

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"  
Departamento de Engenharia de Biosistemas

---

## Balço de radiação e de energia em sistemas agrícolas



Disciplina (LEB0630) Agrometeorologia Aplicada  
Responsável - Prof. Dr. Paulo Cesar Sentelhas  
Colaborador - Prof. Dr. Gustavo C. Beruski  
E-mail - beruskigc@usp.br

Piracicaba - SP

---

---

---

---

---

---

---

---

### SUMÁRIO



- RADIAÇÃO SOLAR;
- VARIAÇÃO TEMPORAL E SAZONAL DA RADIAÇÃO;
- SALDO DE RADIAÇÃO;
- MEDIDAS E ESTIMATIVAS DO SALDO DE RADIAÇÃO;
- ALBEDO E SUAS IMPLICAÇÕES NAS PLANTAS;
- BALANÇO DE ENERGIA;
- APLICAÇÕES PRÁTICAS.

**COMPETÊNCIA:**  
→ Entender a importância da radiação solar para os sistemas agrícolas  
→ Reconhecer diferenças entre balanço de radiação e energia;  
→ Aplicar conceitos radiométricos para a resolução de problemas em Sistemas

**HABILIDADES:**  
→ Empregar dados e conhecimento sobre saldo de radiação e balanço de energia ao planejamento agroclimático e nas tomadas de decisão.



Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEB0630

---

---

---

---

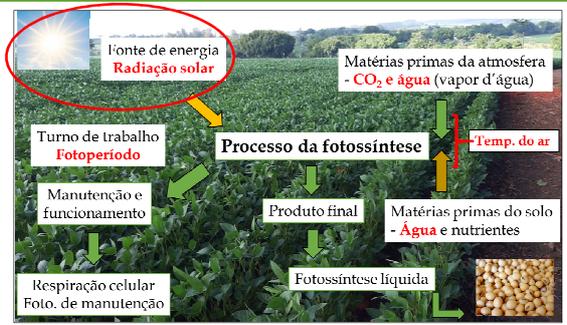
---

---

---

---

### INTRODUÇÃO



**Fototropismo e Indução floral**



Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEB0630

---

---

---

---

---

---

---

---

# RADIAÇÃO SOLAR



- Manutenção da vida;
- Energia;
- Agricultura:
  - Produtividade Vegetal;

