

Ensembles

Prof. Jefferson T. Oliva

Reconhecimento de Padrões (RC18EE)
Engenharia de Computação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Campus Pato Branco



Sumário

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

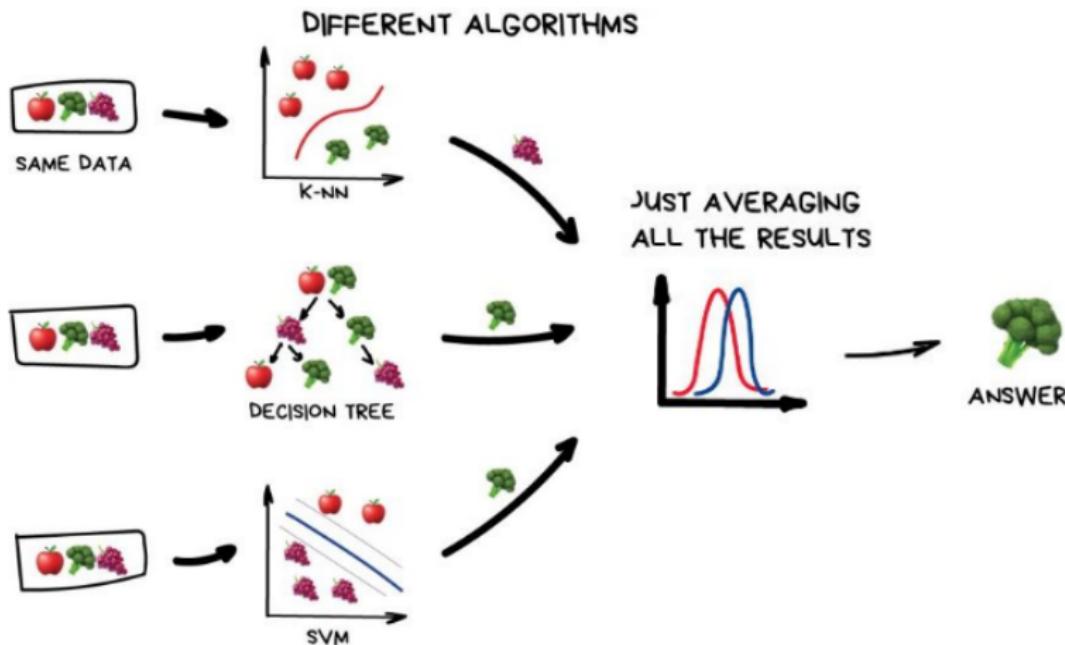
Introdução

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

Ensemble

Ensemble

- Também conhecido como comitê de classificadores



Ensemble

- 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* ...

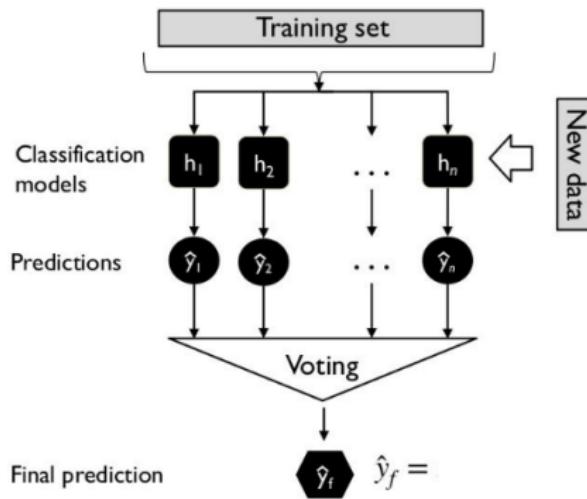
Ensemble

- 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: método *random subspace*
 - 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

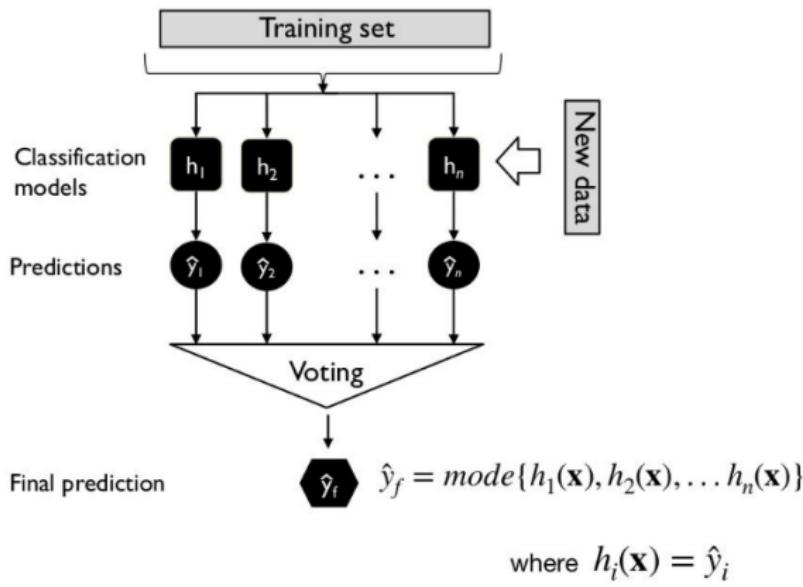
Classificação por Votação

- 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 suas fraquezas individuais



