

Modelos de Regressão para Dados de Contagem com R

Prof. Dr. Walmes M. Zeviani
Eduardo E. Ribeiro Jr
Prof. Dr. Cesar A. Taconeli

Laboratório de Estatística e Geoinformação
Departamento de Estatística
Universidade Federal do Paraná

7 de junho de 2016

`{walmes,eduardo.jr,taconeli}@ufpr.br`

Disponibilização



<https://github.com/leg-ufpr/MRDCr>

<https://gitlab.c3sl.ufpr.br/leg/MRDCr>

Modelos de Regressão para Dados de Contagem com `r` - MRDCr

Conteúdo

1. Introdução
2. Modelo de Poisson
3. Estimação via Quase-Verossimilhança
4. Modelo Binomial Negativa
5. Modelos para Excesso de Zeros
 - 5.1 Modelos de Barreira *Hurdle*
 - 5.2 Modelos de Mistura (*Zero Inflated*)
6. Modelos Paramétricos Alternativos
 - 6.1 Modelo Poisson-Generalizada
 - 6.2 Modelo COM-Poisson
 - 6.3 Modelo Gamma-Count
7. Modelos com Efeitos Aleatórios

1

Introdução

Dados de contagens

Alguns exemplos de problemas envolvendo contagens:

- ▶ Número de acidentes em uma rodovia por semana;
- ▶ Número de automóveis vendidos por dia;
- ▶ Número de gols marcados por times de futebol por partida;
- ▶ Número de falhas por metro de fio de cobre produzido;
- ▶ Número de colônias de bactérias por $0,01mm^2$ de uma dada cultura...

Modelos probabilísticos para dados de contagens

- ▶ Modelos probabilísticos para variáveis aleatórias discretas, com suporte no conjunto de números inteiros não-negativos, são potenciais candidatos para a análise de dados de contagens.
- ▶ Algumas alternativas: Distribuição Binomial, Poisson e generalizações; distribuições geradas por misturas, como a beta-binomial, binomial negativa; distribuições fundamentadas na modelagem do tempo entre eventos, na razão de probabilidades sucessivas...

Regressão para dados de contagens

- ▶ Modelos de regressão são utilizados para modelar a distribuição de uma variável aleatória Y condicional aos valores de um conjunto de variáveis explicativas x_1, x_2, \dots, x_p .
- ▶ Métodos para inferência e modelos de regressão para dados de contagem estão bem aquém, em quantidade e diversidade, em relação ao verificado para dados contínuos.
- ▶ A aplicação de modelos de regressão com erros normais na análise de contagens, embora frequente, em geral é desaconselhável.

Regressão com erros normais na análise de dados de contagens

- ▶ O modelo linear com erros normais não considera a natureza discreta dos dados;
- ▶ Associa probabilidade nula a qualquer possível contagem;
- ▶ Admite probabilidades não nulas a valores negativos da variável;

Regressão com erros normais na análise de dados de contagens

- ▶ O uso de transformações dificulta a interpretação dos resultados;
- ▶ O uso da transformação logarítmica apresenta problemas para contagens iguais a zero;
- ▶ Não se contempla a relação não constante entre variância e média, característica de dados de contagens.

2

Modelo de Poisson

A distribuição de Poisson

- ▶ A distribuição de Poisson é a principal referência para a análise de dados de contagens.
- ▶ Função de probabilidades:

$$P(Y = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots; \lambda > 0.$$

- ▶ Se os eventos sob contagem ocorrem independentemente e sujeitos a uma taxa constante $\lambda > 0$, sob o modelo Poisson, para um intervalo de exposição de tamanho t tem-se:

$$P(Y_t = k) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^k}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Propriedades da distribuição de Poisson

Dentre as principais propriedades da distribuição de Poisson, tem-se:

- ▶ Média: $E(Y) = \lambda$;
- ▶ Variância: $Var(Y) = \lambda$ (equidispersão);
- ▶ Razão de probabilidades sucessivas: $\frac{P(X=k)}{P(X=k-1)} = \frac{\lambda}{k}$, gerando a relação de recorrência:

$$P(Y = k)k = P(Y = k - 1)\lambda;$$

- ▶ Se Y_1, Y_2, \dots, Y_n são v.a.s independentes com $Y_i \sim Poisson(\lambda_i)$, e $\sum \lambda_i < \infty$, então $\sum Y_i \sim Poisson(\sum \lambda_i)$.

Distribuição Poisson para diferentes valores de λ

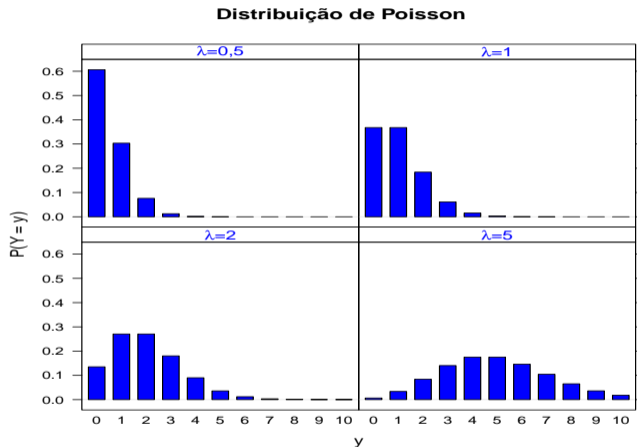


Figura : Distribuição de Poisson para diferentes valores de λ

Motivações para a distribuição de Poisson

- ▶ Caso limite da distribuição binomial(n, π) quando $n \rightarrow \infty$ e $\pi \rightarrow 0$, fixado $\lambda = n\pi$, ou seja:

$$\lim_{n \rightarrow \infty \pi \rightarrow 0} \left[\binom{n}{k} \left(\frac{\lambda}{n}\right)^k \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{n-k} \right] = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}.$$

- ▶ Resultado do processo estocástico de Poisson, em que os eventos contados ocorrem **aleatoriamente** ao longo do tempo, espaço,...

Motivações para a distribuição de Poisson

- ▶ Se o tempo decorrido entre sucessivos eventos é uma variável aleatória com distribuição exponencial de média $\mu = 1/\lambda$, então o número de eventos ocorridos em um intervalo t de tempo tem distribuição de Poisson com média λt .
 - ▶ A dualidade entre as distribuições Poisson e exponencial implica que a taxa de ocorrência do evento, definida por:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P \{ \text{evento ocorrer em } (t, t + \Delta t) \}}{\Delta t},$$

dado que o evento não ocorreu até o tempo t , é **constante** para todo $t > 0$.

Diferentes comportamentos para $\lambda(t)$

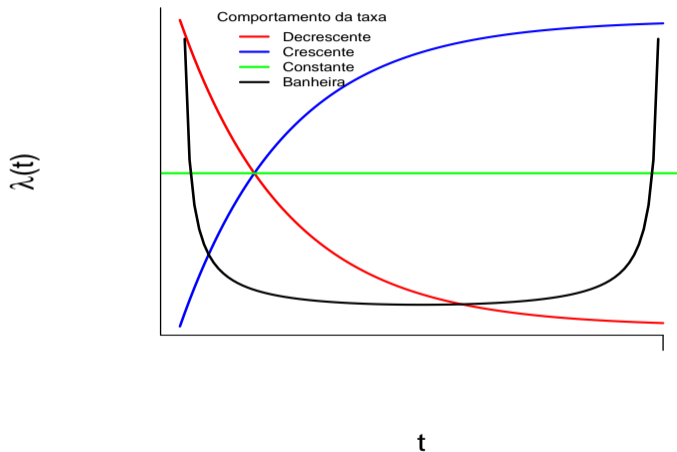


Figura : Diferentes comportamentos para $\lambda(t)$

O processo de Poisson

O Processo de Poisson configura um processo de contagem em que $Y(t), t \geq 0$, representa o número de eventos que ocorrem até t , satisfazendo:

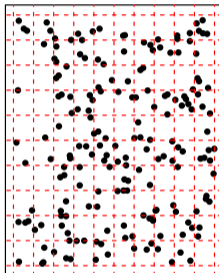
- 1 $Y(t)$ é inteiro e não negativo;
- 2 Para $s < t$, $Y(s) \leq Y(t)$;
- 3 $Y(t) - Y(s)$ é o número de eventos que ocorrem no intervalo $(s, t]$;
- 4 O processo é estacionário:

$$Y(t_2 + s) - Y(t_1 + s) \stackrel{i.d.}{\sim} Y(t_2) - Y(t_1), \forall s > 0$$

- 5 O processo tem incrementos independentes, ou seja, os números de eventos verificados em intervalos disjuntos são independentes.

