



## **II Simpósio Paulista sobre Nutrição de Plantas Aplicada em Sistemas de Alta Produtividade**

# **MECANISMOS DE DEFESA DA PLANTA A ESTRESSES**

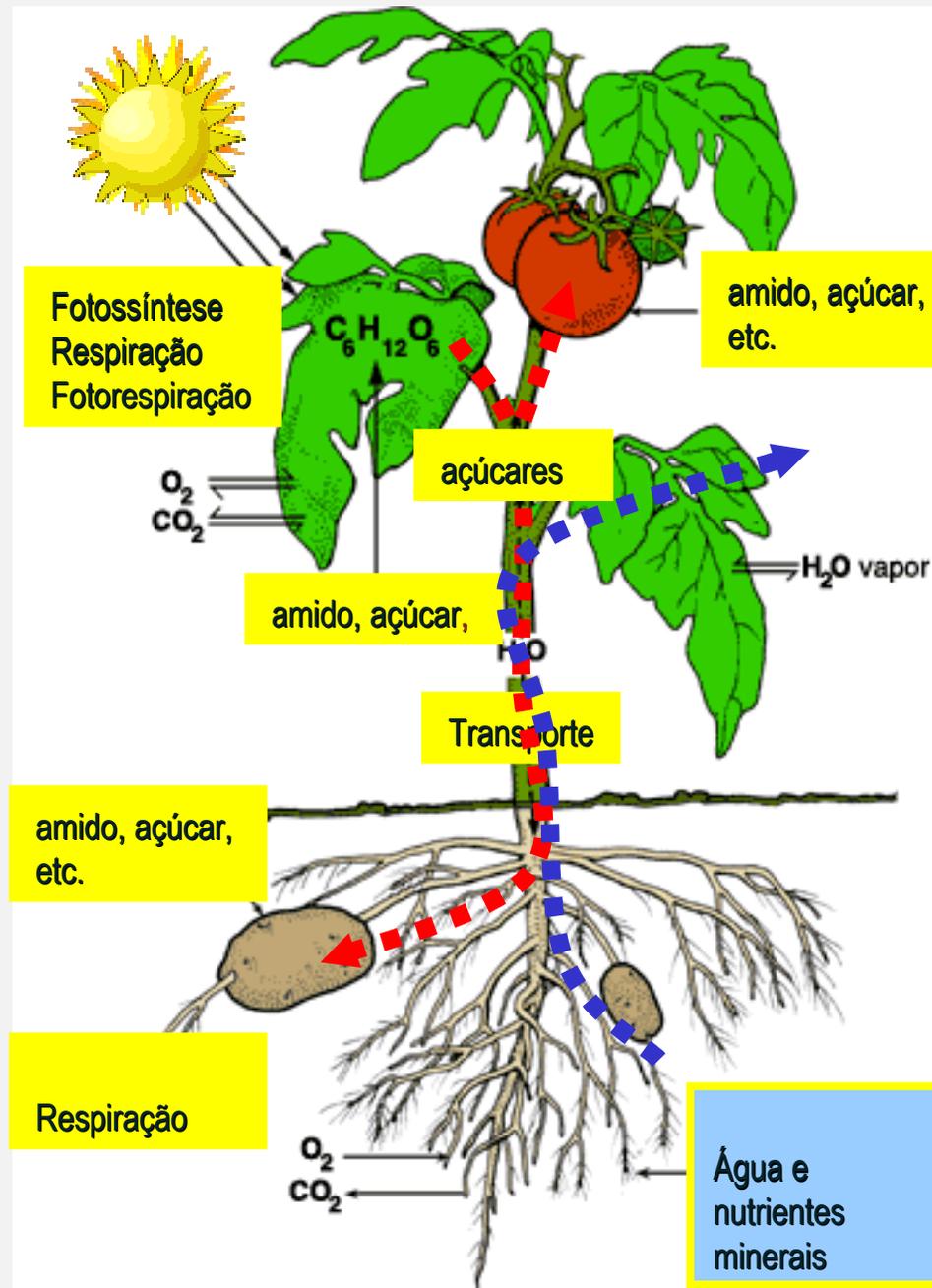
**Carlos Alberto Martinez**

# **Assuntos a tratar**

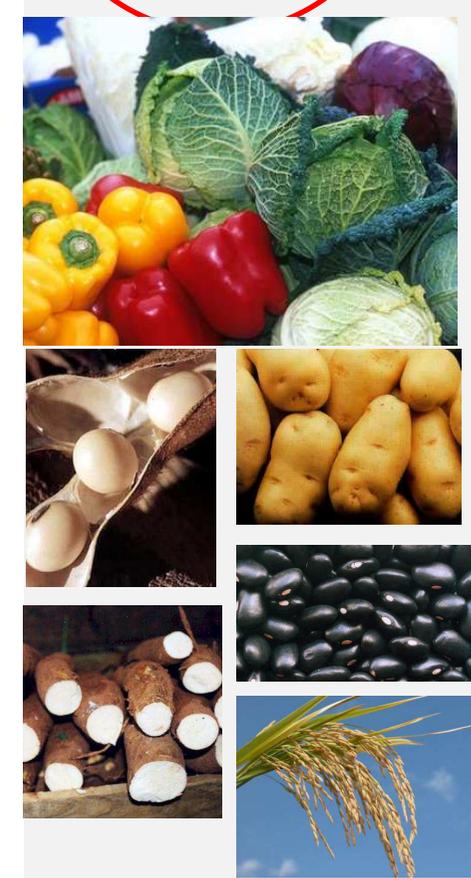
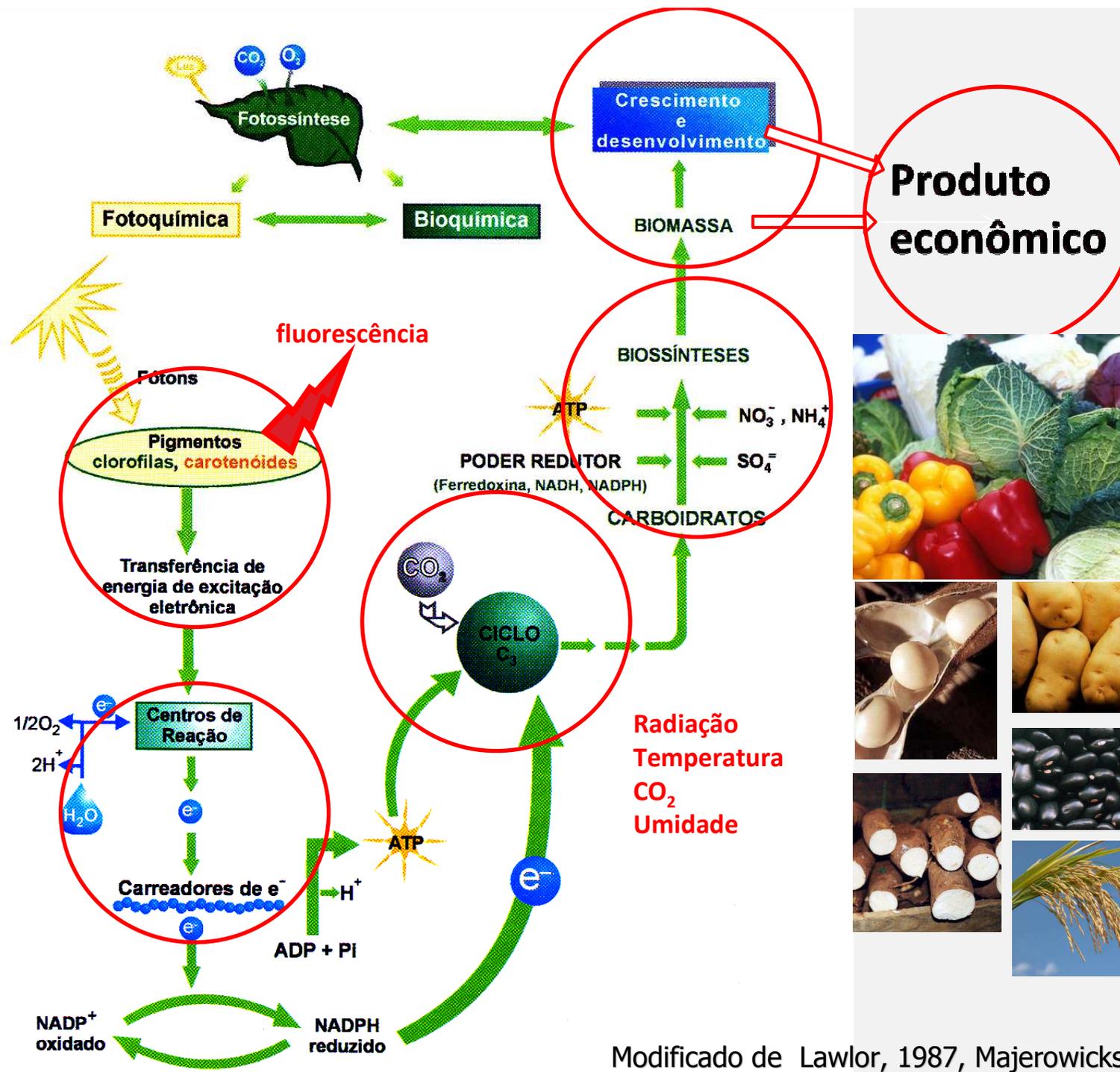
- **Alguns conceitos de fisiologia da produção**
- **Fatores Limitantes da produtividade - Estresse abiótico e seu impacto na produção de alimentos**
- **Mecanismos de defesa da planta a estresses**
- **Mudanças climáticas e produção de alimentos – Impacto sobre a agricultura Brasileira**

# **Alguns conceitos de fisiologia da produção**

# FISIOLOGIA DAS PLANTAS CULTIVADAS

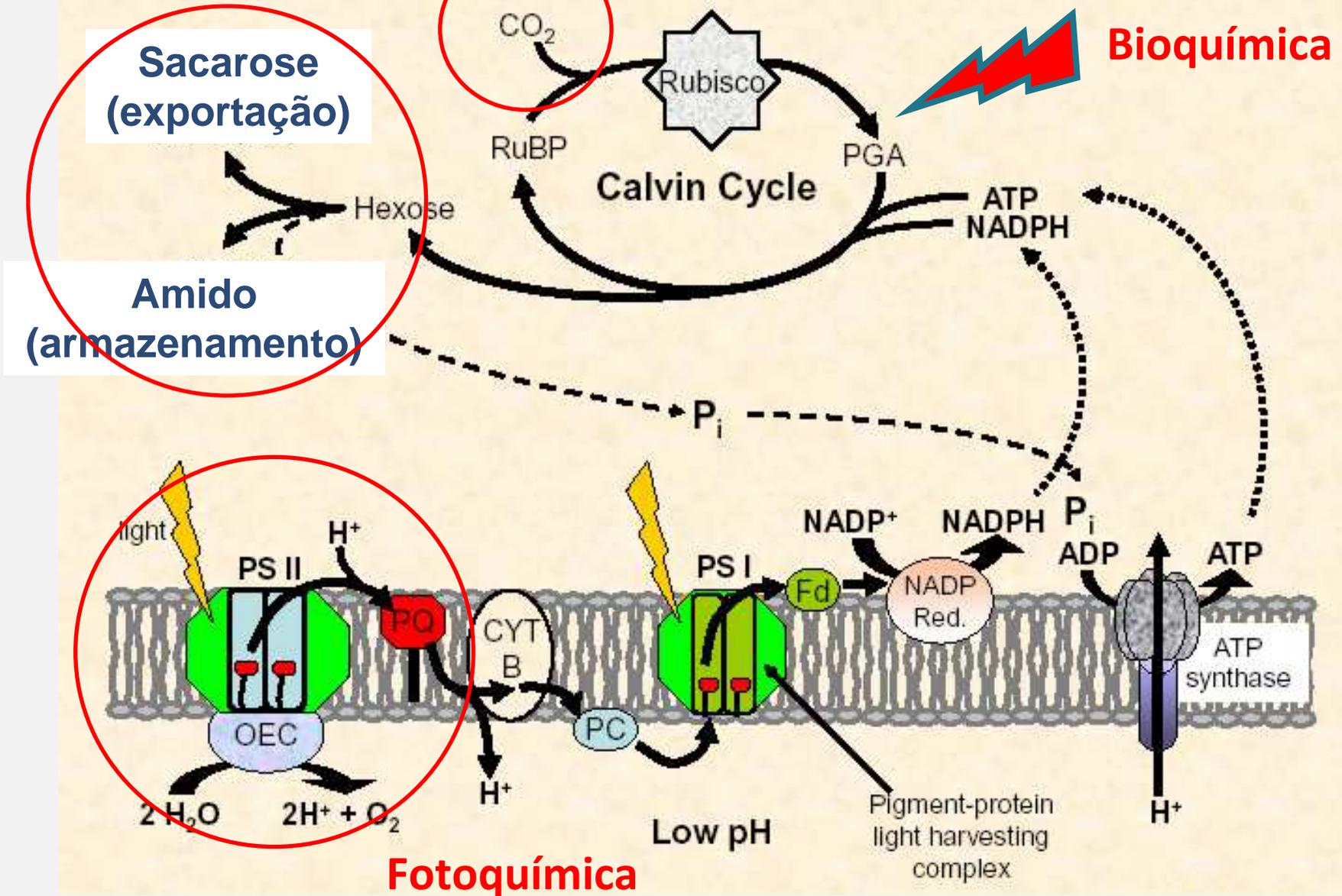


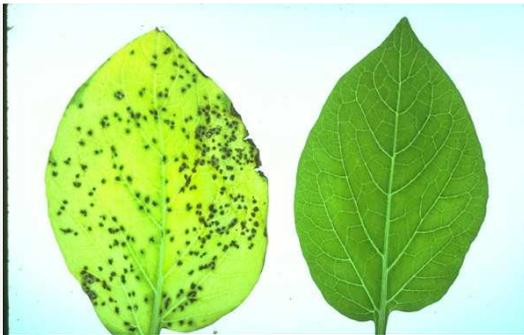
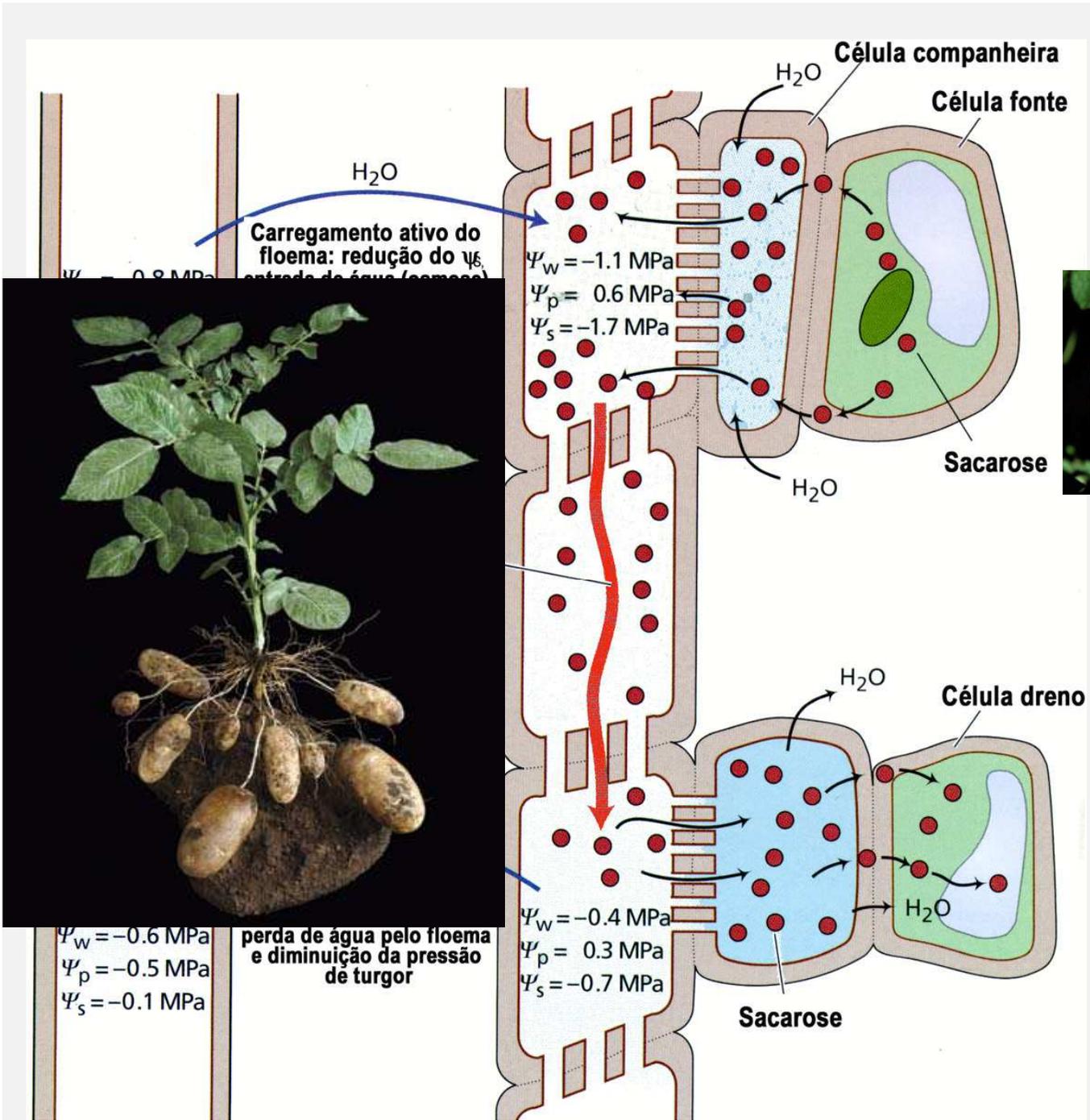




Modificado de Lawlor, 1987, Majerowicks, 2005

# ESQUEMA DA FOTOSSÍNTESE C3

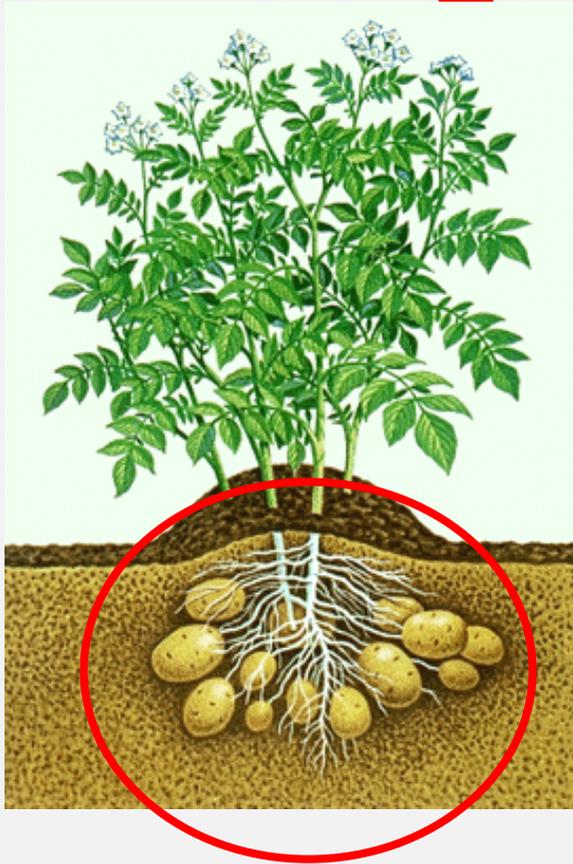




# Força do dreno e produtividade



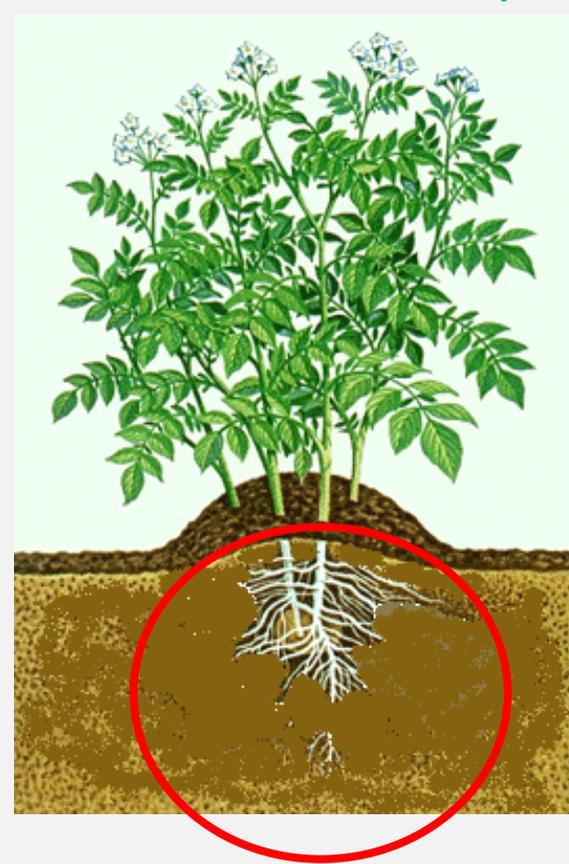
Fotossíntese



Maior força dreno



Fotossíntese



Menor força dreno

# **Fatores limitantes da produção de alimentos**

# Estresse abiótico em plantas

**Altas temperaturas**



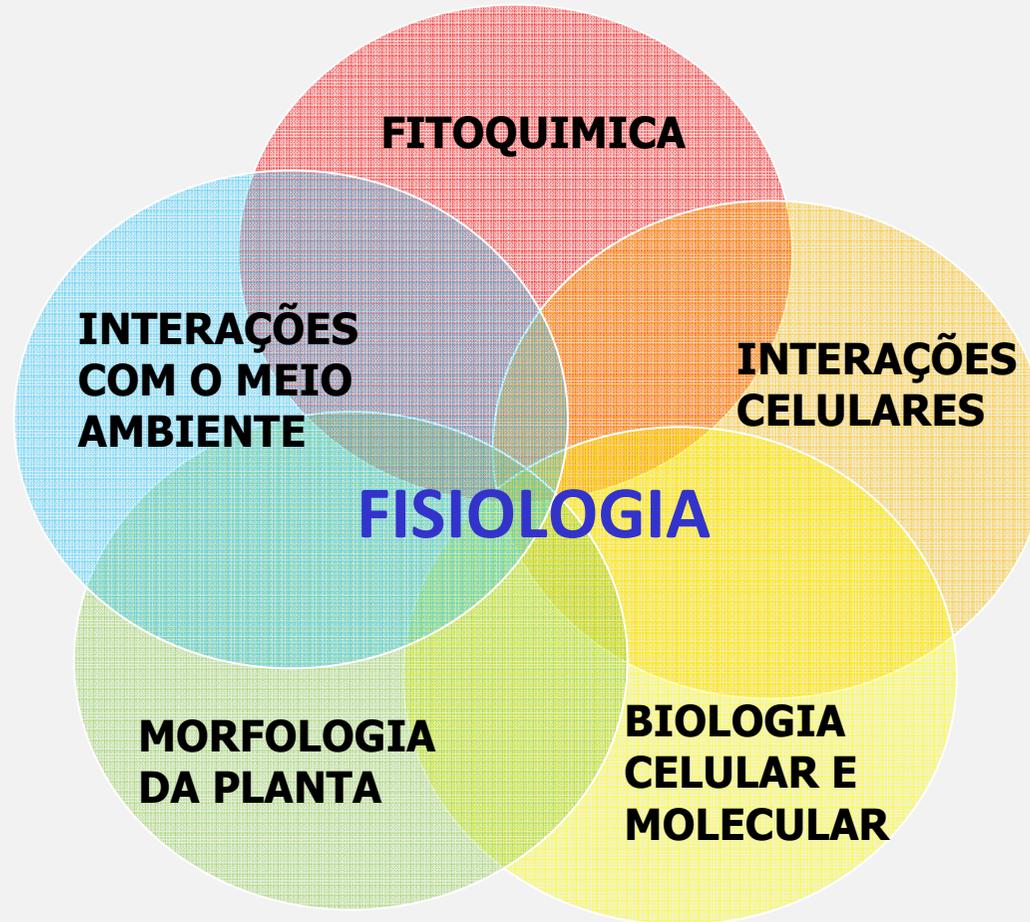
**baixas temperaturas**



**Seca**



**Deficiência nutricional**



**Alta irradiância**



**Toxicidade de elementos**



**Salinidade**



**Alagamento**



# **Estresse abiótico e seu impacto na produção de alimentos**

# Perdas de produtividade em decorrência do estresse biótico e abiótico

Boyer, 1982

Cultura	Rend. Recorde (Ton/ha)	Rend. Médio (Ton/ha)	Perdas (%)			
			Doenças	Pragas	Ervas daninhas	Estresse abiótico
Milho	19,3	4,6	0,7	0,7	0,5	12,7
Trigo	14,5	1,9	0,4	0,1	0,2	11,9
Soja	7,4	1,6	0,3	0,1	0,3	5,1
Sorgo	21,1	2,8	0,3	0,3	0,4	16,2
Aveia	10,6	1,7	0,4	0,1	0,3	7,9
Cevada	11,4	2,0	0,4	0,1	0,2	8,5
Batata	94,1	42,6	8,0	5,9	0,8	50,9
Média % RR		21,6 (Perdas 78,4%)	4,1	2,6	2,6	69,1

