

MAE 5905: Introdução à Ciência de Dados

Pedro A. Morettin

Instituto de Matemática e Estatística
Universidade de São Paulo
pam@ime.usp.br
<http://www.ime.usp.br/~pam>

Aula 9

20 de maio de 2021

Sumário

- 1 Algoritmos de Suporte Vetorial
- 2 Classificador de Margem Máxima
- 3 Classificador de Margem Flexível

- **Algoritmos de Suporte Vetorial (ASV)**, conhecidos na literatura anglo-saxônica como **Support Vector Machines (SVM)** foram introduzidos por Cortes and Vapnik (1995), que desenvolveram essa classe de algoritmos para classificação binária e englobam técnicas úteis para classificação, com inúmeras aplicações, dentre as quais destacamos reconhecimento de padrões, classificação de imagens, reconhecimentos de textos escritos à mão, expressão de gens em DNAs etc.
- Vapnik and Chervonesky (1964, 1974) foram, talvez, os primeiros a usar o termo **Aprendizado com Estatística (Statistical Learning)** em conexão com problemas de reconhecimento de padrões e inteligência artificial.
- Algoritmos de suporte vetorial são generalizações não lineares do algoritmo *Generalized Portrait*, desenvolvido por Vapnik e Chervonesky (1964).
- Embora a tradução literal do termo proposto por Vapnik seja **Máquinas de Suporte Vetorial**, optamos por utilizar **Algoritmos de Suporte Vetorial** para que não se pense que algum tipo de máquina esteja ligado a essas técnicas. Aparentemente, Vapnik utilizou esse termo para enfatizar o aspecto computacional intrínseco à aplicação dos algoritmos.

- Uma propriedade importante dos ASV é que a determinação dos parâmetros do modelo corresponde a um problema de otimização convexa, de modo que qualquer solução local é também uma solução global.
- Fazem uso extensivo de Multiplicadores de Lagrange.
- Os algoritmos de suporte vetorial competem com outras técnicas bastante utilizadas, como Modelos Lineares Generalizados (MLG), Modelos Aditivos Generalizados (MAG), Redes Neurais (Neurais), modelos baseados em árvores etc.
- A comparação com esses métodos é baseada em três fatores: **interpretabilidade** do modelo usado, **desempenho** na presença de valores atípicos e **poder preditivo**.
- Por exemplo, os MLG têm baixo desempenho na presença de valores atípicos, valor preditivo moderado e boa interpretabilidade.
- Por outro lado, os ASV têm desempenho moderado na presença de valores atípicos, alto poder preditivo e baixa interpretabilidade.
- ASV são usados para AE Supervisionado (regressão e classificação).

ASV/SVM

- O princípio operacional fundamental dos ASV é que um **kernel** (núcleo) é usado para mapear os dados de entrada (ou padrões) em um espaço de dimensão mais alta (**feature space**), de tal sorte que o problema de classificação, por exemplo, torna-se separável.
- O sucesso da aplicação dos ASV depende da escolha, a priori, desse kernel.
- Os kernels mais populares são:

Gaussiano

Polinomial

Exponential radial basis

Splines

- Recentemente, têm sido usados kernels baseados em ondaletas.
- Essencialmente, um ASV é implementado por um código computacional que realiza essas tarefas. No Repositório **R** há pacotes como **e1071** e a função **svm** desenvolvidos com essa finalidade. Outras alternativas são o pacote **kernlab** e a função **ksvm**.

A abordagem de Cortes and Vapnik (1995) para o problema de classificação baseia-se nas seguintes premissas:

- a) **Separação de classes:** procura-se o melhor hiperplano separador entre as classes, maximizando-se a **margem** entre os pontos mais próximos das duas classes. Os pontos sobre as fronteiras dessas classes são chamados **vetores suporte** (**support vectors**).
- b) **Superposição de classes:** pontos de uma classe que estão no outro lado do hiperplano separador são ponderados com baixo peso para reduzir sua influência.
- c) **Não linearidade:** quando não pudermos encontrar um separador linear, utilizamos um **kernel** para mapear os dados de entrada em um espaço de dimensão mais alta (**feature space**) de tal forma que nesse espaço, são construídos os hiperplanos separadores.
- d) **Solução do problema:** o problema envolve otimização quadrática e pode ser resolvido com técnicas conhecidas.

