

# Ensembles

Prof. Jefferson T. Oliva

Aprendizado de Máquina e Reconhecimento de Padrões (AM28CP)  
Engenharia de Computação  
Departamento Acadêmico de Informática (Dainf)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
Campus Pato Branco



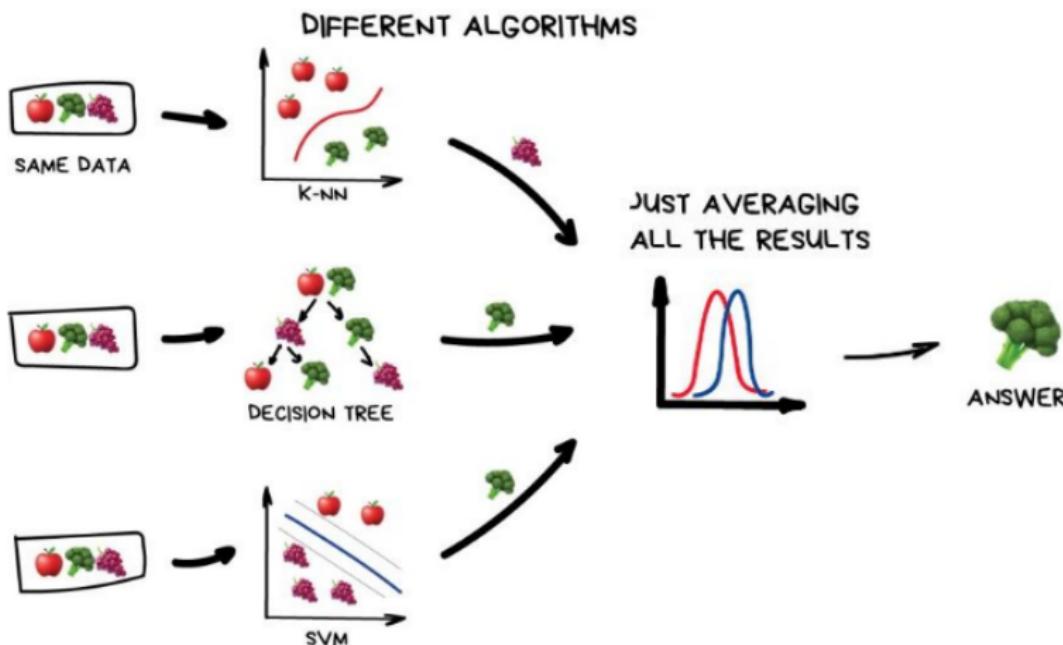
- Ensemble
- Classificação por Votação
- Bagging
- Random Forest
- Adaboost

- Procuramos uma segunda, terceira ou mais opiniões em diversas situações
  - Saúde
  - Financeiro
  - Entre outros assuntos
- Para cada opinião, determinados um peso que influencia em uma decisão final
- Em outras palavras, procuramos a melhor opinião possível

## Ensemble

# Ensemble

- Também conhecido como comitê de classificadores



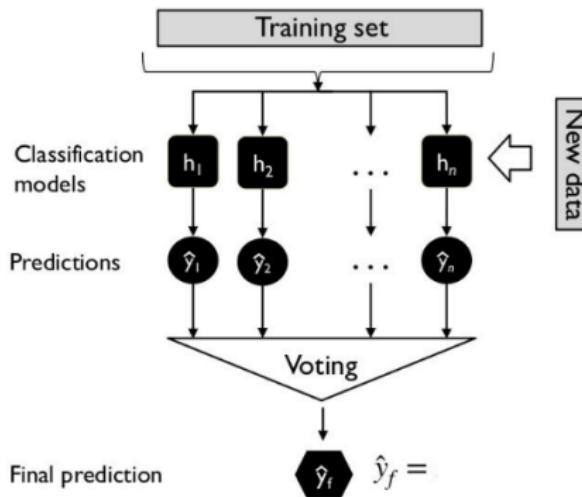
- Os métodos ensembles são geralmente divididos em duas famílias
  - Baseado em média (ou votação): o princípio norteador é construir vários estimadores de forma independente e, em seguida, calcular a média de suas previsões
    - O estimador combinado é geralmente melhor do que qualquer um dos estimadores de base única, pois sua variância é reduzida
    - Exemplos de métodos: *bagging*, floresta randômica (*random forest*) ...
  - *Boosting*: os estimadores base são construídos sequencialmente e tenta-se reduzir o viés do estimador combinado
    - Combinação de vários modelos fracos para produzir um conjunto poderoso
    - Exemplos de métodos: AdaBoost, *Gradient Tree Boosting* ...

- Acurácia e diversidade são vitais para a construção de classificadores ensembles
- Todos os métodos visam construir boas hipóteses individuais com erros não correlacionados (diversidade)
- Principais abordagens:
  - Manipulação de hipóteses/classificadores: votação e empilhamento (*stacking*)
  - Manipulação de exemplos de treinamento: *bagging* e *boosting*
  - Manipulação de características de entrada: subespaço de atributos
  - Manipulação de exemplos e de atributos de treinamento: *floresta randômica*
  - Manipulação de saídas alvos (*target*): classificação multiclasse
  - Injeção de aleatoriedade: redes neurais ensembles

## Classificação por Votação

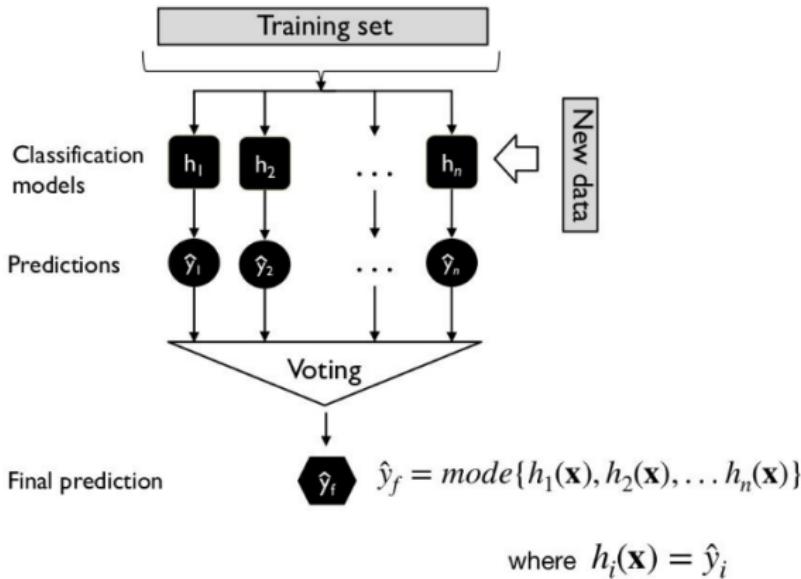
# Classificação por Votação

- A ideia é combinar classificadores de aprendizado de máquina conceitualmente diferentes e usar a votação majoritária ou a média das probabilidades previstas (voto suave) para a predição dos rótulos das classes
- Essa abordagem pode ser útil para um conjunto de modelos com desempenho igualmente bom para o equilíbrio de duas fraquezas individuais