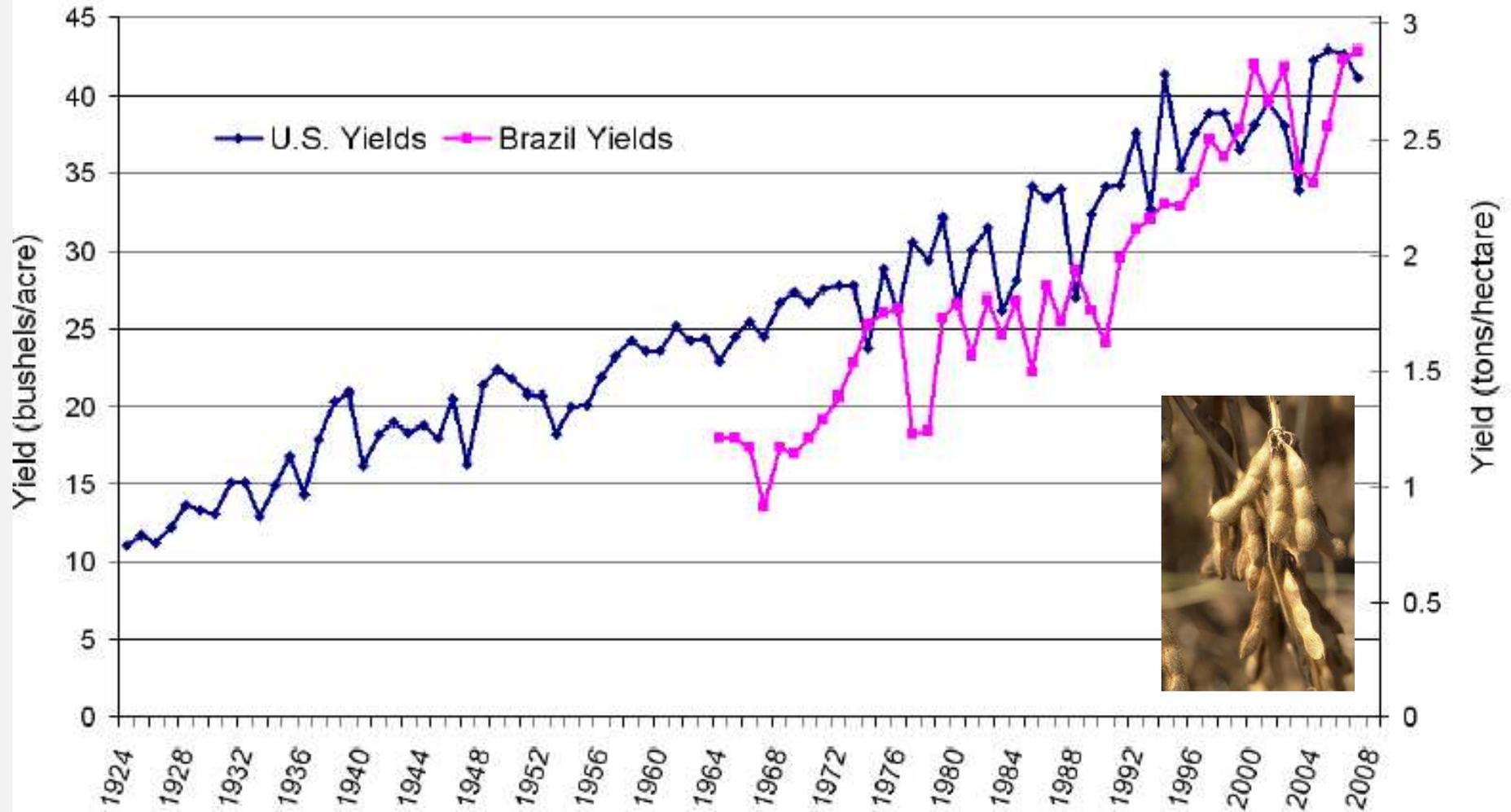
# Produtividade de culturas - Brasil

IBGE, 2009

Cultura	Rend. Recorde (Ton/ha)	Rend. Médio Ton/ha 2008	Perdas			
			Doenças	Pragas	Ervas daninhas	Estresse abiótico
Milho	19,3	4,1	?	?	?	?
Trigo	14,5	2,5	?	?	?	?
Soja	7,4	2,8	?	?	?	?
Sorgo	21,1	2,4	?	?	?	?
Aveia	10,6	2,0	?	?	?	?
Cevada	11,4	3,0	?	?	?	?
Batata	94,1	30,0	?	?	?	?
Média % do Rend. Recorde		26,2	<b>Total de perdas: 73,8 %</b>			

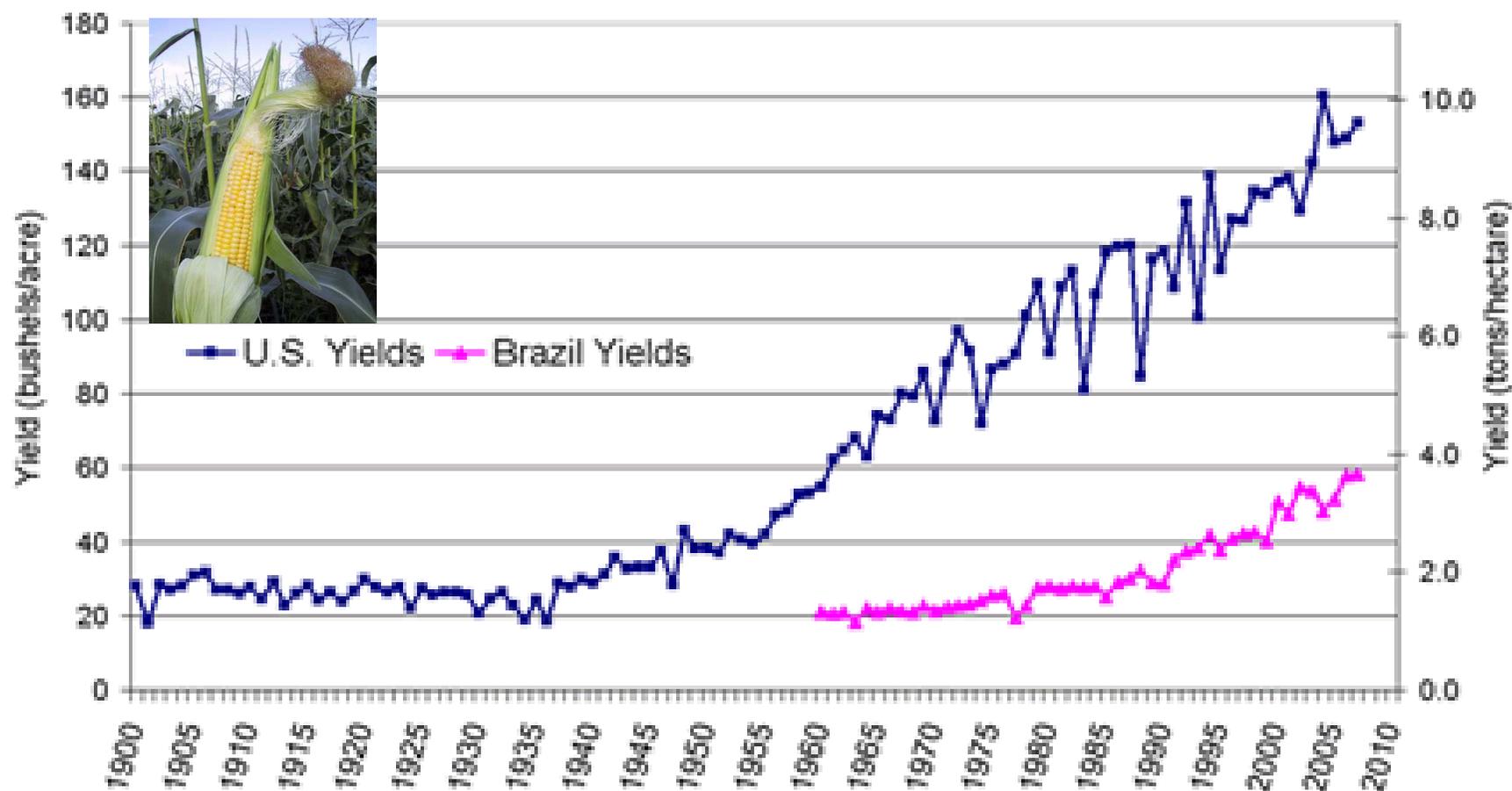
# HISTÓRICO DO RENDIMENTO DA SOJA NO BRAZIL E USA

Historical Soybean Yields for U.S. and Brazil



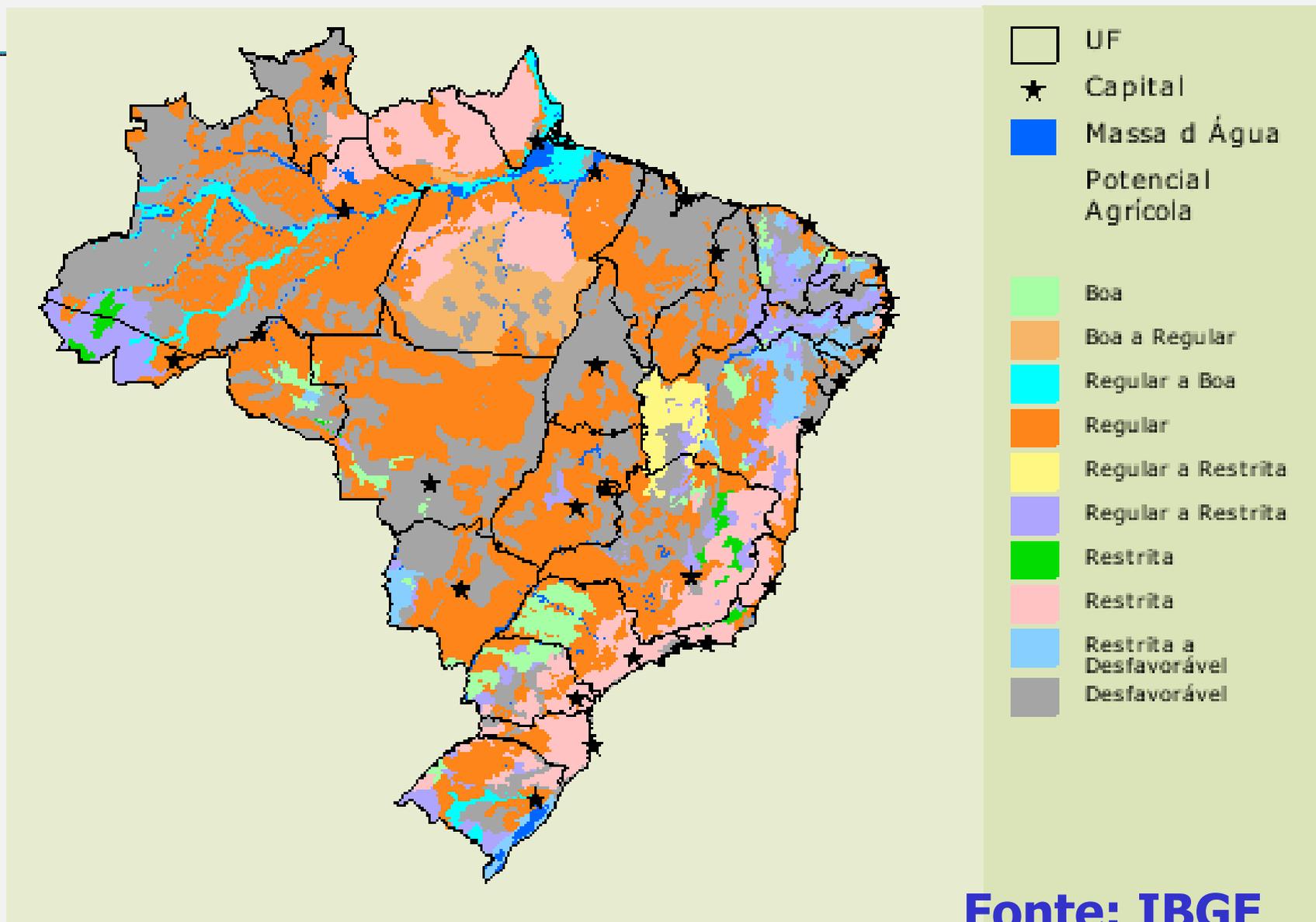
Data Source: USDA's NASS and PSD Online

## HISTÓRICO DO RENDIMENTO DO MILHO NO BRAZIL E USA



Data Source: USDA's NASS and PSD Online

# Potencial Agrícola do Brasil



Fonte: IBGE

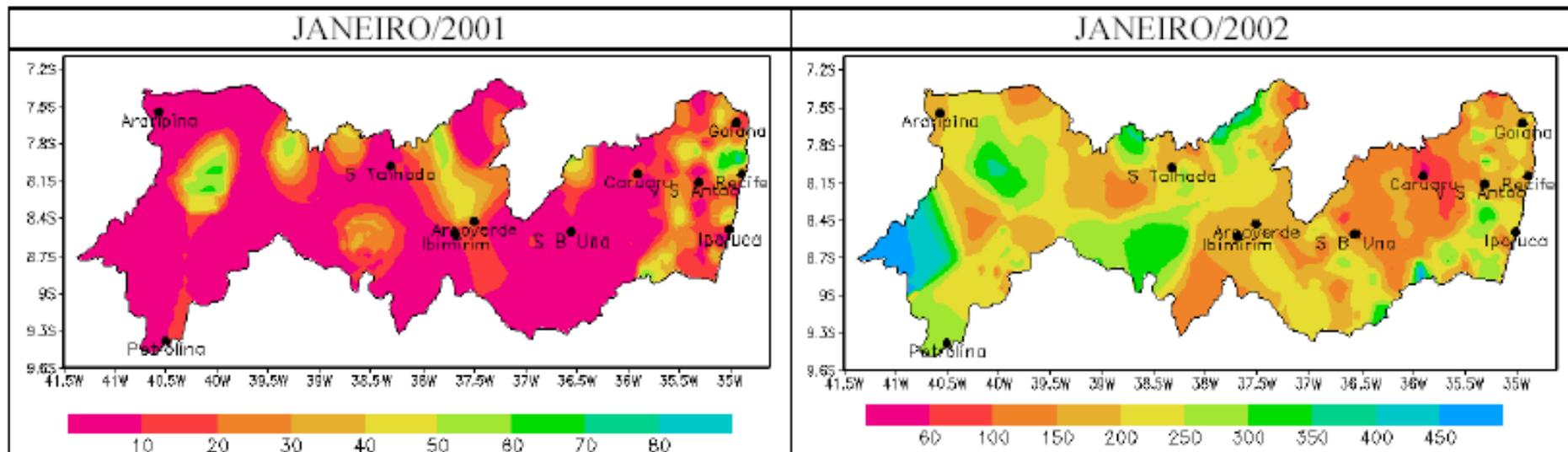
## Produção potencial e realizada e perdas até a pré-colheita, da safra de milho, por Unidade da Federação - 1996-2002

### PERNAMBUCO

ANO	Produção Potencial (Mt)	Produção Realizada (Mt)	% perdas	
1996	255,1	236,3	7,4	
1997	233,8	186,6	20,1	
1998	59,0	15,1	74,3	
1999	88,9	34,9	60,7	
2000	185,3	139,7	24,6	
2001	89,7	20,5	77,1	←
2002	126,3	86,6	31,4	←
MÉDIA			42,6	

Fonte IBGE

# PRECIPITAÇÃO PERNAMBUCO



**77,1%**

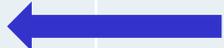
**31,4%**

**PERDAS DA PRODUÇÃO DE MILHO**

Fonte: Ferreira et al, 2002

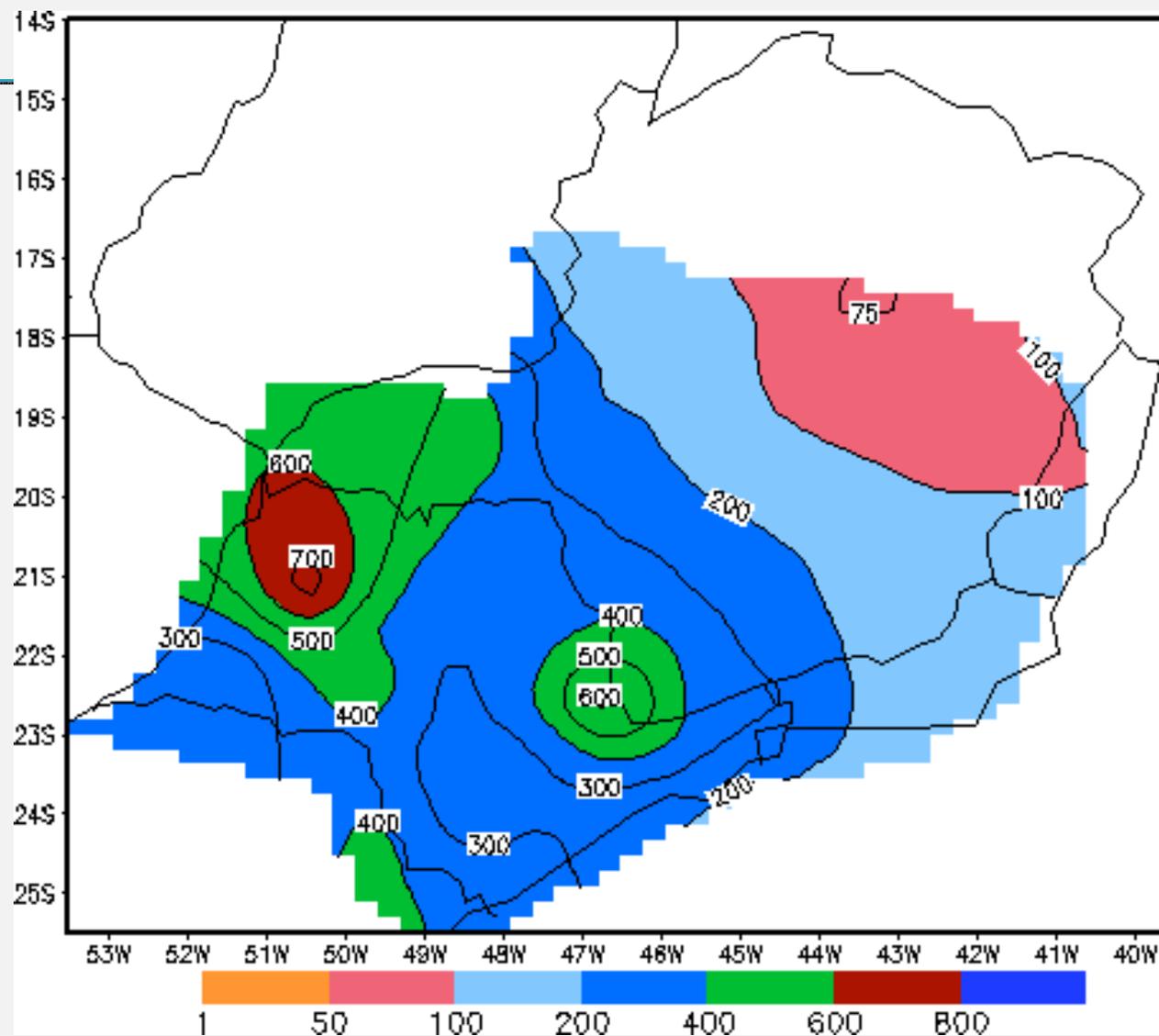
## Produção potencial e realizada e perdas até a pré-colheita, da safra de milho, por Unidade da Federação - 1996-2002

### MINAS GERAIS

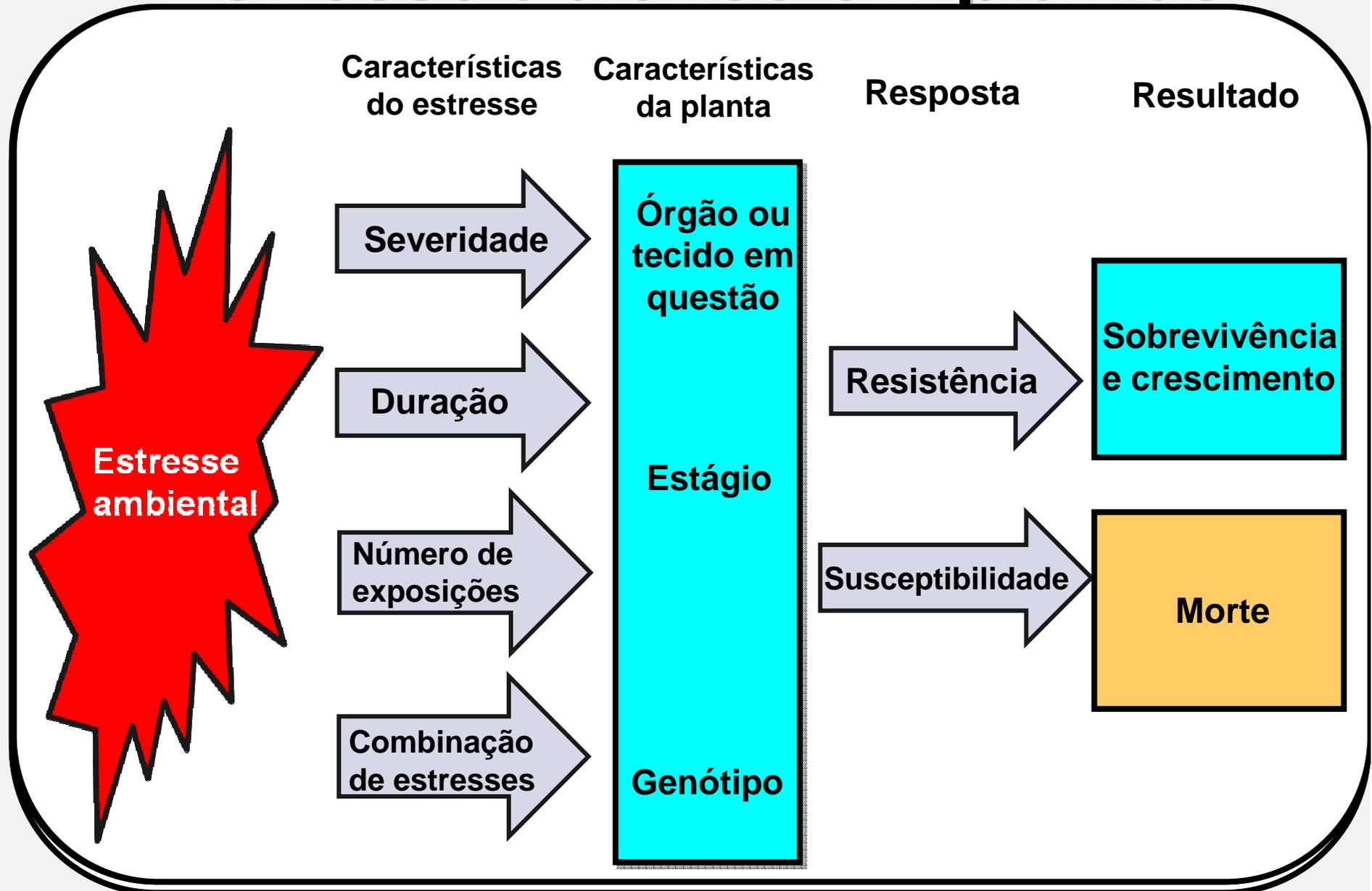
ANO	Produção Potencial (Mt)	Produção Realizada (Mt)	% perdas	
1996	3.531,4	3.329,0	<b>5,73</b>	
1997	3.957,2	3.915,1	<b>1,06</b>	
1998	3.753,3	3.708,7	<b>1,19</b>	
1999	3.946,2	3.911,7	<b>0,87</b>	
2000	4.232,3	4.232,2	<b>0,01</b>	
2001	4.182,4	4.017,7	<b>3,94</b>	
2002	4.832,9	4.808,1	<b>0,51</b>	
MÉDIA			<b>1,90</b>	

