



SOLOS FLORESTAIS II

Prof. Clodoaldo dos Santos

CONTEÚDOS DA DISCIPLINA

1. O solo como sistema trifásico
2. Propriedades físicas e morfológicas do solo
 - Textura
 - Estrutura
 - Consistência
 - Densidade
 - Porosidade
 - Cor do solo
3. Água no Solo
4. Aeração do solo
5. Temperatura do solo
6. Química do Solo
7. Classificação de solos
8. Solos e ambientes brasileiros



A decorative vertical bar on the left side of the slide, featuring a gradient from dark blue to light blue and several orange circles of varying sizes. The text "PROPRIEDADES DO SOLO" is centered in a yellow, serif font.

PROPRIEDADES DO SOLO



O SOLO COMO UM SISTEMA TRIFÁSICO

O SOLO COMO SISTEMA TRIFÁSICO

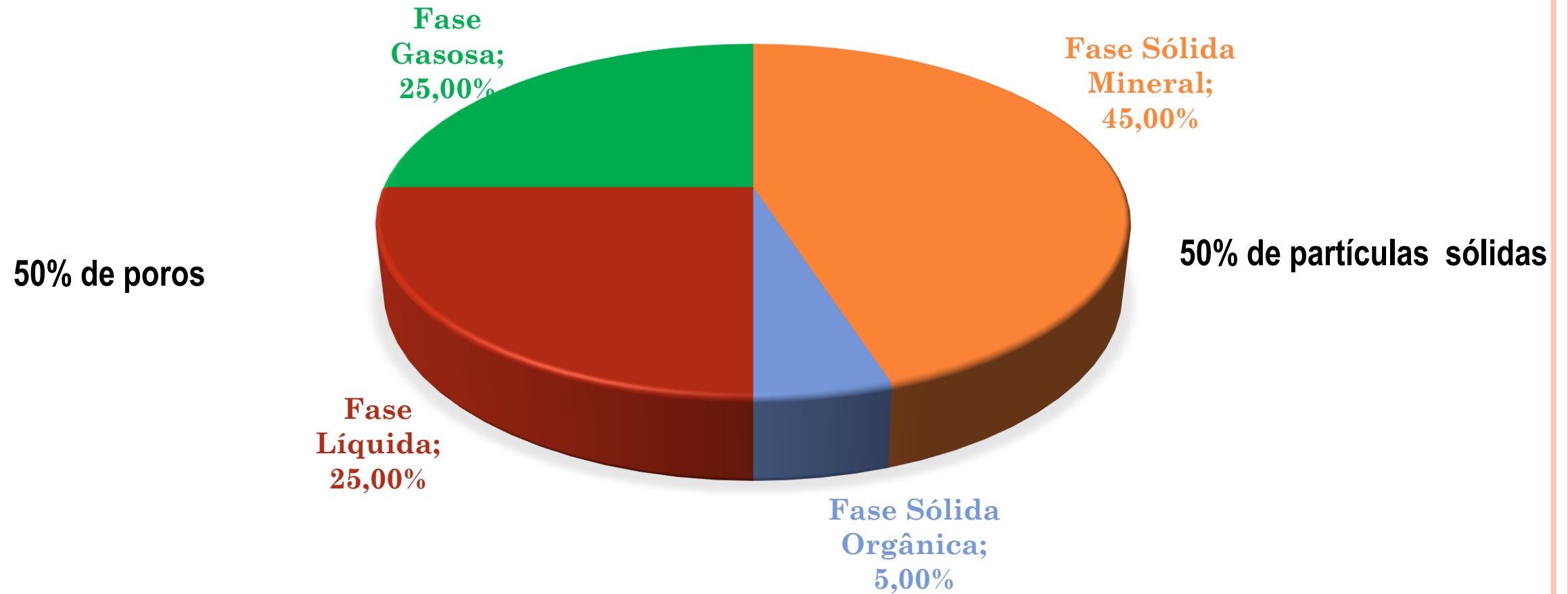


Figura 1 – Composição volumétrica de um solo com boa estrutura.

COMPONENTES DO SOLO

Fase sólida (50%)	Matéria mineral (45%)	Minerais Primários	
		Minerais Secundários	<ul style="list-style-type: none"> • Minerais argilosos • Oxi-hidróxidos Fe, Al, Mn • Silicatos não cristalinos • Carbonatos
	Matéria orgânica (5%)	Porção viva (raízes das plantas, fauna do solo)	
		Porção não viva (restos de organismos vegetais e animais em vários graus de decomposição e produtos de decomposição)	
Fase líquida (25%)	Solução do solo	Água higroscópica (fortemente retida por adsorção)	
		Água capilar (microporos: fracamente retida, disponível para as plantas)	
		Água gravitacional (macroporos: não é retida pelo solo)	
Fase gasosa (25%)	Atmosfera do solo	O ₂ , CO ₂ , N, vapor de água	



FASE SÓLIDA

- Os componentes inorgânicos variam bastante em tamanho e exercem uma grande influência nas propriedades dos solos;
- Os componentes orgânicos são representados por restos de animais e vegetais em estágio diversos de decomposição e materiais sintetizados no solo;



FASE SÓLIDA – FRAÇÃO ORGÂNICA

Características do húmus

Cor escura, amorfo, poroso	
Estrutura química complexa	(ácidos húmicos 28-60%, ácidos fúlvicos 20-40% e huminas 20-32%)
Baixa densidade	1,1 kg m ⁻³
Elevado poder de retenção de água (2 - 4x o seu peso)	Retém bases (K, Na, Ca, Mg); fonte de elementos nutritivos (N, S, P)
Natureza coloidal ($\emptyset \mu$), carga eléctrica negativa, independente do pH	Superfície específica elevada; Elevada CTC (>300 cmol _c .dm ⁻³) e elevado poder tampão
Formação de complexos argilo-húmicos e organo-metálicos (quelatização)	Favorece a agregação (coesão) do solo



Matéria Orgânica = Material não decomposto + Material em transformação
+ Húmus

(ácidos húmicos e fúlvicos e huminas)

Mineralização: processo que conduz à desorganização e transformação da estrutura dos resíduos orgânicos em compostos simples, solúveis ou gasosos (Ca^{2+} , K^+ , NH_4^+ , PO_4^{2-} , NO_3^- , CO_2 , H_2O)

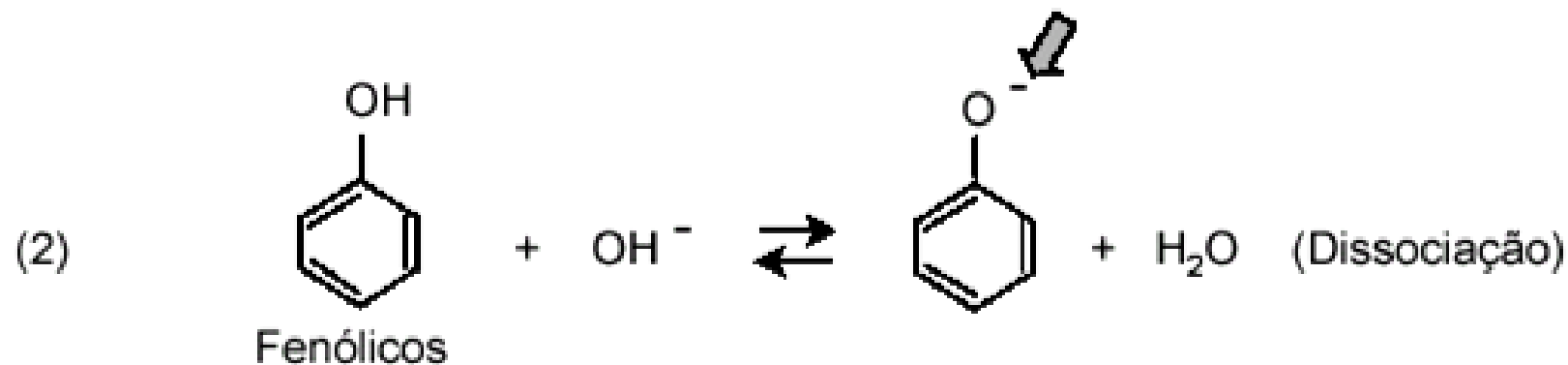
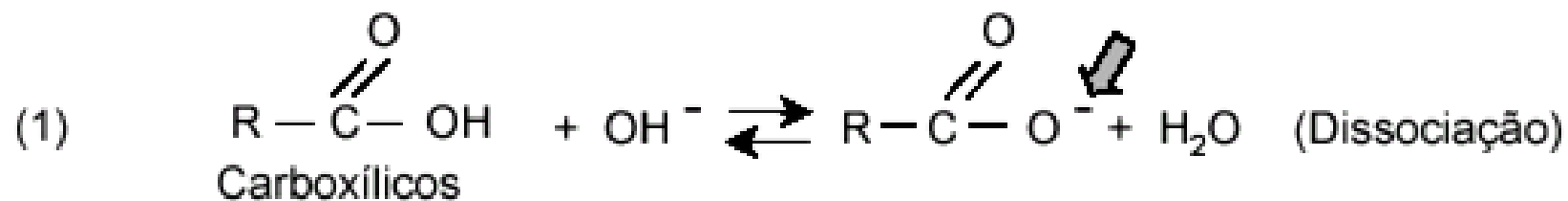
Humificação: processo que conduz á formação de complexos coloidais estáveis e resistentes à decomposição (húmus);



✓ Eletronegativa, independente do pH

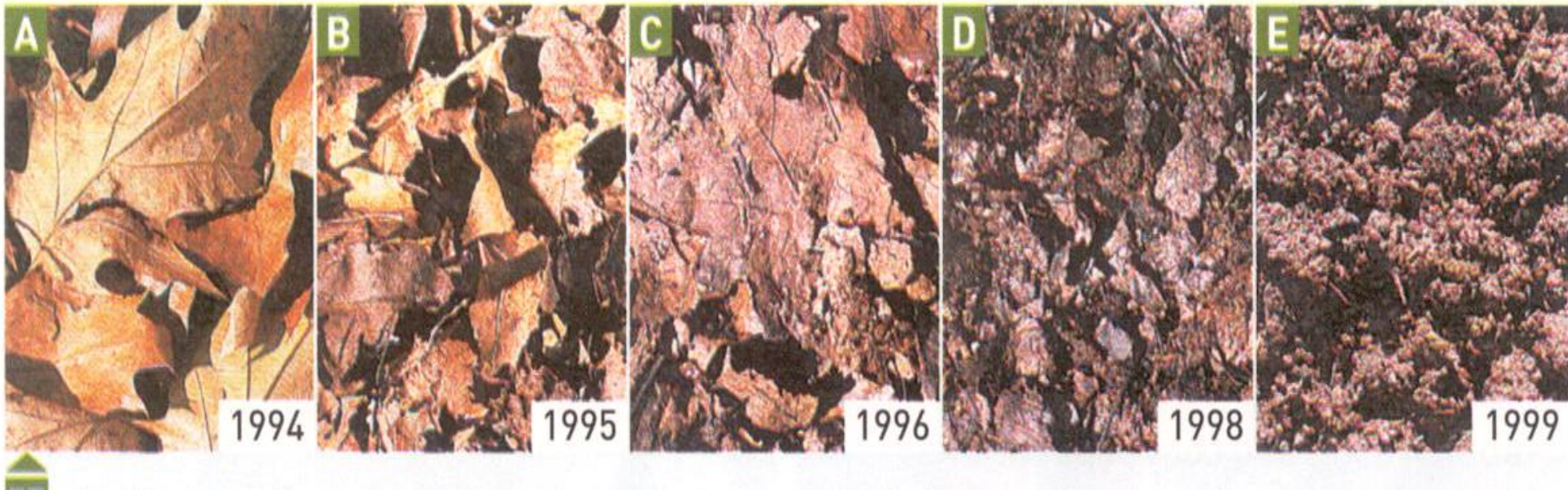
✓ Dissociação do grupo OH (liberação do H⁺)

- grupos carboxílicos (COOH) : pH 4 - 7
- grupos oxidrílicos (OH fenólicos e enólicos): pH > 6



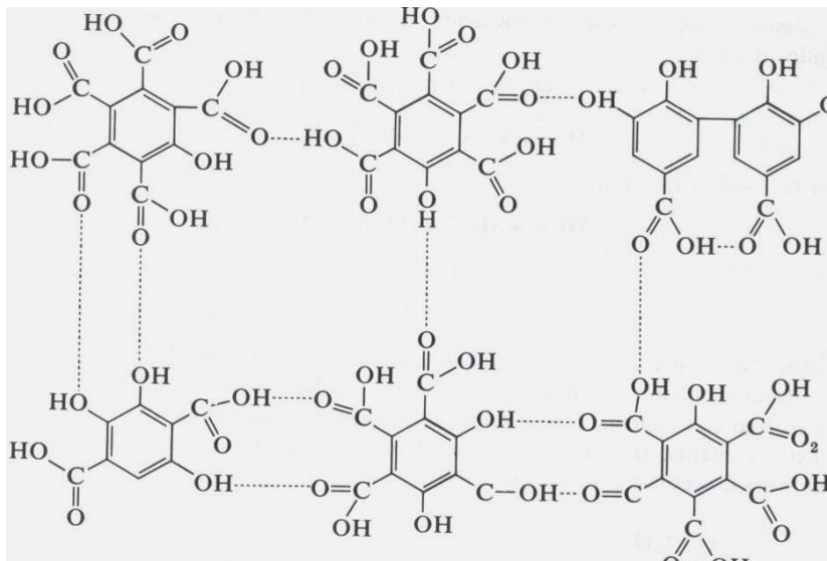
→ Aumento do pH

Formação de cargas negativas por aumento do pH, nos radicais (1) carboxílicos (1) e (2) fenólicos da matéria orgânica



A serrapilheira transforma-se ao longo do tempo em húmus

Estrutura química parcial de um ácido



Composição química da Matéria Orgânica

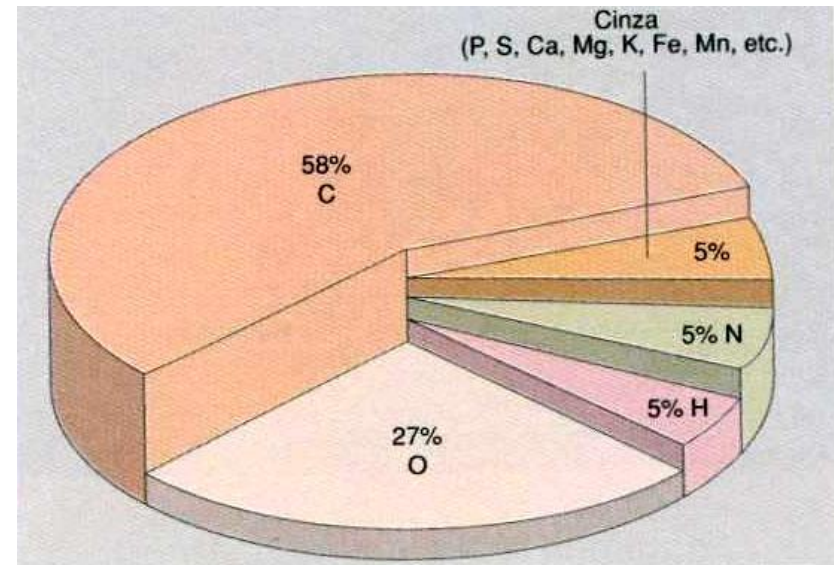




Foto 1: Ademir Fontana. Indianópolis-MG. Depósitos orgânicos. (SiBCS, 2018)

FASE SÓLIDA – FRAÇÃO MINERAL

A fração mineral (ou dos componentes inorgânicos) inclui os fragmentos de rocha, minerais primários e minerais secundários, todos em formas e dimensões extremamente variáveis.



o Minerais Primários

herdados da rocha-mãe

Quartzo, Feldspatos,
Micas, Piroxênios,
Anfibólios, Olivinas.

Conhecimento Qualitativo e Quantitativo:

- Grau de evolução do solo
- Reserva mineral (Minerais alteráveis que contêm elementos biogênicos)

P, K, Ca, Mg, S

Fe, Mn, Zn, Cu, Bo, Mo, Cl

o Minerais Secundários

- Síntese *in situ* de produtos resultantes da meteorização de minerais primários menos resistentes;
- Alteração da estrutura de minerais primários verificada *in situ*;
- Herdados da rocha-mãe

Minerais Silicatados:

- Caulinita;
- Ilita;
- Montmorilonita...

Oxi-hidróxidos Fe, Al, Mn:

- Gibsita (Al (OH)₃)
- Goetita (α FeO.OH)
- Hematita (Fe₂O₃)

Silicatos não cristalinos

Carbonatos:

- Calcita (CaCO₃)
- Dolomita (MgCO₃)



FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO SOLO

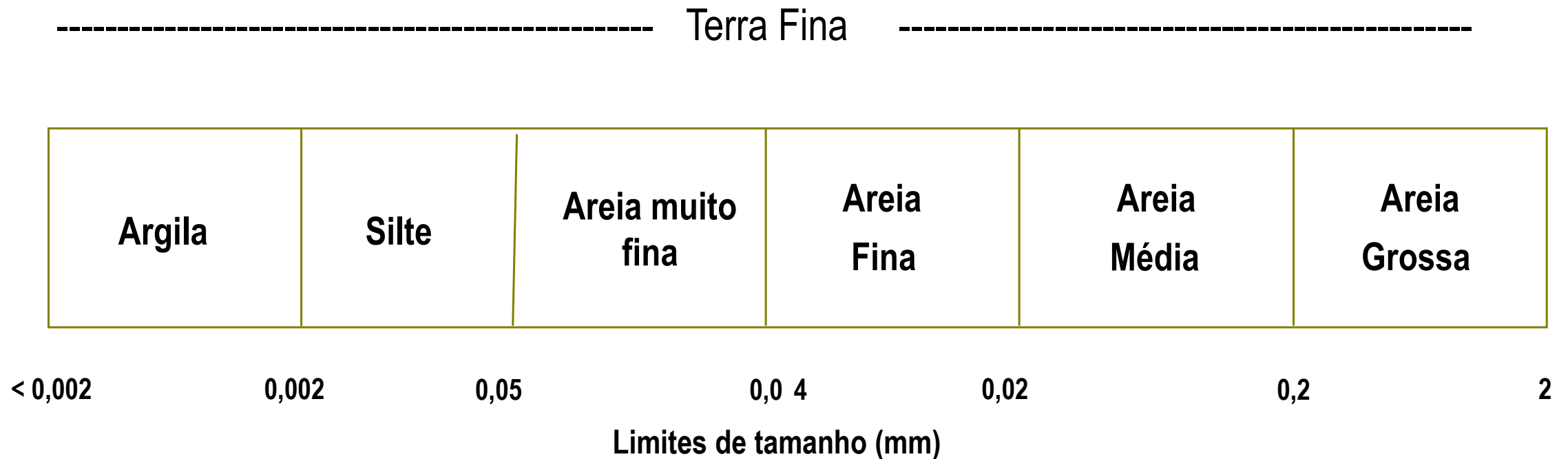


Figura 2 – Limites dos tamanhos das partículas dos solos, segundo classificação de Atterberg.

Quadro 1 – Limites dos tamanhos das partículas dos solos.

Fração	mm
Matacões	> 200 (fragmento de rocha)
Calhaus	200 – 20 (fragmento de rocha)
Cascalho	20 - 2,0 (fragmento de rocha)
Areia	2,0 – 0,05 (minerais individuais)
Silte	0,05 – 0,002 (minerais individuais)
Argila	< 0,002 (minerais secundários)

Fonte: Murphy, 1980

- Os fragmentos de rocha são pedaços grosseiros de material de origem e aparecem como remanescentes da intemperização da rocha maciça na formação do solo;
- Os minerais individuais são minerais primários que provém diretamente do material de origem e se mantém inalterados em sua composição (quartzo, feldspatos, micas, piroxênios, anfibólios, etc.).



O conhecimento dos minerais primários é de valor pedológico e edafológico grandes. Já que sua presença fornecerá indicações úteis no que se refere ao grau de evolução do solo e sobre sua reserva mineral.



- Minerais secundários são aqueles formados à baixas temperaturas, pela desintegração e alteração dos minerais primários através do intemperismo;
- Nos solos das regiões tropicais os minerais secundários componentes da fração argila mais importantes são os minerais de argila silicatados e os óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de ferro e alumínio;





QUÍMICA DO SOLO

O SOLO COMO UM SISTEMA DISPERSO

- O solo é constituído de mais de uma fase, estando a fase sólida em estado de acentuada subdivisão.
 1. Fase líquida, gasosa e sólida;
 2. Fase sólida composta pelas frações minerais e material orgânico;
 3. A fração minerais é composta pelas frações granulométricas, areia, silte e argila, com diferentes tamanhos;




SOLO COMO SISTEMA DISPERSO

Sistema Disperso: sistema no qual **pelo menos uma fase é subdividida em partículas extremamente pequena, que exibem uma área superficial grande** por unidade de volume.

A fração argila dos solos apresenta importância grande por ser a fração ativa do solo e que participa de praticamente todas as reações físico-químicas que ocorrem no solo.



São características dos minerais da fração argila:

- 1) Estado coloidal com presença de cargas elétricas;
 - 2) Adsorção de íons;
 - 3) Retenção de água;
 - 4) Apresentam plasticidade e pegajosidade;
 - 5) São susceptíveis à dispersão e floculação;
 - 6) Exibem dureza e tenacidade no estado seco;
 - 7) Variam de volume conforme a umidade;
 - 8) Desempenham papel importante na cor e agregação dos solos minerais;
- 

SISTEMA COLOIDAL

Um ou mais componentes constituindo a fase dispersa (a fase constituída pelas partículas) apresentam, pelo menos, uma de suas dimensões entre $1\ \mu\text{m}$ e $1\ \text{nm}$ ($1\ \text{nm} = 10^{-9}\ \text{m}$) e encontram-se em uma segunda fase, o meio de dispersão (água e ar, o meio pelo qual as partículas se distribuem).




Estado Coloidal: um estado de subdivisão da matéria em tamanho extremamente pequeno, se aproximando mas não chegando à subdivisão molecular.

