

# Endogamia e Heterose

**Ana Paula Aprígio Assis**  
Departamento de Genética e Biologia Evolutiva  
Universidade de São Paulo



Carlos II - o último Habsburgo

# Hardy Weinberg

- Sem seleção
- Populações infinitas (sem deriva)
- Sem mutação
- Sem fluxo gênico
- Acasalamientos aleatórios (panmixia)

# Hardy Weinberg

- Sem seleção
- Populações infinitas (sem deriva)
- Sem mutação
- Sem fluxo gênico
- Acasalamientos aleatórios (panmixia)

# Hardy Weinberg

- Sem seleção
- Populações infinitas (sem deriva)
- Sem mutação
- Sem fluxo gênico
- Acasalamientos aleatórios (panmixia)

A partir das frequências alélicas nós conseguimos calcular as frequências genotípicas!

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

# Endocruzamento = endogamia = inbreeding

- Cruzamento entre indivíduos aparentados (cruzamentos não aleatórios!)

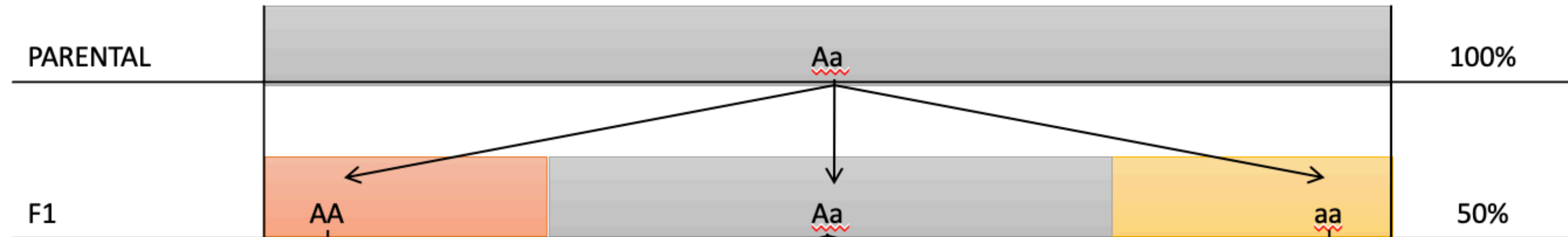
# Endocruzamento

## auto-fecundação - caso extremo!



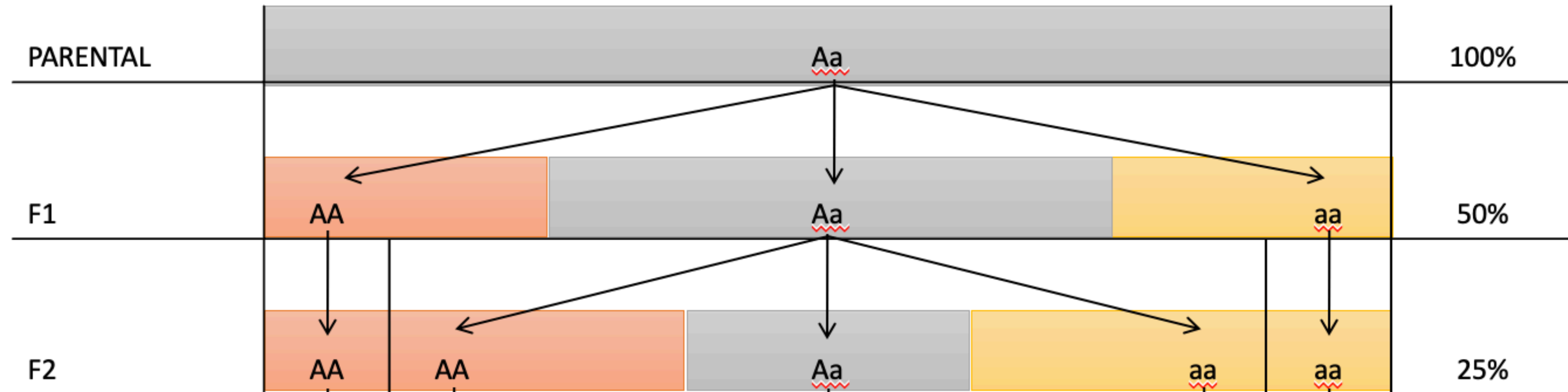
# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!



# Endocruzamento

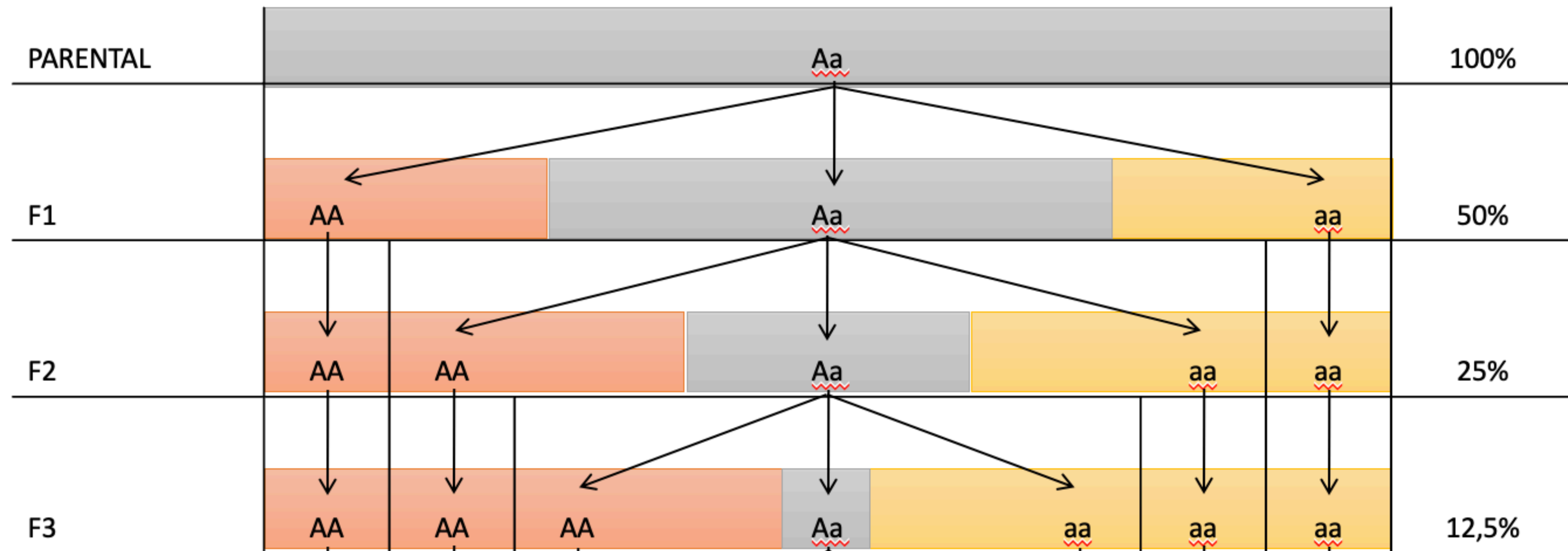
auto-fecundação - caso extremo!





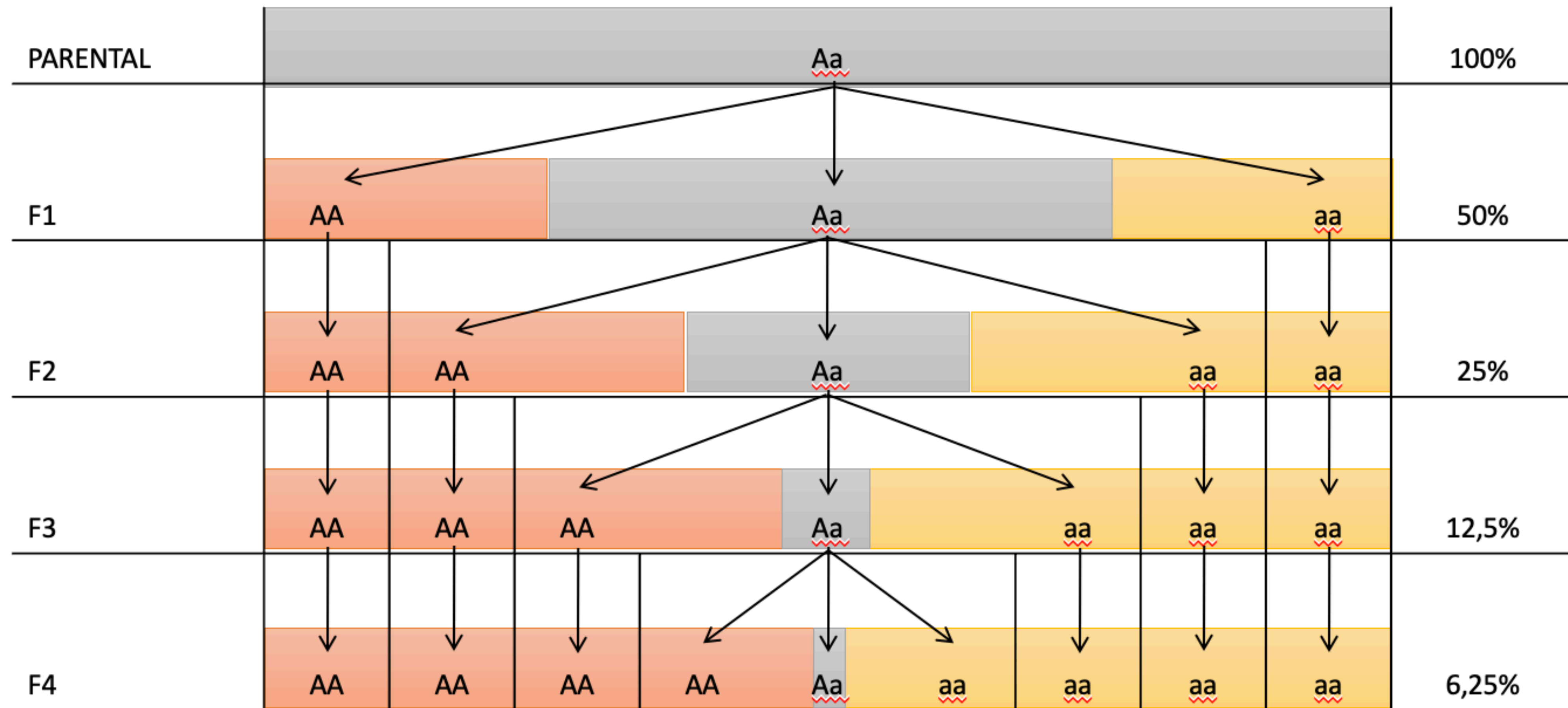
# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!