Fundamentação dos ASV

- Apresentaremos as ideias básicas sobre algoritmos de suporte vetorial (ASV), concentrando-nos no problema de **classificação dicotômica**, *i.e.*, em que as unidades amostrais devem ser classificadas em uma de duas classes possíveis. Para ideias sobre o caso de mais de duas classes, veja o Texto.
- Adotaremos uma abordagem heurística, mais próxima daquela usualmente empregada em Estatística, deixando para as Notas de Capítulo do Texto a abordagem original (e mais formal) dos ASV.
- Seja \mathcal{X} o **espaço dos dados** (ou dos padrões); em geral, $\mathcal{X} = \mathbb{R}^d$ e seja a resposta $y \in \{-1, 1\}$.
- Por exemplo, podemos ter dados de várias variáveis explicativas (idade, peso, taxa de colesterol etc.) e uma variável resposta (doença cardíaca, com $y = 1$ em caso afirmativo e $y = -1$ em caso negativo) observadas em vários indivíduos (o **conjunto de treinamento**). O problema de classificação consiste na determinação de dois subconjuntos (classes) de \mathcal{X} , um dos quais estará associado a indivíduos com doença cardíaca. O classificador indicará em qual das classes deveremos incluir novos indivíduos (o **conjunto de teste**) para os quais conhecemos os valores das variáveis explicativas.

Fundamentação dos ASV

Vamos considerar três situações:

- 1) As classes são perfeitamente separáveis por uma fronteira linear; nesse caso, o separador (hiperplano) é conhecido como **classificador de margem máxima** (CMM).
 - Para duas variáveis, o separador é uma reta; para três variáveis, o separador é um plano. No caso de p variáveis, o separador é um **hiperplano** de dimensão $p - 1$. A Figura 1 é um exemplo. Note que podemos ter mais de uma reta separando as duas classes.
- 2) Não há um hiperplano que separe as duas classes, como no exemplo apresentado na Figura 2, que corresponde à Figura 1 com pontos trocados de lugar. O separador, neste caso é o **classificador de margem flexível** (CMF).
- 3) Um separador linear não conduz a resultados satisfatórios exigindo a definição de fronteiras de separação não lineares. Para isso, recorreremos ou a funções não lineares das observações ou a **kernels**, para mapear o espaço dos dados em um espaço de dimensão maior. O separador, neste caso é o **classificador de margem não linear** (CMNL).

Fundamentação dos ASV

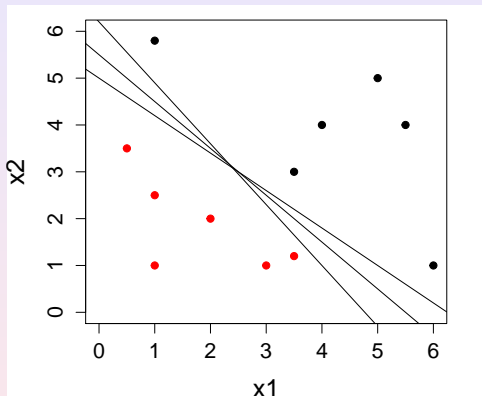


Figura: Dois conjuntos de pontos perfeitamente separáveis por um hiperplano (reta)