**Fonte IBGE**

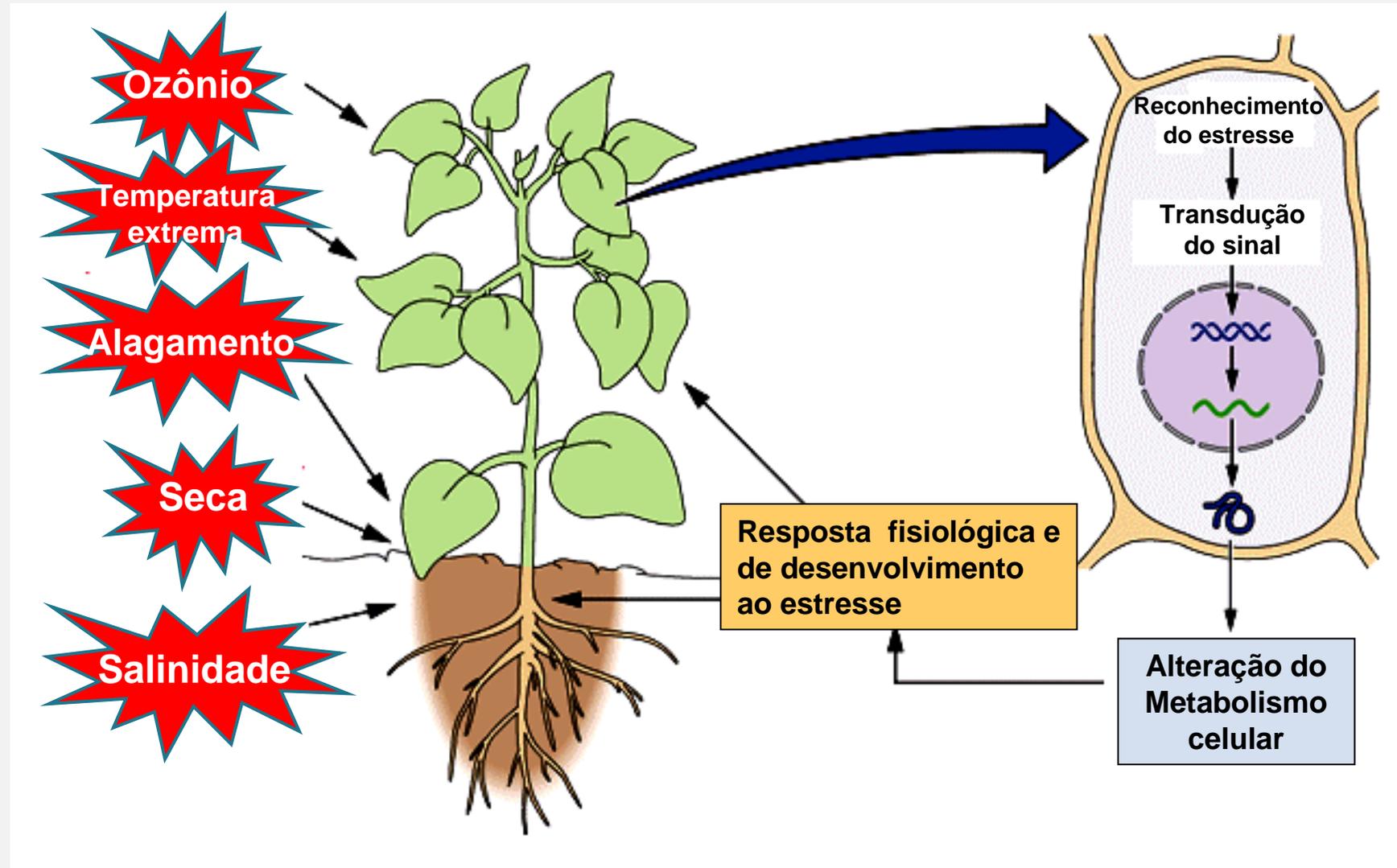
# PRECIPITAÇÃO SUDESTE JANEIRO DE 1999

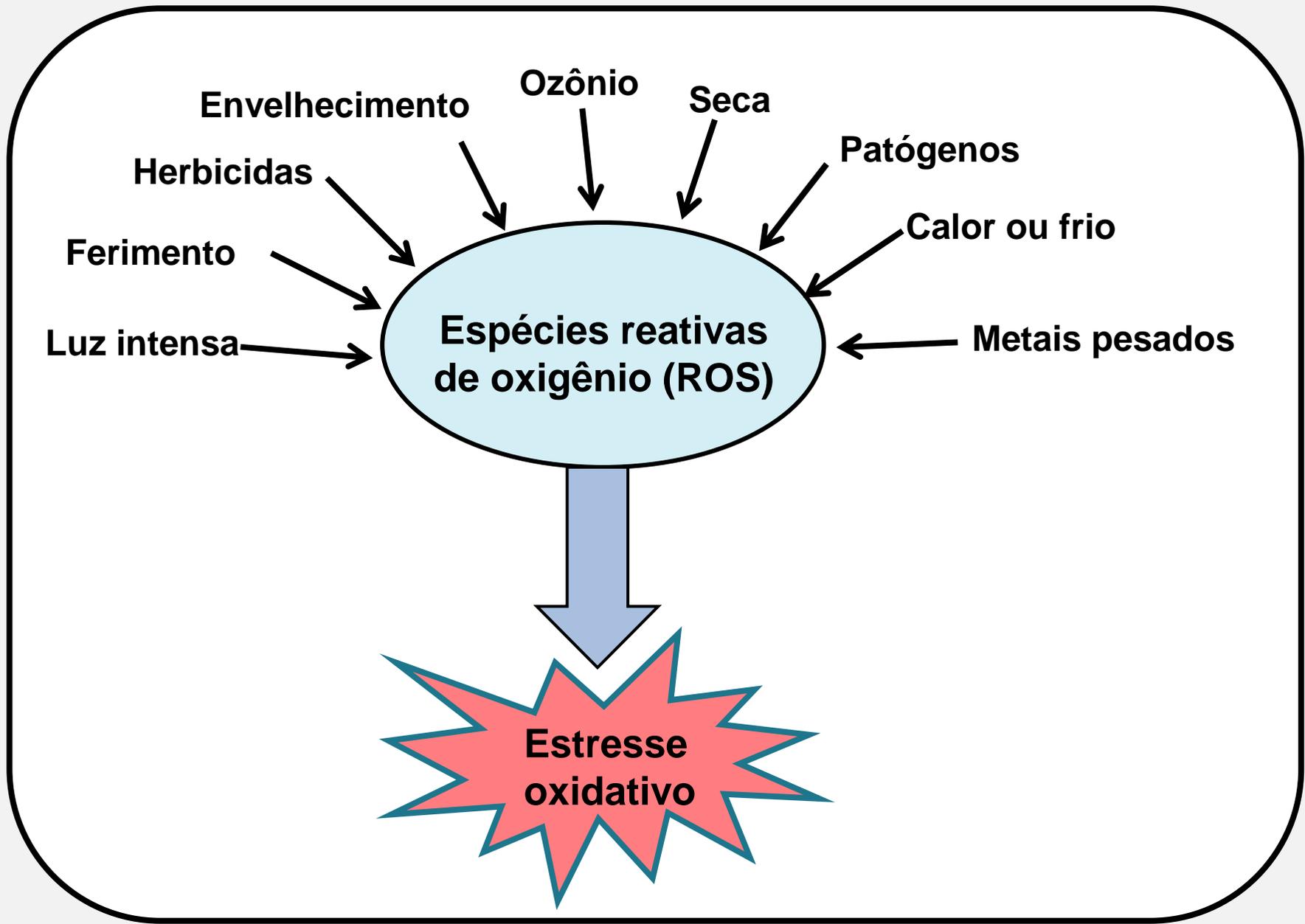


# Estresse abiótico em plantas



# Respostas das plantas ao estresse abiótico





**Envelhecimento**

**Ozônio**

**Seca**

**Herbicidas**

**Patógenos**

**Ferimento**

**Calor ou frio**

**Luz intensa**

**Espécies reativas de oxigênio (ROS)**

**Metais pesados**

**Estresse oxidativo**

# Estresse oxidativo

---

- **PRODUÇÃO DE ESPECIES REATIVAS DE OXIGÊNIO (ROS)**

**ROS**

```
graph TD; ROS[ROS] --> Lipids[Peroxidação de lipídios]; ROS --> Proteins[Oxidação de proteínas]; ROS --> DNA[Oxidação do DNA]; Lipids --> Membranes[Alterações em membranas e função de organelas]; Proteins --> Membranes; DNA --> Membranes; Membranes --> Damage[Dano Celular];
```

**Peroxidação de lipídios**

**Oxidação de proteínas**

**Oxidação do DNA**

**Alterações em membranas e função de organelas**

**Dano Celular**

**ROS** = Espécies reativas de oxigênio



*Moléculas ou fragmentos moleculares que possuem um elétron não pareado*

### Não-Radicais

Oxigênio singleto (  $O_2^1$  )

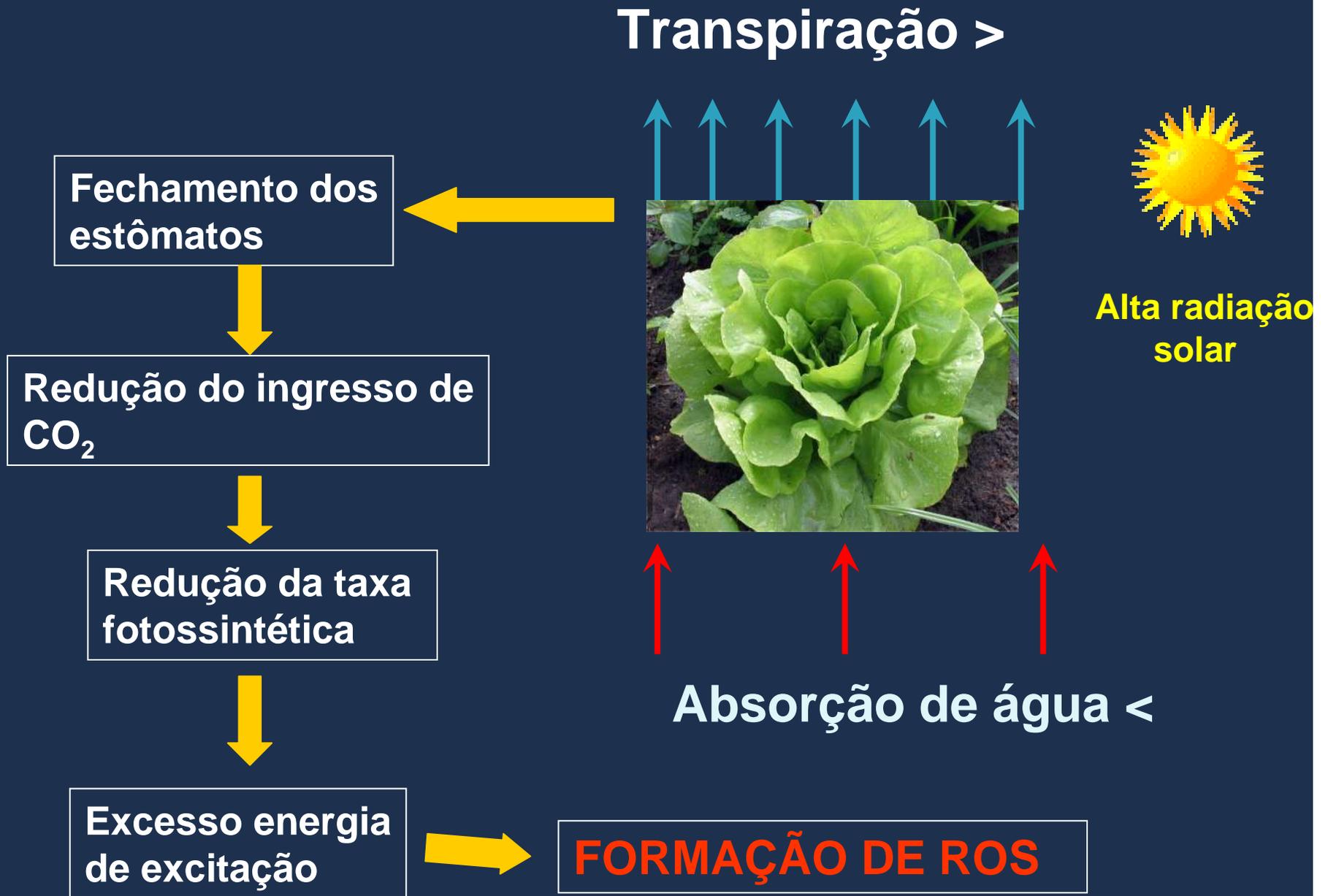
Peróxido de hidrogênio (  $H_2O_2$  )

### Radicais

Radical superóxido (  $O_2^{\bullet-}$  )

Radical hidroxila (  $OH^{\bullet}$  )

# Formação de ROS associado a estresse hídrico

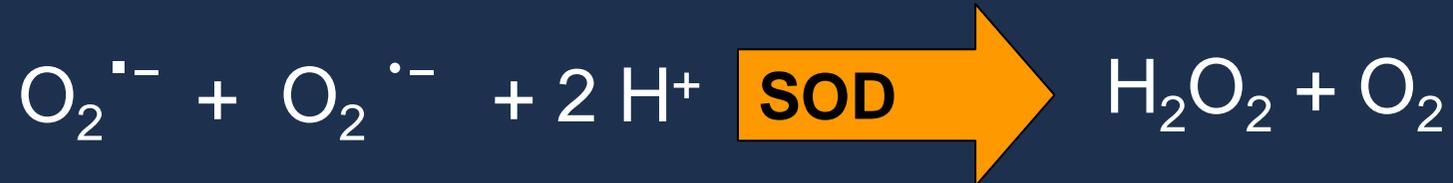


---

# **Mecanismos de Defesa contra Estresse oxidativo**

# Reações das enzimas antioxidantes

## Superóxido dismutase



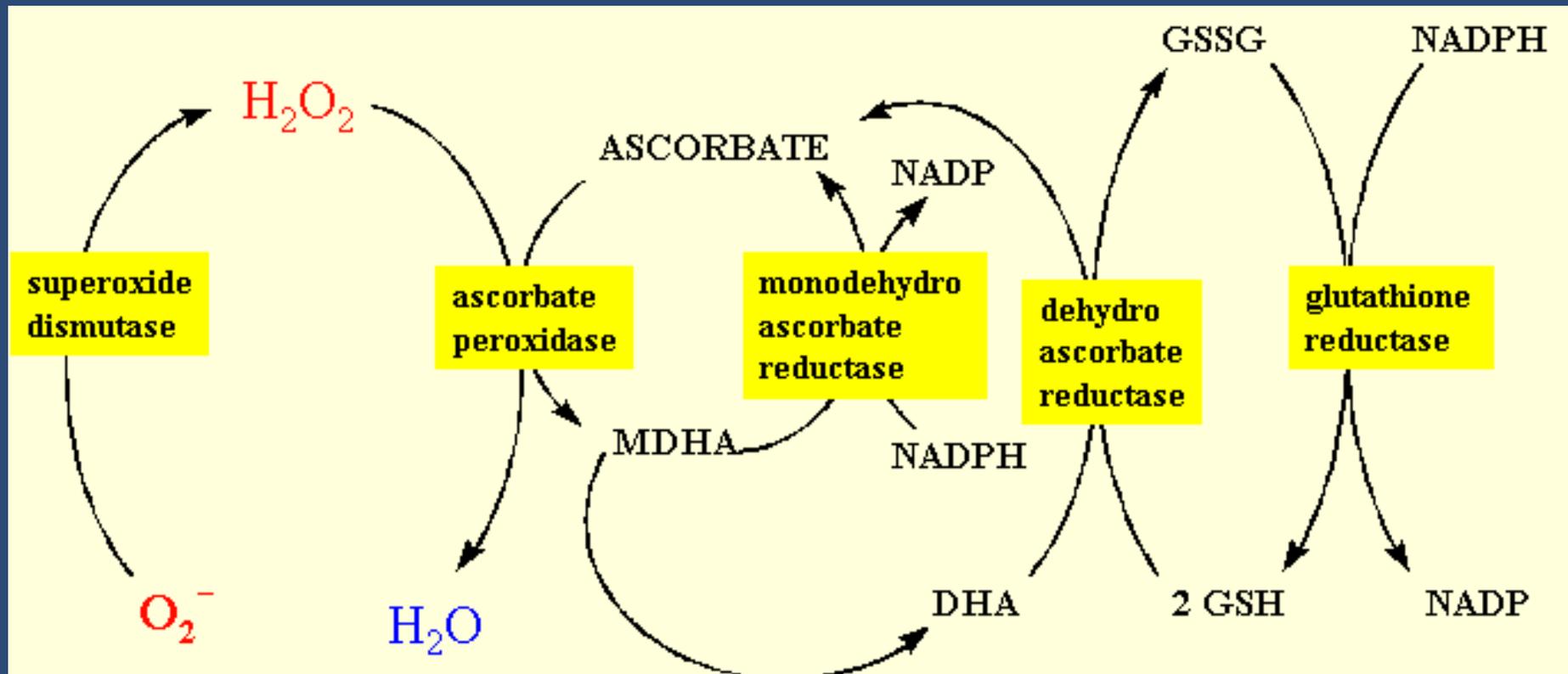
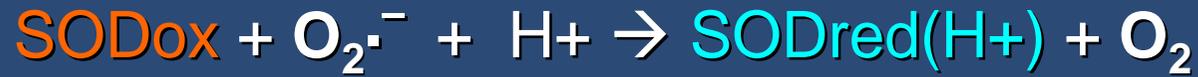
## Catalase



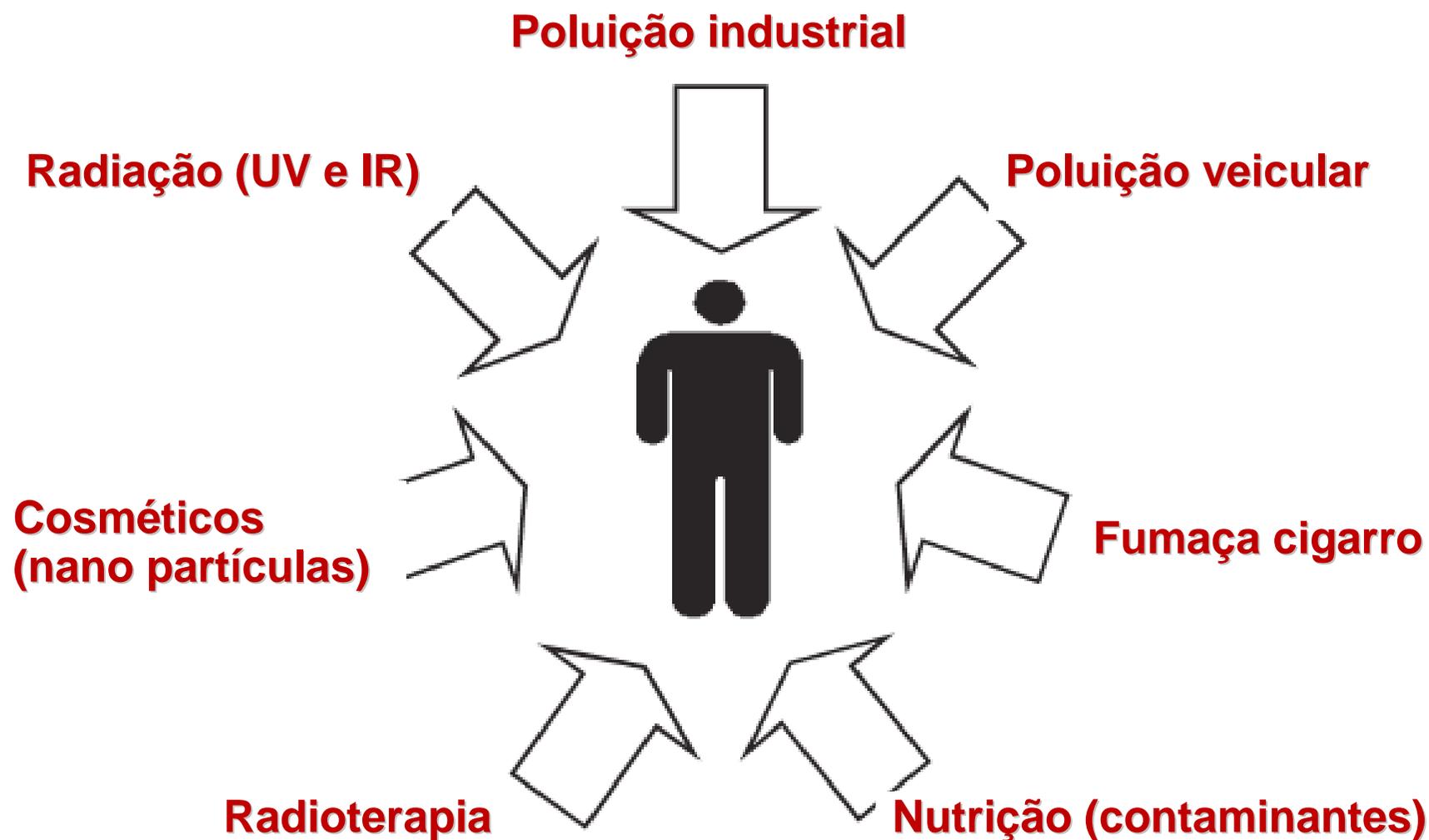
## Ascorbato peroxidase



## Ação das enzimas antioxidantes

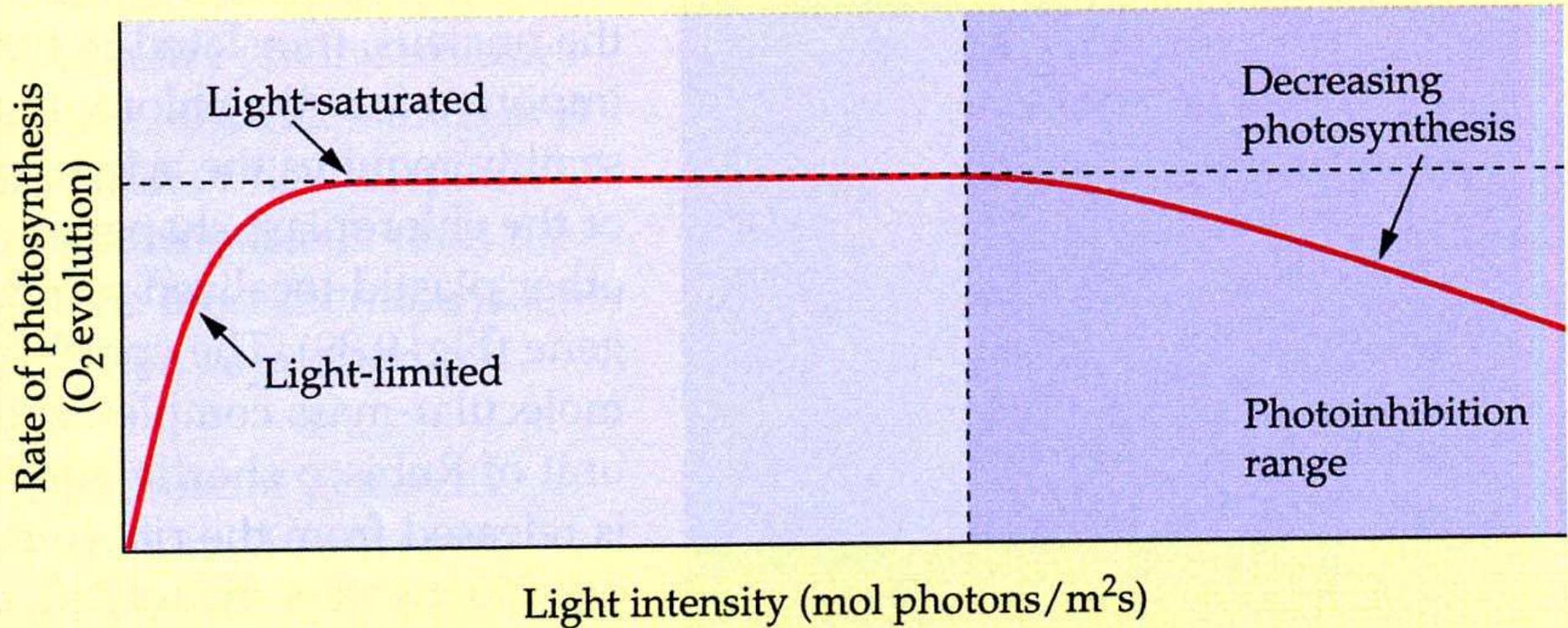


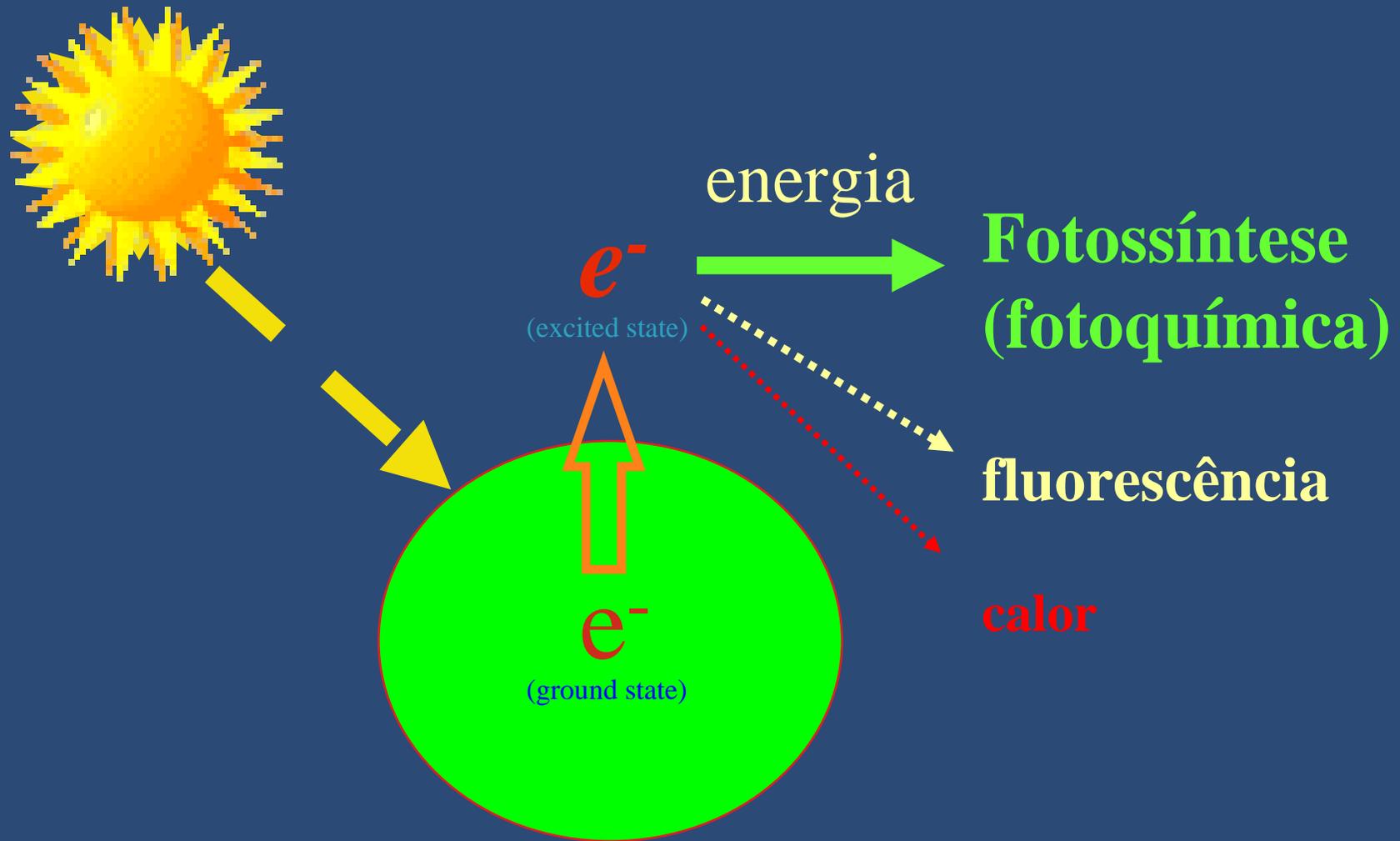
# Estresse oxidativo em humanos (NOXAS)