# Endocruzamento

## auto-fecundação - caso extremo!



# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

$F_0$

AA

250

Aa

500

aa

250

# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

		AA	Aa	aa
$F_0$		250	500	250
$F_1$		250 + 125	250	250 + 125

# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

	AA	Aa	aa
$F_0$	250	500	250
$F_1$	250 + 125	250	250 + 125
$F_2$	375 + 62.5	125	375 + 62.5

# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

	AA	Aa	aa
$F_0$	250	500	250
$F_1$	250 + 125	250	250 + 125
$F_2$	375 + 62.5	125	375 + 62.5
$F_3$	437.5 + 31.25	62.5	437.5 + 31.25

# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

	AA	Aa	aa
$F_0$	$p^2$	$2pq$	$q^2$
$F_1$	$p^2 + pq/2$	$pq$	$q^2 + pq/2$
$F_2$	$p^2 + 3pq/4$	$pq/2$	$q^2 + 3pq/4$
$F_3$	$p^2 + 7pq/8$	$pq/4$	$q^2 + 7pq/8$
$F_4$	$p^2 + 15pq/16$	$pq/8$	$q^2 + 15pq/16$



# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

AA

Aa

aa

F<sub>0</sub>

$$p^2$$

$$2pq$$

$$q^2$$

F<sub>1</sub>

0

1/2

1/2

$$+ pq/2$$

F<sub>2</sub>

0

1/4

1/2

$$+ 3pq/4$$

F<sub>3</sub>

0

1/8

3/4

$$+ 7pq/8$$

F<sub>4</sub>

$$p^2 + 15pq/16$$

$$pq/8$$

$$q^2 +$$

$$15pq/16$$

As frequências alélicas mudam?

# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

As frequências alélicas mudam?

$$F_4 \quad p^2 + 15pq/16 \quad pq/8 \quad q^2 + 15pq/16$$

$$p = p^2 + 15pq/16 + 1/2[pq/8]$$

# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

As frequências alélicas mudam?

$$p = p^2 + 15pq/16 + 1/2[pq/8]$$

$$p = p^2 + 15pq/16 + pq/16$$

$$p = p^2 + pq \qquad p = p^2 + p(1-p)$$

# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

As frequências alélicas mudam?

$$p = p^2 + p(1-p)$$

$$p = p^2 + p - p^2$$

$$p = p$$

# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

As frequências alélicas mudam? NÃO!

ENDOGAMIA não causa mudanças nas freq. alélicas!

# Endocruzamento

auto-fecundação - caso extremo!

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

**ENDOGAMIA por si só NÃO  
é um mecanismo evolutivo!**

**No entanto, endogamia tem consequências evolutivas  
drásticas!!!!**

# Endocruzamento

## Como estimar?

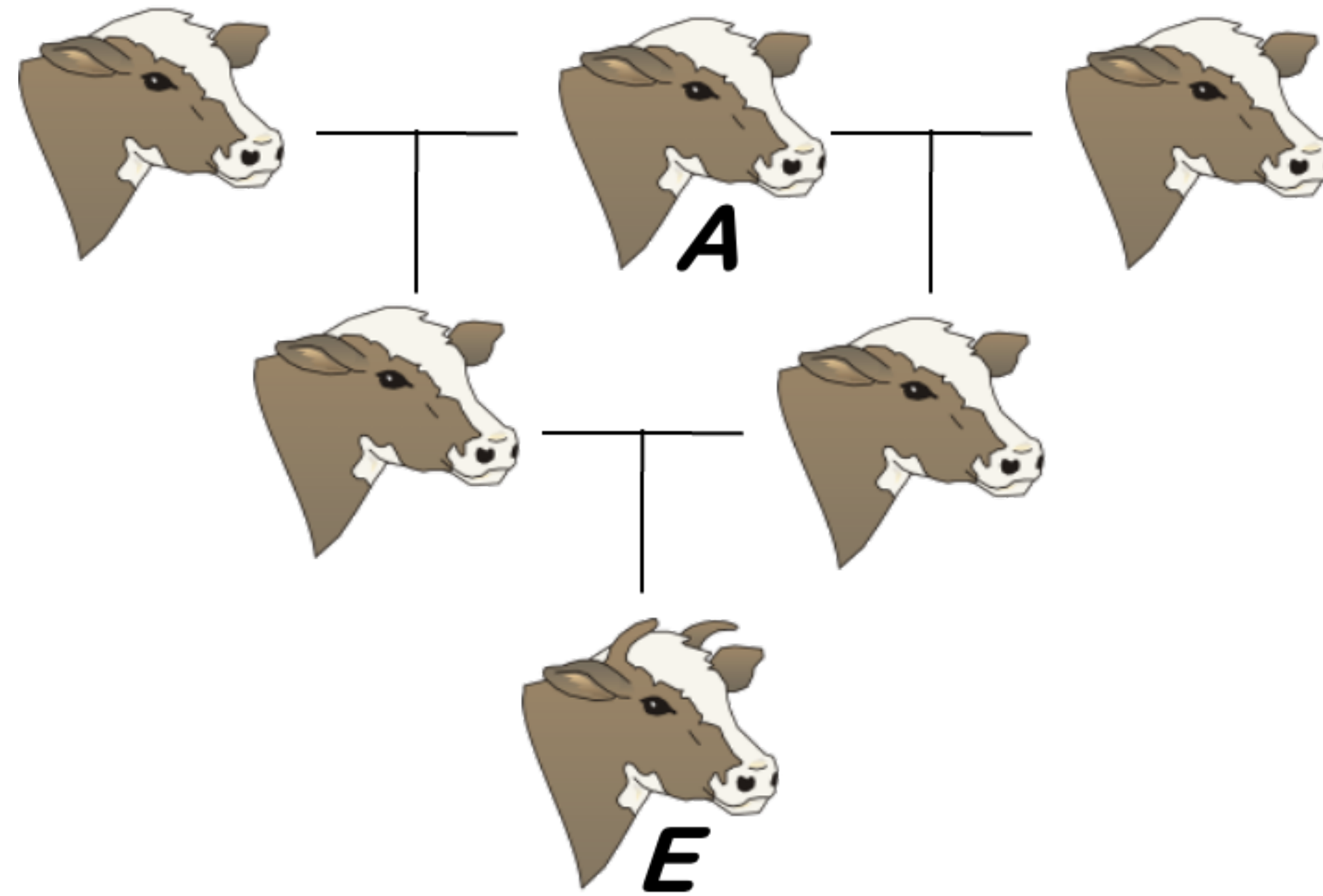
- Endocruzamentos menos extremos que auto-fecundação também geram um excesso de homozigotos mas numa taxa mais devagar!