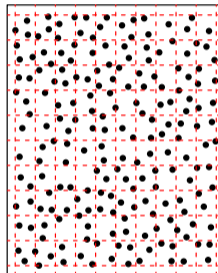
Diferentes padrões em processos de contagens

Padrão aleatório



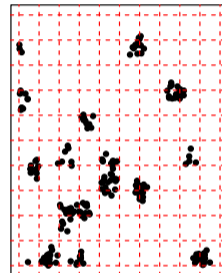
Equidispersão
 $\text{Var}(Y)=E(Y)$

Padrão uniforme



Subdispersão
 $\text{Var}(Y)<E(Y)$

Padrão agregado



Superdispersão
 $\text{Var}(Y)>E(Y)$

Figura : Ilustração de diferentes tipos de processos pontuais

Regressão Poisson

- ▶ O modelo de regressão Poisson (ou modelo log linear de Poisson) é o mais usado para a análise de dados de contagens.
- ▶ A regressão Poisson baseia-se nos pressupostos inerentes ao processo e à distribuição de Poisson.
- ▶ Caso tais pressupostos não sejam atendidos, a regressão Poisson ainda pode ser uma alternativa apropriada, desde que usada com os cuidados necessários.

Regressão Poisson - Especificação do modelo

- ▶ Sejam Y_1, Y_2, \dots, Y_n variáveis aleatórias condicionalmente independentes, dado o vetor de covariáveis $\mathbf{x}_i' = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$, $i = 1, 2, \dots, n$. A regressão Poisson é definida pela distribuição de Poisson:

$$f(y_i|\mathbf{x}_i) = \frac{e^{-\mu_i}(\mu_i)^{y_i}}{y_i!}, \quad y = 0, 1, 2, \dots,$$

sendo as covariáveis inseridas ao modelo por:

$$\ln(\mu_i) = \mathbf{x}_i'\boldsymbol{\beta},$$

em que $\boldsymbol{\beta}$ é o vetor de parâmetros de regressão.

Regressão Poisson - Propriedades

- ▶ $f(y_i | \mathbf{x}_i) = \frac{e^{-\exp(\mathbf{x}'_i \boldsymbol{\beta})} \exp(\mathbf{x}'_i \boldsymbol{\beta})^{y_i}}{y_i!}$
- ▶ $E[y_i | \mathbf{x}_i] = \mu_i = \exp(\mathbf{x}'_i \boldsymbol{\beta}) ;$
- ▶ $Var[y_i | \mathbf{x}_i] = \mu_i = \exp(\mathbf{x}'_i \boldsymbol{\beta}) .$

Regressão Poisson - Estimação por máxima verossimilhança

Para a regressão Poisson:

- ▶ Log-verossimilhança: $l(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^n \{y_i x_i' \boldsymbol{\beta} - \exp(x_i' \boldsymbol{\beta})\} - \ln(y_i!)$;
- ▶ Vetor escore: $S(\boldsymbol{\beta}) = \frac{\partial l(\boldsymbol{\beta}; \mathbf{y})}{\partial \boldsymbol{\beta}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \exp(x_i' \boldsymbol{\beta})) x_i$;
- ▶ Matriz Informação: $I(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^n \mu_i x_i x_i' = \exp(x_i' \boldsymbol{\beta}) x_i x_i'$;
- ▶ Distribuição assintótica: $\hat{\boldsymbol{\beta}} \stackrel{a}{\sim} N\left(\boldsymbol{\beta}, [\sum_{i=1}^n \mu_i x_i x_i']^{-1}\right)$.

Regressão Poisson - Modelo Linear Generalizado

A Regressão Poisson é um caso particular dos Modelos Lineares Generalizados (MLG). Algumas propriedades dessa classe de modelos:

- ▶ Os estimadores são consistentes ainda que a distribuição especificada seja incorreta, mas desde que a média condicional de Y seja declarada corretamente;
- ▶ Os erros padrões, intervalos de confiança e testes de hipóteses, no entanto, ficam comprometidos;
- ▶ O ajuste de um MLG requer apenas a especificação:
 - ▶ Da esperança de Y condicional às covariáveis, mediante especificação do preditor linear e da função de ligação;
 - ▶ Da variância condicional, mediante especificação da função de variância $V(\mu)$, possível inclusão do parâmetro de dispersão (ϕ), ou sua estimação por métodos robustos (abordagem de Quase-Verossimilhança).

Estudos de caso

Vignette v01_poisson.html

3

Estimação via Quase-Verossimilhança

Regressão Poisson - Quase-Verossimilhança

- ▶ Para o ajuste de um modelo alternativo via Quase-Verossimilhança, definimos:

$$g(E(y_i|\mathbf{x}_i)) = \mathbf{x}_i'\boldsymbol{\beta};$$

$$\text{Var}(y_i|\mathbf{x}_i) = \phi V(\mu_i).$$

- ▶ A obtenção dos estimadores se dá pela maximização da função de quase-verossimilhança:

$$Q(\boldsymbol{\mu}) = \int_y^\mu \frac{y-t}{\phi V(t)} dt$$

- ▶ As funções de quase-verossimilhança, quase-escore e quase-informação compartilham propriedades comuns às correspondentes funções no caso paramétrico, para MLGs.

Estimação via Quase-Verossimilhança

- ▶ Distribuição assintótica:

$$\hat{\beta}_{QL} \overset{a}{\sim} N(\beta, \text{Var}(\hat{\beta}_{QL}))$$

- ▶ Para o modelo Quase-Poisson, assume-se:

$$\ln(E(y_i|x_i)) = x_i'\beta;$$

Estimação via Quase Verossimilhança

- ▶ A matriz de covariâncias assintótica para $\hat{\beta}_{QL}$ fica dada por:

$$\text{Var}(\hat{\beta}_{QL}) = \left[\sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i' \mu_i \right]^{-1} \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i' \omega_i \left[\sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i' \mu_i \right]^{-1},$$

com $\mu_i = \exp(\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta})$ e $\omega_i = \text{Var}(y_i | \mathbf{x}_i)$.

- ▶ Podemos considerar $\omega_i = V(\mu_i; \phi)$, como $\omega_i = \phi \mu_i$, $\omega_i = \phi \mu_i^2$ ou, simplesmente, o estimador robusto, baseado em $\omega_i = (y_i - \mu_i)^2$.
- ▶ Um estimador para ϕ :

$$\hat{\phi} = \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{\mu}_i)^2}{V(\hat{\mu}_i)}.$$

Estudos de caso

Vignette `Ovelhas.html`

4

Modelo Binomial Negativa

Distribuição binomial negativa

- ▶ Função de probabilidades:

$$P(Y = k) = \frac{\Gamma(\alpha + k)}{\Gamma(k + 1)\Gamma(\alpha)} \left(\frac{\lambda}{\lambda + \alpha}\right)^k \left(\frac{\alpha}{\lambda + \alpha}\right)^\alpha, k = 0, 1, 2, \dots; \alpha > 0, \lambda > 0$$

- ▶ Propriedades:

$$E(Y) = \lambda; \quad \text{Var}(Y) = \lambda + \alpha^{-1}\lambda^2$$

- ▶ Assim, para qualquer $\alpha > 0$, temos $\text{Var}(Y) > \lambda$.
- ▶ A distribuição binomial negativa tem como caso limite distribuição Poisson, quando $\alpha \rightarrow \infty$.

Distribuição binomial negativa

- ▶ Uma parametrização alternativa:

$$P(Y = k) = \binom{r + k - 1}{r - 1} (1 - p)^r p^k, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

sendo $r = \alpha$ e $p = \lambda / (\lambda + \alpha)$, com $0 < p < 1$ e $r > 0$.

- ▶ Modelagem do número de "sucessos" até o r -ésimo "fracasso" ($r = 1, 2, 3, \dots$), configurando uma generalização da distribuição geométrica (para $r = 1$).
- ▶ Modelagem de alguns tipos de processos pontuais envolvendo contágio.

