

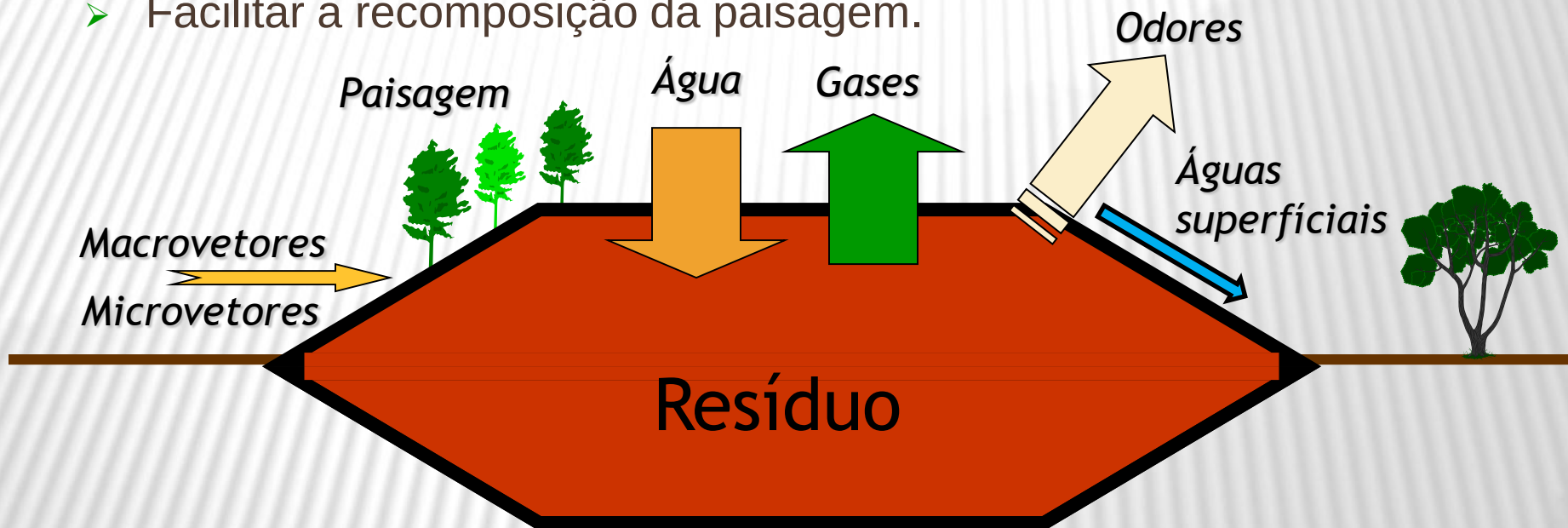
Camadas de Cobertura Capilares e Metanotróficas

Fernando A. M. Marinho
Universidade de São Paulo

2019

Funções “óbvias” da cobertura final de aterros

- Servir como elemento de redução de odor, vetores de doenças e outros inconvenientes.
- Servir como sistema de controle de águas superficiais.
- Facilitar a recomposição da paisagem.

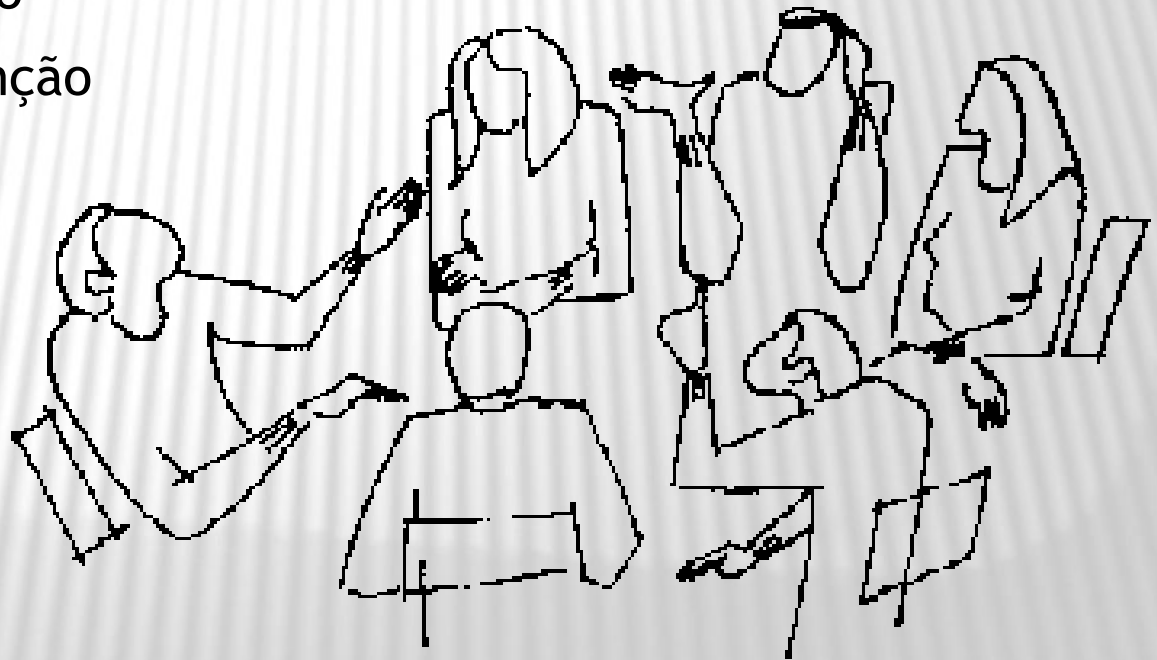


Funções “não tão óbvias” da cobertura final de aterros

- **Controlar** a entrada de água e ar para dentro do aterro.
- **Minimizar** a migração de gás para fora do aterro.

Planejamento para a Cobertura de Aterros

- Uso subsequente
- O clima
- Geometria do aterro
- Tipo de resíduo
- Riscos ambientais envolvidos
- Custo de execução
- Custo de manutenção



Definições

Coberturas convencionais

Objetivam impedir a entrada de água, por meio do uso de elementos “impermeabilizantes”.

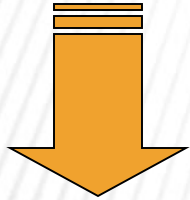
Coberturas evapotranspirativas

Objetivam controlar a entrada de água, usando o solo e o clima como elementos de controle.

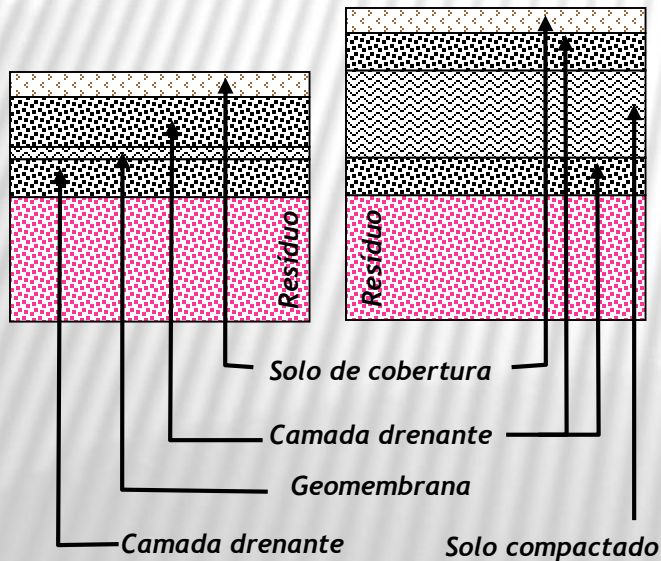
Barreiras capilares

Objetivam controlar a entrada de água usando o clima, o contraste de solos e a gravidade.

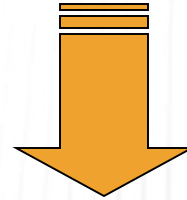
Barreira Resistiva



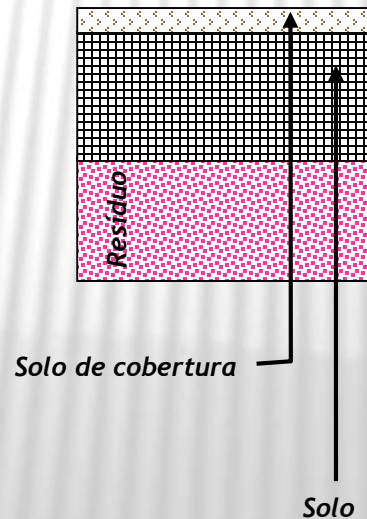
“impermeabilizante”