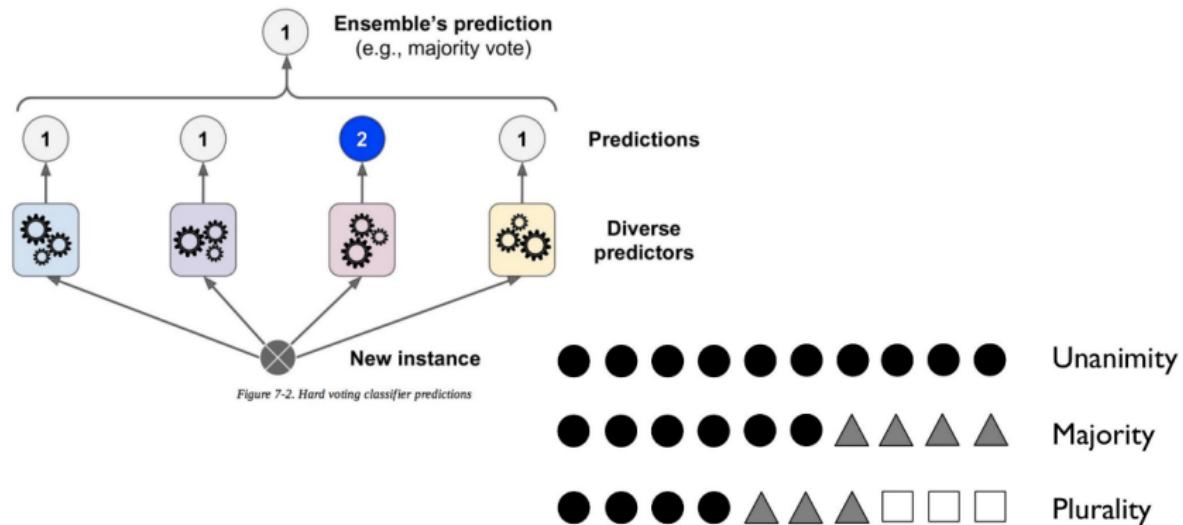
Classificação por Votação

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



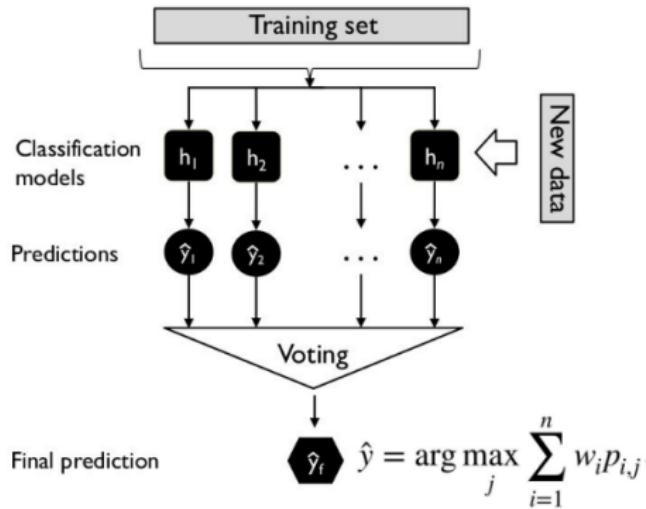
Classificação por Votação

- 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 $w_i = \frac{1}{n}$,
 $\forall w_i \in \{w_1, \dots, w_n\}$



Classificação por Votação

- 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:
 - $C_1(x) \rightarrow [0.9, 0.1]$
 - $C_2(x) \rightarrow [0.8, 0.2]$
 - $C_3(x) \rightarrow [0.4, 0.6]$

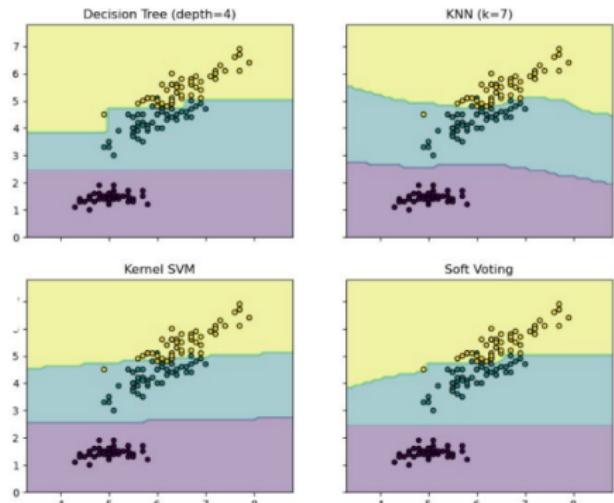
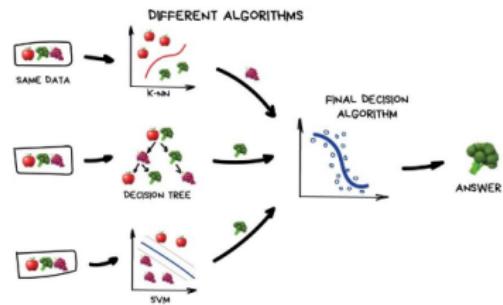
$$\hat{y} = \arg \max_i \sum_{j=1}^n w_j p_{i,j}$$