As principais características dos **colóides** são:

- ✓ **Cargas elétricas***
- ✓ **Área superficial**
- ✓ **Movimento Browniano**

** São importantes por influir em reações como adsorção e troca de íons importantes para a química de solos e em reações de floculação e dispersão.*



- Nesse sistema ocorrem:
 - Reações químicas
 - Reações Físico-químicas
 - Reações Microbiológicas



PROPRIEDADES DE UM SISTEMA COLOIDAL

a) Grande Superfície Específica (área pela unidade de peso do material – $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)

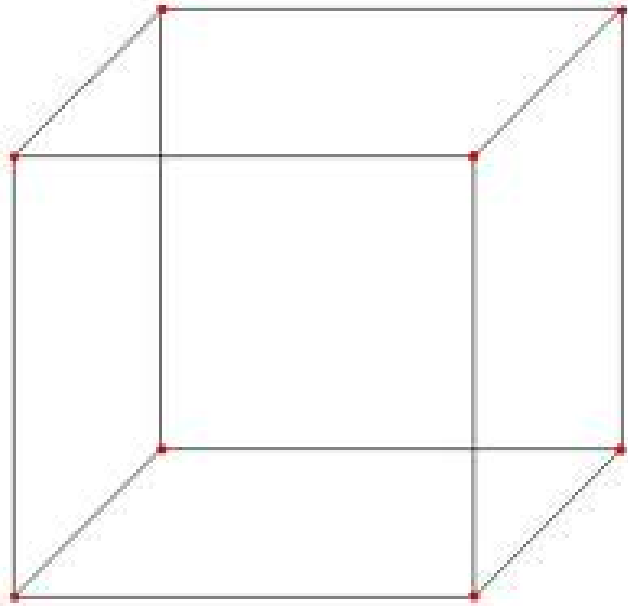
Variações

Textura ou granulometria

Tipos de minerais de argila

Teor de matéria orgânica





$$A = 6 \cdot a^2$$

Sendo:

A: área total do Cubo

a: aresta

$$SE = A \cdot m$$

Sendo:

SE: superfície específica

A: área total do Cubo

m: massa da aresta



Cubo	Arestas	m	A	SE
6	1 cm	1 g	6 cm ²	6 cm ² g ⁻¹
8	1 cm	1g	8 cm ²	8 cm ² g ⁻¹
1.000	0,1 cm	1g	60 cm ²	60 cm ² g ⁻¹
1.000.000	0,01 cm	1 g	600 cm ²	600 cm ² g ⁻¹

Quadro 2 – Superfície específica dos principais componentes da fração argila do solo.

Constituintes da Fração Argila	Superfície Específica (m² g⁻¹)
Gibbsita	1 – 2,5
Caulinita	10 – 30
Goethita	30
Óxidos de ferro	100 – 400
Vermiculita	300 – 500
Montmorilonita	700 – 800
Matéria orgânica	± 700

○ b) Cargas Elétricas

As partículas coloidais do solo (argilas) são eletronegativas, embora possam, também, conter cargas positivas, estas em menor número;

As cargas elétricas proporcionam a adsorção de íons de cargas opostas, retendo-os no solo e, estes íons são importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas;.



○ c) Cinética

As partículas dispersas em meios líquidos apresentam movimentos (Movimento Browniano), que são bruscos, irregular e em zigue-zague;

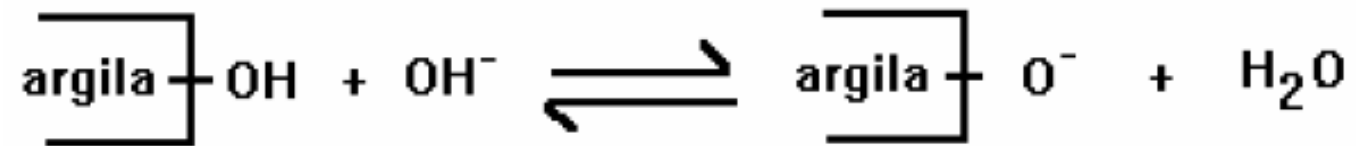
A difusão (migração de partículas de maior concentração para outra de menor concentração) e a sedimentação de partículas (movimento ocasionado pela força gravitacional) são movimentos devido à energia cinética das partículas;



ORIGEM DAS CARGAS ELÉTRICAS DO SOLO

o Cargas Negativas

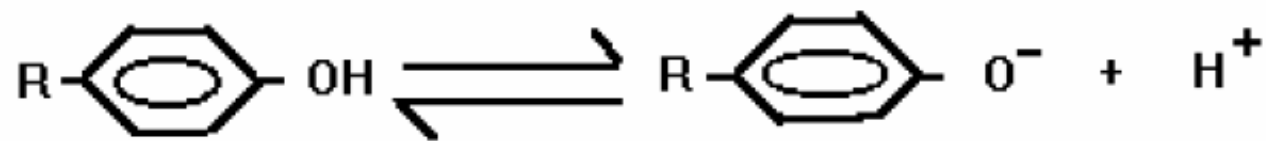
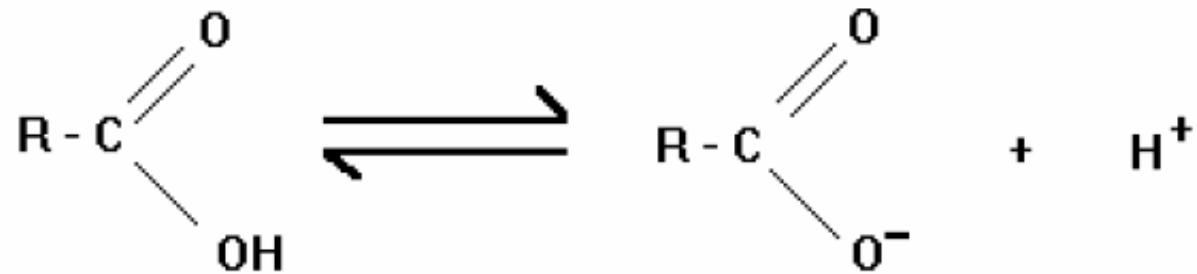
a) Dissociação do Grupo OH



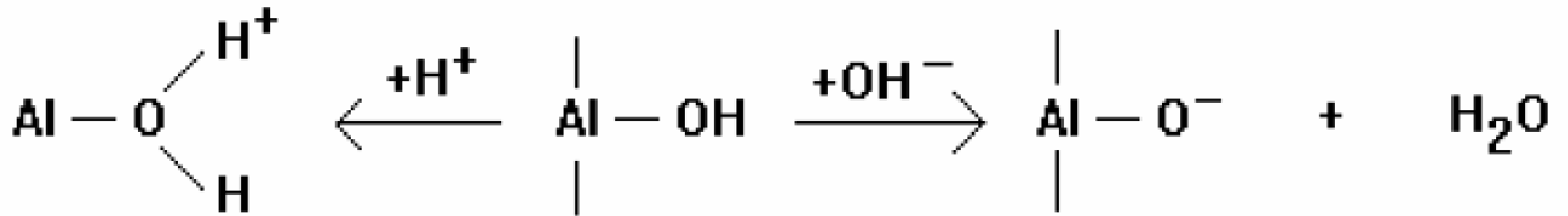
b) Substituição Isomórfica



o c) Matéria Orgânica



o Cargas Positivas



carga
positiva

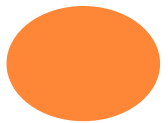
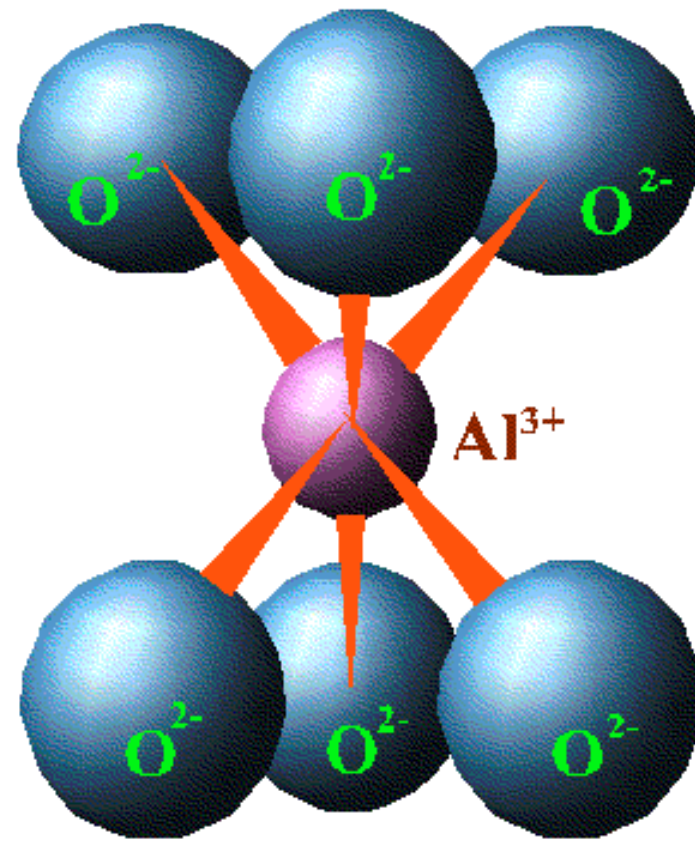
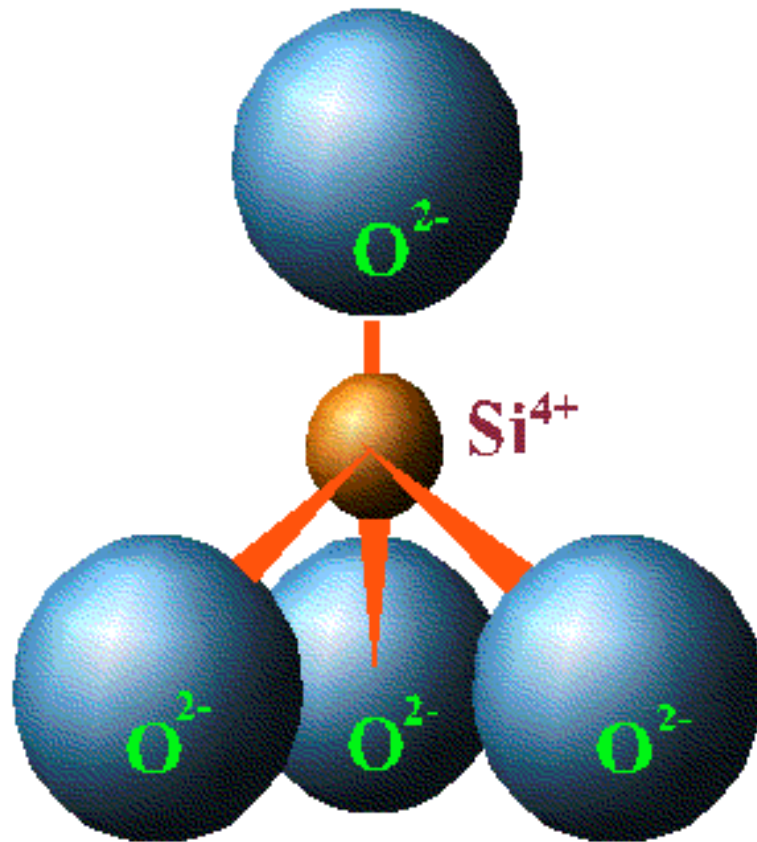
carga nula
(pH = PCZ^{1/2})

carga
negativa



MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA

- Argilas Silicatadas



- Principais Grupos de Argilas Silicatadas
 - CAULINITA

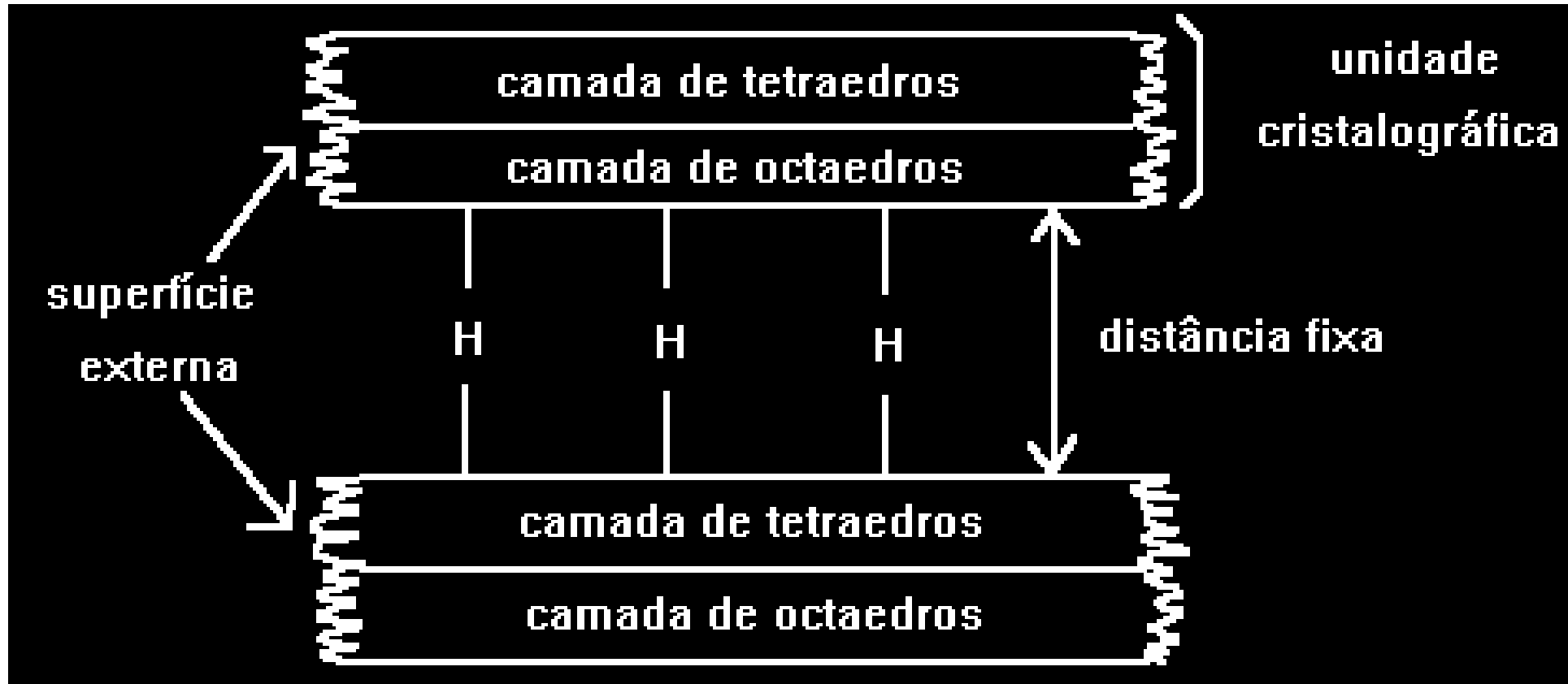
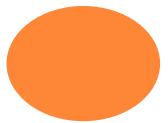


Figura 3 – Representação esquemática das argilas do grupo da caulinita (tipo 1:1).



- Apresenta superfície específica bastante baixa e a CTC é altamente dependente do pH, o que demonstra que as cargas da caulinita são desenvolvidas em função do pH do solo;



A caulinita é uma argila de atividade bastante baixa, em termos de atividade coloidal. Apresenta baixa plasticidade e pegajosidade e também baixa capacidade de expansão e contração. É um mineral de ocorrência extremamente grande em solos brasileiros.



□ MONTMORILONITA

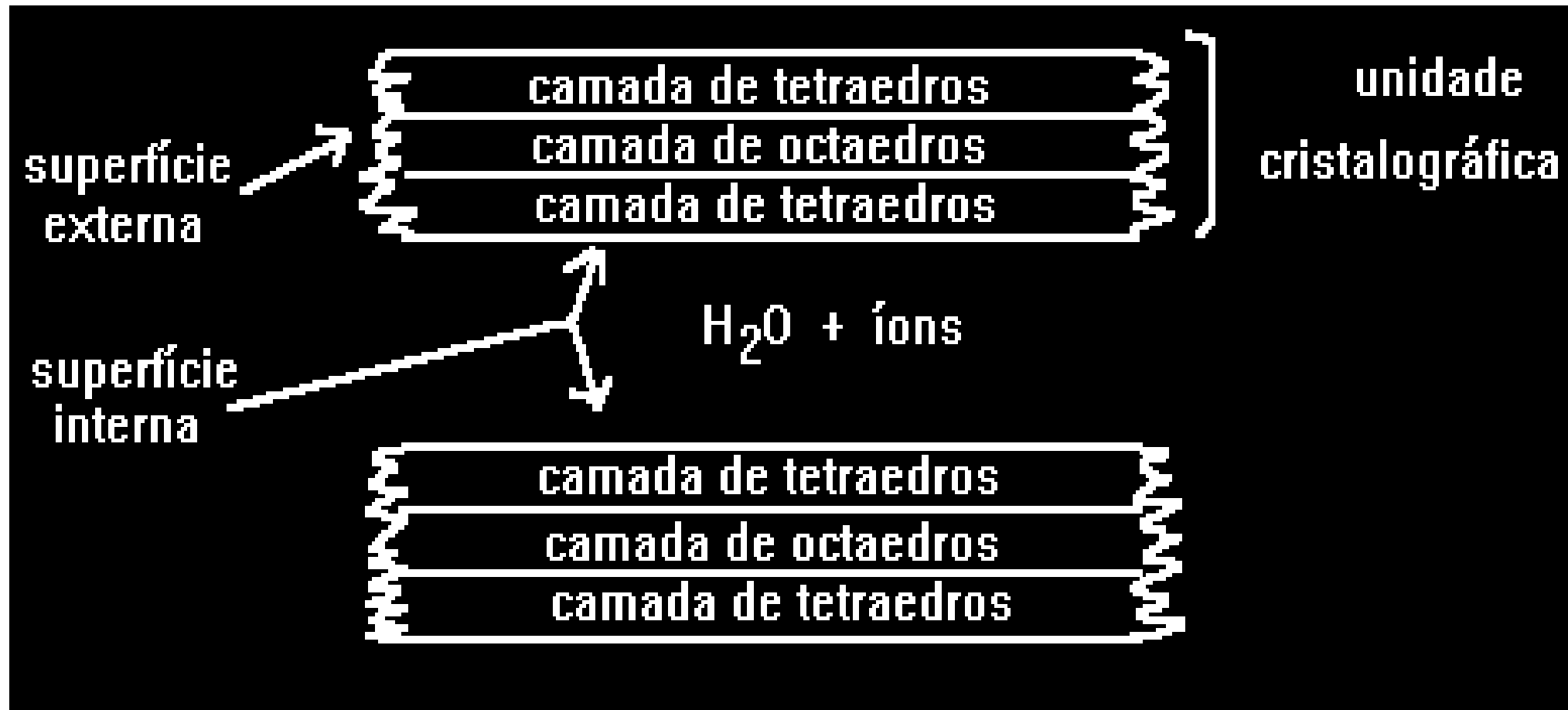


Figura 4 – Representação esquemática das argilas do grupo da Montmorilonita (tipo 2:1).



- São minerais chamados 2:1 por que são formados pelo empilhamento de duas lâminas tetraédricas fazendo um sanduíche com a lâmina octaédrica;



- Os minerais 2:1 têm uma característica importante que é a presença de cargas elétricas de superfície que são originárias, principalmente, de substituições isomórficas nas camadas tetraédricas e octaédricas;
- A montmorilonita é uma argila de baixa carga nas camadas, assim, a atração entre as camadas expansíveis e os cátions entre as camadas é fraca e permite a água e outras substâncias penetrem entre os planos basais e provoquem uma grande expansão do material;



A montmorilonita apresenta uma alta superfície específica, a CTC é praticamente independente do pH, ou seja, a maioria das cargas é originariamente oriunda das substituição isomórfica;

É uma argila de atividade alta apresentando alta plasticidade e pegajosidade e uma capacidade muito grande de expansão e contração, o que provoca muitas rachaduras no solo quando seco;



□ ILITA

Apresenta organização estrutural semelhante à Montmorilonita, exceto as ligações entre as unidades cristalográficas que são neutralizadas por íons de K.

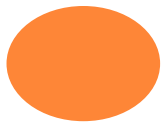
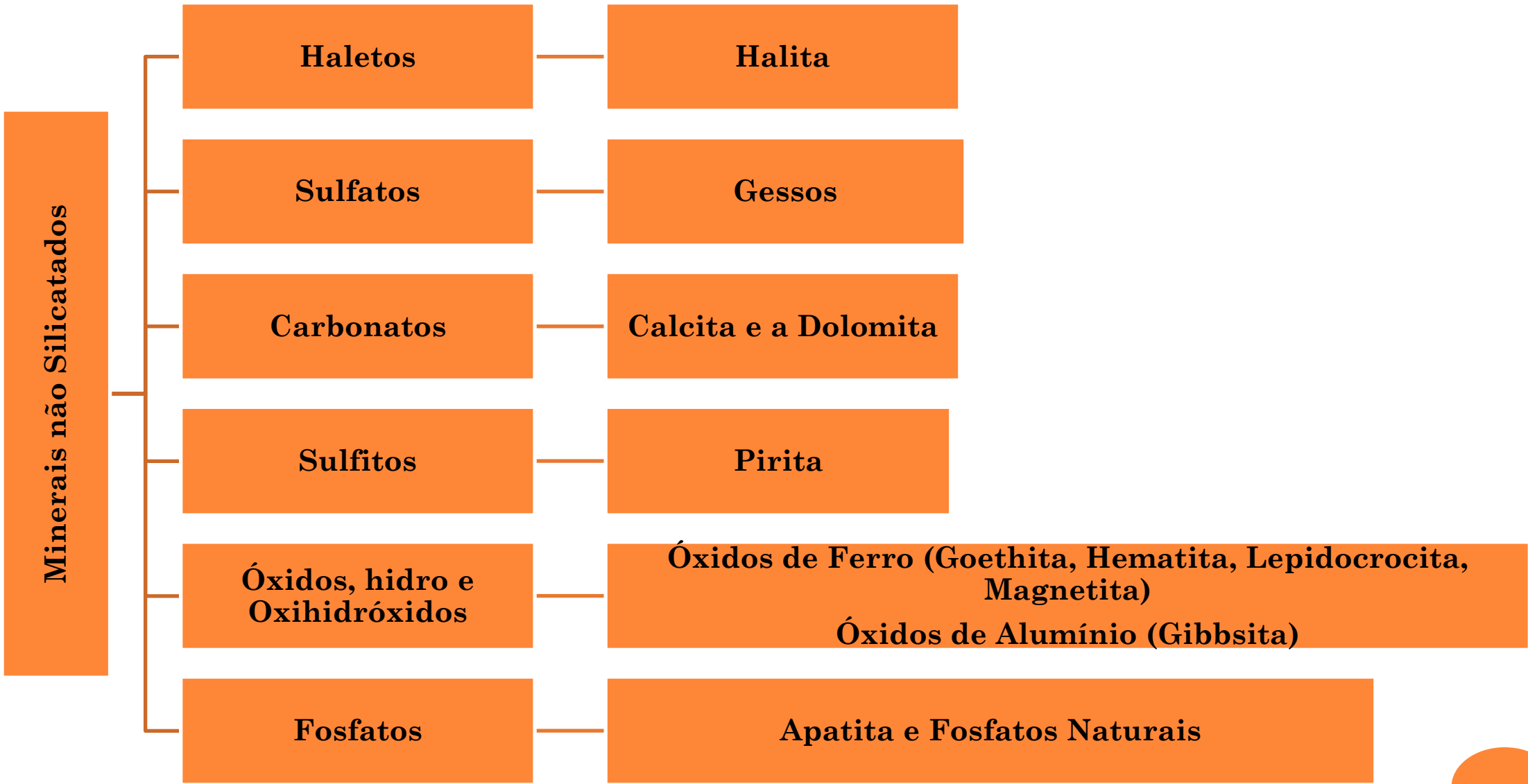
□ Outros Grupos de Argilas Silicatadas

▪ VERMICULITA

▪ CLORITA







ARGILAS NÃO SILICATADAS

□ Óxidos de Fe e Al

❖ GIBBSITA ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$)

❖ GOETHITA ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

❖ HEMATITA (Fe_2O_3)



ÓXIDOS DE FERRO E ALUMÍNIO

São minerais secundários de importância muito significativa nos solos de regiões tropicais e, de grande influência nas propriedades destes solos.