**F = coeficiente de endogamia**

**Probabilidade de que dois alelos de um indivíduo sejam idênticos por ancestralidade.**

# Endocruzamento

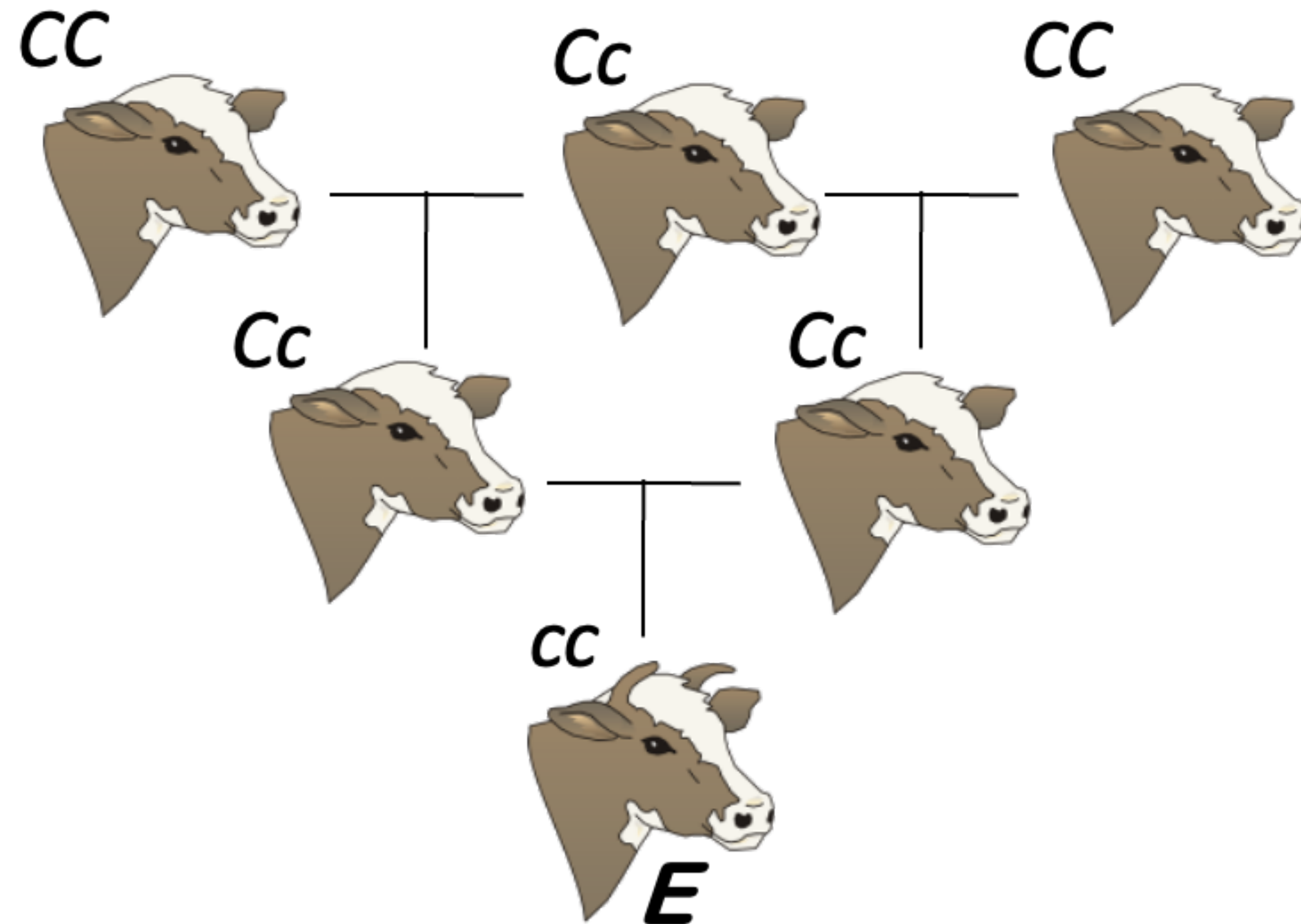
Estimando F





# Endocruzamento

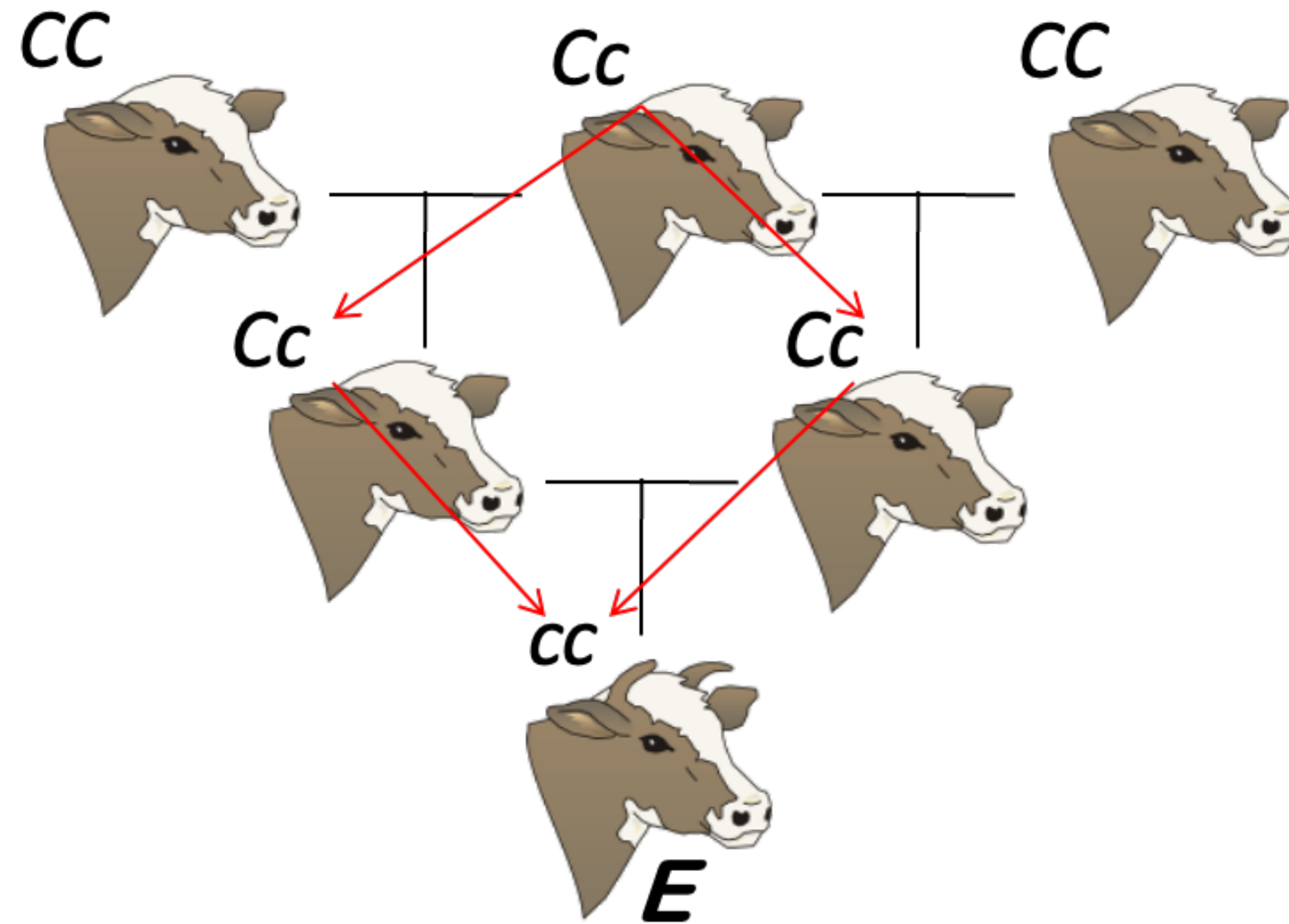
## Estimando F



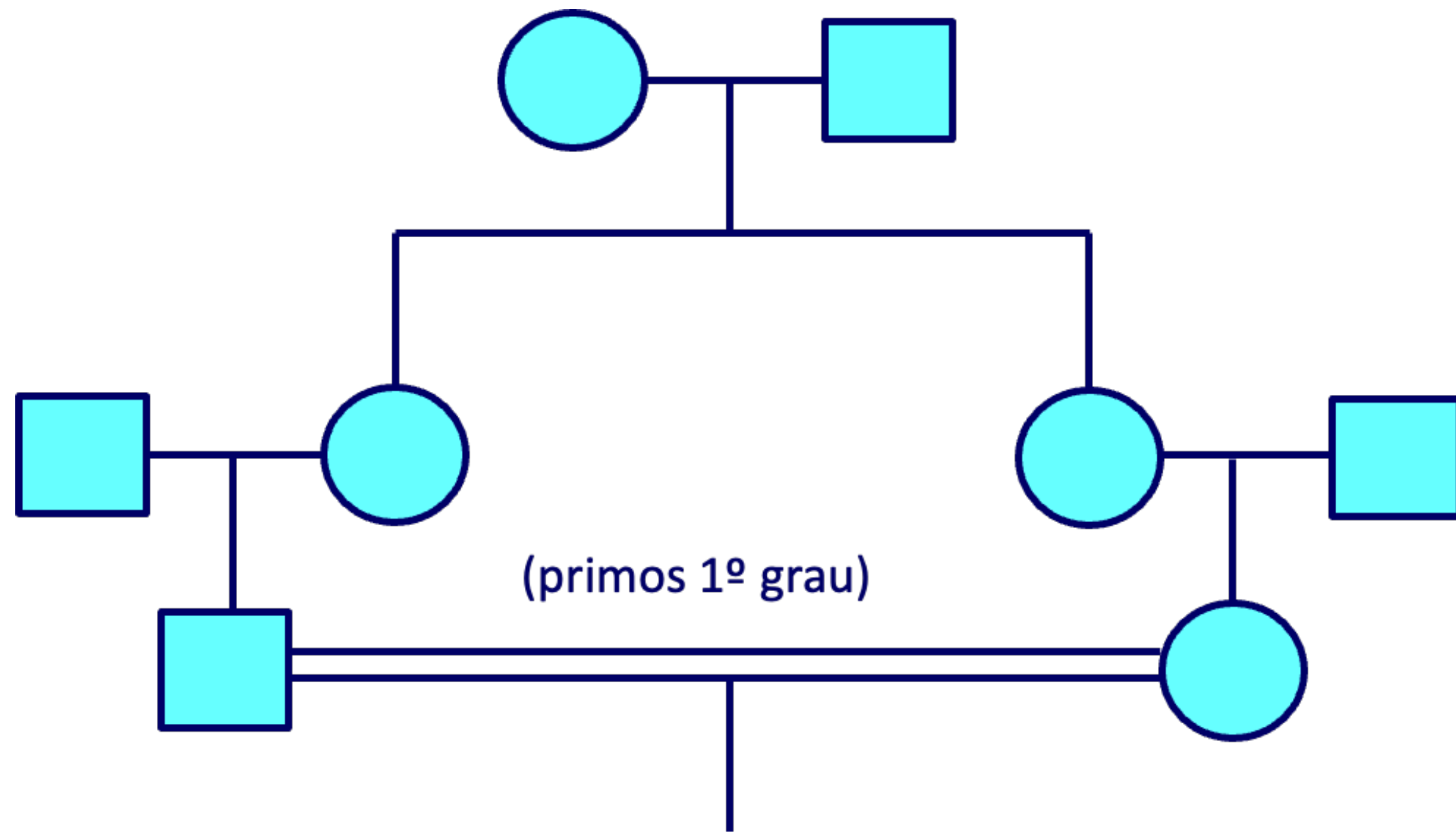
O indivíduo E é endocruzado pois ambos alelos em um dado loco, C, pode ter descendido de um único parental (ou ancestral), A.