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

Classificação por Votação

- 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

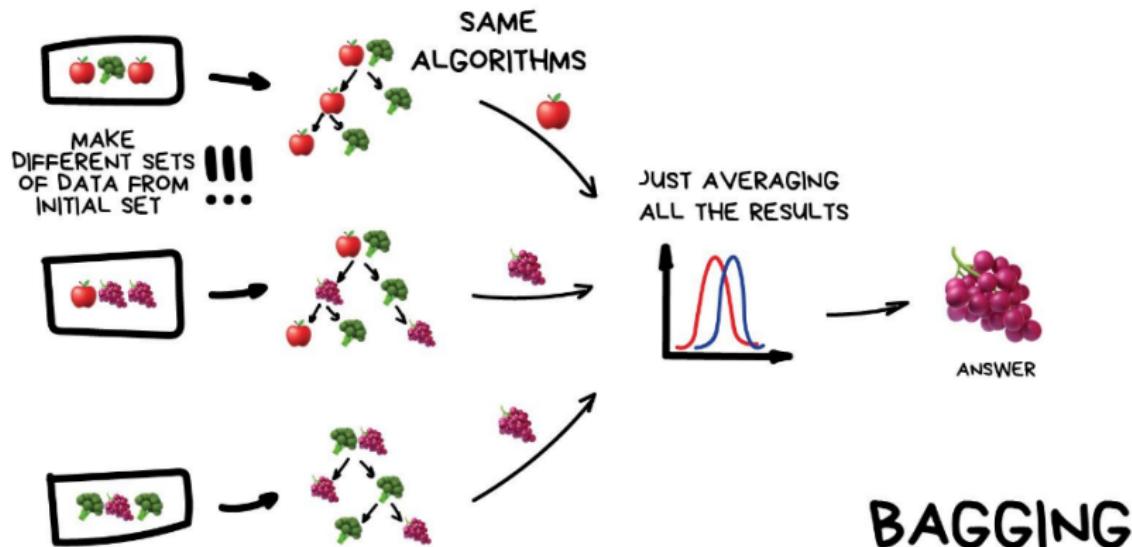


Bagging

Bagging

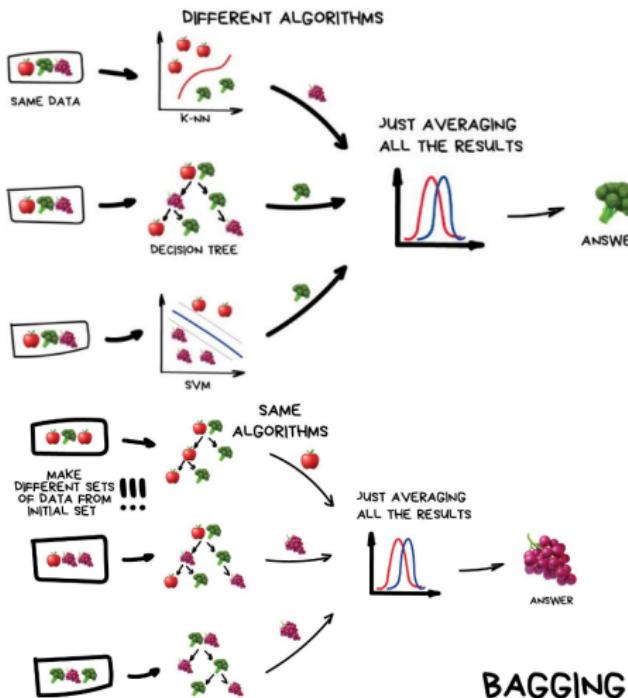
- *Bootstrap Aggregating*
 - Breiman, L. (1996). Bagging predictors. Machine learning, 24(2), 123-140.
- Família ensemble: baseado média (vários estimadores independentemente)
- Erros não correlacionados (diversidade)
 - Manipulação de exemplos de treinamento
 - Manipulação de características de entrada

Bagging



Bagging

- Votação vs. bagging



Bagging

Original Dataset

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	----------

Bootstrap 1

x_6	x_5	x_2	x_9	x_5	x_8	x_1	x_4	x_8	x_2
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

x_3	x_7	x_{10}
-------	-------	----------

Bootstrap 2

x_{10}	x_1	x_3	x_5	x_1	x_7	x_4	x_2	x_1	x_8
----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

