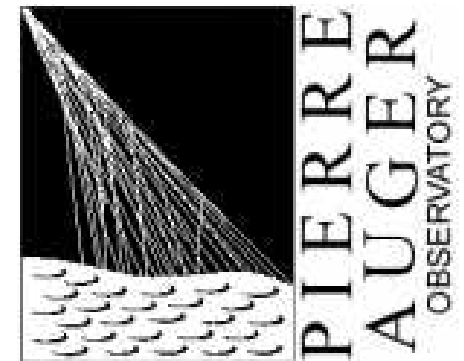


# Distribuição angular de “prompt” neutrinos em simulações de Chuveiros Atmosféricos Extensos

Márcio Müller, Victor Gonçalves e D. R. Gratieri

*Grupo de Altas e Médias Energias*

*Universidade Federal de Pelotas - 2016*



# 1. Introdução

## 2. Distribuição de energia de múons e neutrinos

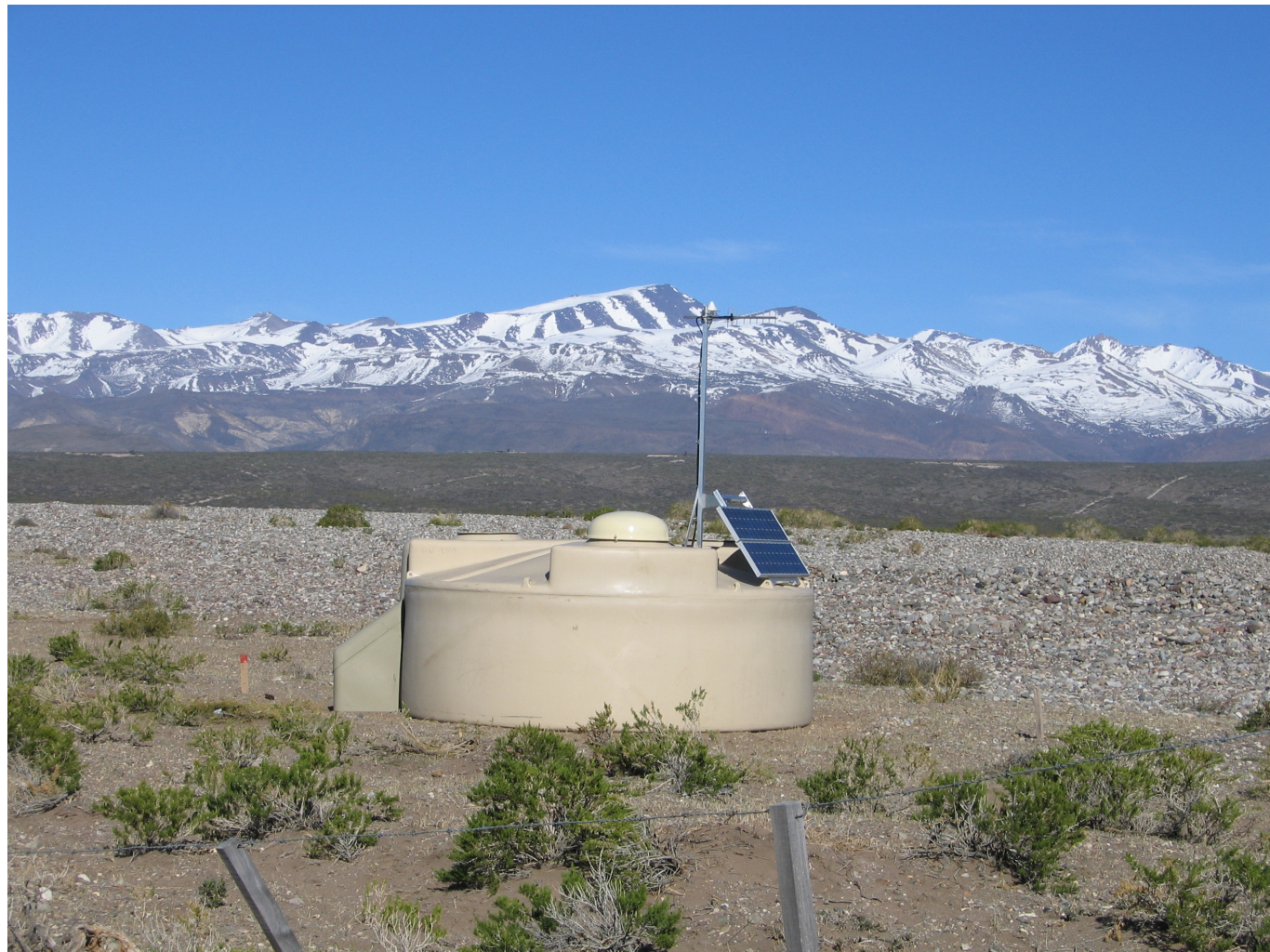
## 3. Distribuição angular zenital de neutrinos