Distribuição binomial negativa

- ▶ A principal motivação para a distribuição binomial negativa baseia-se num processo de contagem heterogêneo, em que $Y \sim \text{Poisson}(\theta)$ e θ tem distribuição $\text{Gama}(\alpha, \beta)$:

$$g(\theta; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \theta^{\alpha-1} e^{-\beta\theta}, \quad \alpha, \beta, \nu > 0,$$

com $E(\theta) = \theta = \alpha/\beta$ e variância $\text{Var}(\theta) = \alpha/\beta^2$.

- ▶ Como resultado, temos uma mistura Poisson-Gamma, resultando, marginalmente (em relação a θ), na distribuição binomial negativa.

Distribuição binomial negativa para diferentes parâmetros

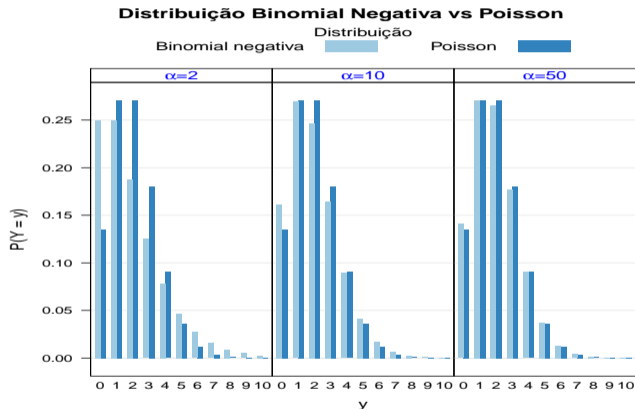


Figura : Distribuição binomial negativa para $\lambda = 2$ e diferentes valores de α .

Distribuição binomial negativa

- ▶ O modelo de regressão com resposta binomial negativa pode ser especificado fazendo $E(y|x) = \exp(x'\beta)$.
- ▶ Para valores fixados de α , a distribuição binomial negativa fica expressa na forma da família exponencial linear, contemplada pela teoria de MLG.
- ▶ A estimação dos parâmetros do modelo se dá numericamente, segundo um algoritmo em duas etapas, em que α e β são estimados condicionalmente até convergência.

Estudos de caso

Vignette Sinistros.html

5

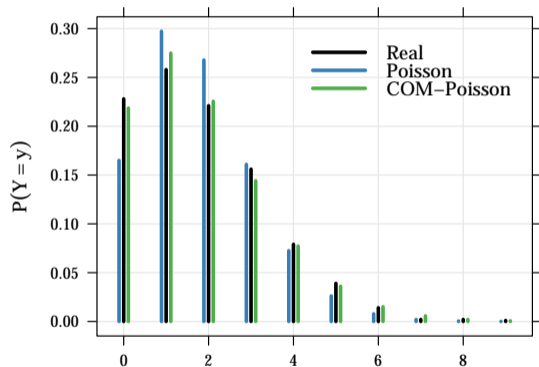
Modelos para Excesso de Zeros

Excesso de Zeros

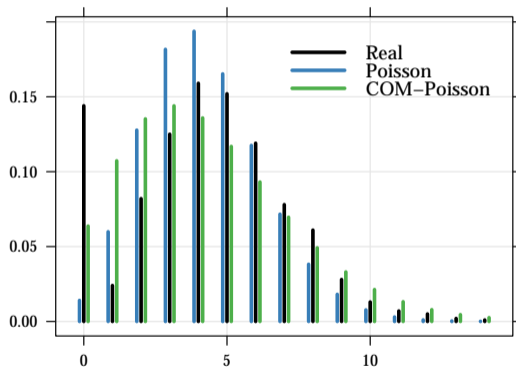
- ▶ Casos em que a proporção de valores nulos na amostra é superior àquela estimada por um modelo de contagem. No caso Poisson $e^{-\lambda}$
- ▶ Geralmente contagens com um número excessivo de valores nulos apresentam superdispersão (ocasionada pelo excesso de zeros).
- ▶ Os modelos mais flexíveis abordados não capturam esse excesso de zeros e não se ajustam adequadamente.

Excesso de Zeros

$$\mu_{\text{count}} = 2, \pi_{\text{zero extra}} = 0.1$$



$$\mu_{\text{count}} = 5, \pi_{\text{zero extra}} = 0.15$$



Gerador de excesso de zeros

- ▶ Uma limitação das abordagens estudadas é que as contagens nulas e não nulas são provenientes do mesmo processo gerador dos dados.
- ▶ Para dados com excesso de zeros, é razoável a suposição da haver mais de um processo gerador atuando na geração dos dados.
- ▶ Assim a ocorrência de valores nulos podem ser caracterizada como:
 - ▶ **zeros amostrais:** Ocorrem segundo um processo gerador de contagens (e.g Processo Poisson)
 - ▶ **zeros estruturais:** Ausência de determinada característica da população.

Gerador de excesso de zeros

Exemplo. Um estudo que visa avaliar a quantidade de produtos comprados em um mercado por uma família na última semana. A variável de interesse é o número de itens comprados.

zeros estruturais: Se a família não foi ao mercado na última semana. Inevitavelmente o número de produtos será 0.

zeros amostrais: A família foi ao mercado, porém não adquiriu nenhum produto.

Modelando contagens com excesso de zeros

Como há dois processos que geram os valores da população, na modelagem deve-se considerar ambos. As principais abordagens nestes casos são via:

- ▶ **Modelos de barreira (*Hurdle Models*):** que desconsidera os zeros amostrais e modela os zeros estruturais e as contagens positivas (seção 1); e
- ▶ **Modelos de mistura (*Zero Inflated Models*):** que modela os zeros (estruturais e amostrais) em conjunto com as contagens positivas (2).

5.1

Modelos para Excesso de Zeros
Modelos de Barreira *Hurdle*

Modelos *Hurdle*

- ▶ A variável de interesse é particionada em contagens nulas e não nulas;
- ▶ Consideram somente os zeros estruturais;
- ▶ São chamados também de modelos condicionais, hierárquicos ou de duas partes;
- ▶ Esta abordagem combina um modelo de contagem truncado à esquerda do ponto $y = 1$ e um modelo censurado à direita no mesmo ponto $y = 1$

Modelos Hurdle

Distribuição de probabilidades

$$Pr(Y = y) = \begin{cases} f_z(0) & \text{se } y = 0, \\ (1 - f_z(0)) \frac{f_c(Y = y)}{1 - f_c(Y = 0)} & \text{se } y = 1, 2, \dots \end{cases}$$

em que f_z é uma função de probabilidades degenerada no ponto 0 e f_c um função de probabilidades de uma variável Y^* , como a Poisson.

Momentos da distribuição

Média

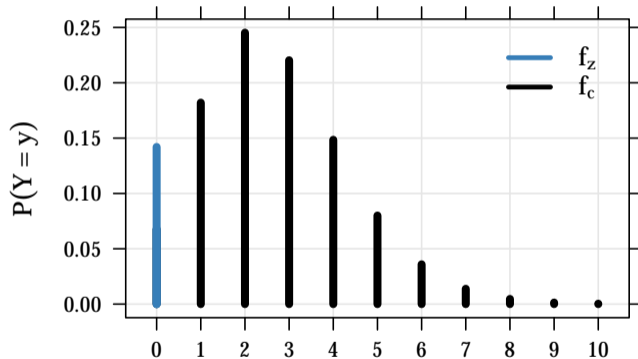
$$E(Y) = \frac{E(Y^*)(1 - f_z(0))}{1 - f_c(Y = 0)}$$

Variância

$$V(Y) = \frac{1 - f_z(0)}{1 - f_c(Y = 0)} \left[E(Y^*) \frac{(1 - f_z(0))}{1 - f_c(Y = 0)} \right]$$

Distribuição Hurdle

- ▶ f_z é uma função de probabilidades degenerada no ponto $y = 0$, ou seja, tem toda massa no ponto 0.
- ▶ f_c é uma função de probabilidades tradicional, que no modelo é truncada em $y = 1$.
- ▶ Os modelos de barreira combinam f_z e f_c para descrever Y
- ▶ Para a parte positiva os dados ainda podem apresentar sub, superdispersão ou excesso de valores em outro ponto.