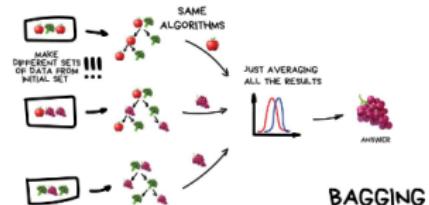
x_6	x_9
-------	-------

Bootstrap 3

x_6	x_5	x_4	x_1	x_2	x_4	x_2	x_6	x_9	x_2
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

x_3	x_7	x_8	x_{10}
-------	-------	-------	----------

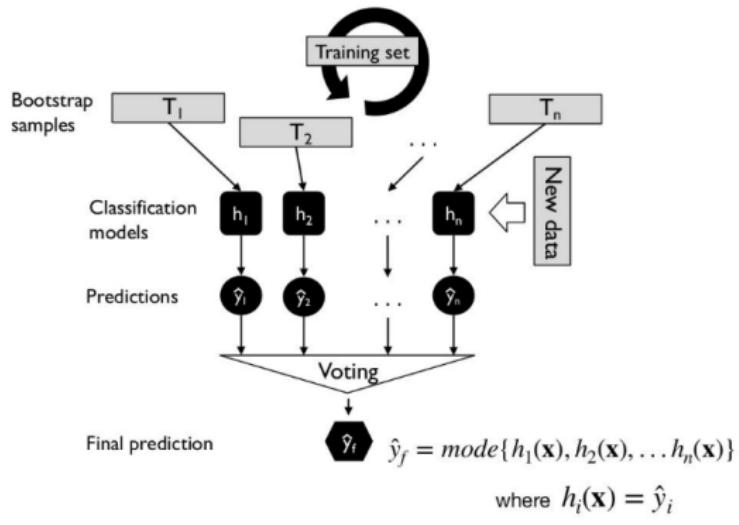
Training Sets



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: $\hat{y} = mode\{h_1(\mathbf{x}), \dots, h_n(\mathbf{x})\}$
-

Bagging



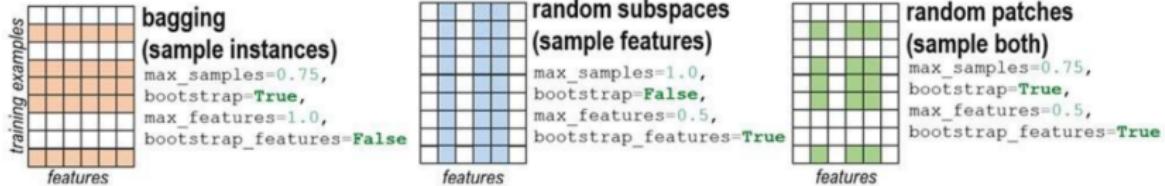
Training example indices	Bagging round 1	Bagging round 2	...
1	2	7	...
2	2	3	...
3	1	2	...
4	3	1	...
5	7	1	...
6	2	7	...
7	4	7	...

Below the table, three arrows point downwards from the row indices 1, 2, and 7 to the corresponding classification models h_1, h_2, h_7 respectively.