## 4. Distribuição de energia e angular de neutrinos

## 5. Distribuição angular zenital de neutrinos

-  $\geq 1 \text{ PeV}$

## 6. Conclusão



## I. INTRODUÇÃO

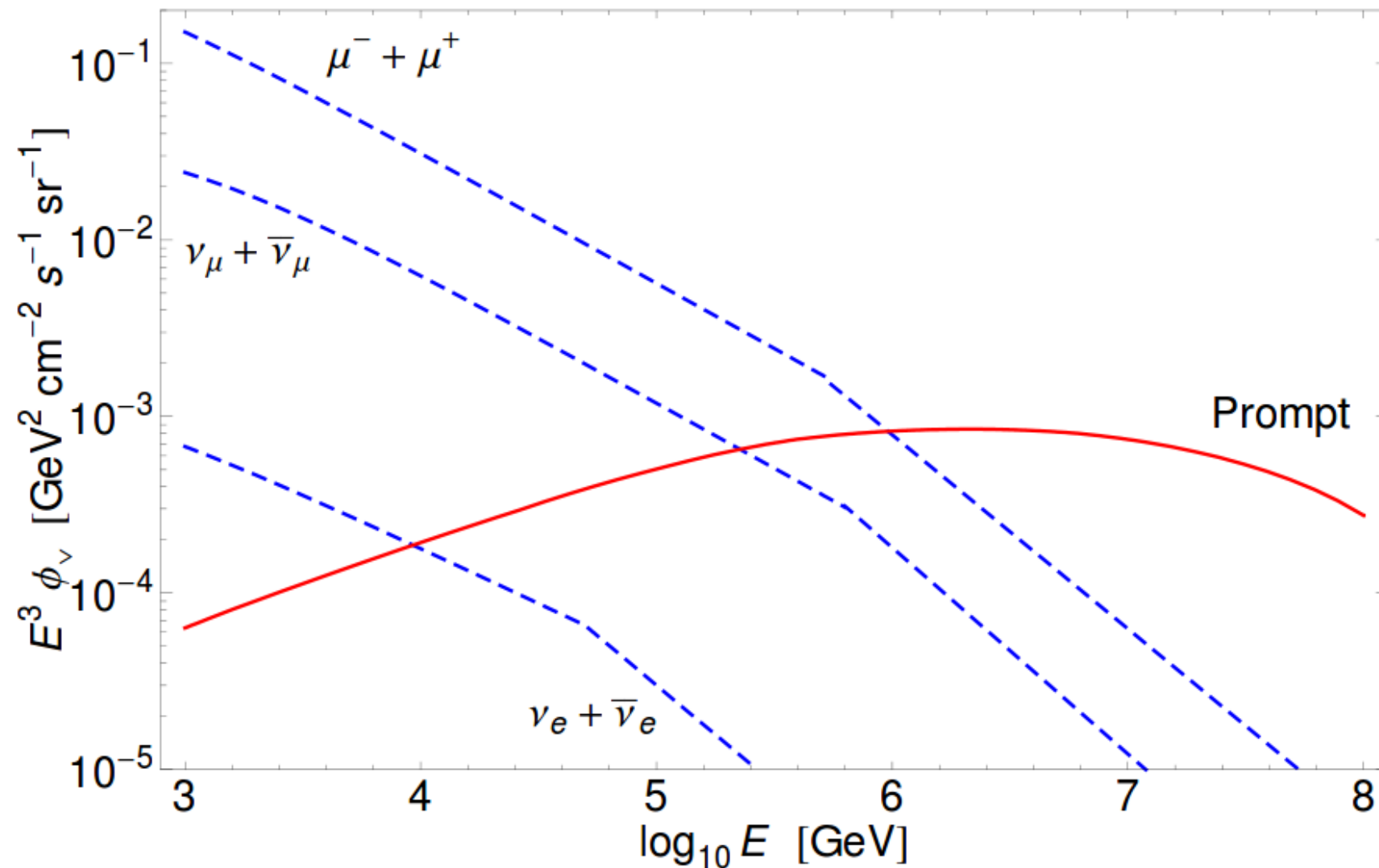
### A. Fluxo de “prompt” múons e neutrinos

