

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"  
 DEPARTAMENTO DE GENÉTICA  
 LGN0313 – Melhoramento Genético



## O Equilíbrio de Hardy-Weinberg e a Seleção

Prof. Fernando Angelo Piotto

[fpiotto@gmail.com.br](mailto:fpiotto@gmail.com.br)

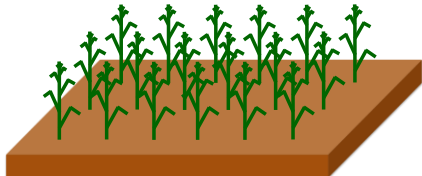
Piracicaba, 20 de maio de 2016

### Introdução

- **População:** "Comunidade reprodutiva composta de organismos de fertilização cruzada, os quais participam de um mesmo conjunto de genes" (Dobzhansky, 1951)
- **População:** Conjunto de indivíduos da mesma espécie, que ocupam o mesmo local, apresentam uma continuidade no tempo e possuem a capacidade de se intercasalar ao acaso e, portanto, de trocar genes entre si

### Estrutura Genética

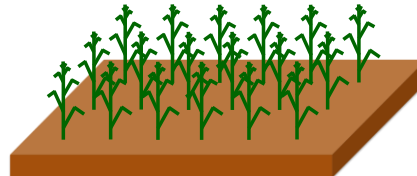
- **Populações de plantas**



### Estrutura Genética

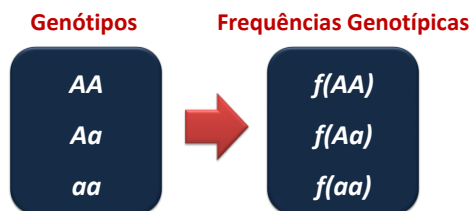
- **Propriedades de uma população:**

- Frequências genotípicas
- Frequências alélicas



### Estrutura Genética

- Considerando um loco com 2 alelos ( $A$  e  $a$ )



### Frequências Genotípicas

Tamanho da população (N)

AA (D) : Aa (H) : aa (R)

$$f(AA) = D / N$$

$$f(Aa) = H / N$$

$$f(aa) = R / N$$

### Frequências Genotípicas

- Ex.: População com 1000 indivíduos

490 plantas = AA

420 plantas = Aa

90 plantas = aa



### Frequências Genotípicas

$$f(AA) = 0,49$$

$$f(Aa) = 0,42$$

$$f(aa) = 0,09$$

### Frequências Alélicas

- Ex.: População com 1000 indivíduos

$$f(A) = f(AA) + \frac{1}{2} f(Aa) = 0,49 + \frac{1}{2} 0,42 = 0,70$$

$$f(a) = f(aa) + \frac{1}{2} f(Aa) = 0,09 + \frac{1}{2} 0,42 = 0,30$$

### Frequências Alélicas

- Ex.: População com 1000 indivíduos

$$f(A) = f(AA) + \frac{1}{2} f(Aa)$$

$$f(a) = f(aa) + \frac{1}{2} f(Aa)$$

### Frequências Alélicas

- Ex.: População com 1000 indivíduos

$$f(A) = f(AA) + \frac{1}{2} f(Aa) = 0,49 + \frac{1}{2} 0,42 = 0,70$$

$$f(a) = f(aa) + \frac{1}{2} f(Aa) = 0,09 + \frac{1}{2} 0,42 = 0,30$$

$$f(A) = 0,70$$

$$f(a) = 0,30$$

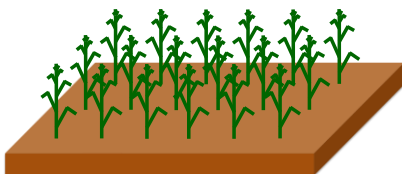
Frequências Alélicas

### Estrutura Genética

Gametas { ♂  
♀

$$f(A) = p$$

$$f(a) = q$$



### Estrutura Genética

- Supondo 1 loco com dois alelos:

