



ME414 - Estatística para Experimentalistas

Parte 7

Probabilidade Condicional e Independência

Probabilidade Condicional

Probabilidade Condicional: encontrar a probabilidade de um evento quando você tem alguma outra informação sobre o evento.

- Considere o lançamento de dois dados. Espaço amostral na figura abaixo.
- Considere que cada resultado tenha a mesma chance de ocorrer: $1/36$.
- Suponha que você lance primeiro um dos dados e o resultado é 4.
- Qual a probabilidade de que a soma dos resultados dos dois dados seja 10?

1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6
3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6
4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6
5-1	5-2	5-3	5-4	5-5	5-6
6-1	6-2	6-3	6-4	6-5	6-6

Probabilidade Condicional

Como saiu 4 no primeiro dado, há 6 resultados possíveis:

$$\Omega_1 = \{(4, 1), (4, 2), (4, 3), (4, 4), (4, 5), (4, 6)\}$$

Cada resultado tem a mesma probabilidade de ocorrer: $1/6$.

Dado que o primeiro dado teve resultado 4, então a probabilidade de cada evento em Ω_1 tem igual chance de ocorrer.

Considere os eventos:

$B = \{\text{a soma dos dados é igual a } 10\}$

$A = \{\text{no primeiro dado saiu } 4\}$

Definimos a **probabilidade condicional de B dado A** por:

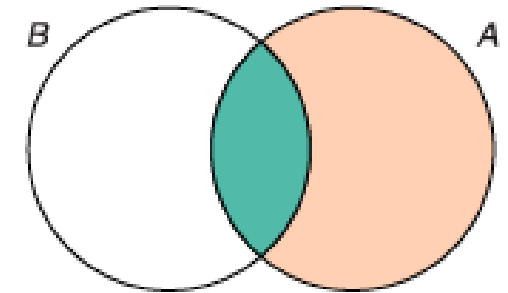
$$P(B | A)$$

Probabilidade Condicional

Suponha que o resultado do experimento esteja contido no evento A .

Para que o resultado esteja também no evento B , ele precisa necessariamente estar tanto em A quanto em B , ou seja, precisa estar em $A \cap B$.

Mas, como sabíamos desde o início que o resultado estava em A , nosso espaço amostral agora é reduzido para somente os elementos de A e então:



$$P(B | A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$$

Exemplo: Lançamento de dois dados

Voltando ao exemplo dos dois dados.

- Seja o evento $A = \{\text{no primeiro dado saiu } 4\}$.

$$A = \{(4, 1), (4, 2), (4, 3), (4, 4), (4, 5), (4, 6)\}$$

- Seja o evento $B = \{\text{a soma dos dados é igual a } 10\}$

$$B = \{(4, 6), (5, 5), (6, 4)\}$$

- Então $A \cap B = \{(4, 6)\}$. Portanto:

$$P(B \mid A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} = \frac{1/36}{6/36} = \frac{1}{6}$$

Exemplo: Qual a chance de cair na malha fina?

80.2 milhões de declarações.

Renda x Caiu na Malha Fina?

	Sim	Não	Total
D - abaixo de 25.000	90	14010	14100
C - 25.000 a 49.999	71	30629	30700
B - 50.000 a 99.999	69	24631	24700
A - acima de 100.000	80	10620	10700
Total	310	79890	80200

Para simplificar, uma frequência de 90 representa 90.000.

Exemplo: Qual a chance de cair na malha fina?

Espaço amostral:

$$\Omega = \{(A, \text{sim}), (A, \text{não}), (B, \text{sim}), (B, \text{não}), (C, \text{sim}), (C, \text{não}), (D, \text{sim}), (D, \text{não})\}$$

Qual a probabilidade de cair na malha fina se a renda for acima de 100.000?

Considere os eventos:

- $\mathcal{A} = \{\text{caiu na malha fina}\} = \{(A, \text{sim}), (B, \text{sim}), (C, \text{sim}), (D, \text{sim})\}$
- $\mathcal{B} = \{\text{renda acima de 100.000}\} = \{(A, \text{sim}), (A, \text{não})\}$

$$\begin{aligned} P(\mathcal{A} \mid \mathcal{B}) &= \frac{P(\mathcal{A} \cap \mathcal{B})}{P(\mathcal{B})} = \frac{P(\{(A, \text{sim})\})}{P(\{(A, \text{sim}), (A, \text{não})\})} \\ &= \frac{80/80200}{10700/80200} = 0.007 \end{aligned}$$

Exemplo: Qual a chance de cair na malha fina?