Combinações comuns

Pode-se propor diferentes distribuições para f_z e f_c . Uma escolha natural para f_z é a Bernoulli e para f_c a Poisson. Assim

$$\begin{aligned} f_z &\sim \text{Bernoulli}(\pi) \\ f_c &\sim \text{Poisson}(\lambda) \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad P(Y = y) = \begin{cases} 1 - \pi & \text{se } y = 0, \\ \pi \left(\frac{e^{-\lambda} \lambda^y}{y!(1 - e^{-\lambda})} \right) & \text{se } y = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Embora essa escolha de modelo seja o que tem o maior suporte computacional, ressalta-se que outras distribuições podem ser escolhidas para ambas as partes f_z e f_c .

Modelos de regressão *Hurdle*

- ▶ Incorporando covariáveis em f_z e f_c na forma $h(Z\gamma)$ e $g(X\beta)$, respectivamente.
- ▶ As funções $h(\cdot)$ e $g(\cdot)$, são as funções de ligação escolhidas conforme modelos f_z e f_c .
- ▶ O modelo de regressão *Hurdle* terá, portanto, os vetores de parâmetros β , γ e potencialmente ϕ (caso um modelo com parâmetro de dispersão for considerado)
- ▶ Se os modelos para f_z e f_c e as respectivas matrizes Z e X forem as mesmas, o teste $H_0 : \beta = \gamma$ avalia a a necessidade do modelo *Hurdle*.

Modelos de regressão *Hurdle*

Função de verossimilhança

$$L(\underline{\theta}; \underline{y}) = \prod_{i=1}^n (1 - \mathbb{1}(f_{z_i}(0))) \cdot \prod_{i=1}^n \mathbb{1} \left((1 - f_{z_i}(0)) \left(\frac{f_{c_i}(y_i)}{1 - f_{c_i}(0)} \right) \right)$$

Função de log-verossimilhança

$$l(\underline{\theta}; \underline{y}) = \sum_{i=1}^n (1 - \mathbb{1}(\log(f_{z_i}(0)))) + \sum_{i=1}^n \mathbb{1}(\log(1 - f_{z_i}(0)) + \log(f_{c_i}(y_i)) - \log(1 - f_{c_i}(0)))$$

Sendo $\mathbb{1}$ a função indicadora que assume o valor 1 se $y > 0$ e β , γ e ϕ , se houver). 0 se $y = 0$ e $\underline{\theta}$ o vetor de parâmetros do modelo.

Modelos *Hurdle* no R

Neste minicurso utilizaremos principalmente pacote o `pscl` (*Political Science Computational Laboratory, Stanford University*)

```
library(pscl)
hurdle(y ~ fc_predictor | fz_predictor, dist = "poisson", zero.dist = "poisson")
```

Modelos *Hurdle* no R

Um outro pacote que proporciona diversas funções e podemos adaptar para o ajuste desses modelos é o VGAM (*Vector Generalized Linear and Additive Models*)

```
library(VGAM)
vglm(y ~ predictor, family = zapoisson)

## ou ajustando as partes
vglm(y ~ fc_predictor, family = pospoisson, data = subset(data, y > 0))
vglm(SurvS4(cy, st) ~ fz_predictor, cens.poisson,
     data = transform(data, cy = pmin(1, y), st = ifelse(y >= 1, 0, 1))
```

5.2

Modelos para Excesso de Zeros
Modelos de Mistura (*Zero Inflated*)

Modelo *Zero Inflated*

- ▶ Consideram uma mistura de modelos;
- ▶ Os zeros agora são caracterizados em amostrais e estruturais;
- ▶ Há contribuição para estimação da probabilidade em zero de duas funções de probabilidade;
- ▶ São chamados de modelos de mistura ou inflacionados de zero (*ZI*);
- ▶ Esta abordagem “mistura” um modelo de contagem sem restrição e um modelo censurado à direita no ponto $y = 1$.

Modelo Zero Inflated

Distribuição de probabilidades

$$Pr(Y = y) = \begin{cases} f_z(0) + (1 - f_z(0))f_c(Y = y) & \text{se } y = 0, \\ (1 - f_z(0))f_c(Y = y) & \text{se } y = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Momentos da distribuição

Média

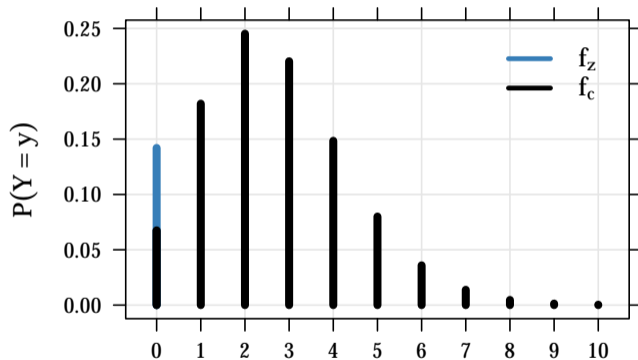
$$E(Y) = (1 - f_z(0))E(Y^*)$$

Variância

$$V(Y) = (1 - f_z(0))E(Y^*)[E(Y^{*2}) - (1 - f_z(0))E^2(Y^*)]$$

Distribuição Zero Inflated

- ▶ f_z é uma função de probabilidades degenerada no ponto $y = 0$, ou seja, tem toda massa no ponto 0.
- ▶ f_c é uma função de probabilidades para dados de contagem.
- ▶ Os modelos de mistura misturam f_z e f_c para descrever Y
- ▶ Para a parte f_c os dados ainda podem apresentar sub, superdispersão ou excesso de valores em outro ponto.



Misturas comuns

Pode-se propor diferentes distribuições para f_z e f_c . Uma escolha natural para f_z é a Bernoulli e para f_c a Poisson. Assim

$$\begin{aligned} f_z &\sim \text{Bernoulli}(\pi) \\ f_c &\sim \text{Poisson}(\lambda) \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad P(Y = y) = \begin{cases} (1 - \pi) + \pi e^{-\lambda} & \text{se } y = 0, \\ \pi \left(\frac{e^{-\lambda} \lambda^y}{y!} \right) & \text{se } y = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Embora essa escolha de modelo seja o que tem o maior suporte computacional, ressalta-se que outras distribuições podem ser escolhidas para ambas as partes f_z e f_c .

Modelos de regressão *Zero Inflated*

- ▶ Incorporando covariáveis em f_z e f_c na forma $h(Z\gamma)$ e $g(X\beta)$, respectivamente.
- ▶ As funções $h(\cdot)$ e $g(\cdot)$, são as funções de ligação escolhidas conforme modelos f_z e f_c .
- ▶ O modelo de regressão *Hurdle* terá, portanto, os vetores de parâmetros β , γ e potencialmente ϕ (caso um modelo com parâmetro de dispersão for considerado)
- ▶ Como agora são modelos misturados a comparação entre β e γ não tem a mesma interpretabilidade.
- ▶ Para comparação de modelos tradicionais contra os modelos de mistura, o teste de Vuong para modelos não aninhados pode ser aplicado.

Modelos de regressão *Zero Inflated*

Função de verossimilhança

$$L(\underline{\theta}; \underline{y}) = \prod_{i=1}^n \mathbb{1}((1 - f_{z_i}(0))f_{c_i}(y_i)) \cdot \prod_{i=1}^n (1 - \mathbb{1}(y_i = 0)) (f_{z_i}(0) + (1 - f_{z_i}(0))f_{c_i}(0))$$

Função de log-verossimilhança

$$l(\underline{\theta}; \underline{y}) = \sum_{i=1}^n \mathbb{1}(y_i > 0) (\log(1 - f_{z_i}(0)) + \log(f_{c_i}(y_i))) + \sum_{i=1}^n (1 - \mathbb{1}(y_i = 0)) (\log(f_{z_i}(0) + (1 - f_{z_i}(0))f_{c_i}(0)))$$

Sendo $\mathbb{1}$ a função indicadora que assume o valor 1 se $y > 0$ e 0 se $y = 0$ e $\underline{\theta}$ o vetor de parâmetros do modelo (β , γ e ϕ , se houver).