Bagging

- 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

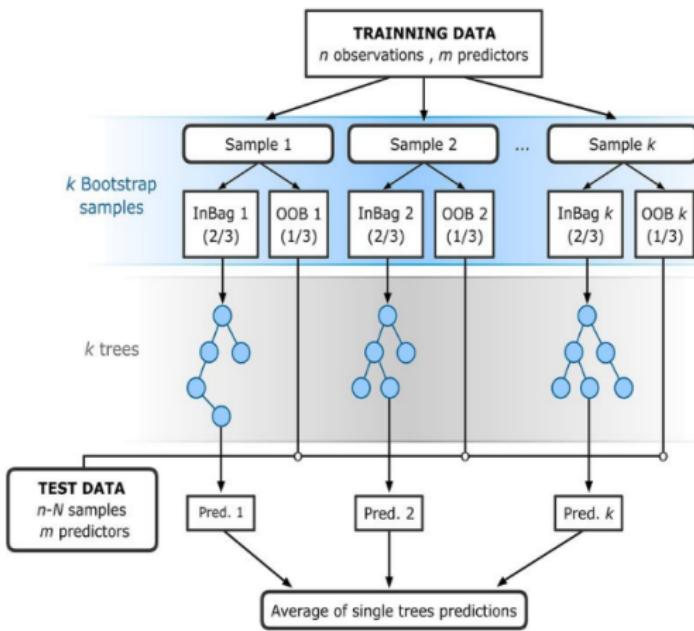
Bagging



Random Forest

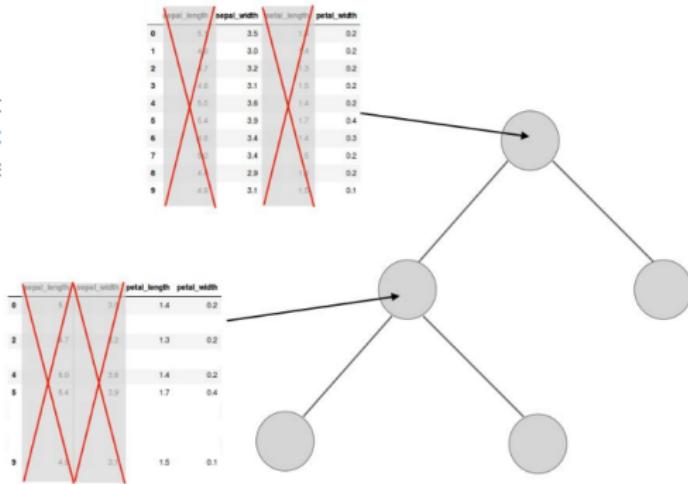
Random Forest

- 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



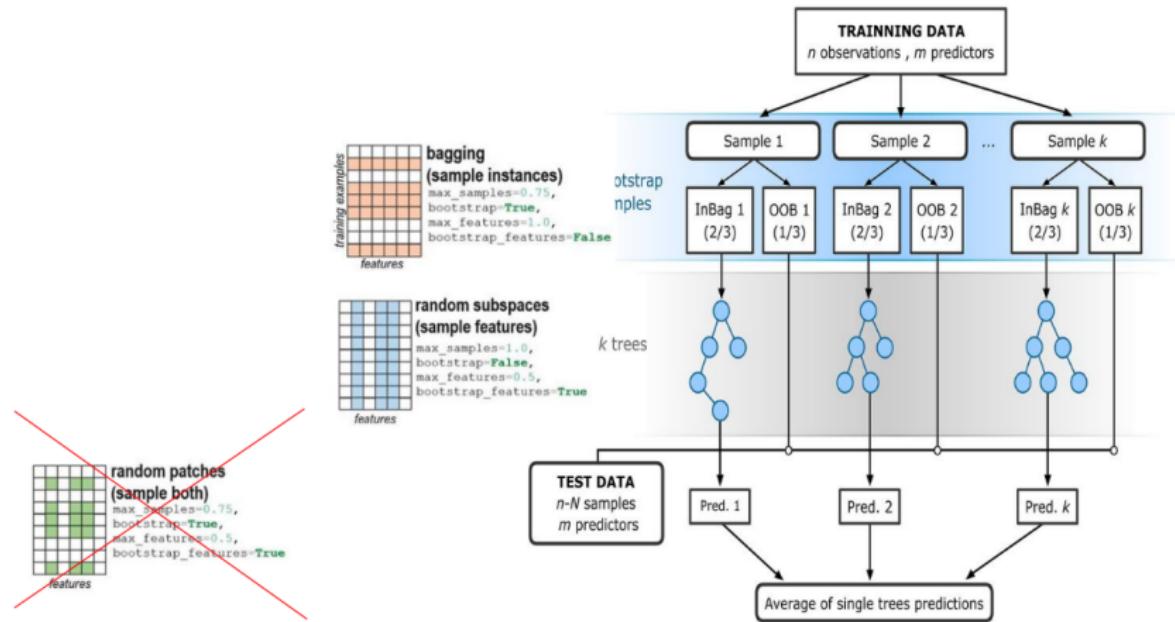
Random Forest

- 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



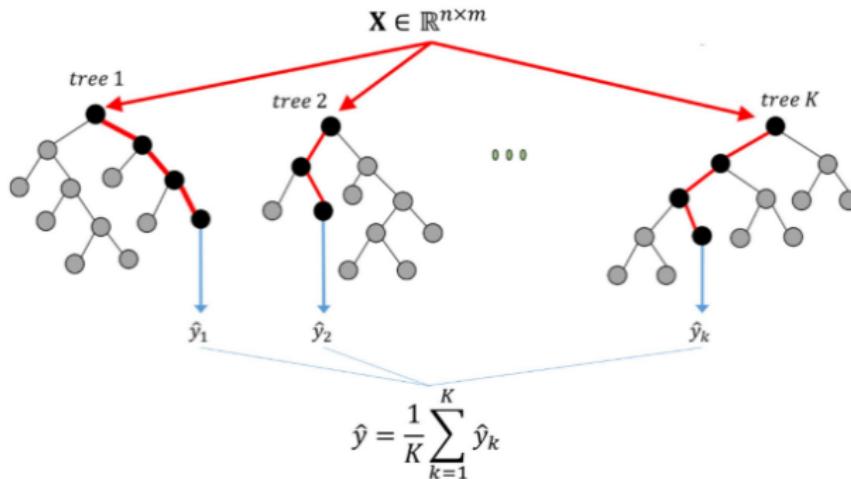
Random Forest

- Bagging com árvores + subconjuntos de características aleatórias



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



Random Forest

- Limite superior para o erro de generalização

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