- Chuveiros Atmosféricos Extensos (CAEs) são essenciais na física de raios cósmicos.
- Primários alcançam a Terra com energias de até  $10^{20} eV$ .
- Neutrinos atmosféricos e múons são produzidos nas interações de raios cósmicos com a atmosfera terrestre.
- Neutrinos atmosféricos são também um background para outras fontes de neutrinos, tais como neutrinos cosmogênicos produzidos em interações de raios cósmicos com a radiação de fundo e...
- ...diretamente de fontes tais como Núcleo Ativo de Galáxias (AGNs) e Gamma Ray Bursts.

- O fluxo atmosférico de neutrinos a baixas energias tem sido extensivamente estudado [1], [2], [3] e [4].
- Este fluxo de múons e neutrinos surgem principalmente dos produtos de decaimentos de píons carregados e káons.
- Enquanto a energia cresce, os comprimentos de decaimento do méson tornam-se maiores que seus caminhos (para píons com  $E > 100 \text{ GeV}$ ,  $L_{decay} \approx 6 \text{ km}$ ) ...
- ... suprimindo a produção de múons e neutrinos.
- A energias acima de  $100 \text{ GeV}$  píons e káons tornam-se menos efetivos na produção de múons e neutrinos atmosféricos.

- Hádrons de vida curta são também produzidos a altas energias. Eles também contribuem para o fluxo de neutrinos, especialmente vindos do decaimento “prompt” de mésons charmosos.
- A  $E \gtrsim 10^7 \text{ GeV}$  hádrons pesados alcançam sua energia crítica e suas probabilidades de decaimento decrescem rapidamente.
- A  $E \approx 10^8 \text{ GeV}$  seu comprimento de decaimento se torna da ordem de  $\approx 10 \text{ km}$ , implicando que eles tendem a interagir com o ar ao invés de decair.
- O fluxo de léptons de alta energia em CAEs é diretamente associado à produção de chams, de fato, o decaimento “prompt” de hádrons charmosos têm sido extensivamente estudado [5], [6] e [7] como a fonte dominante de léptons a energias na casa de  $\text{PeV}$ .

- Este fluxo de partículas “prompt” é calculado em [7] (via equação de cascata), usando dipole picture em uma estrutura de QCD perturbativa, a qual incorpora o efeito de saturação partônicas presentes à altas energias.



- Foi usado uma parametrização para a partícula primária, como segue:

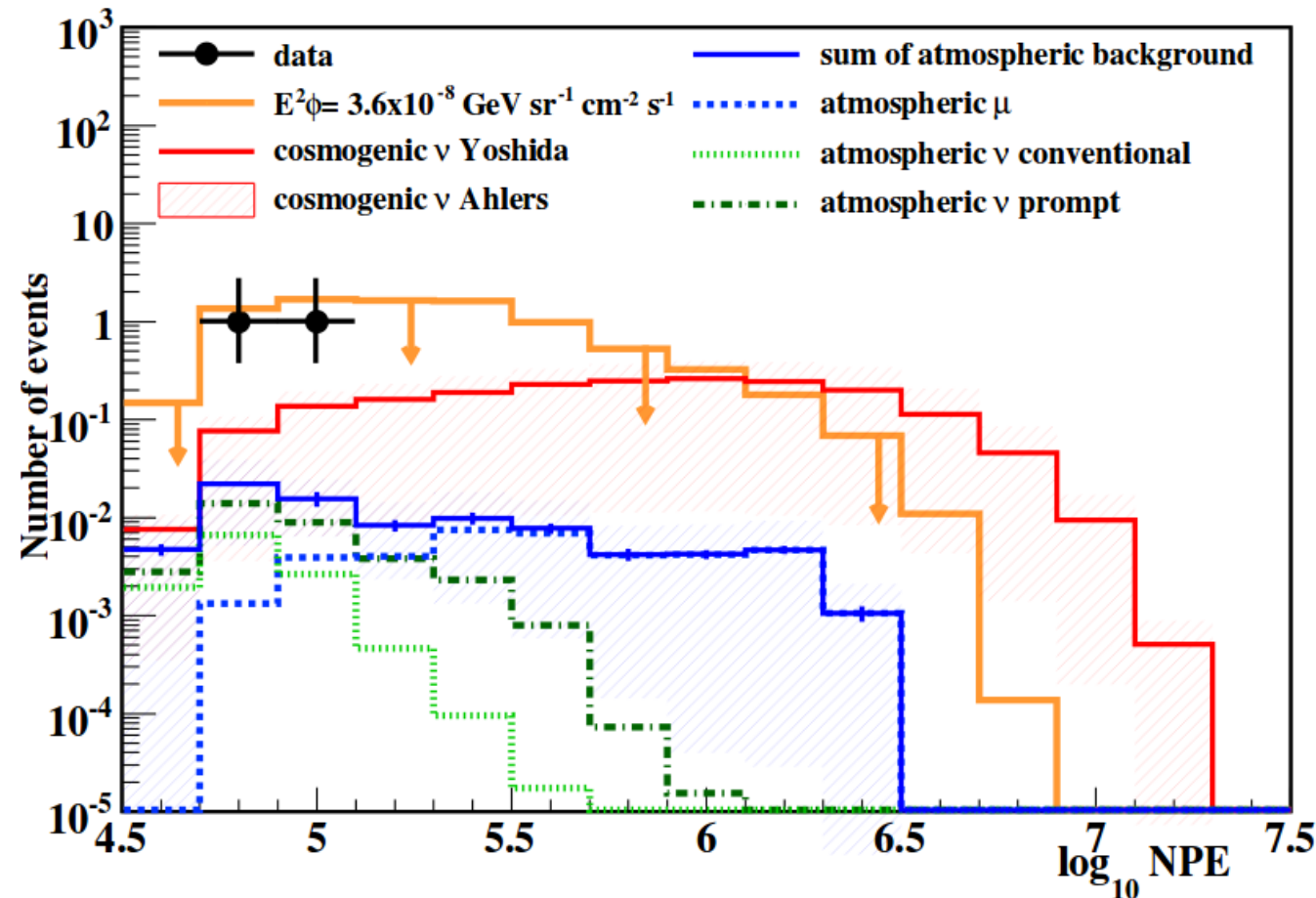
$$\begin{aligned}\phi_N(E) &= 1.7E^{-2.7} && \text{para } E < 5 \times 10^6 \text{ GeV} \\ \phi_N(E) &= 174E^{-3} && \text{para } E > 5 \times 10^6 \text{ GeV}\end{aligned}\quad (1)$$

- $E$  em  $GeV$  e  $\phi_N(E)$  in  $cm^{-2}s^{-1}sr^{-1} (GeV/A)^{-1}$
- O três fluxos de “prompt” são aproximadamente iguais para  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  (e suas respectivas anti-partículas) e  $\mu^- + \mu^+$ .
- A dependência de energia deste fluxo de “prompt” é menos íngreme que o fluxo “convencional”. O fluxo convencional foi tirado de [8].