Fundamentação dos ASV

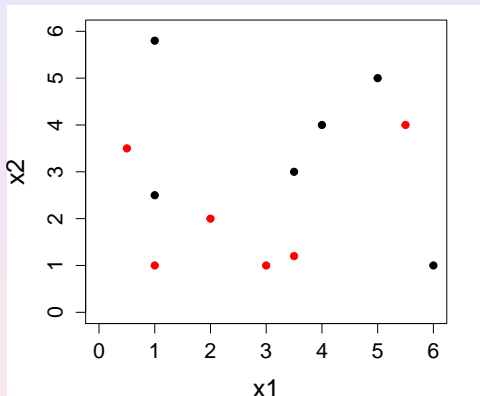


Figura: Dois conjuntos de pontos não separáveis por um hiperplano (reta)

Margem e Vetores Suporte

- No caso de duas variáveis, o hiperplano é uma reta com equação $\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 = 0$.
- Essa reta separa o plano em duas regiões, uma em que $\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 > 0$ e outra em que $\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 < 0$.
- Consideremos n observações das variáveis X_1, \dots, X_p , dispostas na forma de uma matriz \mathbf{X} , de ordem $n \times p$. Seja $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})^\top$, o vetor correspondente à i -ésima coluna de \mathbf{X} .
- Além disso, sejam $y_1, \dots, y_n \in \{-1, 1\}$, definindo o conjunto de treinamento $\mathcal{T} = \{(\mathbf{x}_1, y_1), \dots, (\mathbf{x}_n, y_n)\}$ e seja $\mathbf{x}_0 = (x_{10}, \dots, x_{p0})^\top$ um **vetor de teste**.

Margem e Vetores Suporte

- Queremos desenvolver um classificador usando um hiperplano separador no espaço \mathbb{R}^p com base no conjunto de treinamento.
- Definindo $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_p)^\top$, teremos

$$\alpha + \boldsymbol{\beta}^\top \mathbf{x}_i > 0, \quad \text{se } y_i = 1, \quad (1)$$

$$\alpha + \boldsymbol{\beta}^\top \mathbf{x}_i < 0, \quad \text{se } y_i = -1. \quad (2)$$

- Chamemos

$$f(\mathbf{x}) = \alpha + \boldsymbol{\beta}^\top \mathbf{x}. \quad (3)$$

Então, classificaremos \mathbf{x}_0 a partir do sinal de $f(\mathbf{x}_0) = \alpha + \boldsymbol{\beta}^\top \mathbf{x}_0$; se o sinal for positivo, \mathbf{x}_0 será classificado na Classe 1 (para a qual $y = 1$, digamos), e se o sinal for negativo, na Classe 2 (para a qual $y = -1$). Em qualquer situação, $y_i(\alpha + \boldsymbol{\beta}^\top \mathbf{x}_i) \geq 0$.

Margem e Vetores Suporte

- Como vimos, podem existir infinitos hiperplanos separadores, se os dados de treinamento estiverem perfeitamente separados.
- A sugestão de Vapnik e colaboradores é escolher um hiperplano que esteja o mais afastado das observações de treinamento, chamado de **hiperplano de margem máxima**.
- A **margem** é a menor distância entre o hiperplano e os pontos de treinamento.
- O classificador de margem máxima (CMM) é a solução (se existir) do seguinte problema de otimização:

$$\text{maximizar}_{(\alpha, \beta)} m(\alpha, \beta) \quad (4)$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^p \beta_i^2 = 1, \quad (5)$$

$$y_i(\alpha + \beta^\top \mathbf{x}_i) \geq m(\alpha, \beta), \quad i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

- Dizemos que $m = m(\alpha, \beta)$ é a **margem** do hiperplano e cada observação estará do lado correto do hiperplano se $m > 0$.

Margem e Vetores Suporte

- Os chamados **vetores suporte** são definidos pelos pontos cujas distâncias ao hiperplano separador sejam iguais à margem e se situam sobre as **fronteiras de separação**, que são hiperplanos paralelos cujas distâncias ao hiperplano separador é igual à margem.
- O classificador depende desses vetores, mas não das demais observações.
- A distância m do hiperplano separador a um ponto do conjunto de treinamento é

$$m = |f(\mathbf{x})| / \|\beta\|,$$

em que o denominador indica a norma do vetor β .