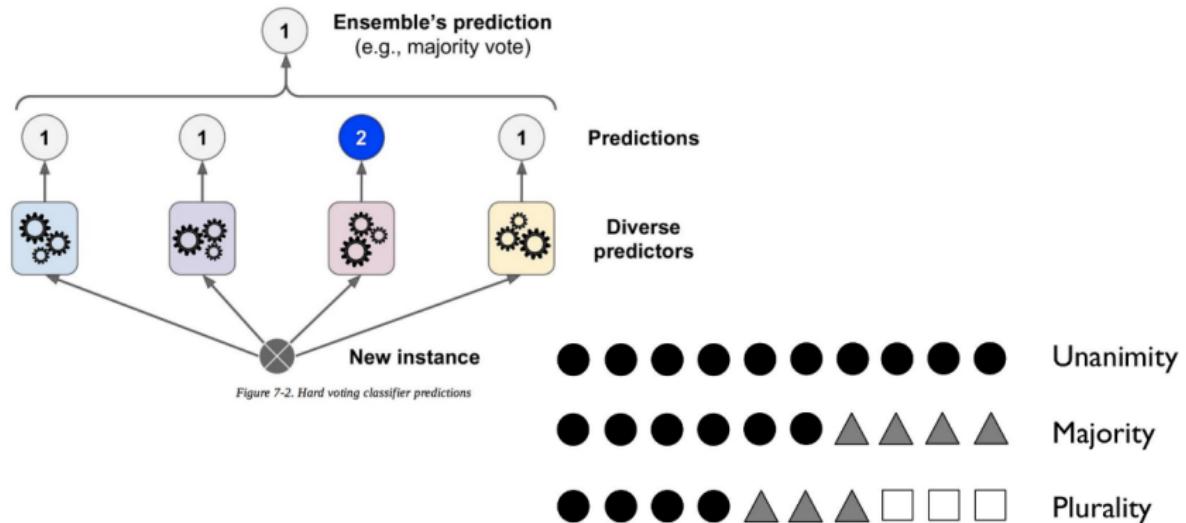
# Classificação por Votação

- Rotulação pela classe majoritária (votação rígida): a classe prevista para uma nova amostra é o rótulo majoritário predito pelos classificadores individuais



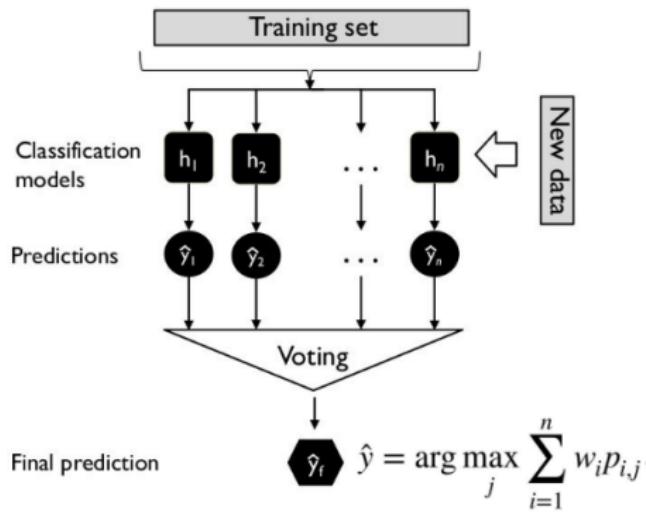
# Classificação por Votação

- Rotulação pela classe majoritária (votação rígida)



# Classificação por Votação

- Rotulação utilizando probabilidades médias ponderadas (votação suave): diferentemente da votação rígida, a votação suave retorna o rótulo da classe como *argmax* da soma das probabilidades previstas
  - $p_{i,j}$ : probabilidade de associação da classe do  $i$ -ésimo classificador para o rótulo  $j$
  - $w_i$ : parâmetro de ponderação opcional, cuja configuração padrão é  $w_i = \frac{1}{n}, \forall w_i \in \{w_1, \dots, w_n\}$



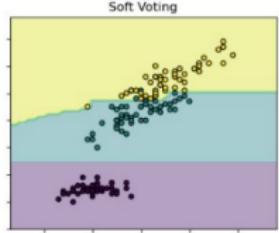
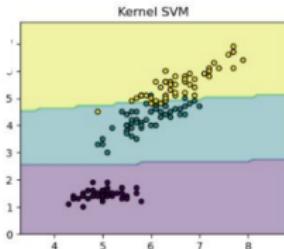
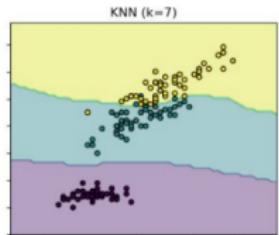
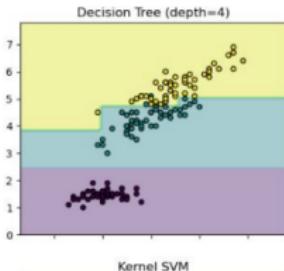
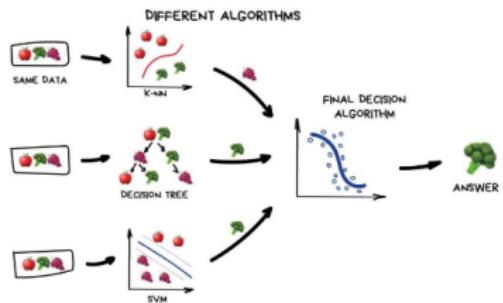
- Rotulação utilizando probabilidades médias ponderadas (votação suave)
  - Dado um problema de classificação binária, onde  $i \in \{0, 1\}$ , suponha que o nosso ensemble possa fazer as seguintes predições:
    - $C_1(x) \rightarrow [0.9, 0.1]$
    - $C_2(x) \rightarrow [0.8, 0.2]$
    - $C_3(x) \rightarrow [0.4, 0.6]$

$$\hat{y} = \arg \max_i \sum_{j=1}^n w_j p_{i,j}$$

- Utilizando pesos uniformes, temos os seguintes resultados
  - $p(i_0|x) = \frac{0.9+0.8+0.4}{3} = 0,7$
  - $p(i_1|x) = \frac{0.1+0.2+0.6}{3} = 0,3$
  - $\arg \max_i [p(i_0|x), p(i_1|x)] = 0$

- Rotulação utilizando probabilidades médias ponderadas (votação suave)
  - Dado um problema de classificação binária, onde  $i \in \{0, 1\}$ , suponha que o nosso ensemble possa fazer as seguintes predições:
    - $C_1(x) \rightarrow [0.9, 0.1]$
    - $C_2(x) \rightarrow [0.8, 0.2]$
    - $C_3(x) \rightarrow [0.4, 0.6]$
  - Caso utilizamos os pesos  $w = \{0.1, 0.1, 0.8\}$ , temos uma predição diferente:
    - $p(i_0|x) = 0.1 * 0.9 + 0.1 * 0.8 + 0.8 * 0.4 = 0,49$
    - $p(i_1|x) = 0.1 * 0.1 + 0.1 * 0.2 + 0.8 * 0.6 = 0,51$
    - $\arg \max_i[p(i_0|x), p(i_1|x)] = 1$