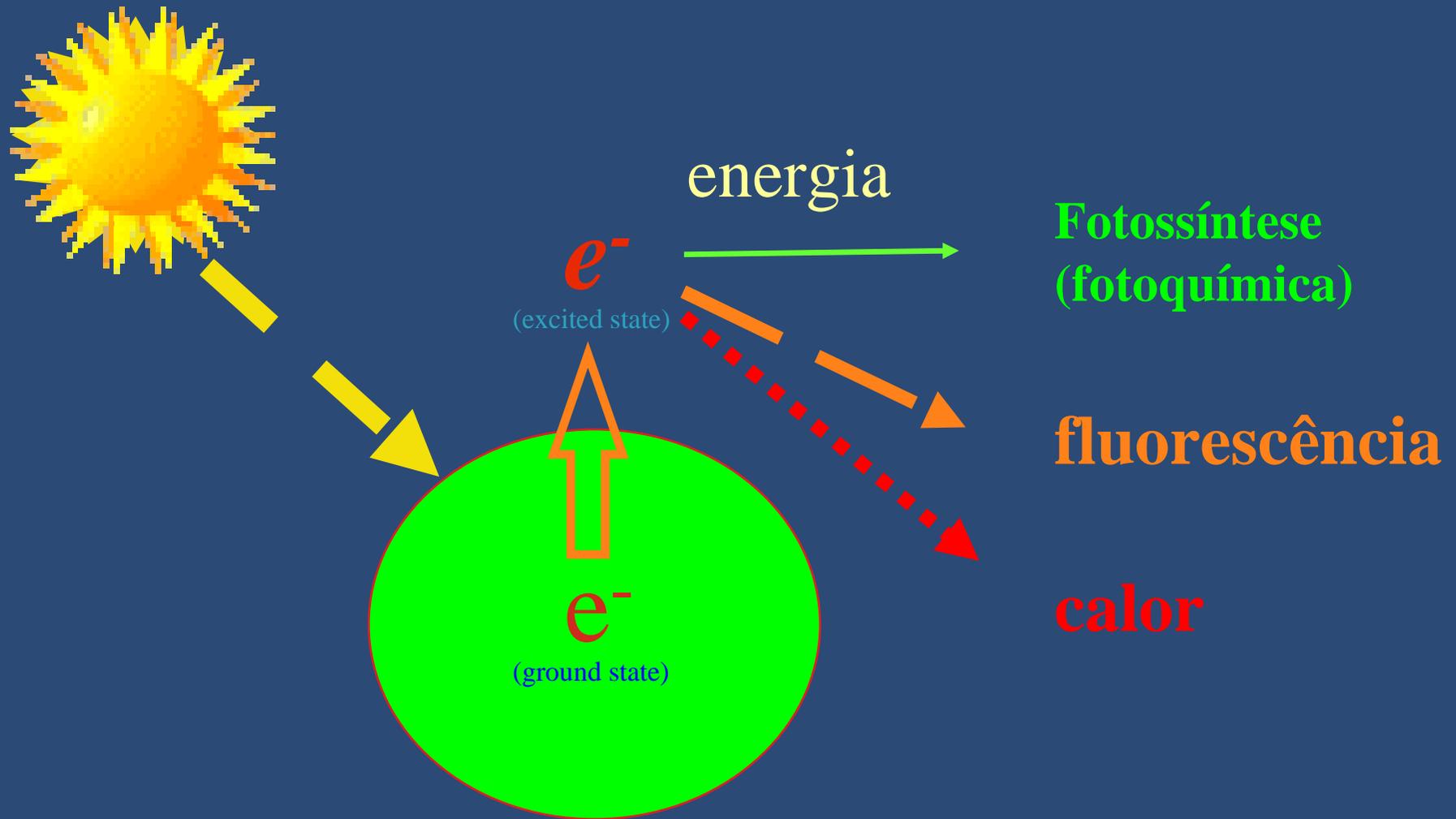
# **ESTRESSE LUMINOSO EM PLANTAS**

# FOTOINIBIÇÃO DA FOTOSÍNTESE

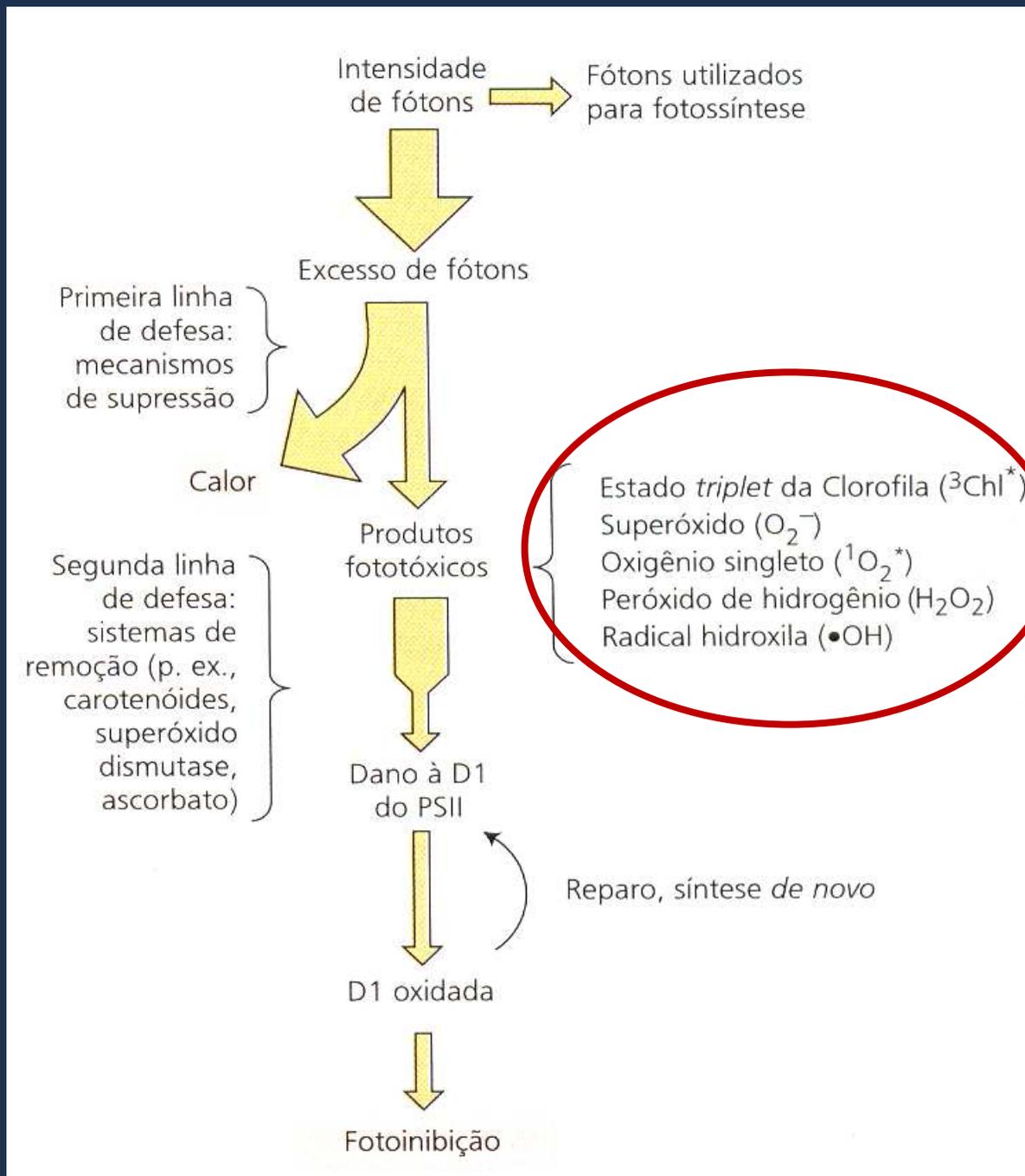




Dissipação da energia da clorofila  
Condições normais

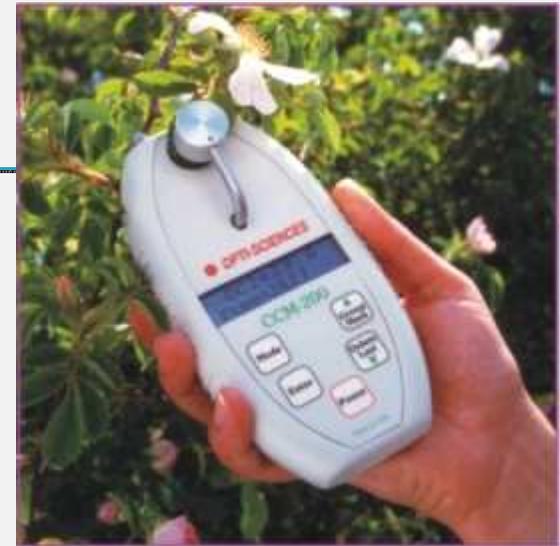


Dissipação da energia da clorofila  
sob situações de **estresse**

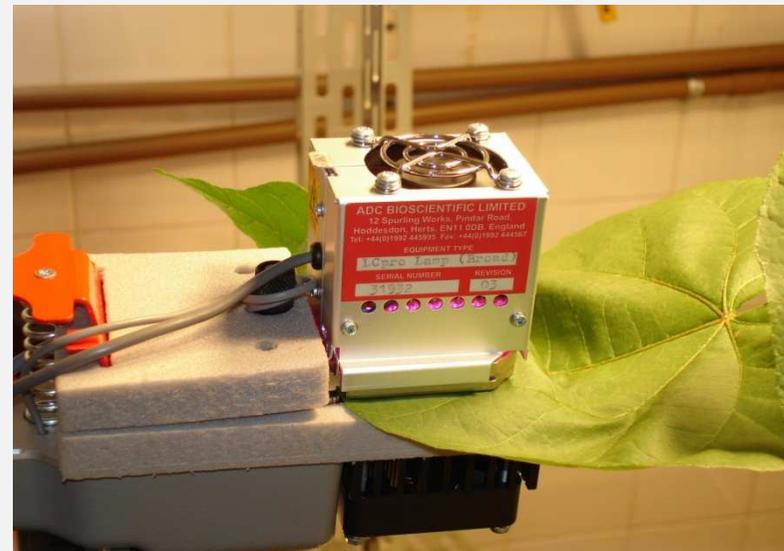
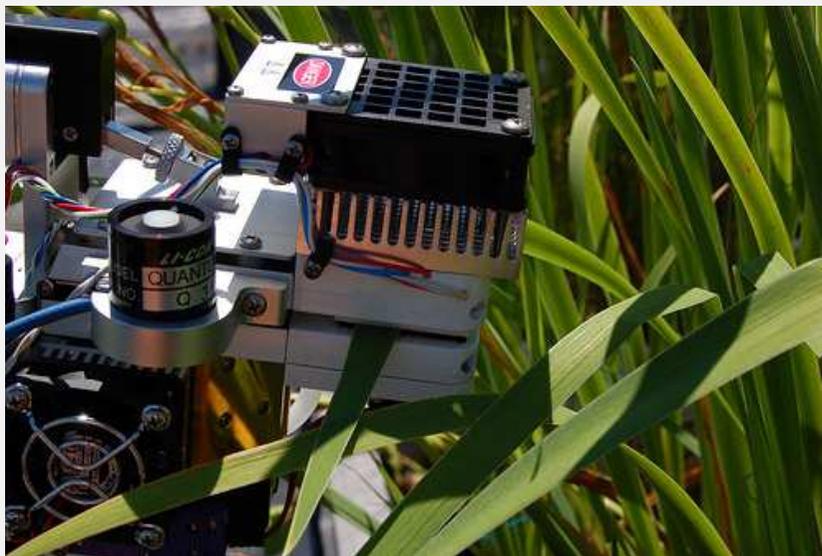


# **METODOLOGIAS PARA AVALIAR O ESTRESSE EM PLANTAS**

# FLUORÔMETROS



# COLORÍMETROS



# MEDIDORES DAS TROCAS GASOSAS

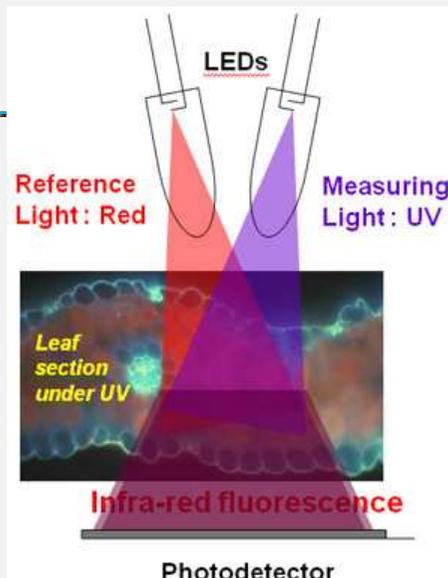
# Metodologias modernas para avaliar o estresse em plantas (análise de imagem)

- Fluorescência induzida por radiação UV
- Fluorescência de imagem
- Análise de imagem termal
- Análise da refletância espectral
- Determinação “in situ” de radicais livres

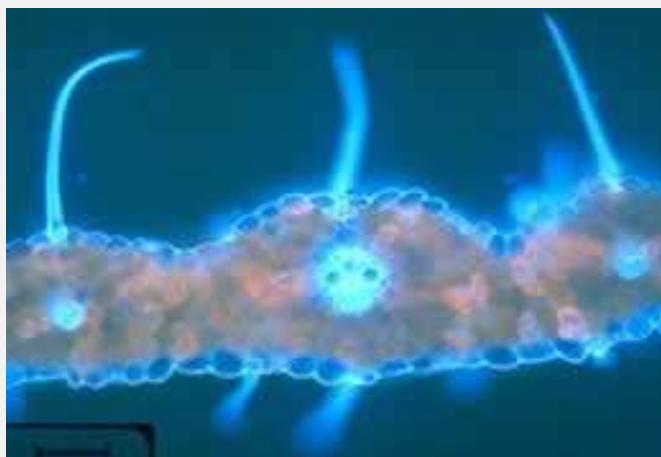
# Fluorescência induzida por radiação UV



**Dualex ®  
Force-A - França**



**Multiplex ®**



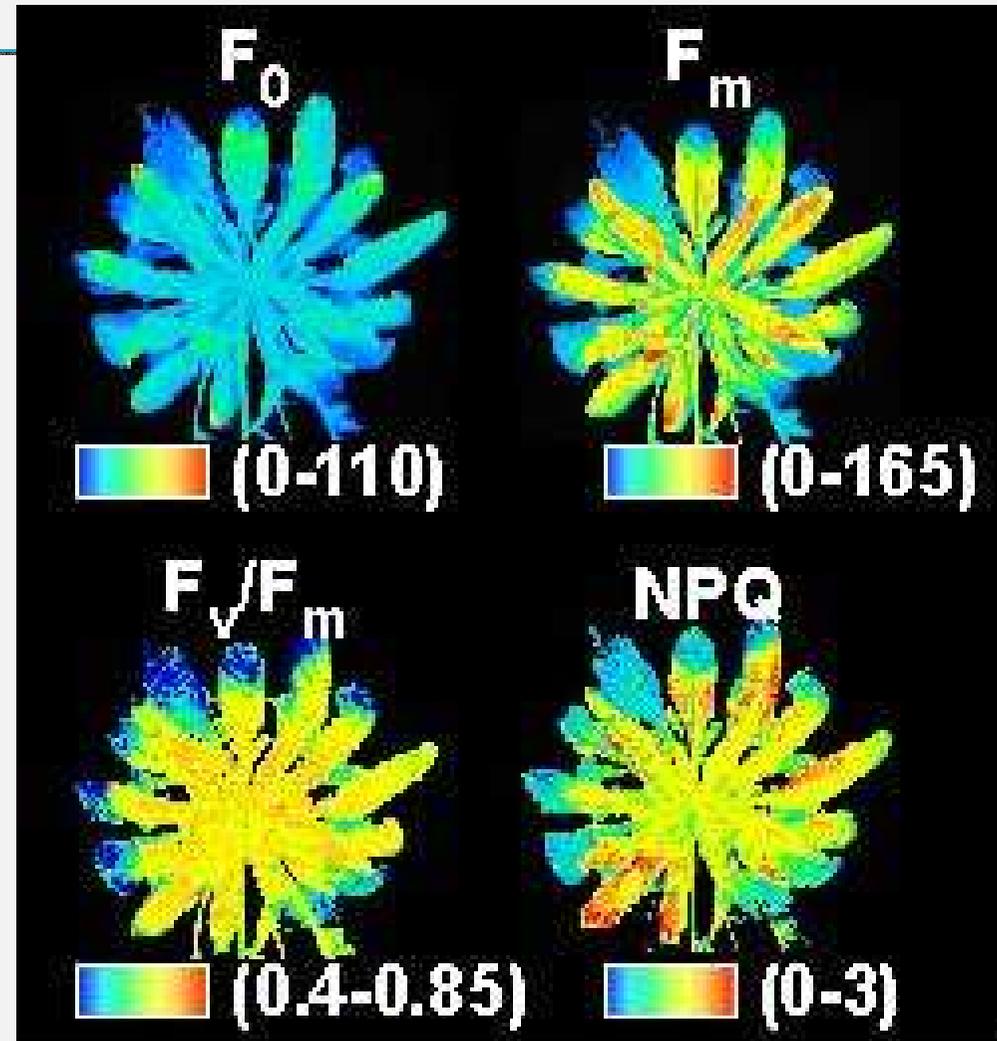
**Fluorescência azul-esverdeada (tricomas, parede celular, tecido vascular, epiderme) > Compostos polifenólicos**



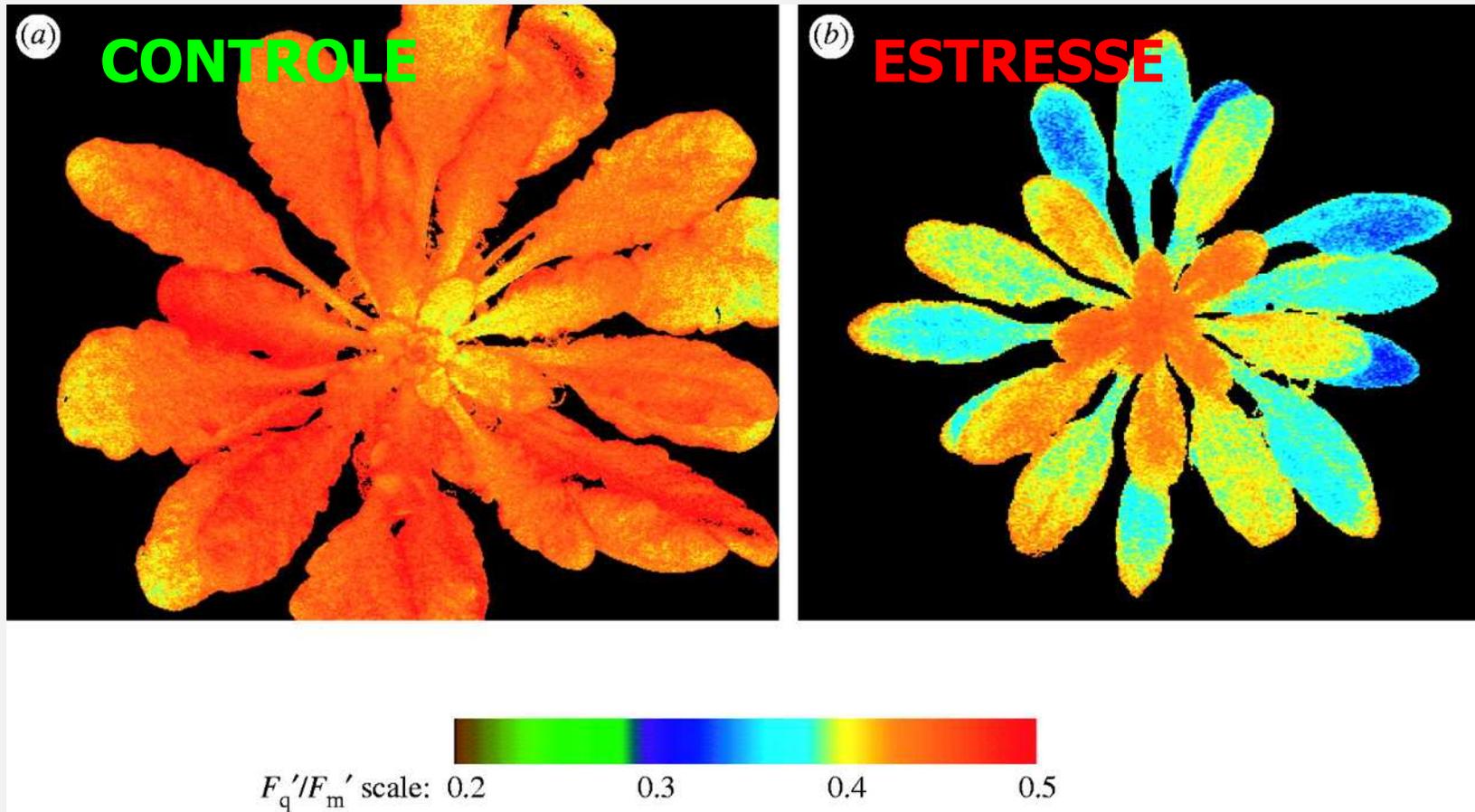
**Fluorescência vermelha (cloroplastos das células Mesofílicas) > clorofila a**

# Fluorescência de imagem

- IMAGING-PAM (WALTZ – GERMANY)



Images of the chlorophyll fluorescence parameter  $F_q'/F_m'$  for *Arabidopsis thaliana* wild-type plants grown (a) well watered (control) and (b) in a slowly developing drought (droughted)



Morison J. et.al. Phil. Trans. R. Soc. B 2008;363:639-658

# Termometria IR



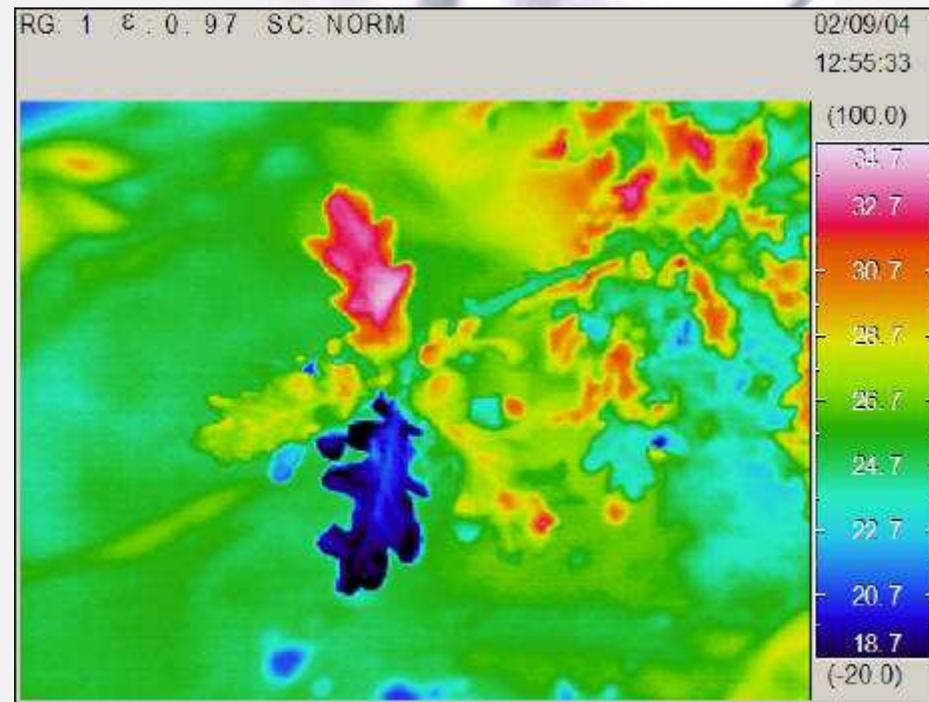
ThermaCAM P640

Folha não transpirando

Folha transpirando

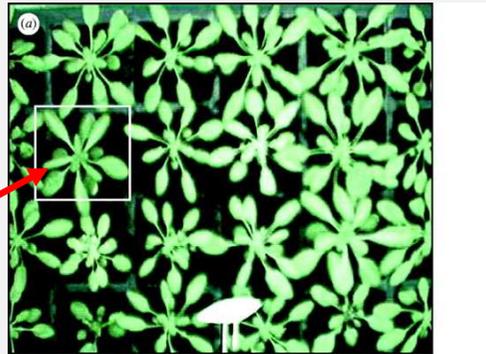


Hydroforce

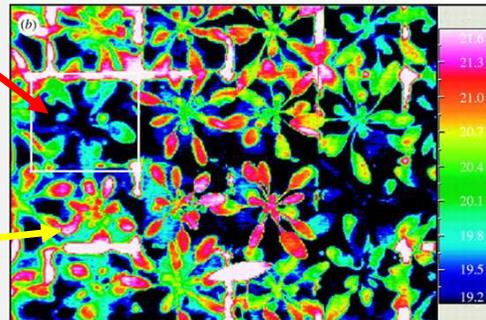


**Imagem de Termografia IR mostrando diferenças de temperatura entre mutantes OST e plantas selvagem de *Arabidopsis thaliana***