Alelos	Frequências Alélicas	
A	f(A)	f(A) = p
a	f(a)	f(a) = q

Onde,  $p + q = 1$

### Estrutura Genética

- Troca de genes ao acaso (cruzamentos ao acaso)

		Gametas Masculinos ♂	
		$f(A) = p$	$f(a) = q$
Gametas Femininas ♀	$f(A) = p$	$f(AA) = p^2$	$f(Aa) = pq$
	$f(a) = q$	$f(Aa) = pq$	$f(aa) = q^2$

### Estrutura Genética

Genótipos	Frequências Genotípicas
AA	$f(AA) = p^2$
Aa	$f(Aa) = 2pq$
aa	$f(aa) = q^2$

$$\text{Onde, } p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

### O Equilíbrio de Hardy-Weinberg

- Em população **infinitamente grande**, as **frequências** genotípicas e alélicas **permanecerão constantes** no decorrer das gerações, a não ser que haja, seleção, acasalamento não ao acaso, migração ou mutação

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

### O Equilíbrio de Hardy-Weinberg

- **Consequências na práticas**
  - Trabalhar com amostras
  - Multiplicação de populações melhoradas
  - Aumento na média de populações
  - Aumento da frequência de alelos e indivíduos desejados

### Estrutura Genética

- **População está em equilíbrio de HW?**

500 plantas AA	$f(AA) = 0,49$
200 plantas Aa	$f(Aa) = 0,42$
300 plantas aa	$f(aa) = 0,09$
	$f(A) = p = 0,60$
	$f(a) = q = 0,40$

### Acasalamentos ao acaso

- **População está em equilíbrio de HW?**

$$f(A) = p = 0,60$$

$$f(a) = q = 0,40$$

$$f(AA) = p^2 = 0,60^2 = 0,36$$

$$f(Aa) = 2pq = 2 \times 0,60 \times 0,40 = 0,48$$

$$f(aa) = q^2 = 0,40^2 = 0,16$$

### Acasalamentos ao acaso

- **População está em equilíbrio de HW?**

#### Frequências Observadas    Frequências Esperadas

$$f(AA) = 0,50$$

$$f(Aa) = 0,20$$

$$f(aa) = 0,30$$

$$f(AA) = 0,36$$

$$f(Aa) = 0,48$$

$$f(aa) = 0,16$$

Necessário verificar as hipóteses por meio de testes estatísticos

### Acasalamentos ao acaso

- **Cruzamentos ao acaso entre os indivíduos da população**
  - Cada planta: 10 gametas masculinos e 10 gametas femininos

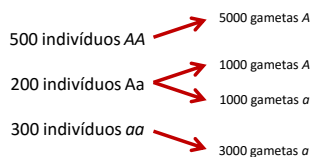
500 indivíduos AA

200 indivíduos Aa

300 indivíduos aa

### Estrutura Genética

- **Cruzamentos ao acaso entre os indivíduos da população**
  - Cada planta: 10 gametas masculinos e 10 gametas femininos



### Estrutura Genética

- **Cruzamentos ao acaso entre os indivíduos da população**
  - Cada planta: 10 gametas masculinos e 10 gametas femininos



### Estrutura Genética

Gametas Masculinos

		$f(A) = 0,6$	$f(a) = 0,4$
Gametas Femininos	$f(A) = 0,6$	0,36	0,24
	$f(a) = 0,4$	0,24	0,16

$$f(AA) = 0,36$$

$$f(Aa) = 0,48$$

$$f(aa) = 0,16$$

### Acasalamentos ao acaso

- **Se a população não estiver em equilíbrio, é necessária somente uma geração de cruzamentos ao acaso para que ela volte ao equilíbrio**
- **Próxima geração**
  - AA = 360 indivíduos =  $f(AA) = 0,36$
  - Aa = 480 indivíduos =  $f(Aa) = 0,48$
  - aa = 160 indivíduos =  $f(aa) = 0,16$

### Estrutura Genética

- População está em equilíbrio de HW?