Probabilidade condicional por faixa de renda em 2002

Renda X Caiu na Malha Fina?	Sim	Não	Total
D - abaixo de 25.000	90/14100	14010/14100	14100/14100
C - 25.000 a 49.999	71/30700	30629/30700	30700/30700
B - 50.000 a 99.999	69/24700	24631/24700	24700/24700
A - acima de 100.000	80/10700	10620/10700	10700/10700

Exemplo: Qual a chance de cair na malha fina?

Probabilidade condicional por faixa de renda em 2002

Renda X Caiu na Malha Fina?	Sim	Não	Total
D - abaixo de 25.000	0.006	0.994	1
C - 25.000 a 49.999	0.002	0.998	1
B - 50.000 a 99.999	0.003	0.997	1
A - acima de 100.000	0.007	0.993	1

Independência

Vimos que:

$$P(B | A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$$

Regra da multiplicação:

$$P(A \cap B) = P(A)P(B | A)$$

Quando $P(B | A) = P(B)$ (informação sobre A não altera a probabilidade do evento B), dizemos que B e A são **independentes**. Neste caso:

$$P(A \cap B) = P(A)P(B)$$

Exemplo

Considere o lançamento de dois dados “justos” (36 resultados possíveis têm a mesma probabilidade de ocorrer).

Considere os eventos:

- A : primeiro dado tem resultado 3.
- B : soma dos dados é igual a 8.
- C : soma dos dados é igual a 7.

Perguntas:

- Eventos A e B são independentes?
- E os eventos A e C são independentes?

Exemplo

Eventos A e B são independentes?

$$P(A \cap B) = P(\{(3, 5)\}) = \frac{1}{36}$$

$$P(A) = P(\{(3, 1), (3, 2), (3, 3), (3, 4), (3, 5), (3, 6)\}) = \frac{6}{36}$$

$$P(B) = P(\{(2, 6), (3, 5), (4, 4), (5, 3), (6, 2)\}) = \frac{5}{36}$$

$$P(A \cap B) = \frac{1}{36} \neq P(A) \times P(B) = \frac{6}{36} \times \frac{5}{36}$$

Portanto, A e B não são eventos independentes.

Exemplo

E os eventos A e C são independentes?

$$P(A \cap C) = P(\{(3, 4)\}) = \frac{1}{36}$$

$$P(A) = P(\{(3, 1), (3, 2), (3, 3), (3, 4), (3, 5), (3, 6)\}) = \frac{6}{36}$$

$$P(C) = P(\{(1, 6), (2, 5), (3, 4), (4, 3), (5, 2), (6, 1)\}) = \frac{6}{36}$$

$$P(A \cap C) = \frac{1}{36} = P(A) \times P(C) = \frac{6}{36} \times \frac{6}{36}$$

Portanto, A e C são eventos independentes.

Exemplo

Suponha que A e B sejam dois eventos disjuntos.

Suponha que $P(A) > 0$ e $P(B) > 0$.

A e B são independentes?

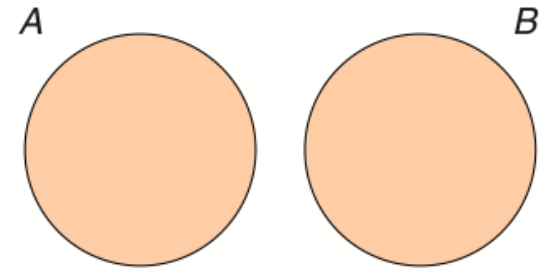
A e B são disjuntos, então $A \cap B = \emptyset$ e $P(A \cap B) = 0$.

$P(A) > 0$ e $P(B) > 0$, portanto:

$$P(A \cap B) = 0 \neq P(A)P(B).$$

A e B não são independentes.

Além disso: $P(B | A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} = 0$, ou seja, dado que A ocorre, B não ocorre.



Exemplo

Em uma família com duas crianças, considere os eventos:

- $A = \{\text{a primeira criança é uma menina}\}$
- $B = \{\text{as duas crianças são meninas}\}$.