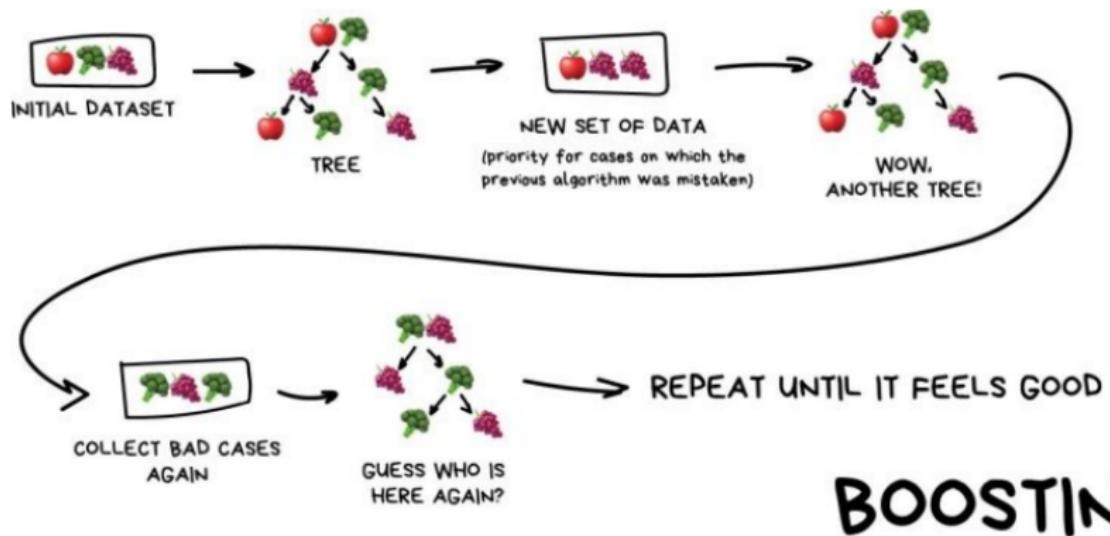
- $\bar{\rho}$: correlação média entre as árvores
- s : "força" do ensemble

Adaboost

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")

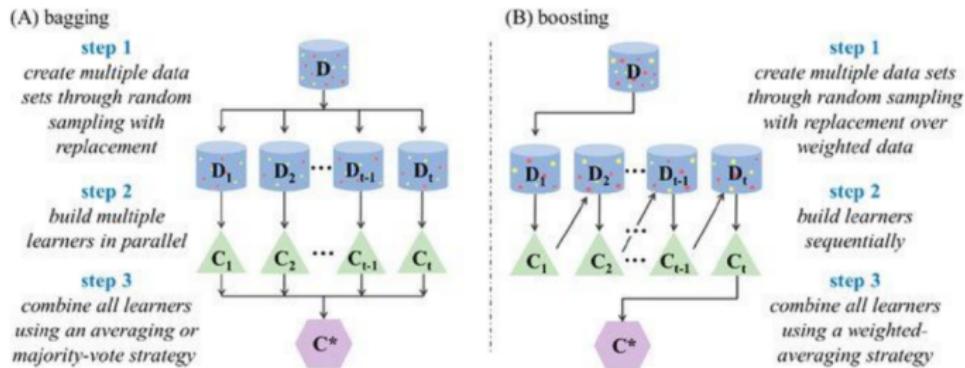
Adaboost



BOOSTING

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)

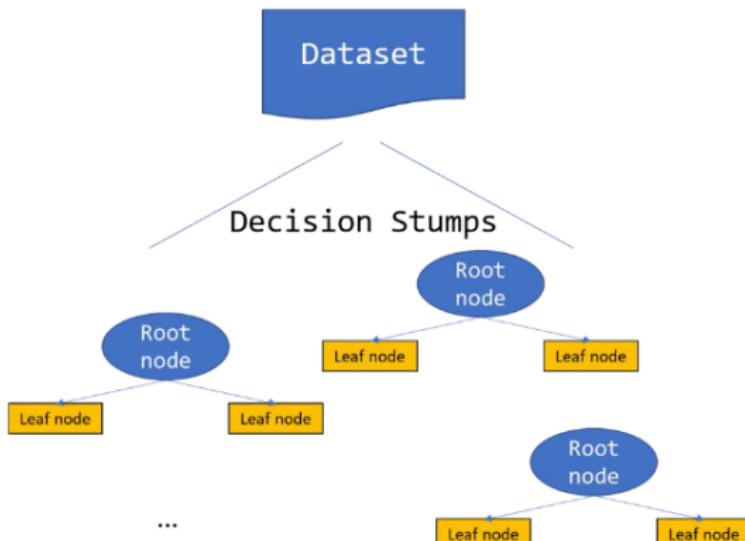


Adaboost

- 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

Adaboost

- 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



AdaBoost

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

Adaboost

- 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

Referências I



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.