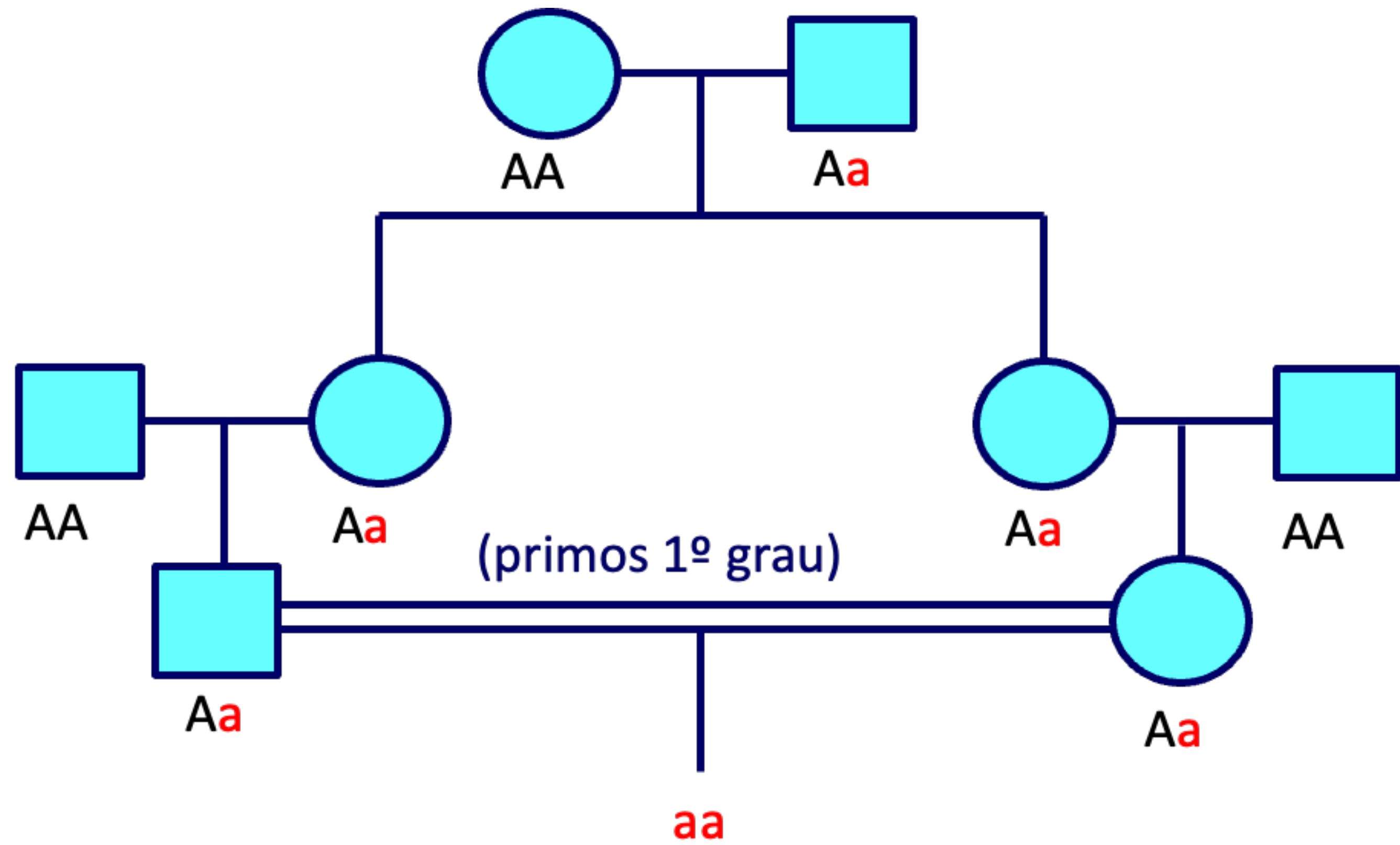
# Endocruzamento

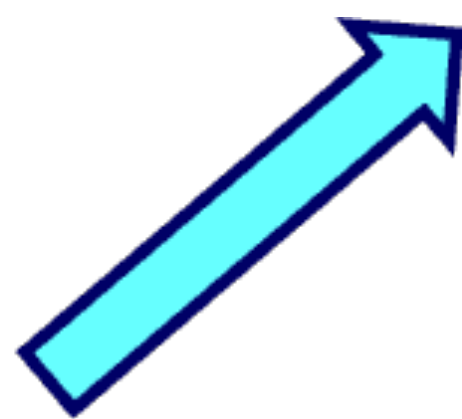
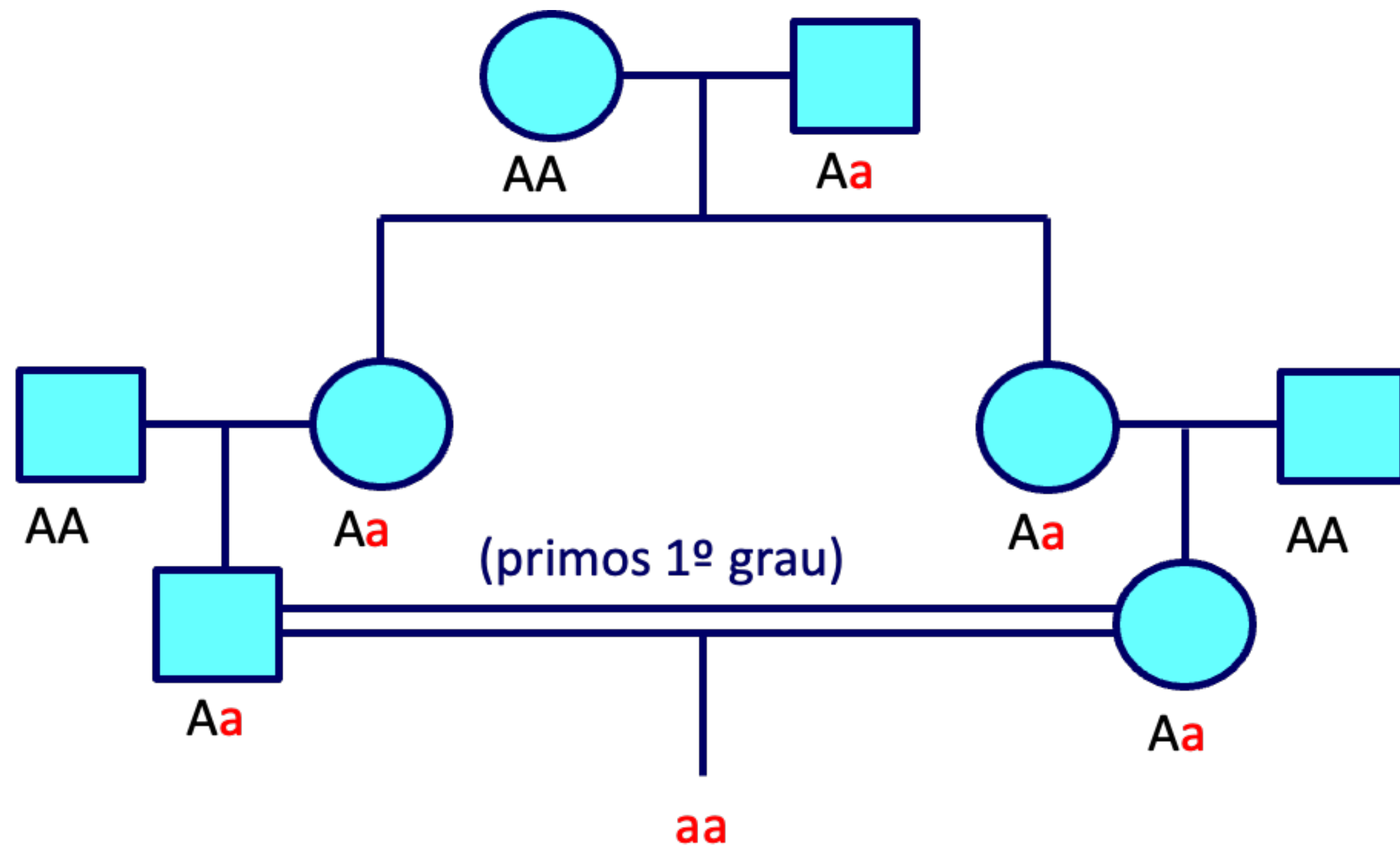
## Estimando F



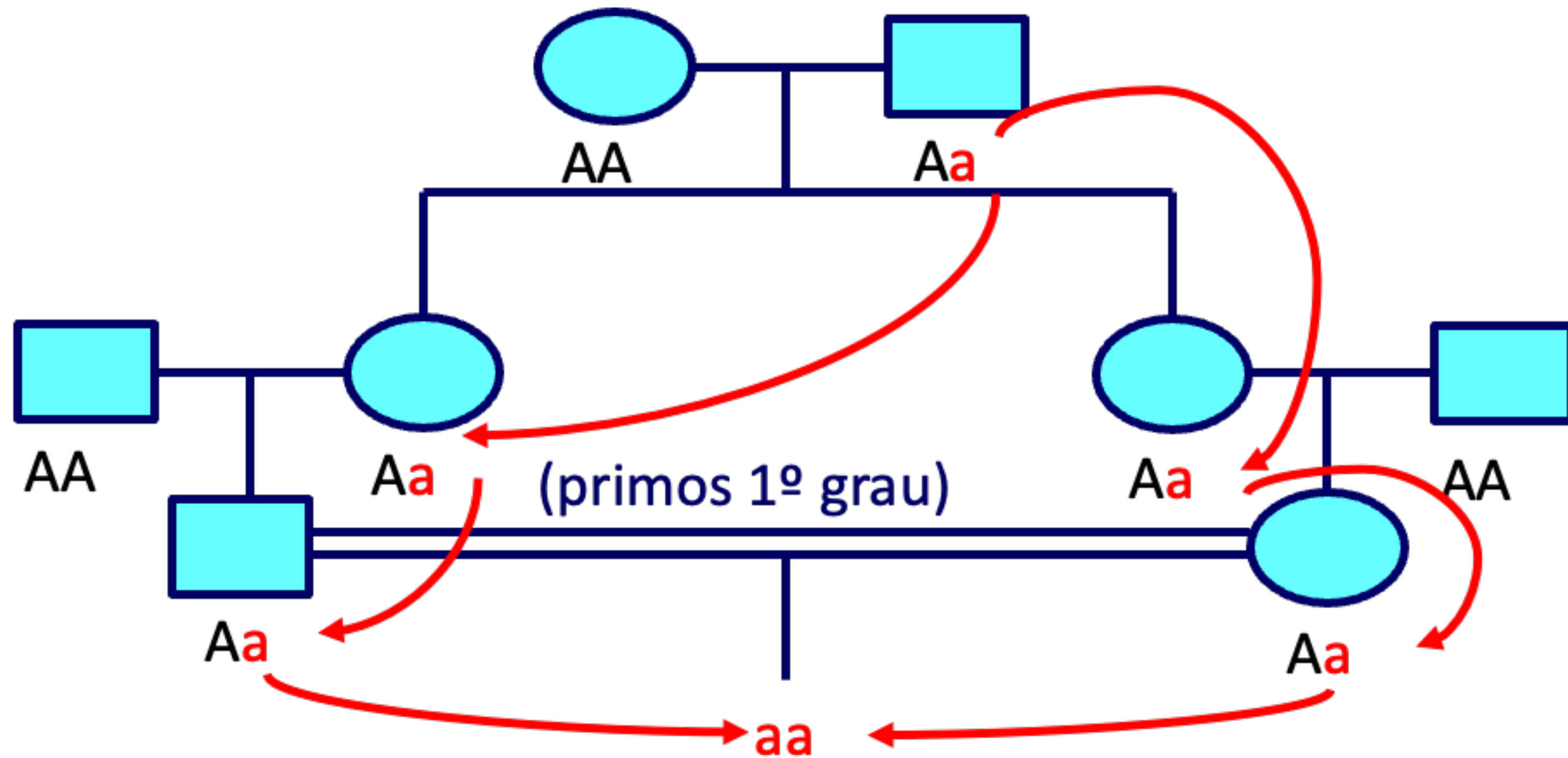
O indivíduo E é endocruzado pois ambos alelos em um dado loco, C, pode ter descendido de um único parental (ou ancestral), A.