Qual a $P(B | A)$?

$$\Omega = \{FF, MM, FM, MF\}$$

$$A = \{FF, FM\} \quad B = \{FF\} \quad \implies \quad B \cap A = B$$

Portanto,

$$P(B | A) = \frac{P(B \cap A)}{P(A)} = \frac{P(\{FF\})}{P(\{FF, FM\})} = \frac{1/4}{1/2} = 1/2$$

Exemplo

Em uma família com duas crianças, considere os eventos:

- $A = \{\text{a primeira criança é uma menina}\}$
- $B = \{\text{as duas crianças são meninas}\}$.

A e B são eventos independentes?

$$\Omega = \{FF, MM, FM, MF\}$$

$$A = \{FF, FM\} \quad B = \{FF\} \quad \implies \quad B \cap A = B$$

Então, $P(B \cap A) = P(B) = \frac{1}{4}$ e

$$P(A)P(B) = \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{8} \neq P(B \cap A)$$

Portanto, A e B não são independentes.

Chutar as respostas e ainda passar na prova

Chutar: escolher as respostas ao acaso

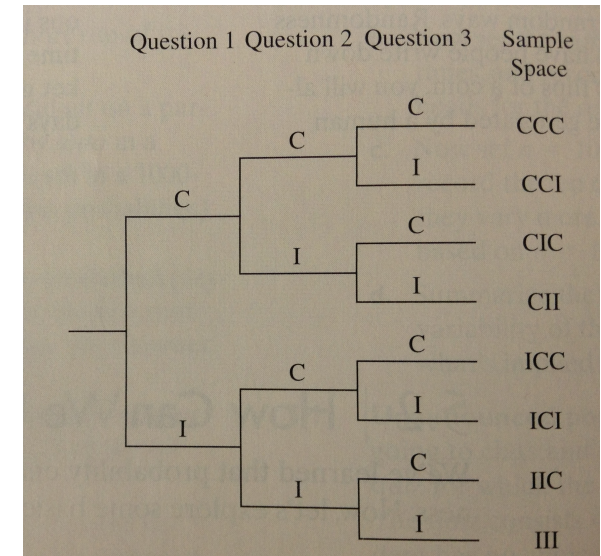
Temos uma prova com três questões de múltipla escolha.

Em cada questão há 5 alternativas, apenas 1 é correta.

Experimento: anotar o resultado do aluno na prova.

Espaço amostral:

$$\Omega = \{CCC, CCI, CIC, CII, ICC, ICI, IIC, III\}$$



Chutar as respostas e ainda passar na prova

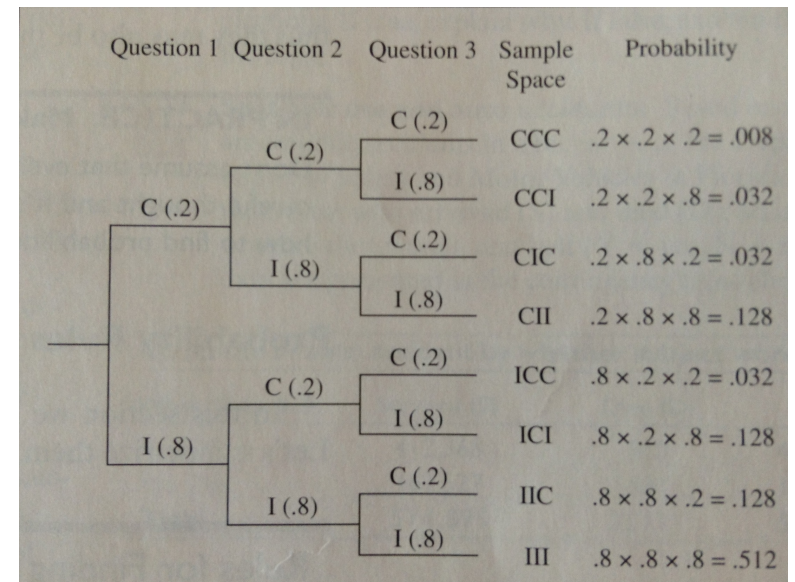
Quais as probabilidades dos eventos do espaço amostral?