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEP/USP



---

---

---

---

---

---

---

---

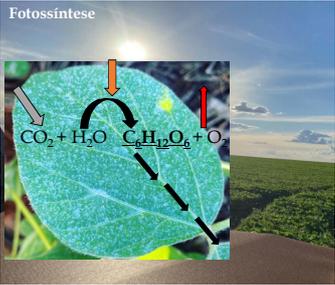
# RADIAÇÃO SOLAR

## Produtividade Vegetal

↓

1. Processo da Fotossíntese
  - 1.1 Fotossíntese Bruta
  - 1.2 Fotossíntese Líquida
2. Processo da Respiração

### Fotossíntese



Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEP/USP



---

---

---

---

---

---

---

---

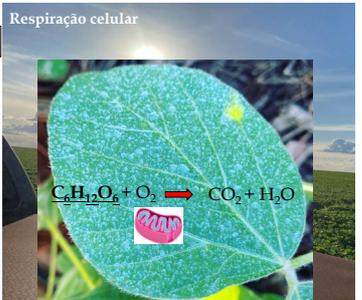
# RADIAÇÃO SOLAR

## Produtividade Vegetal

↓

1. Processo da Fotossíntese
  - 1.1 Fotossíntese Bruta
  - 1.2 Fotossíntese Líquida
2. Processo da Respiração

### Respiração celular



Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEP/USP



---

---

---

---

---

---

---

---

## RADIACÃO SOLAR



Produtividade Vegetal



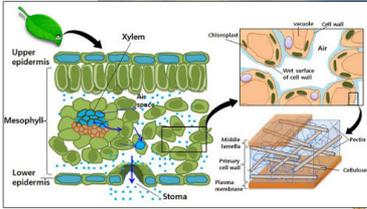
Transpiração vegetal

1. Processo da Fotossíntese

- 1.1 Fotossíntese Bruta
- 1.2 Fotossíntese Líquida

2. Processo da Respiração

3. Processo da Transpiração



Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEP/USP



---

---

---

---

---

---

---

---

---

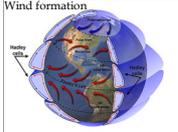
---

## RADIACÃO SOLAR

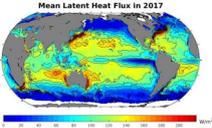




- Manutenção da vida;
- Energia;
- Agricultura:
  - Produtividade Vegetal;
  - Fenômenos Meteorológicos.



Wind formation



Mean Latent Heat Flux in 2017






Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEP/USP



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## RADIACÃO SOLAR





- Manutenção da vida;
- Energia;
- Agricultura:
  - Produtividade Vegetal;
  - Fenômenos Meteorológicos.



**Radiação Solar Incidente**

Variabilidade:

- Escala diária;
- Escala sazonal.

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEP/USP



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## VARIAÇÃO DIÁRIA DA RADIAÇÃO

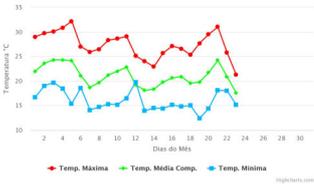


### Movimento de Rotação



Instituto Nacional de Meteorologia - INMET

Temperaturas Diárias (Máxima, Média, Mínima)



Temp. Máxima    Temp. Média Comp.    Temp. Mínima

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
1.1.18.0620



---

---

---

---

---

---

---

---

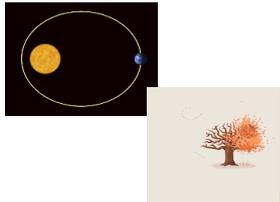
---

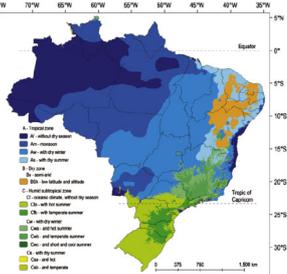
---

## VARIAÇÃO SAZONAL DA RADIAÇÃO



### Movimento de Translação





**Fluxo de energia solar:**

- **Ângulo de incidência:**
  - **Latitude e Declinação Solar;**
- **Distância Terra-Sol.**

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
1.1.18.0620



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## VARIAÇÃO SAZONAL DA RADIAÇÃO



- **EVENTOS PERIÓDICOS NAS EFEMÉRIDES**

**21 de Março**

Início do Outono no HS e Primavera HN  
Sol perpendicular ao Equador (12h)  
Sol tangente ao horizonte nos Polos  
Fotoperíodo 12 horas

**21 de Junho**

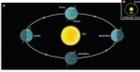
Início do Inverno no HS e Verão HN  
Sol perpendicular ao T. Câncer (12h)  
Sol tangente ao meio dia no Circulo Polar Antártico - N = 0h  
Sol tangente a meia noite no Circulo Polar Ártico - N = 24h  
Fotoperíodo máximo no HN e mínimo no HS

**22 de Setembro**

Início da Primavera no HS e Outono HN  
Sol perpendicular ao Equador (12h)  
Sol tangente ao horizonte nos Polos  
Fotoperíodo 12 horas

**21 de Dezembro**

Início do Verão no HS e Inverno HN  
Sol perpendicular ao T. Capricórnio (12h)  
Sol tangente ao meio dia no Circulo Polar Ártico - N = 0h  
Sol tangente a meia noite no Circulo Polar Antártico - N = 24h  
Fotoperíodo máximo no HS e mínimo no HN



Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
1.1.18.0620



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



## FOTOPERÍODO



- Introdução, seleção e a indicação de materiais genéticos para o cultivo;
- Planejamento de semeadura / Cultivo em ambientes protegidos.