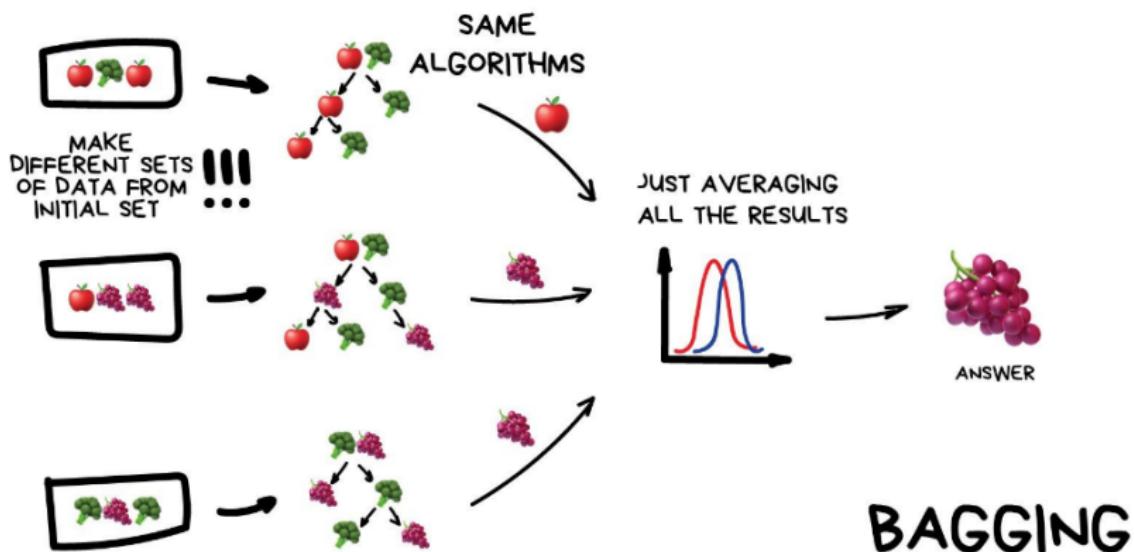
# Classificação por Votação



## Bagging

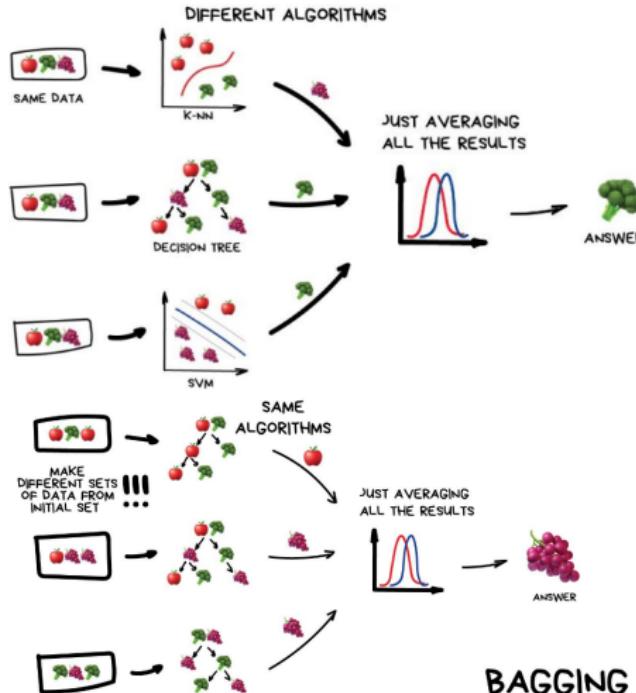
- *Bootstrap Aggregating*
  - Breiman, L. (1996). Bagging predictors. Machine learning, 24(2), 123-140.
- Família ensemble: baseado média (vários estimadores independentemente)
- Erros não correlacionados (diversidade)
  - Manipulação de exemplos de treinamento
  - Manipulação de características de entrada

# Bagging

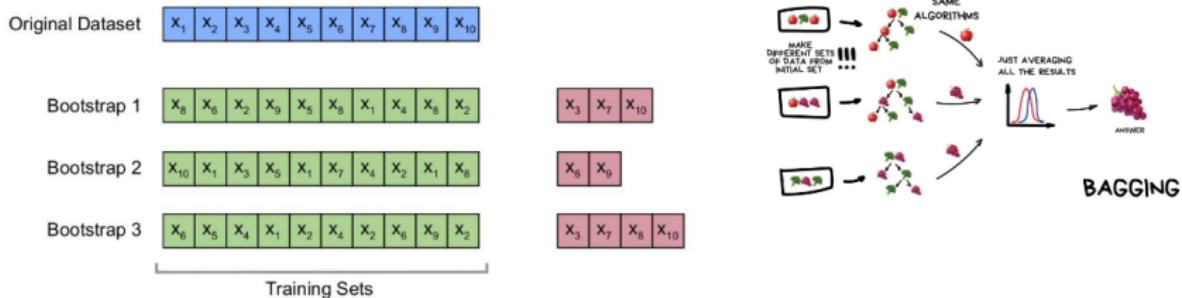


# Bagging

- Votação vs. bagging



# Bagging



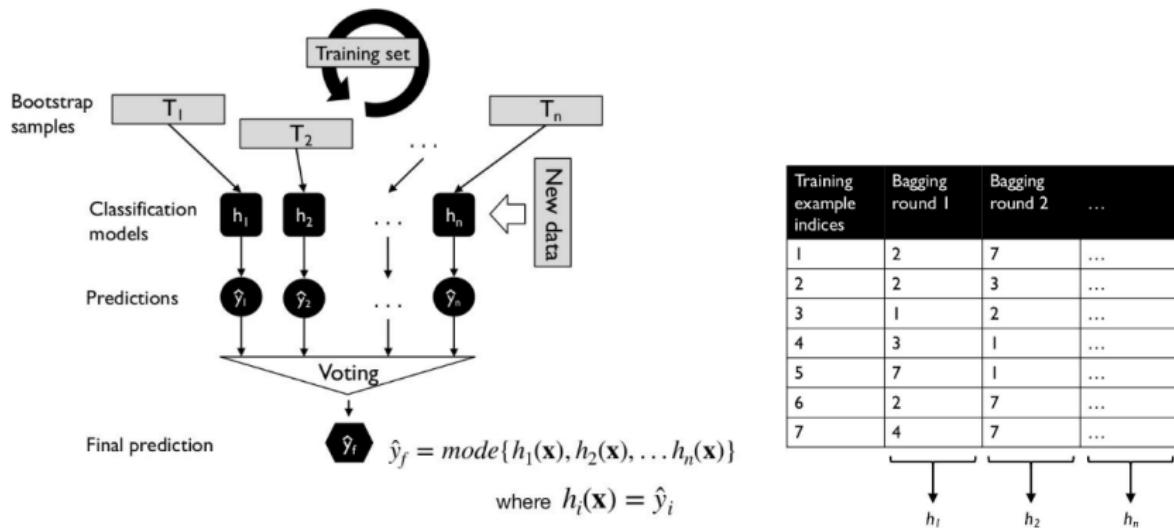
---

## Algorithm 1 Bagging

---

- 1: Let  $n$  be the number of bootstrap samples
  - 2:
  - 3: **for**  $i=1$  to  $n$  **do**
  - 4:     Draw bootstrap sample of size  $m$ ,  $\mathcal{D}_i$
  - 5:     Train base classifier  $h_i$  on  $\mathcal{D}_i$
  - 6:      $\hat{y} = \text{mode}\{h_1(\mathbf{x}), \dots, h_n(\mathbf{x})\}$
-