Frequências Observadas      Frequências Esperadas

$$f(AA) = 0,50$$

$$f(Aa) = 0,20$$

$$f(aa) = 0,30$$

$$f(AA) = 0,36$$

$$f(Aa) = 0,48$$

$$f(aa) = 0,16$$

Necessário verificar as hipóteses por meio de testes estatísticos

### Estrutura Genética

- Considerando a população em equilíbrio

Frequências Esperadas

$$f(AA) = 0,36$$

$$f(Aa) = 0,48$$

$$f(aa) = 0,16$$

Segue o exemplo a seguir

### Seleção

- Efeito da seleção em populações

Genótipos	População Original	
	Nº	Frequência
AA	360	0,36
Aa	480	0,48
aa	160	0,16
Total	1000	1,00

### Seleção

- Efeito da seleção em populações

Genótipos	Após a Seleção	
	Nº	Frequência
AA	360	0,36
Aa	480	0,48
aa	0	0,00
Total	840	0,84

### Seleção

- Efeito da seleção em populações

Alelos	Após a Seleção	
	Nº	Frequência
A	360 (AA)	0,715
a	480 (Aa)	0,285
Total	840	1,00

### Seleção

- Efeito da seleção em populações

$$f(A) = 0,715$$

$$f(a) = 0,285$$

$$f(AA) = p^2 = 0,715^2 = 0,51$$

$$f(Aa) = 2pq = 2 \times 0,715 \times 0,285 = 0,41$$

$$f(aa) = q^2 = 0,40^2 = 0,08$$

## Seleção

### • Efeito da seleção em populações

$f(AA) = 0,36$	<b>Seleção</b> →	$f(AA) = 0,51$
$f(Aa) = 0,48$		$f(Aa) = 0,41$
$f(aa) = 0,16$		$f(aa) = 0,08$

*Seleção altera a frequência alélica da população*

## Seleção

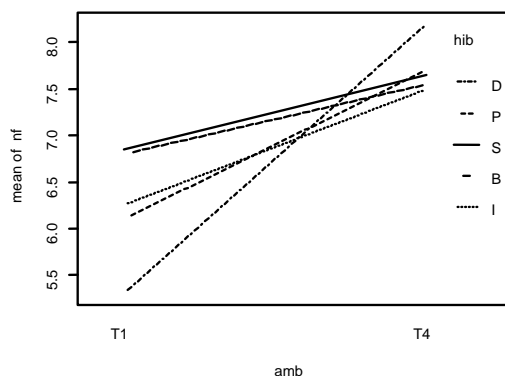
### • Efeito da seleção em populações

Número de indivíduos	<b>Seleção</b> →	Número de indivíduos
AA = 360		AA = 510
Aa = 480		Aa = 410
aa = 160	aa = 80	

*Processo se repete até que  $f(AA) = 1$*

## Populações e o Equilíbrio de HW

- A população está em EHW?
- E após um ciclo de acasalamento ao acaso?
- Ao atingir o EHW, as frequências mudam?
- Qual é o efeito da seleção?



```
anova(lm(nf ~ hib*amb + amb:bl))
```

## Referências

- Araújo PM e Paterniani E (1999) Melhoramento de plantas alógamas. In: Destro D e Montalván R (Ed.) Melhoramento genético de plantas. Editora UEL, Londrina, p. 299-341.
- Borém A e Miranda GV (2013) (6ed.) Melhoramento de plantas. Editora UFV, Viçosa, 523p. (Cap. 21)
- Cruz CD (2005) Princípios de genética quantitativa. Editora UFV, Viçosa, 394p. (Cap. 2)
- Souza Junior CL (2001) Melhoramento de espécies alógamas. In: Nass LL et al (Ed.) Recursos genéticos e melhoramento - plantas. Editora Fundação MT, Rondonópolis, p. 159-200.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"  
DEPARTAMENTO DE GENÉTICA  
LGN0313 – Melhoramento Genético