### SOJA



### CEBOLA

Cultivar	Requerimento de luz para bulbificar
Dias curtos	11-12 horas
Dias intermediários	13 horas
Dias longos	> 14 horas

Cultivar	Fotoperíodo crítico (horas de luz)	Fotoperíodo que foi exposta (horas de luz)	Comportamento
A	14-16	12	Alta percentagem de plantas improdutivas.
B	11-12	14	Formação prematura de bulbos, redução de tamanho e de potencial produtivo.
C	11-12	11-12	Formação normal de bulbos de acordo com capacidade de maturidade do cultivar.

Figura 1. Distribuição dos grupos de maturidade relativa de cultivares de soja no Brasil, em função da latitude. Fonte: Adaptado de Altieri et al (2009).  
Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/033

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## RADIÇÃO SOLAR EXTRATERRESTRE



Energia solar que incide no topo da atmosfera

$I_z = J_o \cos Z_h$

$Q_o = 37,6 (d/D)^2 [\pi/180 \text{ hn} \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \text{hn}]$

- Os valores de  $Q_o$ :
  - Métodos de estimativa da irradiância solar global;
  - Estimativa da evapotranspiração;
  - Métodos de estimativa da produtividade potencial de culturas agrícolas.

Energia solar que incide na superfície

$Q_g = Q_o * (a + b \eta/N)$

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/033

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## SALDO DE RADIAÇÃO



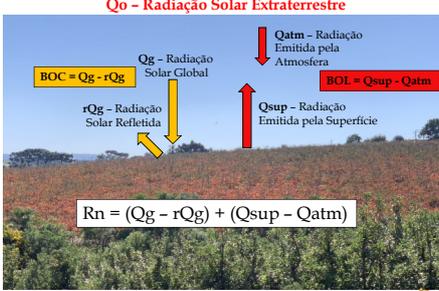
Saldo de Radiação -  $R_n$

Contabilização das entradas e saídas de radiação de um dado sistema

Balanco de Ondas Curtas:  $BOC = Q_g - rQ_g$

Balanco de Ondas Longas:  $BOL = Q_{sup} - Q_{atm}$

$R_n = BOC + BOL$



Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/033

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### SALDO DE RADIAÇÃO

ESALQ



Avocado – Queimadura solar  
São Gotardo/MG - 21/10/2020

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
F.F.P. 0639



---

---

---

---

---

---

---

---

### SALDO DE RADIAÇÃO

ESALQ



Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
F.F.P. 0639



---

---

---

---

---

---

---

---

### SALDO DE RADIAÇÃO

ESALQ



Class 0 (Shaded)    Class 1 (Exposed)    Class 2 (Mild)    Class 3 (Moderate)    Class 4 (Severe)

Fig. 1. Sun injury categories, Granny Smith apples.

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
F.F.P. 0639



---

---

---

---

---

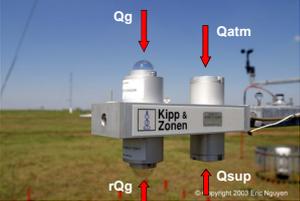
---

---

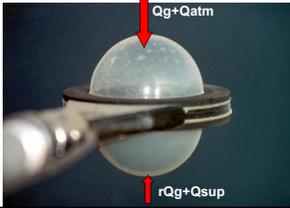
---

### MEDIDA SALDO DE RADIAÇÃO

ESALQ



O saldo de radiação é medido com equipamentos denominados saldo-radiômetros. As fotos apresentadas mostram diferentes tipos de saldo-radiômetros utilizados em estações meteorológicas automáticas. Todos eles utilizam o mesmo princípio empregado nos piranômetros de termopar, porém medindo OC e OL.

Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/0639

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### MEDIDA SALDO DE RADIAÇÃO

ESALQ



Medida do Saldo de Radiação

Mudas de Abacate

Soja

Prof. Dr. Fábio Senzelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/0639

AGRO METEORO 23  
LEBR - CSOAR

---

---

---

---

---

---

---

---

---

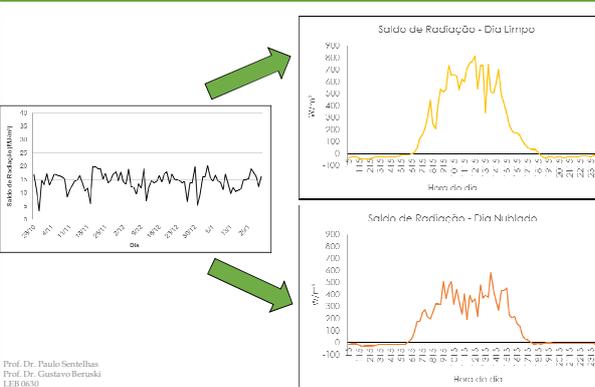
---

---

---

### VARIAÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO

ESALQ



Saldo de Radiação - Dia Limpo

Saldo de Radiação - Dia Nublado

Prof. Dr. Paulo Senzelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/0639

---

---

---

---

---

---

---

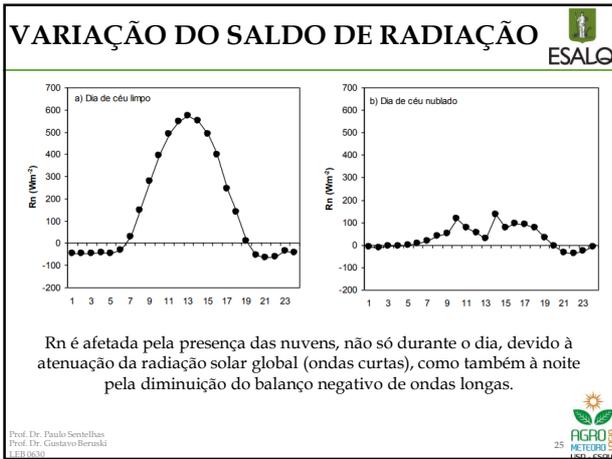
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

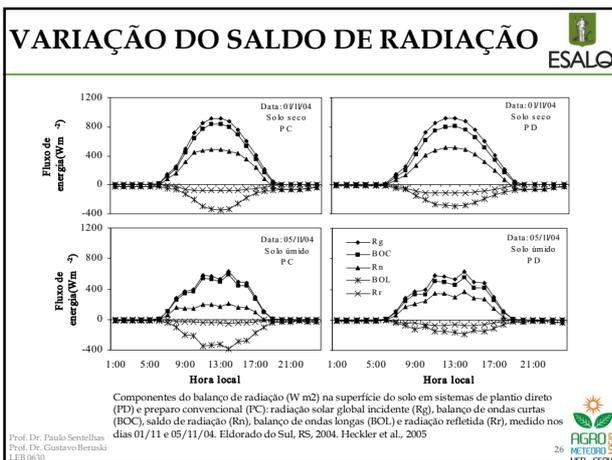
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

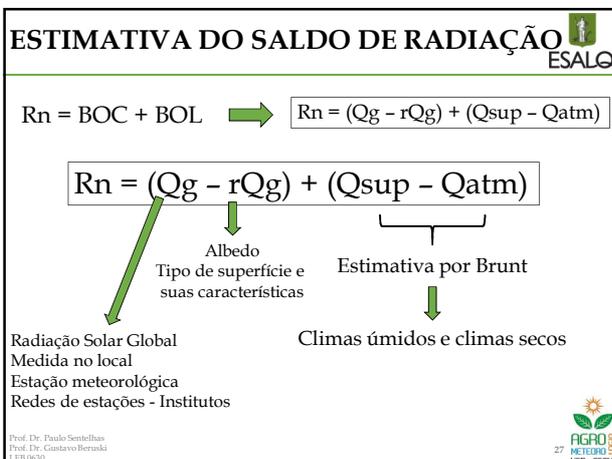
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