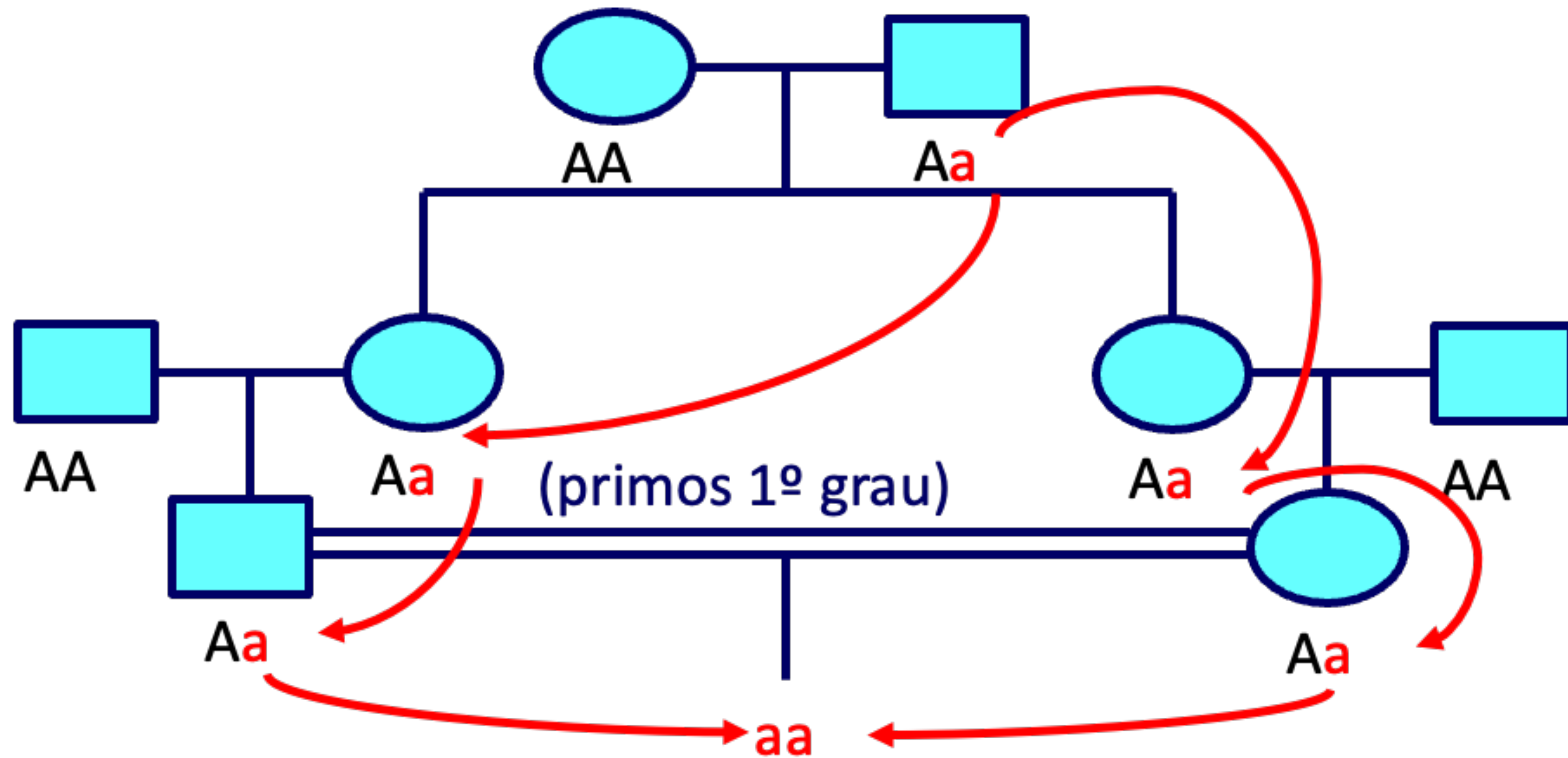
autozigoto



Probabilidade de um determinado alelo tornar-se autozigoto

autozigoto

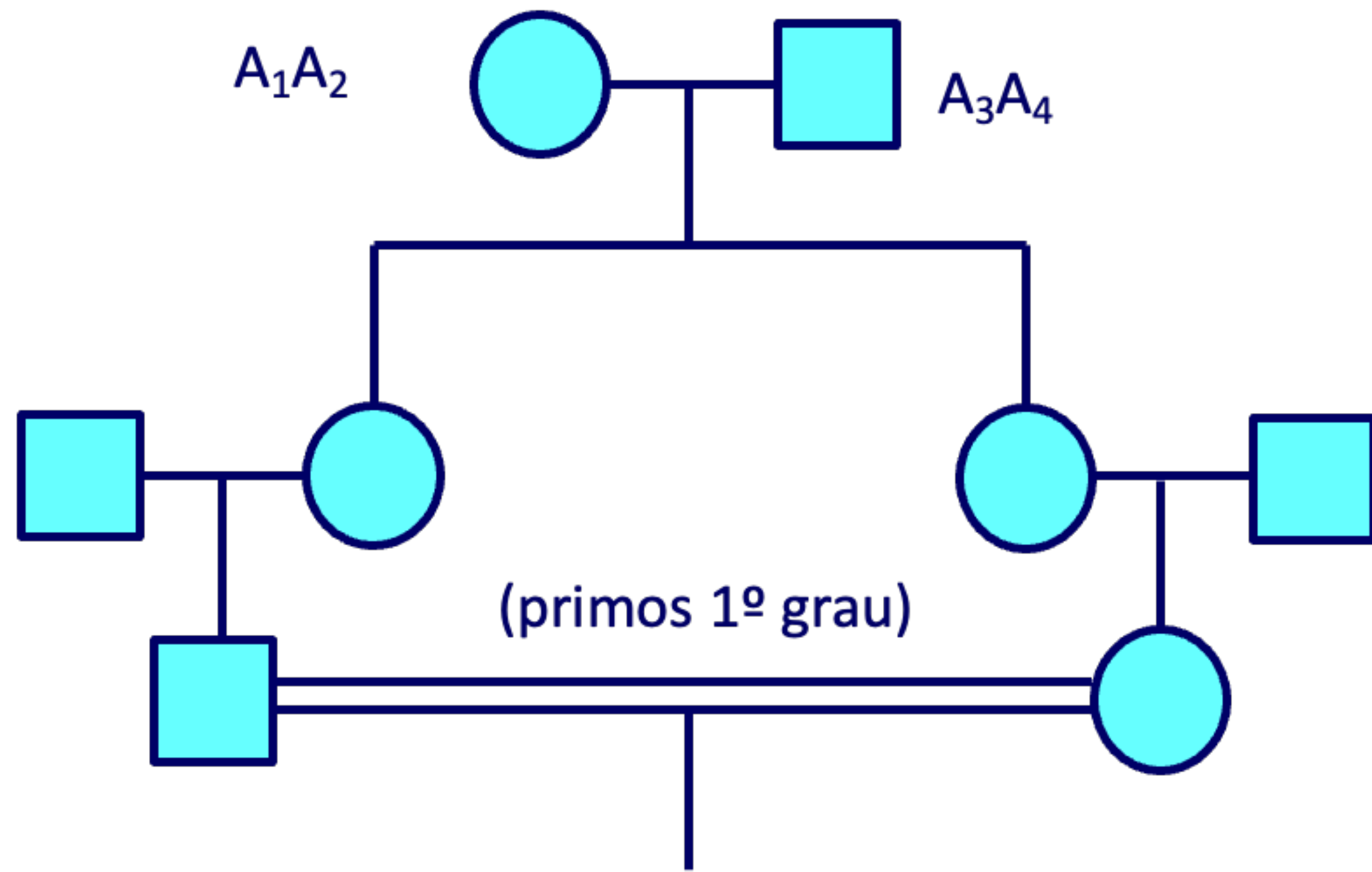
$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \left(\frac{1}{2}\right)^6 = \frac{1}{64}$$



Probabilidade de um determinado alelo tornar-se autozigoto

$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \left(\frac{1}{2}\right)^6 = \frac{1}{64}$$





Probabilidade de qualquer um dos alelos presentes ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  ou  $A_4$ ) nos avós entrar em autozigose

$$\frac{1}{64} \times 4 = \frac{1}{16}$$

(coeficiente de endocruzamento)





# Endocruzamento

## Estimando F

Coeficientes de endocruzamento de indivíduos que resultam de cruzamento entre:

- Pais com filhas, mães com filhos ou entre irmãos:  $F = 1/4$
- Meio-irmãos, primos duplos em primeiro grau ou de tios(as) com sobrinhos(as)  $F = 1/8$
- Tios(as) e meia(o)-sobrinhas(os) ou primos em primeiro grau  $F = 1/16$
- Primos em segundo grau  $F = 1/32$
- Primos em terceiro grau  $F = 1/64$