## B. Motivação

- Múons e neutrinos atmosféricos que atingem o solo (acima de uns poucos GeV), nos informam sobre interações hadrônicas e oscilações do background de neutrinos para fonte de neutrinos astrofísicas.

- Eventos reais de neutrinos de alta energia são muito raros. Recentemente dois eventos [9] (com uma energia estimada de  $1.04 \pm 0.16$  e  $1.14 \pm 0.17$  PeV, respectivamente) foram observados no detector IceCube [10]. Estes dois eventos, podem ser uma primeira indicação de um fluxo de neutrinos astrofísicos.



- Distribuição NPE (Number of Photoelectrons) para 615.9 dias.



- Múons de alta energia podem ser observados em telescópios de neutrinos, e eles poderiam ser usados para estimar o fluxo de neutrinos correlacionado.
- Neste trabalho nós iremos observar a distribuição angular e energética de “prompt” múons e neutrinos em CAES.
- Também iremos estimar o número destes neutrinos altamente energéticos (acima de  $1 \text{ PeV}$ ) e o ângulo zenital com que tais partículas alcançam o chão.
- Para o cálculo do número de neutrinos no ICeCube[11]:

$$dN = T\Omega \sum_{\nu+\bar{\nu}} N_{eff}(E_\nu) \sigma_{\nu h}(E_\nu) \Phi_\nu(E_\nu) dE_{vis} \quad (2)$$

onde  $T$  = número de dias de tomada de dados,  $\Omega = 4\pi$  e  $N_{eff}$  (relacionado ao  $V_{eff}$  (volume efetivo)).

- Queremos estimar o número de neutrinos de alta energia que alcançam o chão e no futuro calcular o background atmosférico de neutrinos de alta energia chegando por ex. ao detector IceCub.