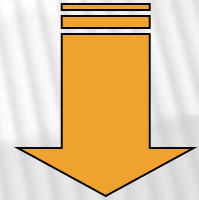
Barreira Evapotranspirativa



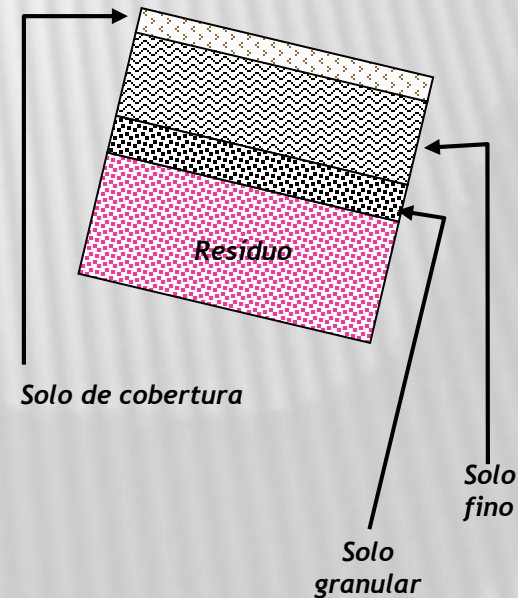
Retenção
Evaporação



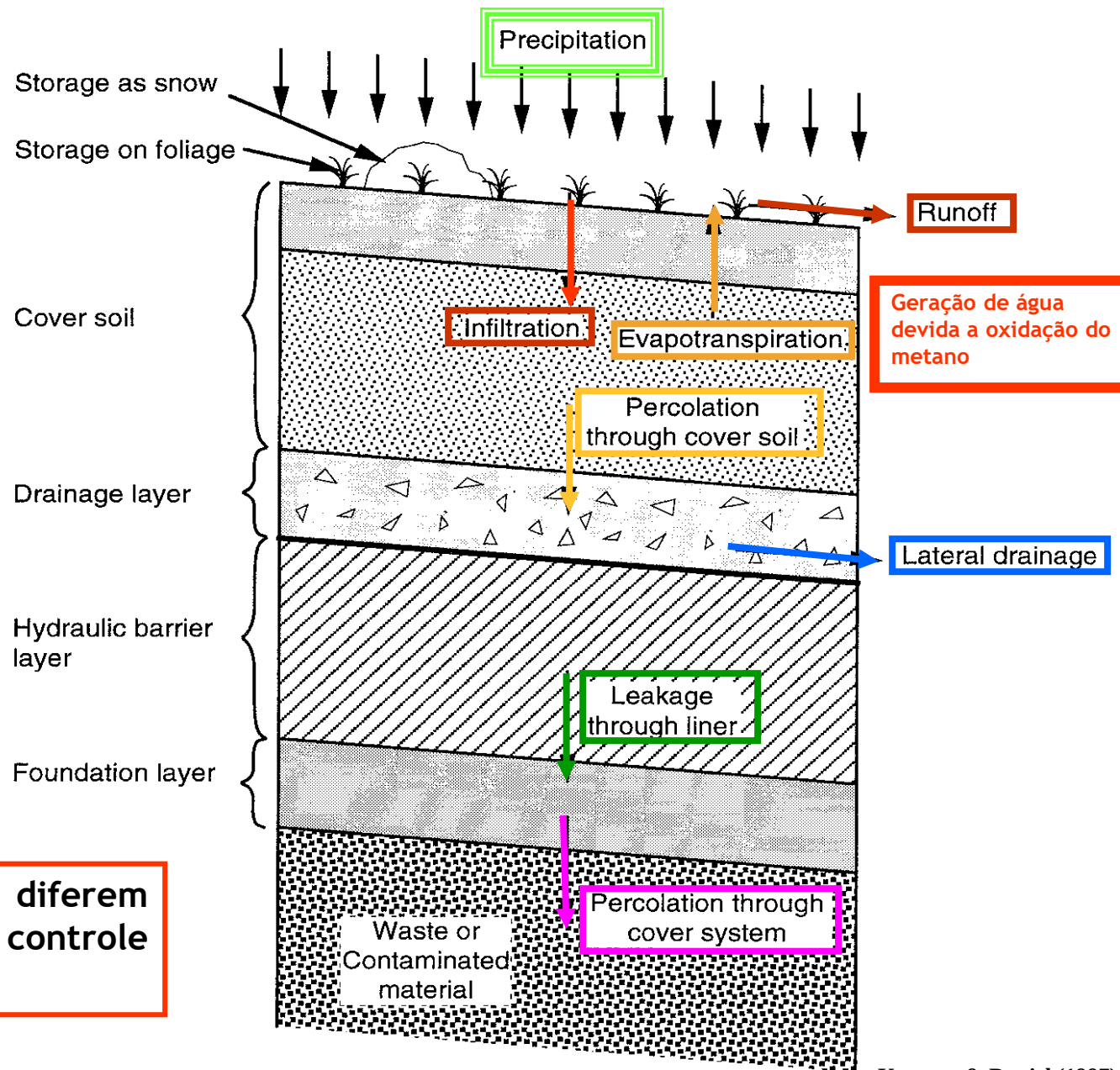
Barreira Capilar



Retenção
Evaporação
Bloqueio e Escoamento

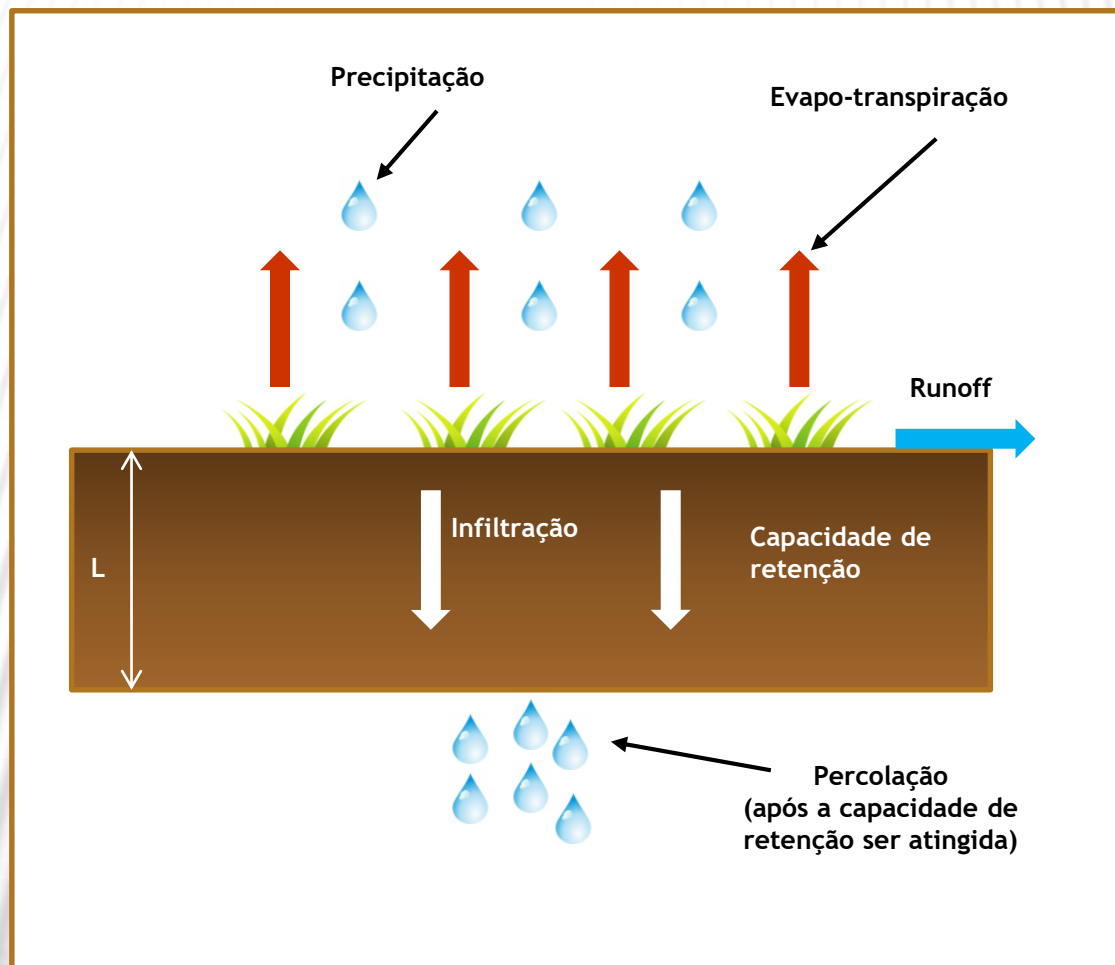


Movimentos de água no sistema



As diversas coberturas diferem em função do foco de controle de movimento de água

Balanço Hídrico na Cobertura



CHAPTER I--ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY

PART 258--CRITERIA FOR MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS

§ 258.60 Closure criteria.

(a) Owners or operators of all MSWLF units must install a final cover system that is designed to minimize infiltration and erosion. **The final cover system must be designed and constructed to:**

(1) **Have a permeability less than or equal to the permeability of any bottom liner system** or natural subsoils present, or a permeability no greater than 1×10^{-5} cm/sec, whichever is less, and

(2) Minimize infiltration through the closed MSWLF by the use of an infiltration layer that contains a minimum 18-inches of earthen material, and

(3) Minimize erosion of the final cover by the use of an erosion layer that contains a minimum 6-inches of earthen material that is capable of sustaining native plant growth.

(b) The Director of an approved State may approve an alternative final cover design that includes:

(1) **An infiltration layer that achieves an equivalent reduction in infiltration as the infiltration layer specified in paragraphs (a)(1) and (a)(2) of this section,** and

(2) An erosion layer that provides equivalent protection from wind and water erosion as the erosion layer specified in paragraph (a)(3) of this section.

(3) The Director of an approved State may establish alternative requirements for the infiltration barrier in a paragraph (b)(1) of this section, after public review and comment, for any owners or operators of MSWLFs that dispose of 20 tons of municipal solid waste per day or less, based on an annual average. Any alternative requirements established under this paragraph must:

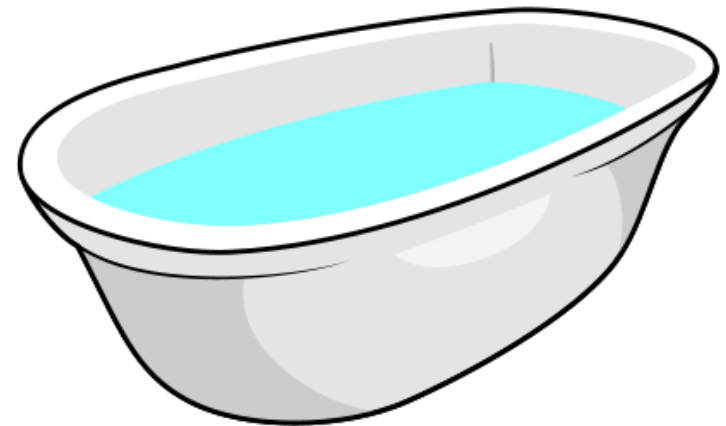
(i) **Consider the unique characteristics of small communities;**

(ii) **Take into account climatic and hydrogeologic conditions;** and

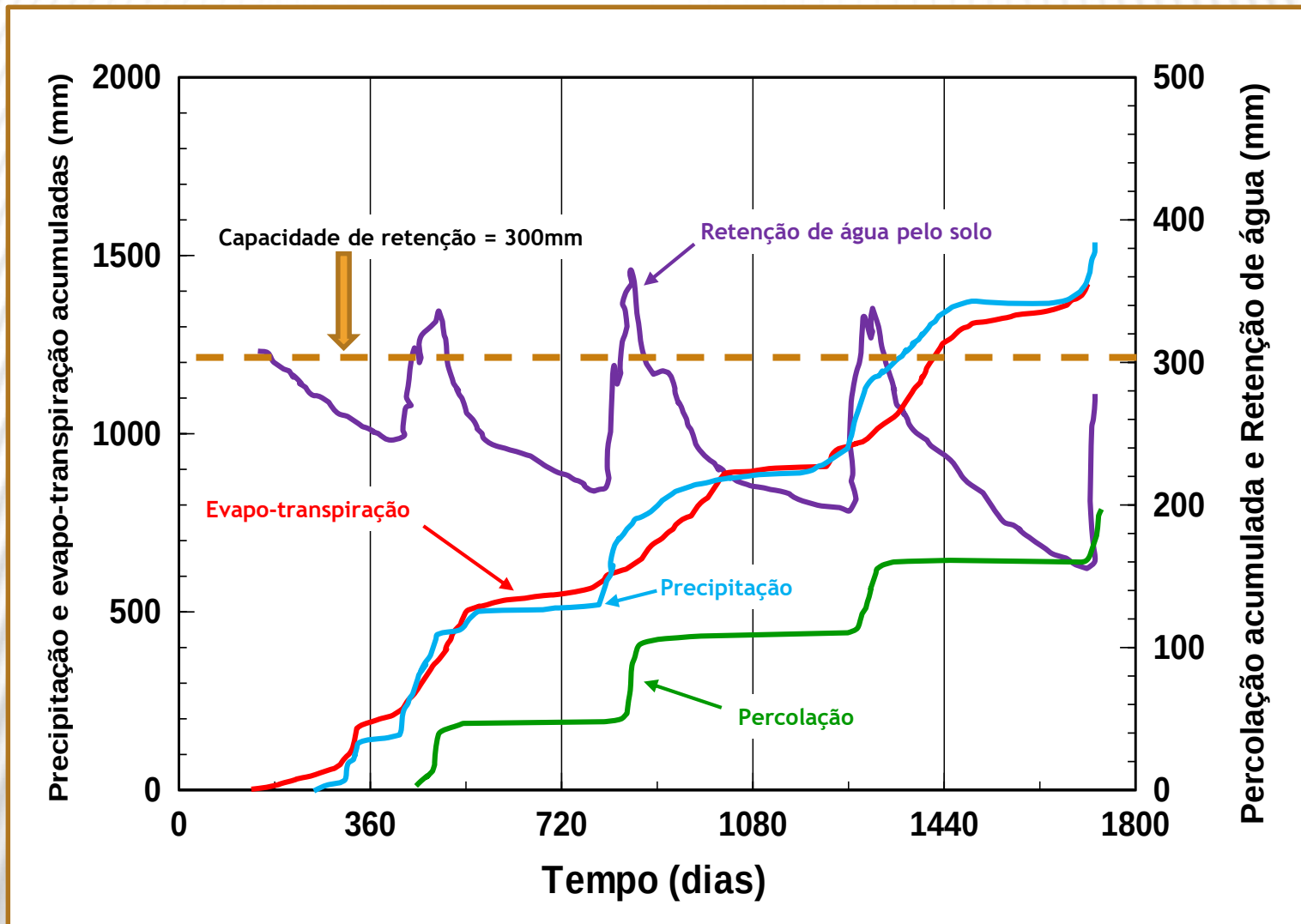
(iii) Be protective of human health and the environment.

O Clima, os Materiais e o Tipo de Cobertura

Cuidado com o efeito banheira (barthtub effect)



Dados para Balanço Hídrico na Cobertura (esquemático)



Adaptado de Benson (2004)

Capacidade de retenção de água dos solos

Máximo teor de umidade gravimétrico (MTUG)

$$MTUG = \frac{e}{G}$$

Índice de vazios

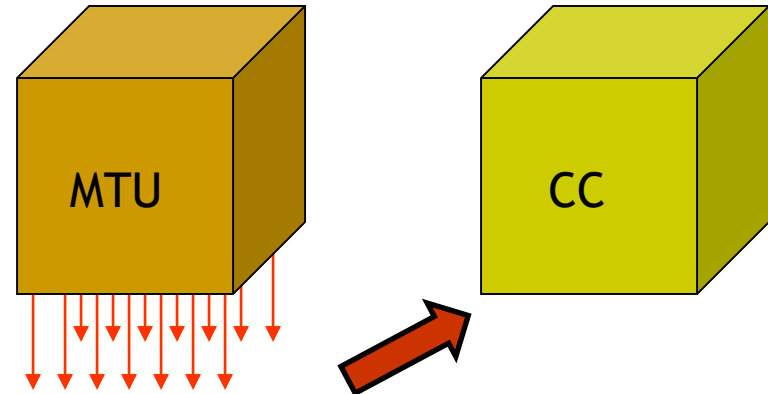
Densidade
relativa dos
grãos

Máximo teor de umidade volumétrico (MTUV)

$$MTUV = n$$

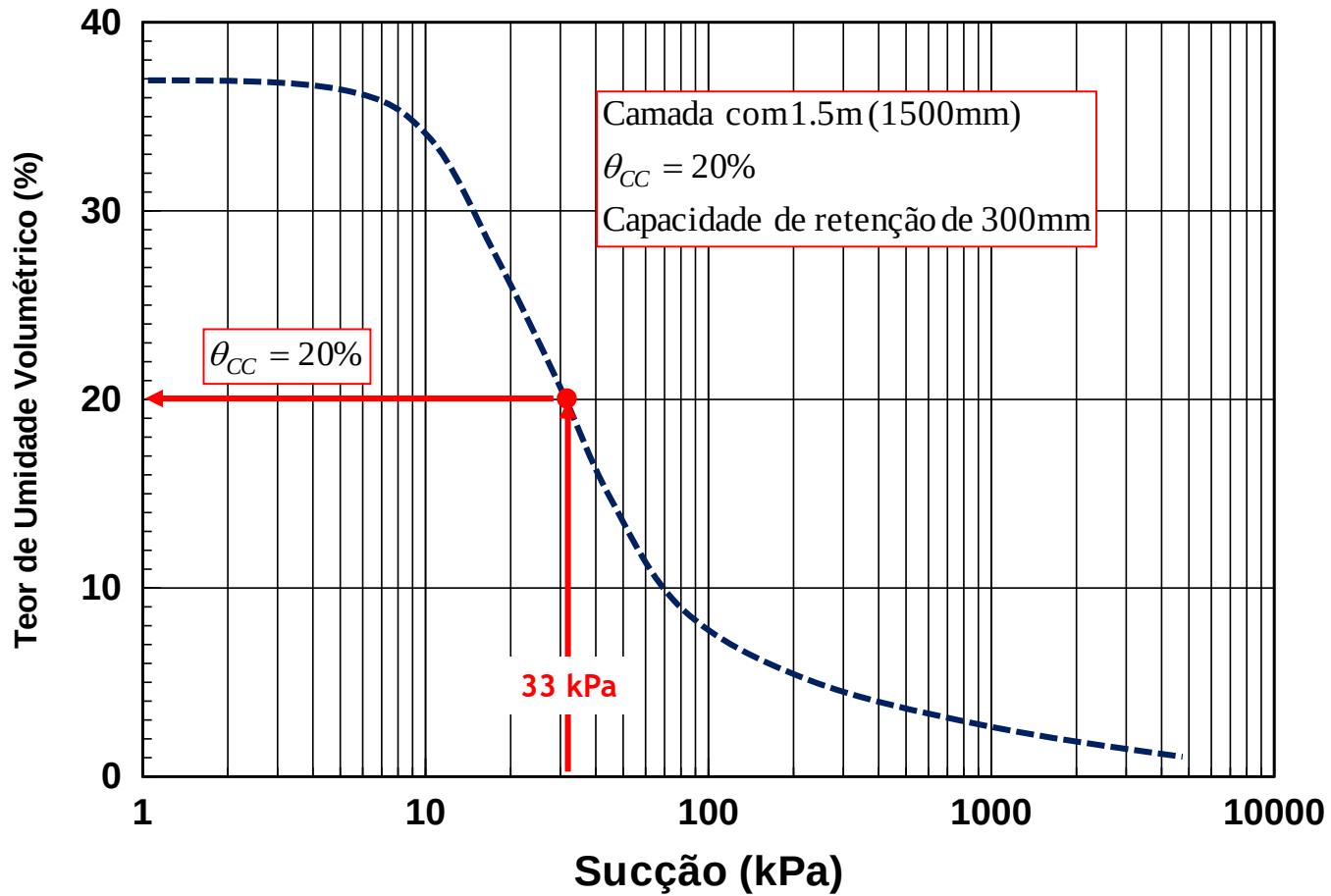
Porosidade

Capacidade de “campo” (CC)