**Mutante**  
(Temperatura 19,9°C)



**Selvagem**  
(Temperatura 20,3 - 21°C)



**Índice de condutância calculada**

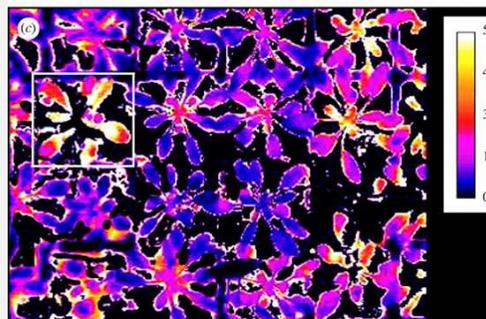
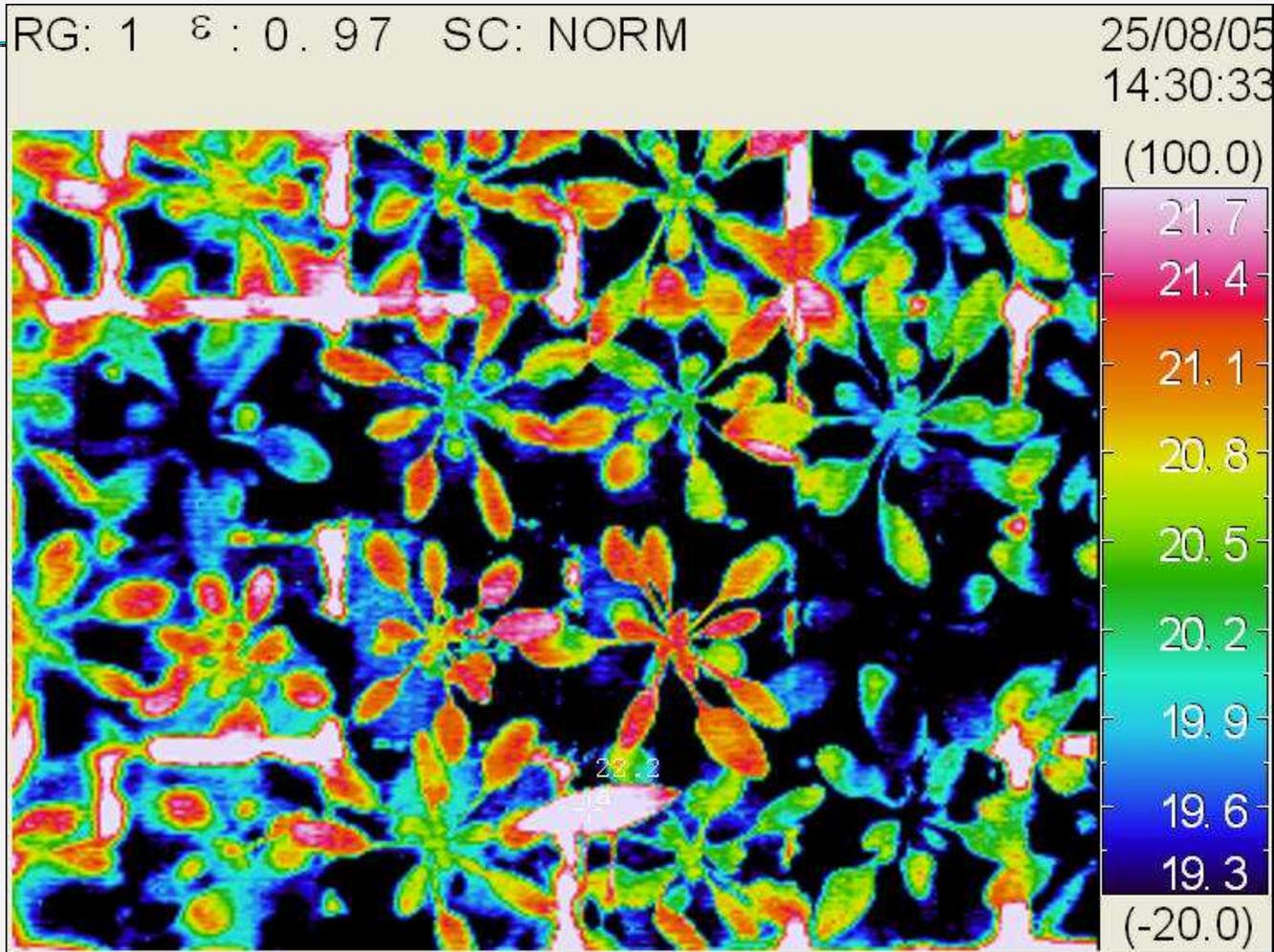


Imagem de Termografia IR mostrando diferenças de temperatura entre mutantes OST (maior temperatura) e plantas selvagem (menor temperatura) de *Arabidopsis thaliana* associados a diferenças na condutância do estômato



# Estresse Biótico: Hypersensitive response of tobacco to TMV

Após 2 dias de infecção

Após 8 dias de infecção

Imagem  
termal

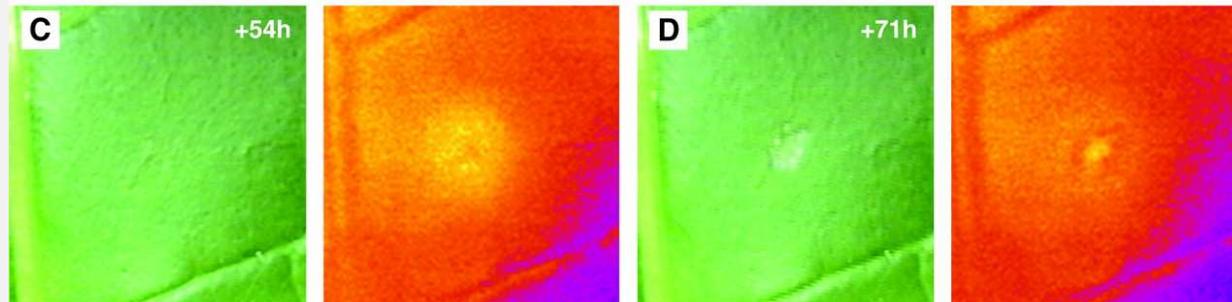
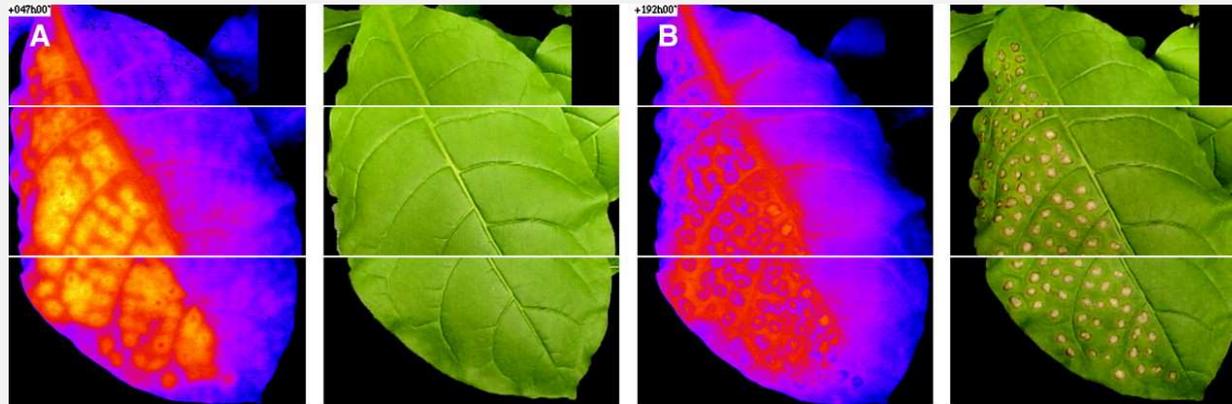
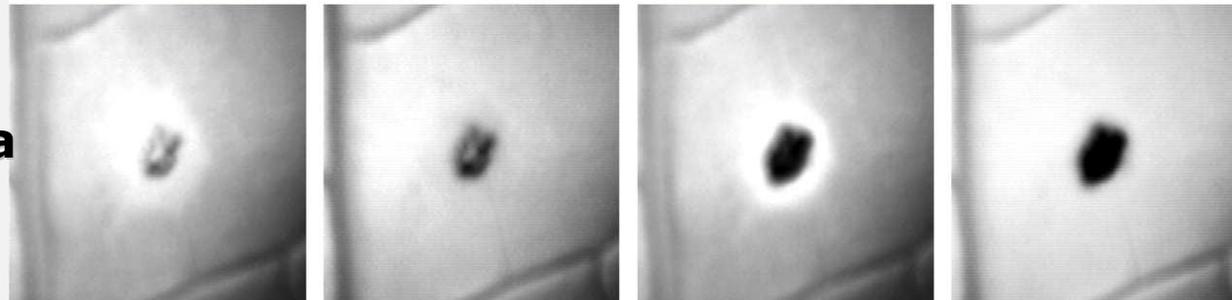


Imagem  
fluorescência



Chaerle, L. et al. *J. Exp. Bot.* 2007 58:773-784; doi:10.1093/jxb/erl257

## Soyface – University of Illinois

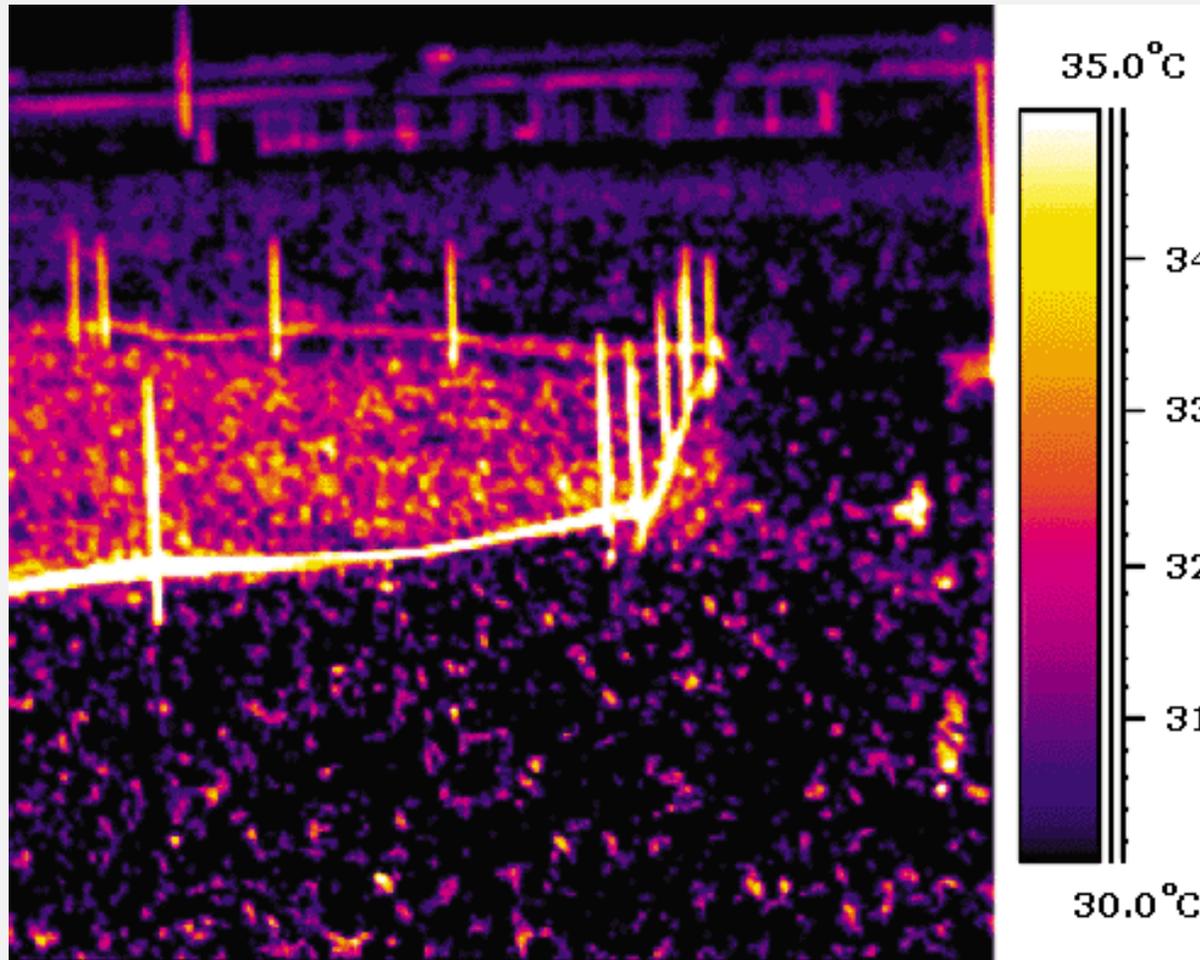
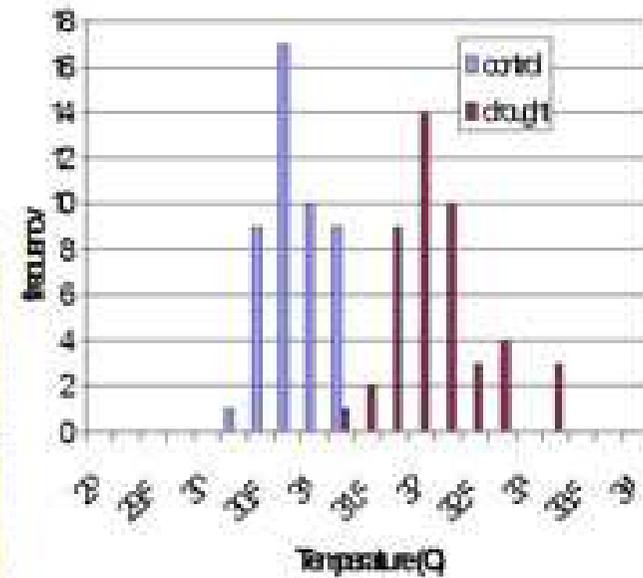
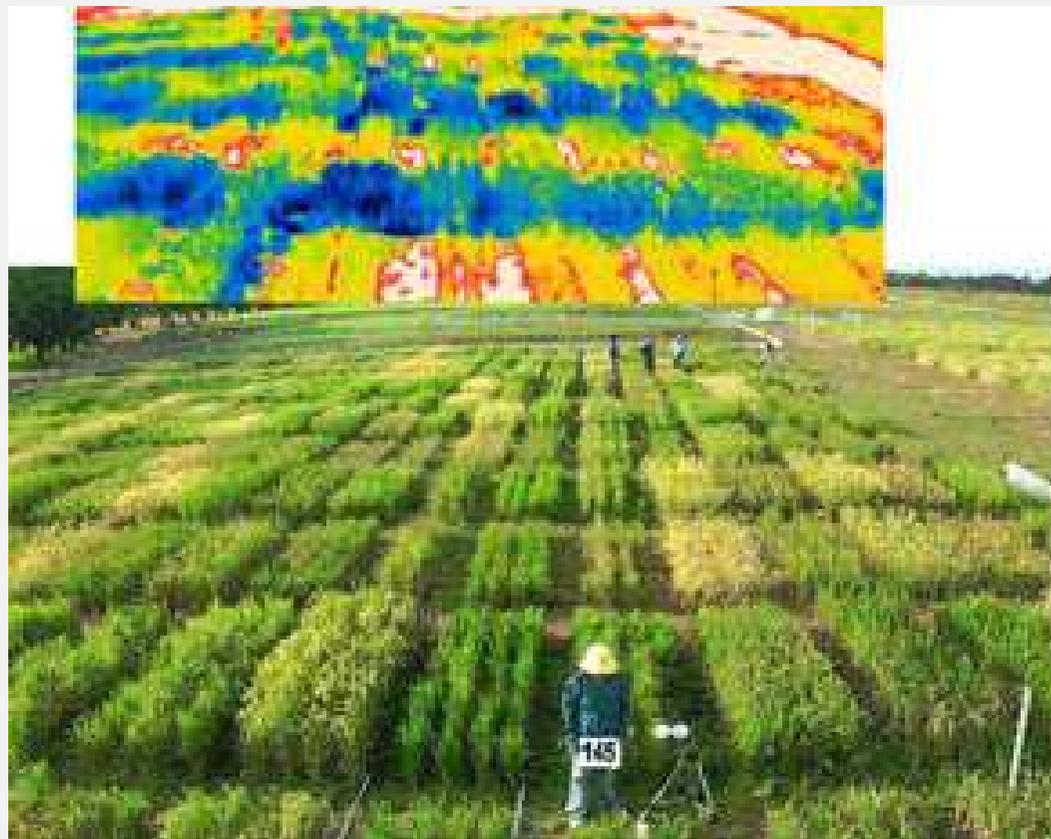


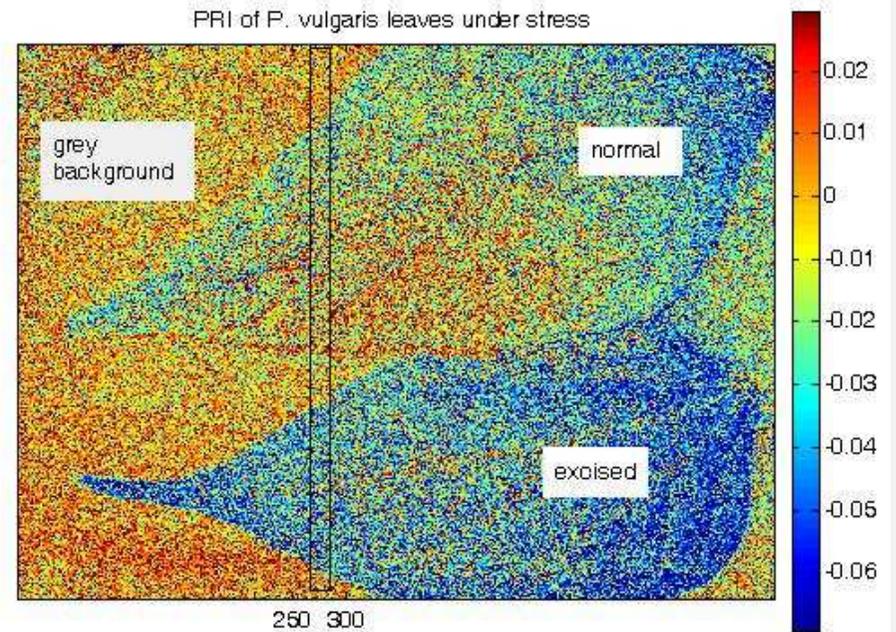
Imagem térmica da Variação da temperatura (+3°C) associada ao incremento do CO<sub>2</sub>

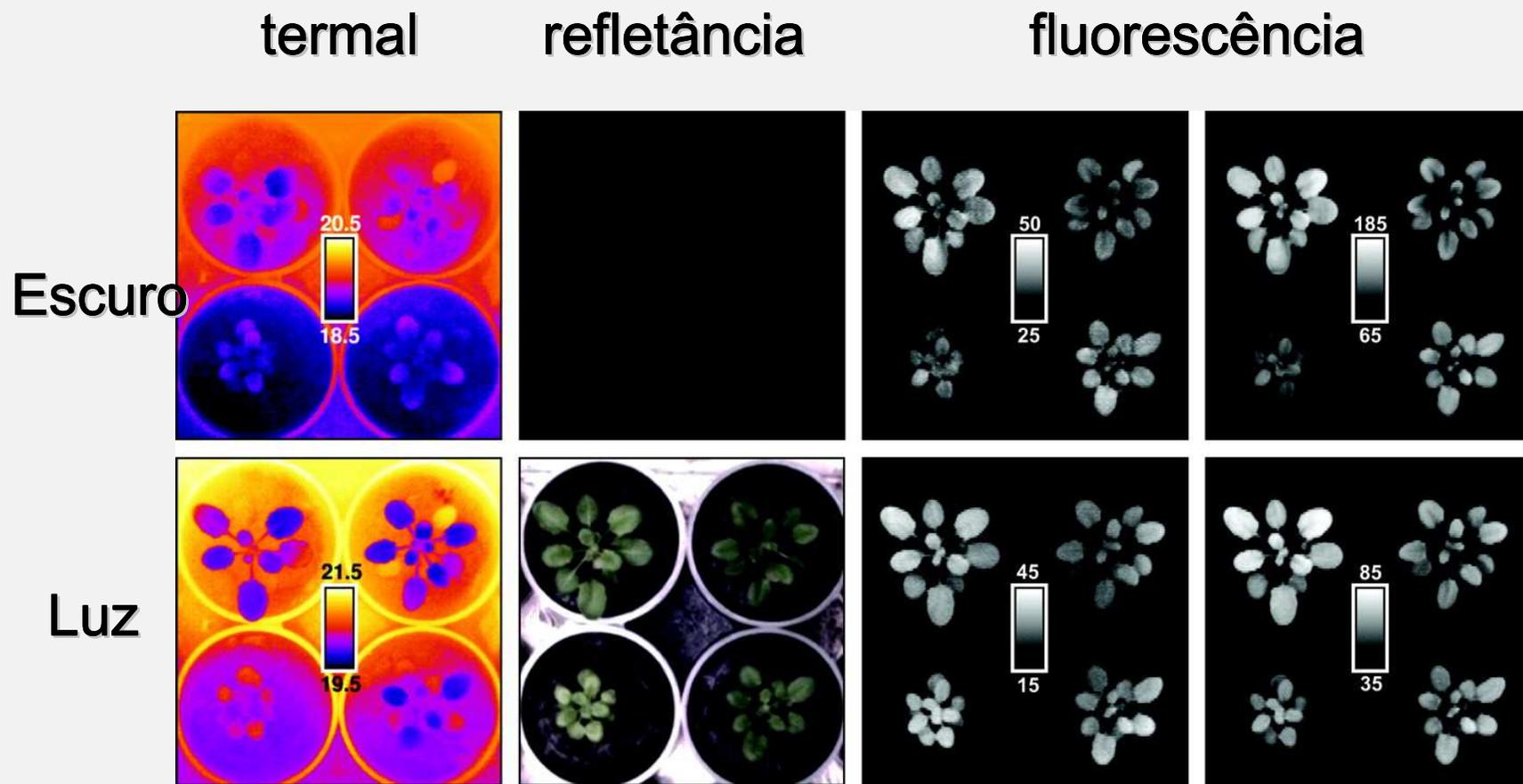
# Termografia IR para seleção de material resistente a estresse hídrico em campo -Arroz

---

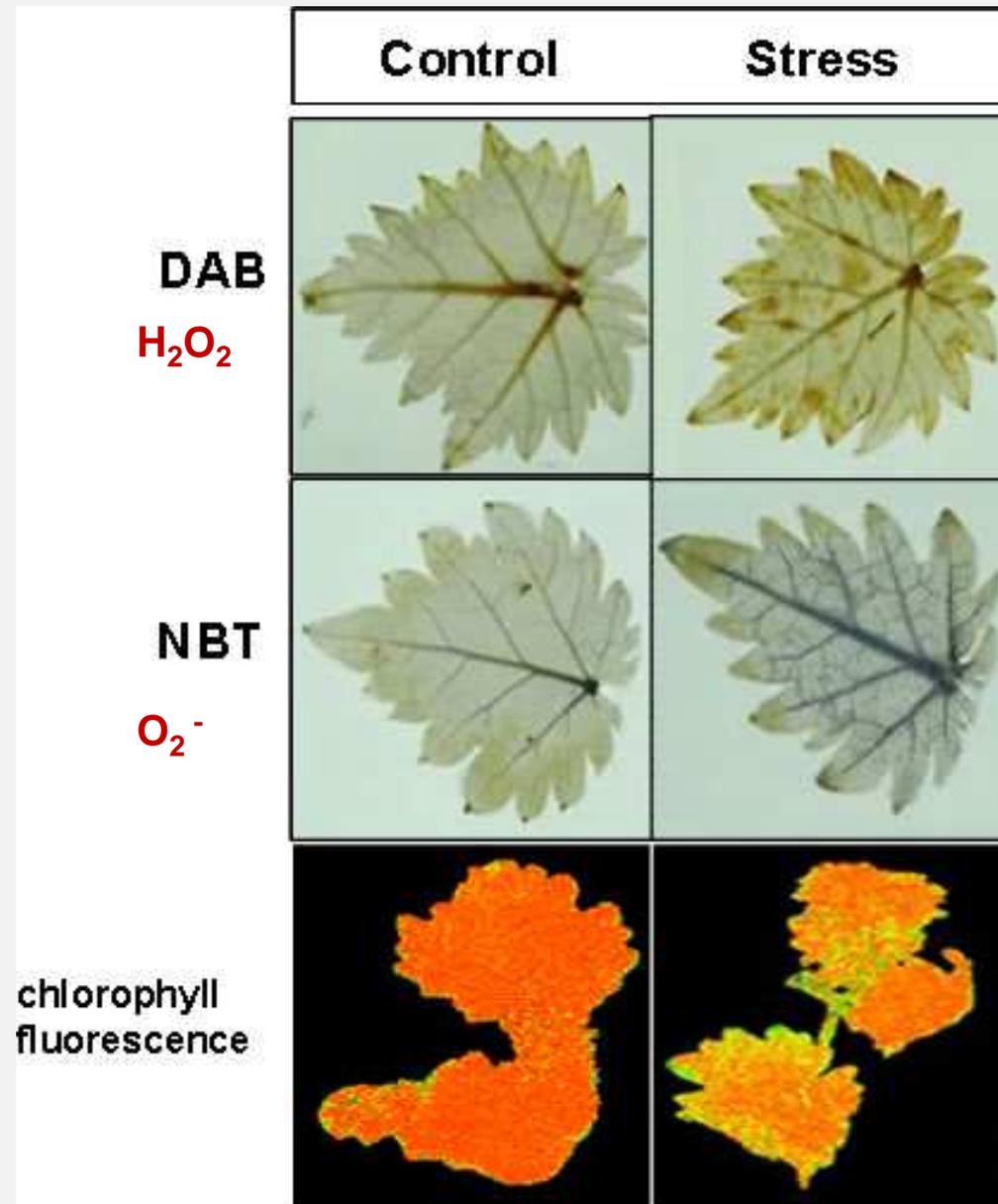


# Câmeras para medir a refletância





# Detecção "in situ" de radicais livres



# Reação do DAB para localização *in situ* do peróxido de hidrogênio produzido por estresse luminoso

**CONTROLE**



**Fv/Fm: 0,400**



**Fv/Fm: 0,820**



**Fv/Fm: 0,200**



**FOTOINIBIÇÃO**

Após 1 hora de exposição  
a  $1600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

**FOTOINIBIÇÃO**

Após 3 horas de exposição a  
 $1600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

---

# **Biodiversidade para enfrentar o desafio das mudanças climáticas**

# Biodiversidade do arroz

---



## **ANDES: Centro de Biodiversidade de importantes cultivos alimentícios**

---



# Biodiversidade de hortaliças

---



# Biodiversidade do milho



# Milho Andino resistente a estresse e alta produtividade



**MILHO ROXO**



**"CHICHA MORADA"  
suco de flavonóides**

# Cultivo da quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) sob condições de estresse salino e alagamento - Bolívia