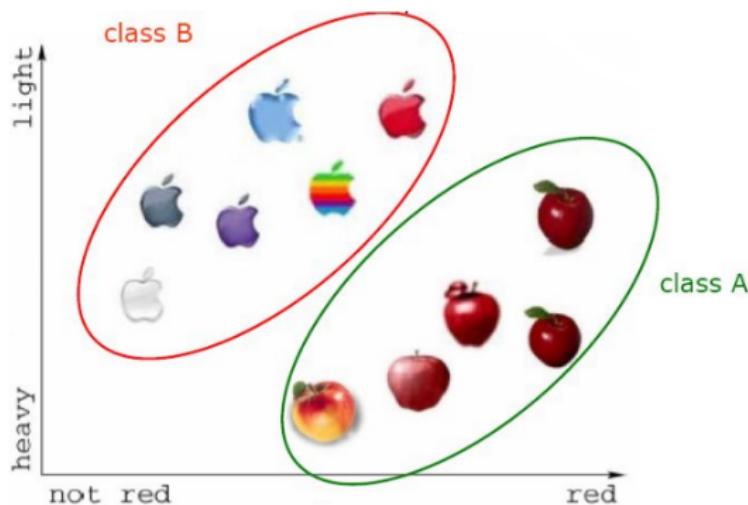
Slides. Ensemble Learning. Departamento de Informática. CEFET-RJ, 2020.

Apêndice

Adaboost

Adaboost

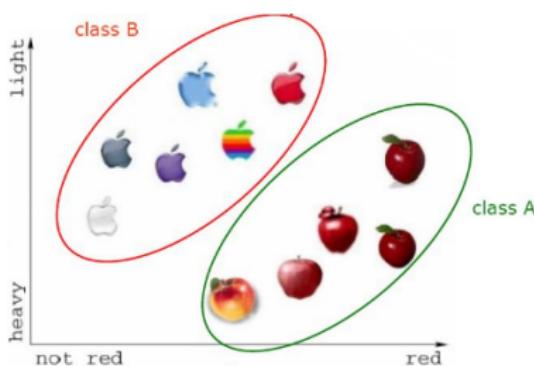
- Maças de plástico X maçãs reais



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 $w_1(i) = 1/n, \quad i = 1, \dots, n, \quad \mathbf{w}_1 \in \mathbb{R}^n$

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

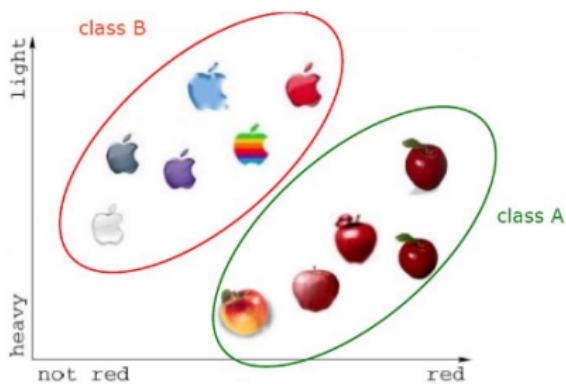


Normalize weights

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]

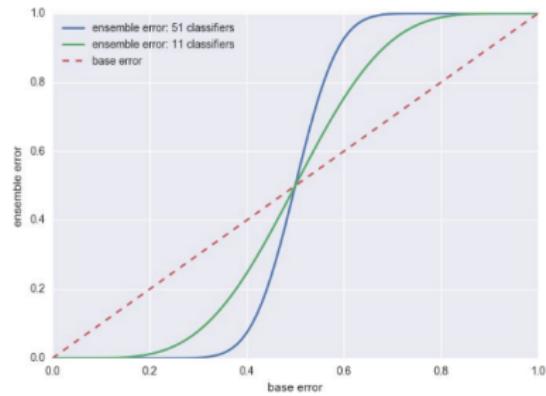
- Error (ϵ): 2/11
 - $\epsilon = 0.18$



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 α

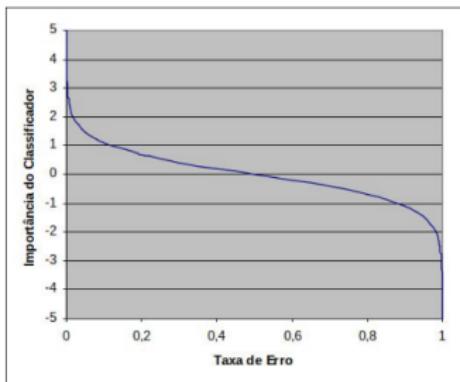
10: $\alpha_r := \frac{1}{2} \log[(1 - \epsilon_r)/\epsilon_r]$ [small if error is large and vice versa]