### C. Simulador

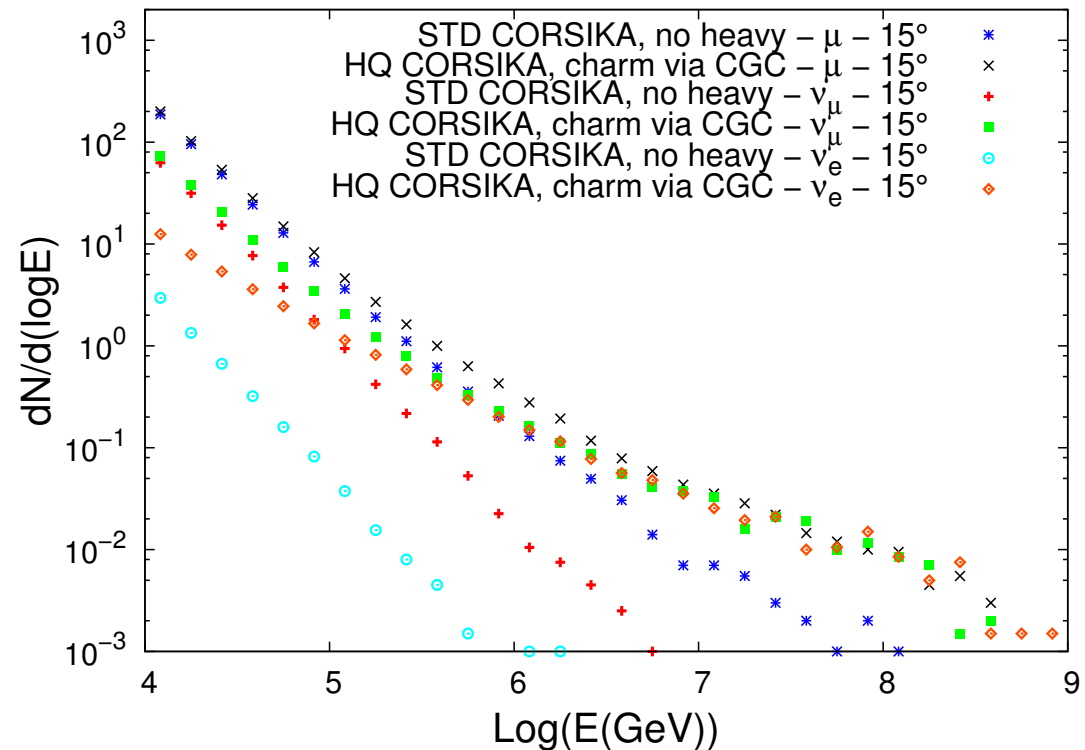
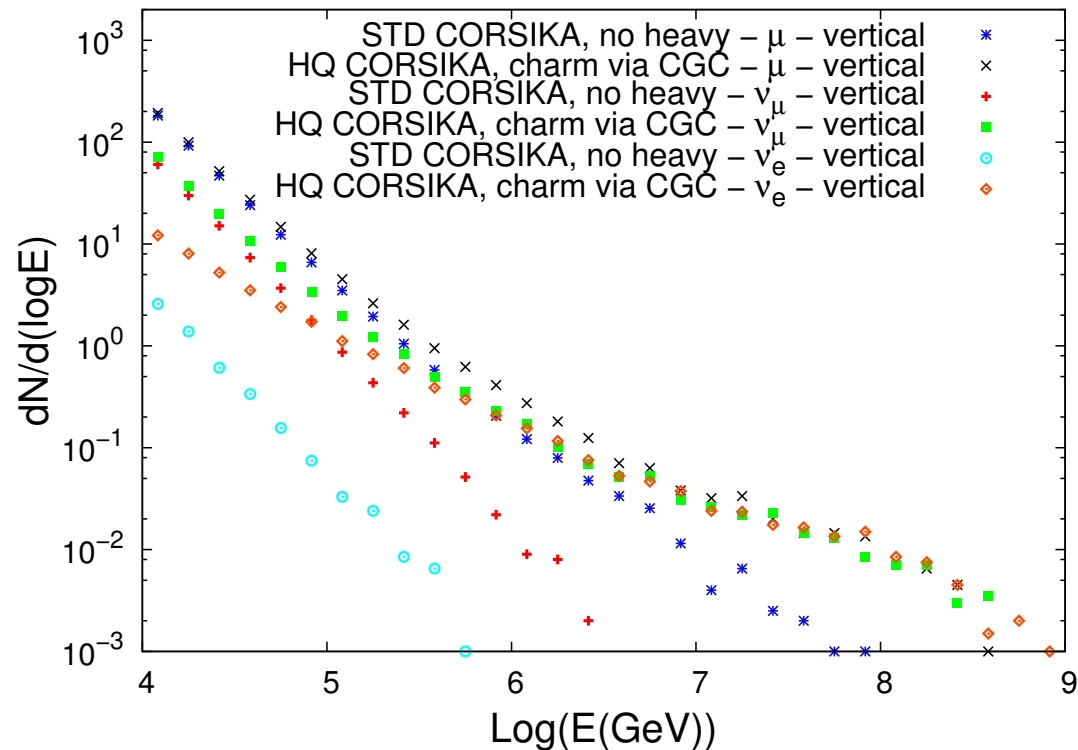
- Usaremos um código modificado do gerador de CAEs CORSIKA[12]. Tal código sempre irá produzir partículas pesadas (charm e bottoms) na primeira interação do raio cósmico primário[13], [14] e [15] (a partir de agora chamaremos de HQ CORSIKA).
- Tal código faz uso de dois modelos de hadronização de hádrons pesados, Color Glass Condensate (CGC) e Intrinsic Quark Model (IQM).