**Prolina, Glicina betaína?**

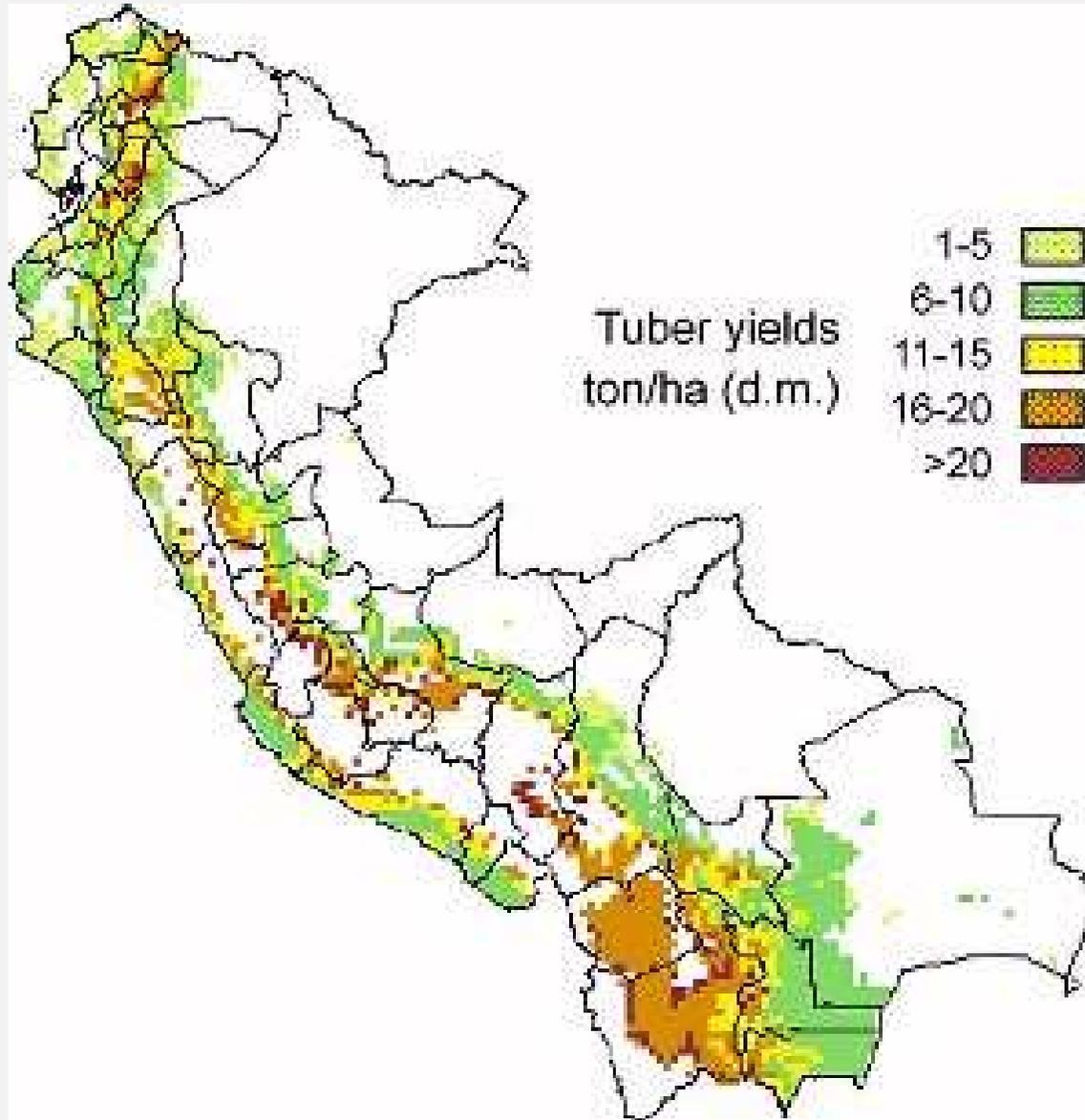




## Biodiversidade da batata nos Andes

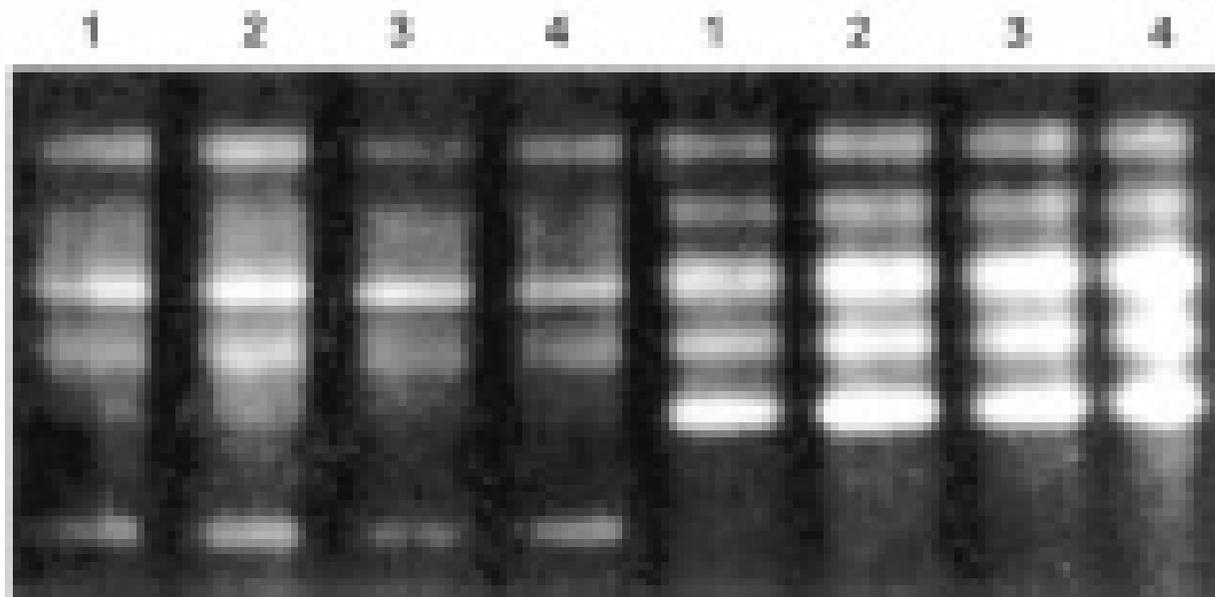


# A batata andina



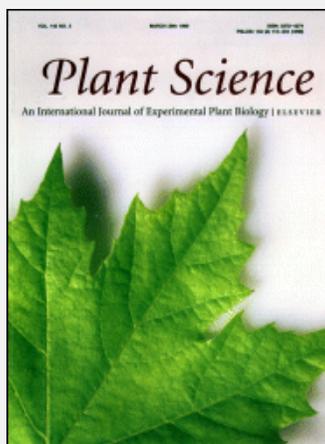
# Atividade da superóxido dismutase na proteção contra estresse hídrico e oxidativo em batata andina (*Solanum curtilobum*)

MnSOD  
Cu/ZnSOD  
FeSOD  
Cu/ZnSOD  
Cu/ZnSOD  
Cu/ZnSOD



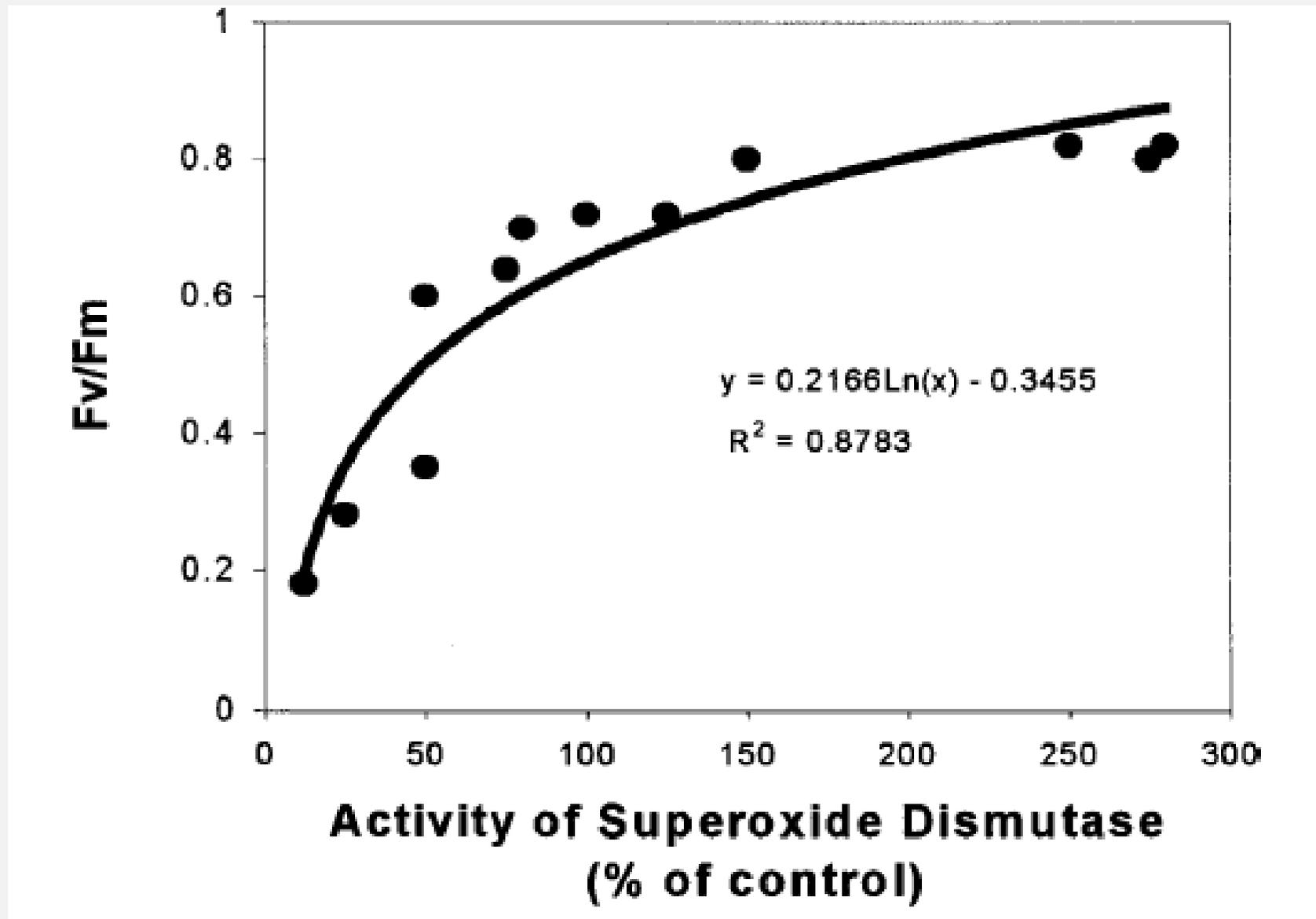
*Solanum tuberosum*

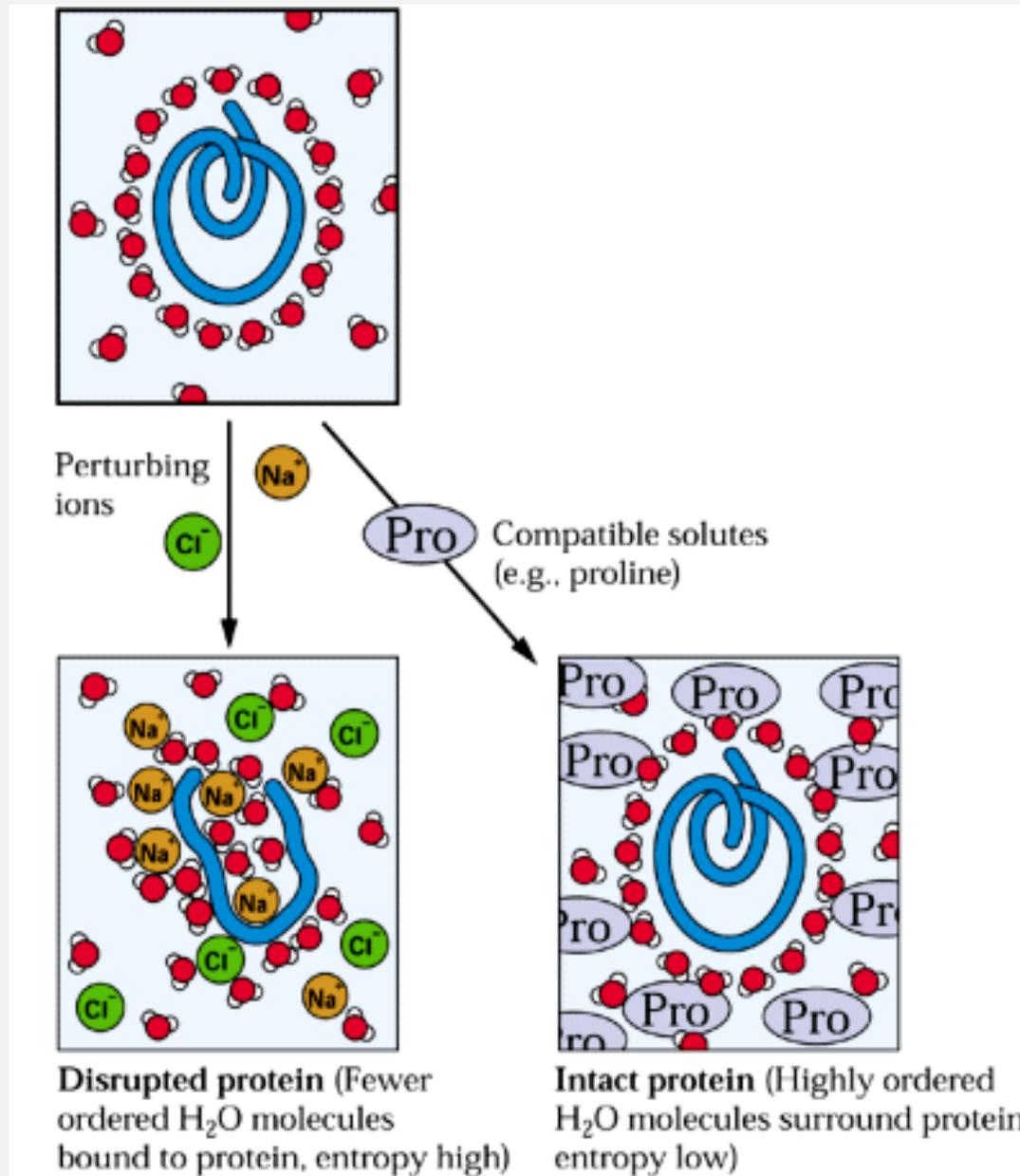
*Solanum curtilobum*



MARTINEZ, C.A., LOUREIRO, M., OLIVA, M.A., MAESTRI, M. Differential responses of superoxide dismutase in freezing resistant *Solanum curtilobum* and freezing sensitive *Solanum tuberosum* subjected to oxidative and water stress. *Plant Science* 160: 505-515. 2001.

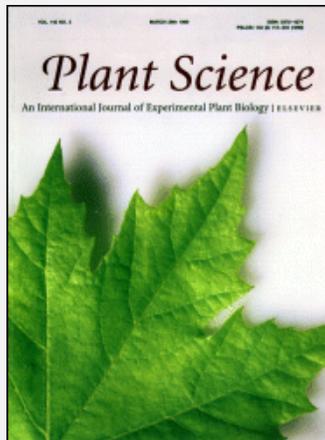
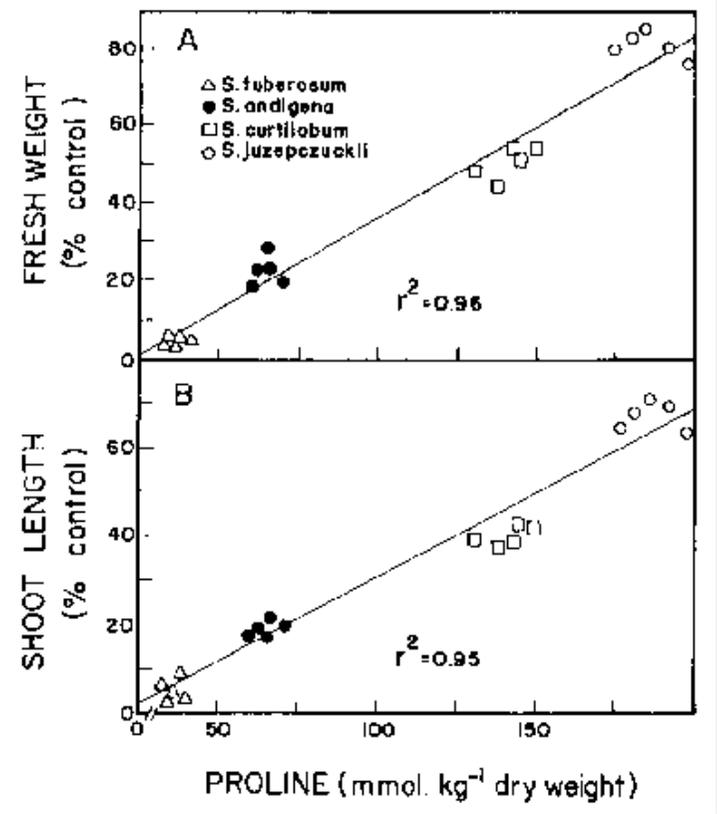
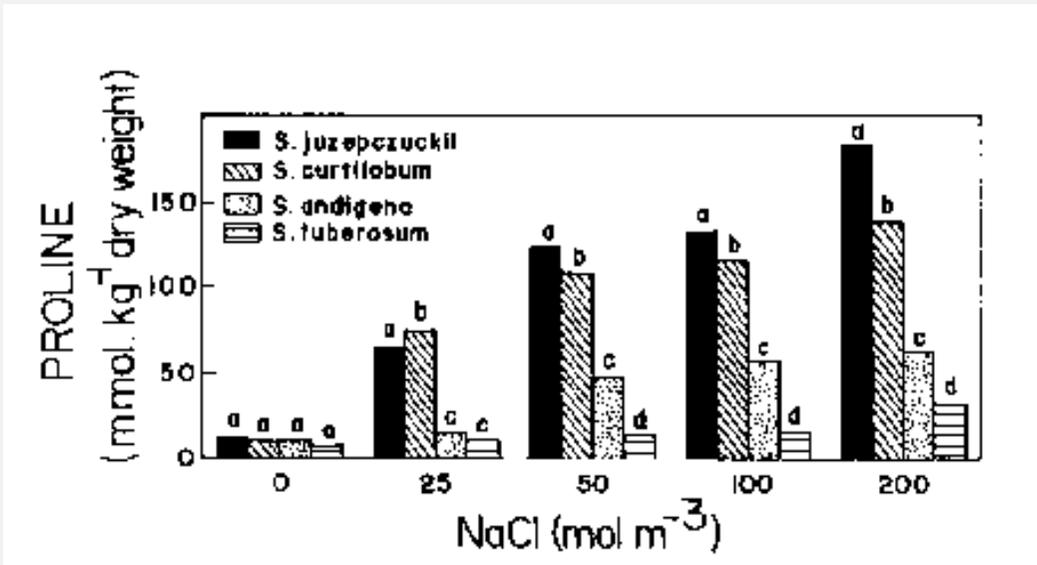
**Relações entre a atividade de SOD e a eficiência fotossintética máxima (Fv/Fm) em batata andina (*Solanum curtilobum*)**





**A prolina como soluto osmoticamente compatível**

# Acúmulo de Prolina em plantas resistentes a estresse salino



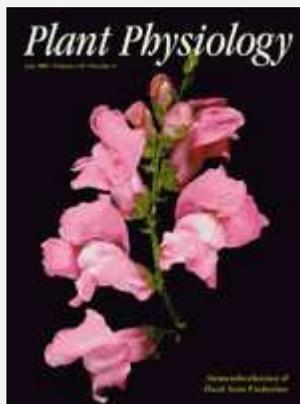
MARTINEZ, C.A., MAESTRI, M., LA...  
In vitro salt tolerance and proline acc...  
spp) differing in frost resistance. Pla...  
Elsevier Science, v.116, n.2, p.177-

## Proteína BiP confere tolerância contra estresse hídrico

**Plantas transgênicas**



**Plantas controle**

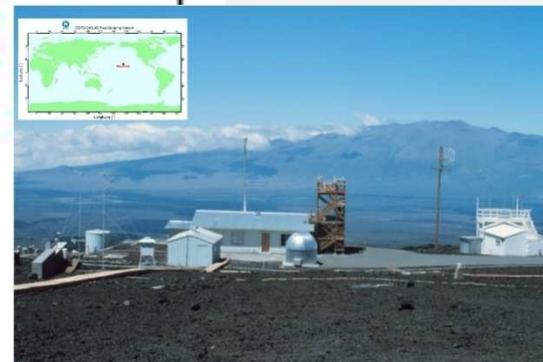
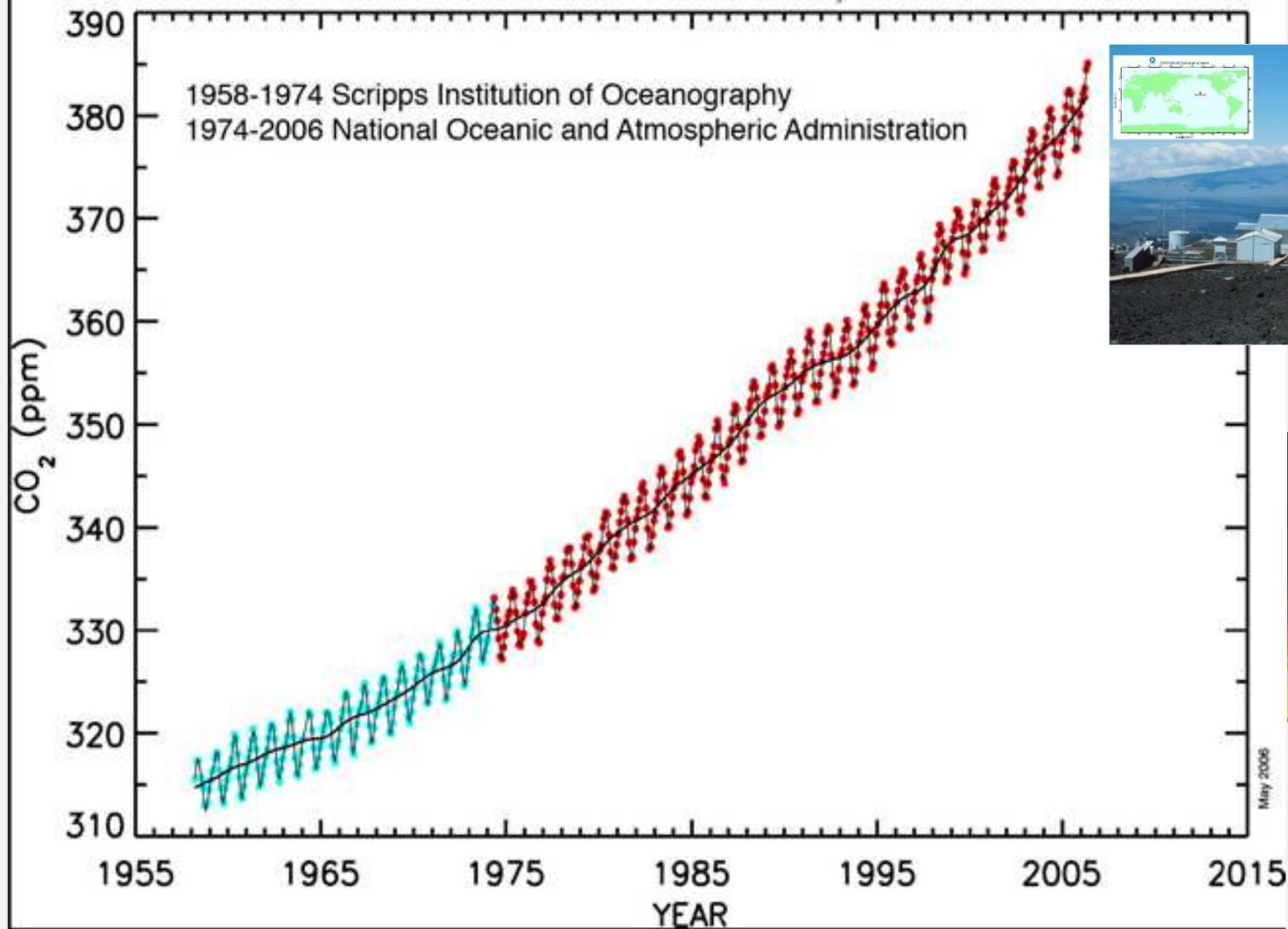


FÁTIMA C. ALVIM, SÔNIA M.B. CAROLINO, JÚLIO C.M. CASCARDO, CRISTIANO C. NUNES, CARLOS A. MARTINEZ, WAGNER C. OTONI, AND ELIZABETH P.B. FONTES  
Enhanced Accumulation of BiP in Transgenic Plants Confers Tolerance to Water Stress *Plant Physiol.* 2001 126: 1042-1054.