# Adicionando endocruzamento a H-W

$$p = \text{freq}(A)$$

$$q = \text{freq}(a)$$

$F$  = fração dos alelos na população idênticos por descendência

$1-F$  = fração dos alelos na população não idênticos por descendência

# Adicionando endocruzamiento a H-W

$$p = \text{freq}(A)$$

$$q = \text{freq}(a)$$

$$F(AA) =$$

# Adicionando endocruzamiento a H-W

$$p = \text{freq}(A)$$

$$q = \text{freq}(a)$$

$$F(AA) = p \times p(1-F)$$

# Adicionando endocruzamiento a H-W

$$p = \text{freq}(A)$$

$$q = \text{freq}(a)$$

$$F(AA) = p \times p(1-F) + p \times F$$

# Adicionando endocruzamiento a H-W

$$p = \text{freq}(A)$$

$$q = \text{freq}(a)$$

$$F(AA) = p \times p(1-F) + p \times F$$

$$F(AA) = p^2(1-F) + pF$$

# Adicionando endocruzamiento a H-W

$$p = \text{freq}(A)$$

$$q = \text{freq}(a)$$

$$F(AA) = p \times p(1-F) + p \times F$$

$$F(AA) = p^2(1-F) + pF$$

$$F(aa) = q^2(1-F) + qF$$



# Adicionando endocruzamiento a H-W

$$p = \text{freq}(A)$$

$$q = \text{freq}(a)$$

$$F(AA) = p \times p(1-F) + p \times F$$

$$F(AA) = p^2(1-F) + pF$$

$$F(aa) = q^2(1-F) + qF$$

$$F(Aa) = pq(1-F) + qp(1-F) = 2pq(1-F)$$

# Adicionando endocruzamento a H-W

$$p = \text{freq}(A)$$

$$q = \text{freq}(a)$$

$$F(AA) = p \times p(1-F) + p \times F$$

$$F(AA) = p^2(1-F) + pF$$

$$F(aa) = q^2(1-F) + qF$$

$$F(Aa) = pq(1-F) + qp(1-F) = 2pq(1-F)$$

Se  $F=0$

Se  $F=0.5$

# Adicionando endocruzamiento a H-W

$$p = \text{freq}(A)$$

$$q = \text{freq}(a)$$

$$F(AA) = p \times p(1-F) + p \times F$$

$$F(AA) = p^2 - p^2F + pF = p^2 + pF(1-p) = p^2 + pqF$$

$$F(Aa) = q^2 + pqF$$

# Adicionando endocruzamiento a H-W

$$p = \text{freq}(A)$$

$$q = \text{freq}(a)$$

$$F(AA) = p^2 + pqF$$

$$F(Aa) = 2pq - 2Fpq$$

$$F(Aa) = q^2 + pqF$$

# Adicionando endocruzamiento a H-W

$$p = \text{freq}(A)$$

$$q = \text{freq}(a)$$

$$F(AA) = p^2 + pqF$$

$$F(Aa) = 2pq - 2Fpq$$

$$F(aa) = q^2 + pqF$$

Coeficiente F de Wright!

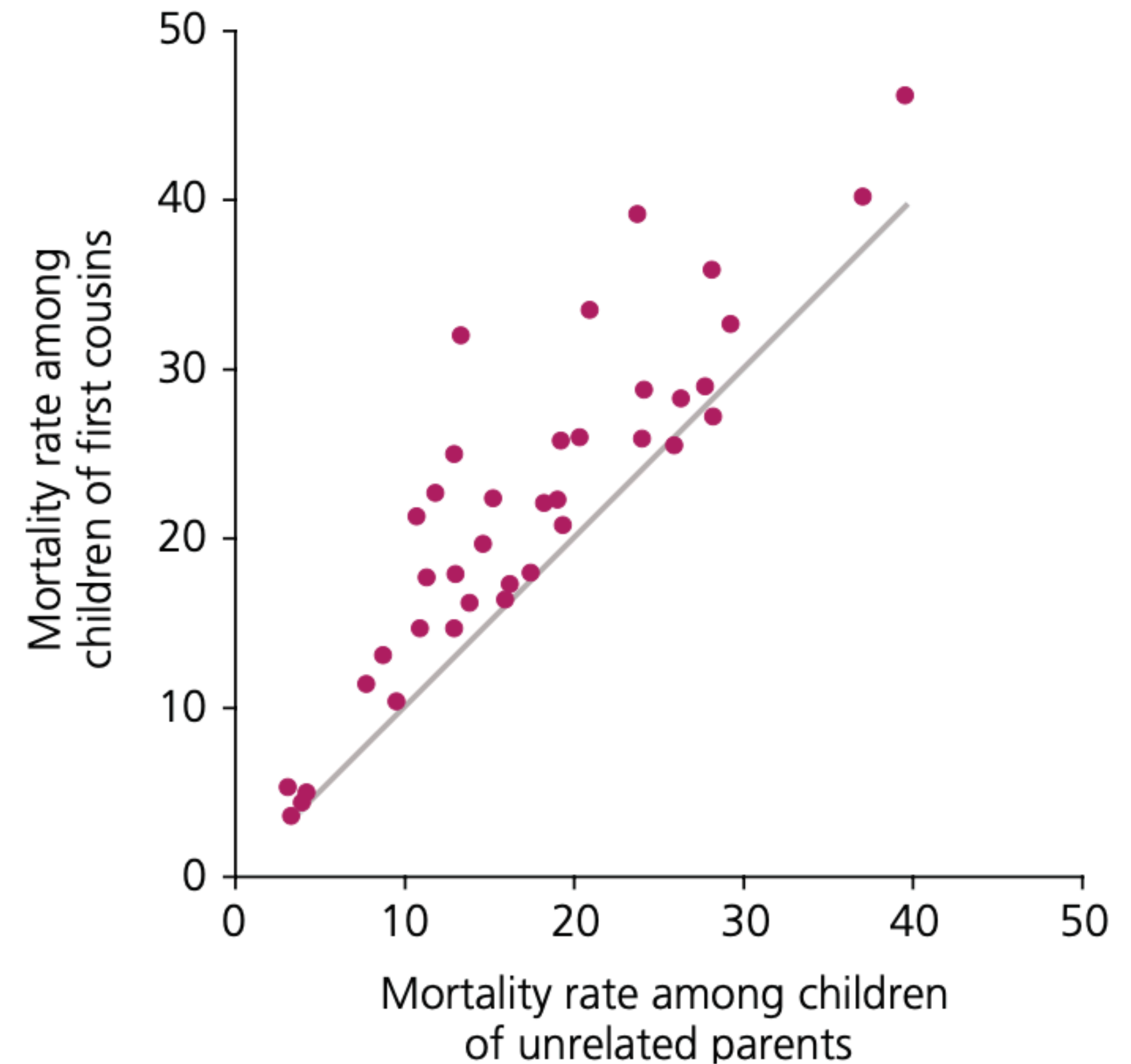
# **Depressão endogâmica**

## **efeitos evolutivos de endogamia**

# Depressão endogâmica

## efeitos evolutivos de endogamia

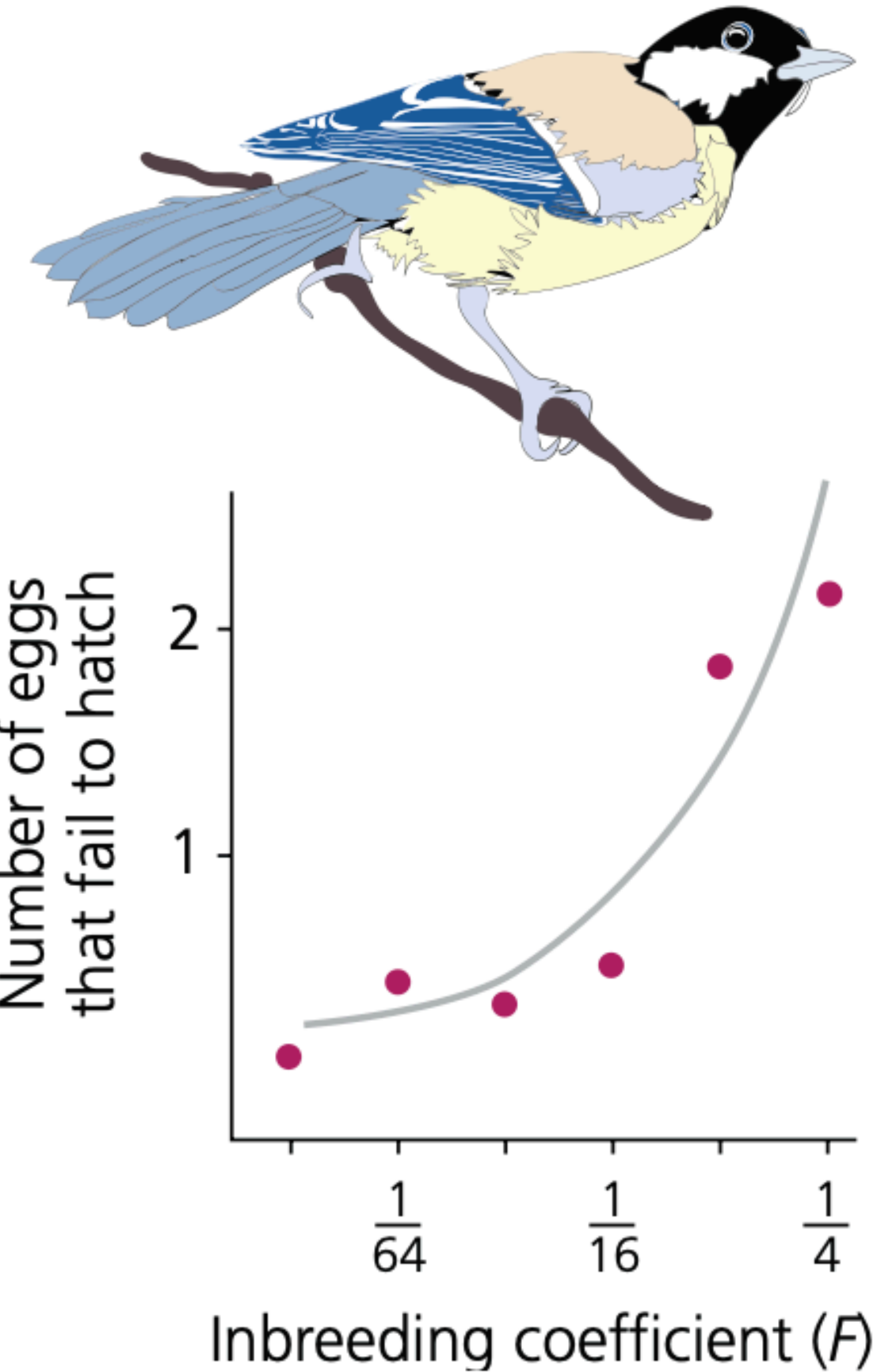
- Exposição de alelos deletérios a seleção natural!