Modelos *Zero Inflated* no R

Usando o `pscl` (*Political Science Computational Laboratory, Stanford University*)

```
library(pscl)
zeroinfl(y ~ fc_preditore | fz_preditore, dist = "poisson", link = "logit")
```

Usando o VGAM (*Vector Generalized Linear and Additive Models*)

```
library(VGAM)
vglm(y ~ preditor, family = zipoisson)
```

Estudos de caso

Vignette `v07_excesso-zeros.html`

`peixe` : número de peixes capturados por grupos em um parque estadual

`sinistros` : número de sinistros em uma seguradora de automóveis

6

Modelos Paramétricos Alternativos

6.1

Modelos Paramétricos Alternativos
Modelo Poisson-Generalizada

A distribuição de probabilidade

- ▶ Introduzida por [9] e estudada em detalhes por [10]
- ▶ Modela casos de superdispersão e subdispersão.
- ▶ A Poisson é um caso particular.
- ▶ Se $Y \sim$ Poisson Generalizada, sua função de probabilidade é

$$f(y) = \begin{cases} \theta(\theta + \gamma y)^{y-1} \exp\{-(\theta + \gamma y)\}, & y = 0, 1, 2, \dots \\ 0, & y > m \text{ quando } \gamma < 0. \end{cases}$$

- ▶ $\theta > 0$.
- ▶ $\max\{-1, -\theta/m\} < \gamma < 1$.
- ▶ m é maior inteiro positivo para o qual $\theta + m\gamma > 0$ quando γ é negativo.
- ▶ Note que o espaço paramétrico de γ é dependente do parâmetro θ .

Propriedades da Poisson Generalizada

Média e variância

- ▶ $E(Y) = \theta(1 - \gamma)^{-1}$.
- ▶ $V(Y) = \theta(1 - \gamma)^{-3}$.

Relação média-variância

- ▶ Superdispersa se $\gamma > 0$.
- ▶ Subdispersa se $\gamma < 0$.

Quando $\gamma = 0$ a Poisson Generalizada reduz a distribuição Poisson e, portanto, apresenta equidispersão.

Parametrização de média para modelo de regressão

Defina

$$\theta = \frac{\lambda}{1 + \alpha\lambda}, \quad \gamma = \alpha \frac{\lambda}{1 + \alpha\lambda}.$$

Ao substituir na função densidade, tem-se

$$f(y) = \left(\frac{\lambda}{1 + \alpha\lambda} \right)^y \frac{(1 + \alpha y)^{y-1}}{y!} \exp \left\{ -\lambda \frac{(1 + \alpha y)}{(1 + \alpha\lambda)} \right\}.$$

- ▶ $E(y) = \lambda$,
- ▶ $V(y) = \lambda(1 + \alpha\lambda)^2$.
- ▶ Superdispersa se $\alpha > 0$,
- ▶ Subdispersa se $\alpha < 0$.
- ▶ Poisson se $\alpha = 0$.

Restrições no espaço paramétrico

- ▶ $\lambda > 0$.
- ▶ $1 + \alpha\lambda > 0$.
- ▶ $1 + \alpha y > 0$.

Considerando uma amostra aleatória de y_i e valores conhecidos de $\lambda_i, i = 1, 2, \dots$, as restrições combinadas sobre α resultam em

$$\alpha > \min \left\{ \frac{-1}{\max(y_i)}, \frac{-1}{\max(\lambda_i)} \right\}, \quad \text{quando } \alpha < 0. \quad (1)$$

Função de log-verossimilhança

Considerando uma amostra aleatória $y_i, i = 1, 2, \dots, n$, a verossimilhança é

$$L(y; \lambda, \alpha) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{\lambda}{1 + \alpha\lambda} \right)^{y_i} \frac{(1 + \alpha y_i)^{y_i - 1}}{y_i!} \exp \left\{ -\lambda \frac{(1 + \alpha y_i)}{(1 + \alpha\lambda)} \right\}. \quad (2)$$

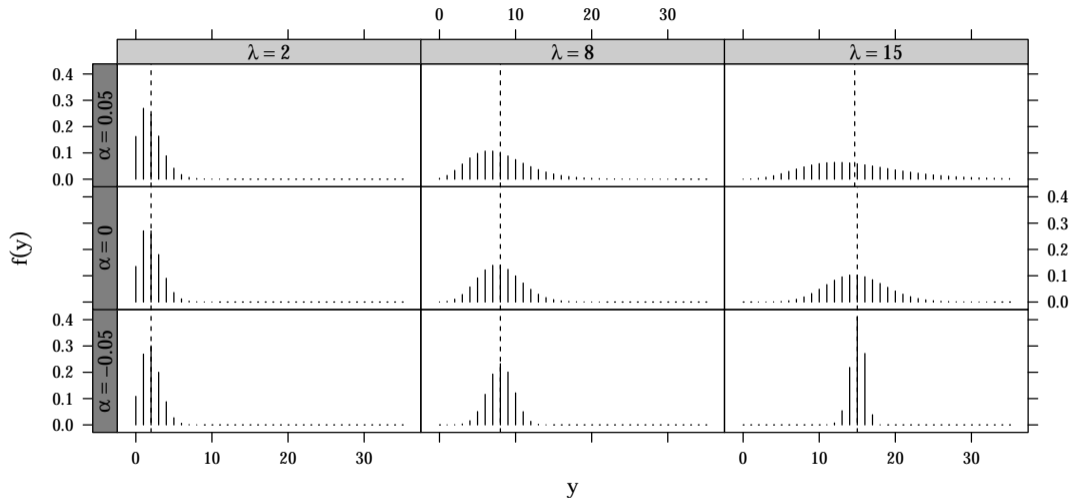
A função de log-verossimilhança é

$$\ell(y; \lambda, \alpha) = \sum_{i=1}^n y_i \ln(\lambda) - \ln(1 + \alpha\lambda) + (y_i - 1) \ln(1 + \alpha y_i) - \lambda \frac{(1 + \alpha y_i)}{(1 + \alpha\lambda)} - \ln(y_i!) \quad (3)$$

Implementação da log-verossimilhança

```
## library(MRDCr)
devtools::load_all()
llpgnz

## function(params, y, X, offset = NULL) {
##   # params: vetor de parâmetros;
##   #   params[1]: parâmetro de dispersão (alpha);
##   #   params[-1]: parâmetro de locação (lambda);
##   # y: variável resposta (contagem);
##   # X: matriz do modelo linear;
##   # offset: tamanho do domínio onde y foi medido (exposição);
##   #-----
##   if (is.null(offset)) {
##     offset <- 1L
##   }
##   alpha <- params[1]
##   lambda <- offset * exp(X %*% params[-1])
```



Estudos de caso

[poisson_generalizada.html](#)

`soja` : Número de vagens, de grãos e de grãos por vagem.

`capdesfo` : Número de capulhos produzidos em algodão.

`nematoide` : Número de nematoides em raízes de linhagens de feijoeiro.

6.2

Modelos Paramétricos Alternativos
Modelo COM-Poisson

Distribuição COM-Poisson

- ▶ Nome COM-Poisson, advém de seus autores **CO**nway e **MA**xwell (também é chamada de distribuição Conway-Maxwell-Poisson).
- ▶ Proposta em um contexto de filas [1], essa distribuição generaliza a Poisson com a adição de um parâmetro.
- ▶ Modifica a relação entre probabilidades consecutivas.