Para cada questão:

$$P(C) = 0.2 \quad \text{e} \quad P(I) = 0.8$$

Então, a probabilidade de acertar as três questões é:

$$\begin{aligned} P(CCC) &= P(C) \times P(C) \times P(C) \\ &= (0.2)(0.2)(0.2) \\ &= (0.2)^3 = 0.008 \end{aligned}$$



Qual a probabilidade do aluno acertar pelo menos duas questões?

$$P(CCC) + P(CCI) + P(CIC) + P(ICC) = 0.008 + 3 \times 0.032 = 0.104$$

Cinto de segurança e acidentes

Uso de cinto / Sobreviveu	Sim (S)	Não (\bar{S})	Total
Sim (C)	414368	510	412878
Não (\bar{C})	162527	1601	164128
Total	574895	2111	577006

Qual a probabilidade de que a pessoa morreu no acidente?

$$P(\bar{S}) = \frac{2111}{577006} = 0.004$$

Qual a probabilidade de que a pessoa morreu dado que ela usava o cinto de segurança?

$$P(\bar{S} | C) = \frac{P(\bar{S} \cap C)}{P(C)} = \frac{510}{412878} = 0.001$$

Cinto de segurança e acidentes

Uso de cinto / Sobreviveu	Sim (S)	Não (\bar{S})	Total
Sim (C)	414368	510	412878
Não (\bar{C})	162527	1601	164128
Total	574895	2111	577006

Qual a probabilidade de que a pessoa morreu dado que ela não usava o cinto de segurança?

$$P(\bar{S} | \bar{C}) = \frac{P(\bar{S} \cap \bar{C})}{P(\bar{C})} = \frac{1601}{164128} = 0.01$$

Morte e uso de cinto são eventos independentes?

$$P(\bar{S}) = \frac{2111}{577006} = 0.004$$

Como $P(\bar{S} | C) \neq P(\bar{S})$, os eventos não são independentes.

Exemplo

Uma sacola contém 10 sementes de flores vermelhas e 5 de flores brancas. Seleccionamos duas sementes ao acaso, uma a uma e sem reposição.

Qual é a probabilidade de que :

- a primeira semente seja vermelha?
- a segunda seja branca se a primeira foi vermelha?

Defina os eventos:

$A = \{a \text{ primeira semente é vermelha}\}$ e $B = \{a \text{ segunda semente é branca}\}$

Então:

$$P(A) = \frac{10}{15} = \frac{2}{3} \quad \text{e} \quad P(B|A) = \frac{5}{14}$$

Teorema de Bayes

Considere dois eventos quaisquer A e B .

Para que um elemento esteja em A , há duas possibilidades:

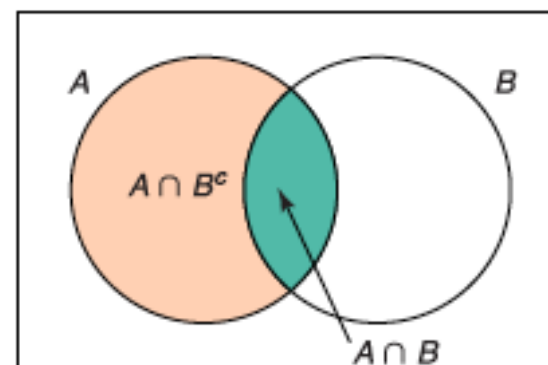
- o elemento está em A e em B ;
- o elemento está em A , mas não está em B .

Portanto, podemos escrever:

$$A = (A \cap B) \cup (A \cap B^c)$$

As duas possibilidades são disjuntas, então:

$$P(A) = P(A \cap B) + P(A \cap B^c)$$



Teorema das Probabilidades Totais

Vimos que: $P(A) = P(A \cap B) + P(A \cap B^c)$

E sabemos que:

$$P(A \cap B) = P(A | B)P(B)$$

$$P(A \cap B^c) = P(A | B^c)P(B^c)$$

Então reescrevemos:

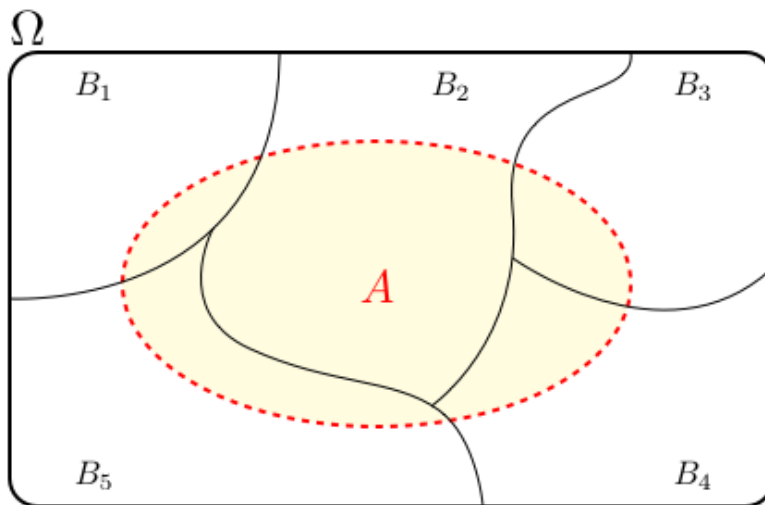
$$P(A) = P(A | B)P(B) + P(A | B^c)P(B^c)$$