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

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



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



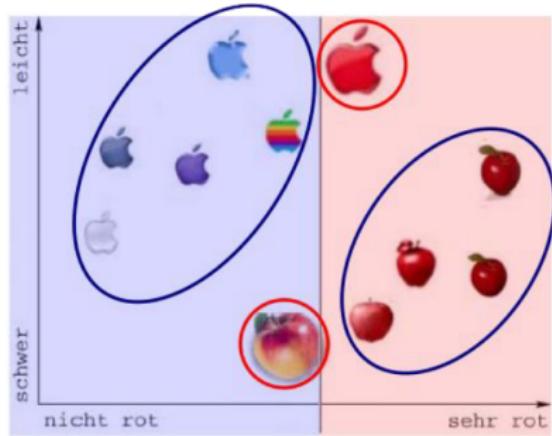
Weights update

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

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

The parameter α_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;
 - $w_{r+1}(i) = 0,091 * \exp(0,75)$
 - $w_{r+1}(i) = 0,091 * 2,117 = 0,193$



Adaboost

Weights update

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

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



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
 - $w_2(i) = 0,193/0,773 = 0,248$

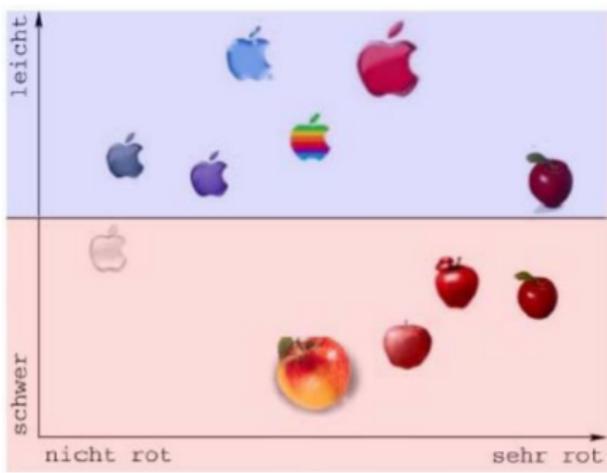


Fit a weak Learner and compute error

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 (ϵ): 2/11
 - $\epsilon = 0.18$

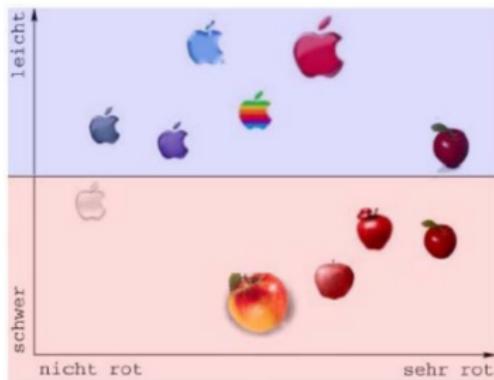


Estimador weight α and Weights update

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]

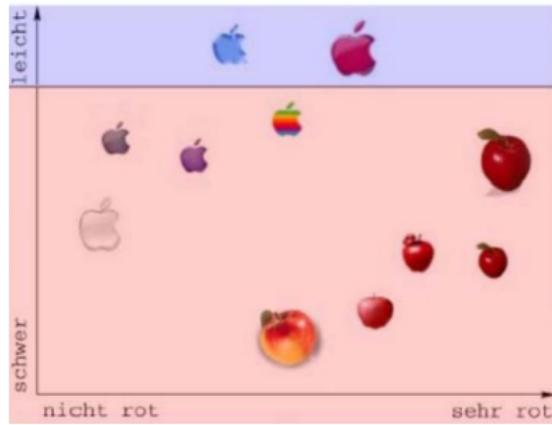
11: $w_{r+1}(i) := w_r(i) \times \begin{cases} e^{-\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) = y^{[i]} \\ e^{\alpha_r} & \text{if } h_r(\mathbf{x}^{[i]}) \neq y^{[i]}\end{cases}$



Adaboost

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



Adaboost

Final classifier

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

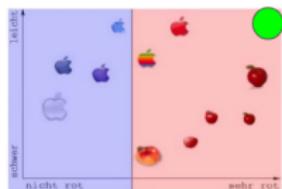
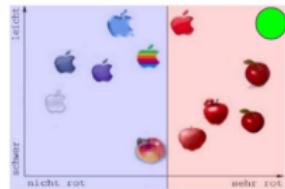
- $\alpha_1 = 0,75$
- $\alpha_2 = 0,75$
- $\alpha_3 = 0,29$
- $\alpha_4 = 0,75$

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

apple: $\arg \max_1 = 0,75 * 1(0) + 0,75 * 1(1) + 0,29 * 1(0) + 0,75 * 1(1) = 1,50$

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

$$h_{ens} = -1$$



Adaboost

Final classifier

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

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

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

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



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



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

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