- ▶ **Distribuição Poisson**

$$\frac{P(Y = y - 1)}{P(Y = y)} = \frac{y}{\lambda}$$

- ▶ **Distribuição COM-Poisson**

$$\frac{P(Y = y - 1)}{P(Y = y)} = \frac{y^\nu}{\lambda}$$

Distribuição COM-Poisson

Distribuição de probabilidades

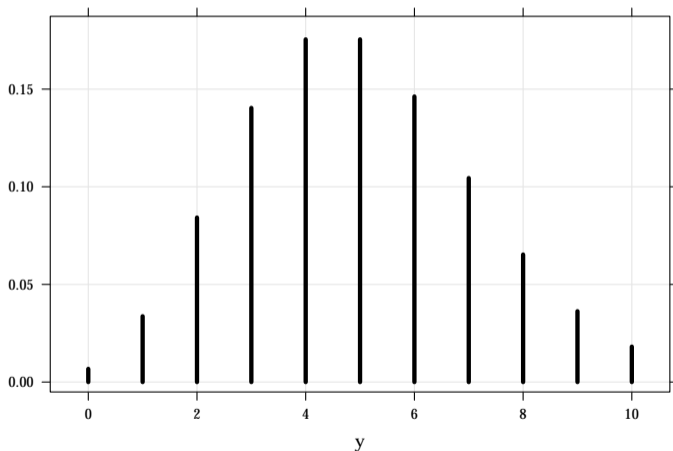
$$\Pr(Y = y \mid \lambda, \nu) = \frac{\lambda^y}{(y!)^\nu Z(\lambda, \nu)}, \quad \text{em que } Z(\lambda, \nu) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\lambda^j}{(j!)^\nu}; \quad \lambda > 0, \nu \geq 0$$

Casos particulares

- ▶ Distribuição Poisson, quando $\nu = 1$
- ▶ Distribuição Bernoulli, quando $\nu \rightarrow \infty$
- ▶ Distribuição Geométrica, quando $\nu = 0, \lambda < 1$

Distribuição COM-Poisson

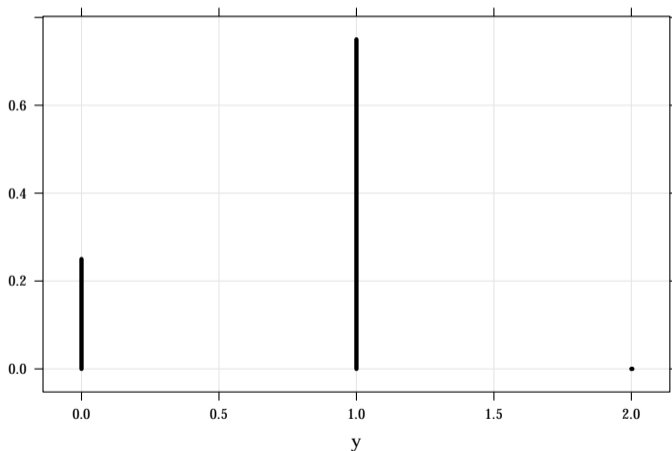
- ▶ Poisson $\nu = 1$
- ▶ Bernoulli $\nu \rightarrow \infty$
- ▶ Geométrica $\nu = 0, \lambda < 1$

COM-Poisson ($\lambda = 5, \nu = 1$)

Distribuição COM-Poisson

- ▶ Poisson $\nu = 1$
- ▶ Bernoulli $\nu \rightarrow \infty$
- ▶ Geométrica $\nu = 0, \lambda < 1$

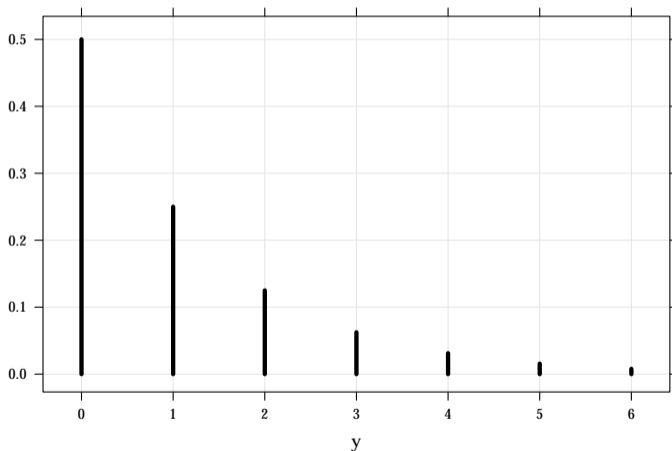
COM-Poisson ($\lambda = 3, \nu = 20$)

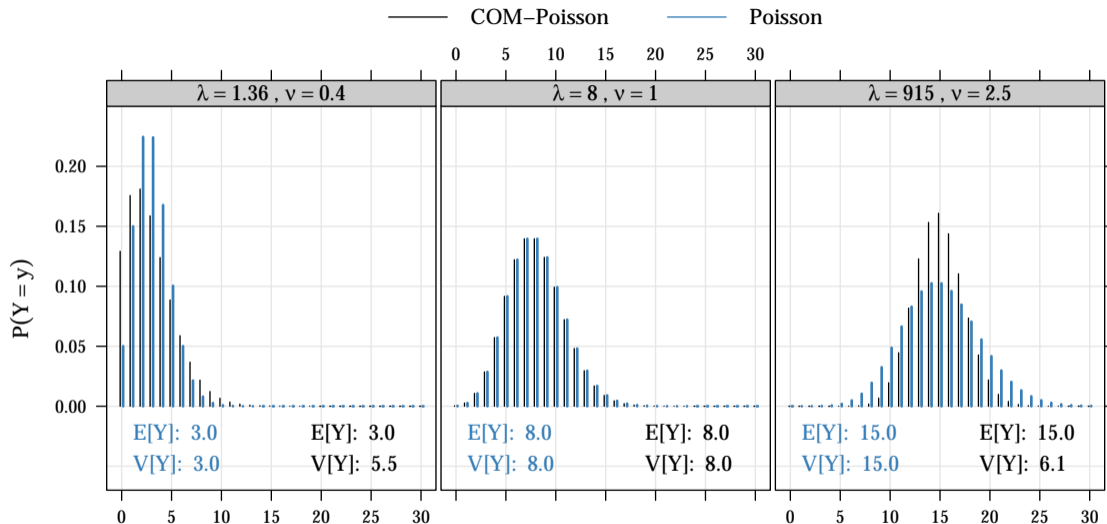


Distribuição COM-Poisson

- ▶ Poisson $\nu = 1$
- ▶ Bernoulli $\nu \rightarrow \infty$
- ▶ Geométrica $\nu = 0, \lambda < 1$

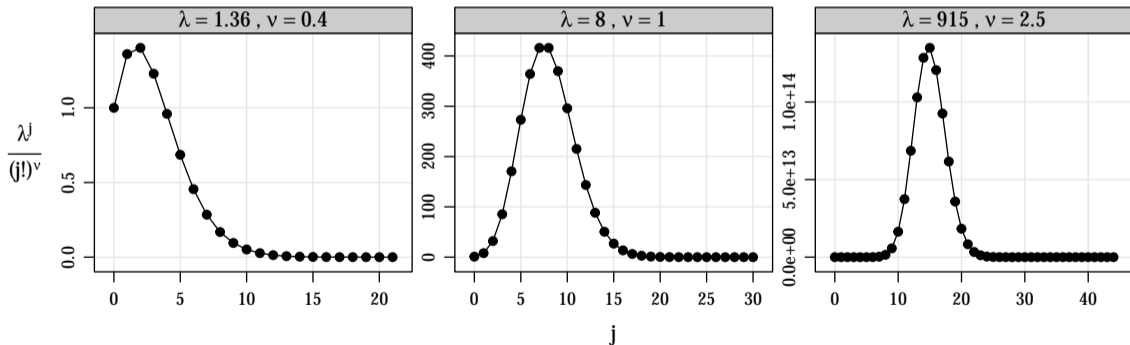
COM-Poisson ($\lambda = 0.5, \nu = 0$)





Assintoticidade da função Z

$$Z(\lambda, \nu) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\lambda^j}{(j!)^\nu}$$



Momentos da distribuição

Não tem expressão analítica, calculamos utilizando a definição de média e variância;