# Depressão endogâmica

## efeitos evolutivos de endogamia

- Exposição de alelos deletérios a seleção natural!





# Depressão endogâmica

## efeitos evolutivos de endogamia

- Exposição de alelos deletérios a seleção natural! — Risco extinção!



# Depressão endogâmica

## efeitos evolutivos de endogamia

- Exposição de alelos deletérios a seleção natural! — Risco extinção!



### Heterozigidade

### Regiões genéticas desprovidas de Heterozigidade

indicação de  
endogamia



# Depressão endogâmica

## efeitos evolutivos de endogamia

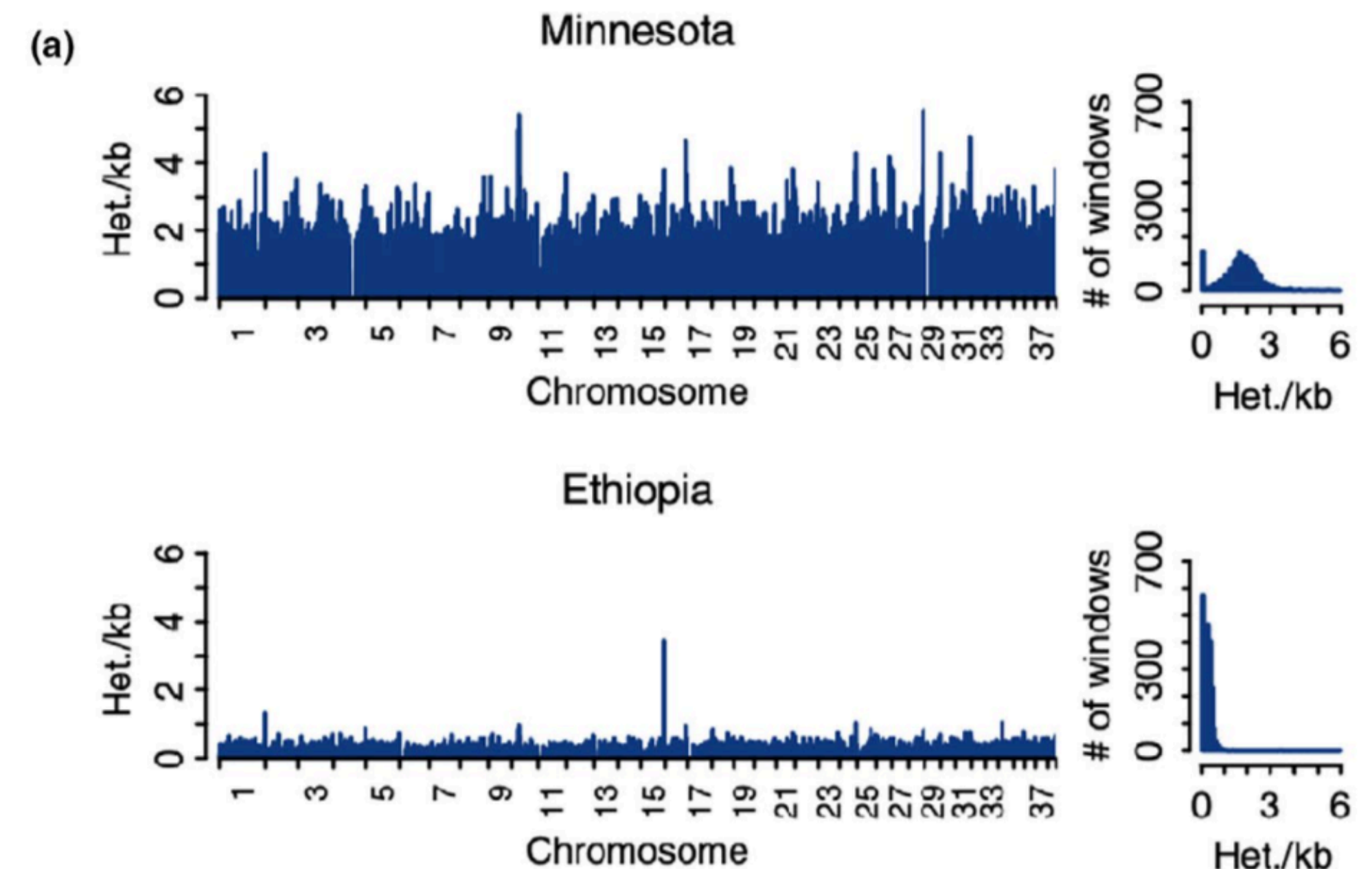
- Exposição de alelos deletérios a seleção natural! — Risco extinção!



## Heterozigidade

## Regiões genéticas desprovidas de Heterozigidade

indicação de endogamia



# Depressão endogâmica

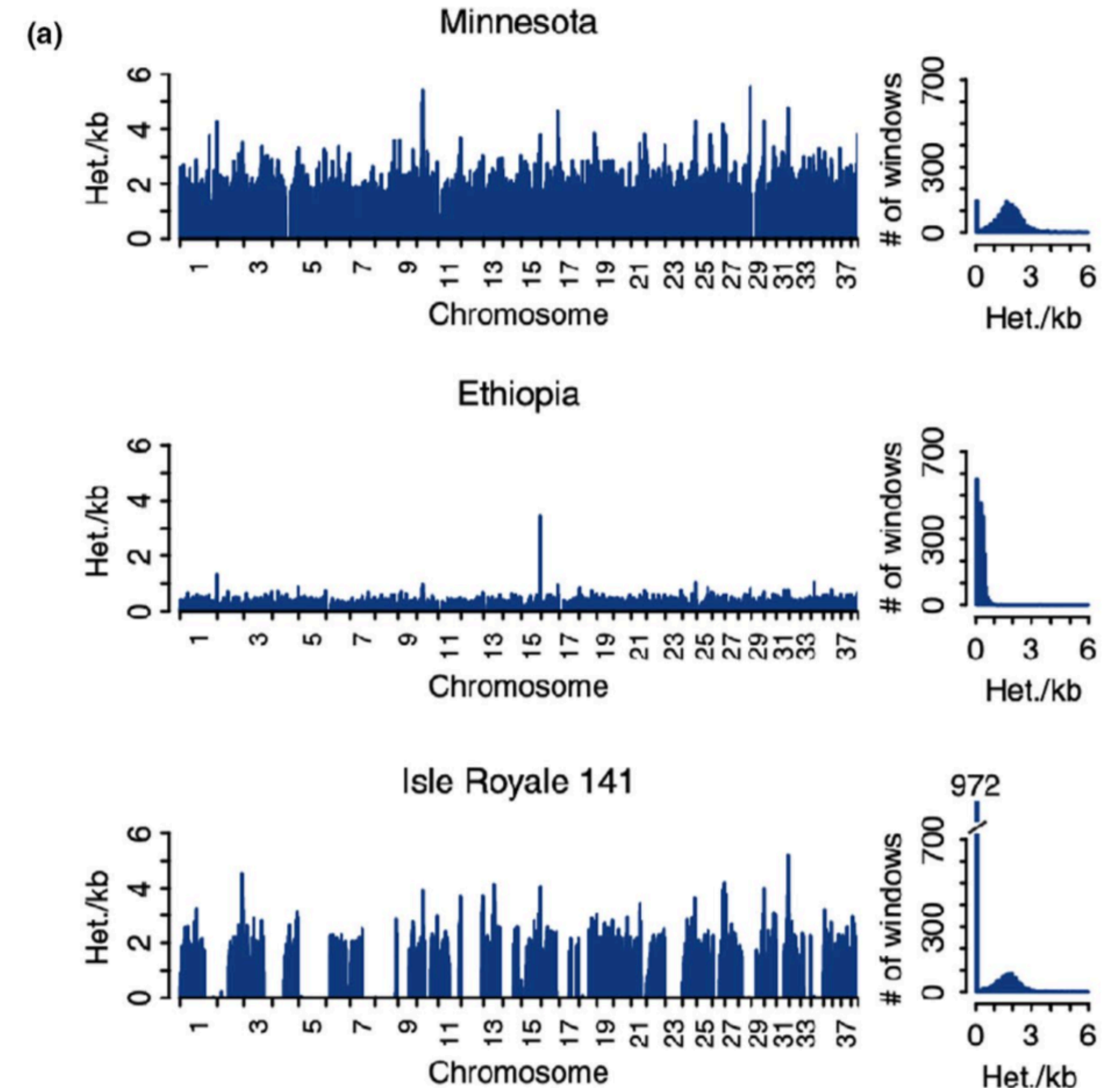
## efeitos evolutivos de endogamia

- Exposição de alelos deletérios a seleção natural! — Risco extinção!