ÓXIDOS DE FERRO

Por meio do intemperismo de minerais primários (ferromagnesianos) há a liberação do Fe através de uma reação hidrolítica e oxidativa (irreversível).



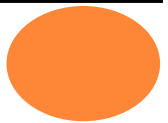
Goethita



- ✓ São os responsáveis pelas cores avermelhadas e amareladas dos solos;
- ✓ Influem na formação de estrutura ajudando a formação de agregados estáveis;
- ✓ Têm alta superfície específica;



Os óxidos de ferro mais importantes para os solos são: **HEMATITA** e **GOETHITA**.

- A HEMATITA confere a cor vermelha e tem um poder pigmentante bastante forte. É um mineral de ambientes tipicamente bem drenados;
 - A GOETHITA é a forma mais frequente nos solos brasileiros e é responsável pelas cores amarelas e bruno-amareladas dos solos brasileiros. É um mineral que ocorre em quase todas as condições climáticas;
- 

ÓXIDOS DE ALUMÍNIO

A GIBBSITA é o mais comum de ser encontrado no solos e é um dos principais componentes da fração argila de alguns solos devido ao fato de ser um **produto final de intemperismo avançado dos solos;**



A formação da Gibbsita se dá a partir da intemperização dos minerais primários que podem ser intemperizados diretamente a Gibbsita ou podem passar por estágios intermediários de formação;



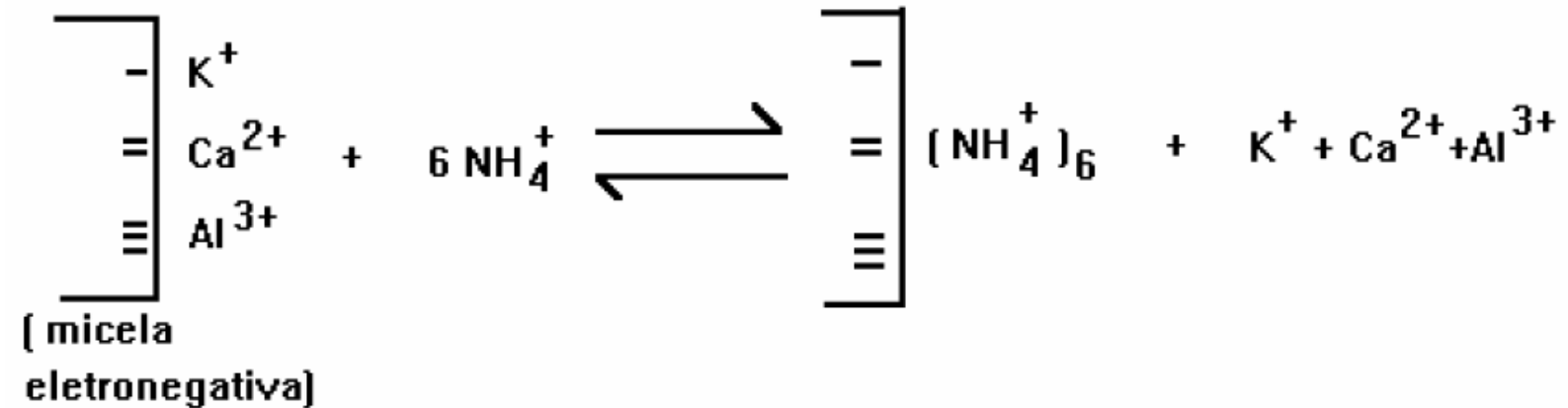
Um aspecto de grande importância nos óxidos de Fe e Al é a sua natureza *anfotérica*, ou seja, **os óxidos de Fe e Al apresentam cargas negativas ou positivas de acordo com o pH;**

O mecanismo de formação de cargas elétricas na superfície dos óxidos de Fe e Al pode ser vista como uma protonação ou desprotonação dos grupamentos superficiais das partículas;

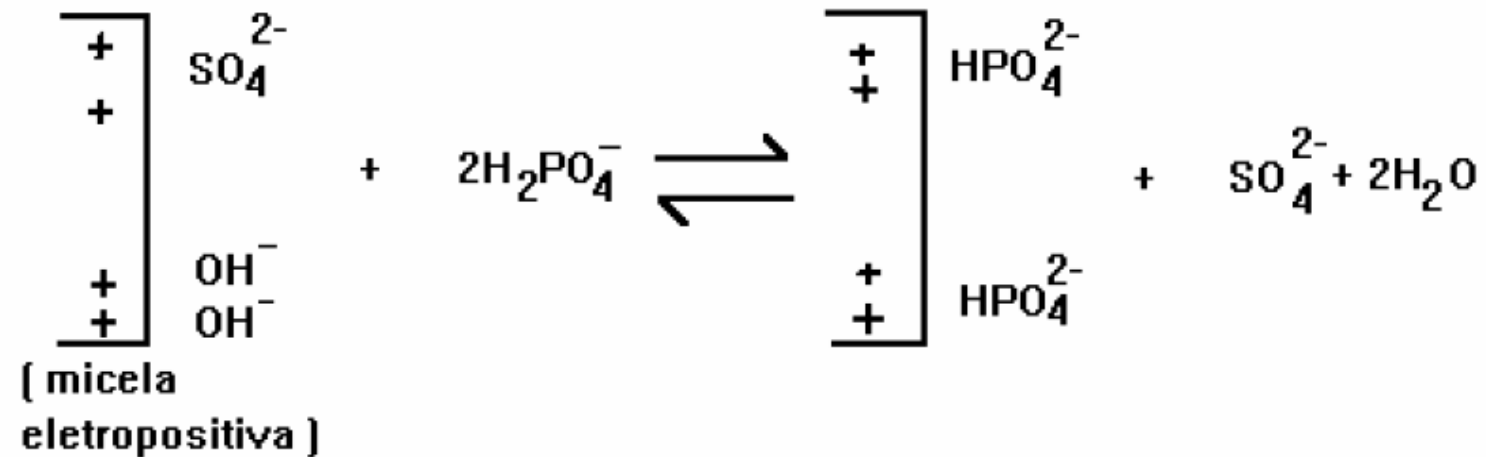


ADSORÇÃO E TROCA IÔNICA

Troca Catiônica



Troca Aniônica



CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA

pH do solo ↓		pH 7,0 ↓			
CTC permanente		CTC dependente de pH			
K^+	Ca^{2+}	Al^{3+}	-H	-H	-H
		Ca^{2+}	-H	-H	-H
	H^+ Al^{3+}	H^+	-H		-H
NH_4^+	Mg^{2+}	Mg^{2+}	-H		-H
	H^+		-H		
		-H			
CTC efetiva		CTC "dependente do pH"			

Figura 3 – Representação esquemática da CT de um solo de região tropical



PRINCÍPIOS BÁSICOS DA CTC

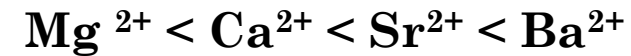
- **A troca é reversível**
- **A troca é uma reação estequiométrica**
- **É um processo rápido**



FATORES QUE AFETAM A CTC

- **pH**

- **Natureza dos cátions trocáveis**



- **Raios Iônicos Hidratados**

Lei de Coulomb (a atração entre cargas é diretamente proporcional o número de cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa)

- **Concentração da solução**

- **Natureza da fase sólida**



Quadro 3 – Capacidade de troca catiônica, a pH 7,0 de alguns materiais trocadores constituintes do solo.

Material	CTC (cmol_c kg⁻¹)
Matéria Orgânica	150 – 400
Montmorilonita	80 – 150
Caulinita	3 -15
Óxidos de Fe e Al	4 - 10

FONTE: Wutke & Camargo (1972); Fassbender (1978)



Quadro 4 – Classes de características relacionadas com a CTC.

CARACTERÍSTICAS	CLASSES				
	M. Baixa	Baixa	Média	Alta	M. Alta
SB (cmol _c dm ⁻³)	≤ 0,60	0,61 – 1,80	1,81 – 3,60	3,61 – 6,00	< 6,00
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	≤ 0,20	0,21 -0,50	0,51 – 1,00	1,01 – 2,00	< 2,00
t (cmol _c dm ⁻³)	≤ 0,80	0,81 – 2,30	2,31 – 4,60	4,61 – 8,00	< 8,00
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	≤ 1,00	1,01 - 2,50	2,51 – 5,00	5,01 – 9,00	< 9,00
T (cmol _c dm ⁻³)	≤ 1,60	1,61 - 4,30	4,31 – 8,60	8,61 - 15,0	< 15,0
V %	≤ 20,0	20,1- 40,0	40,1 – 60,0	60,1 – 80,0	> 80,0
m %	≤ 15,0	15,1 – 30,0	30,1 – 50,0	50,1 – 75,0	> 75,0

Fonte: Alvarez V. et al. (1999)

- Valor CTC total (T) e CTC efetiva (t)

$$T = SB + (H + Al) \text{ (cmol}_c\text{dm}^{-3} \text{ ou cmol}_c\text{kg}^{-1}\text{)}$$

$$t = SB + Al^{+3} \text{ (cmol}_c\text{dm}^{-3} \text{ ou cmol}_c\text{kg}^{-1}\text{)}$$

- Soma de Bases (SB): $SB = Ca^{+2} + Mg^{+2} + K^+ + Na^+ + NH_4^+$ (cmol_cdm⁻³ ou cmol_ckg⁻¹)

- Saturação por Bases (V): $V = \frac{SB}{T} * 100$ (%)

- Saturação por Alumínio (m): $m = \frac{Al^{+3}}{t} * 100$ (%)

- Acidez Trocável: Al^{+3} (cmol_cdm⁻³ ou cmol_ckg⁻¹)

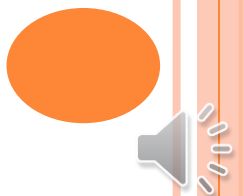
- Acidez Potencial: $H + Al$ (cmol_cdm⁻³ ou cmol_ckg⁻¹)



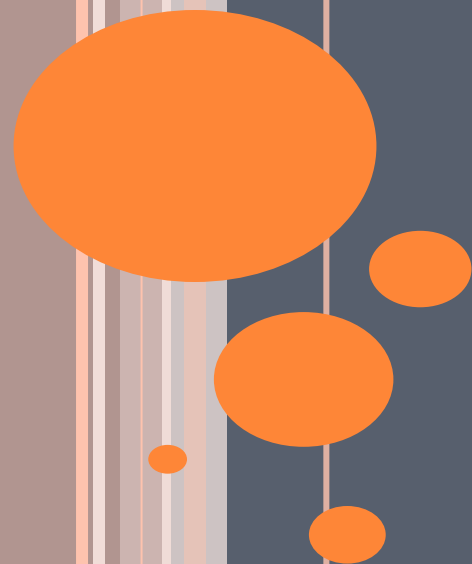
Solos	pH	Al ³⁺	SB	t	(H + Al)	T	V	m	
		-----cmol _c dm ⁻³ -----						%	
A	5,4	0,1	1,9	2,0	1,4	3,3	58	5	
B	4,5	1,7	1,0	2,7	5,0	6,0	17	63	
C	6,5	0,0	10,0	10,0	1,0	11,0	91	0	



OBRIGADO PELA ATENÇÃO!



PROPRIEDADES FÍSICAS E MORFOLÓGICAS DO SOLO



O SOLO COMO SISTEMA TRIFÁSICO

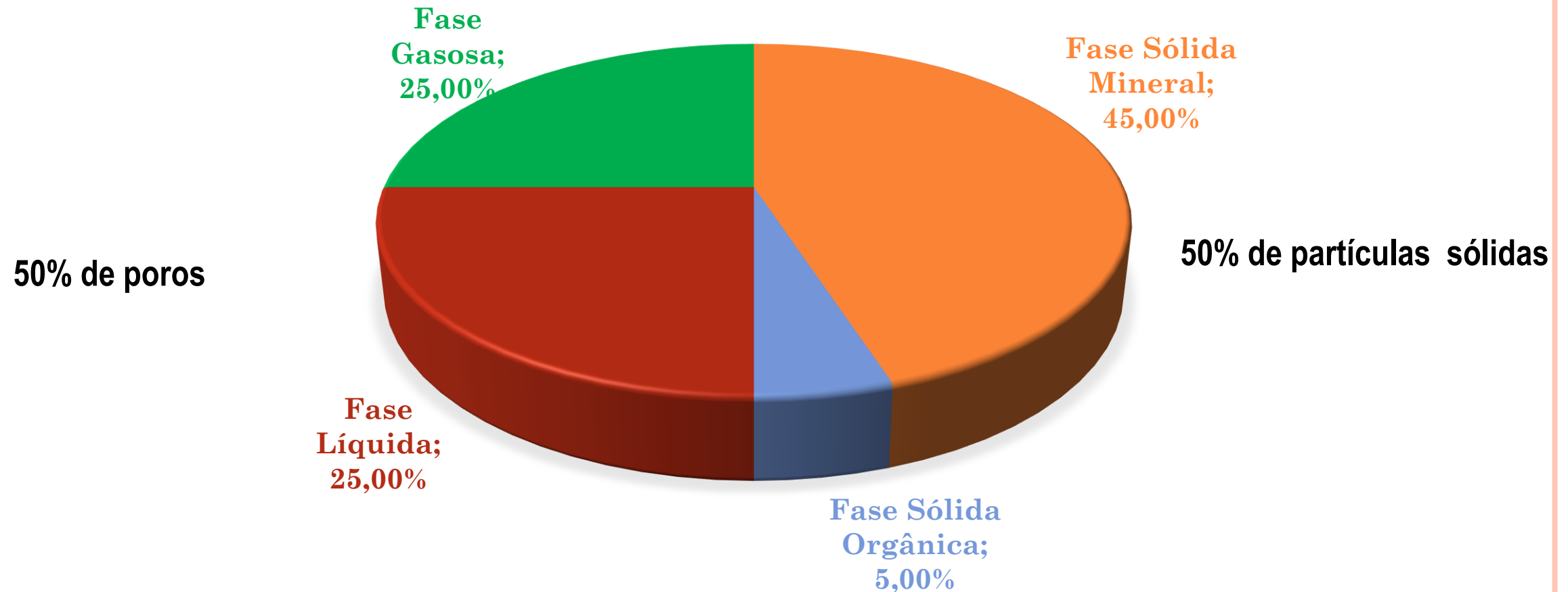
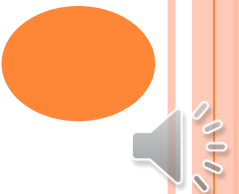


Figura 1 – Composição volumétrica de um solo com boa estrutura.



O SOLO COMO UM SISTEMA DISPERSO

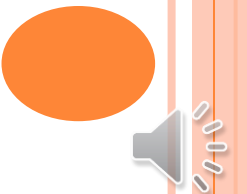
- O solo é constituído de mais de uma fase, estando a fase sólida em estado de acentuada subdivisão.
 1. Fase líquida, gasosa e sólida;
 2. Fase sólida composta pelas frações minerais e material orgânico;
 3. A fração minerais é composta pelas frações granulométricas, areia, silte e argila, com diferentes tamanhos;



SOLO COMO SISTEMA DISPERSO

Sistema Disperso: sistema no qual pelo menos uma fase é subdividida em partículas extremamente pequena, que exibem uma área superficial grande por unidade de volume.

A fração argila dos solos apresenta importância grande por ser a fração ativa do solo e que participa de praticamente todas as reações físico-químicas que ocorrem no solo.



São características dos minerais da fração argila:

- 1) Estado coloidal com presença de cargas elétricas;
- 2) Adsorção de íons;
- 3) Retenção de água;
- 4) Apresentam plasticidade e pegajosidade;
- 5) São susceptíveis à dispersão e floculação;
- 6) Exibem dureza e tenacidade no estado seco;
- 7) Variam de volume conforme a umidade;
- 8) Desempenham papel importante na cor e agregação dos solos minerais;



Estado Coloidal: um estado de subdivisão da matéria em tamanho extremamente pequeno, se aproximando mas não chegando à subdivisão molecular.

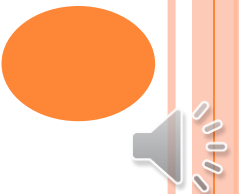
As principais características dos **colóides** são:

- ✓ **Cargas elétricas***
- ✓ **Área superficial**
- ✓ **Movimento Browniano**

** São importantes por influir em reações como adsorção e troca de íons importantes para a química de solos e em reações de floculação e dispersão.*



- Nesse sistema ocorrem:
 - Reações químicas
 - Reações Físico-químicas
 - Reações Microbiológicas

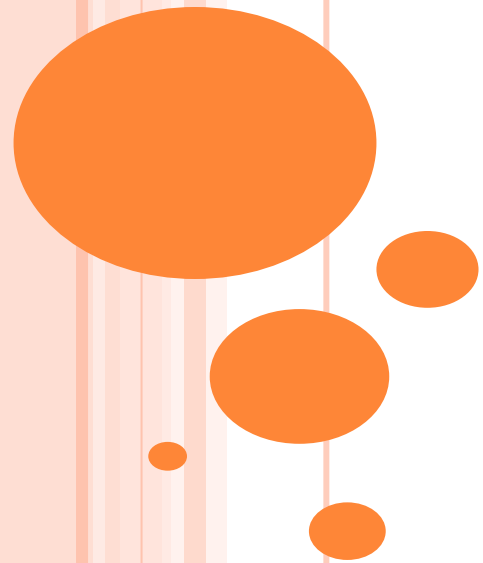


Quadro 2 – Superfície específica dos principais componentes da fração argila do solo.

Constituintes da Fração Argila	Superfície Específica (m² g⁻¹)
Gibbsita	1 – 2,5
Caulinita	10 – 30
Goethita	30
Óxidos de ferro	100 – 400
Vermiculita	300 – 500
Montmorilonita	700 – 800
Matéria orgânica	± 700



TEXTURA DO SOLO



○ TEXTURA

É uma importante característica do solo, utilizada no estudo da gênese, morfologia e classificação do solo;

Permite inferir sobre a fertilidade do solo (solos argilosos tendem a ser mais férteis que solos arenosos) e a conservação do solo (solos arenoso são muito permeáveis à água, mas igualmente suscetíveis à erosão hídrica);

A textura do solo está relacionada intimamente com a área superficial específica do solo;

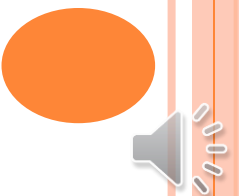


Tabela - Área específica e capacidade de troca de cátions (CTC) de diferentes partículas do solo.

Partícula	Área Específica ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	CTC ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)
Caulinita (1:1)	10-20	3-15
Ilita (2:1)	70-120	10-40
Vermiculita (2:1)	300-500	100-150
Silte	< 0,1	Baixo
Areia fina	< 0,1	Muito baixo
Areia grossa	< 0,01	Extremamente baixo



- A fração que mais influencia o comportamento físico do solo é a argila, carregada predominantemente por cargas negativas;
- As cargas da superfície da partícula mais os cátions neutralizantes formam a **dupla camada elétrica**;
- A atração de um cátion a uma micela de argila carregada negativamente, geralmente aumenta com o aumento da valência do cátion;



COMO É A DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS À MEDIDA QUE SE AFASTA DA PARTÍCULA?

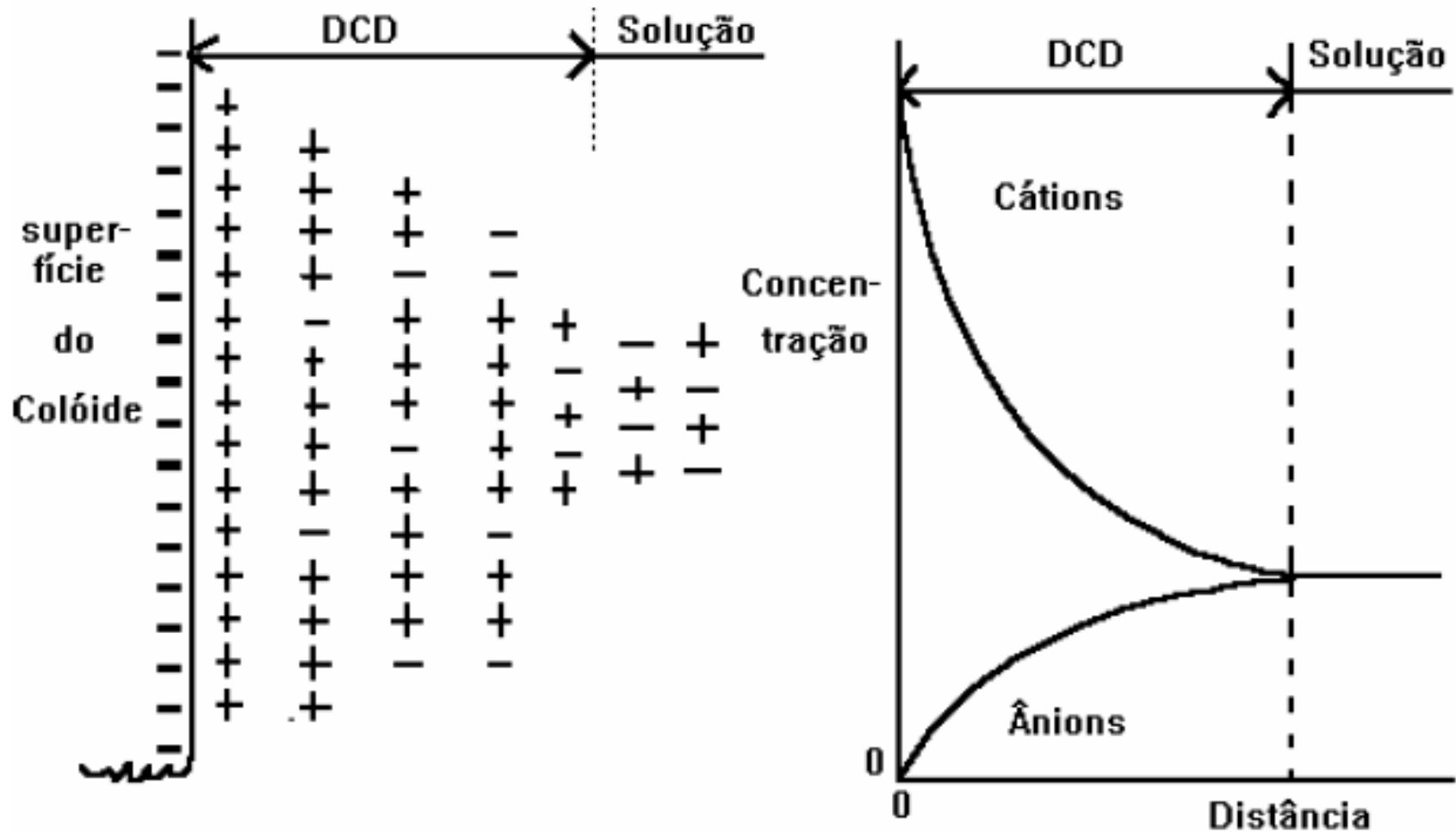


Figura 5 - Distribuição de íons a partir da superfície de colóide eletronegativo, de acordo com o conceito de dupla camada difusa (DCD) (Mitchell, 1976).