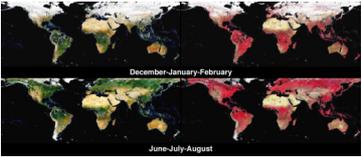


### ALBEDO - COEFICIENTE DE REFLEXÃO

Manejo do Saldo de Radiação

$$R_n = (\cancel{Q_g} - \check{rQ_g}) + (\check{Q}_{sup} - \cancel{Q}_{atm})$$

$rQ_g$  → r - Albedo → Coef. Reflexão da Superfície



Surface type	Typical value
Fresh asphalt	0.03 - 0.04
Open ocean	0.06
Conifer forest (summer)	0.08 - 0.15
Worn asphalt	0.12
Deciduous trees	0.15 - 0.18
Sand	0.15 - 0.45
Tundra	0.18 - 0.25
Agricultural crops	0.18 - 0.25
Bare soil	0.17
Green grass	0.20 - 0.25
Desert sand	0.30 - 0.40
Snow	0.40 - 0.90
Ocean ice	0.50 - 0.70
Fresh snow	0.80 - 0.90

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
11/03/20




---

---

---

---

---

---

---

---

---

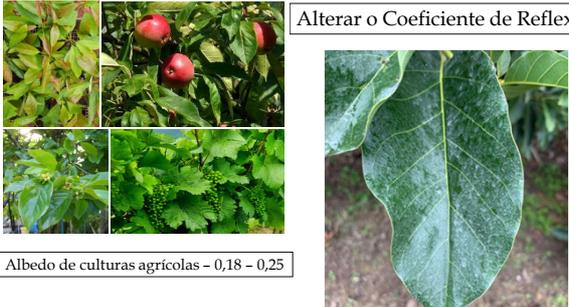
---

---

---

### ALBEDO - COEFICIENTE DE REFLEXÃO

Alterar o Coeficiente de Reflexão



Albedo de culturas agrícolas - 0,18 - 0,25

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
11/03/20




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### ALBEDO - COEFICIENTE DE REFLEXÃO

Uso de produtos que alterem a coloração das folhas



Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
11/03/20




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## APLICAÇÃO PRÁTICA



### PROTETOR SOLAR






Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
L.18.0620



---

---

---

---

---

---

---

---

## IMPLICAÇÃO NO BALANÇO DE RADIAÇÃO

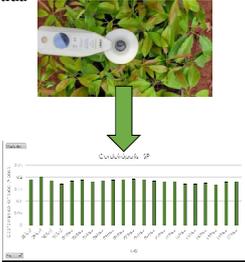


Implicações na modificação da quantidade de radiação solar refletida

**BALANÇO DE RADIAÇÃO → Saldo de Radiação**

Condição normal de reflexão  
Albedo - 0.19 → 19% de Rad. refletida









Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
L.18.0620



---

---

---

---

---

---

---

---

## IMPLICAÇÃO NO BALANÇO DE RADIAÇÃO



Implicações na modificação da quantidade de radiação solar refletida

**BALANÇO DE RADIAÇÃO → Saldo de Radiação**

Condição normal de reflexão  
Albedo - 0.19 → 19% de Rad. refletida



Sem proteção solar

Condição com Protetor Solar  
Momentos com Albedo de 0.27



Com proteção solar





Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
L.18.0620



---

---

---

---

---

---

---

---

### IMPACTO NO BALANÇO DE ENERGIA

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEB-0639

ESALQ

AGRO METEORO USP - 65042

---

---

---

---

---

---

---

---

### BALANÇO DE ENERGIA

Implicações na modificação da quantidade de radiação solar refletida

BALANÇO DE RADIAÇÃO → Saldo de Radiação

**BALANÇO DE ENERGIA**

Balanço de energia →  $R_n = H + G + LE + F$

O saldo de radiação é repartido em diferentes processos:

- Físicos: Aquecimento do ar (H) e do solo (G) e Evaporação (LE)
- Biofísico: Transpiração (LE)
- Bioquímico: **Fotossíntese (F)**

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEB-0639

ESALQ

AGRO METEORO USP - 65042

---

---

---

---

---

---

---

---

### BALANÇO DE ENERGIA

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEB-0639

ESALQ

AGRO METEORO USP - 65042

---

---

---

---

---

---

---

---



### IMPLICAÇÕES DO BALANÇO DE ENERGIA

ESALQ

Balanço de energia

$$R_n = H + G + LE + F$$

↓  
Temperatura  
↓  
Transpiração

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/0630

AGRO METEORO USP - ESALQ

---

---

---

---

---

---

---

---

### IMPLICAÇÕES DO BALANÇO DE ENERGIA

ESALQ

Balanço de energia

$$R_n = H + G + LE + F$$

↓  
Temperatura  
↓  
Transpiração  
↓  
Fotossíntese

Aproveitamento energético na fotossíntese é menor que 3%

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/0630

AGRO METEORO USP - ESALQ

---

---

---

---

---

---

---

---

### IMPLICAÇÕES DO BALANÇO DE ENERGIA

ESALQ

$$R_n = H + G + LE + F$$

EFICIÊNCIA NO USO DA RADIAÇÃO

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/0630

AGRO METEORO USP - ESALQ

---

---

---

---

---

---

---

---

### IMPLICAÇÕES DO BALANÇO DE ENERGIA

ESALQ

**EFICIÊNCIA RADIAÇÃO**

ASSIMILAÇÃO DE CO<sub>2</sub>

Taxa de fotossíntese:  
- 3 g (CH<sub>2</sub>O) m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> → para cada 1.4 g MJ<sup>-1</sup>,

**REPRESENTATIVO PARA PLANTAS C3**

↑ **RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE**  
AUMENTO NA TEMPERATURA DO AR E FOLHA

Temperatura acima de 30°C no período reprodutivo:  
- Acelera o ciclo;  
- Eleva as chances de abortamento  
- Reduz produtividade

ASSIMILAÇÃO DE CO<sub>2</sub>  
CARBOIDRATOS - CH<sub>2</sub>O  
BIOMASSA | PRODUTIVIDADE

C3

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/0230

DelWit (1965) e Câmara  
AGRO METEORO USP - ESALQ

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### IMPLICAÇÕES DO BALANÇO DE ENERGIA

ESALQ

**Rn = H + G + LE + F**

**EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA**

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/0230

AGRO METEORO USP - ESALQ

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### IMPLICAÇÕES DO BALANÇO DE ENERGIA

ESALQ

**EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA**

↳ Razão entre o acúmulo de biomassa vegetal ao consumo de hídrico

↑ **EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA**

↓ **REDUZIDA EFIC. - 0,3**

Diagram illustrating water use efficiency (WUE) and transpiration (E<sub>tr</sub>) in C3 and C4 plants. The diagram shows photosynthesis, respiration, and transpiration processes, with WUE and E<sub>tr</sub> highlighted. The text indicates that C4 plants have a higher efficiency in water use compared to C3 plants, which have a reduced efficiency of approximately 0.3.

Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
LEBR/0230

Rahman et al., 2019

AGRO METEORO USP - ESALQ

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### IMPLICAÇÕES DO BALANÇO DE ENERGIA

ESALQ

Fazer com que ocorra a troca gasosa apenas quando o déficit de saturação entre a folha e o ambiente seja pequeno



Aumentar a abertura estomática  
Aumentar a absorção de CO<sub>2</sub>  
Diminuir a perda de água



Prof. Dr. Paulo Sentelhas  
Prof. Dr. Gustavo Beruski  
FAPESP

AGRO  
METEORO  
USP - ESALQ

---

---

---

---

---

---

---

---