# Bagging



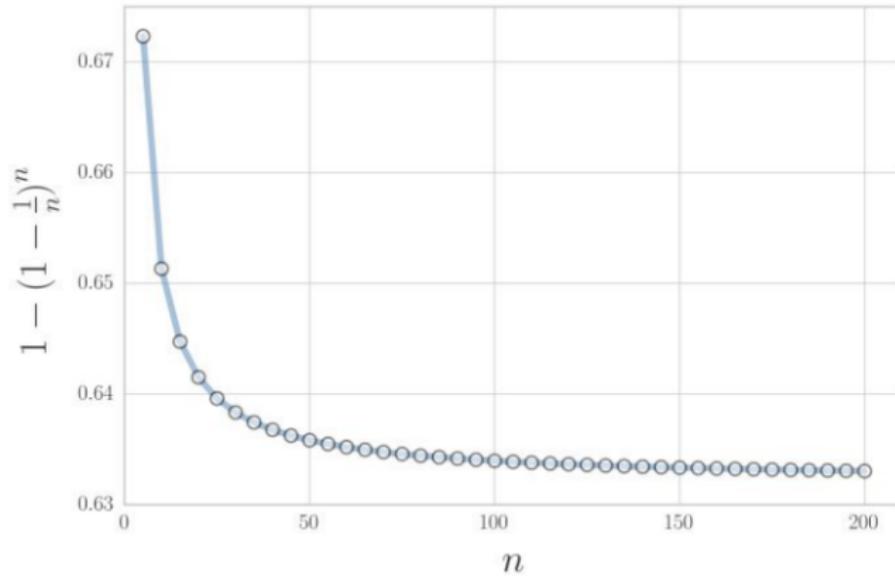
# Bagging

- Probabilidade de amostragem

$$P(\text{amostra não escolhida}) = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2$$

$$\frac{1}{e} \approx 0,368, n \rightarrow \infty$$

$$P(\text{amostra escolhida}) = 1 - \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \approx 0,632$$

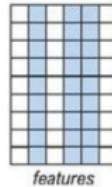


- Os métodos *bagging* formam uma classe de algoritmos que constroem várias instâncias de um ensemble utilizando subconjuntos aleatórios gerados a partir conjunto de treinamento original e, em seguida, agregam suas previsões individuais para formar uma previsão final
- Existem diversos métodos *bagging*, cujas principal diferença encontra-se pela forma em que os subconjuntos de treinamento são formados:
  - Colagem (*pasting*): subconjuntos aleatórios de amostras são gerados para o treinamento do modelo
  - *Bagging*: amostras são extraídas com reposição
  - Subespaços aleatórios: os subconjuntos aleatórios de características
  - *Patches* aleatórios: os estimadores base são construídos em subconjuntos de amostras e de características

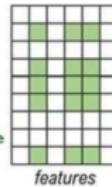
# Bagging



**bagging  
(sample instances)**  
`max_samples=0.75,  
bootstrap=True,  
max_features=1.0,  
bootstrap_features=False`



**random subspaces  
(sample features)**  
`max_samples=1.0,  
bootstrap=False,  
max_features=0.5,  
bootstrap_features=True`

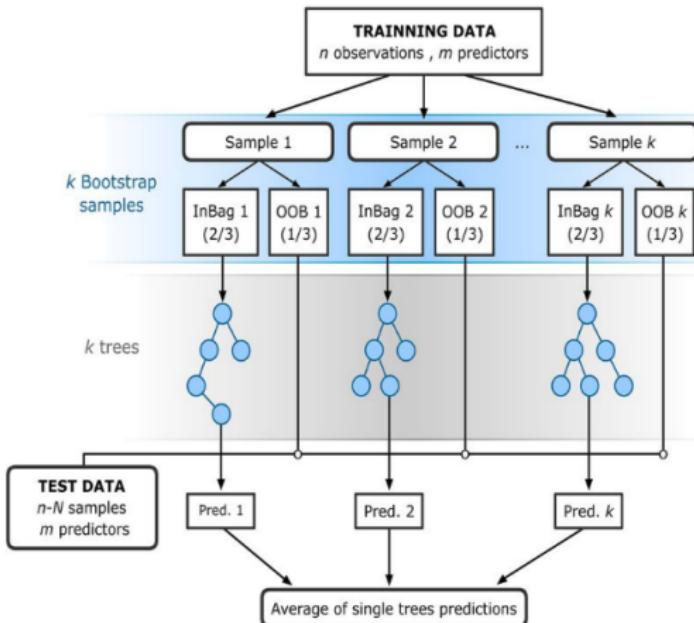


**random patches  
(sample both)**  
`max_samples=0.75,  
bootstrap=True,  
max_features=0.5,  
bootstrap_features=True`

## **Random Forest**

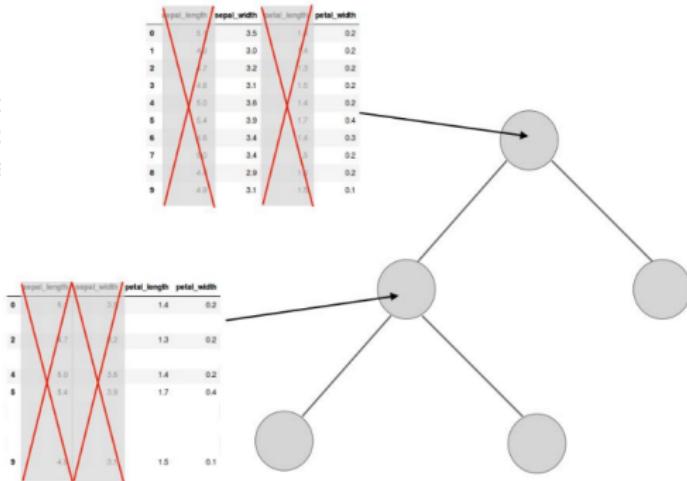
# Random Forest

- Floresta randômica | floresta aleatória
- Cada árvore no conjunto é construída a partir de uma amostra retirada com reposição (ou seja, uma amostra *bootstrap*) do conjunto de treinamento