Perda de água por gravidade

Curva de Retenção e o Cálculo da CR



Capacidade de retenção de água dos solos



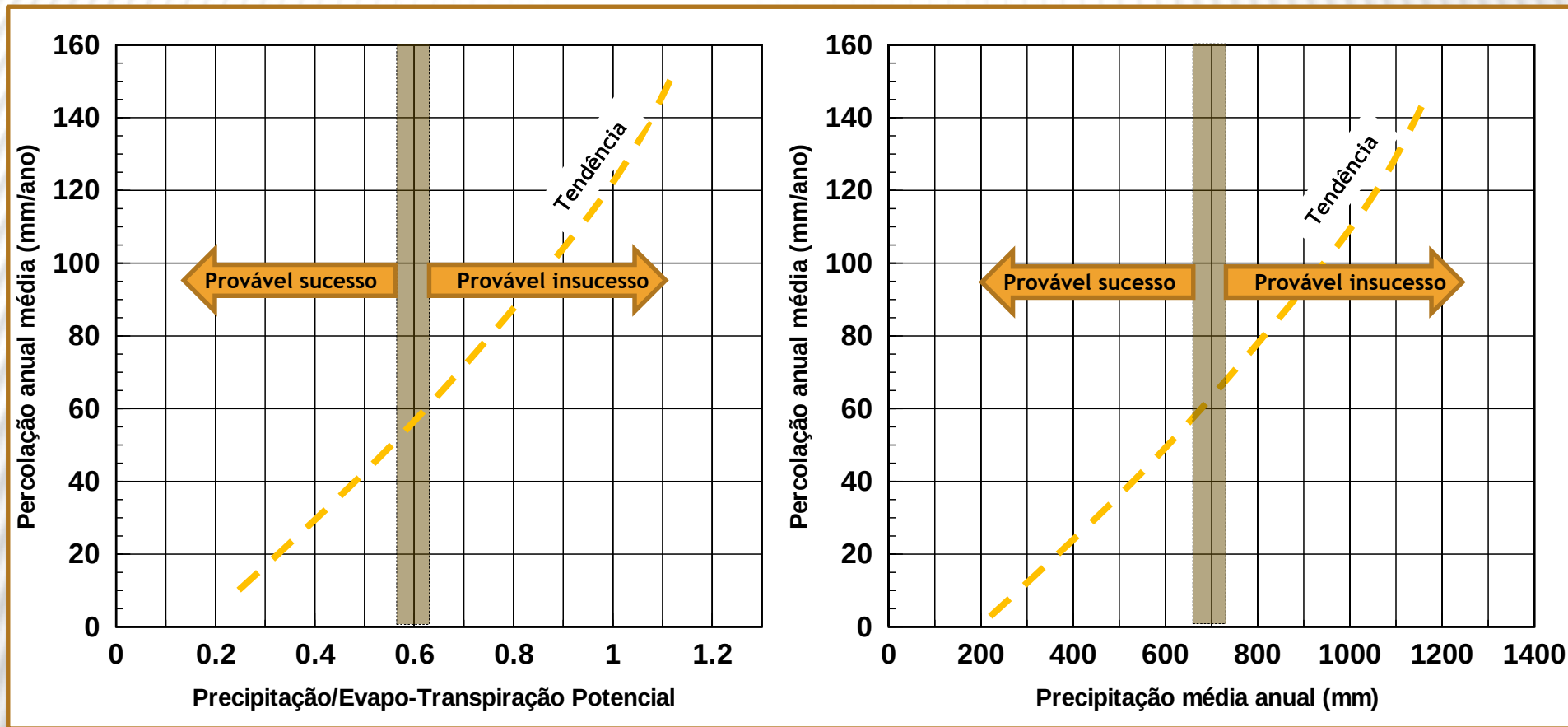
http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/glossary/e_g/field_capacity.html

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{Ah_w}{Ab} = \frac{h_w}{b}$$

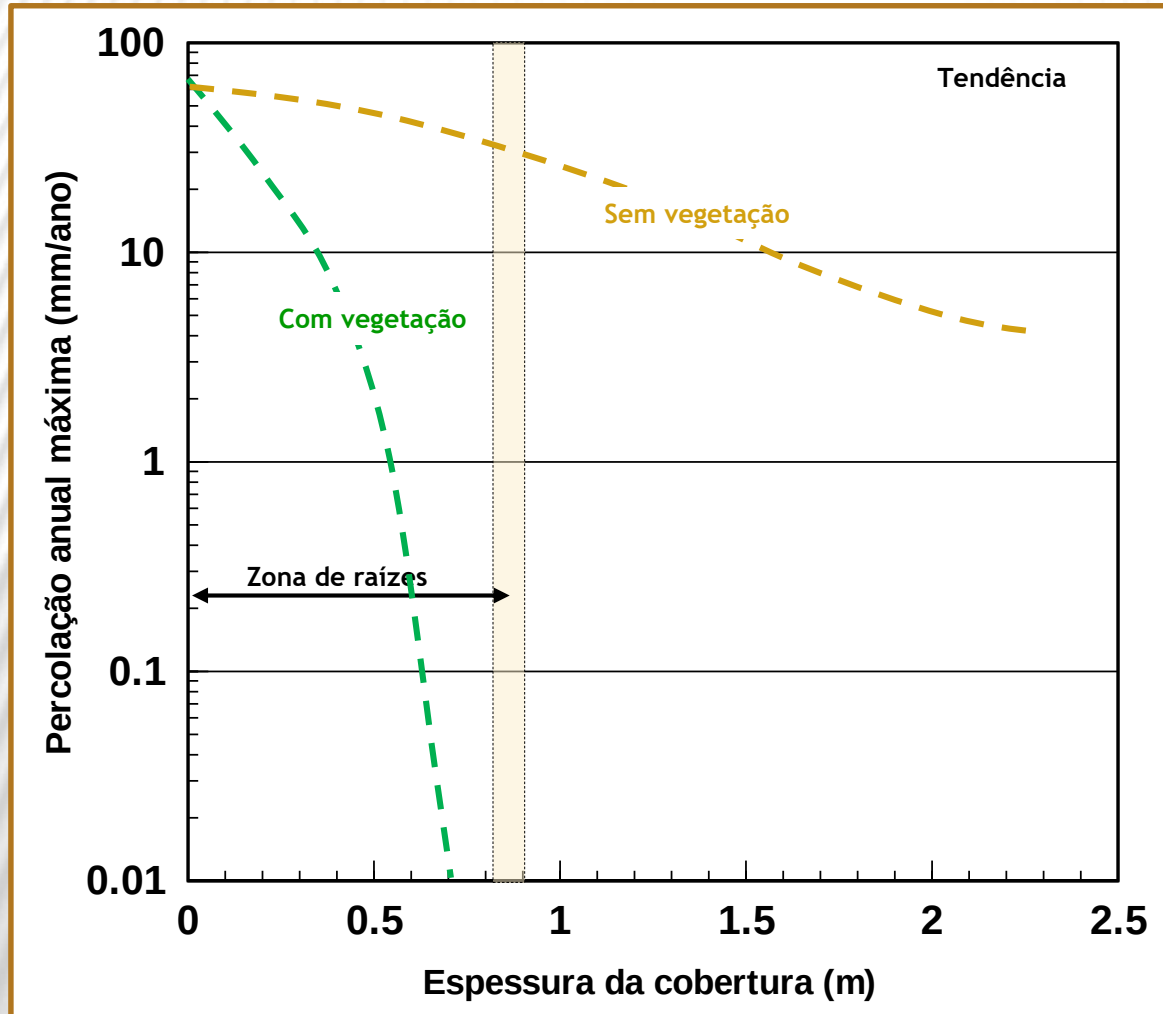
$$h_w = \theta_{CC} b = \text{Capacidade de Campo (CR)}$$

O Clima e a Cobertura

Coberturas Evapo-transpirativas



A vegetação e a Cobertura



- ✓ A eficiência da vegetação depende do clima e pode ser um elemento importante na redução da percolação de água para dentro do resíduo.
- ✓ Quando a vegetação é eficiente a espessura da cobertura pode ser menor já que tem-se a evapotranspiração.
- ✓ A água é removida na profundidade das raízes e não somente na superfície.

Projeto Preliminar

Cobertura Resistiva



Condutividade hidráulica

Cobertura Evapo-Transpirativa

Definir a quantidade de água para armazenar



Local do projeto
Solo
Espessura

Capacidade de Retenção

$$CR = P - ET - L - R - P_r$$

Precipitação

Evapo-Transpiração

$$ET = \beta PET$$

0.3 - 1.0

Drenagem lateral

Run-off

Percolação

Hipótese

A vegetação remove a água disponível a cada ano

$$\theta_{CC} - \theta_{PM}$$

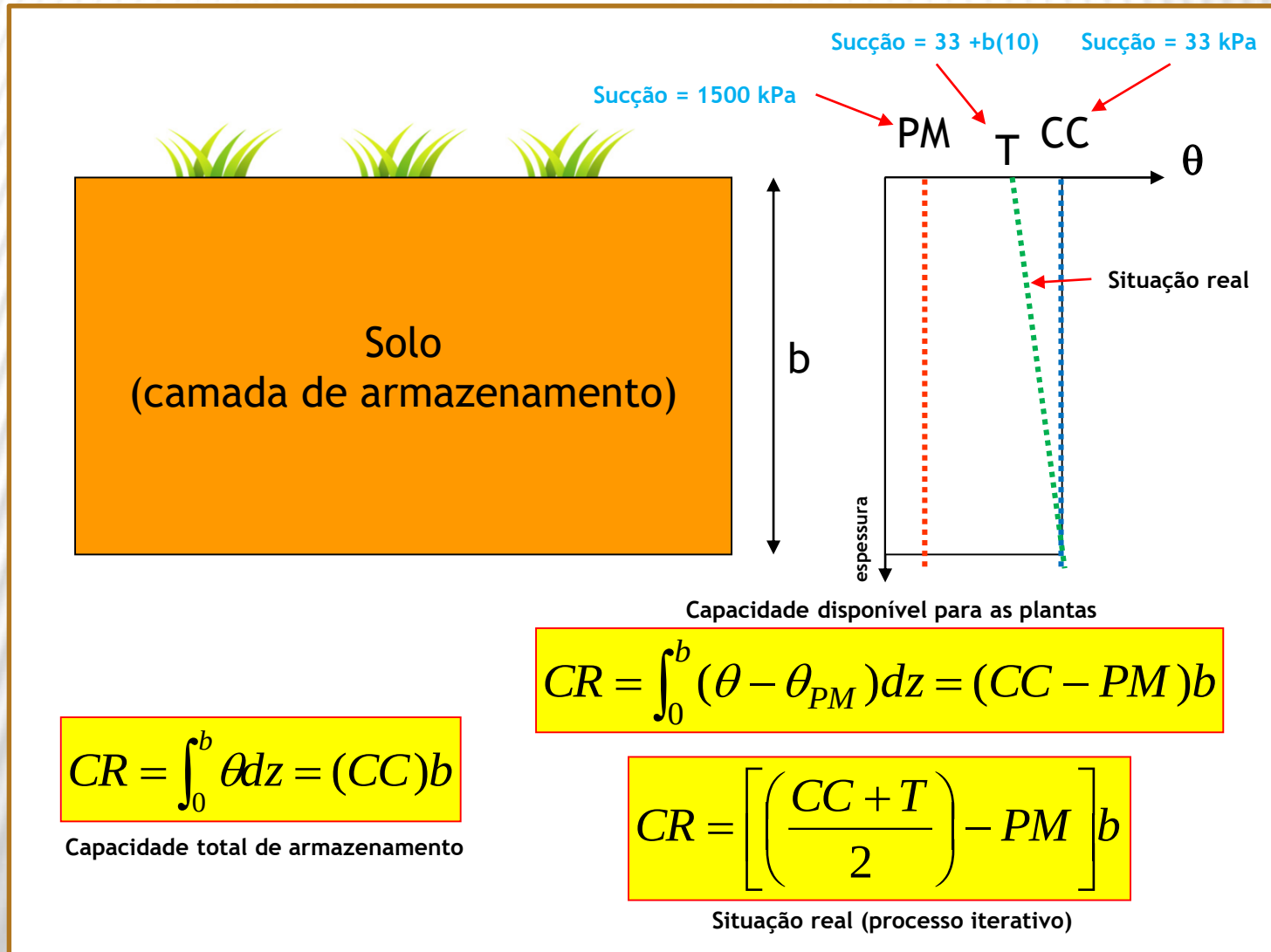
Mês	P (mm)	PET (mm)	P/PET	Limite excedido?	CR (mm)
Jan	59	26	2.29	Sim	41
Fev	45	73	0.62	Sim	10
Mar	92	181	0.51	Sim	17
Abr	18	324	0.06	Não	0
Mai	8	502	0.02	Não	0
Jun	3	599	0.00	Não	0
Jul	0	632	0.00	Não	0
Ago	5	533	0.01	Não	0
Set	8	354	0.02	Não	0
Out	103	196	0.53	Sim	22
Nov	99	74	1.34	Sim	62
Dez	69	22	3.08	Sim	6
Total	510	3515	0.15	-	158