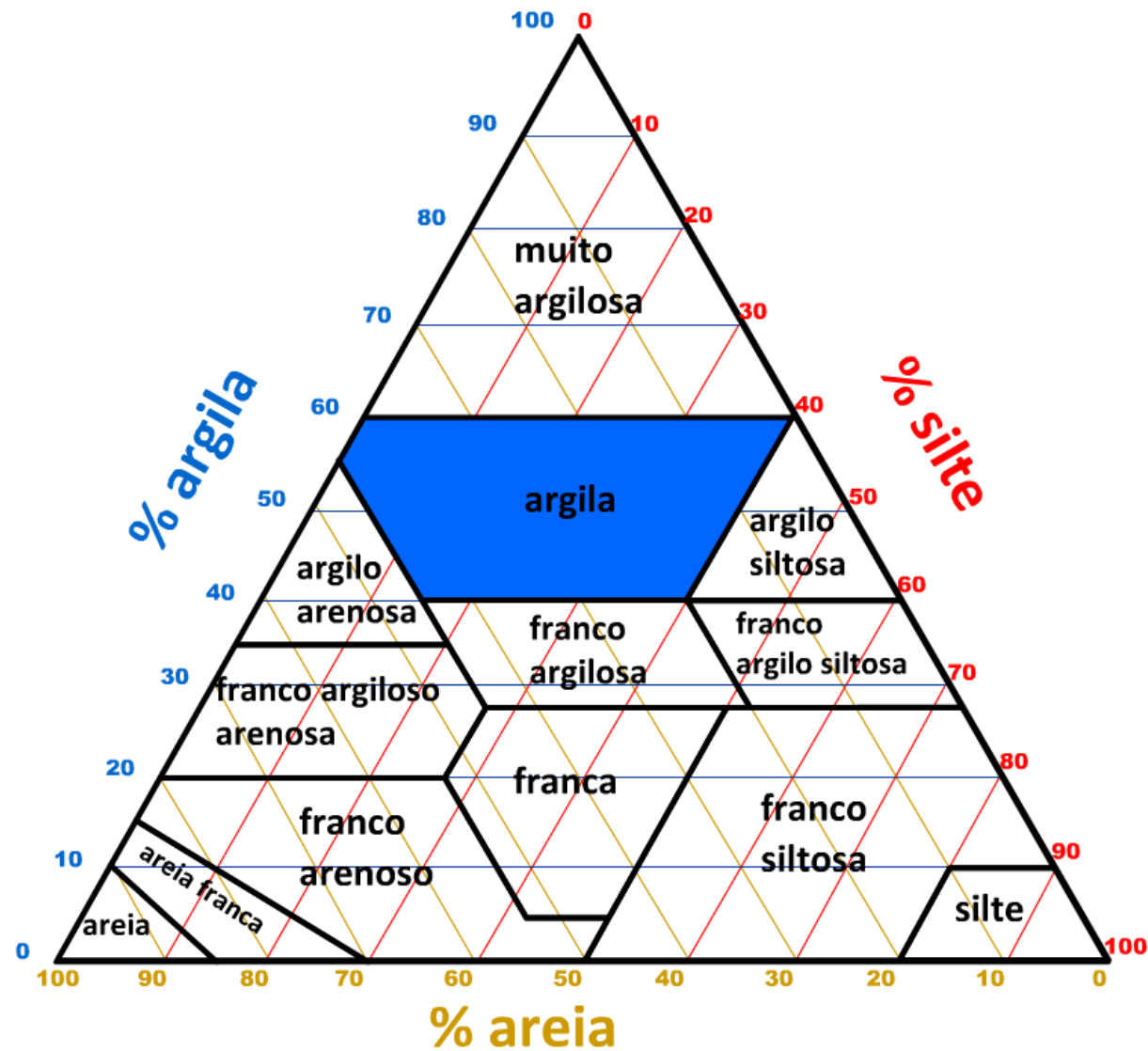
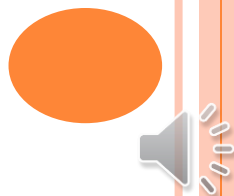


Figura 6 - Representação da textura pelo triângulo.



DETERMINAÇÃO DA TEXTURA DO SOLO

o No campo (subjetivo e sujeito a erros)

- **Areia:** sensação de atrito, aspereza. A fração areia é solta, com grãos simples, não plástica, não pode ser deformada, não pegajosa, não higroscópica, predominam macroporos na massa, não coesa, pequena área superficial específica, CTC praticamente ausente;

- **Silte:** sedosidade. Apresenta ligeira coesão quando seco, poros de tamanho intermediário, ligeira ou baixa higroscopicidade, superfície específica intermediária, CTC baixa;

- **Argila:** plasticidade e pegajosidade. É plástica e pegajosa quando úmida, dura e muito coesa quando seca, alta higroscopicidade, elevada superfície específica, alta CTC, predomínio de microporos, contração e expansão, forma agregados com outras partículas;



o **Em Laboratório (Análise Textural)**

❖ **Preparação da Amostra**

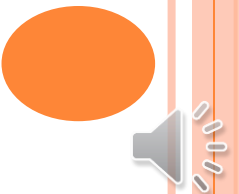
- Remoção da Matéria Orgânica
- Remoção de Óxidos de Ferro
- Remoção de Carbonatos
- Remoção de sais solúveis

❖ **Dispersão da Amostra de solo**

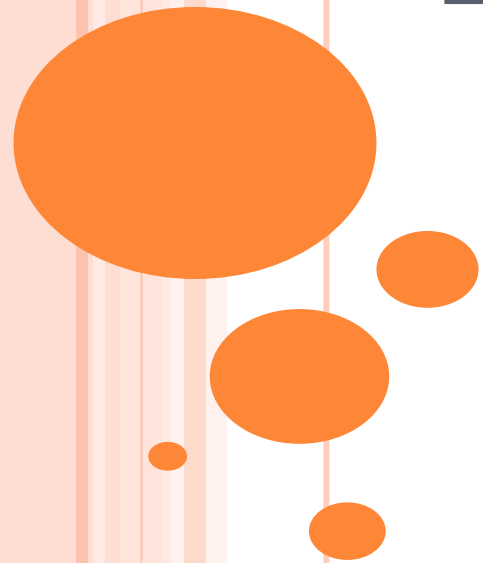
- Dispersão Química
- Dispersão Física
- Dispersão Ultrassônica

❖ **Separação das frações**

- Peneiramento
- Sedimentação



ESTRUTURA DO SOLO



“Estrutura do solo é o arrançamento das partículas do solo e do espaço poroso entre elas; incluindo ainda o tamanho, forma e arrançamento dos agregados formados quando partículas primárias se agrupam em unidades separáveis”.

(Marshall, 1962)

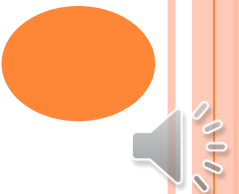
“Estrutura do solo é o arranjo ou ordenação das partículas primárias (areia, silte, argila) e secundárias (microagregados) em certos modelos ou padrões estruturais, incluindo, necessariamente, o espaço poroso acompanhante”.

(Baver et al., 1973)

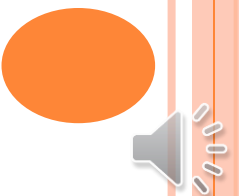


A estrutura é uma das propriedades mais importantes do solo. A ela estão relacionados diversos processos essenciais à relação solo-planta

- O movimento e a retenção de água;
- A aeração;
- A transferência de calor;
- A porosidade;
- A penetração de raízes, e o desenvolvimento geral das plantas;
- Atividade biológica do solo (microbiana);

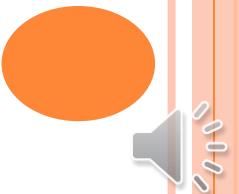


Solos bem agregados favorecem o arejamento e permitem maior aprofundamento do sistema radicular, aumentando o volume de solo explorado em água e nutrientes.



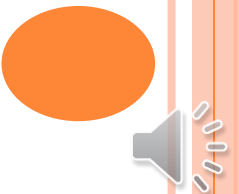
o GÊNESE DA ESTRUTURA DO SOLO

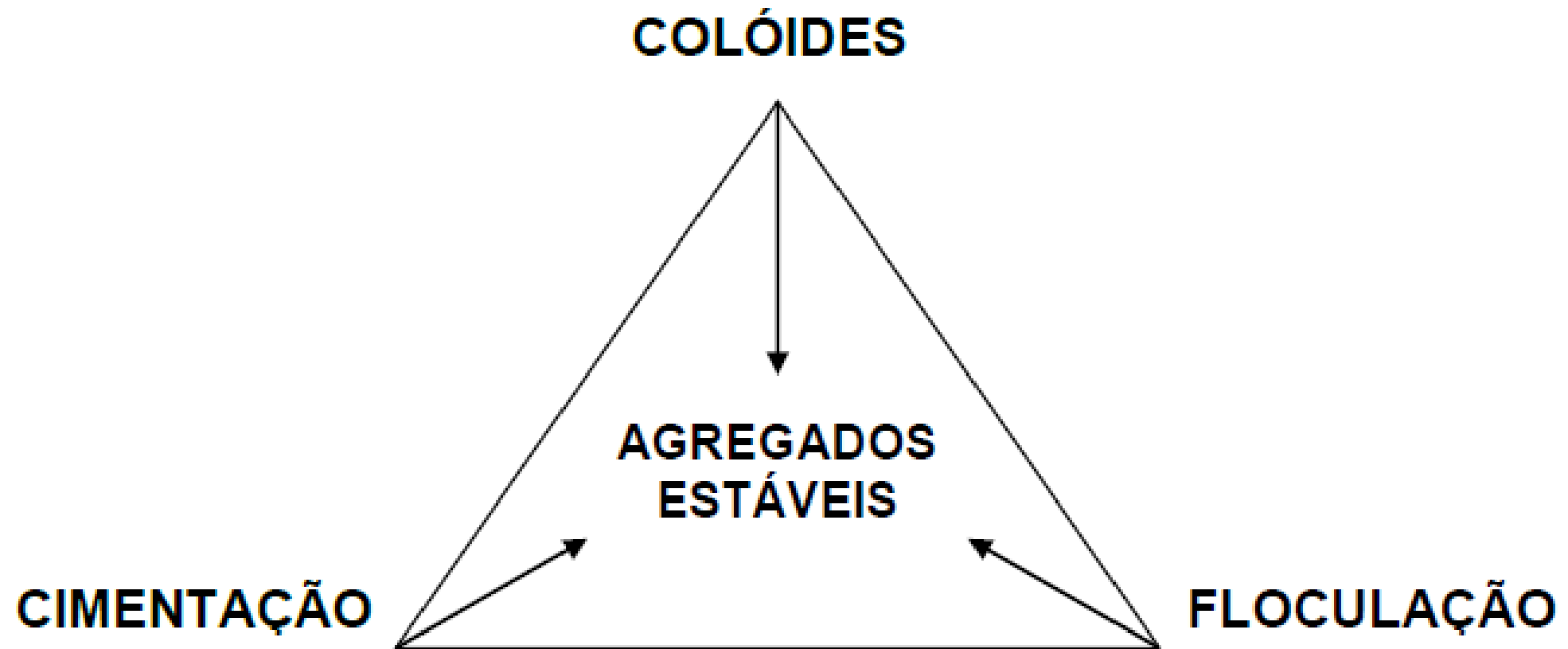
- A formação de agregados está intimamente relacionada à **floculação** e ao comportamento da **dupla camada elétrica** relacionada aos **colóides**;
- A floculação pode ser de natureza eletrocinética, onde partículas primárias com alto potencial eletrocinético ou **potencial zeta**, se repelem mutuamente quando se chocam em uma suspensão;
- Se este potencial for reduzido, ocorre um fenômeno inverso e as partículas passam a se atrair, formando **flocos ou grumos**;

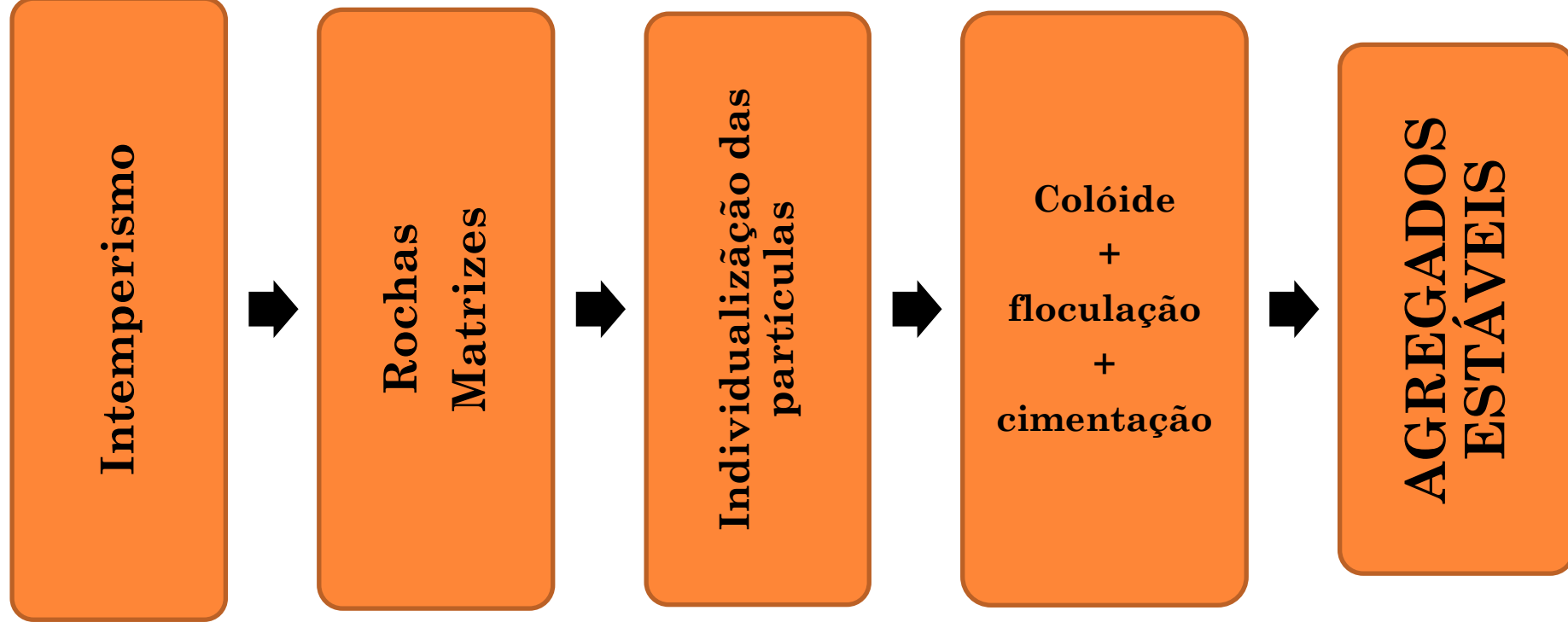


Outro tipo de floculação que existe é aquele que é resultante da atração eletrostática entre os bordos positivos e as cargas negativas dos minerais de argila, produzindo uma floculação mais estável;

Para a formação de AGREGADOS ESTÁVEIS é necessário, desta forma, que existam COLÓIDES; que estes passem pelo processo de FLOCULAÇÃO, e que haja CIMENTAÇÃO das partículas floculadas;







MECANISMOS DE FORMAÇÃO DOS AGREGADOS

- ✓ A formação de agregados estáveis no solo exigem que o material coloidal seja, primeiro, floculado;
- ✓ Deve haver estabilização ou cimentação das partículas primárias floculadas;
- ✓ A matéria orgânica, os silicatos, os óxidos de ferro e de alumínio, quando combinados com determinados cátions do complexo de troca do solo, formam os componentes básicos dos agentes cimentantes;



MODELO DE ESTRUTURAÇÃO DO SOLO

Teoria do Domínio Argiloso de Emerson (1959)

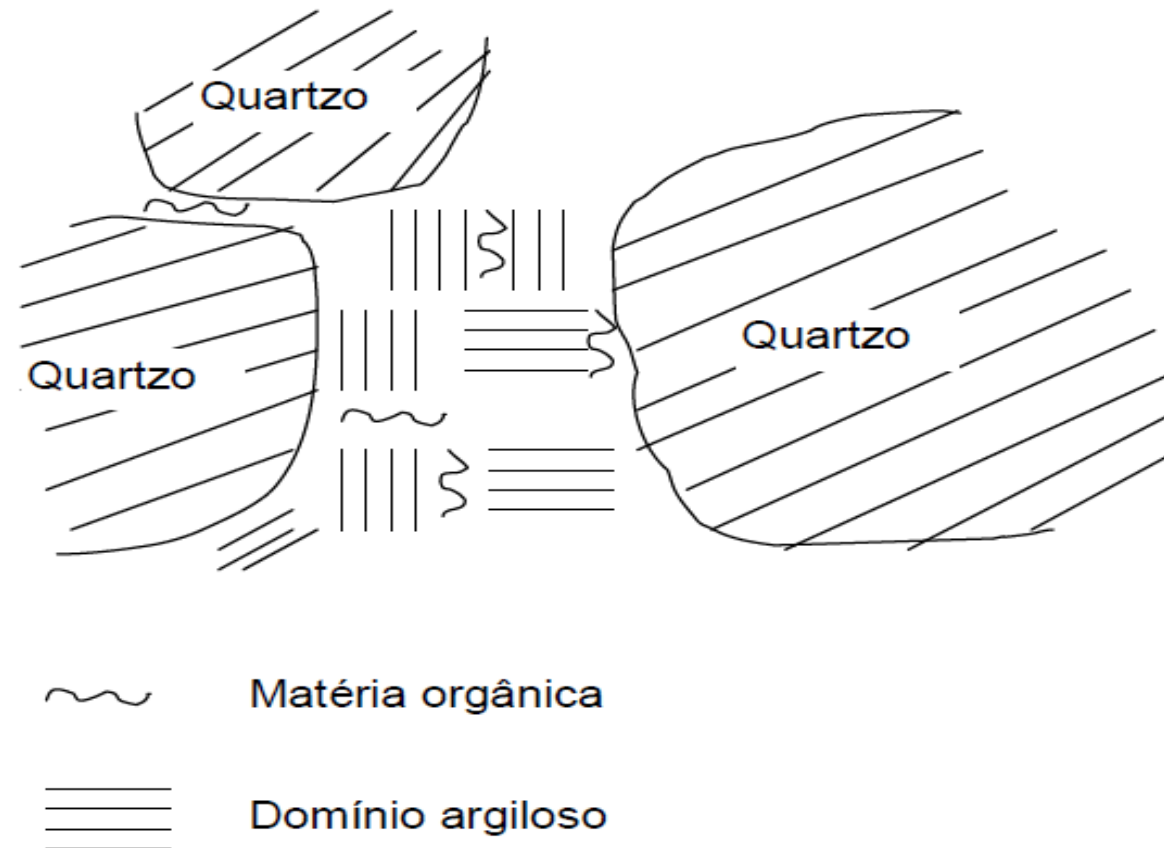
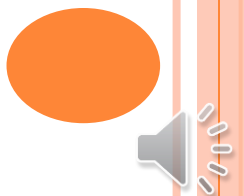
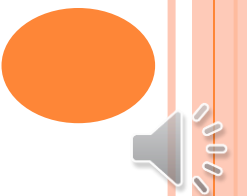
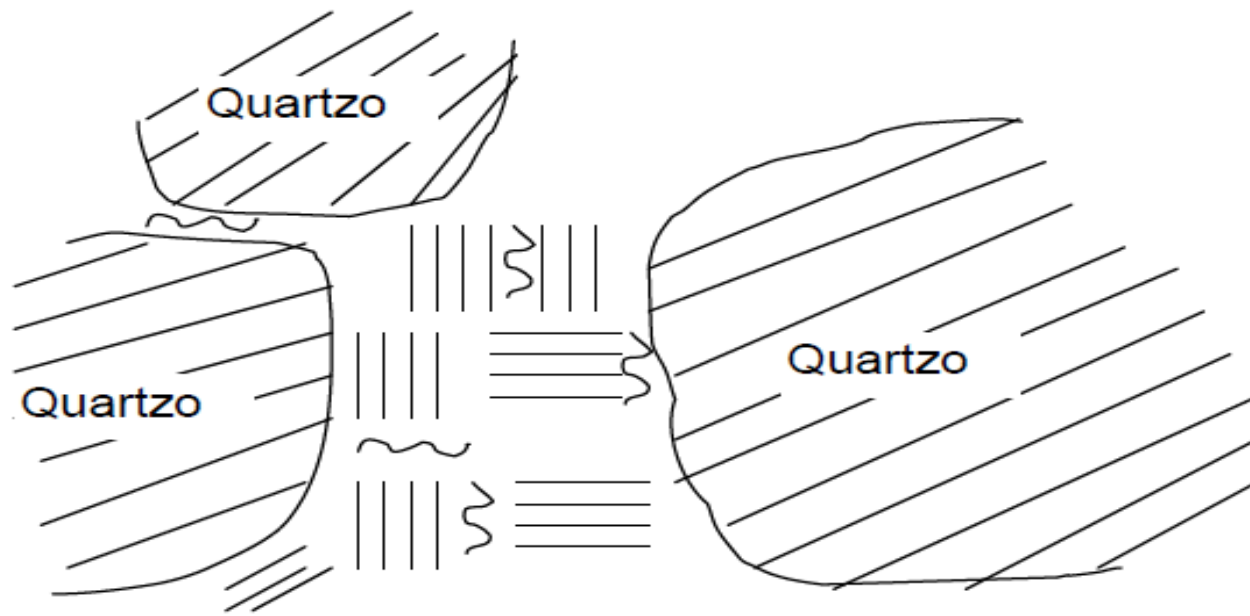


Figura 7 - Representação esquemática da teoria de Emerson.