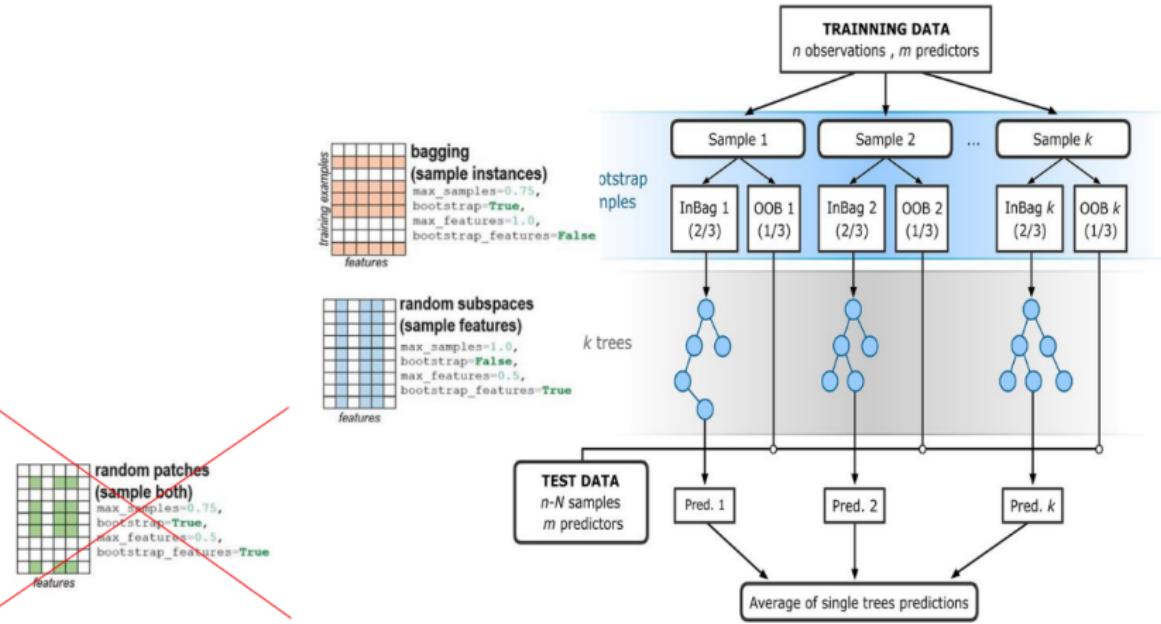
# Random Forest

- Ao dividir cada nó durante a construção de uma árvore, a melhor divisão é encontrada a partir de todos as características de entrada ou de um subconjunto aleatório de atributos



# Random Forest

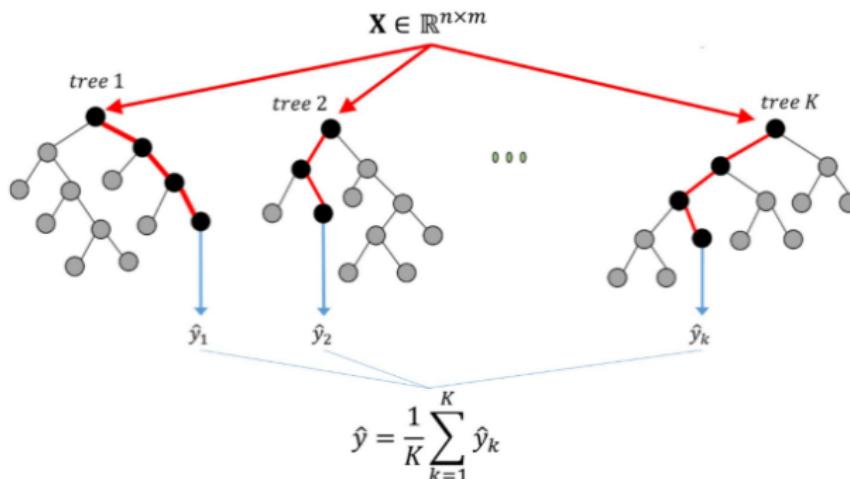
- Bagging com árvores + subconjuntos de características aleatórias



- Ho, Tin Kam. "The random subspace method for constructing decision forests." *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 20.8 (1998): 832-844.
  - "Nosso método se baseia em um procedimento autônomo e pseudoaleatório para selecionar um pequeno número de dimensões de um determinado espaço de características"
  - No método subespaço aleatório, cada árvore recebe um subconjunto aleatório de características
- Breiman, Leo. "Random Forests" *Machine learning* 45.1 (2001): 5-32.
  - "... uma floresta aleatória com características aleatórias é formada pela seleção aleatória, em cada nó, de um pequeno grupo de variáveis ??de entrada para divisão"

# Random Forest

- Breiman, Leo. "Random Forests" Machine learning 45.1 (2001): 5-32.
  - Em contraste com a publicação original, a implementação do *scikit-learn* combina classificadores calculando a média de sua previsão probabilística, em vez de deixar cada classificador votar em uma única classe



- Limite superior para o erro de generalização

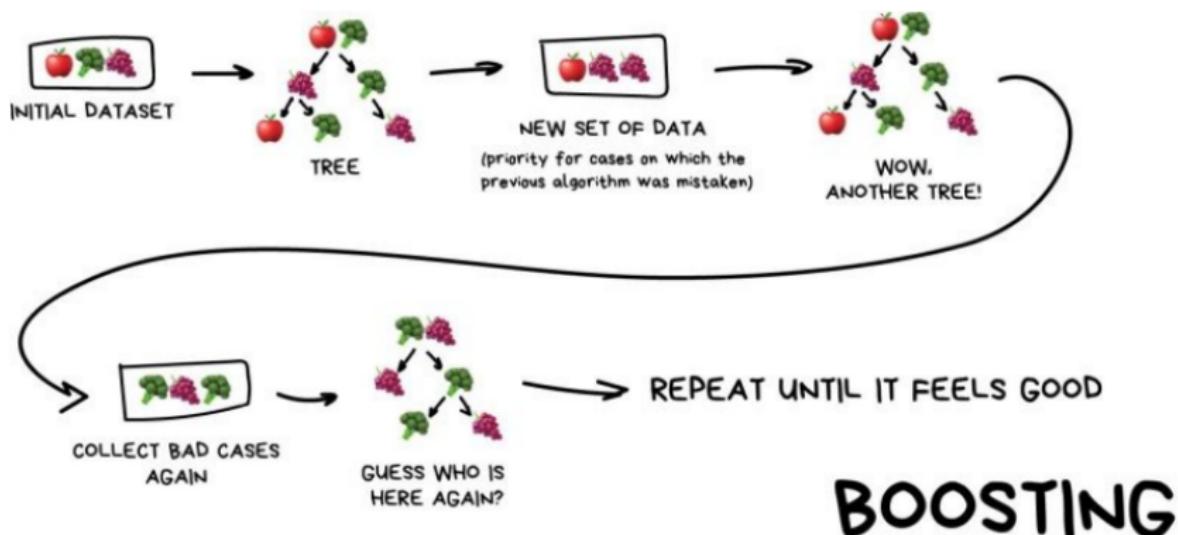
$$PE \leq \frac{\bar{\rho}(1 - s^2)}{s^2}$$

- $\bar{\rho}$ : correlação média entre as árvores
- $s$ : "força" do ensemble

## Adaboost

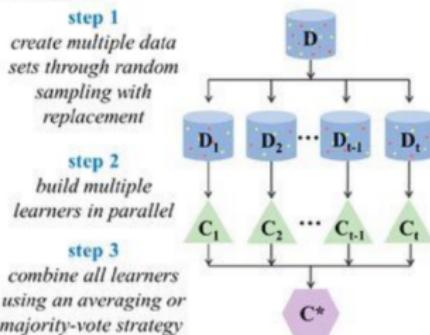
- Adaptive Boosting
  - Freund, Y., & Schapire, R. E. (1997). A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *Journal of computer and system sciences*, 55(1), 119-139.
- Método *boosting* (vários estimadores sequencialmente)
- Erros não correlacionados (diversidade)
  - Manipulação dos exemplos de treinamento
  - Aprendizes fracos ("weak learners")