Albright et al (2010)

Projeto Preliminar

Cobertura Evapo-Transpirativa

Definir a Espessura da camada



Projeto Preliminar

Cobertura Evapo-Transpirativa

Estimar Espessura Inicial da Camada



$$b \geq \frac{CR}{(CC - PM)}$$

Projeto Preliminar

Cobertura Evapo-Transpirativa

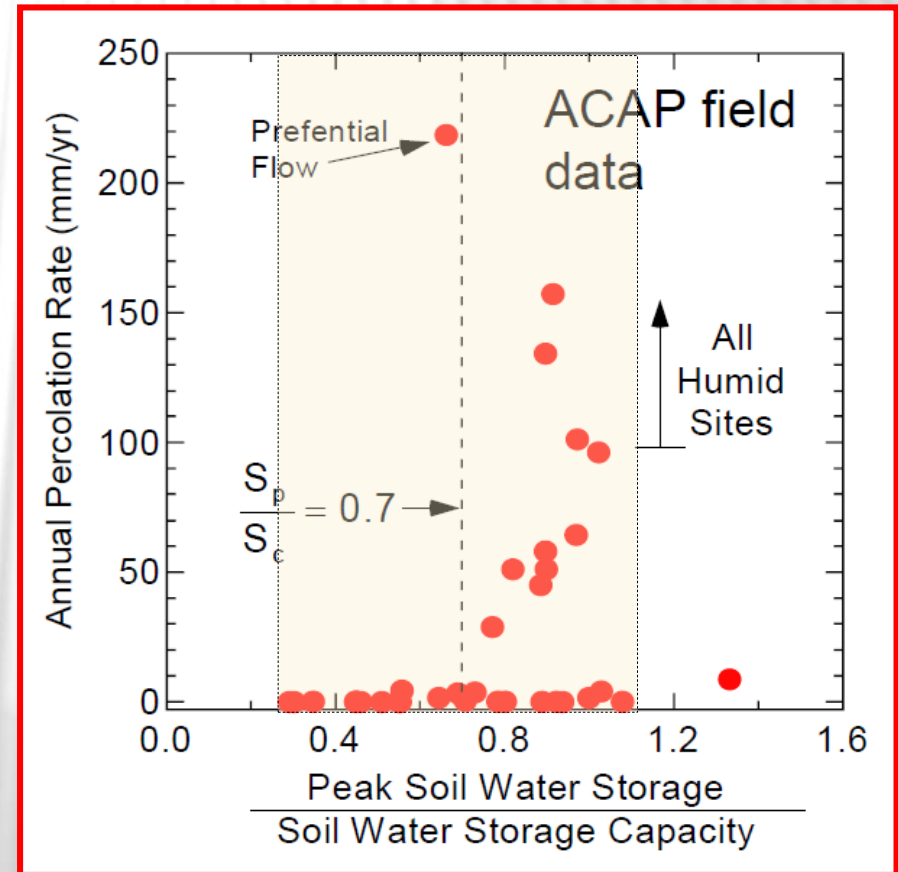
Definir a Espessura da camada

Dados experimentais (Benson (2004) sugerem que:

$$b \geq \frac{P}{0.7CR}$$

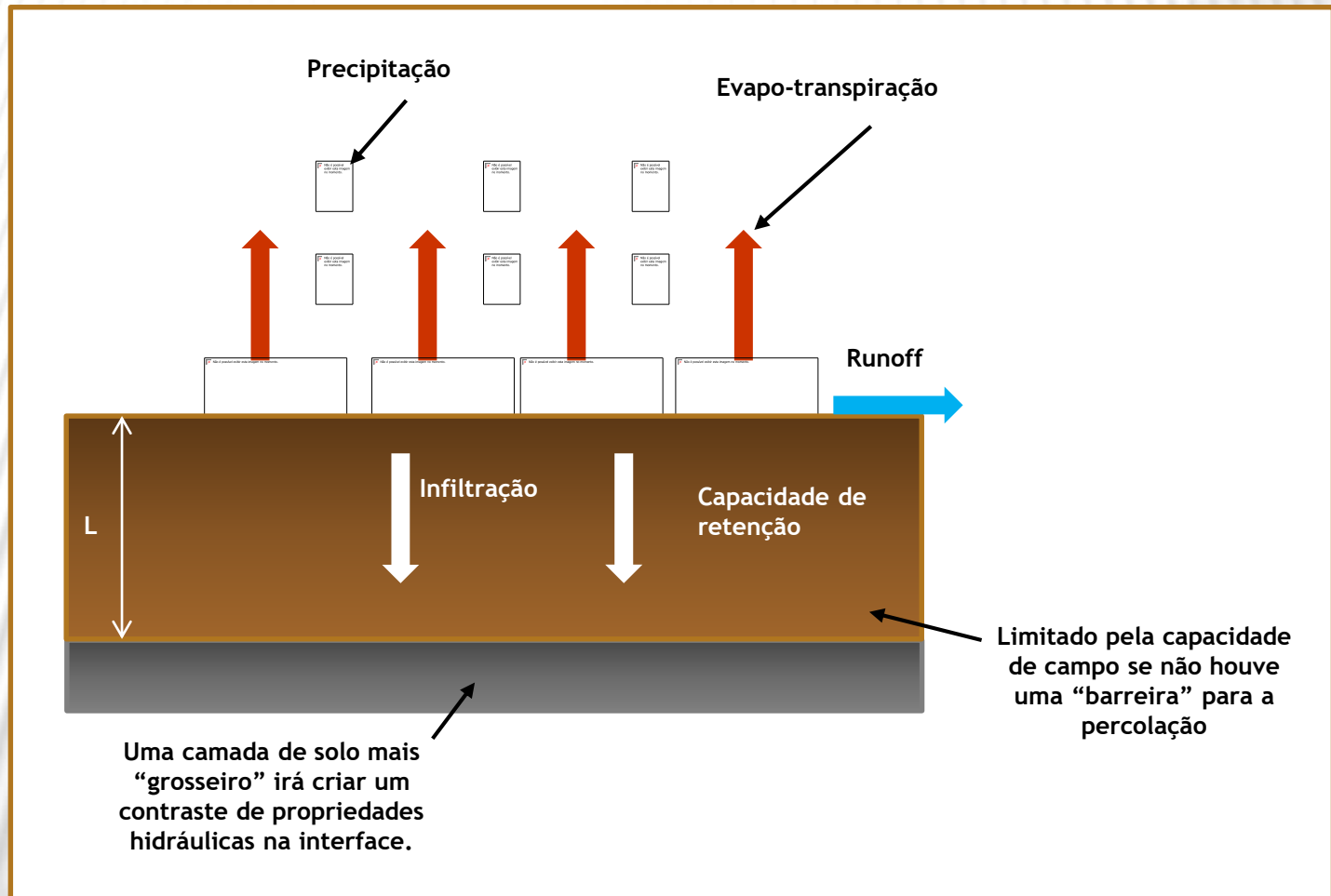
A percolação existe quando o teor de umidade é 70%CC

Um processo iterativo deve ser feito.



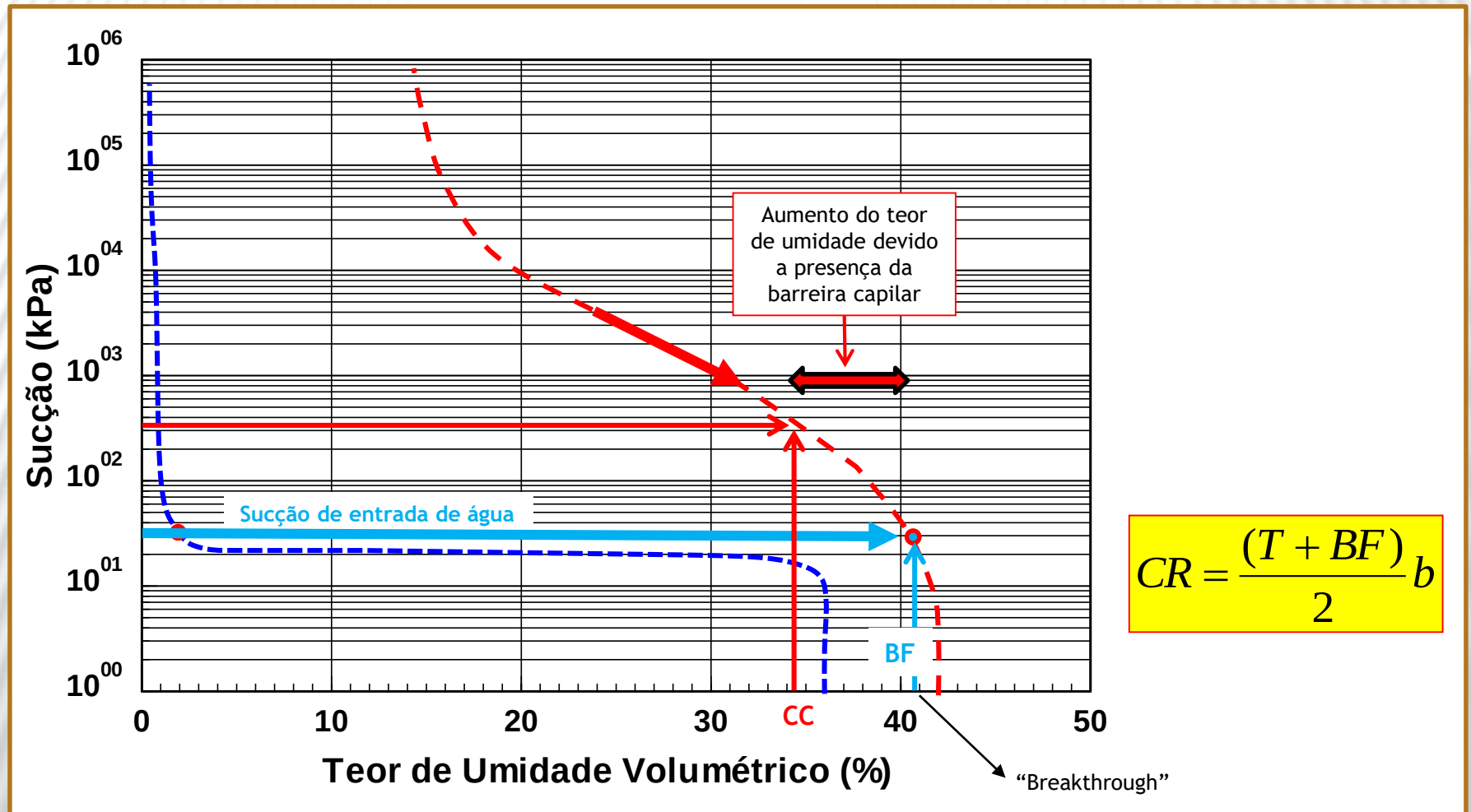
Projeto Preliminar

Barreira Capilar (efeito adicional na cobertura evapo-transpirativa)



Projeto Preliminar

Barreira Capilar



A barreira capilar inclinada

Capacidade de Retenção

$$CR = P - ET - L - R - P_r$$

Precipitação

Evapo-Transpiração

Drenagem lateral

Run-off

Percolação

Não pode ser um solo muito fino pois reduz muito a condutividade hidráulica

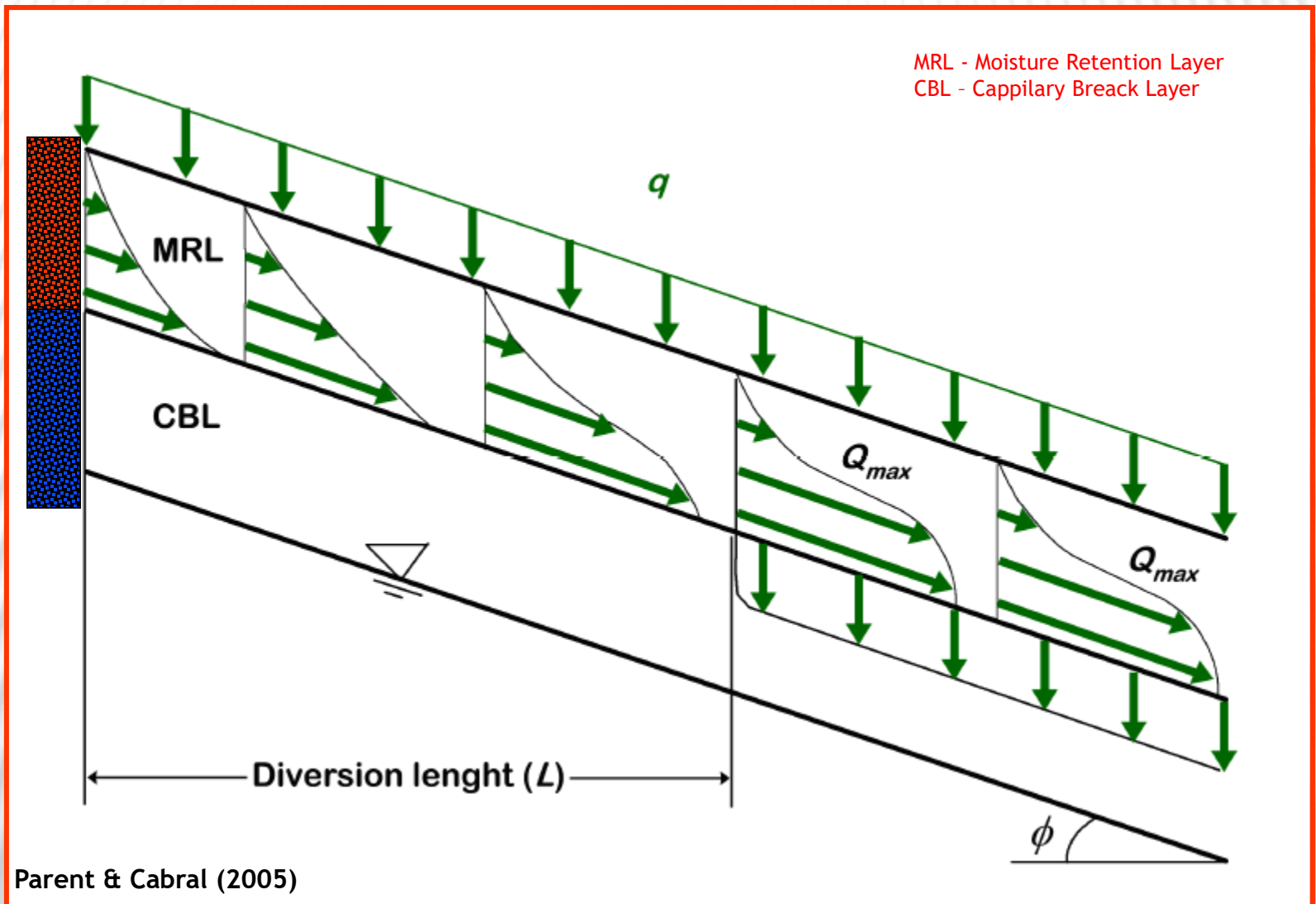
Água é colocada no topo do modelo

A capacidade de retenção é atingida (já aumentada pela barreira capilar) e a água flui lateralmente

A partir de certo ponto a água entra na camada de baixo.