- “Grãos de quartzo, *Domínio argiloso* e matéria orgânica se arranjam de várias maneiras, formando os agregados do solo”.
- Quartzo: representa a fração grosseira do solo (areia e silte);
- Domínio argiloso: são grupo de cristais de argila tendo cátions trocáveis adequados, os quais estão orientados e suficientemente unidos ao grupo para comportar-se em água como uma unidade simples;





~~~~~ Matéria orgânica

==== Domínio argiloso

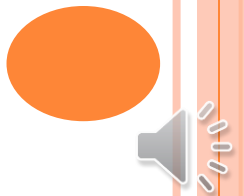
- 1) Ligação Quartzo – Matéria orgânica – Quartzo;
- 2) Quartzo – Matéria orgânica – Domínio argiloso;
- 3) Domínio argiloso- Matéria orgânica – Domínio argiloso;
- 4) Domínio argiloso/lado – Domínio argiloso/face;

Figura 7 - Representação esquemática da teoria de Emerson.



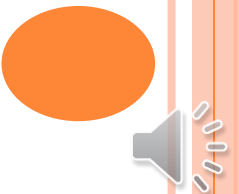
# AGENTES DE ESTRUTURAÇÃO

- *Coloides: Minerais e Orgânicos*
- Íons trocáveis – *Cátions presentes*
- *Óxidos de Ferro e Alumínio*
- *Atividade Microbiana*
  - Direta : crescimento de microrganismos
  - Indireta : decomposição da matéria orgânica



# COLOIDES INORGÂNICOS

- Partículas de areia e silte somente não se agregam.
- É necessária a presença de material finamente dividido, coloidal, para que o processo de estruturação ocorra;
- Os materiais coloidais inorgânicos do solo pode ser ***as próprias partículas de argila e os óxidos de ferro e de alumínio;***



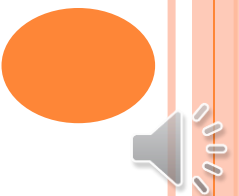
## COLOIDES ORGÂNICOS

- Os principais produtos da síntese microbiana, relacionados à estabilização de agregados, pelo seu poder cimentante, são os **polissacarídeos**;
- *A maior parte da agregação do solo é resultante da ação da argila e dos colóides orgânicos*, implicando na possibilidade da existência de interações entre estes materiais formando **complexos argilo-orgânicos**;



○ Os mecanismos de formação dos *complexos argilo-orgânicos* pelos quais os coloides estabilizam a estrutura do solo, podem ser atribuídos à união dos polímeros orgânicos às superfícies argilosas através de:

- 1) Pontes de cátions;
- 2) Pontes de H;
- 3) Forças de Van der Waals;
- 4) Complexos de óxidos e húmus;



## CÁTIONS TROCÁVEIS

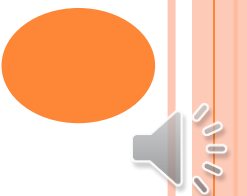
- A floculação é determinada pela concentração de eletrólitos em solução e pelo tipo de cátion saturando o coloide e a troca catiônica;
- Cátions que apresentam alta carga e/ou baixa hidratação promovem sistemas coloidais que floculam mais facilmente;
- Estes cátions substituem os monovalentes que houverem e, em baixa concentração de eletrólitos, **promovem floculação, ao comprimirem a dupla camada difusa;**



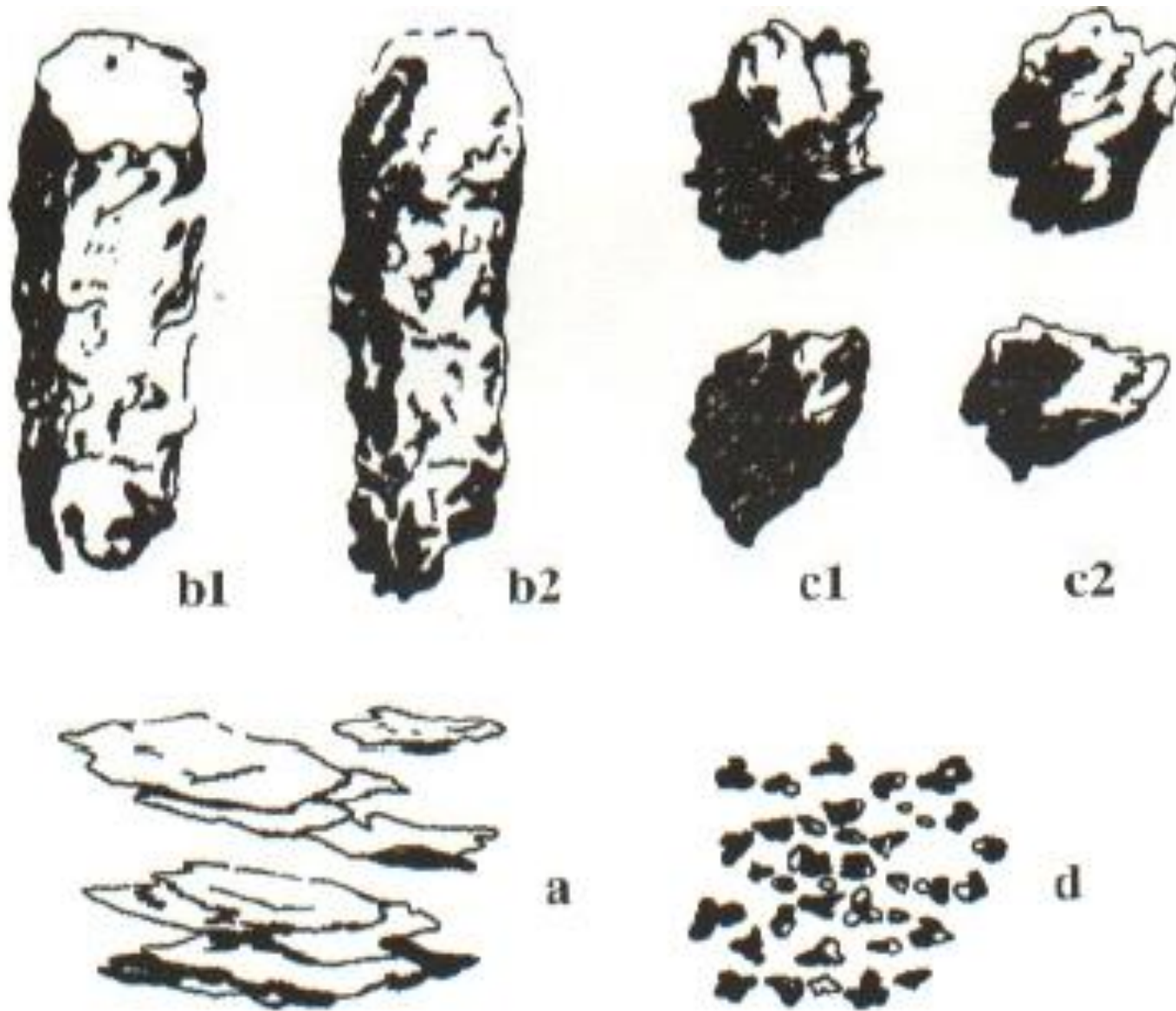
# CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DO SOLO

○ A classificação da estrutura do solo é baseada em aspectos morfológicos dos agregados individualizados, baseando-se em três aspectos básicos:

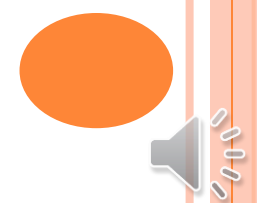
- 1) **TIPO** : determinado pela **FORMA** do agregado;
- 2) **CLASSE** : determinado pelo **TAMANHO** do agregado;
- 3) **GRAU**: determinado pela facilidade ou dificuldade de **DISTINÇÃO** (“RESISTÊNCIA”) dos agregados;







a) laminar; b1) prismático; b2) colunar; c1) blocos angulares; c2) blocos subangulares e d) granular





Laminar

Uma dimensão, a vertical, é muito menor que as outras duas. Predomínio do plano horizontal.



Granular

Agregados esferoides ou poliedros com faces planas ou curvas.

- SE as unidades estruturais NÃO são POROSAS, estrutura GRANULAR;
- SE as unidades estruturais SÃO POROSAS, estrutura GRUMOSAS;





Prismática



Colunar

Uma dimensão, a vertical, é muito **MAIOR** que as outras duas. Predomina a linha vertical.

- SE o topo ou cabeça do agregado é de quinas, estrutura **PRISMÁTICA**;
- SE o topo ou cabeça do agregado são **ARREDONDADOS**, estrutura **COLUNAR**;





Bloco angular



Bloco subangular

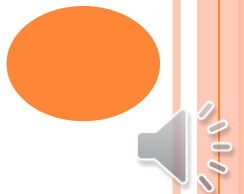
NÃO HÁ predomínio de nenhuma das três dimensões.

- SE apresenta superfícies planas e faces planas, estrutura em blocos ANGULARES;
- SE existe uma mistura de faces arredondadas e planas, estrutura em blocos SUBANGULARES;



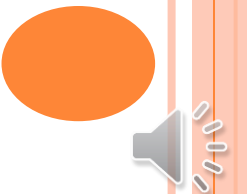
# TÉCNICAS QUE PROMOVEM A ESTRUTURAÇÃO DO SOLO

1. Calagem;
2. Incorporação de resíduos orgânicos;
3. Proteção do solo;
4. Minimizar a movimentação do solo;
5. Preparo do solo em condições de umidade ideais;
6. Evitar cátions dispersantes;



# CONSIDERAÇÕES DA ESTRUTURA DO SOLO

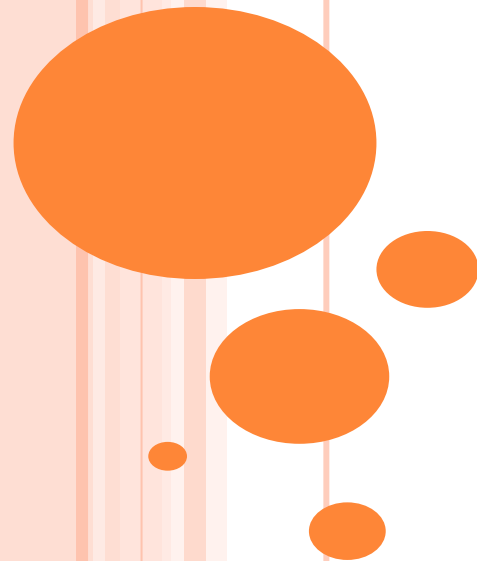
- A estrutura é um atributo dinâmico do solo, sendo fortemente afetada por atividade biológica e, notadamente, por práticas de manejo do solo;
- A matéria orgânica pode atuar diretamente como agente cimentante e governando o tipo de óxido de ferro presente;
- A estruturação do solo modifica as manifestações de sua composição textural, refletindo mais claramente o comportamento físico desses solos;
- Caulinita e Gibbsita são os constituintes mineralógicos responsáveis pelo desenvolvimento da estrutura dos Latossolos;



- Não existe solo sem estrutura, ou seja, mesmo não havendo agregação, as partículas do solo produzirão determinado arranjo que propiciará definido ambiente físico do solo;
- Os fatores de formação do solo podem influenciar o aparecimento de determinada estrutura;

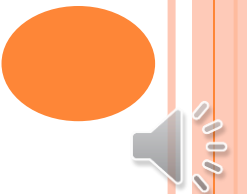


# AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA DO SOLO

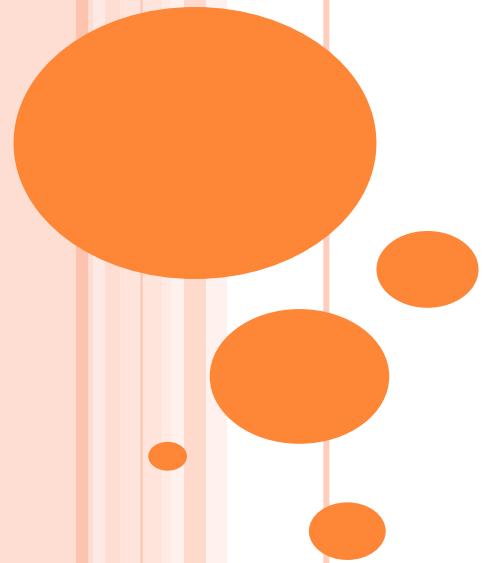




Solos bem estruturados oferecem melhores condições para o desenvolvimento das plantas e a persistência dessa estruturação, de certa forma, opõe-se à degradação do solo.



# DENSIDADES DO SOLO



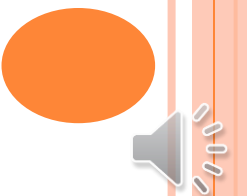
## DENSIDADE DO SOLO

A densidade do solo é definida como sendo a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca a 105°C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros.

Densidade do Solo ou Global (“*Bulk*” density)

( $\rho$ ), é a densidade que inclui o espaço poroso do solo.

$$\rho = \frac{M_s}{V} \text{ (kg.m}^{-3}\text{)} \quad (5)$$

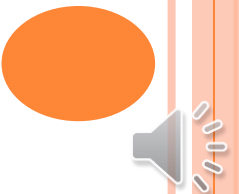


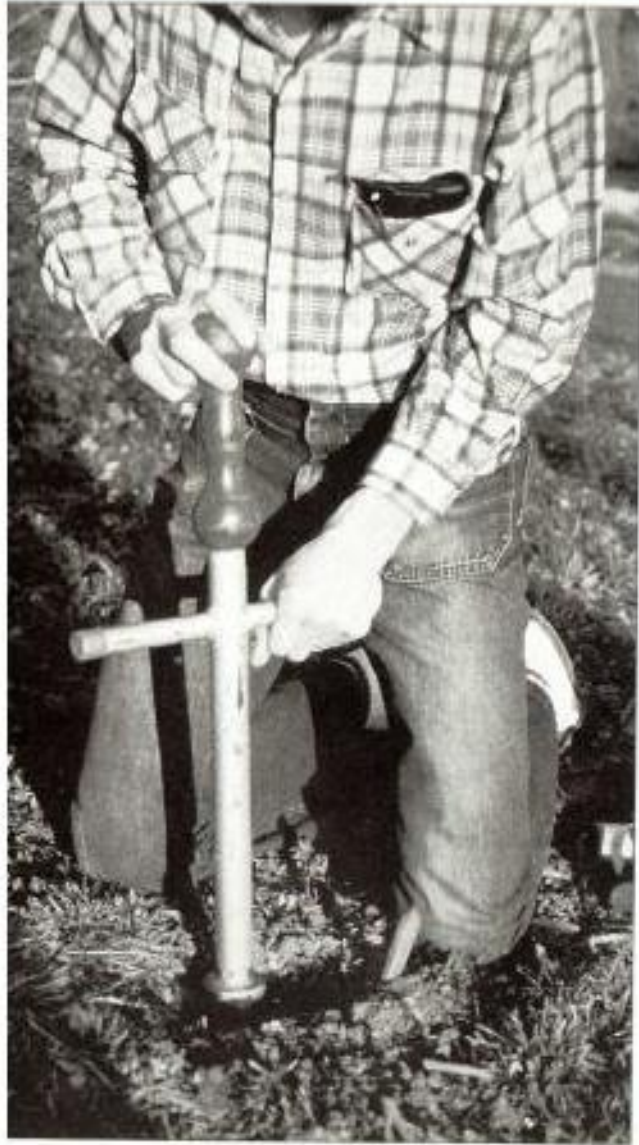
# MÉTODO DE DETERMINAÇÃO

- O método mais utilizado é o do anel volumétrico:

Usa-se o anel de kopeck, de bordos cortantes e capacidade interna conhecida, geralmente  $100 \text{ cm}^3$ ;

Crava-se o anel na parede do perfil ou no próprio solo, removendo-o a seguir o excesso de terra, a qual será desbastada com auxílio de uma faca cortante, até igualar com ambas as superfícies do anel;





(a)



(b)



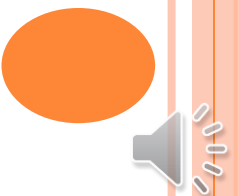
- Transfere-se o anel para um recipiente apropriado, ainda no campo, para a amostra se manter indeformada; secando em estufa e pesando-se a amostra, calcula-se então a densidade do solo, onde:

$$D_s = M/V$$

$D_s$  é a densidade do solo;

$M$  é a massa da amostra; e,

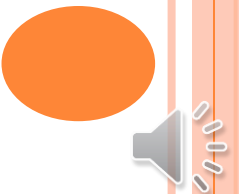
$V$  é o volume da amostra.



# INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

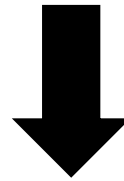
As densidades dos solos são expressas em gramas por centímetros cúbicos ou kilogramas por metro cúbico e as amplitudes de variação situam-se dentro dos seguintes limites:

- solos argilosos, de 1,00 a 1,25 g/cm<sup>-3</sup>;
- solos arenosos, de 1,25 a 1,40 g/cm<sup>-3</sup>;
- solos húmicos, de 0,75 a 1,00 g/cm<sup>-3</sup>



- Os valores de  $\rho$  refletem, em última análise, algumas características do sistema poroso do solo:

1. Desenvolvimento do sistema radicular;
2. Capacidade de armazenamento de água para as plantas;



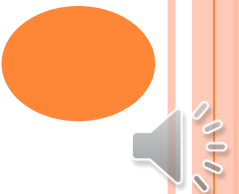
Sistema de Manejo do Solo



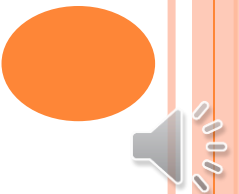


## ALGUMAS CONSIDERAÇÕES:

- A  $\rho$  reflete, primariamente, o arranjo das partículas do solo, que por sua vez, define as características do sistema poroso;
- A  $\rho$  depende da estrutura do solo em todos os seus aspectos;
- Os valores de  $\rho$  são reflexos da composição mineralógica da fração argila, da textura e do teor de matéria orgânica;
- Os valores mais baixos de  $\rho$  estão associados a solos ou camadas de solos em estrutura granular;
- Os valores mais elevados de  $\rho$  estão associados à estrutura do tipo blocos ou similar;



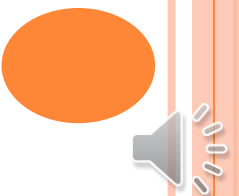
- Sob condições de estrutura comparáveis, quanto mais argiloso o solo menor sua densidade;
- Em solos expansivos, ou aquele em que o volume  $V$  varia com o teor de água do solo, como quando as argilas são do tipo 2:1, o valor da densidade do solo deve ser acompanhado do valor da umidade do solo no momento da medida;
- Os valores de  $\rho$  poderão ser alterado pelo uso e manejo do solo;



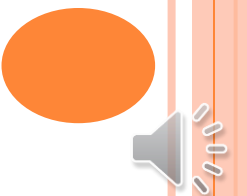
- A recomendação do solo para determinadas culturas, como por exemplo, as produtoras de raízes e tubérculos, preferem solos pouco densos.
- A densidade acima da qual as raízes não conseguem penetrar no solo não é a mesma para todos os solos.
- A densidade do solo também pode interferir na germinação de sementes.
- Pode interferir na concentração de proteínas e açúcares presentes nos frutos.



- A determinação da densidade do solo dos horizontes de um perfil, permite avaliar certas propriedades do solo, como:
  - ❖ a drenagem;
  - ❖ a porosidade;
  - ❖ a condutividade hidráulica;
  - ❖ a permeabilidade ao ar e à água;
  - ❖ a capacidade de saturação;
  - ❖ o volume de sedimentação;