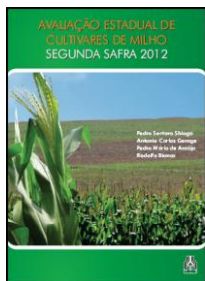
## Interação Genótipo x Ambiente

Prof. Fernando Angelo Píotto

[fpíotto@gmail.com.br](mailto:fpíotto@gmail.com.br)

Piracicaba, 20 de maio de 2016

## Exemplo de Interação GxE



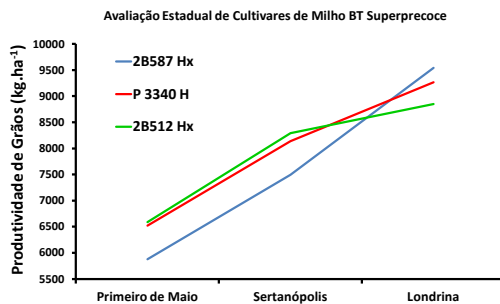
- [www.iapar.br](http://www.iapar.br)
  - Publicações do IAPAR
  - Boletim técnico
  - BT-78 – Avaliação estadual de cultivares de milho
    - Segunda Safra 2012

Tabella 8. Resultados finais do estudo de avaliação estadual de cultivares superprecoce de milho BT avaliados em lajotas em **Luiziana**, IAPAR, Segunda safra 2012.

Cultivares	Altura (cm)	Alteza (cm)	Índice de maturação	Produção (kg/ha)	Teor de amido (%)	Teor de proteína (%)	Teor de fibra (%)	Teor de lignina (%)	Teor de lignocelulose (%)	Teor de lignina (%)	Teor de lignocelulose (%)	Teor de lignina (%)	Teor de lignocelulose (%)
1. 20021-96	240	210	0,10	64,7	7	0,38	60	21,1	0,207	2,4	2,4	2,4	2,4
2. 21240-9	240	210	0,10	64,7	7	0,38	60	21,1	0,207	2,4	2,4	2,4	2,4
3. 20021-96	240	210	0,10	64,7	7	0,38	60	21,1	0,207	2,4	2,4	2,4	2,4

[http://www.iapar.br/arquivos/File/zip\\_pdf/BT78\\_Milho2012.pdf](http://www.iapar.br/arquivos/File/zip_pdf/BT78_Milho2012.pdf)

## Exemplo de Interação GxE



## Introdução

- Condições edafoclimáticas
- Ocorrência de patógenos
- Ocorrência de plantas daninhas
- Práticas culturais
- Características do solo

**Ambiente**

= **Genótipo**  
Cultura Agrícola

**Fenótipos**  
Produção de Grãos  
Taxa de Crescimento  
Acúmulo de Biomassa

## Introdução

**Fenótipo = Genótipo + Ambiente**

$$F = G + E$$

Cada genótipo (G) pode apresentar um desempenho relativo diferente em cada ambiente (E)

Genótipo x Ambiente

$$F = G + E + GE$$

## Introdução

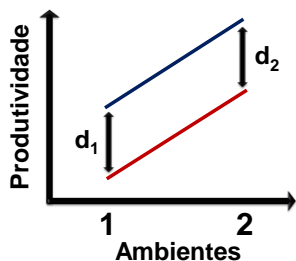
- **Importância da interação Genótipo x Ambiente**
  - Uma cultivar pode apresentar desempenhos diferentes em ambientes diferentes
  - Viés na avaliação dos ganhos de seleção
  - Dificuldade na recomendação de cultivares com ampla adaptabilidade
- **Causas da Interação**
  - Fatores fisiológicos e bioquímicos de cada genótipo

## Introdução

- **Necessário avaliar sua magnitude visando:**
  - Quantificar seus efeitos sobre as técnicas de melhoramento
  - Adotar procedimentos para sua minimização ou aproveitamento
- **Tipos de Interação**
  - Ausência de Interação
  - Interação Simples
  - Interação Complexa