A barreira capilar inclinada

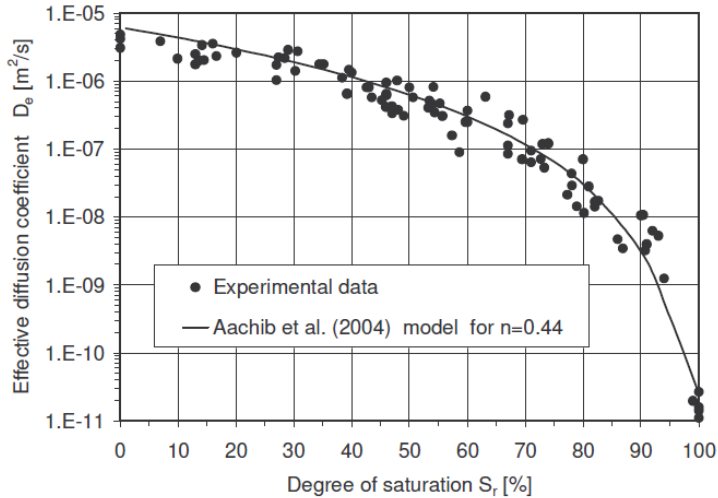


Refinar com Análises Numéricas

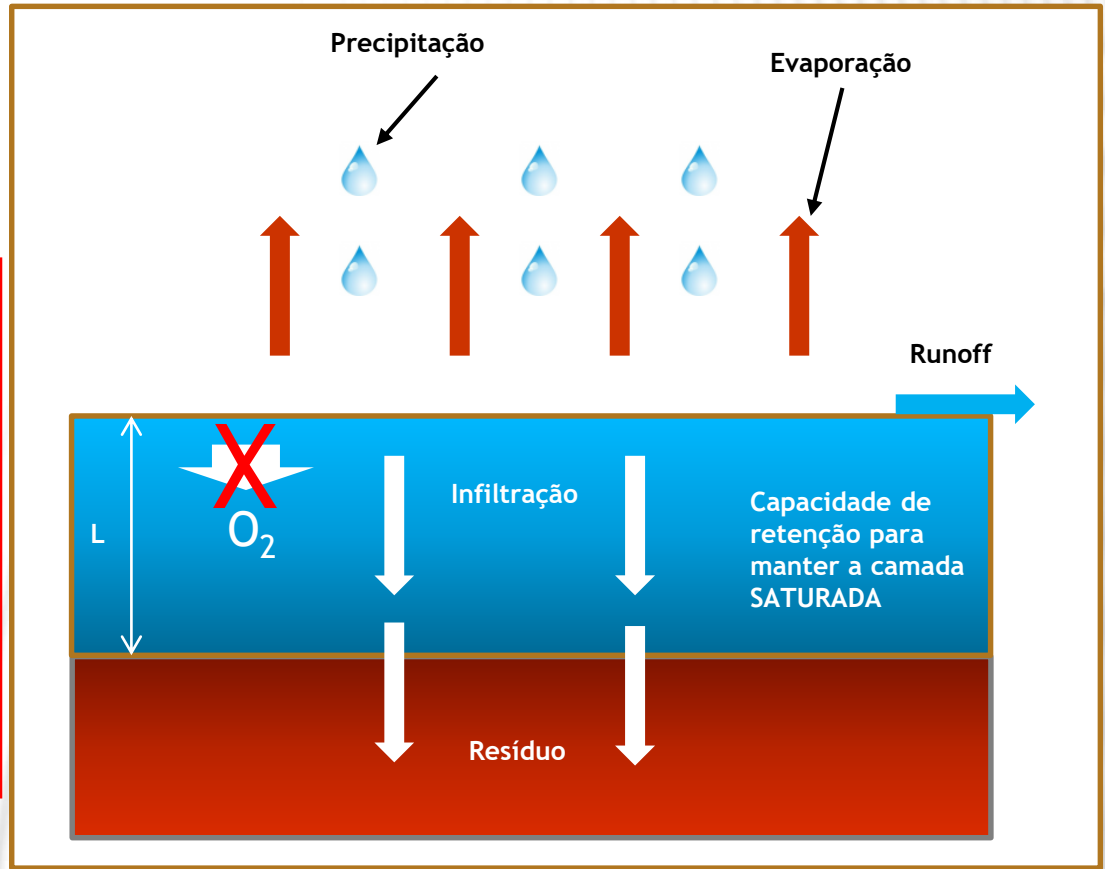


Barreira capilar para proteção às reações químicas

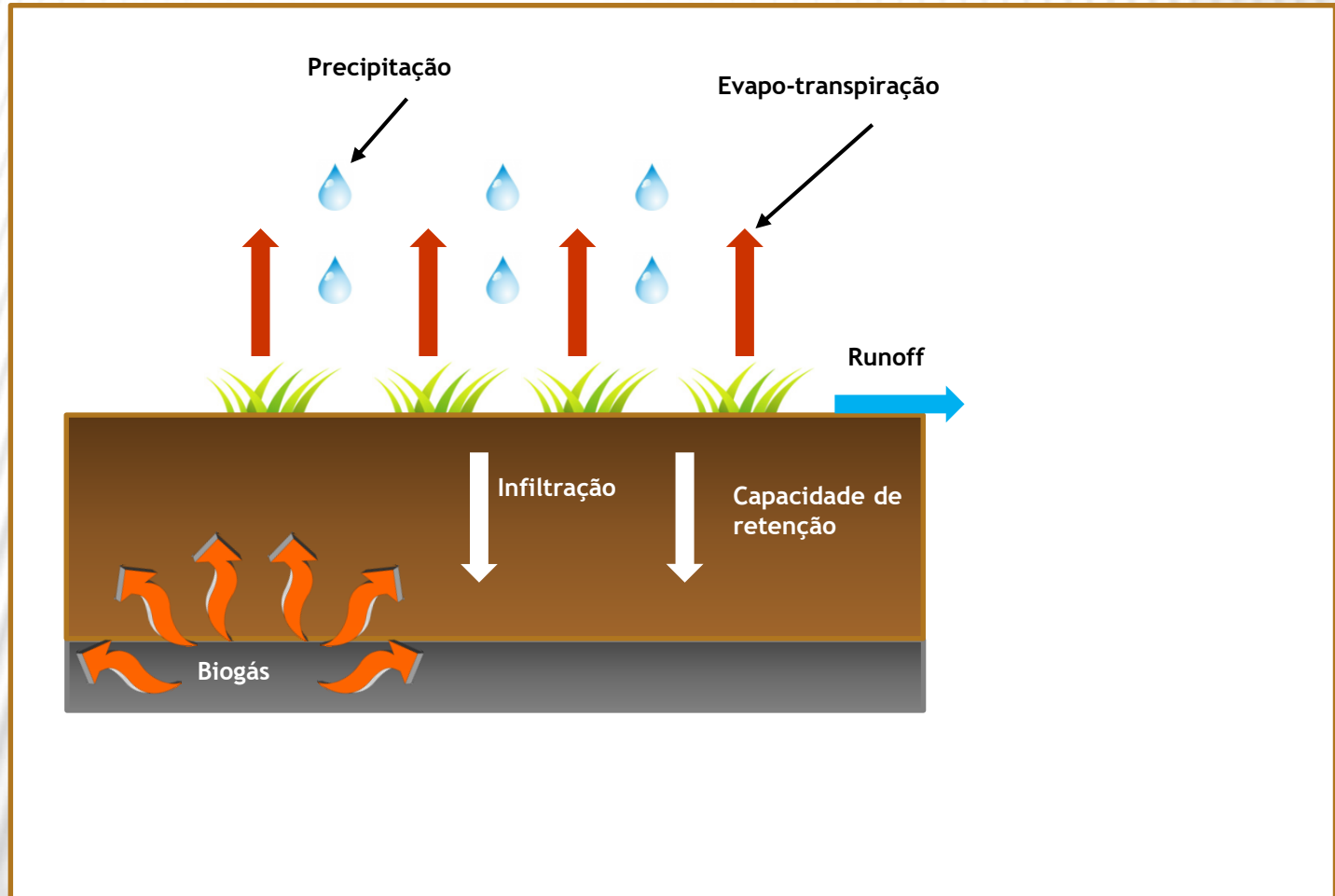
Camada saturada para reduzir a entrada de oxigênio



Mbonimpa et al. (2008)



A Cobertura Final e o Papel das Bactérias Metanotróficas

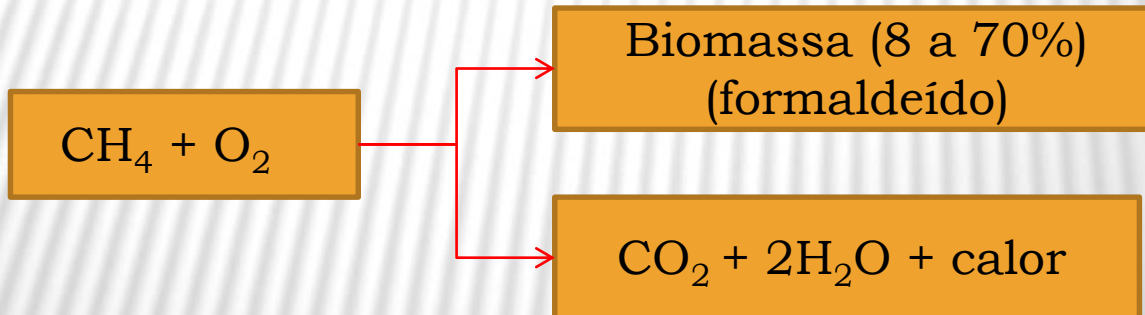
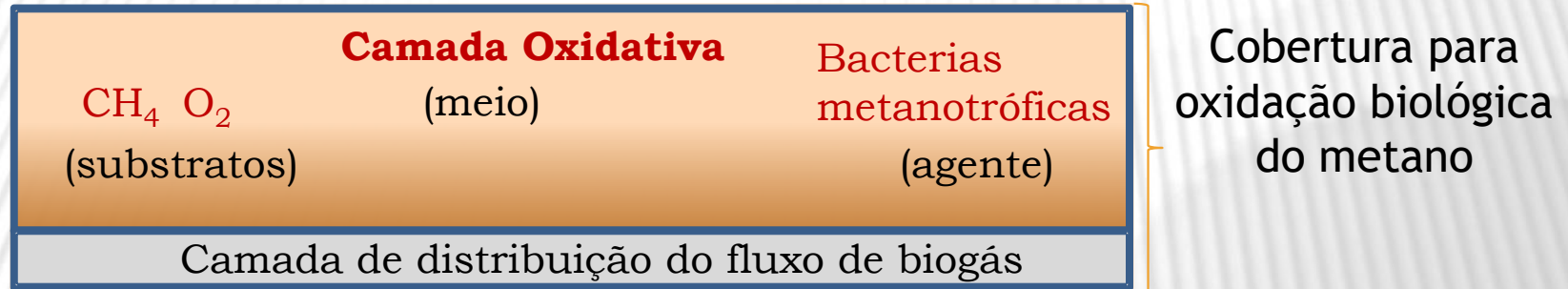


Agradecimento a Lia Maldaner e Paula Teixeira:

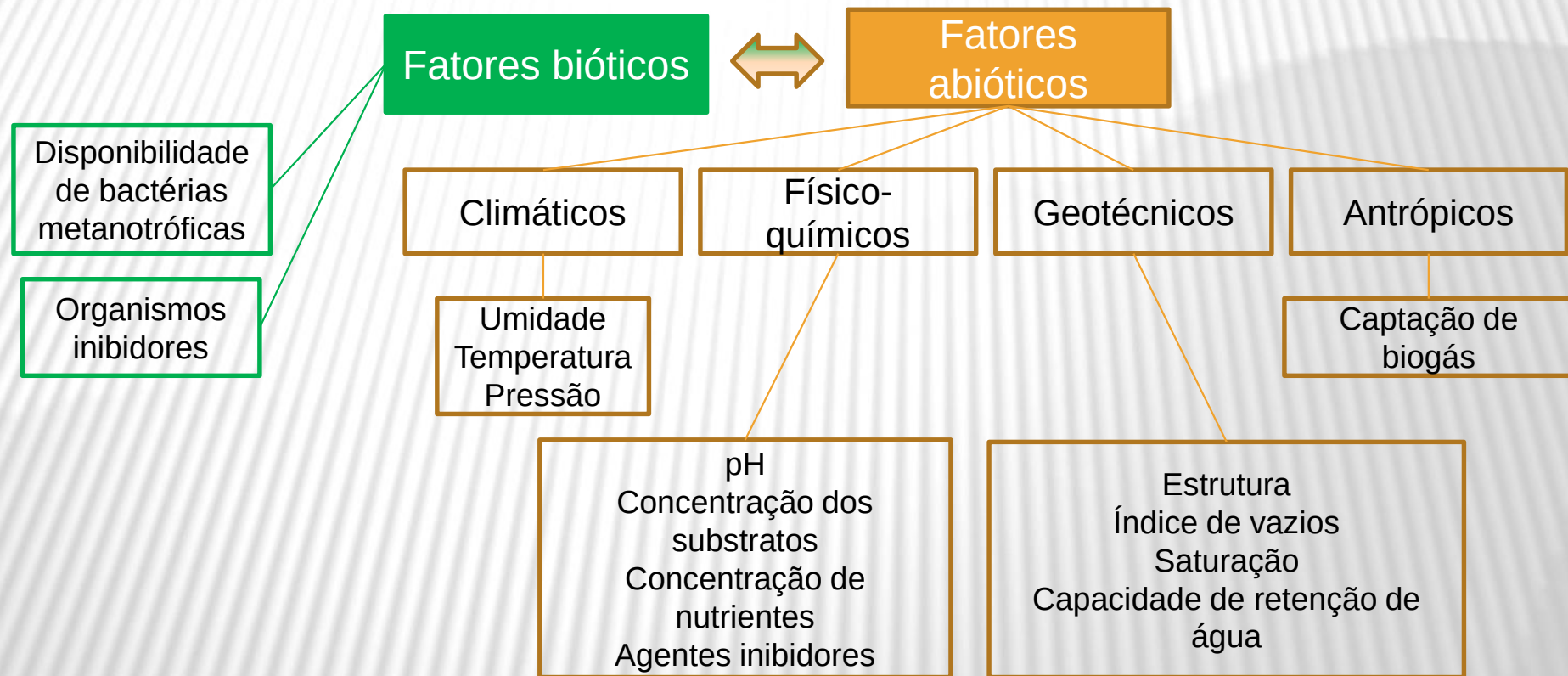
Dissertação: Cobertura para Oxidação Biológica do metano em Coberturas de Aterros de RSU (2011)

Tese: Oxidação Biológica do Metano em Coberturas de Aterros de RSU: Dinâmica do Processo e Aspectos Geotécnicos (2008).

Oxidação Biológica do Metano

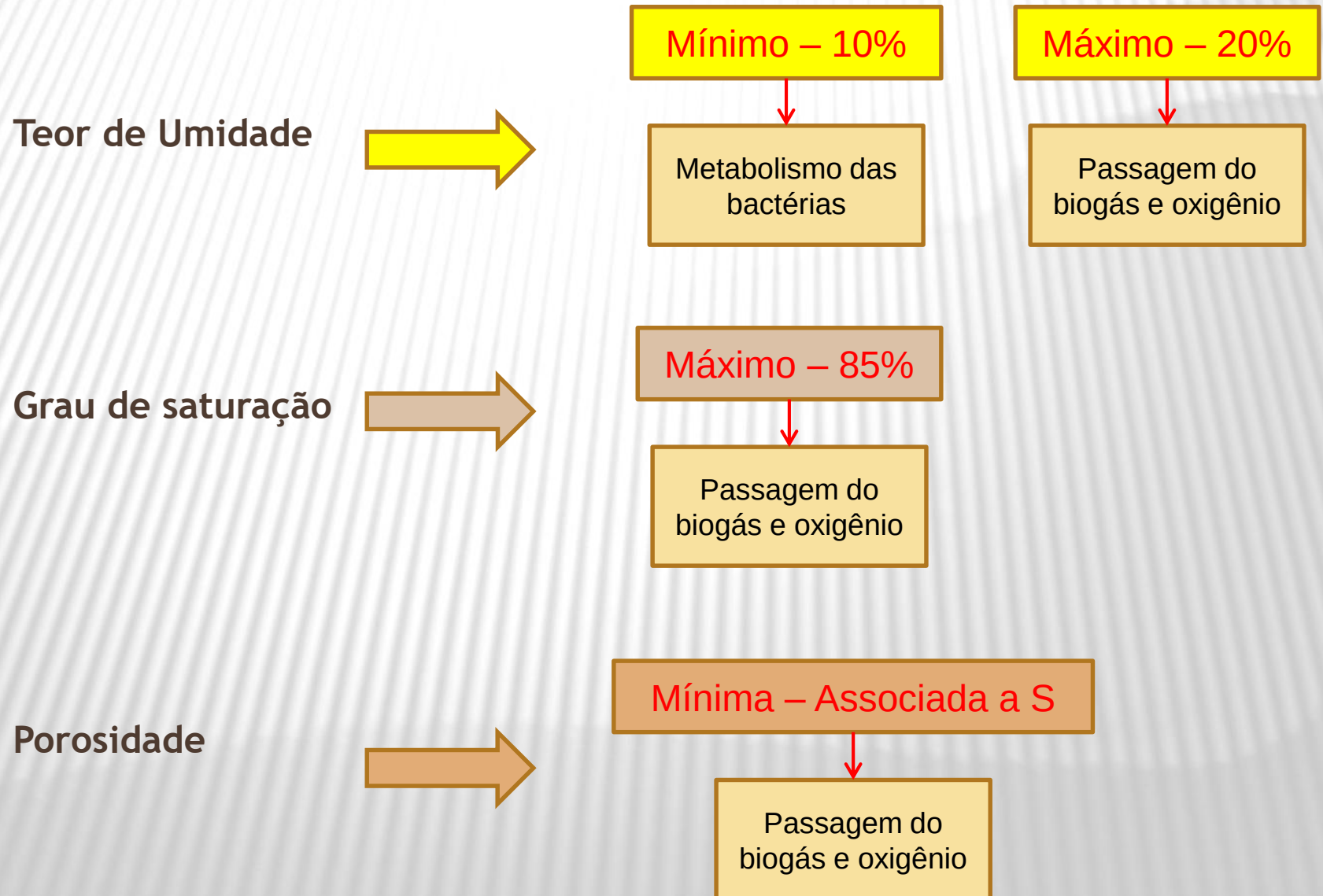


Fatores que Afetam a Oxidação Biológica do Metano

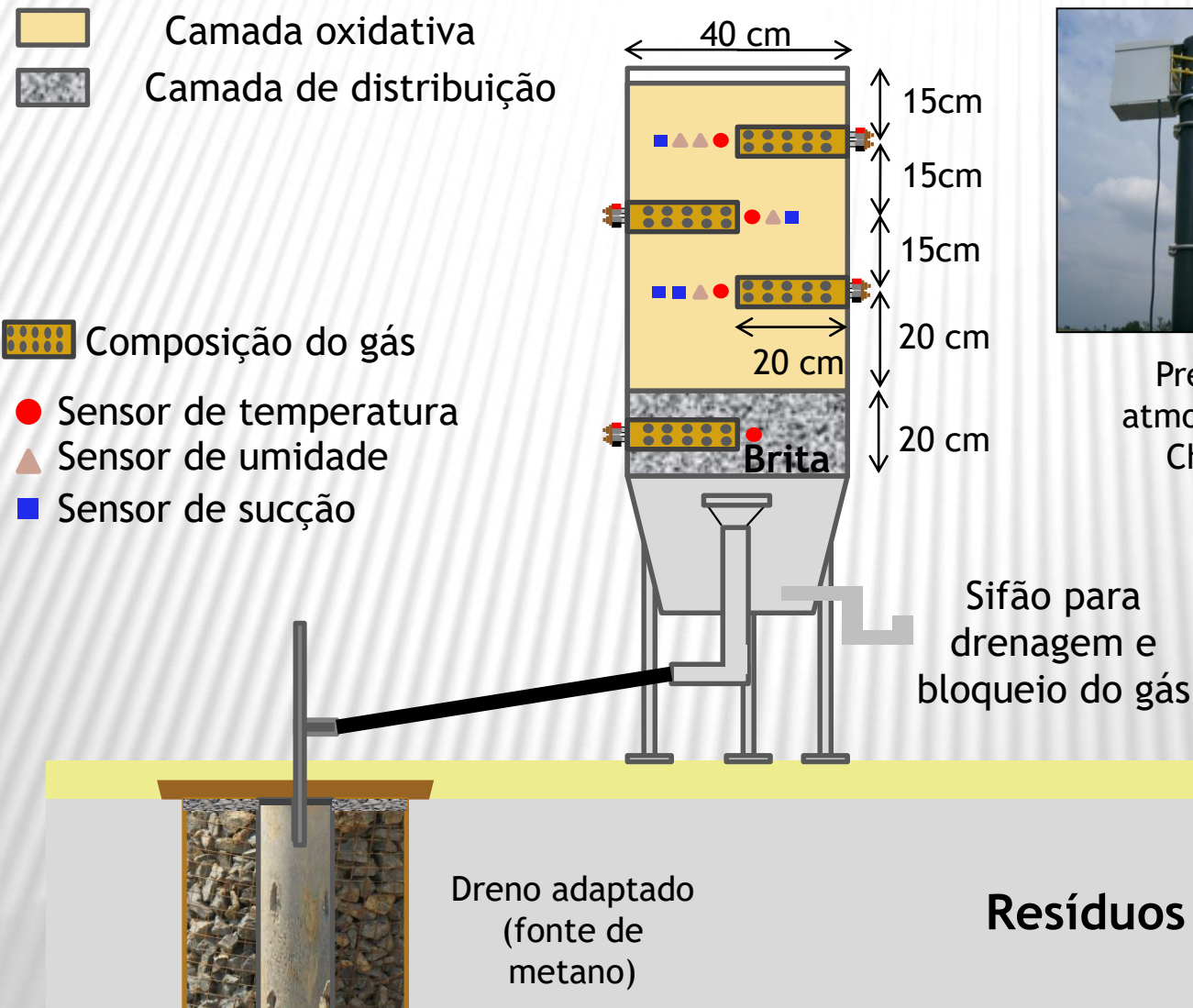


Fatores interdependentes - difícil definir a influência de cada um isoladamente

Fatores Geotécnicos que Afetam a Oxidação Biológica do Metano



Biofiltro para Oxidação Biológica do Metano



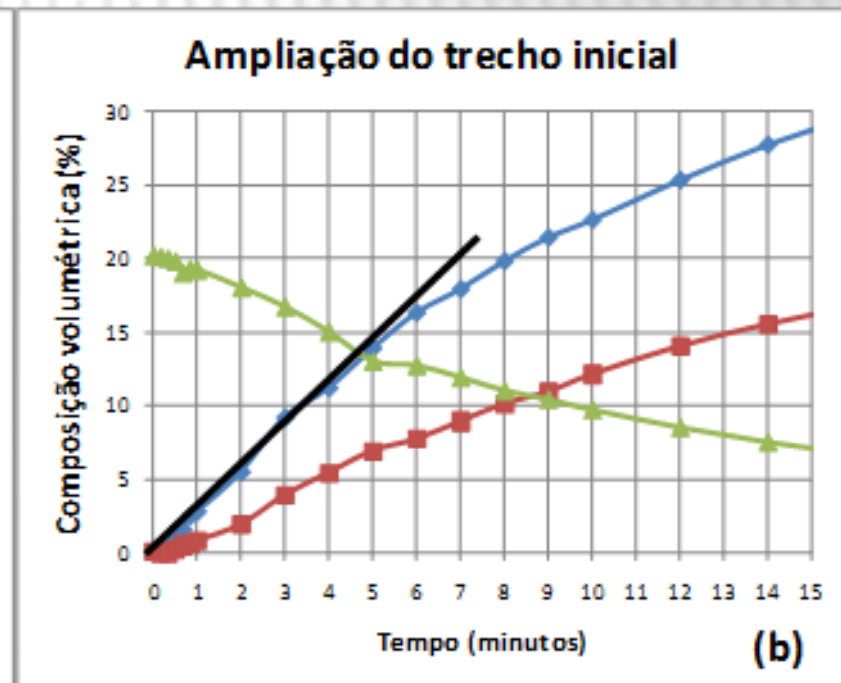
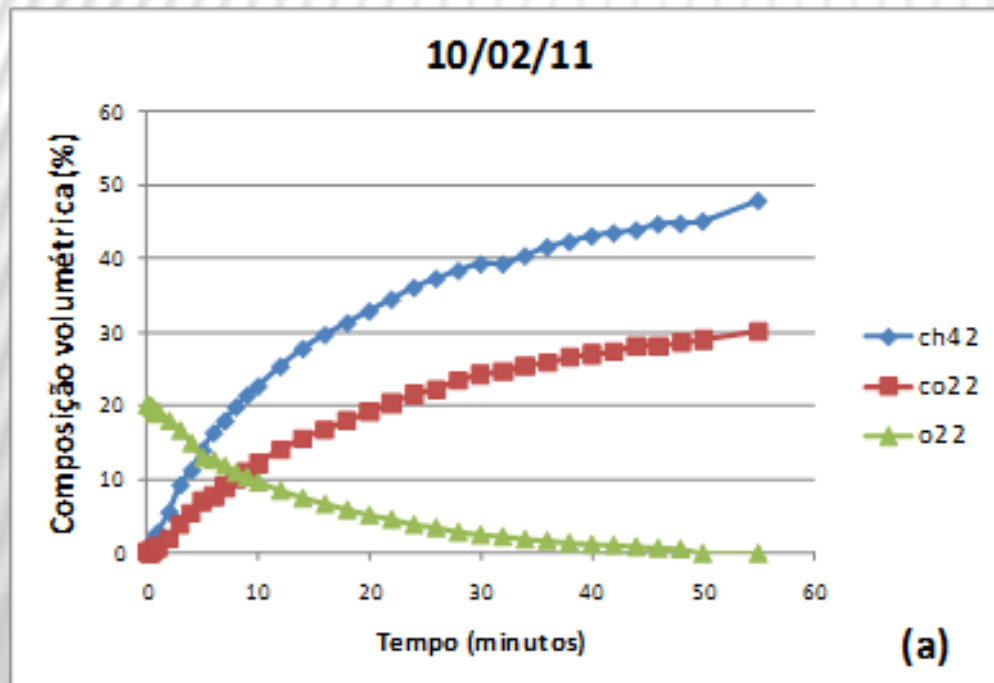
Sistema de aquisição de dados