# Adaboost

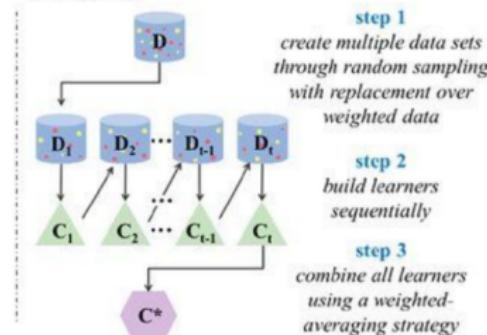


- O princípio básico do AdaBoost é ajustar uma sequência de aprendizes fracos (ou seja, modelos que são apenas ligeiramente melhores do que suposições aleatórias, como pequenas árvores de decisão) em versões repetidamente modificadas dos dados
- Métodos de média (votação, *bagging*, árvores aleatórias) X métodos sequenciais (AdaBoost)

(A) bagging

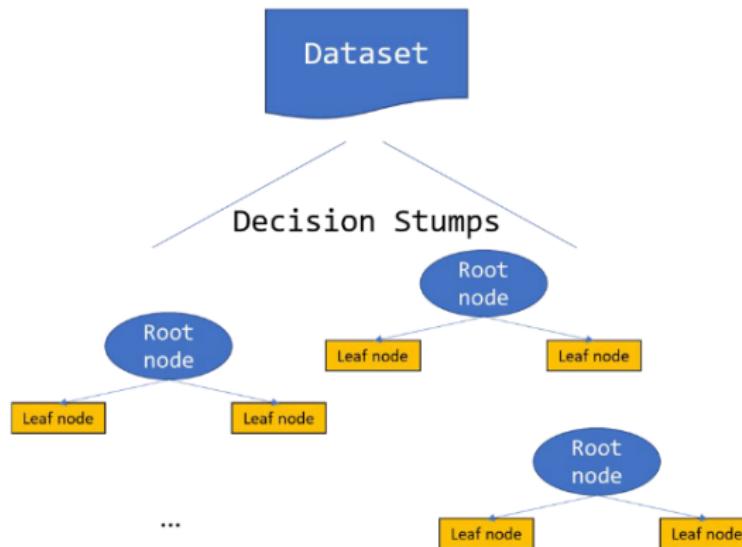


(B) boosting



- AdaBoost inicializa um vetor com pesos uniformes
- *Loop*
  - Aplicação do aprendiz fraco (ligeiramente melhor do que a adivinhação aleatória) nos exemplos de treinamento ponderados
    - Em vez do conjunto de treinamento original, pode-se extrair amostras por *bootstrap* com probabilidade ponderada
  - Aumento do peso para exemplos classificados incorretamente
    - Votação "suave" em classificadores treinados

- Aprendiz fraco: árvore de decisão para classificação binária com rótulos -1 e 1
  - $h(x) = s(1(x_k \leq t))$
- Onde:
  - $s(x) \in \{-1, 1\}$ ,  $k \in \{1, \dots, K\}$  ( $k$  é o número de características),  $t$  é um limiar



---

**Algorithm 1** AdaBoost

---

- 1: Initialize  $k$ : the number of AdaBoost rounds
  - 2: Initialize  $\mathcal{D}$ : the training dataset,  $\mathcal{D} = \{\langle \mathbf{x}^{[1]}, y^{[1]} \rangle, \dots, \langle \mathbf{x}^{[n]}, y^{[n]} \rangle\}$
  - 3: Initialize  $w_1(i) = 1/n, \quad i = 1, \dots, n, \quad \mathbf{w}_1 \in \mathbb{R}^n$
  - 4:
  - 5: **for**  $r=1$  to  $k$  **do**
  - 6:     For all  $i : \mathbf{w}_r(i) := w_r(i) / \sum_i w_r(i)$  [normalize weights]
  - 7:      $h_r := \text{FitWeakLearner}(\mathcal{D}, \mathbf{w}_r)$
  - 8:      $\epsilon_r := \sum_i w_r(i) \mathbf{1}(h_r(i) \neq y_i)$  [compute error]
  - 9:     if  $\epsilon_r > 1/2$  then stop
  - 10:     $\alpha_r := \frac{1}{2} \log[(1 - \epsilon_r)/\epsilon_r]$  [small if error is large and vice versa]
  - 11:     $w_{r+1}(i) := w_r(i) \times \begin{cases} e^{-\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) = y^{[i]} \\ e^{\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) \neq y^{[i]} \end{cases}$
  - 12: Predict:  $h_{ens}(\mathbf{x}) = \arg \max_j \sum_r^k \alpha_r \mathbf{1}[h_r(\mathbf{x}) = j]$
  - 13:
- 

- Exemplo encontra-se no apêndice

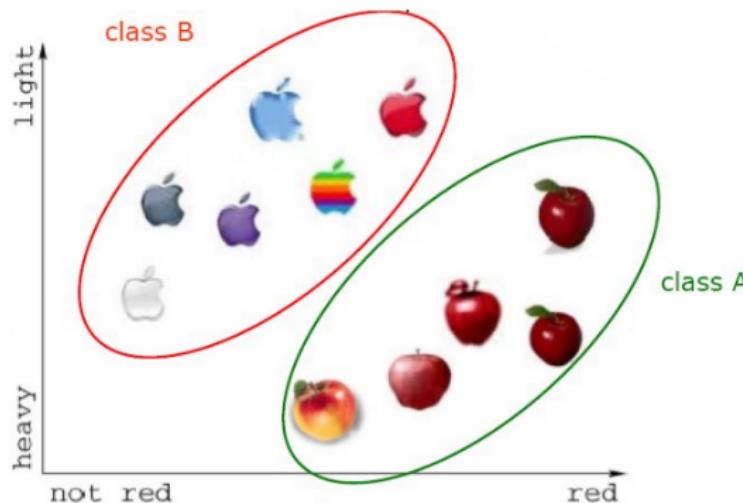
## • Boosting

- As modificações de dados em cada iteração, chamada de *boosting*, consistem na aplicação de pesos a cada uma das amostras de treinamento
- Inicialmente, esses pesos são definidos, de modo que a primeira etapa simplesmente treina um aprendiz fraco com os dados originais
- Para cada iteração sucessiva, os pesos da amostra são modificados individualmente e o algoritmo de aprendizado é reaplicado aos dados reponderados
- O peso atribuído a cada amostra de treinamento pode ser usado das seguintes maneiras:
  - ① Pode ser usado como uma distribuição amostral para realizar um *bootstrap* a partir do conjunto amostral dos dados originais
  - ② Pode ser usado pelo classificador base para aprender um modelo que atribui pesos maiores para exemplos de classificação difíceis

-  ALMEIDA, L. M.  
*Sistemas Baseados em Comitês de Classificadores.*  
*Slides.* Pós-Graduação em Ciência da Computação. UFPE, 2010.
-  BISHOP, C. M.  
*Pattern Recognition and Machine Learning.*  
Springer, 2006.
-  CASANOVA, D.  
Ensemble methods. Aprendizado de Máquina.  
*Slides.* Engenharia de Computação. Dainf/UTFPR, 2020.
-  SANT'ANA, D.  
Ensemble methods. Aprendizado de Máquina.  
*Slides.* Ensemble Learning. Departamento de Informática.  
CEFET-RJ, 2020.