De maneira geral, pode-se afirmar que, quanto mais elevada for a densidade do solo, **maior será sua compactação, estrutura degradada, menor sua porosidade total e, conseqüentemente, maiores serão as restrições para o crescimento e desenvolvimento das plantas.**



# DENSIDADE DA PARTÍCULA

- A densidade de partículas refere-se ao volume de sólidos de uma amostra de terra, sem considerar a porosidade;
- Por definição, entende-se densidade da partícula como sendo a relação existente entre a massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelas partículas sólidas;
- A densidade de partículas de um solo quer seco ou molhado é sempre a mesma, desde que se subtraia da massa da amostra o peso da água contida;



## Densidade dos Sólidos ou das Partículas ( $\rho_s$ )

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \rightarrow (\text{kg.m}^{-3}) \quad (4)$$



## MÉTODO DE DETERMINAÇÃO

Na determinação da densidade das partículas do solo é necessário obter o valor da massa da amostra e depois o volume dos sólidos presentes.

A massa é obtida por simples pesagem em balança analítica.

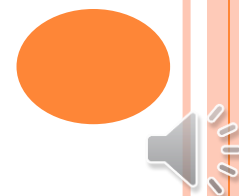
Quanto ao volume, pode ser obtido pelo método do balão volumétrico, o qual é considerado o mais preciso dentre os métodos existentes.





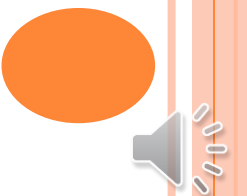
Em laboratório, a determinação de densidade de partícula nada mais é do que a medida do volume de líquido deslocado por uma massa conhecida de partículas sólidas.

Os líquidos usualmente empregados são água e álcool etílico (preferencialmente esse último).



Nos solos, seus valores variam, em média, entre os limites de 2,3 e 2,9 g cm<sup>-3</sup>. Como valor médio, para efeito de cálculos, por exemplo, pode-se, considerar a densidade de partículas como sendo de 2,65 g cm<sup>-3</sup>.

Isto porque os constituintes minerais predominantes nos solos são o quartzo, os feldspatos e os silicatos de alumínio coloidais, cujas densidades de partículas estão em torno de 2,65.

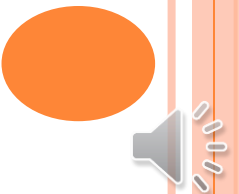


## ALGUMAS CONSIDERAÇÕES:

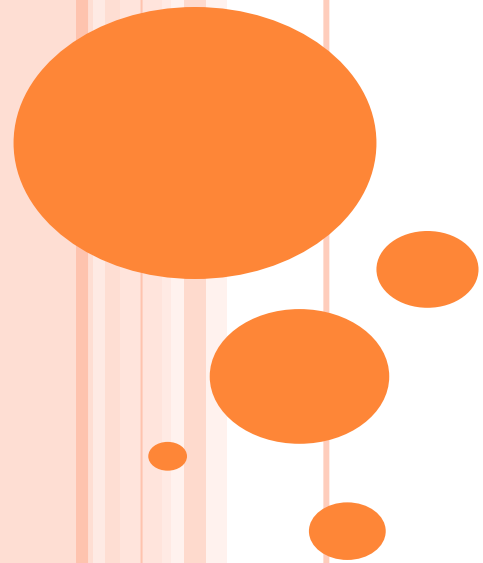
- Não reflete as condições de estruturação do solo;
- É um atributo muito estável cuja magnitude depende, exclusivamente, da composição das partículas sólidas;
- Dependente da composição mineralógica do solo, ou seja, depende das proporções relativas das frações minerais e orgânicas (composição da parte mineral);
- A presença de óxidos de Fe e metais pesados aumenta o valor de  $\rho_s$ , enquanto a matéria orgânica contribui para o seu abaixamento;



- A  $\rho_s$  é utilizada para:
  1. Cálculo da Porosidade do solo;
  2. Cálculo do tempo de sedimentação das partículas na análise textural;



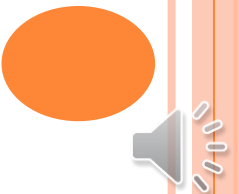
# POROSIDADE DO SOLO



- Representa a fração do solo em volume não ocupada por sólidos;

$$\alpha = \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)$$

- A caracterização do sistema poroso é importante no:
  - a) Armazenamento e movimento de água e gases no solo;
  - b) Desenvolvimento do sistema radicular;
  - c) Fluxo e retenção de calor;
  - d) Resistência mecânica dos solos;



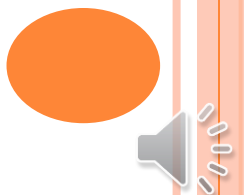
- Todo solo possui poros....mas seu número, tamanho, distribuição e continuidade são variáveis conforme o solo;
- Os poros são divididos em duas classes: *microporos* e *macroporos*, menores e maiores do que cerca de 0,05 mm de diâmetro, respectivamente;
- Assim, espera-se que um solo argiloso apresente grande microporosidade e um solo arenoso apresente grande macroporosidade;



Tabela - Classificação do sistema poroso.

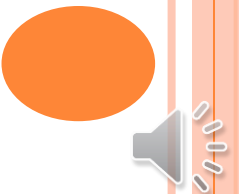
| Denominação               | Diâmetro Efetivo ( $\mu\text{m}$ ) | Função                                                                        |
|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Poros grandes             | $> 60$                             | Infiltração de água, aeração e crescimento de radículas ( $100 \mu\text{m}$ ) |
| Poros médios              | $60 - 10$                          | Redistribuição de água, crescimento de pelos radiculares ( $10 \mu\text{m}$ ) |
| Poros pequenos            | $10 - 0,2$                         | Armazenamento de água disponível                                              |
| Superfícies higroscópicas | coloides                           | Armazenamento de água não disponível                                          |

Fernandes filho & Francelino, (2001)





- Os Latossolos gibbsíticos (estrutura granular) e textura muito argilosa, são permeáveis à água devido a sua elevada macroporosidade (boa drenagem e excelentes condições de aeração);
- Os Latossolos caulíníticos apresentam valores menores de macroporosidade;
- Atributo bastante influenciado pelo uso e manejo do solo;
- A Porosidade total deve variar entre  $0,30 - 0,70 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ;



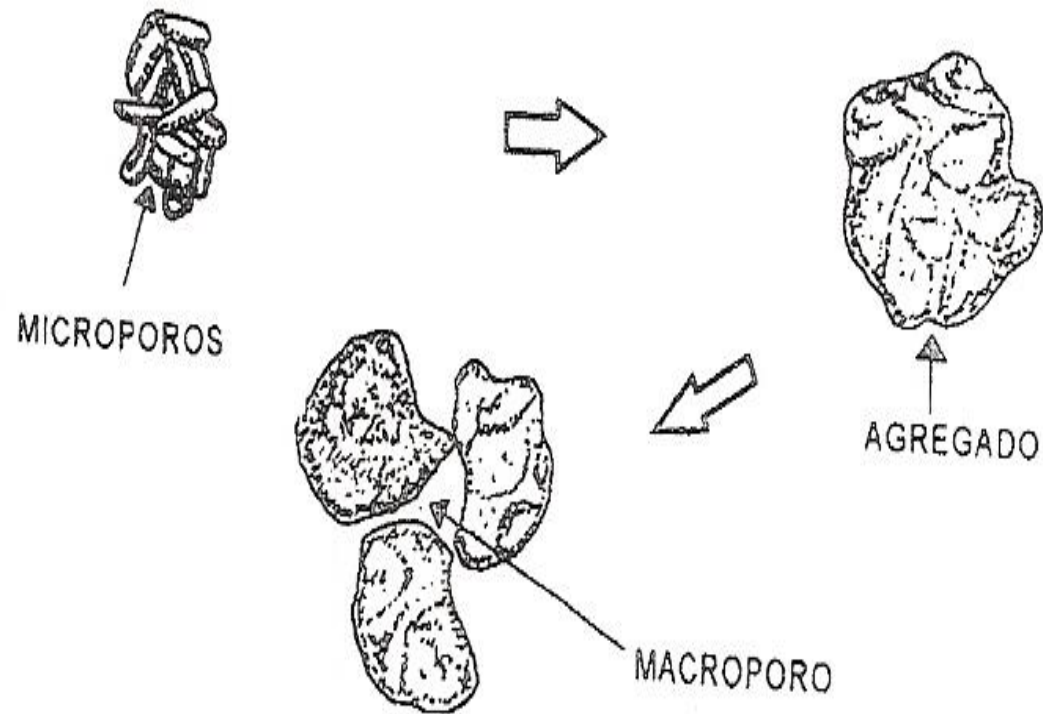
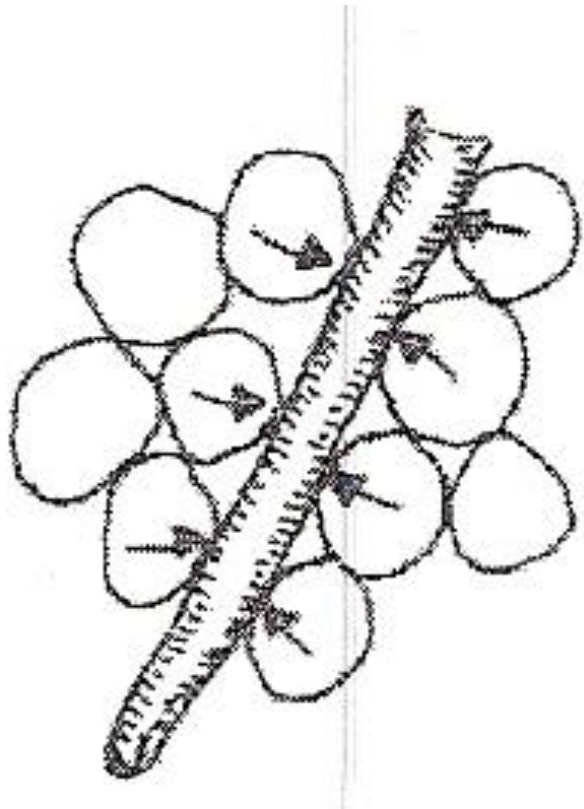
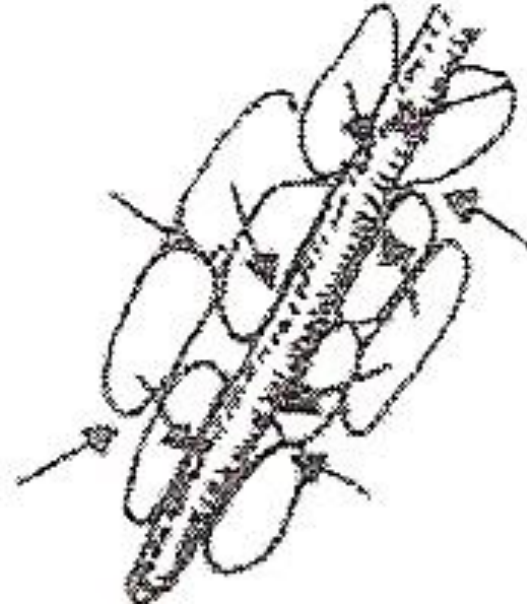


Figura 8 – Formação de microporos e macroporos através da agregação de partículas de diferentes tamanhos.





Solo não compactado



Solo compactado

Figura 9 – Solo antes e depois de compactado, reduzindo a proporção de macroporos, com elevação da microporosidade, que leva a água e nutrientes até as raízes.



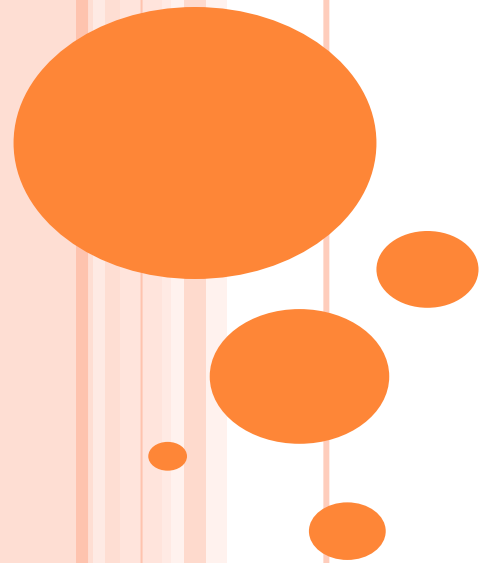
- Os agentes agregantes das partículas primárias incluem a matéria orgânica, Ca, óxidos de Fe e de Al, que contribuem para o arejamento e infiltração de água;
- Os agentes desagregantes (Na, compactação, *puddlagem*) têm o efeito inverso, prejudicando o crescimento radicular;
- A água é retida com mais força nos poros menores, nos poros maiores, a própria gravidade retira a água;



- Solos argilosos tendem a armazenar mais água que solos arenosos, embora a disponibilidade desta água para as plantas muitas vezes seja limitada;
- A compactação do solo pode ser benéfica, desde que esteja em níveis adequados, para a elevação da capacidade de armazenamento de água em solos com déficit hídrico;
- Todas as variáveis condicionantes da estrutura, portanto, incluindo textura e matéria orgânica, influenciarão os valores da porosidade total do solo



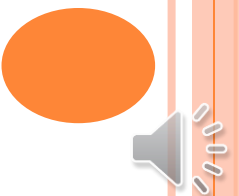
# CONSISTÊNCIA DO SOLO



# CONSISTÊNCIA DO SOLO

É a resposta do solo às forças externas que tentam deformá-lo ou rompê-lo.

Manifestação das forças de coesão e adesão sob diferentes condições de umidade.



- Expressão utilizada para caracterizar determinadas propriedades dinâmicas dos solos relacionadas à manifestação de forças físicas, especialmente aquelas ligadas à resistência que os materiais de solo oferece à deformação;
- É a manifestação das forças físicas de coesão e adesão que atuam no solo a diferentes conteúdos de umidade, envolvendo: o comportamento em função da gravidade, da pressão, do empuxo e da tração; a tendência da massa do solo de aderir a outros corpos e as sensações do tato do observador que manipula a amostra do solo;

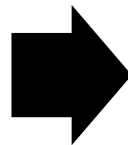




# NATUREZA DAS FORÇAS

- **ADESÃO**: refere-se a atração da fase líquida à superfície da fase sólida (L-S);
- **COESÃO**: é a união de partículas adjacentes, em função da presença de moléculas da fase líquida, na forma de pontes ou filmes de água (S-S, L-L);

**Consistência**

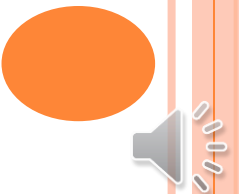


**Resistência  
à  
deformação**



- A coesão é devida a atuação de forças de atração mútua, resultantes de mecanismos físico-químicos:
  - (1) Forças de Van der Waals
  - (2) Atração eletrostática entre cargas negativas e as cargas positivas;
  - (3) Ligações catiônicas;
  - (4) Efeito cimentantes da matéria orgânica, óxidos de ferro e alumínio e carbonatos;
  - (5) Tensão superficial

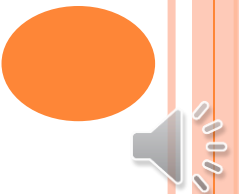
A coesão é diretamente proporcional à tensão superficial e inversamente proporcional à distância entre partículas.



# FORMAS DE CONSISTÊNCIA

A maior parte dos solos poderão apresentar segundo ATTERBERG as seguintes formas de consistência:

- (1) Dureza ou Tenacidade;
- (2) Friabilidade
- (3) Plasticidade
- (4) Pegajosidade



| Solo Seco            | Solo Úmido   | Solo Molhado |               |
|----------------------|--------------|--------------|---------------|
|                      |              | Molhado      | Muito Molhado |
| Dureza ou Tenacidade | Friabilidade | Plasticidade | Pegajosidade  |



ARAÇÃO

PUDDLAGEM

---

Vertissolos

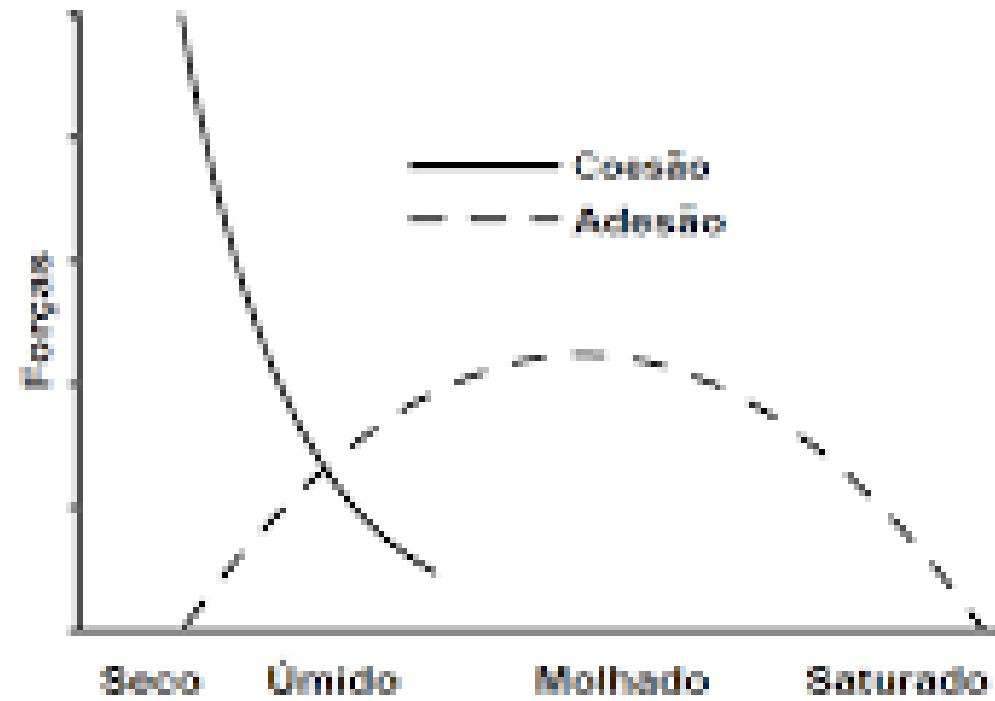
---

Latossolos



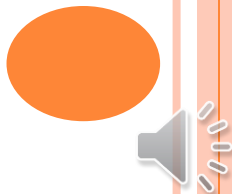
- A baixos conteúdos de umidade, o solo é, geralmente, duro e muito coerente, devido ao efeito de cimentação entre partículas secas;
- À medida que ocorre aumento no teor de umidade, as moléculas de água passam a ser adsorvidas pelas superfícies das partículas, decrescendo a atuação da coesão e levando o solo ao estado de friabilidade;
- Aumentando-se, ainda mais, o teor de umidade no solo, a coesão dos filmes de água ao redor das partículas torna o solo ao mesmo tempo aderente e plástico;





# FATORES QUE AFETAM A CONSISTÊNCIA

- Textura do solo;
- Natureza dos coloides minerais;
- Teor de matéria orgânica;
- Estrutura do solo;
- Cátions adsorvidos (dispersão/floculação);
- Teor de umidade;



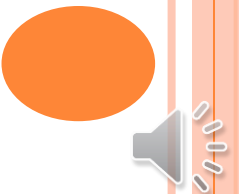
## IMPLICAÇÕES NO MANEJO DO SOLO

- Em função de sua estreita relação coma a umidade do solo, a consistência indica o momento mais adequado para se trabalhar mecanicamente o solo;