Margem e Vetores Suporte

- Como o interesse está nos pontos que são corretamente classificados, devemos ter $y_i f(\mathbf{x}_i) > 0$, $i = 1, \dots, n$. Então

$$\frac{y_i f(\mathbf{x}_i)}{\|\beta\|} = \frac{y_i(\alpha + \beta^\top \mathbf{x}_i)}{\|\beta\|}, \quad (7)$$

e queremos escolher α e β de modo a maximizar essa distância.

- A margem máxima é encontrada resolvendo

$$\operatorname{argmax}_{\alpha, \beta} \left\{ \frac{1}{\|\beta\|} \min_i \left[y_i(\alpha + \beta^\top \mathbf{x}_i) \right] \right\}. \quad (8)$$

- A solução de (8) é complicada e sua **formulação canônica** pode ser convertida num problema mais fácil por meio do uso de **Multiplicadores de Lagrange**.

Exemplo CMM

Consideremos os 12 pontos dispostos na Figura 1, sendo 6 em cada classe. Usando a função `svm` do pacote `e1071` e o comando `summary(svm.model)` obtemos o seguinte resultado:

Call:

```
svm(formula = type ~ ., data = my.data, type = "C-classification",  
kernel = "linear", scale = FALSE)
```

Parameters:

```
SVM-Type: C-classification
```

```
SVM-Kernel: linear
```

```
cost: 1
```

```
gamma: 0.5
```

Number of Support Vectors: 3

```
( 1 2 )
```

Number of Classes: 2

Levels:

```
-1 1
```


Exemplo CMM

- Observe que a função usa o kernel linear, que corresponde ao CMM.
- As opções *cost* e *gamma* serão explicadas adiante.
- Os coeficientes do hiperplano separador, que nesse caso é uma reta, podem ser obtidos por meio dos comandos

```
\alpha = svm.model$ rho
```

```
\beta = t(svm.model$coefs) %*% svm.model $ SV
```

e são

```
> alpha
```

```
[1] 5.365853
```

```
> beta
```

```
          x1          x2  
[1,] -0.8780489 -1.097561
```

Exemplo CMM

- A equação do hiperplano separador, disposto na Figura 3 é $5,366 - 0,878X_1 - 1,098X_2 = 0$.
- Na mesma figura, indicamos as fronteiras de separação e os vetores suporte, dados pela solução de (4). Note que os coeficientes $\beta_1 = 0,8780489$ e $\beta_2 = -1,097561$ não satisfazem a restrição indicada em (4), pois foram obtidos por meio da formulação canônica do problema em que a restrição é imposta ao numerador de (7). Para detalhes, consulte a Nota de Capítulo 3.
- Neste caso há três vetores suporte (indicados por círculos azuis), um na Classe 1 (ponto em vermelho) e dois na Classe 2 (pontos em preto). Os demais pontos estão em lados separados, delimitados pelas fronteiras de separação (não há pontos entre as fronteiras).
- A margem é $m = 0,71$.

Exemplo CMM

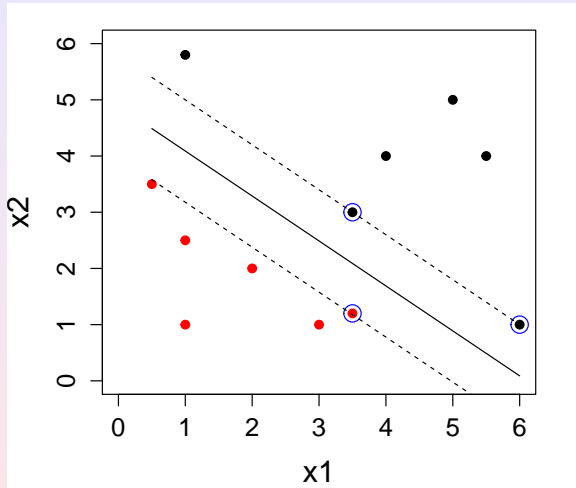


Figura: Hiperplano (reta) separador, margem, fronteiras e vetores suporte.