## Adaboost

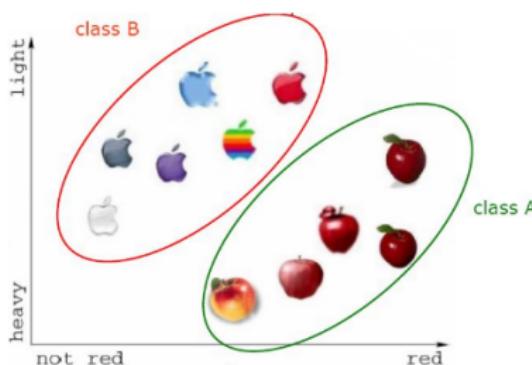
- Maças de plástico X maçãs reais



## Initialization

- 1: Initialize  $k$ : the number of AdaBoost rounds
- 2: Initialize  $\mathcal{D}$ : the training dataset,  $\mathcal{D} = \{\langle \mathbf{x}^{[1]}, y^{[1]} \rangle, \dots, \langle \mathbf{x}^{[n]}, y^{[n]} \rangle\}$
- 3: Initialize  $w_1(i) = 1/n, \quad i = 1, \dots, n, \quad \mathbf{w}_1 \in \mathbb{R}^n$

- $w_1(i) = 1/11 \quad \forall i \in D$ 
  - $w_1(i) = 0,091$

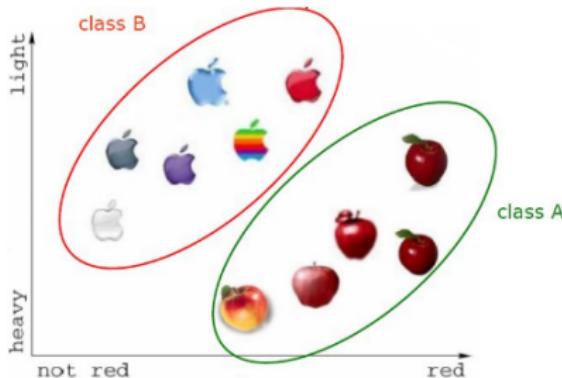


## Normalize weights

5: **for**  $r=1$  to  $k$  **do**

6:     For all  $i$  :  $\mathbf{w}_r(i) := w_r(i) / \sum_i w_r(i)$  [normalize weights]

- $w_1(i) = 0,091/1$ 
  - $w_1(i) = 0,091$

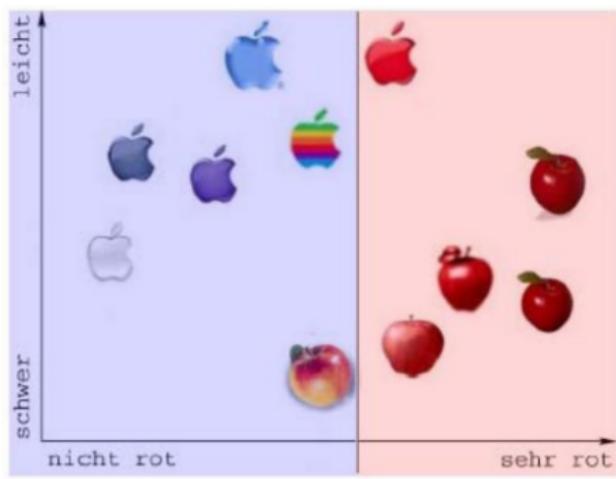


# Fit a weak Learner and compute error

7:  $h_r := \text{FitWeakLearner}(\mathcal{D}, \mathbf{w}_r)$

8:  $\epsilon_r := \sum_i w_r(i) \mathbf{1}(h_r(i) \neq y_i)$  [compute error]

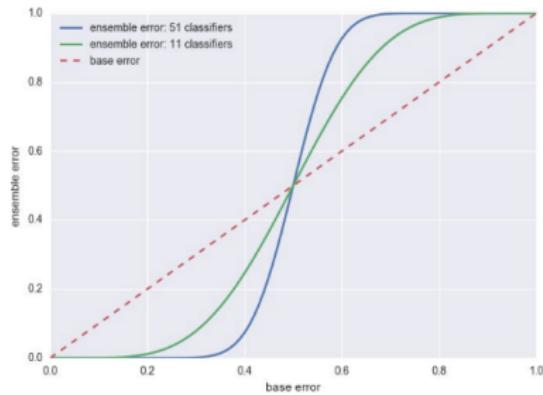
- Error ( $\epsilon$ ): 2/11
  - $\epsilon = 0.18$



## Verify the sanity

9: if  $\epsilon_r > 1/2$  then stop

If the error is greater than a random guessing, combine these classifier leads to an increase in the classification error



## Estimador weight $\alpha$

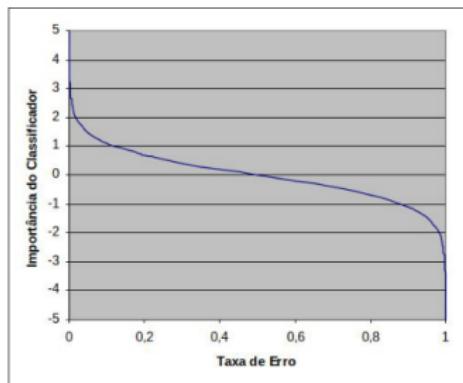
10:  $\alpha_r := \frac{1}{2} \log[(1 - \epsilon_r)/\epsilon_r]$  [small if error is large and vice versa]

The lower the error rate, the greater the importance attributed to the classifier!

- $\epsilon = 0.18$
- Estimador weight ( $\alpha$ ):  $\frac{1}{2} \log(1-0,18/0,18)$ 
  - $\alpha_1 = 0,75$



$$\alpha_r = \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 - \epsilon_r}{\epsilon_r} \right)$$



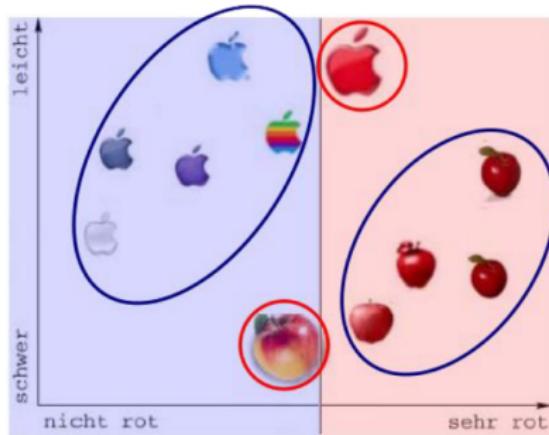
## Weights update

- $w_1(i) = 0,091 \quad \forall i \in D$
- $\alpha_1 = 0,75$

$$11: \quad w_{r+1}(i) := w_r(i) \times \begin{cases} e^{-\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) = y^{[i]} \\ e^{\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) \neq y^{[i]} \end{cases}$$

The parameter  $\alpha_r$  is used to update the weights of the training examples

- Correctly classified records ( $h_r(\mathbf{x}^i) = y^i$ ):
  - weight decreases;
  - $w_{r+1}(i) = 0,091 * \exp(-0,75)$
  - $w_{r+1}(i) = 0,091 * 0,047 = 0,043$
- Wrongly classified records ( $h_r(\mathbf{x}^i) \neq y^i$ )
  - weight increases;
  - $w_{r+1}(i) = 0,091 * \exp(0,75)$
  - $w_{r+1}(i) = 0,091 * 2,117 = 0,193$



