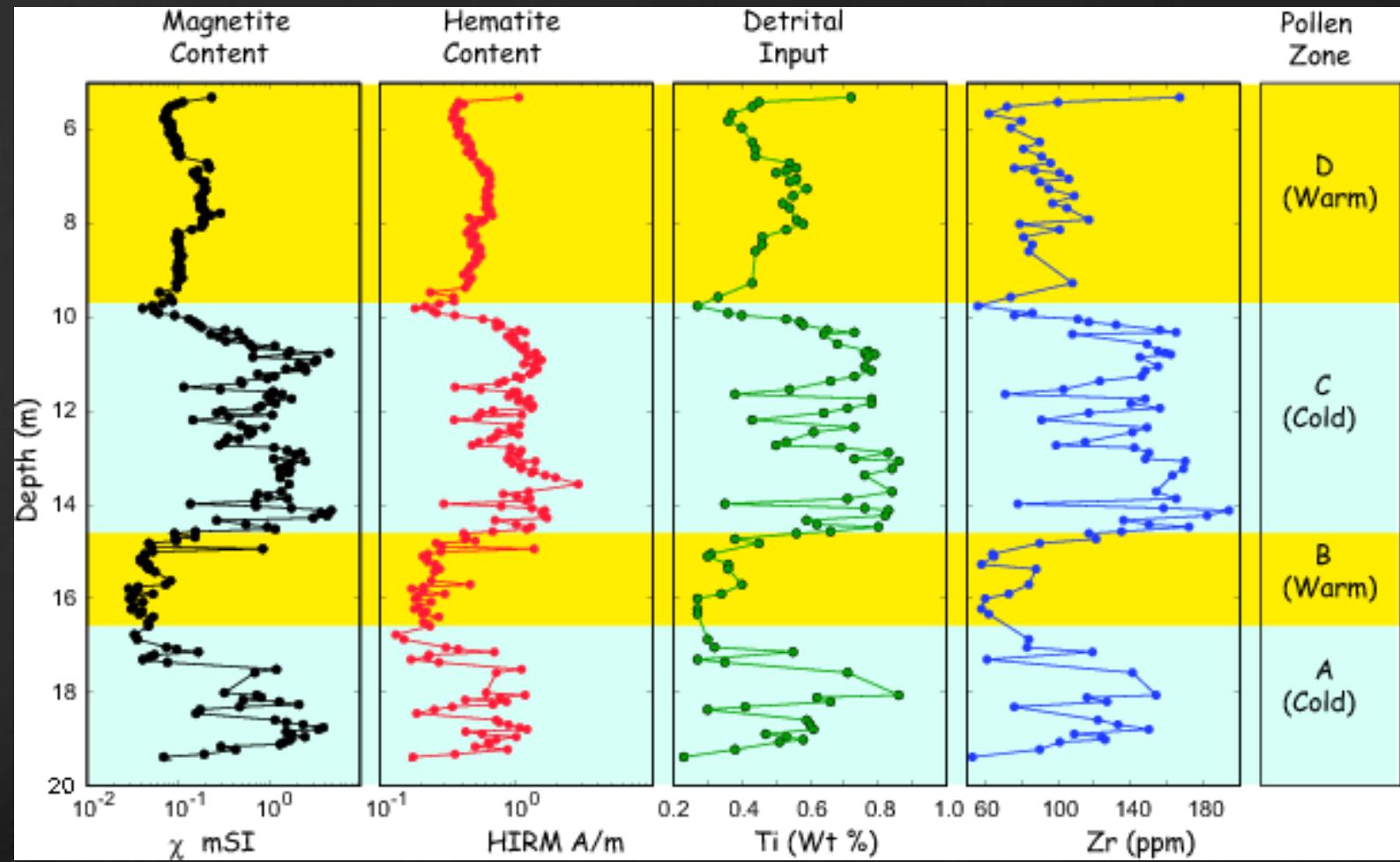




# Exemplos



# Exemplos



# Exemplos