Exemplo CMM

- Consideremos agora dois pontos, \mathbf{x}_0^* e \mathbf{x}_1^* , o primeiro na Classe 1 e o segundo na Classe 2 e vamos classificá-los, usando o algoritmo.
- Por meio da função **predict**, obtemos a Figura 4, que mostra a classificação correta de ambos os pontos (representados nas cores verde e azul).
- Se o problema acima não tiver solução não existirá hiperplano separador, como é o caso apresentado na Figura 2. Nesse caso precisamos recorrer a um classificador que **quase** separa as duas classes. É o que veremos a seguir.

Exemplo CMM

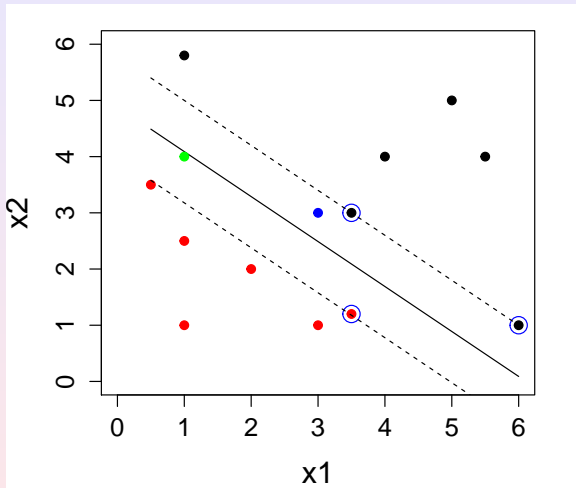


Figura: Classificação dos pontos indicados pelas cores verde e azul.

CMF

- Se não existir um hiperplano separador, como aquele do Exemplo anterior, observações podem estar do lado errado da margem ou mesmo do hiperplano, correspondendo nesse caso a classificações erradas.
- O **classificador de margem flexível** (CMF), também conhecido como **classificador baseado em suporte vetorial** é escolhido de modo a classificar corretamente a maioria das observações, o que se consegue com a introdução de **variáveis de folga**, $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n)^\top$, no seguinte problema de otimização:

$$\text{maximizar}_{(\alpha, \beta, \xi)} m(\alpha, \beta, \xi), \quad (9)$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^p \beta_i^2 = 1, \quad (10)$$

$$y_i(\alpha + \beta^\top \mathbf{x}_i) \geq m(\alpha, \beta, \xi)(1 - \xi_i), \quad (11)$$

$$\xi_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^n \xi_i \leq C.$$

em que C é uma constante positiva. Veja abaixo para mais detalhes sobre C .

- Embora esse tipo de classificador seja conhecido como **support vector classifier** ou **soft margin classifier**, optamos por denominá-lo “classificador de margem flexível” para diferenciá-lo do “classificador de margem máxima”, que também é baseado em vetores suporte.
- As variáveis de folga permitem que observações estejam do lado errado da margem ou do hiperplano. Pontos tais que $\xi_i = 0$ são corretamente classificados e estão sobre a fronteira de separação ou do lado correto da fronteira. Pontos para os quais $0 < \xi_n \leq 1$ estão dentro da fronteira da margem, mas do lado correto do hiperplano, e pontos para os quais $\xi_n > 1$ estão do lado errado do hiperplano e serão classificados erroneamente. Veja a Figura 5, extraída de Bishop (2006). Nessa figura, m está normalizada apropriadamente, veja as Notas de Capítulo 3 e 4.
- O objetivo é maximizar a margem e, então, minimizamos

$$C \sum_{i=1}^n \xi_i + \frac{1}{2} \|\beta\|^2, \quad (12)$$

em que $C > 0$ controla o balanço entre a penalidade das variáveis de folga e a margem.