- Sendo trabalhado quando seco, se o solo for muito duro, haverá um gasto elevado de potência e de combustível, além de desgastes excessivo de implementos;
- Se for plástico e pegajoso, e for trabalhado úmido, problemas de compactação, poderão ocorrer, além de aderência do material de solo ao implemento;

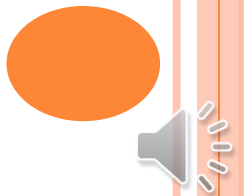




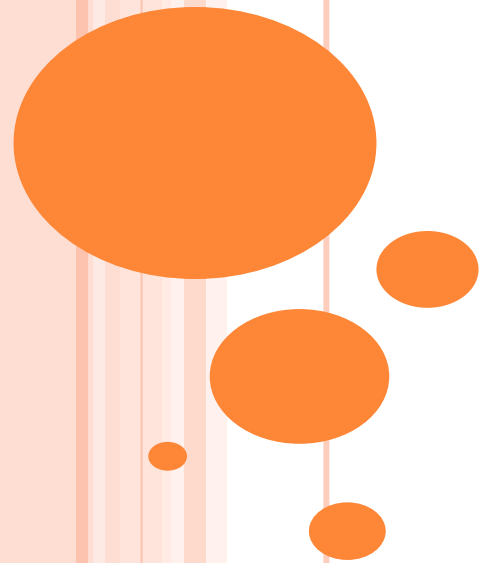
“Solos bem estruturados oferecem melhores condições para o desenvolvimento das plantas e a persistência dessa estruturação, de certa forma, opõe-se à degradação do solo.”



**OBRIGADO PELA ATENÇÃO!**



# AERAÇÃO DO SOLO



# O SOLO COMO SISTEMA TRIFÁSICO



Figura 10 – Composição volumétrica de um solo com boa estrutura.



# COMPONENTES DO SOLO

|                       |                          |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                        |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fase sólida<br>(50%)  | Matéria mineral<br>(45%) | <b>minerais primários</b>                                                                                                   |                                                                                                                                                                        |
|                       |                          | <b>minerais secundários</b>                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Minerais argilosos</li> <li>- Oxi-hidróxidos Fe, Al, Mn</li> <li>- Silicatos não cristalinos</li> <li>- Carbonatos</li> </ul> |
|                       | Matéria orgânica<br>(5%) | <b>Porção viva</b> (raízes das plantas, fauna do solo)                                                                      |                                                                                                                                                                        |
|                       |                          | <b>Porção não viva</b> (restos de organismos vegetais e animais em vários graus de decomposição e produtos de decomposição) |                                                                                                                                                                        |
| Fase líquida<br>(25%) | Solução do solo          | <b>Água higroscópica</b> (fortemente retida por adsorção)                                                                   |                                                                                                                                                                        |
|                       |                          | <b>Água capilar</b> (microporos: fracamente retida, disponível para as plantas)                                             |                                                                                                                                                                        |
|                       |                          | <b>Água gravitacional</b> (macroporos: não é retida pelo solo)                                                              |                                                                                                                                                                        |
| Fase gasosa<br>(25%)  | Atmosfera do solo        | O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , N, vapor de água                                                                         |                                                                                                                                                                        |



- No solo, as frações de água e de ar (gases no solo) complementam-se e juntas preenchem o espaço poroso.
  
- Importância:
  1. Aeração da zona radicular;
  2. Fluxo de vapor de água no solo;
  3. Movimento de componentes voláteis do solo até a superfície ou até a água freática;



# GÁS

Um gás pode consistir em um substância pura ou ser uma mistura de componentes;

1. Densidade e viscosidade pequenas;
2. Expansão e contração expressiva com alteração da temperatura ou pressão;
3. Difusividade alta; e
4. Distribuição rápida e uniforme em recipientes de qualquer formato;



## e Equação Universal dos Gases:

$$PV = nRT$$

onde:

P = Pressão (Pa)

V = volume (m<sup>3</sup>)

n = número de mol

R – constante universal dos gases (8,314 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

T = temperatura (K)

Pressão Atmosférica ao nível do mar (P<sub>0</sub>) = 101.325 Pa

10<sup>5</sup> Pa

1 atm

1 bar

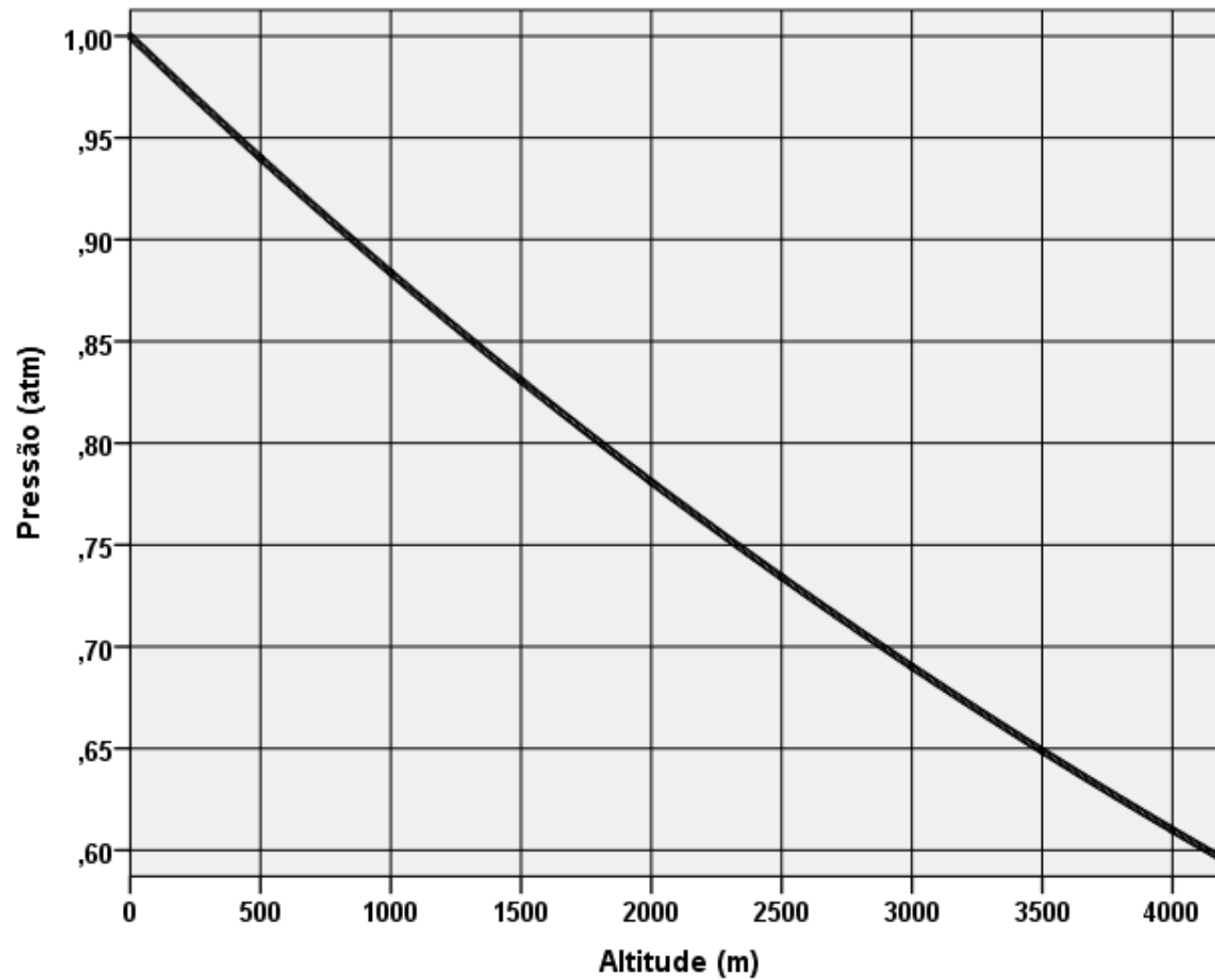
760 mm Hg

10 m água





# COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES DO AR



**Figura 1 - Pressão atmosférica em função da altitude.**



QUADRO 01 – COMPOSIÇÃO MÉDIA DO AR ATMOSFÉRICO SECO

| Substância         | Símbolo         | Massa Molecular<br>(kg.mol <sup>-1</sup> ) | Fração Molar (%) |
|--------------------|-----------------|--------------------------------------------|------------------|
| Nitrogênio         | N <sub>2</sub>  | 0,028                                      | 78,084           |
| Oxigênio           | O <sub>2</sub>  | 0,032                                      | 20,9476          |
| Argônio            | Ar              | 0,040                                      | 0,934            |
| Dióxido de Carbono | CO <sub>2</sub> | 0,044                                      | 0,0314           |
| Néon               | Ne              | 0,0202                                     | 0,001818         |
| Metano             | CH <sub>4</sub> | 0,016                                      | 0,0002           |
| Hélio              | He              | 0,004                                      | 0,000524         |
| Criptônio          | Kr              | 0,0838                                     | 0,000114         |
| Hidrogênio         | H <sub>2</sub>  | 0,002                                      | 0,00005          |
| Xenônio            | Xe              | 0,1313                                     | 0,0000087        |

Fonte: CRC Handbook of Chemistry and Physics, 1997



- O ar do solo está pouco sujeito a processos de mistura, ao contrário do ar atmosférico, devido está alocado num sistema poroso;
- Devido a ausência de mistura, a composição do ar do solo varia em profundidade. Próximo à superfície, a sua composição é muito semelhante à da atmosfera;
- Por causa do consumo de oxigênio e produção de  $\text{CO}_2$ , em profundidade, a concentração de  $\text{CO}_2$  no ar do solo aumenta e a de  $\text{O}_2$  diminui;



TABELA XX – COMPOSIÇÃO DO AR DO SOLO E DO AR ATMOSFÉRICO

| Atmosfera | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O<br>(umidade relativa) |
|-----------|----------------|-----------------|----------------|----------------------------------------|
|           | -----%-----    |                 |                |                                        |
| Livre     | 20,9           | 0,03            | 78,9           | variável                               |
| Solo      | 19,6           | 0,9             | 79,5           | ≈ 100                                  |

Fernandes filho & Francelino, (2001)



# UMIDADE DO AR DO SOLO

- A umidade relativa varia consideravelmente em função do local e do tempo, assumindo valores na faixa de 0 a 1;
- Como o ar do solo está sempre muito próximo à água líquida, a umidade relativa do ar do solo está sempre muito próximo de 1 (ou 100%);

“mesmo num solo muito seco (no ponto de murcha permanente) a umidade relativa do ar está muito elevada (~99%)”;



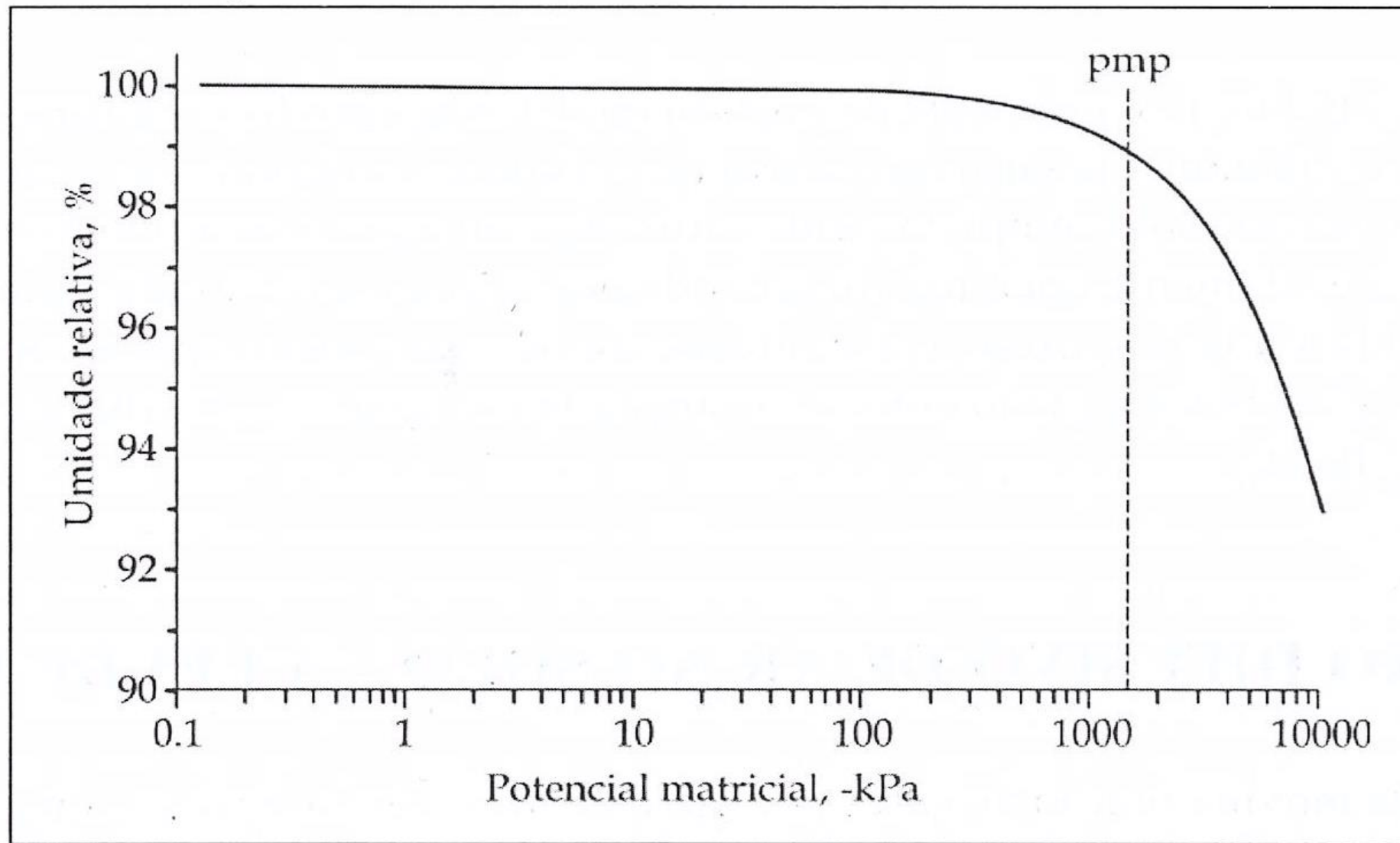


Figura xx – Relação entre umidade relativa do ar no solo e o potencial matricial no ponto de murcha permanente (pmp). (van Lier, 2010)



## DIFUSÃO DE O<sub>2</sub> E CO<sub>2</sub>: POROSIDADE DE AERAÇÃO MÍNIMA

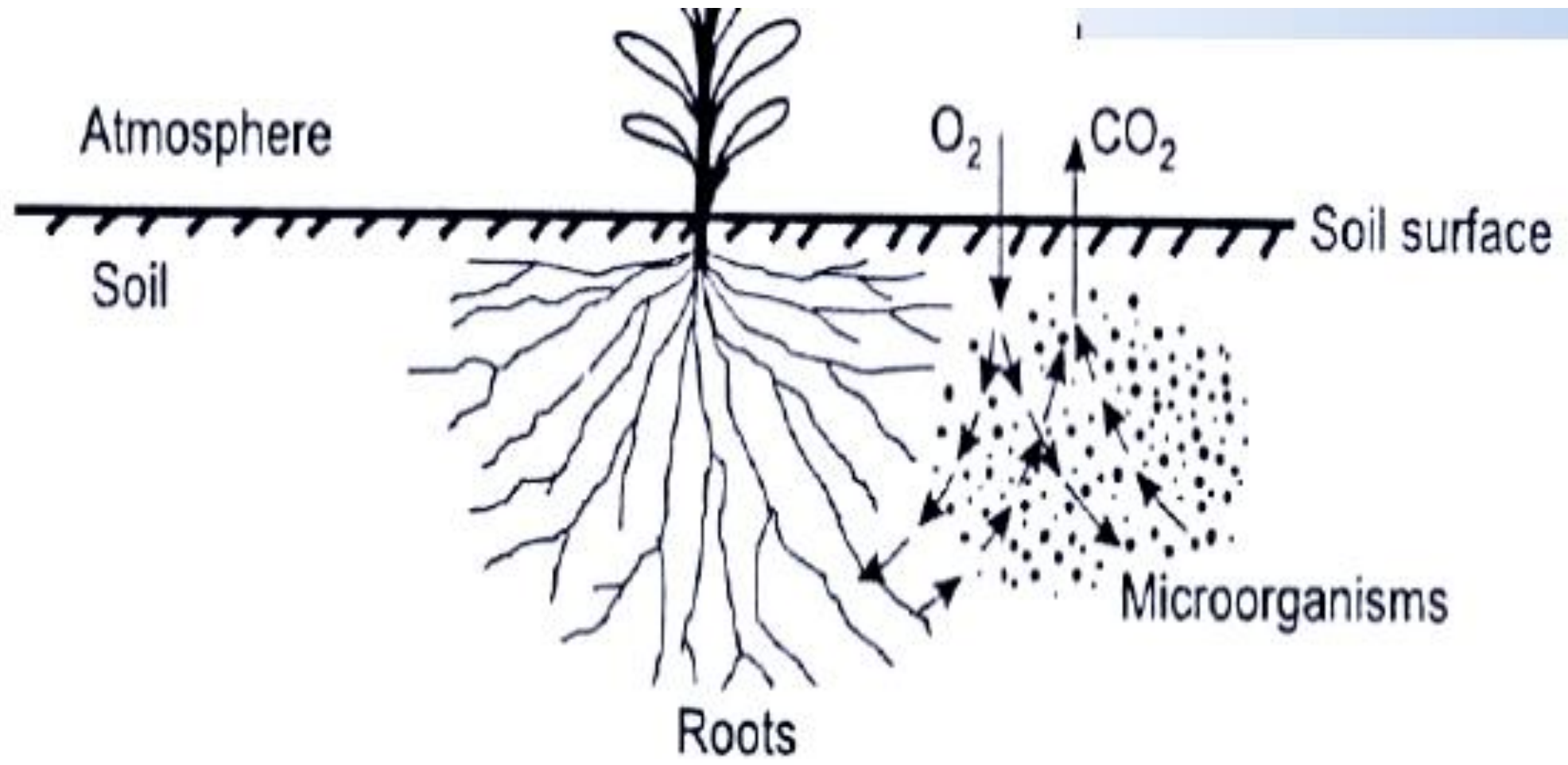
- A difusão de ar pelo tecido vegetal é muito lenta, a entrada de O<sub>2</sub> consumido e a saída do CO<sub>2</sub> produzido não ocorrem através das raízes;
- A difusão passa quase que exclusivamente pela **fase gasosa** do solo, uma vez que a fase líquida é cerca de 10 mil vezes menos permeável e a fase sólida cerca de milhões de vezes;
- O conteúdo de ar no solo ou a *Porosidade de aeração* é um parâmetro muito importante para caracterizar a **aerabilidade de um solo** (capacidade de trocar gases com a atmosfera);



- Como ar e água ocupam o espaço poroso, um alto conteúdo de água está correlacionado com um baixo conteúdo de ar e uma baixa aerabilidade, e vice-versa;
- Um solo com aeração deficiente não fornece condições físicas adequadas para o crescimento vegetal, e a produtividade de culturas é reduzida;
- **Solo compacto** é um solo com porosidade total ou porosidade de aeração tão baixa que a aeração está restrita e/ou a penetração de raízes está impedida (Hillel, 1982);



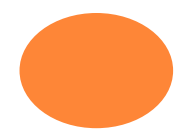
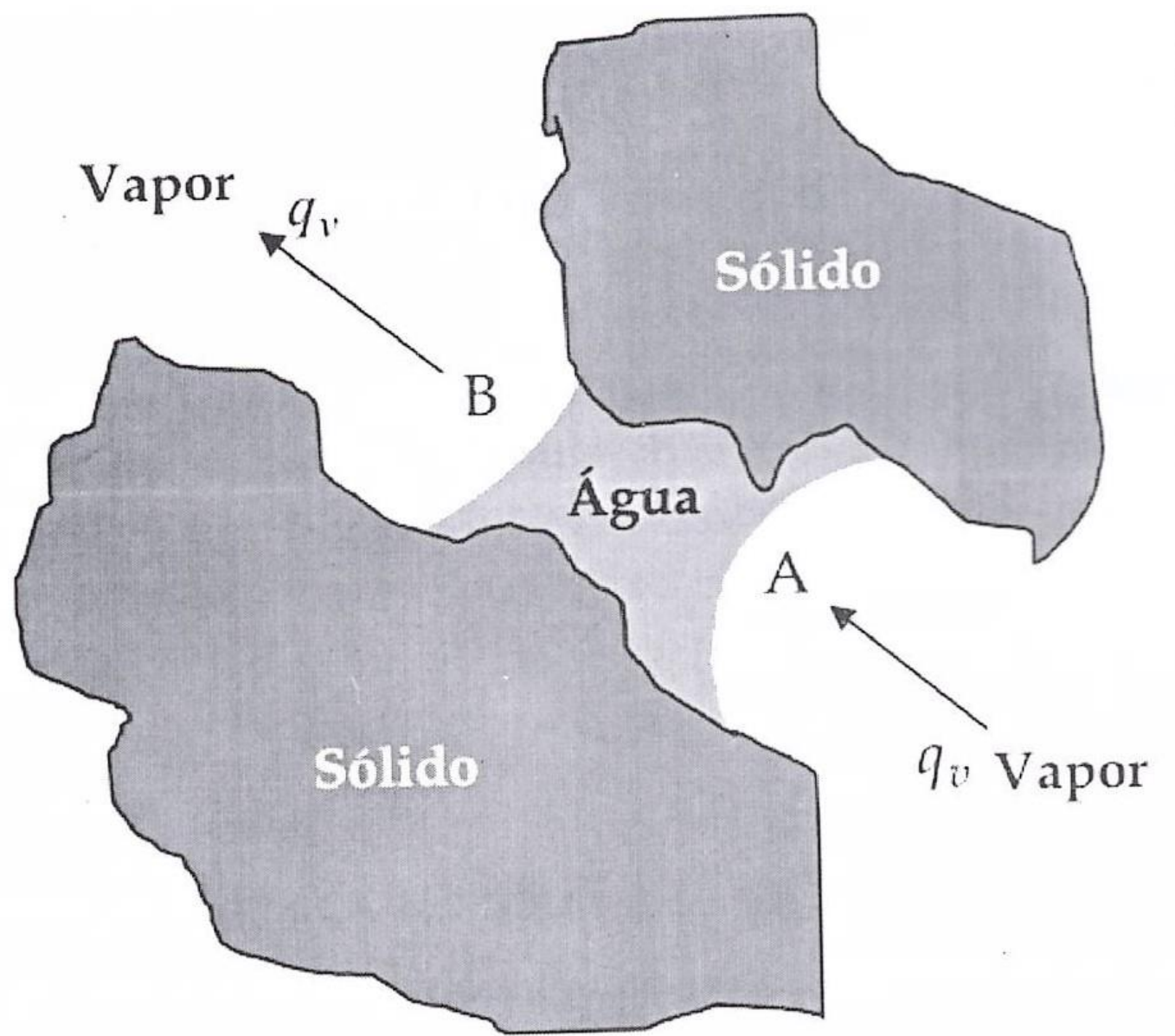




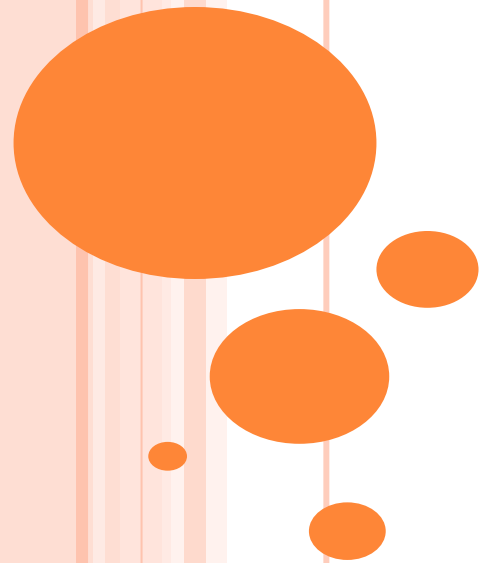
# DIFUSÃO DE VAPOR DE ÁGUA NO SOLO

- O transporte de água no estado gasoso (vapor) é de especial interesse nos processos que envolvem a redistribuição da água no solo em condições secas;
- Nestas condições, a facilidade de o solo conduzir água no estado líquido é muito desprezível e o fluxo de água no estado de vapor pode se tornar significativo;