### Heterozigozidade

### Regiões genéticas desprovidas de Heterozigozidade

indicação de endogamia





# Depressão endogâmica

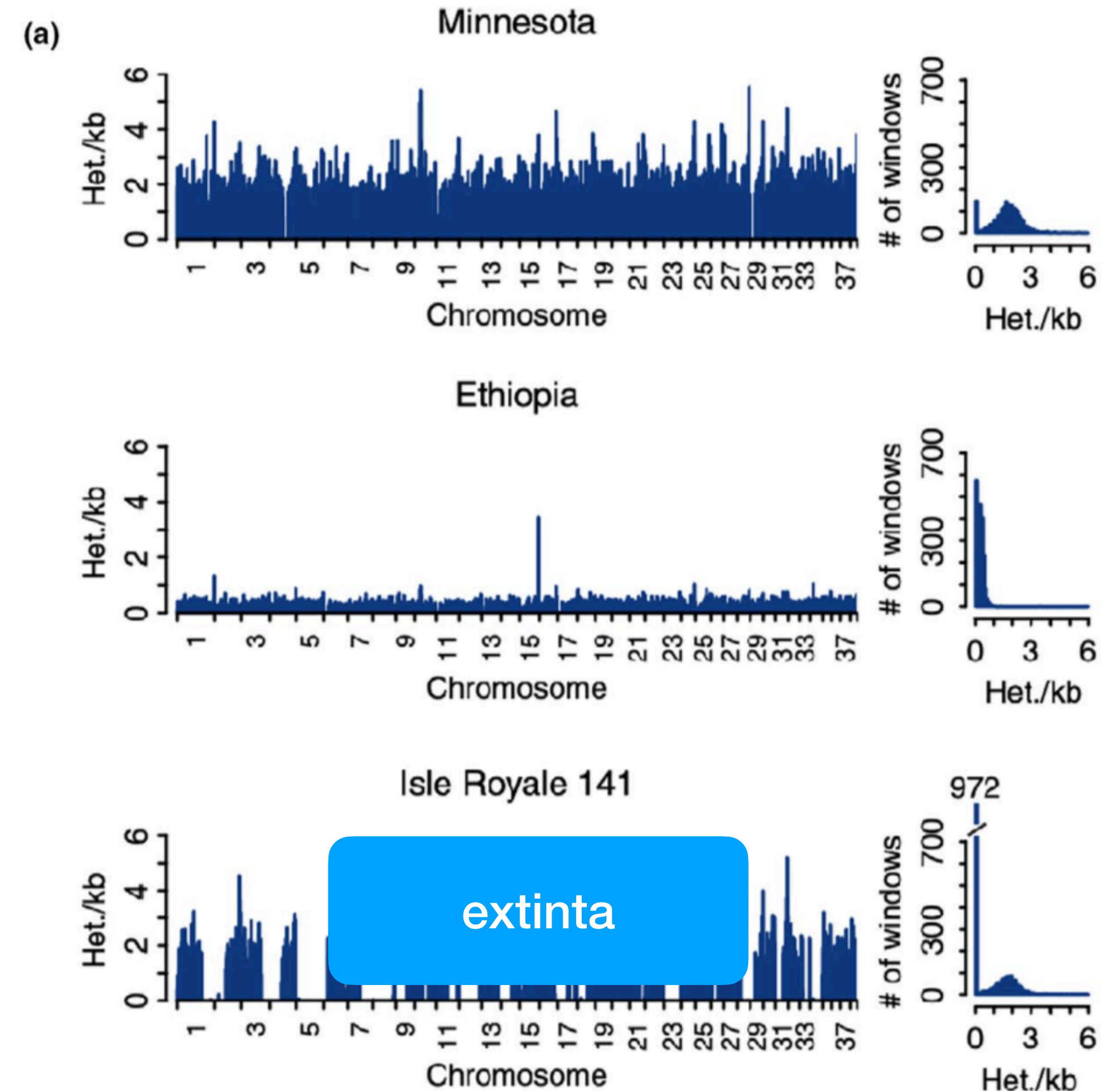
## efeitos evolutivos de endogamia

- Exposição de alelos deletérios a seleção natural! — Risco extinção!

### Heterozigozidade

### Regiões genéticas desprovidas de Heterozigozidade

indicação de endogamia

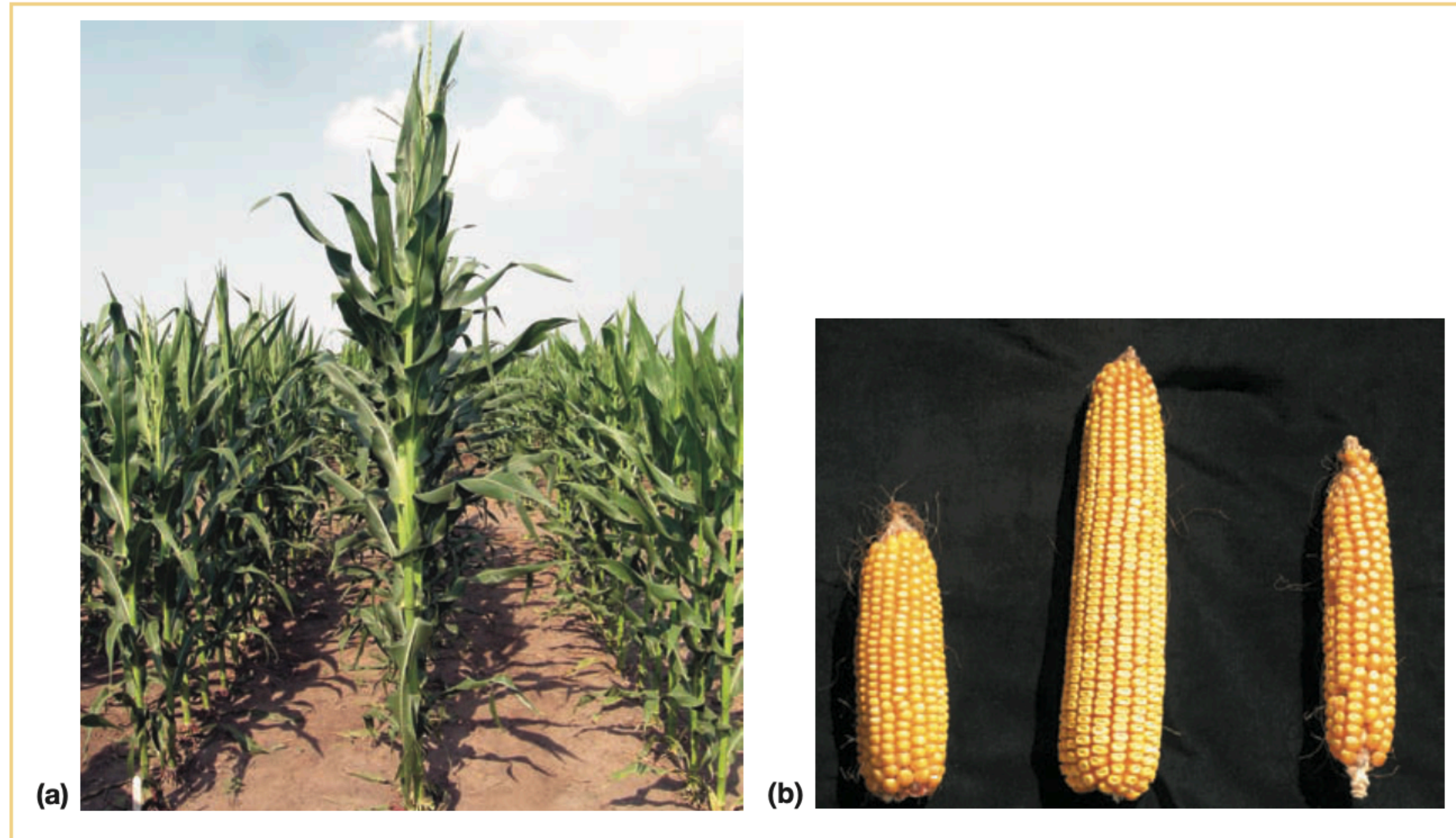




# Heterose

## Vigor do híbrido

Hybrid vigor in corn



É o fenômeno no qual a F1 possui características fenotípicas superiores a média dos dois parentais ou superior que os dois parentais

**FIGURE 3-6** Multiple heterozygous hybrid flanked by the two pure lines crossed to make it. (a) The plants. (b) Cobs from the same plants. [(a) Photo courtesy of Jun Cao, Schnable Laboratory, Iowa State University; (b) Deana Namuth-Covert, PhD, Univ. of Nebraska.]



# Heterose

## Vigor do híbrido

(a) *Brassica oleracea*  
(wild cabbage)

*Brassica rapa*  
(wild turnip)

×  
↓  
*Brassica napus*  
(rapeseed)





# Heterose

## Vigor do híbrido

**DOMINÂNCIA:** complementação  
de alelos deletérios

**SOBREDOMINÂNCIA:** vantagem do  
heterozigoto

(a) *Brassica oleracea*  
(wild cabbage)

*Brassica rapa*  
(wild turnip)

×  
↓  
*Brassica napus*  
(rapeseed)





# Exemplo de livro texto de depressão endogâmica



**PUG**

*at higher risk for:*

**BREATHING PROBLEMS**  
(narrow nasal cavities)

**DIABETES AND EXERCISE INTOLERANCE LEADING TO OBESITY**

**SPINA BIFIDA, LINKED TO THE CURLED TAIL**  
(breeding standard instructs, "The tail is curled as tightly as possible over the hip.")

**RECURRENT OR CHRONIC INFLAMMATION OF THE BRAIN**  
(encephalitis), causing seizures, blindness, head tilt, and other painful symptoms

**DISLOCATION**  
(luxating patella)

**PETA**

Dog photo ©iv22 / Dollar Photo Club

The infographic features a central image of a pug puppy sitting on a light blue circular background. The puppy is facing left. Surrounding the puppy are six text boxes, each connected to the puppy by a dotted line. The text boxes are arranged in two columns. The top-left box is titled 'BREATHING PROBLEMS' and mentions 'narrow nasal cavities'. The middle-left box is titled 'DIABETES AND EXERCISE INTOLERANCE LEADING TO OBESITY'. The bottom-left box is titled 'SPINA BIFIDA, LINKED TO THE CURLED TAIL' and includes a quote from the breeding standard: 'The tail is curled as tightly as possible over the hip.' The top-right box is titled 'RECURRENT OR CHRONIC INFLAMMATION OF THE BRAIN' and lists symptoms like seizures, blindness, and head tilt. The bottom-right box is titled 'DISLOCATION' and specifies '(luxating patella)'. At the bottom center is the PETA logo, and at the bottom right is a small credit line: 'Dog photo ©iv22 / Dollar Photo Club'.

# Exemplo de livro texto de Heterose