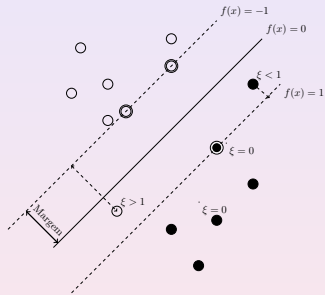


Figura: Detalhes sobre o classificador de margem flexível.

- Como qualquer ponto classificado erroneamente satisfaz $\xi_i > 1$, segue-se que $\sum_{i=1}^n \xi_i$ é um limite superior para o número de classificações errôneas. No limite, quando $C \rightarrow \infty$, obtemos o CMM.
- Queremos minimizar(12) sujeito a (9). Veja a Nota de Capítulo 4.
- A constante $C \geq 0$ deve ser escolhida apropriadamente e determina o número de violações (classificações erradas) permitidas pelo algoritmo. Se $C = 0$, então não há violações e $\xi_1 = \dots = \xi_n = 0$. Se C aumenta, a margem fica mais larga e o contrário ocorre se C decresce. O valor de C tem a ver com a relação viés-variância: quando a constante C é pequena, o viés é pequeno e a variância é grande; se C é grande, o viés é grande e a variância é pequena. Pode-se dizer que C representa o **custo** do classificador.
- A constante C normalmente é escolhida por **validação cruzada** O pacote [e1071](#) tem uma função, `tune()`, que realiza esse procedimento para escolher o melhor modelo, para diferentes valores de C .

Exemplo 1 CMF

Exemplo 1. Consideremos agora os dados dispostos na Figura 3 em que as duas classes não são perfeitamente separáveis. Nesse caso, a utilização da função `tune()` do pacote `e1071` gera o seguinte resultado (editado) indicando que a melhor opção é considerar $C = 4$ e $\text{gamma} = 0.5$.

```
Parameter tuning of svm:  
- sampling method: 10-fold cross validation  
- best parameters:  
  gamma    cost  
  0.5      4  
- best performance: 0.5
```

```
- Detailed performance results:  
  gamma cost error dispersion  
1  0.5   4  0.50  0.4714045  
2  1.0   4  0.60  0.4594683  
3  2.0   4  0.70  0.4216370  
4  0.5   8  0.65  0.4743416  
5  1.0   8  0.65  0.4743416  
6  2.0   8  0.70  0.4216370  
7  0.5  16  0.65  0.4743416  
8  1.0  16  0.65  0.4743416  
9  2.0  16  0.70  0.4216370
```

Exemplo 1 CMF

Com esses parâmetros, as funções `svm` e `summary` geram o seguinte resultado, indicando que há 8 vetores suporte, 4 em cada classe.

```
svm(formula = type ~ ., data = my.data, type = "C-classification",  
kernel = "linear", gamma = 0.5, cost = 4, scale = FALSE)
```

Parameters:

```
SVM-Type: C-classification
```

```
SVM-Kernel: linear
```

```
cost: 4
```

```
gamma: 0.5
```

```
Number of Support Vectors: 8
```

```
( 4 4 )
```

```
Number of Classes: 2
```

```
Levels:
```

```
-1 1
```

Exemplo 1 CMF

Um gráfico indicando os vetores suporte e as regiões de classificação correspondentes está apresentado na Figura 6.