Interpretação: a probabilidade do evento A é uma média ponderada de $P(A | B)$ e $P(A | B^c)$. O peso de cada probabilidade condicional é a probabilidade do evento que está sendo levado em conta ao calcular a probabilidade condicional de A .

Teorema das Probabilidades Totais

Seja $\{B_1, \dots, B_n\}$ uma partição de eventos de Ω e A um evento em Ω .

Dizemos que os eventos $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ formam um partição do espaço amostral Ω se são mutuamente exclusivos e a união desses eventos é Ω .



Então,

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A | B_i)P(B_i)$$

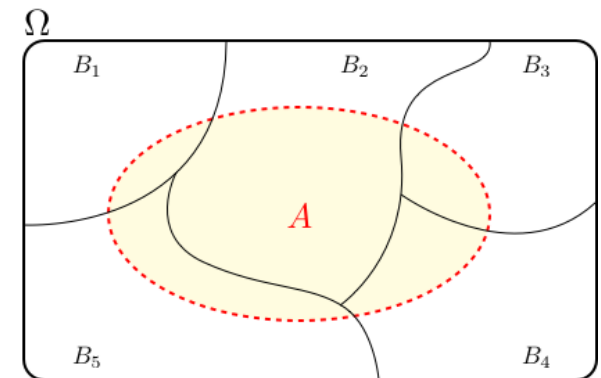
Teorema de Bayes

Se considerarmos a partição B e B^c do espaço amostral Ω e A um evento em Ω .
Então:

$$P(B | A) = \frac{P(B \cap A)}{P(A)} = \frac{P(A | B)P(B)}{P(A | B)P(B) + P(A | B^c)P(B^c)}$$

No caso geral, seja $\{B_1, \dots, B_n\}$ uma partição de eventos de Ω e A um evento em Ω :

$$P(B_i | A) = \frac{P(A | B_i)P(B_i)}{\sum_{i=1}^n P(A | B_i)P(B_i)}$$



Exemplo: Teste de diagnóstico

Um exame de sangue é 99% efetivo em detectar uma certa doença quando esta está presente. No entanto, 2% são falso-positivos. Suponha que 0,5% da população tem a doença.

Qual a probabilidade condicional de que um indivíduo testado aleatoriamente tenha a doença dado que o teste deu positivo?

Temos que,

- 0,5% da população tem a doença;
- o exame é 99% efetivo em detectar a doença quando esta está presente; e
- 2% são falso-positivos.

Exemplo: Teste de diagnóstico

Considere os eventos: $D = \{\text{estar doente}\}$ e $TP = \{\text{testar positivo}\}$, temos que

$$P(TP | D) = 0.99, \quad P(TP | D^c) = 0.02 \quad \text{e} \quad P(D) = 0.005$$

Então,

$$\begin{aligned} P(D | TP) &= \frac{P(TP | D)P(D)}{P(TP)} \\ &= \frac{P(TP | D)P(D)}{P(TP | D)P(D) + P(TP | D^c)P(D^c)} \\ &= \frac{0.99 \times 0.005}{0.99 \times 0.005 + 0.02 \times 0.995} = 0.20 \end{aligned}$$

Câncer de Mama

Câncer de mama afeta 1% das mulheres.

Mamografia é o teste padrão para detectar câncer de mama. Mas sabe-se que não é um teste perfeito.

Estatísticas mostram que:

- a mamografia é 80% efetiva em detectar o câncer quando este realmente existe.
- 9.6% das mamografias resultam em falsos positivos (teste positivo quando o câncer não existe).

Suponha que sua mãe faz uma mamografia e o resultado é positivo. Qual é a probabilidade dela realmente estar com câncer de mama?