## Tipos de Interação GxE

## • Ausência de Interação



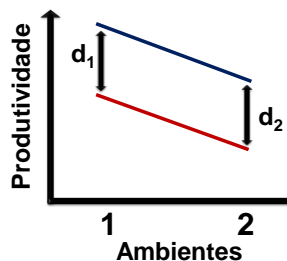
Genótipo 1

Genótipo 2

$$d_1 = d_2$$

## Tipos de Interação GxE

## • Ausência de Interação



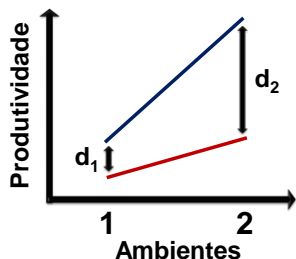
Genótipo 1

Genótipo 2

$$d_1 = d_2$$

## Tipos de Interação GxE

## • Interação Simples



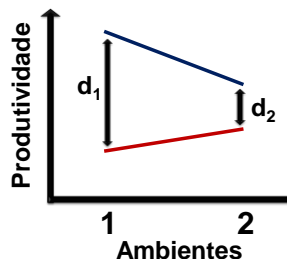
Genótipo 1

Genótipo 2

$$d_1 \neq d_2$$

## Tipos de Interação GxE

## • Interação Simples



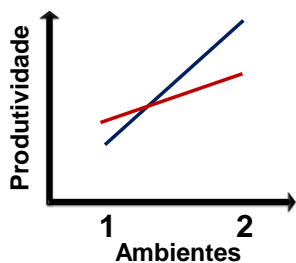
Genótipo 1

Genótipo 2

$$d_1 \neq d_2$$

## Tipos de Interação GxE

## • Interação Complexa



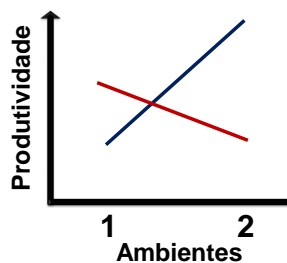
Genótipo 1

Genótipo 2

Inversão de  
Performance

## Tipos de Interação GxE

## • Interação Complexa



Genótipo 1

Genótipo 2

Inversão de  
Performance



### Principais Causas da Interação GxE

- Fotoperíodo
- Tipo de solo
- Fertilidade do solo
- Toxicidade por alumínio
- Época de semeadura
- Práticas agrícolas

Fatores  
Previsíveis

- Distribuição pluviométrica
- Umidade relativa do ar
- Temperatura do ar e do solo
- Patógenos
- Insetos

Fatores  
Imprevisíveis

### Implicações da Interação GxE para o melhoramento e recomendação de cultivares

- **Ausência de Interação e Interação Simples**
  - Não interferem nos programas de melhoramento e na recomendação de cultivares
- **Objetivo do programa de melhoramento**
  - Obtenção de cultivares produtivos em um amplo espectro de ambientes

### Implicações da Interação GxE para o melhoramento e recomendação de cultivares

- **Interação Complexa**
  - Interferem nos programas de melhoramento e na recomendação de cultivares
    - Programas de melhoramento precisam ser regionalizados
    - Recomendação de cultivares precisa ser específica para cada região
  - Em geral, caracteres como a produção, apresentam interação do tipo complexo

### Implicações da Interação GxE para o melhoramento e recomendação de cultivares

- **Ensaio comparativos de produtividade**
  - Genótipos (G) x Locais (L)
  - Genótipos (G) x Anos (A)
  - Genótipo (G) x Locais (L) x Anos (A)
- **Alocação de recursos para os programas de melhoramento e ensaios de competição de cultivares**
  - Combinação entre número de Locais (L), Anos (A) e repetições dos ensaios de competição de cultivares

### Aspectos positivos e negativos da interação GxE

- **Aspectos negativos:**
  - Regionalização dos programas de melhoramento
- **Aspectos positivos:**
  - Manutenção de diversidade
  - Redução da vulnerabilidade