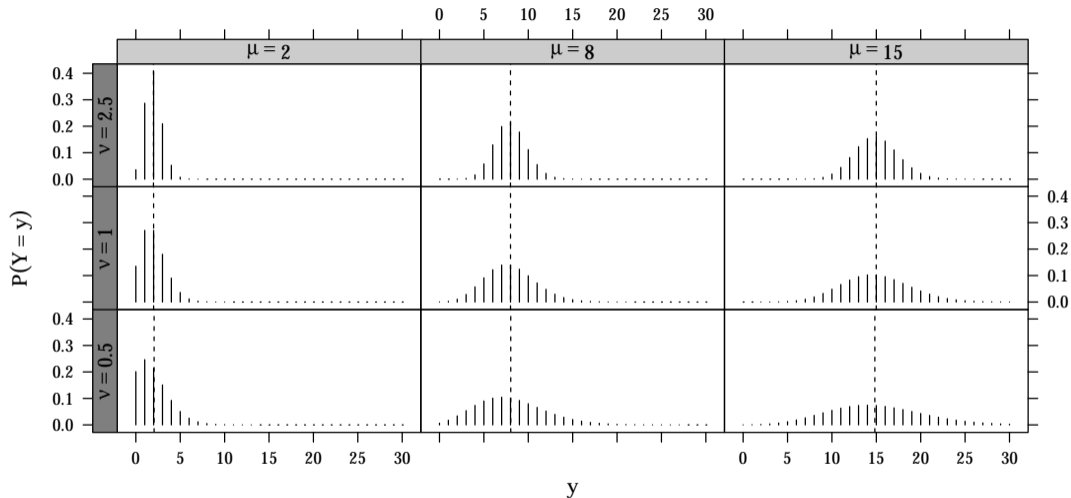
$$\blacktriangleright E(Y) = \sum_{y=0}^{\infty} y \cdot p(y)$$

$$\blacktriangleright V(Y) = \sum_{y=0}^{\infty} y^2 \cdot p(y) - E^2(Y)$$

Aproximação proposta por [3], boa aproximação para $\nu \leq 1$ ou $\lambda > 10^\nu$

$$\blacktriangleright E(Y) \approx \lambda^{\frac{1}{\nu}} - \frac{\nu - 1}{2\nu}$$

$$\blacktriangleright V(Y) \approx \frac{1}{\nu} \cdot E(Y)$$



Modelo de Regressão COM-Poisson

- ▶ Incorporando covariáveis em λ da forma $\lambda_i = \exp(X_i\beta)$, em que X_i é o vetor de covariáveis do i -ésimo indivíduo e β o vetor de parâmetros.

Função de verossimilhança

$$\begin{aligned} L(\beta, \nu; \underline{y}) &= \prod_i^n \left(\frac{\lambda_i^{y_i}}{(y_i!)^\nu} Z(\lambda_i, \nu)^{-1} \right) \\ &= \lambda_i^{\sum_i^n y_i} \prod_i^n \frac{Z(\lambda_i, \nu)^{-1}}{(y_i!)^\nu} \end{aligned}$$

Função de log-verossimilhança

$$\begin{aligned} \ell(\beta, \nu, \underline{y}) &= \log \left(\lambda_i^{\sum_i^n y_i} \prod_i^n \frac{Z(\lambda_i, \nu)^{-1}}{(y_i!)^\nu} \right) \\ &= \sum_i^n y_i \log(\lambda_i) - \nu \sum_i^n \log(y_i!) - \sum_i^n \log(Z(\lambda_i, \nu)) \end{aligned}$$

Estudos de caso

Vignette [compoisson.html](#)

`capdesfo` : Número de capulhos em algodão sob efeito de desfolha (sub)

`capmosca` : Número de capulhos em algodão sob exposição à mosca branca (sub)

`ninfas` : Número de ninfas de mosca branca em plantas de soja (super)

`soja` : Número de vagens, de grãos por planta (equi e super).

6.3

Modelos Paramétricos Alternativos
Modelo Gamma-Count

Duration Dependence and Dispersion in Count-Data Models

Rainer WINKELMANN

Department of Economics, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand

This article explores the relation between nonexponential waiting times between events and the distribution of the number of events in a fixed time interval. It is shown that within this framework the frequently observed phenomenon of overdispersion—that is, a variance that exceeds the mean—is caused by a decreasing hazard function of the waiting times, whereas an increasing hazard function leads to underdispersion. Using the assumption of iid gamma-distributed waiting times, a new count-data model is derived. Its use is illustrated in two applications: the number of births and the number of doctor consultations.

KEY WORDS: Gamma distribution; Negative binomial distribution; Overdispersion; Poisson process; Renewal theory.



WINKELMANN, R.

Duration Dependence and Dispersion in Count-Data Models. *Journal of Business & Economic Statistics*, v.13, n.4, p.467–474, 1995.

Duração dependência

- ▶ Considere um processo estocástico definido pela sequência da v.a. τ_i , intervalo de tempo entre eventos.
- ▶ Se $\{\tau_1, \tau_2, \dots\}$ são independentes e identicamente distribuídos, todos com densidade $f(\tau)$, esse processo é chamado de *renewal process*.
- ▶ Defina a variável de contagem N_T como o número de eventos no intervalo $[0, T)$.
- ▶ Defina $\vartheta_n = \sum_{i=1}^n \tau_i$ o tempo até o n -ésimo evento.
- ▶ A distribuição de ϑ_n determina a distribuição de N_T , mas é baseada em covolução.
- ▶ São distribuições fechadas para covolução: normal, Poisson, binomial e gama.
- ▶ Destas, apenas a gama é contínua e positiva.

Duração dependência

- ▶ Denote $E(\tau) = \mu$, $V(\tau) = \sigma^2$ e $CV(\tau) = \sigma/\mu$.
- ▶ Defina $\lambda(\tau) = \frac{f(\tau)}{1-F(\tau)}$ como a função de risco e assuma que é monótona.
- ▶ Existe relação entre o tipo de duração dependência e o coeficiente de variância

$$\left. \begin{array}{l} \frac{d\lambda(t)}{dt} < \\ = \\ > \end{array} \right\} 0 \Rightarrow v = \left. \begin{array}{l} < \\ = \\ > \end{array} \right\} 1 \quad (4)$$

Relação entre número de eventos e intervalo entre eventos

- ▶ Intervalos entre tempo $\tau \sim \text{Gama}(\alpha, \beta)$,

$$f(\tau, \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot \tau^{\alpha-1} \cdot \exp\{-\beta\tau\},$$

$$E(\tau) = \frac{\alpha}{\beta}, \quad V(\tau) = \frac{\alpha}{\beta^2}.$$

- ▶ Tempo até o n -ésimo evento

$$\vartheta_n = \tau_1 + \cdots + \tau_n \sim \text{Gama}(n\alpha, \beta),$$

$$f_n(\vartheta, \alpha, \beta) = \frac{\beta^{n\alpha}}{\Gamma(n\alpha)} \cdot \vartheta^{n\alpha-1} \cdot \exp\{-\beta\vartheta\},$$

$$E(\vartheta) = \frac{n\alpha}{\beta}, \quad V(\vartheta) = \frac{n\alpha}{\beta^2}.$$

Relação entre número de eventos e intervalo entre eventos

- ▶ A distribuição acumulada do tempo até ϑ_n é

$$F_n(T) = \Pr(\vartheta_n \leq T) = \int_0^T \frac{\beta^{n\alpha}}{\Gamma(n\alpha)} \cdot t^{n\alpha-1} \cdot \exp\{-\beta t\} dt.$$

- ▶ Seja $[0, T)$ um intervalo e N_T a v.a. número de eventos neste intervalo.
- ▶ Segue que $N_T < n$ se e somente se $\vartheta_n \geq T$. Assim

$$\Pr(N_T < n) = \Pr(\vartheta_n \geq T) = 1 - F_n(T);$$

- ▶ Já que $\Pr(N_T = n) = \Pr(N_T < n + 1) - \Pr(N_T < n)$, então

$$\Pr(N_T = n) = F_n(T) - F_{n+1}(T).$$

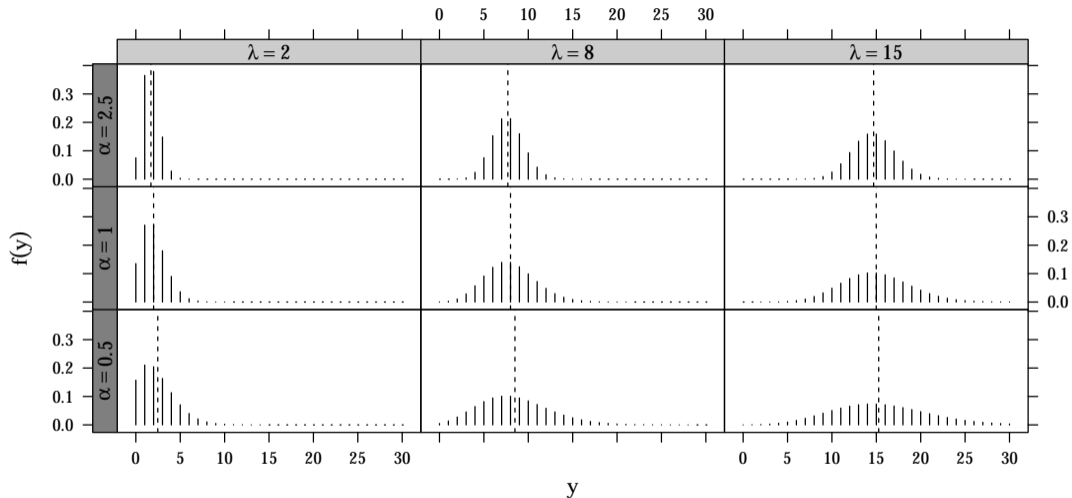
Relação entre número de eventos e intervalo entre eventos