**Mudanças climáticas e produção de  
alimentos – Impacto sobre a  
agricultura Brasileira**

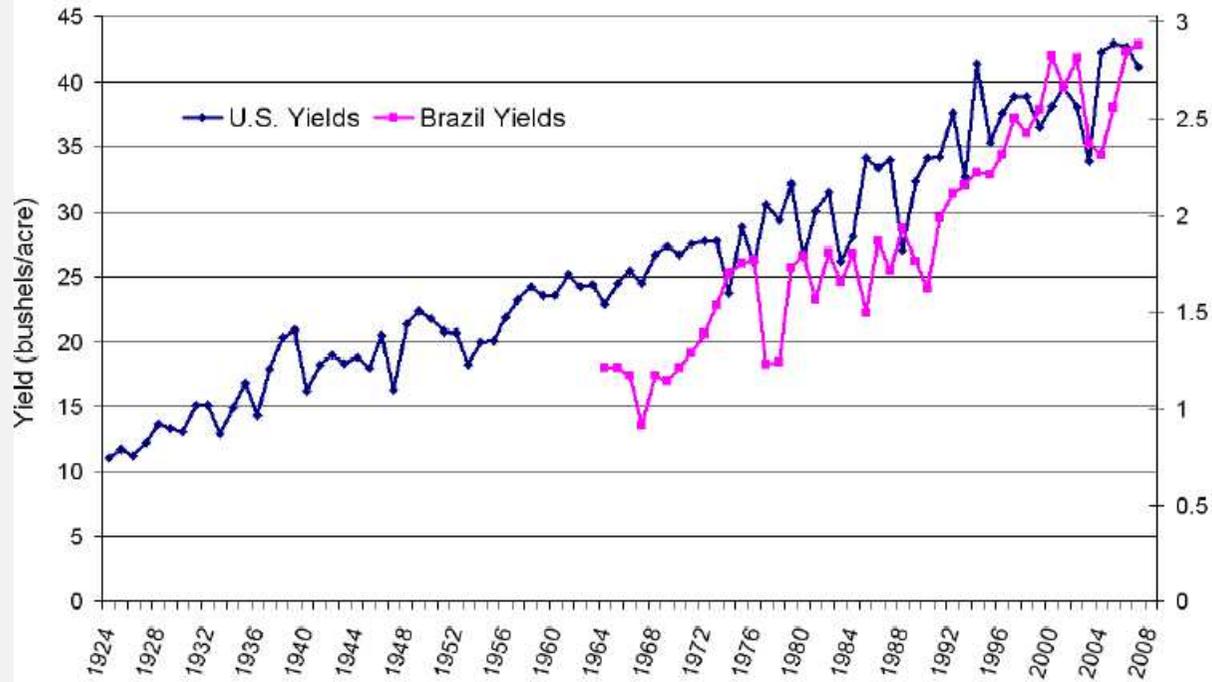
# Mauna Loa Monthly Mean Carbon Dioxide

NOAA ESRL GMD Carbon Cycle



## Curva de Keeling

## Historical Soybean Yields for U.S. and Brazil

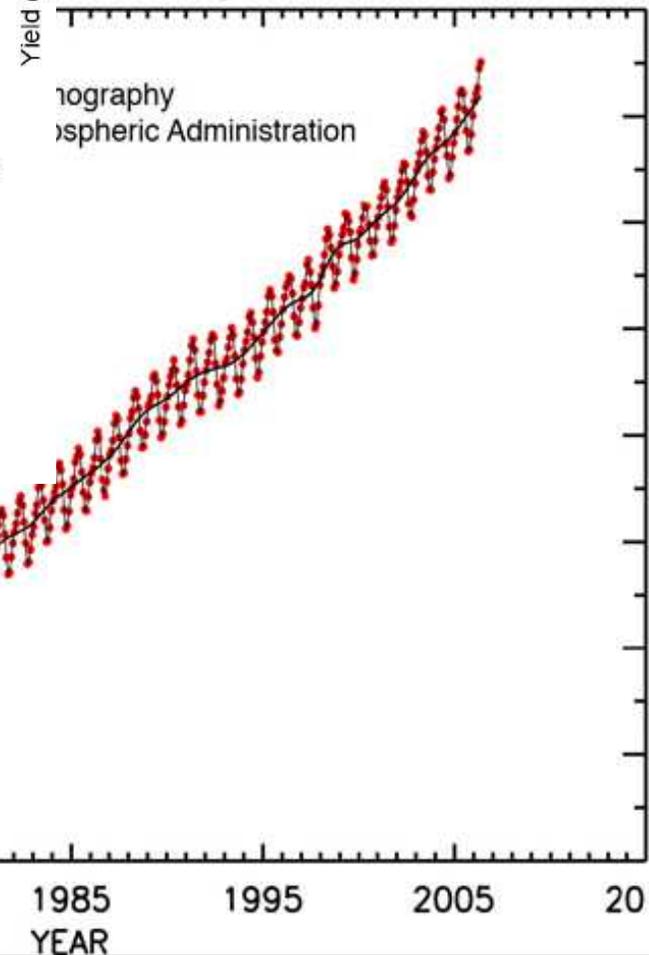


Data Source: USDA's NASS and PSD Online

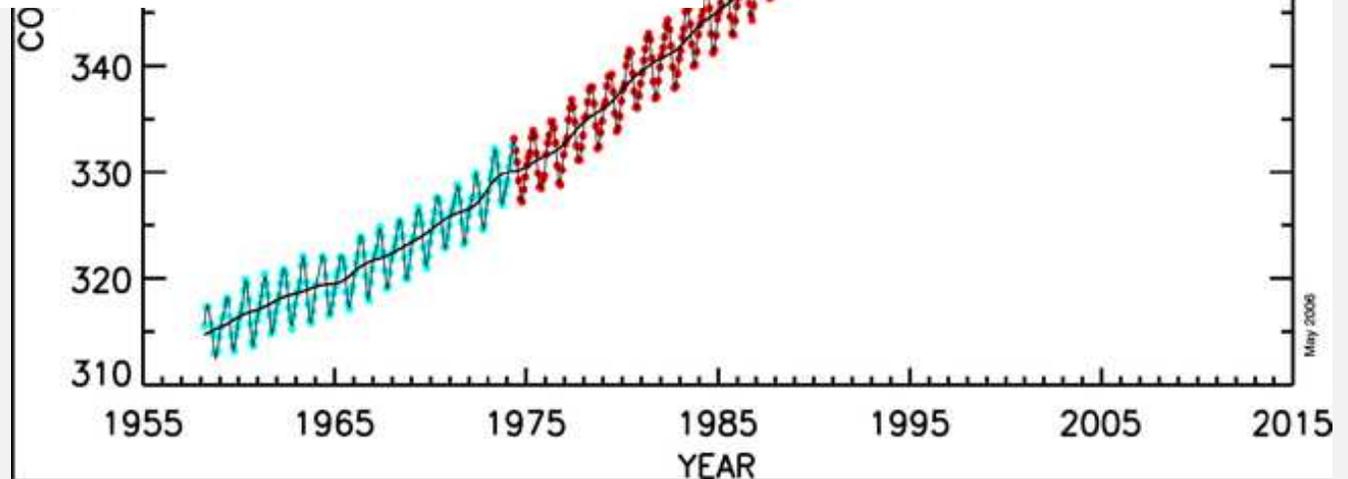
Linking U.S. Agriculture to the World  
FAS

## Mean Carbon Dioxide

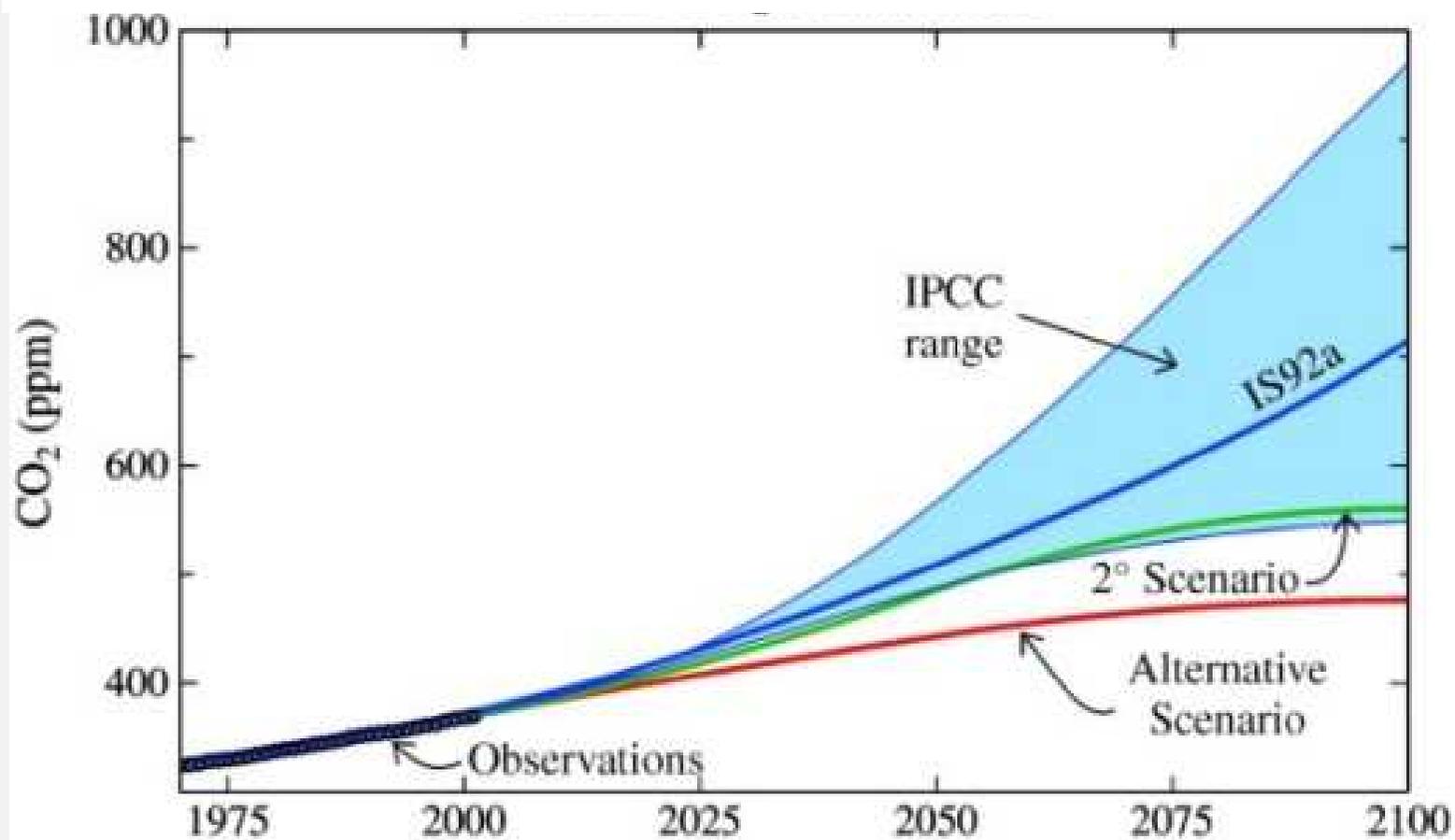
MD Carbon Cycle



**Qual a contribuição do CO<sub>2</sub> como fertilizante?**



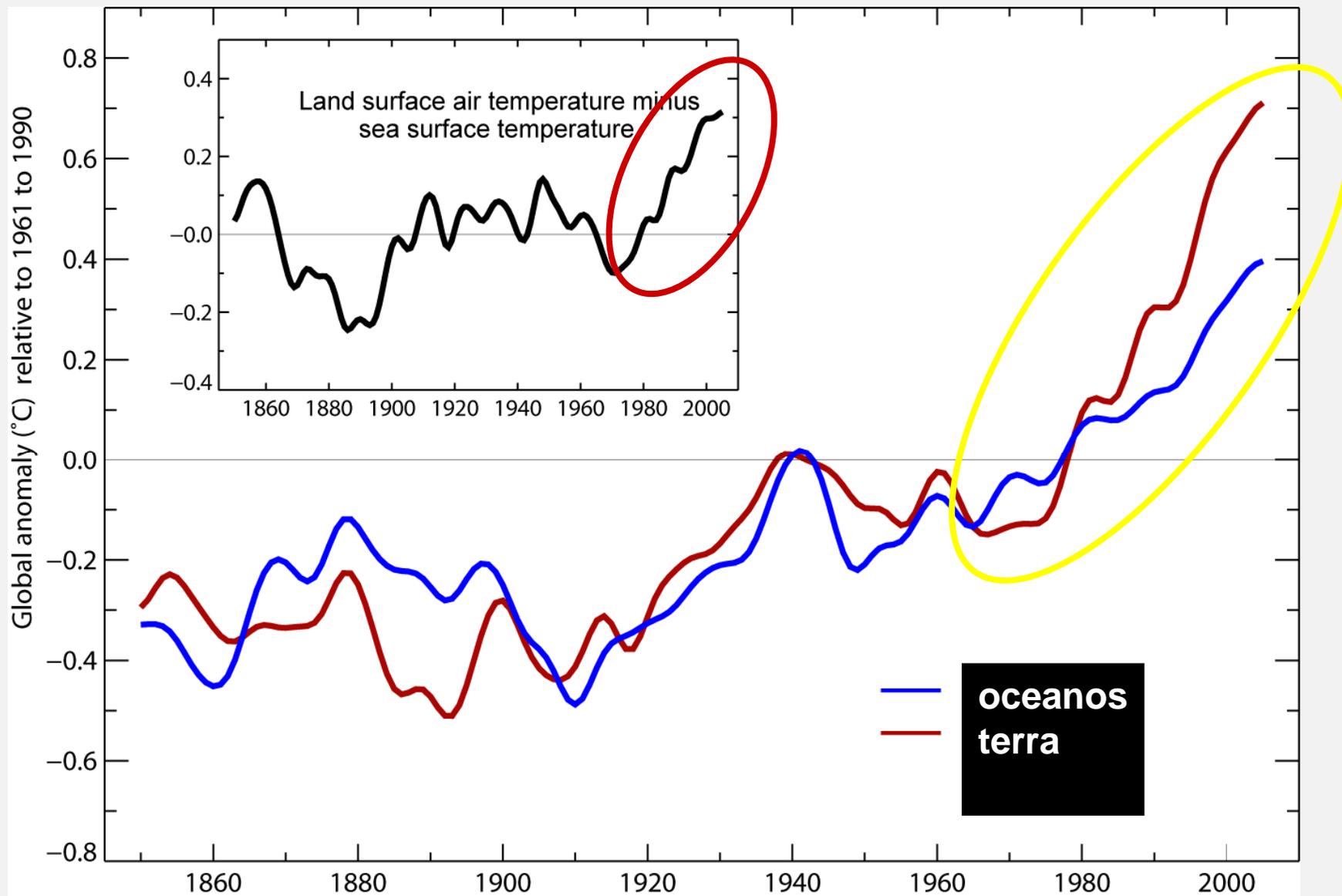
## Previsões para o CO<sub>2</sub> atmosférico



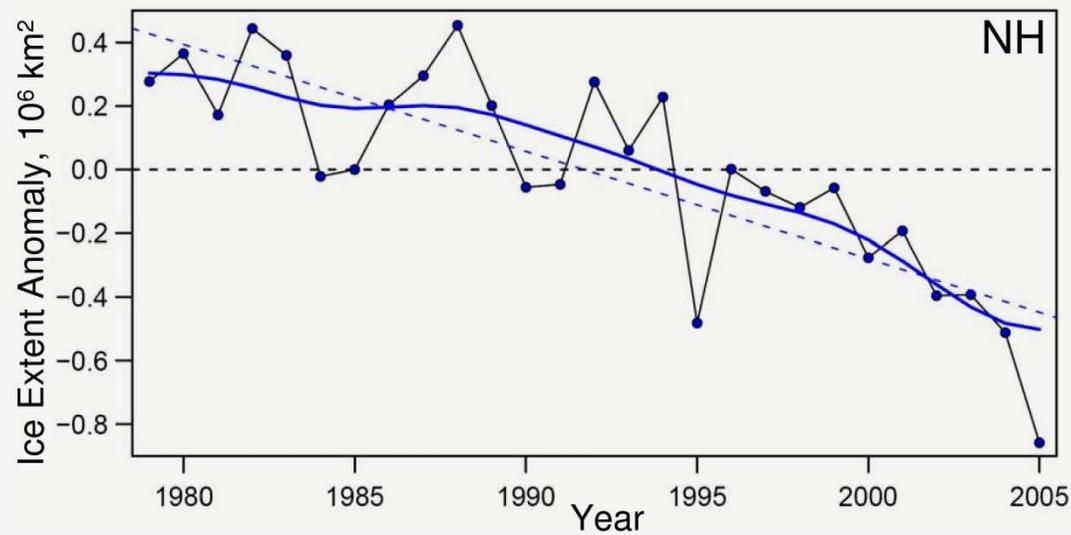
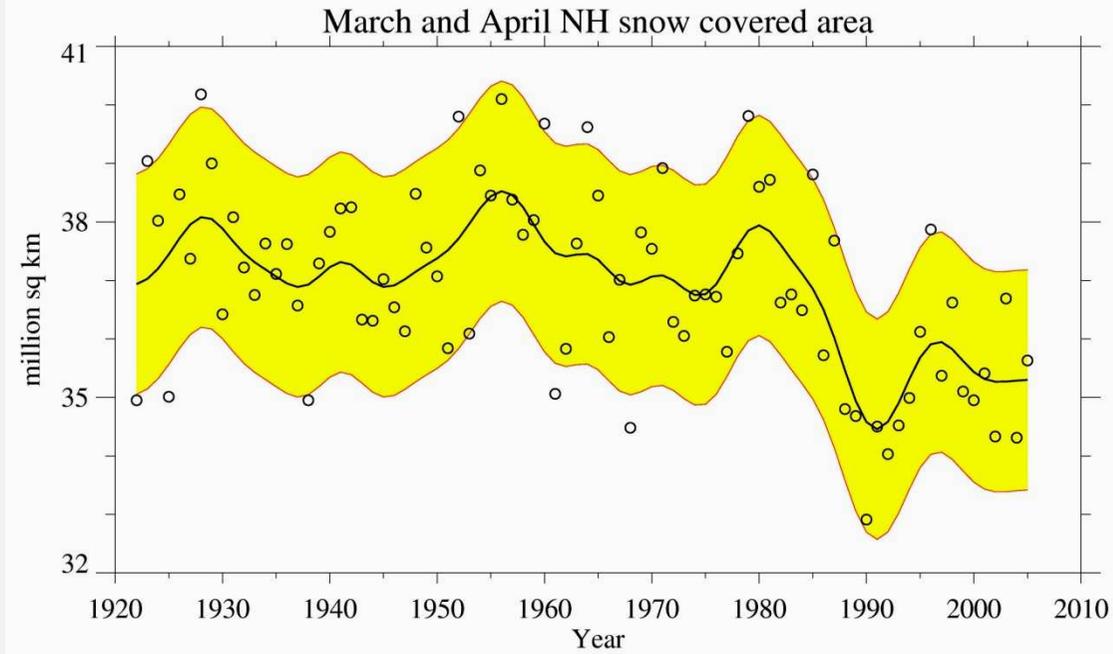
- **400 ppm atual,**
- **600 ppm em 2050**
- **800 ppm em 2100**

# Evidencias do aquecimento global

## Incremento da temperatura



# Diminuição da cobertura de neve e da calota polar ártica



# Evidencias do aquecimento global



**Graciar Upsala, Patagonia**



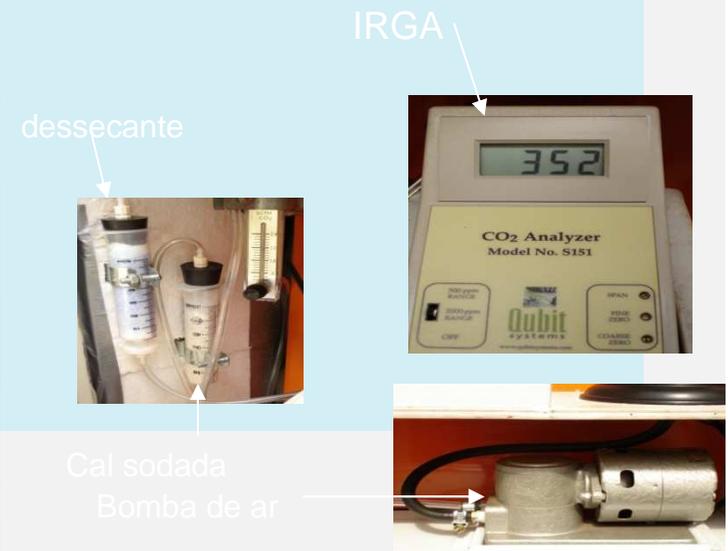
**Efeitos sobre os seres vivos**

## Câmbio climático e seus efeitos na agricultura

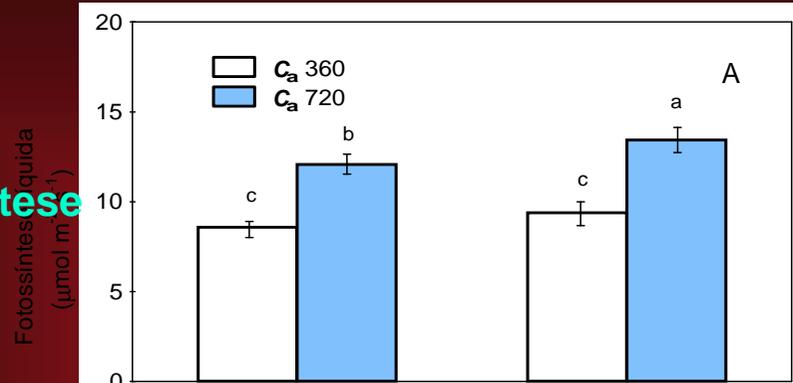
Elemento climático	Cambio esperado (2050's)	probabilidade	Efeitos na agricultura
CO <sub>2</sub>	Incremento de 380 ppm para 450 - 600 ppm	Muito alta	Incremento na fotossíntese e da EUA
Aumento nível do mar	10 – 20 cm	Muito alta	Erosão, alagamento, salinização, perda de terra
Temperatura	Aumento de 1-2°C. Alteração climática, aumento das ondas de calor.	Alta	Alteração nos períodos e nas áreas de cultivo, estresse térmico e hídrico
Precipitação	Alteração sazonal ± 10%	Alta	Aumento do risco de seca
Tormentas	Incremento na frequência	média	Erosão, destruição

# EFEITOS DE ELEVADAS CONCENTRAÇÕES DE CO<sub>2</sub> EM PLANTAS

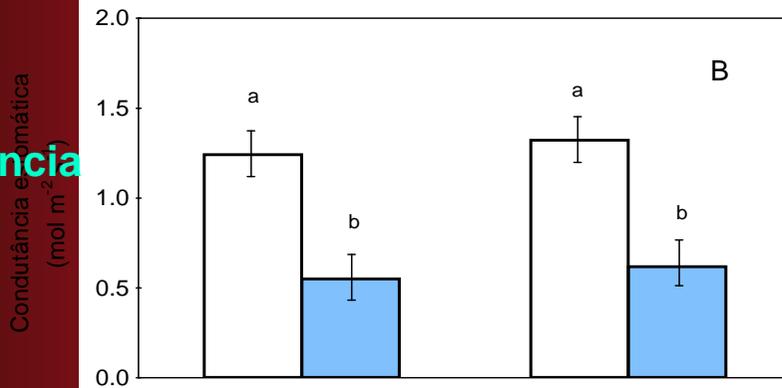
1. Aumento da assimilação de carbono, apesar da aclimatação da capacidade fotossintética.
2. Incremento da eficiência fotossintética do uso do nitrogênio.



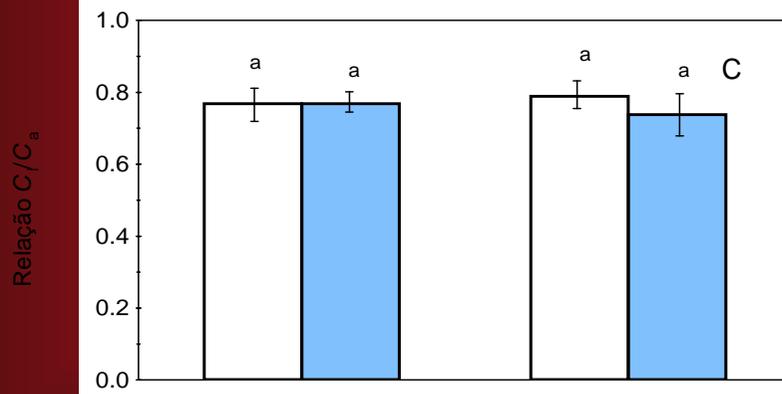
Fotossíntese líquida



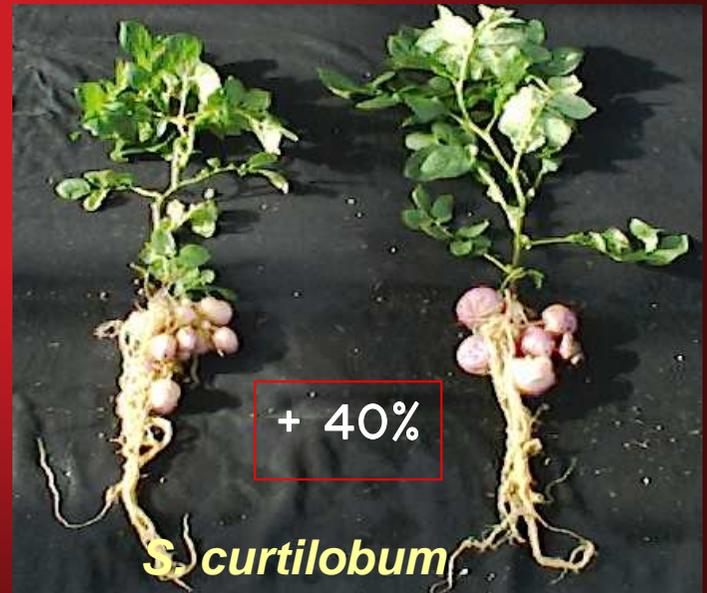
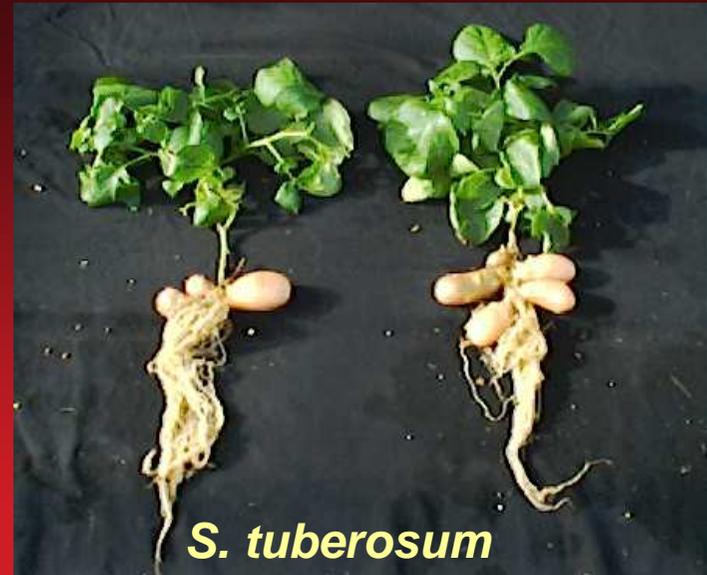
Condutância