- “Uma molécula de vapor de água quando encontra um barreira não precisa atravessá-la, mas condensa de um lado e evapora do lado oposto”;





# ÁGUA DO SOLO



# COMPONENTES DO SOLO

|                       |                          |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                        |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fase sólida<br>(50%)  | Matéria mineral<br>(45%) | <b>minerais primários</b>                                                                                                   |                                                                                                                                                                        |
|                       |                          | <b>minerais secundários</b>                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Minerais argilosos</li> <li>- Oxi-hidróxidos Fe, Al, Mn</li> <li>- Silicatos não cristalinos</li> <li>- Carbonatos</li> </ul> |
|                       | Matéria orgânica<br>(5%) | <b>Porção viva</b> (raízes das plantas, fauna do solo)                                                                      |                                                                                                                                                                        |
|                       |                          | <b>Porção não viva</b> (restos de organismos vegetais e animais em vários graus de decomposição e produtos de decomposição) |                                                                                                                                                                        |
| Fase líquida<br>(25%) | Solução do solo          | <b>Água higroscópica</b> (fortemente retida por adsorção)                                                                   |                                                                                                                                                                        |
|                       |                          | <b>Água capilar</b> (microporos: fracamente retida, disponível para as plantas)                                             |                                                                                                                                                                        |
|                       |                          | <b>Água gravitacional</b> (macroporos: não é retida pelo solo)                                                              |                                                                                                                                                                        |
| Fase gasosa<br>(25%)  | Atmosfera do solo        | O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , N, vapor de água                                                                         |                                                                                                                                                                        |



# RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

- O solo é um conjunto de partículas sólidas de diversas formas e tamanhos, entremeadas por poros de diversas formas e tamanhos e interconectados;
- No campo o espaço poroso é ocupado por uma solução aquosa (água no solo) e uma solução gasosa (ar no solo);
- Nas condições acima o solo é dito *não saturado*. Quando o espaço poroso do solo estiver totalmente cheio de água, o solo é dito estar *saturado*;



- Em termos qualitativos, logo após a drenagem livre de um solo saturado no campo, ***as forças capilares são dominantes*** e que, à medida que o solo seca a partir daí, ***a adsorção vai adquirindo mais importância***;
- Esse dois mecanismos de retenção de água no solo pelas forças capilares e de adsorção reduzem a energia potencial total da água livre;
- A tendência da água em mover-se de onde sua energia potencial total é maior para onde ela é menor;



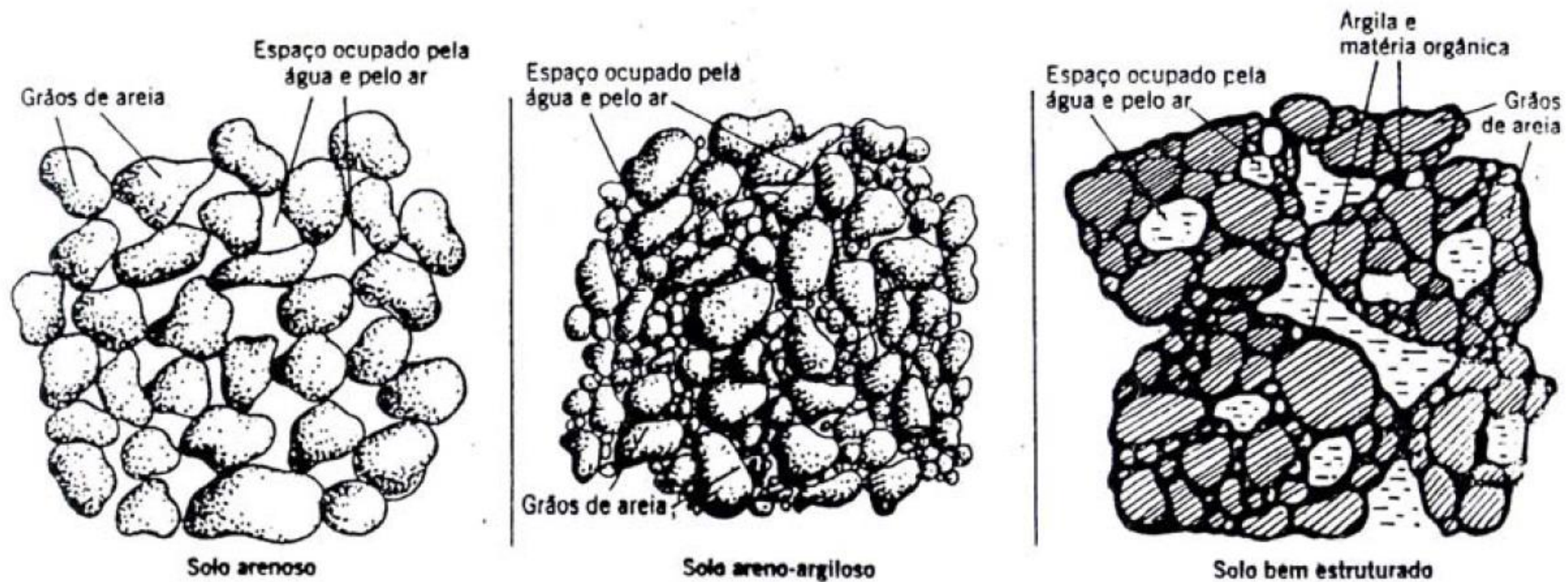
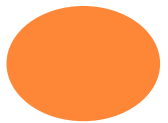


FIGURA 11 – DIFERENTES NÍVEIS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (FERNANDES FILHO & FRANCELINO, 2001)





# RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

- Dois processos explicam a retenção de água num solo não saturado:
  1. Poros Capilares (Fenômeno da Capilaridade);
  2. Adsorção (superfícies dos sólidos do solo);
- **Tensão Superficial e Capilaridade**
  
- Adsorção
  - I. A superfície dos minerais de argila;
  - II. Os pares de elétrons do átomo de oxigênio das moléculas de água;
  - III. Forças de van der Waals (moléculas apolares)



# TENSÃO SUPERFICIAL E CAPILARIDADE

- Resulta da existência de forças de atração de curto alcance entre as moléculas do líquido (Forças de van der Waals – Forças de coesão);
- A distância limite de atração (distância máxima que uma molécula consegue exercer atração sobre as outras ) é função do raio da esfera de ação molecular ( $r$ ) ;
- O raio da esfera de ação molecular da água não excede  $0,05 \mu\text{m}$ ;



# QUANTIFICAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

- Conteúdo de Água à base de Massa (U)

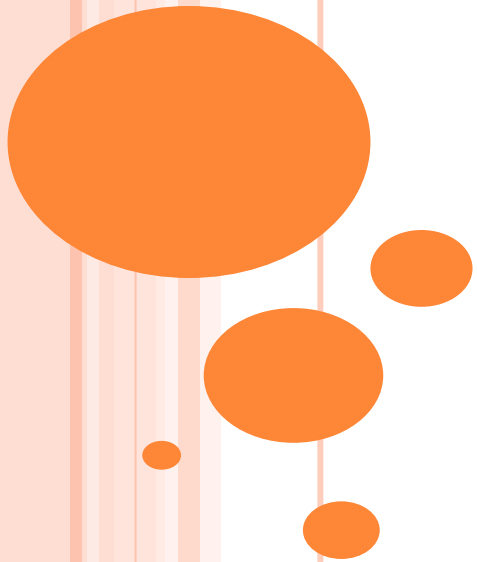
$$U = \frac{m_a}{m_s} (\text{kg kg}^{-1})$$

- Conteúdo de Água Volumétrico ( $\theta$ )

$$\theta = \frac{\rho}{\rho_a} U$$



# TEMPERATURA DO SOLO



# MOVIMENTO DA ENERGIA TÉRMICA NO SOLO

- A temperatura do solo é um dos fatores mais importantes para o desenvolvimento das plantas;
- A capacidade do solo de armazenar e transferir calor é determinada pelas suas propriedades térmicas e pelas condições meteorológicas;
- As propriedades térmicas do solo e as condições meteorológicas, portanto, influem no meio ambiente das plantas;



1. A atividade microbiológica pode ser interrompida;
2. As sementes poderão não germinar;
3. As plantas não se desenvolverem;
4. Os movimentos e disponibilidade dos fluidos, ar e água podem ser afetadas;
5. As reações químicas que liberam nutrientes para as plantas são influenciadas;



- O regime térmico de um solo é determinado pelo aquecimento da superfície pela radiação solar e transporte de calor sensível para seu interior.;
- Os processos de transferências de calor no solo podem ocorrer por:
  1. **Radiação**: troca de calor entre a superfície do solo e a atmosfera (ondas eletromagnéticas).
  2. **Condução**: trocas de energia nos níveis molecular e atômico, e portanto se dá devido ao contato de partículas de solo (solos secos);
  3. **Convecção**: ocorre pelos fluidos em movimento (fluxo de massa) em solos úmidos;



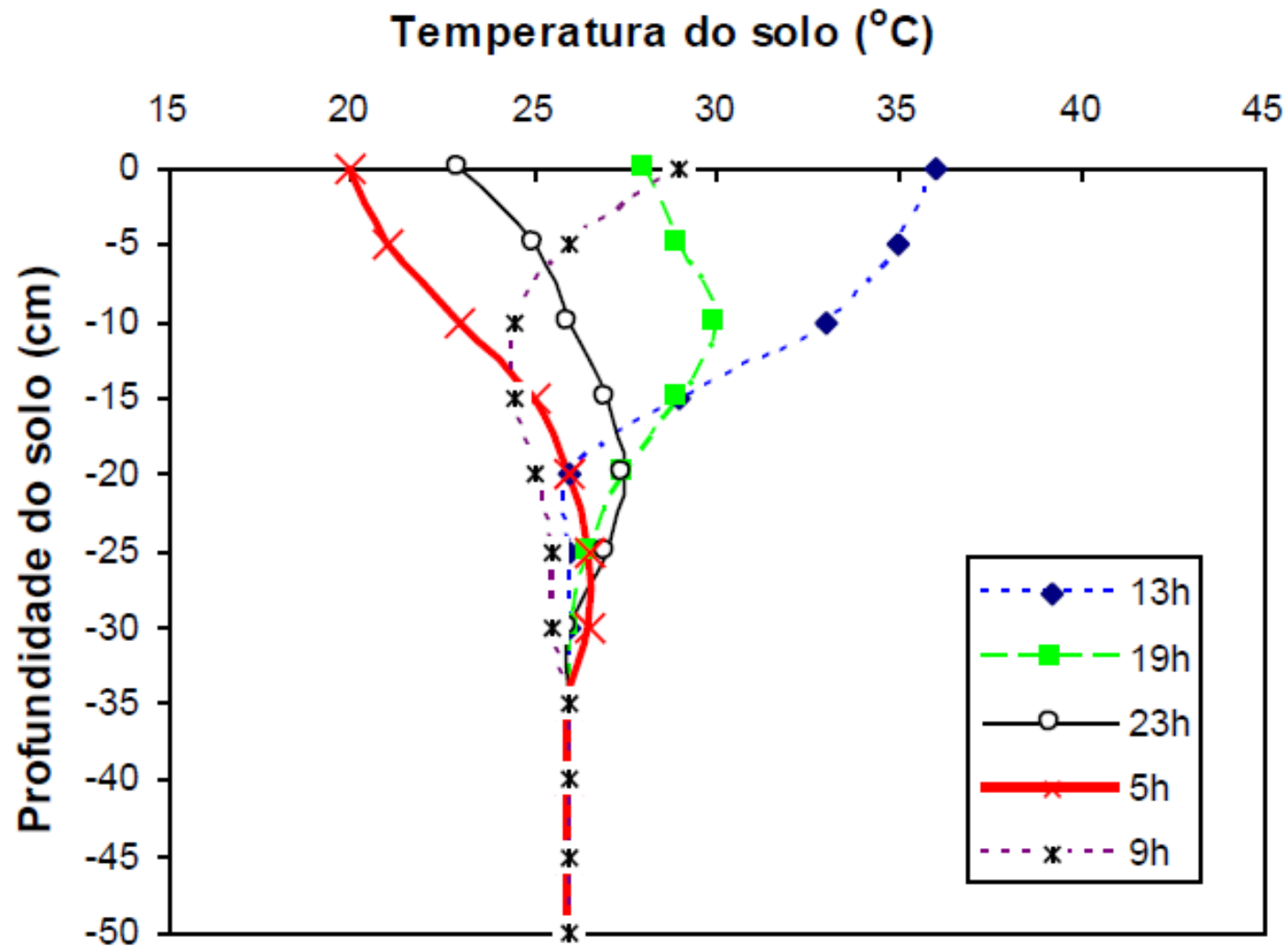


FIGURA 12 – A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO SOLO AO LONGO DO DIA (TEMPORAL) E DA PROFUNDIDADE (ESPACIAL) (SENTELHAS & ANGELOCCI, 2012)





## FATORES DETERMINANTES DA TEMPERATURA DO SOLO

O fluxo de calor no solo depende, basicamente, da sua condutividade térmica, de seu calor específico e de sua emissividade, os quais por sua vez dependem do tipo do solo. Além disso, essa variação é afetada pela interação com outros fatores, dentre eles:

- a) Fatores Externos : Relacionados aos elementos meteorológicos: irradiância solar global, temperatura do ar, nebulosidade, chuva e vento.
- b) Fatores Internos : Relacionados ao tipo de solo, ao relevo e ao tipo de cobertura do terreno



Quadro 5 – Valores típicos aproximados dos calores específicos gravimétricos e das massas específicas das frações constituintes do solo. .

| FRAÇÕES  | $C_g$<br>$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ | $P_p$<br>$kg\ m^{-3}$ |
|----------|-------------------------------|-----------------------|
| MINERAL  | 712                           | 2650                  |
| ORGÂNICA | 1926                          | 1400                  |
| ÁGUA     | 4186                          | 1000                  |
| AR       | 1005                          | 1,3                   |

Fonte: Prevedello, 2010



# TIPO DE SOLO

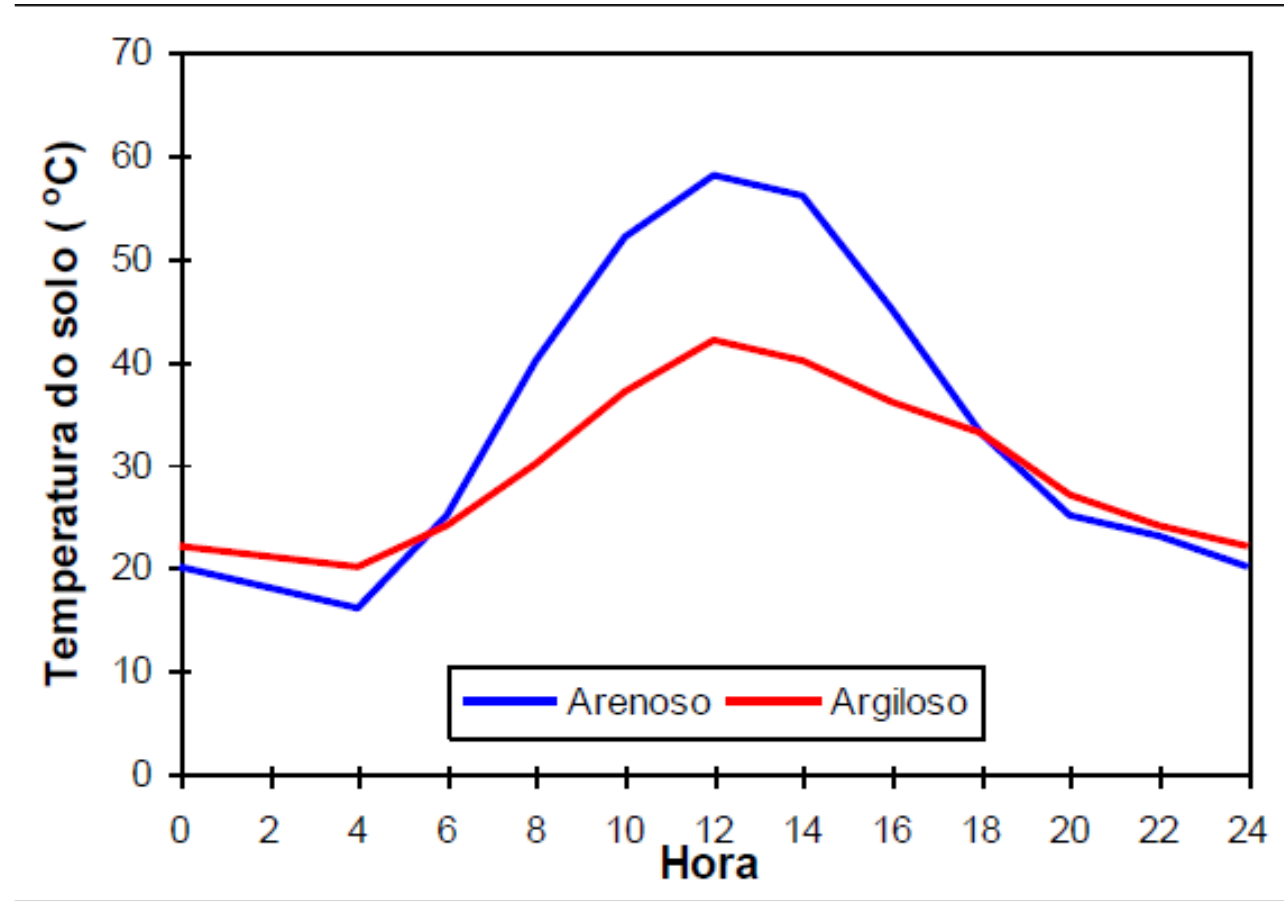
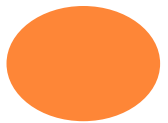


FIGURA 13 – A VARIAÇÃO HORÁRIA DA TEMPERATURA DE UM SOLO ARENOSO E DE OUTRO ARGILOSO (*SENTELHAS & ANGELOCCI, 2012*)



# RELEVO

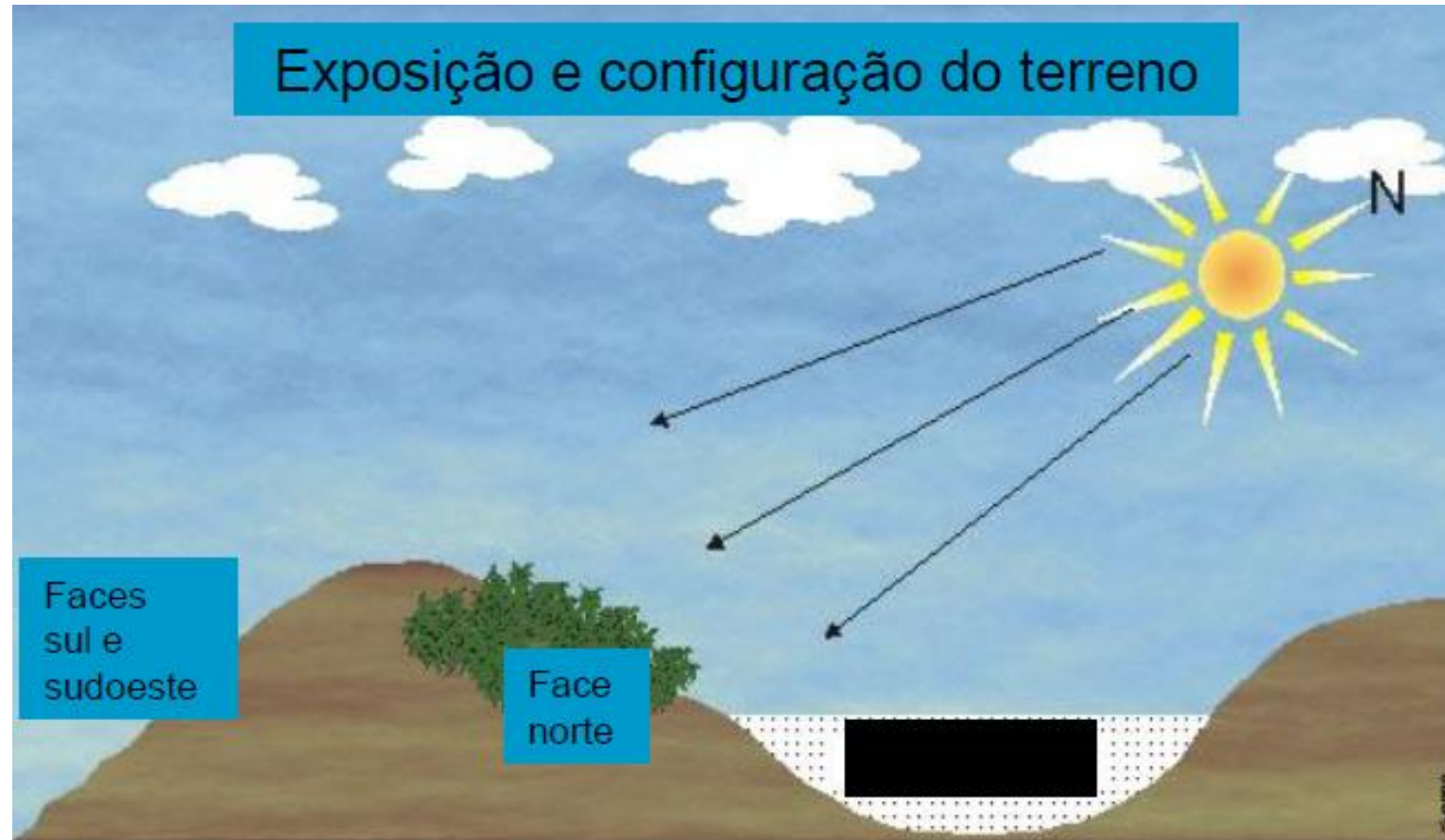


FIGURA 14 – A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO SOLO AO LONGO DO DIA EM FUNÇÃO DA EXPOSIÇÃO Á RADIAÇÃO SOLAR E DA POSIÇÃO DO TERRENO (SENTELHAS & ANGELOCCI, 2012)



# COBERTURA DO SOLO



**Sistema convencional  
solo exposto**



**Sistema plantio-direto  
solo com mulch**



**Mato na entrelinha  
do cafezal**

FIGURA 15 – A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO SOLO EM FUNÇÃO DO TIPO DE COBERTURA DO SOLO (FATOR MICROCLIMÁTICO) (*SENTELHAS & ANGELOCCI*, 2012)



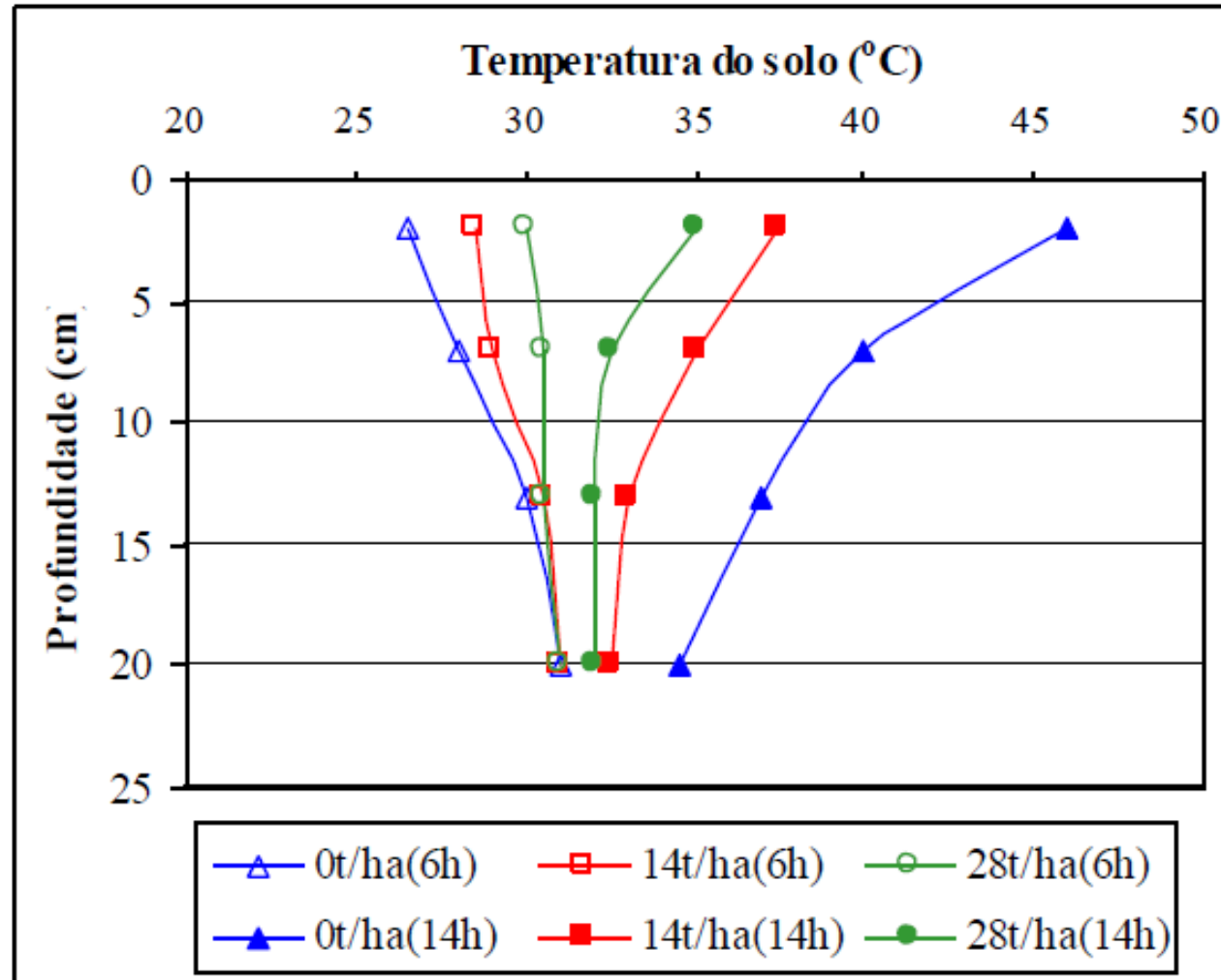


FIGURA 16 – A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO SOLO PARA DOIS HORÁRIOS DO DIA E ATÉ A PROFUNDIDADE DE 20 CM, PARA DIFERENTES GRAUS DE COBERTURA COM PALHA DE CAFÉ (SENTELHAS & ANGELOCCI, 2012)



# FASE SÓLIDA ORGÂNICA

- o **Porção viva** (raízes das plantas + fauna do solo (larvas, vermes, bactérias, fungos))
- o **Porção não viva** (organismos vegetais e animais em vários graus de decomposição + produtos dessa decomposição)

**Critério Microbiológico** (Waksman)

**Matéria Orgânica = Húmus**