- ▶ Portanto, distribuição de N_T é resultado da diferença de acumuladas da distribuição Gama, pois

$$F_n(T) = G(n\alpha, \beta T) = \int_0^T \frac{\beta^{n\alpha}}{\Gamma(n\alpha)} t^{n\alpha-1} \cdot \exp\{-\beta t\} dt. \quad (5)$$

- ▶ Assim

$$\begin{aligned} \Pr(N_T = n) &= G(n\alpha, \beta T) - G((n+1)\alpha, \beta T) \\ &= \left[\int_0^T \frac{\beta^{n\alpha}}{\Gamma(n\alpha)} t^{n\alpha-1} \cdot \exp\{-\beta t\} dt \right] \\ &\quad - \left[\int_0^T \frac{\beta^{(n+1)\alpha}}{\Gamma((n+1)\alpha)} t^{(n+1)\alpha-1} \cdot \exp\{-\beta t\} dt \right] \end{aligned}$$



Parametrização para modelo de regressão

- ▶ A média da variável aleatória N_T é resultado de

$$\begin{aligned} E(N) &= \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot \Pr(i) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot \Pr(i) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} G(i\alpha, \beta T). \end{aligned}$$

- ▶ Para um T cada vez maior, tem-se que

$$N(T) \sim \text{Normal} \left(\frac{\beta}{\alpha}, \frac{\beta}{\alpha^2} \right).$$

Parametrização para modelo de regressão

- ▶ Considere que

$$\frac{\beta}{\alpha} = \exp\{x^\top \theta\} \Rightarrow \beta = \alpha \exp\{x^\top \theta\}.$$

Essa parametrização produz um modelo de regressão para a média do tempo entre eventos definida por

$$E(\tau|x) = \frac{\alpha}{\beta} = \exp\{-x^\top \theta\}.$$

- ▶ O modelo de regressão é para o tempo entre eventos (τ) e não diretamente para contagem porque, a menos que $\alpha = 1$, não é certo que $E(N_i|x_i) = [E(\tau_i|x_i)]^{-1}$.

Função de log-verossimilhança

Considerando uma amostra aleatória $y_i, i = 1, 2, \dots, n$, a verossimilhança é

$$L(\mathbf{y}; \alpha, \beta) = \prod_{i=1}^n (G(y_i \alpha, \beta) - G((y_i + 1) \alpha, \beta)) \quad (6)$$

e a função de log-verossimilhança é

$$\ell(\mathbf{y}; \alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n \ln (G(y_i \alpha, \beta) - G((y_i + 1) \alpha, \beta)) \quad (7)$$

Implementação da log-verossimilhança

```
library(MRDCr)
llgcnt

## function(params, y, X, offset = NULL) {
##   # params: vetor de parâmetros;
##   #   params[1]: parâmetro de dispersão (alpha);
##   #   params[-1]: parâmetro de locação (lambda);
##   # y: variável resposta (contagem);
##   # X: matriz do modelo linear;
##   # offset: tamanho do domínio onde y foi medido (exposição);
##   #-----
##   if (is.null(offset)) {
##     offset <- 1L
##   }
##   alpha <- exp(params[1])
##   eXb <- exp(X %*% params[-1])
##   alpha * eXb <- alpha * eXb
```

Estudos de caso

[gamma_count.html](#)

`soja` : Número de vagens, de grãos e de grãos por vagem.

`capdesfo` : Número de capulhos produzidos em algodão.

`nematoide` : Número de nematoides em raízes de linhagens de feijoeiro.

`cambras` : Gols do Campeonato Brasileiro de 2010.

7

Modelos com Efeitos Aleatórios

Modelos de efeito aleatório

- ▶ Acomodam o efeito de termos aleatórios no modelo (ex: blocos, indivíduos).
- ▶ Podem representar estruturas hierárquicas de efeitos (ex: municípios > bairros > escolas > salas).
- ▶ Podem acomodar superdispersão com efeito aleatório ao nível de observação.

A formulação do modelo de efeito aleatório

- ▶ Seja b_i o vetor q -dimensional, $q \geq 1$, de efeito do i -ésimo nível de um fator categórico.
- ▶ Seja Y_{ij} o valor observado da j -amostra sob efeito de b_i com o vetor linha de covariáveis X_{ij} .
- ▶ Considere que uma função monótona g da média de Y seja função linear do vetor de covariáveis X_{ij} e do vetor de efeitos aleatórios b_i

$$g(\mu_{ij}) = \eta_{ij} = X_{ij}\beta + Z_i b_i. \quad (8)$$

- ▶ A distribuição condicional de Y_{ij} em relação a b_i é

$$Y_{ij}|b_i \sim f(y_{ij}|b_i, \theta), \quad (9)$$

em que f é uma função densidade apropriada para Y e $\theta \subseteq \beta$ o vetor de parâmetros dessa distribuição.

A formulação do modelo de efeito aleatório

- ▶ Seja a distribuição do efeito aleatório b_i

$$b_i \stackrel{iid}{\sim} \text{Normal}(0, D(\alpha)). \quad (10)$$

- ▶ A esperança de Y marginal é

$$E(Y_{ij}) = \mu_{ij}, \quad (11)$$

no qual α é o vetor de parâmetros presentes na especificação da covariância dos efeitos aleatórios.

A formulação do modelo de efeito aleatório

A função de verossimilhança do modelo

$$L(\theta, \alpha) = \prod_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^q} \left[\prod_{j=1}^{n_i} f(y_{ij}, \theta, b_i) \right] \times f(b_i, \alpha) db_i. \quad (12)$$

A formulação do modelo de efeito aleatório







O problema é

- ▶ Calcular a verossimilhança requer avaliar a integral
- ▶ Pode ser em muitas dimensões ($q > 1$, intercepto, inclinação, etc)
- ▶ Efeitos podem ser múltiplos, aninhados ou cruzados
- ▶ Para modelar superdispersão com efeito ao nível de observação, tem-se que b_i é b_{ij} , ou seja, na mesma dimensão dos dados.

Estudos de caso

misto.html

Referências

-  Conway, R. W., Maxwell, W. L. (1962). A queuing model with state dependent service rates. *Journal of Industrial Engineering*, 12, 132–136.
-  Paula, G. A. (2013). *Modelos de regressão com apoio computacional*. IME-USP, São Paulo.
-  Shmueli, G., Minka, T. P., Kadane, J. B., Borle, S., Boatwright, P. (2005). A useful distribution for fitting discrete data: Revival of the Conway-Maxwell-Poisson distribution. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C: Applied Statistics*, 54(1), 127–142.
-  Zeileis, A., Kleiber, C., Jackman, S. (2008). Regression Models for Count Data in R. *Journal of Statistical Software*, 27(8), 1 - 25. doi:<http://dx.doi.org/10.18637/jss.v027.i08>
-  Winkelmann, R. (2008). *Econometric analysis of count data* (5th Ed.). Springer Science & Business Media.
-  SILVA, A. M.; DEGRANDE, P. E.; SUEKANE, R.; FERNANDES, M. G.; ZEVIANI, W. M. Impacto de diferentes níveis de desfolha artificial nos estádios fenológicos do algodoeiro. *Revista de Ciências Agrárias*, v.35, n.1, 2012 (prelo).

Referências



WINKELMANN, R.; ZIMMERMANN, K.
Count data models for demographic data.
Mathematical Population Studies, v.4, n.3, p.205–221, 1994.



WINKELMANN, R.
Duration dependence and dispersion in count-data models.
Journal of Business & Economic Statistics, v.13, n.4, p.467–474, 1995.



CONSUL, P. C. AND G. C. JAIN
A generalization of the Poisson distribution. *Technometrics*, v.15, n.4, p.791–799, 1973.



CONSUL, P. C
Generalized Poisson Distributions: Properties and Applications. **Statistics: Textbooks and Monographs**,
New York: Marcel Dekker Inc. 1989.