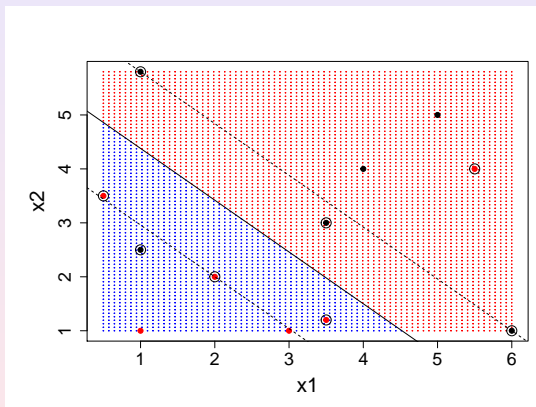


Figura: Vetores suporte para os dados da Figura 3

Exemplo 1 CMF

- A equação do hiperplano classificador é $3,760 - 0,676x_1 - 0,704x_2 = 0$ ou equivalentemente, $x_2 = 3,760/0,704 - 0,676/0,704x_1 = 5,339 - 0,960x_1$. A margem correspondente é $m = (0,676^2 + 0,704^2)^{1/2} = 0,976$. Para detalhes, consulte as Notas de Capítulo 3 e 4.
- Com os comandos `svm.pred <- predict(svm.model, my.data)` e `table(svm.pred, ys)` podem-se obter uma tabela com as classificações certas e erradas assim como as classificações determinadas pelo algoritmo. No exemplo, há 2 classificações erradas conforme indicado na Tabela 1.

Exemplo 1 CMF

Tabela: Coordenadas e classificação dos pontos do Exemplo 8.1 com classificação predita pelo algoritmo

observação	x1	x2	y	y predito
1	0.5	3.5	1	1
2	1.0	1.0	1	1
3	1.0	2.5	-1	1
4	2.0	2.0	1	1
5	3.0	1.0	1	1
6	3.5	1.2	1	1
7	1.0	5.8	-1	-1
8	3.5	3.0	-1	-1
9	4.0	4.0	-1	-1
10	5.0	5.0	-1	-1
11	5.5	4.0	1	-1
12	6.0	1.0	-1	-1

Exemplo 2 CMF

- Os dados do arquivo **tipofacial** forma extraídos de um estudo odontológico realizado pelo Dr. Flávio Cotrim Vellini. Um dos objetivos era utilizar medidas entre diferentes pontos do crânio para caracterizar indivíduos com diferentes tipos faciais, a saber, braquicéfalos, mesocéfalos e doliocéfalos.
- O conjunto de dados contém observações de 11 variáveis em 101 pacientes. Para efeitos didáticos, utilizaremos apenas a altura facial e a profundidade facial como variáveis preditoras.
- A Figura 7 mostra os três grupos (correspondentes à classificação do tipo facial).

Exemplo 2 CMF

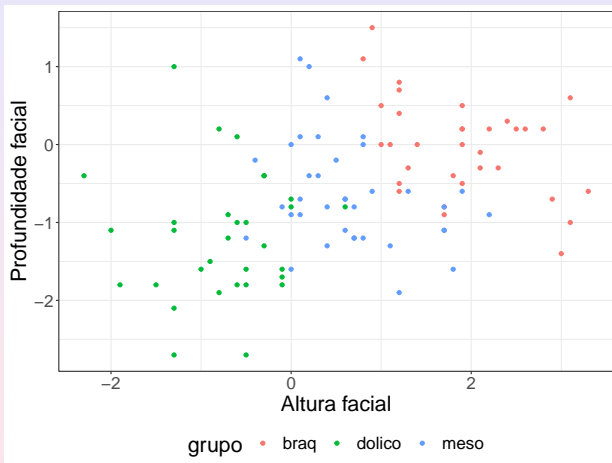


Figura: Gráfico de dispersão com identificação dos três tipos faciais.

Exemplo 2 CMF

Utilizando a função `tune.svm()` do pacote `e1071` por meio dos seguintes comandos

```
> escolhaparam <- tune.svm(grupo ~ altfac + proffac, data = face,  
                           gamma = 2^(-2:2), cost = 2^2:5,  
                           na.action(na.omit(c(1, NA))))  
> summary(escolhaparam)
```

obtemos os resultados, apresentados abaixo, que indicam que as melhores opções para os parâmetros C e γ (obtidas por meio de validação cruzada de ordem 10) para o classificador de margem flexível são $C = 4$ e $\gamma = 2$.