## Weights update

$$11: \quad w_{r+1}(i) := w_r(i) \times \begin{cases} e^{-\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) = y^{[i]} \\ e^{\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) \neq y^{[i]} \end{cases}$$

- $w_1(i) = 0,091 \quad \forall i \in D$
- $w_2(i) = 0,043$  if correct  $w_2(i) = 0,193$  if not



## Repeat / Normalize weights

5: **for**  $r=1$  to  $k$  **do**

6:     For all  $i$  :  $\mathbf{w}_r(i) := w_r(i) / \sum_i w_r(i)$  [normalize weights]

$$(0,043 * 9) + (0,193 * 2) = 0,773$$

- Weights of correctly classified samples
  - $w_2(i) = 0,043/0,773 = 0,056$
- Weights of incorrectly classified samples
  - $w_2(i) = 0,193/0,773 = 0,248$

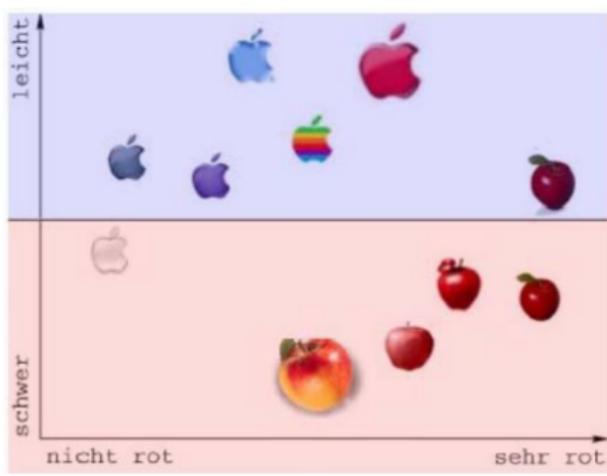


# Fit a weak Learner and compute error

7:  $h_r := \text{FitWeakLearner}(\mathcal{D}, \mathbf{w}_r)$

8:  $\epsilon_r := \sum_i w_r(i) \mathbf{1}(h_r(i) \neq y_i)$  [compute error]

- Error ( $\epsilon$ ): 2/11
  - $\epsilon = 0.18$



# Estimador weight $\alpha$ and Weights update

9: if  $\epsilon_r > 1/2$  then stop

10:  $\alpha_r := \frac{1}{2} \log[(1 - \epsilon_r)/\epsilon_r]$  [small if error is large and vice versa]

11:  $w_{r+1}(i) := w_r(i) \times \begin{cases} e^{-\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) = y^{[i]} \\ e^{\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) \neq y^{[i]} \end{cases}$

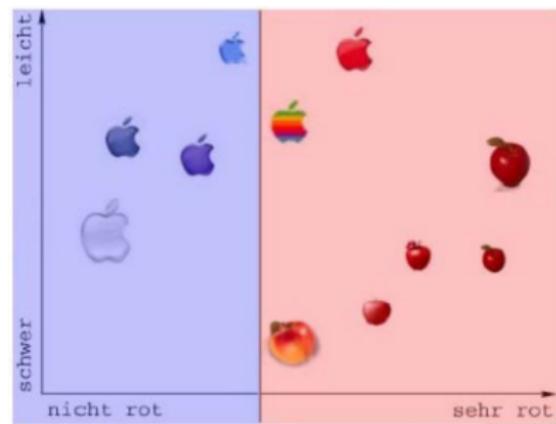
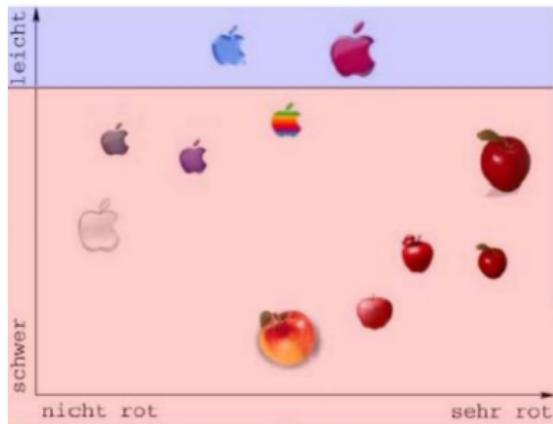


# Repeat

```

5: for r=1 to k do
6:   For all  $i : \mathbf{w}_r(i) := w_r(i) / \sum_i w_r(i)$  [normalize weights]
7:    $h_r := FitWeakLearner(\mathcal{D}, \mathbf{w}_r)$ 
8:    $\epsilon_r := \sum_i w_r(i) \mathbf{1}(h_r(i) \neq y_i)$  [compute error]
9:   if  $\epsilon_r > 1/2$  then stop
10:   $\alpha_r := \frac{1}{2} \log[(1 - \epsilon_r)/\epsilon_r]$  [small if error is large and vice versa]
11:   $w_{r+1}(i) := w_r(i) \times \begin{cases} e^{-\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) = y^{[i]} \\ e^{\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) \neq y^{[i]} \end{cases}$ 

```



## Final classifier

12: Predict:  $h_{ens}(\mathbf{x}) = \arg \max_j \sum_r^k \alpha_r \mathbf{1}[h_r(\mathbf{x}) = j]$

- $\alpha_1 = 0,75$
- $\alpha_2 = 0,75$
- $\alpha_3 = 0,29$
- $\alpha_4 = 0,75$

$$\mathbf{1}(h_r(i) = y_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } h_r(i) \neq y_i \\ 1 & \text{if } h_r(i) = y_i \end{cases}$$

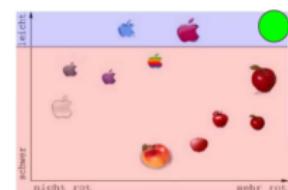
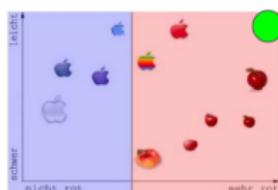


$$\arg \max_{\cdot_1} = 0,75*1(0) + 0,75*1(1) + 0,29*1(0) + 0,75*1(1) = 1,50$$



$$\arg \max_{\cdot_1} = 0,75*1(1) + 0,75*1(0) + 0,29*1(1) + 0,75*1(0) = 1,04$$

$$h_{ens} = -1$$



## Final classifier

$$h_m(\mathbf{x}) = \text{sign} \left( \sum_{j=1}^m w_j h_j(\mathbf{x}) \right) \quad \text{for } h(\mathbf{x}) \in \{-1, 1\}$$

$$h_m(\mathbf{x}) = \arg \max_i \left( \sum_{j=1}^m w_j \mathbf{1}[h_j(\mathbf{x}) = i] \right) \text{ for } h(\mathbf{x}) = i, \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

$$\text{sign} = 0,75*1 + 0,75*-1 + 0,29*1 + 0,75*-1 = -0,46$$

$$h_{\text{ens}} = -1$$



$$\arg \max_{-1} = 0,75*1(0) + 0,75*1(1) + 0,29*1(0) + 0,75*1(1) = 1,50$$



$$\arg \max_1 = 0,75*1(1) + 0,75*1(0) + 0,29*1(1) + 0,75*1(0) = 1,04$$

$$h_{\text{ens}} = -1$$