Relação  $C_i / C_a$



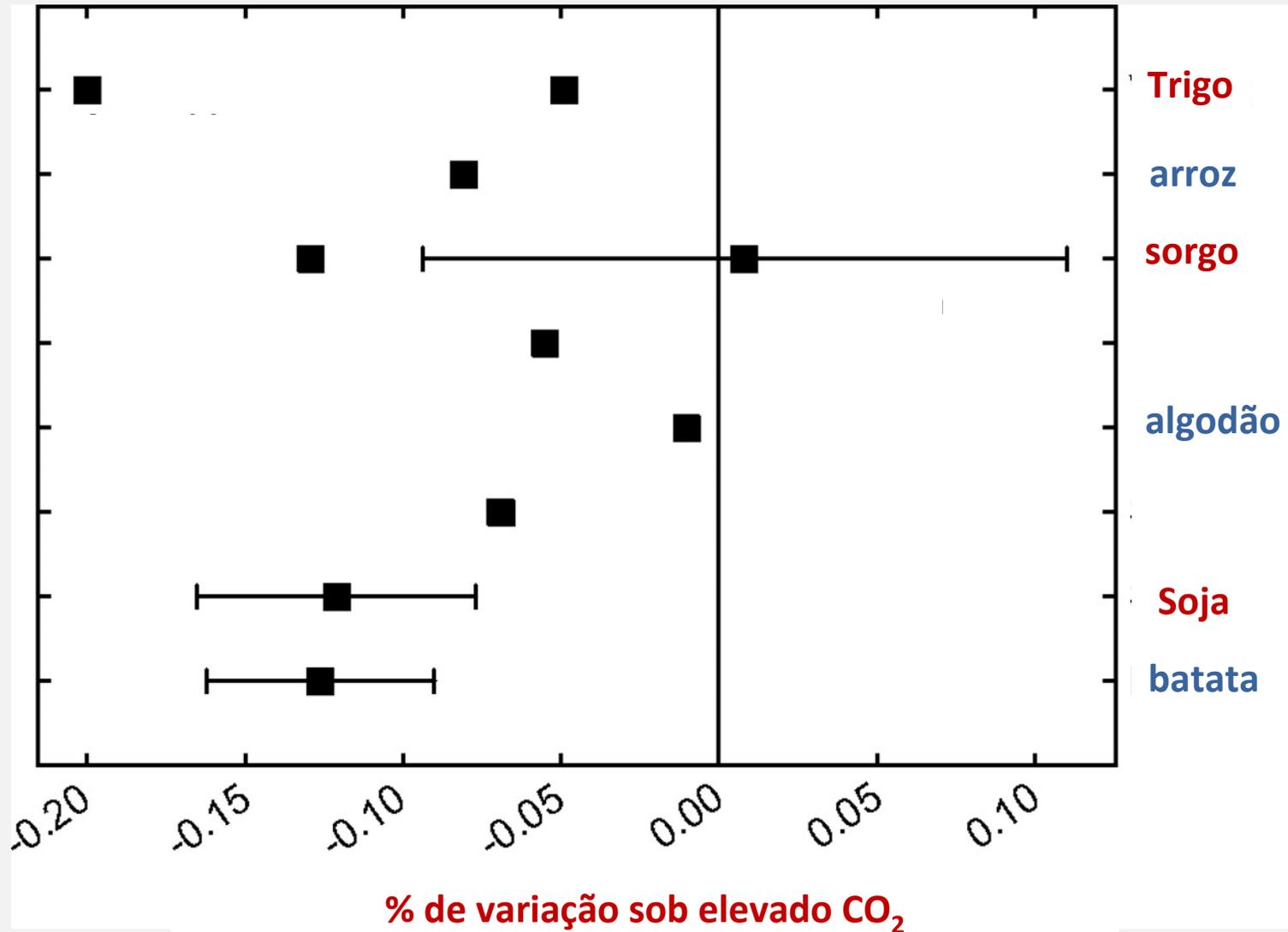
*S. tuberosum*      *S. curtilobum*



360      720  
Concentração de  $\text{CO}_2$

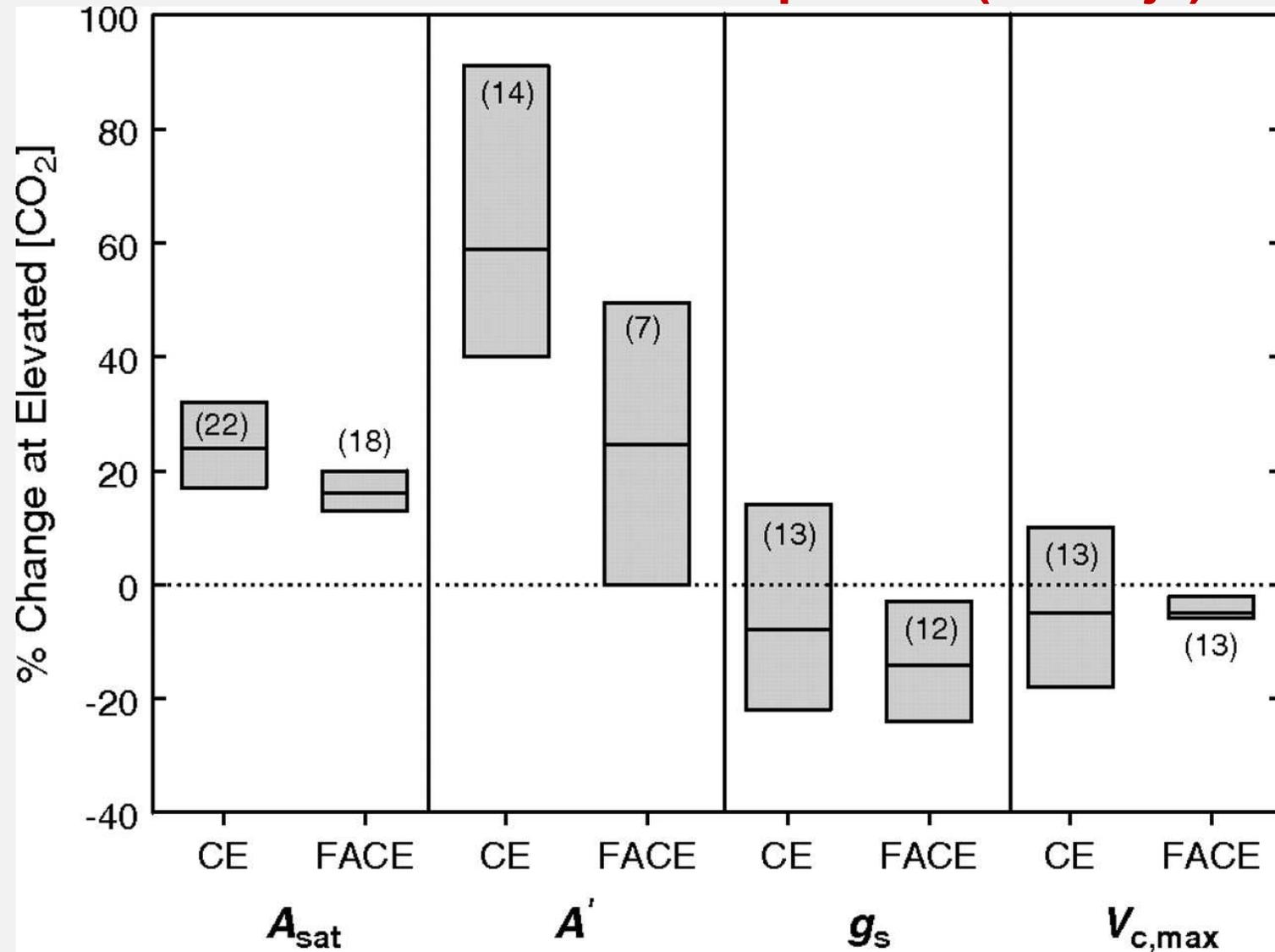
### 3. A evapotranspiração diminui com elevados níveis de CO<sub>2</sub>

Leakey, et al. J. Exp. Bot. 2009

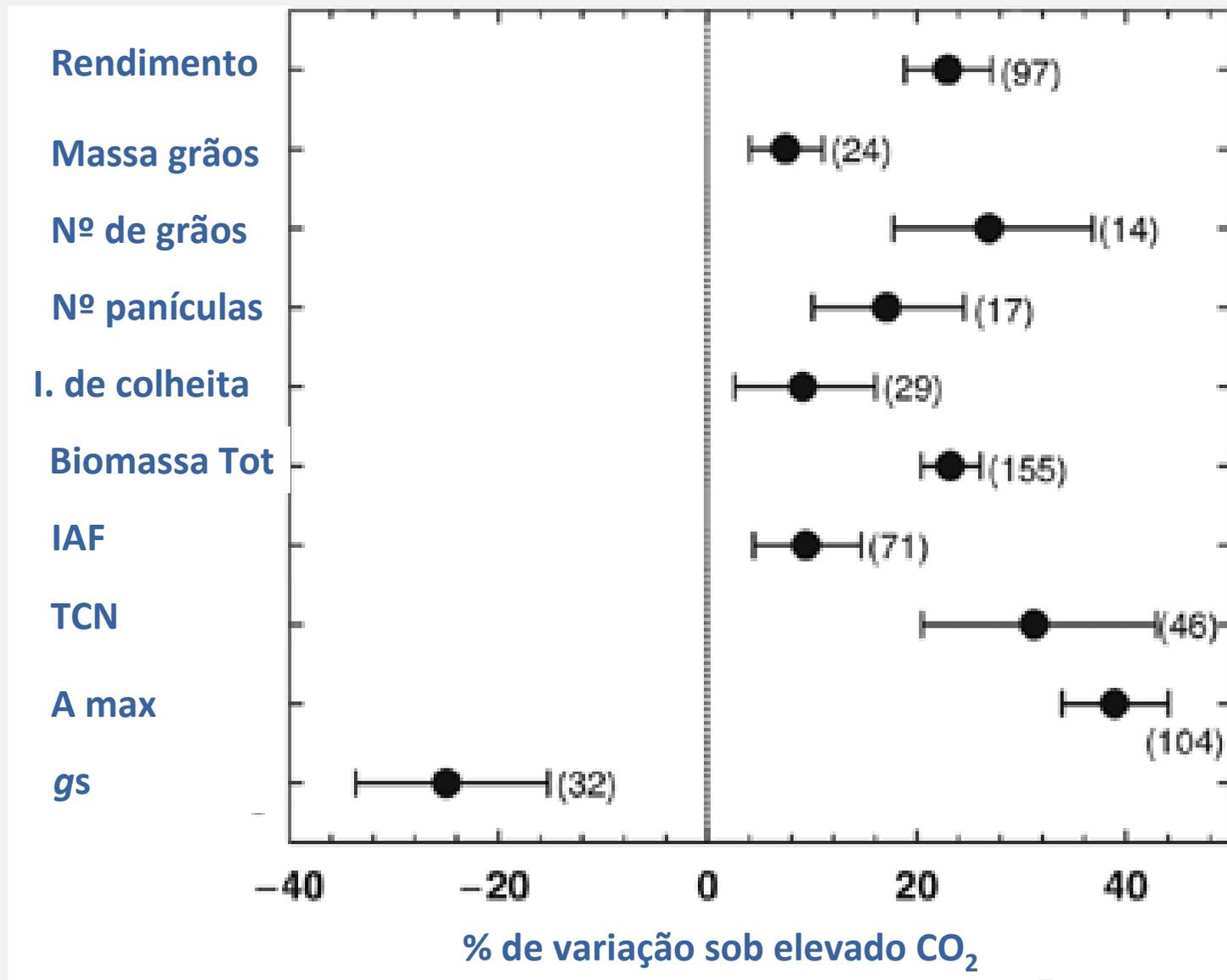




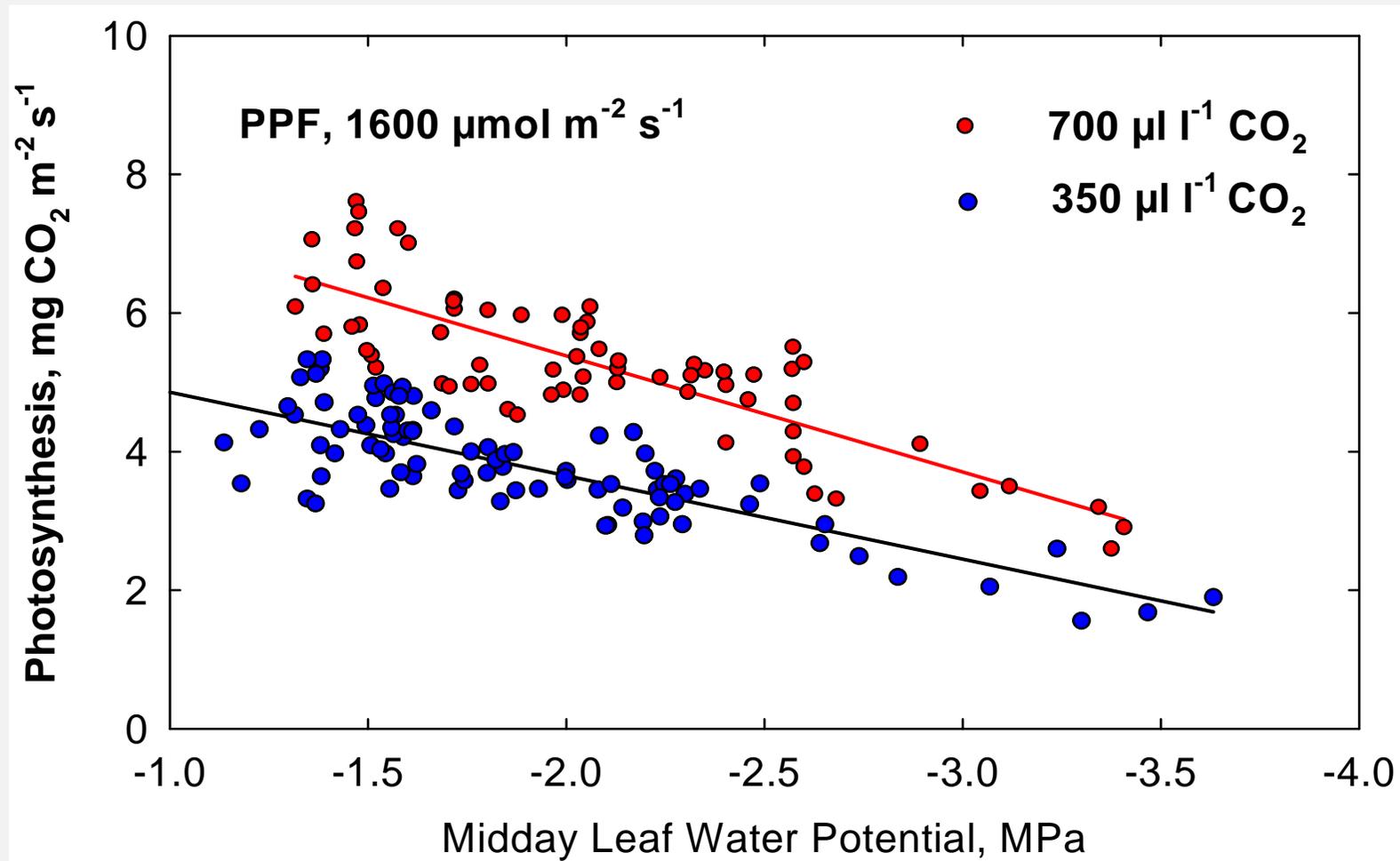
## 6. O efeito “fertilizante” do CO<sub>2</sub> em experimentos FACE em plantas cultivadas é menor do esperado (ex. soja)



## RESPOSTA DO ARROZ A ELEVADA [CO<sub>2</sub>]



# Elevado CO<sub>2</sub> e Potencial de água da folha



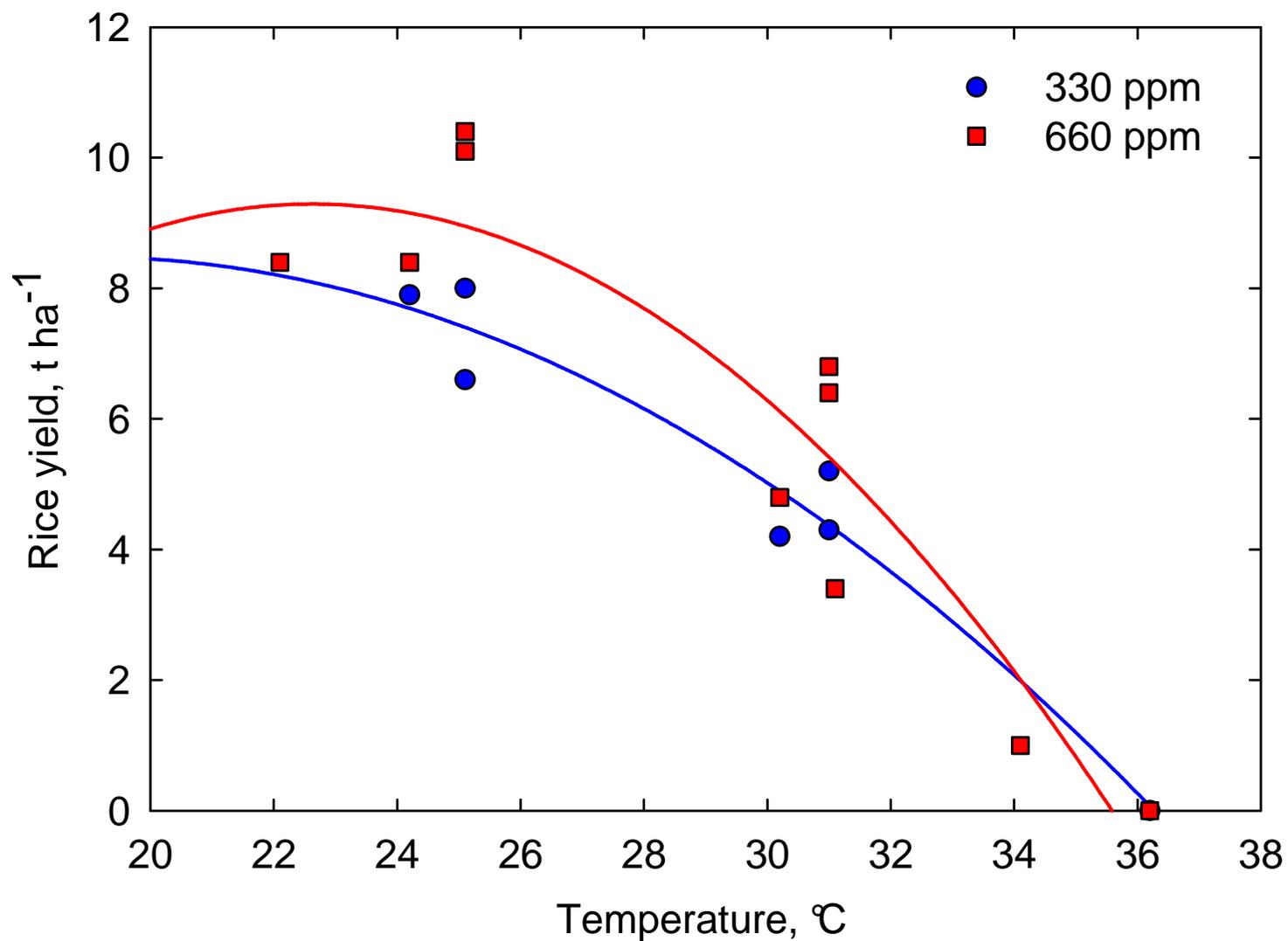
Irrigado



Estresse hídrico

# Cambio climático e produtividade agrícola

## Temperatura e CO<sub>2</sub> em arroz



Baker and Allen, 1993

# Cambio climático e produtividade agrícola

## Efeitos da temperatura sob o rendimento

Cultura	T opt. °C	T max. °C	Rend. T opt ( t/ha)	Rend at 28 °C, (t/ha)	Rend a 32°C (t/ha)	% diminuição (28 to 32 °C)
Arroz	25	36	7.55	6.31	2.93	54
Soja	28	39	3.41	3.41	3.06	10
Feijão	22	32	2.87	1.39	0.00	100
Amendoim	25	40	3.38	3.22	2.58	20
Sorgo	26	35	12.24	11.75	6.95	41

# AQUECIMENTO GLOBAL E PRODUÇÃO AGRÍCOLA DO BRASIL

AQUECIMENTO GLOBAL E A NOVA  
GEOGRAFIA DA PRODUÇÃO  
AGRÍCOLA NO BRASIL

AGOSTO DE 2008



# AQUECIMENTO GLOBAL E PRODUÇÃO AGRÍCOLA DO BRASIL

## SOJA

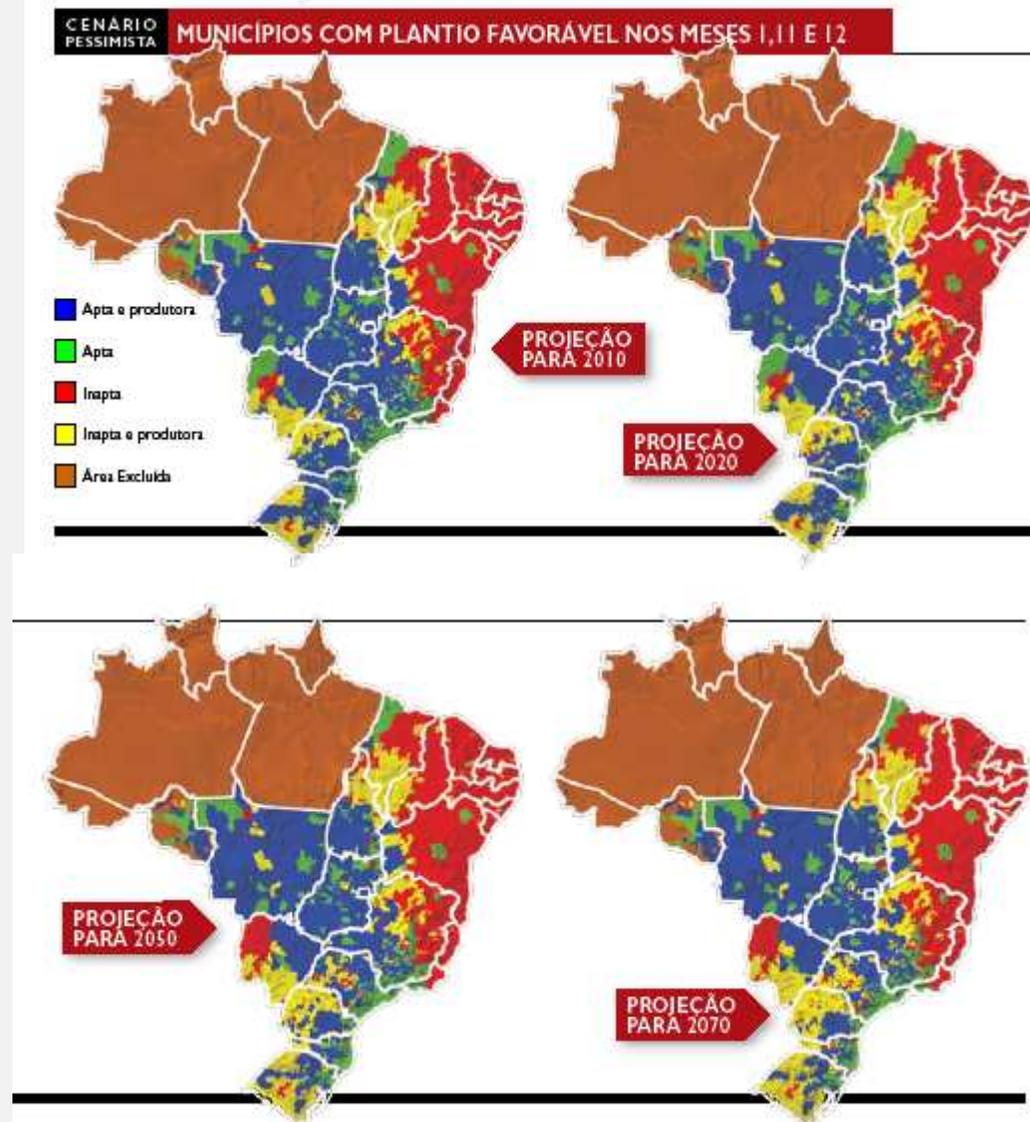


A cultura de soja é a que  
será mais afetada no Brasil  
com as mudanças climáticas



# CENÁRIOS FUTUROS PARA A SOJA

CENÁRIO A2 DO IPCC – ESTIMA AUMENTO DA TEMPERATURA DE 2 °C A 5,4 °C ATÉ 2100



**REDUÇÃO DE 41% DAS ÁREAS COM BAIXO RISCO PARA CULTIVO POR AUMENTO DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA EM DECORRÊNCIA DO AQUECIMENTO**

# VARIAÇÃO DO NUMERO DE MUNICIPIOS E DA ÁREA COM POTENCIAL PARA O PLANTIO DAS PRINCIPAIS CULTURAS BRASILEIRAS

(SIMULAÇÕES PARA O CENÁRIO A2 DO IPCC – MODELO PRECIS)

CULTURA	ATUAL	2020	2050	2070	% VARIAÇÃO ÁREA
Algodão	3590	3091	3017	2967	-16,12
Arroz	4011	3712	3659	3609	-14,19
Café	1245	1127	1058	821	-33,01
Cana	1374	2225	2689	2622	118,18
Feijão	4418	4030	3864	3778	-13,30
Girassol	4475	3958	3887	3831	-18,17
Mandioca	4042	4252	4405	4513	21,26
Milho	4365	3932	3844	3799	-17,28
Soja	2525	2391	2079	1833	-41,39

**CENÁRIO A2 DO IPCC – ESTIMA AUMENTO DA TEMPERATURA DE 2 °C A 5,4 °C ATÉ 2100**

# **Estratégias para enfrentar o desafio**

---

- **Pesquisa em equipes multidisciplinares**
- **Novos métodos de pesquisa**
- **Exploração da biodiversidade**

**CAIXA PRETA DE  
MECANISMOS**

**Mudança climática e  
Estresse abiótico**

**Molecular**

**Bioquímico**

**Fisiológico**

**Planta inteira**

**Comunidade**

**Ecossistema**

Leakey et al, 2009