Determinação do fluxo de metano

$$J_{CH_4} = \frac{V \cdot \frac{\delta C}{\delta t} \cdot \rho}{A}$$

150 a 280 kg/m³dia



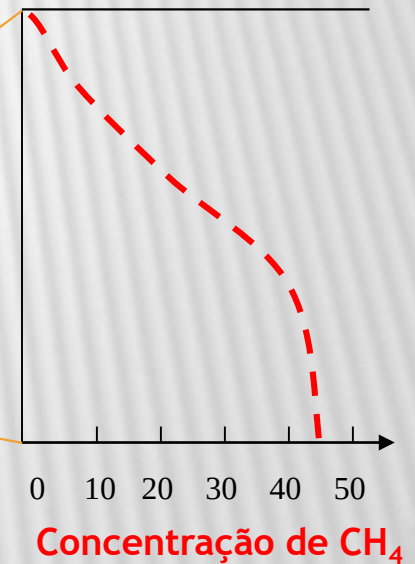
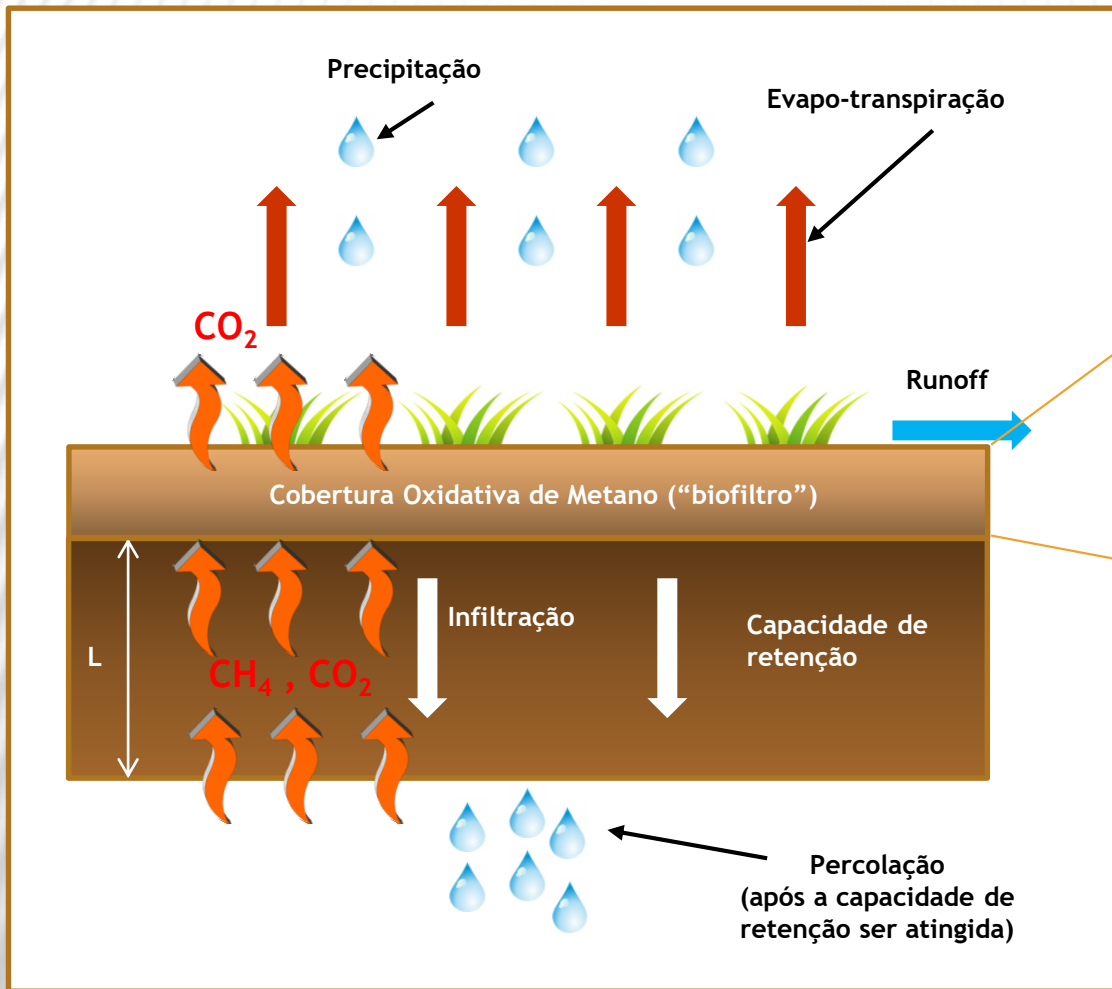
Cálculo da eficiência da oxidação

$$Ef_{ox} = \frac{\%CH_{4P4} - \%CH_{4P1}}{\%CH_{4P4}}$$

$$\text{Taxa de metano oxidado} = Ef_{ox} * J_{CH_4}$$

Cobertura Metanotrófica - Redução das Emissões de CH₄

Não substitui as outras. Complementam,
pois o objetivo é outro.



Sistema de Aquisição de Dados



Sensores de Temperatura,

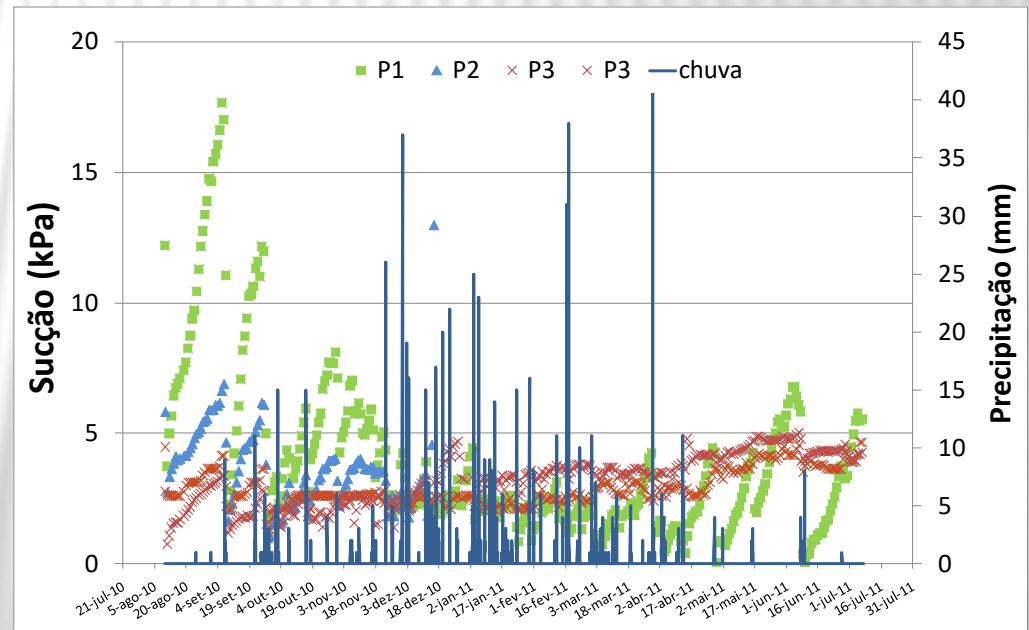
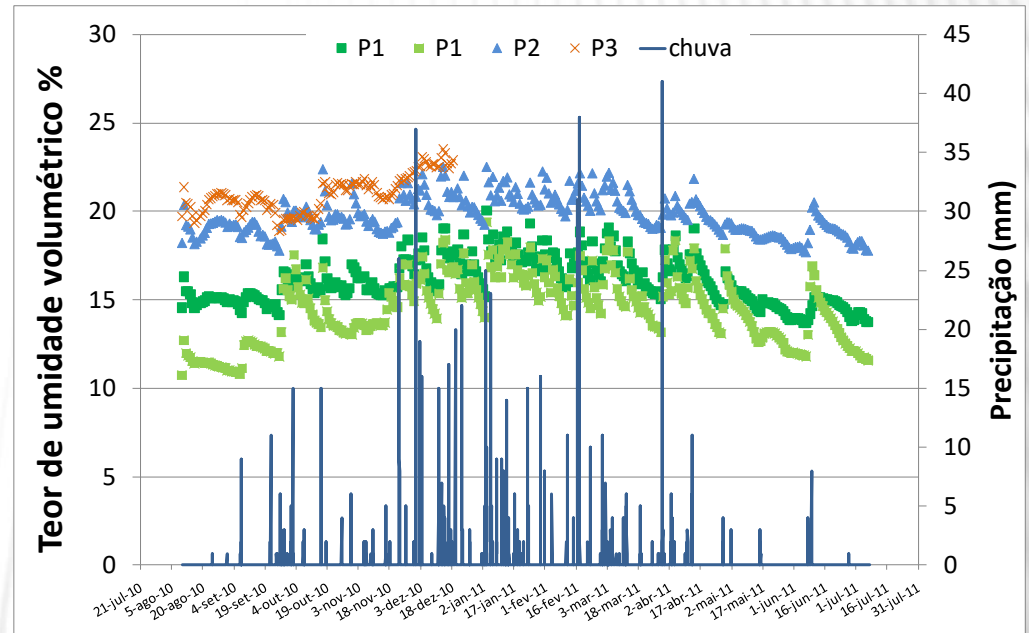
Sucção

e teor de umidade

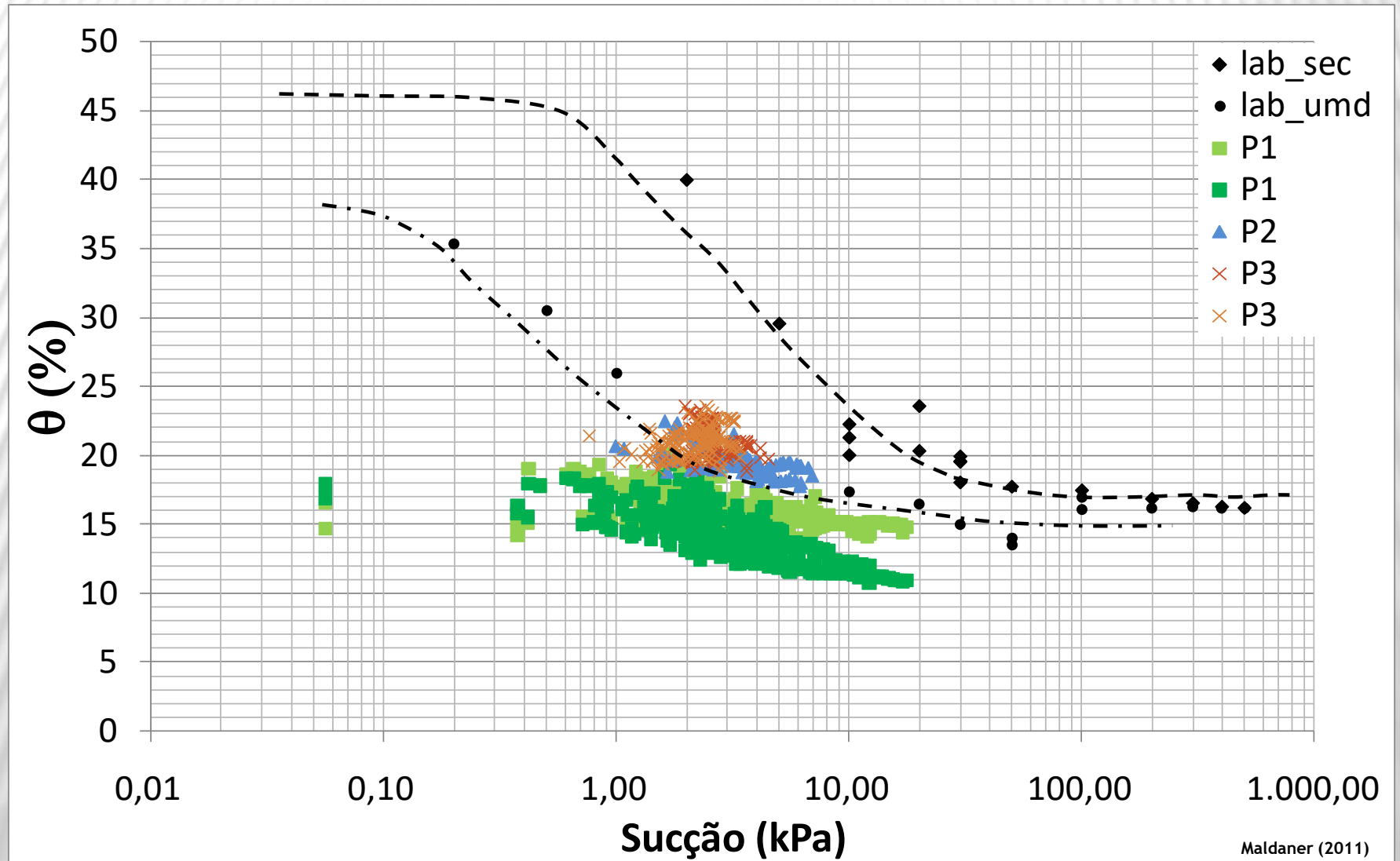


Dados para o Balanço Hídrico:

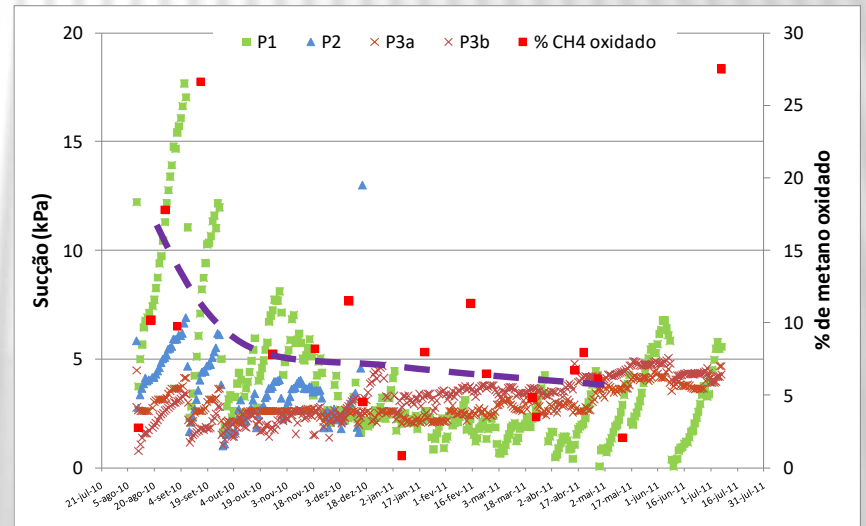
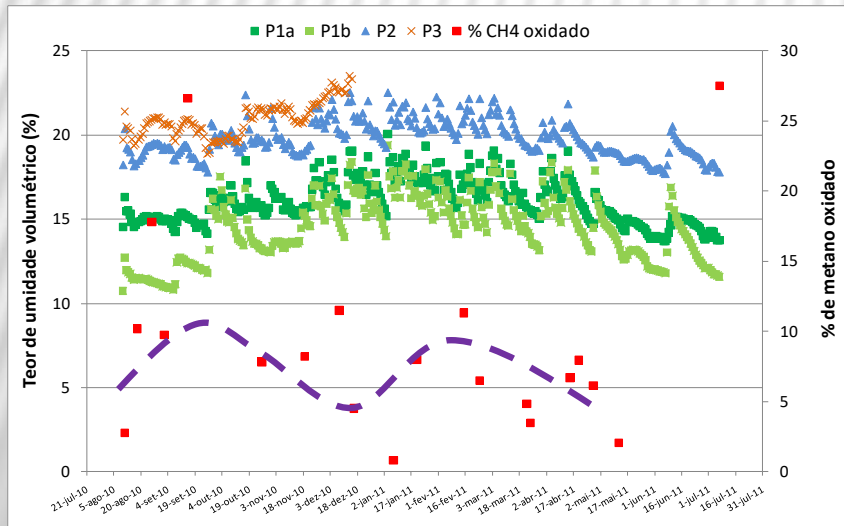
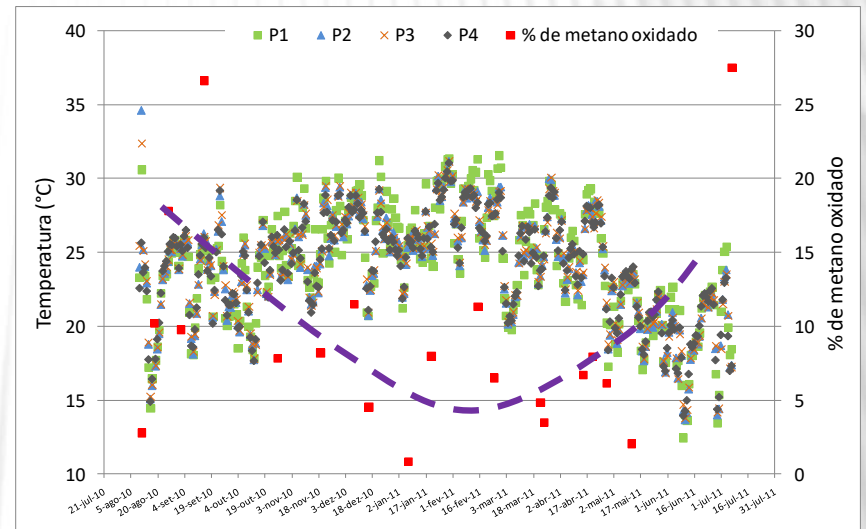
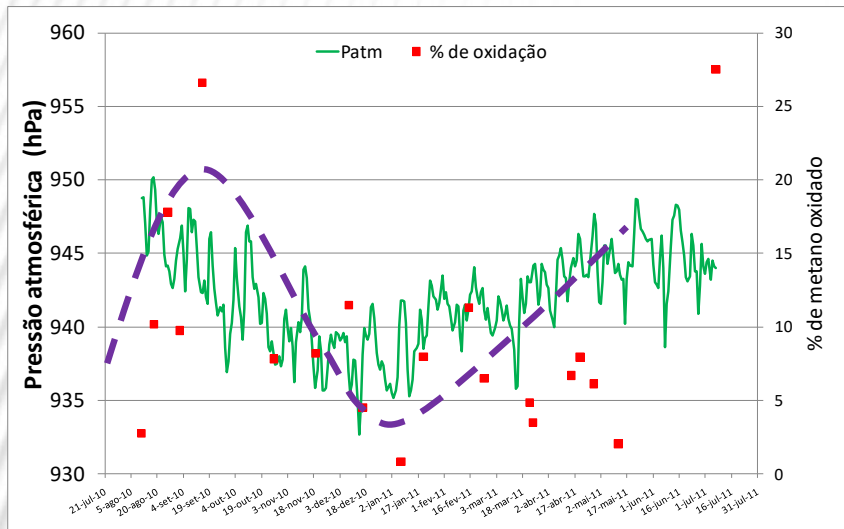
Teor de Umidade, Sucção e Precipitação



Dados: Curva de Retenção Campo versus Laboratório

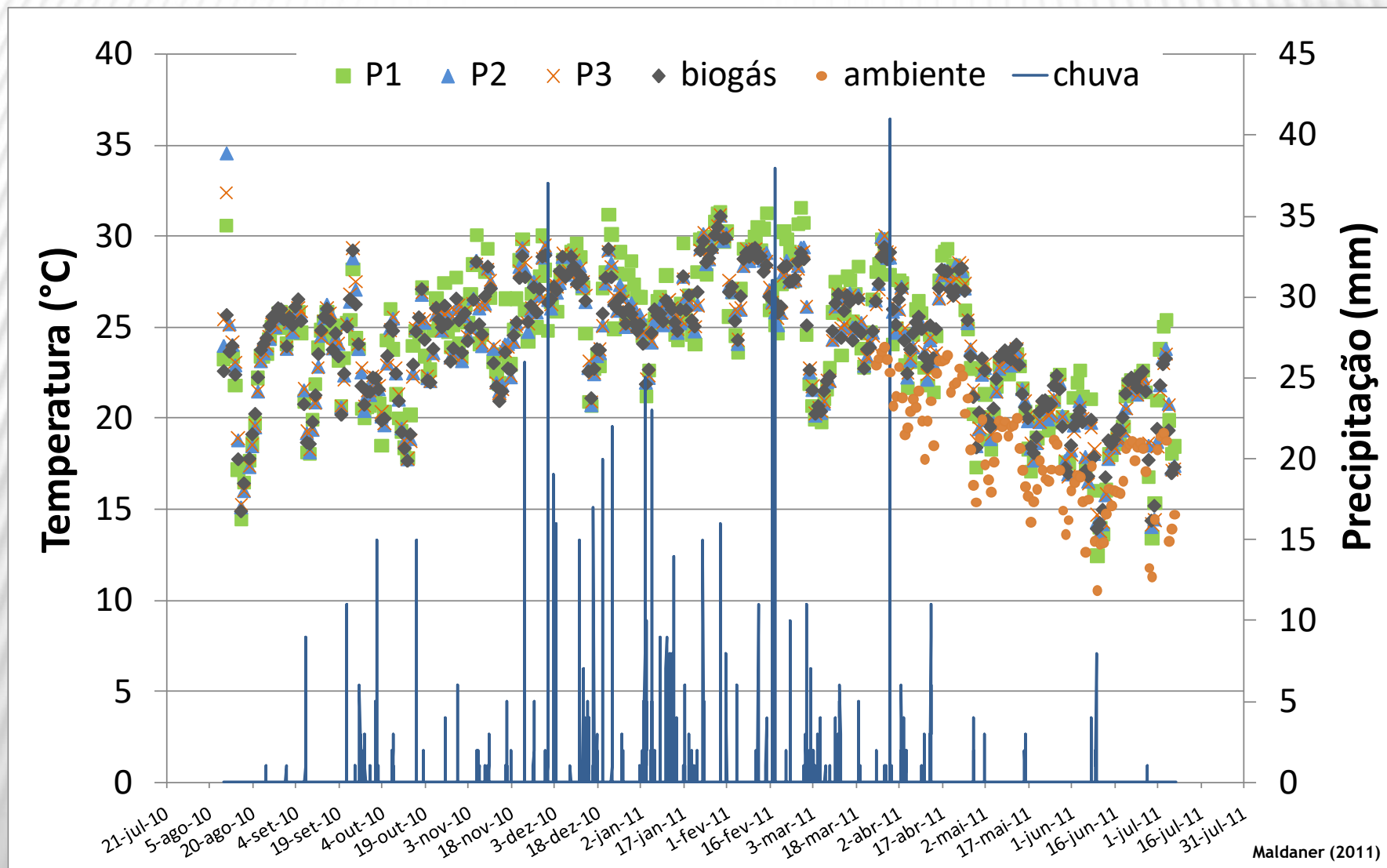


Análise geral dos Dados para Oxidação de Metano



Dados para o Balanço Hídrico:

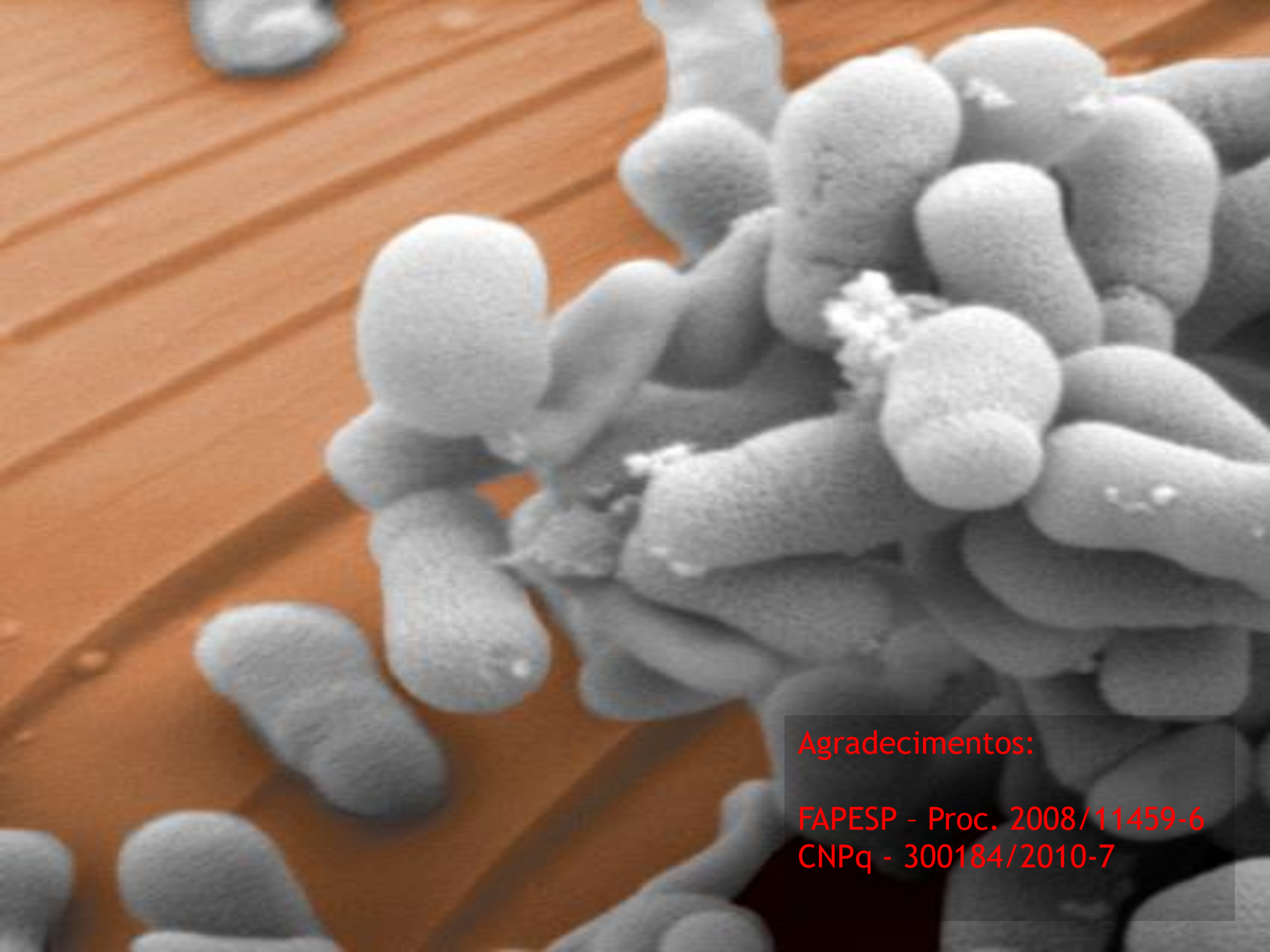
Medição de Temperatura e Precipitação



Para Pensar!



- Entrada de água (Quanto?)
- Avaliação do projeto em função do clima (Dados para o Brasil)
- Parâmetros dos solos utilizados (A cultura da falta de parâmetros)
- O controle da execução (Onde está a experiência das barragens brasileiras?)
- Saída de gás (Como minimizar? Como controlar?)
- Recomposição da paisagem (Vegetação/evapotranspiração)
- Parâmetros (Necessidade)
- Barreiras Alternativas (Quais as vantagens no Brasil?)
- A cobertura e os Lixões (Onde está a solução?)
- Uso de áreas de “antigos” aterros ou lixões (Qual o papel da cobertura?)



Agradecimentos:

FAPESP - Proc. 2008/11459-6
CNPq - 300184/2010-7