Exemplo: Companhia de Seguros

Uma companhia de seguros acredita que as pessoas podem ser divididas em duas categorias:

1. aquelas que estão mais sujeitas a acidentes.
2. aquelas que não estão mais sujeitas a acidentes.

Os dados indicam que uma pessoa da categoria 1 terá um acidente durante o período de um ano com probabilidade 0.1.

A probabilidade para todas as outras pessoas é 0.05.

Suponha que a probabilidade de um novo cliente pertencer à categoria 1 seja 0.2.

Qual a probabilidade de que o novo cliente tenha um acidente durante o primeiro ano? E se um novo cliente tem um acidente durante o primeiro ano, qual é a probabilidade de que ele pertença à categoria 1?



Exemplo: Companhia de Seguros

Pergunta: Qual a probabilidade de que o novo cliente tenha um acidente durante o primeiro ano?

Considere os eventos:

$A = \{\text{o novo cliente tem um acidente durante o primeiro ano}\}$

$B = \{\text{o novo cliente pertence à categoria 1}\}$

$B^c = \{\text{o novo cliente pertence à categoria 2}\}$

Pelo Teorema das Probabilidades Totais:

$$\begin{aligned}P(A) &= P(A \mid B)P(B) + P(A \mid B^c)P(B^c) \\ &= 0.1 \times 0.2 + 0.05 \times 0.8 = 0.06\end{aligned}$$



Exemplo: Companhia de Seguros

Pergunta: Se um novo cliente tem um acidente durante o primeiro ano, qual é a probabilidade de que ele pertença à categoria 1?

$A = \{\text{o novo cliente tem um acidente durante o primeiro ano}\}$

$B = \{\text{o novo cliente pertence à categoria 1}\}$



Pelo Teorema de Bayes:

$$\begin{aligned} P(B | A) &= \frac{P(B \cap A)}{P(A)} = \frac{P(A | B)P(B)}{P(A)} \\ &= \frac{0.1 \times 0.2}{0.06} = \frac{1}{3} \end{aligned}$$

Exemplo: DNA e crime

Dado que o réu é inocente (I), suponha que a probabilidade do DNA dele ser compatível (C) com o DNA encontrado na cena do crime seja 1 em um milhão.

$$P(C | I) = 0.000001$$

Dado que o réu é culpado (\bar{I}), suponha que a probabilidade do DNA dele ser compatível com o DNA da cena do crime seja 0.99.

$$P(C | \bar{I}) = 0.99$$

O DNA do réu é compatível com o DNA da cena do crime.

Encontre a probabilidade do réu ser inocente dado que o DNA é compatível, sendo que a probabilidade incondicional dele ser inocente, $P(I)$, é 0.5.



Exemplo: DNA e crime

Queremos $P(I | C)$, sendo que $P(I) = P(\bar{I}) = 0.5$

Pelo Teorema de Bayes:

$$\begin{aligned}P(I | C) &= \frac{P(I \cap C)}{P(C)} = \frac{P(C | I)P(I)}{P(C)} \\&= \frac{P(C | I)P(I)}{P(C | I)P(I) + P(C | \bar{I})P(\bar{I})} \\&= \frac{0.000001 \times 0.50}{0.000001 \times 0.5 + 0.99 \times 0.5} \\&= 0.000001\end{aligned}$$

A chance de ser inocente dado que houve compatibilidade de DNA é 1 em 1 milhão.



Exemplo: DNA e crime

Encontre a probabilidade do réu ser inocente dado que o DNA é compatível, sendo que a probabilidade incondicional dele ser inocente, $P(I)$, é 0.99.

$$\begin{aligned} P(I | C) &= \frac{P(I \cap C)}{P(C)} = \frac{P(C | I)P(I)}{P(C)} \\ &= \frac{P(C | I)P(I)}{P(C | I)P(I) + P(C | \bar{I})P(\bar{I})} \\ &= \frac{0.000001 \times 0.99}{0.000001 \times 0.99 + 0.99 \times 0.01} \\ &= 0.00001 \end{aligned}$$

A chance de ser inocente dado que houve compatibilidade de DNA é 1 em 100 mil.



Leituras

- [OpenIntro](#): seção 2.2.
- [Ross](#): seções 4.5, 4.6
- Magalhães: capítulo 2

Slides produzidos pelos professores:

- Samara Kiihl
- Tatiana Benaglia
- Larissa Matos
- Benilton Carvalho