Exemplo 2 CMF

Parameter tuning of svm:

- sampling method: 10-fold cross validation

- best parameters:

gamma cost

2 4

- best performance: 0.1281818

- Detailed performance results:

	gamma	cost	error	dispersion
1	0.25	4	0.1481818	0.1774759
2	0.50	4	0.1681818	0.1700348
3	1.00	4	0.1681818	0.1764485
4	2.00	4	0.1281818	0.1241648
5	4.00	4	0.1581818	0.1345127
6	0.25	5	0.1481818	0.1774759
7	0.50	5	0.1681818	0.1700348
8	1.00	5	0.1481818	0.1503623
9	2.00	5	0.1281818	0.1148681
10	4.00	5	0.1772727	0.1453440

Exemplo 2 CMF

Por intermédio da função `svm` com os parâmetros $C = 4$ e $\text{gamma}=2$ obtemos o seguinte resultado com o classificador de margem flexível:

```
svm.model <- svm(grupo ~ altfac + proffac, data = face,  
                 kernel = "linear", gamma=2, cost=4)  
summary(svm.model)
```

Parameters:

SVM-Type: C-classification

SVM-Kernel: linear

cost: 4

Number of Support Vectors: 43

(12 10 21)

Number of Classes: 3

Levels:

braq dolico meso

Exemplo 2 CMF

A tabela de classificação obtida com os comandos apresentados abaixo, indica o número de classificações certas e erradas.

```
svm.pred <- predict(svm.model, face)
table(pred = svm.pred, true = face\$grupo)
```

	true		
pred	braq	dolico	meso
braq	26	0	2
dolico	0	28	4
meso	7	3	31

Exemplo 2 CMF

- Na Figura 8 apresentamos o gráfico de classificação correspondente, obtido por meio do comando

```
plot(svm.model, face, proffac ~ altfac, svSymbol = 4,  
dataSymbol = 4, cex.lab=1.8, main="",  
color.palette = terrain.colors)
```

- Uma das características importantes dos classificadores baseados em vetores suporte é que apenas as observações que se situam sobre a margem ou do lado errado da mesma afetam o hiperplano.
- Observações que se situam no lado correto da margem podem ser alteradas (mantendo-se suas classificações) sem que o hiperplano separador seja afetado.

Exemplo 2 CMF

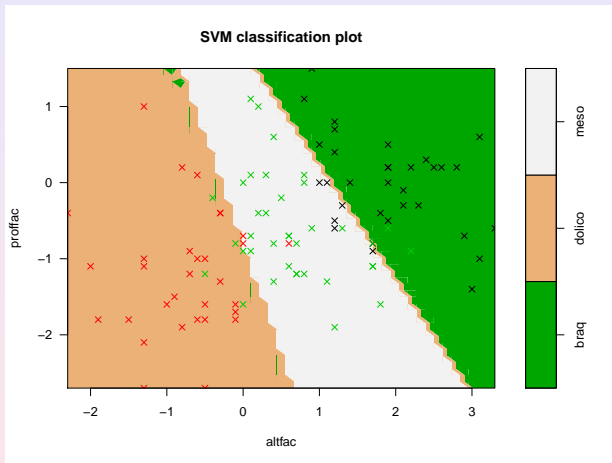


Figura: Classificação do tipo facial obtida pelo classificador de margem flexível.

Referências

- James, G., Witten, D., Hastie, T. and Tibshirani, R. (2017). *Introduction to Statistical Learning*. Springer.
- Morettin, P. A. e Singer, J. M. (2021). *Estatística e Ciência de Dados*. Texto Preliminar, IME-USP.
- Vapnik, V. and Chervonenkis, A. (1964). A note on a class of perceptrons. *Automation and Remote Control*, **25**.
- Vapnik, V. and Chervonenkis, A. (1974). *Theory of Pattern recognition* [in Russian]. Moskow: Nauka.
- Vapnik, V. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*. New York: Springer.
- Vapnik, V. (1998). *Statistical Learning Theory*. New York: Wiley.