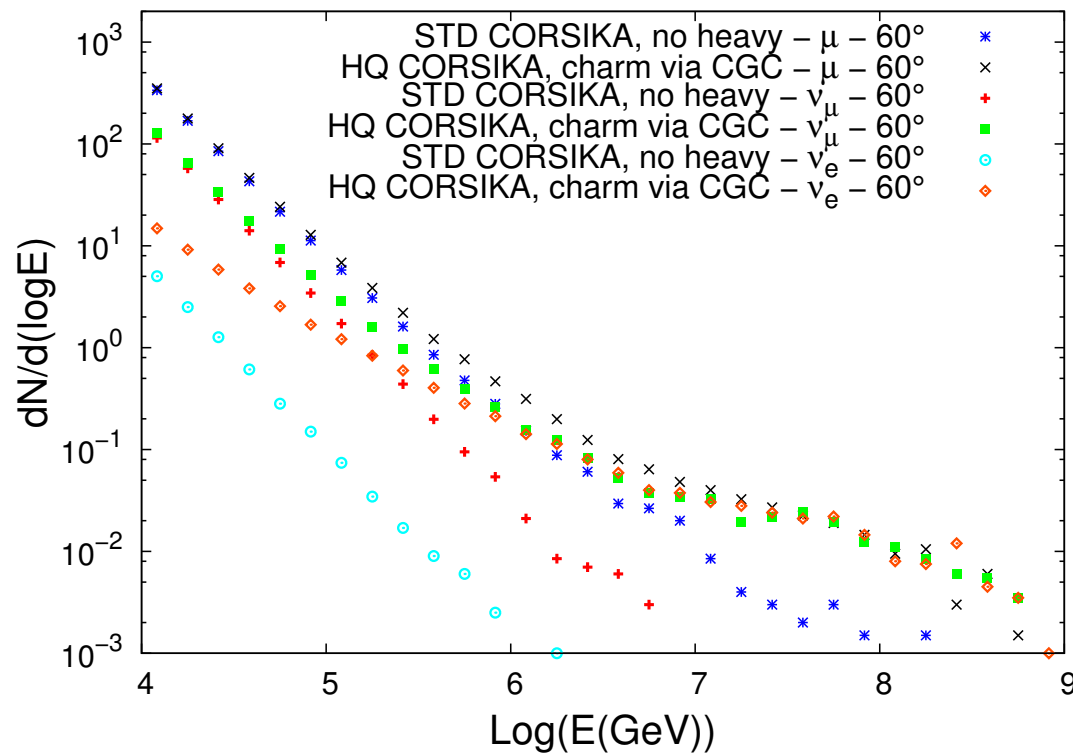
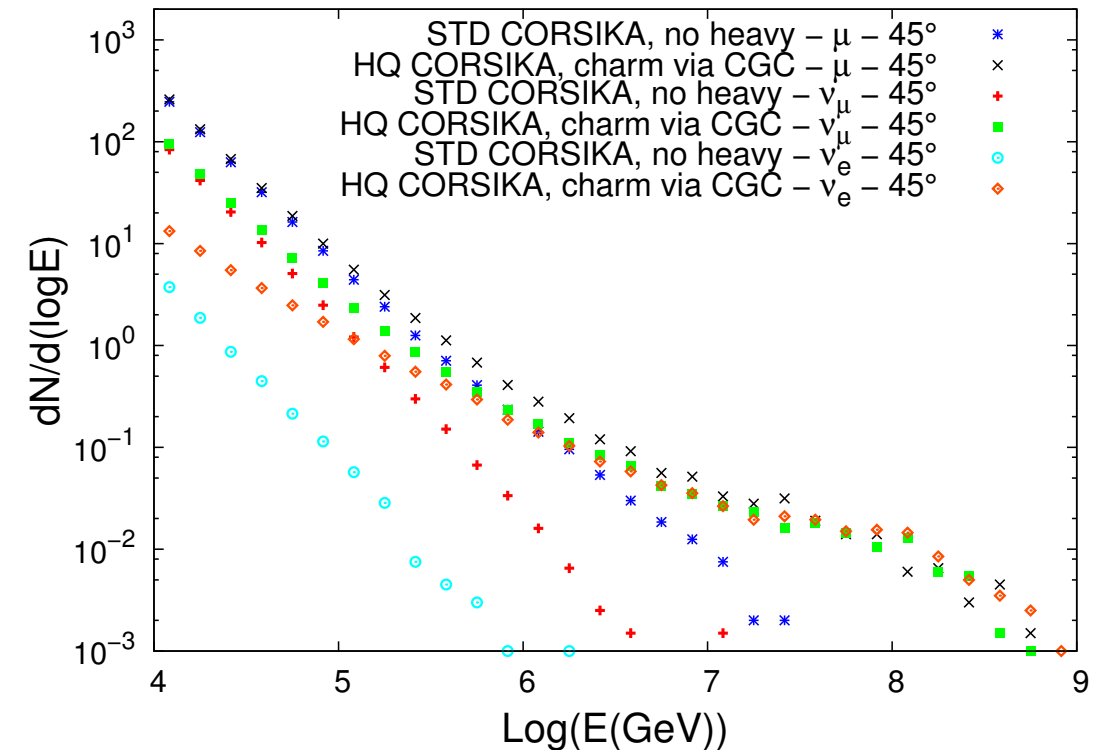
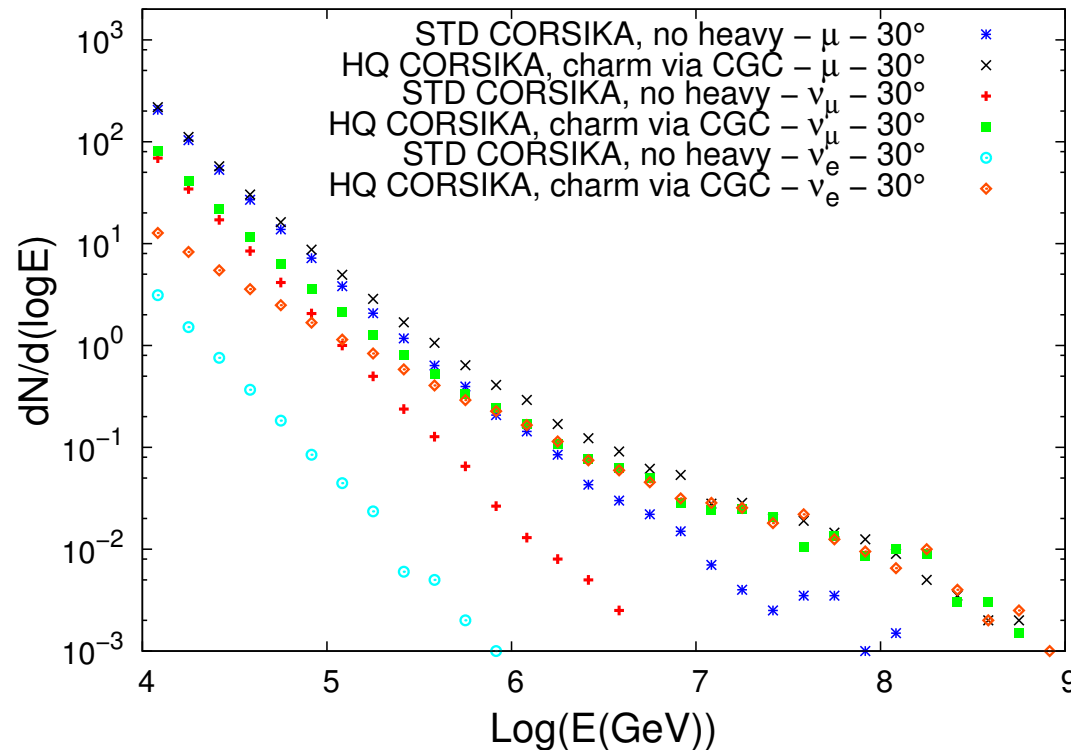
## D. Resultados

- Nas próximas seções, nós iremos mostrar os resultados encontrados.
- Resultados para dois modelos de hadronização de hádrons pesados, CGC ( $x_F > 0.05$ ) e IQM - apenas produção de charm.
- Para vários ângulos zenitais da partícula primária, ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ ).
- CAEs com energia fixa,  $3 \times 10^{19} eV$  e partícula primária próton.
- $\approx 2000$  CAEs para análise.
- Faremos comparações entre nosso código modificado do CORSIKA e o CORSIKA original (sem produção de charm) (a partir de agora chamaremos de STD CORSIKA).

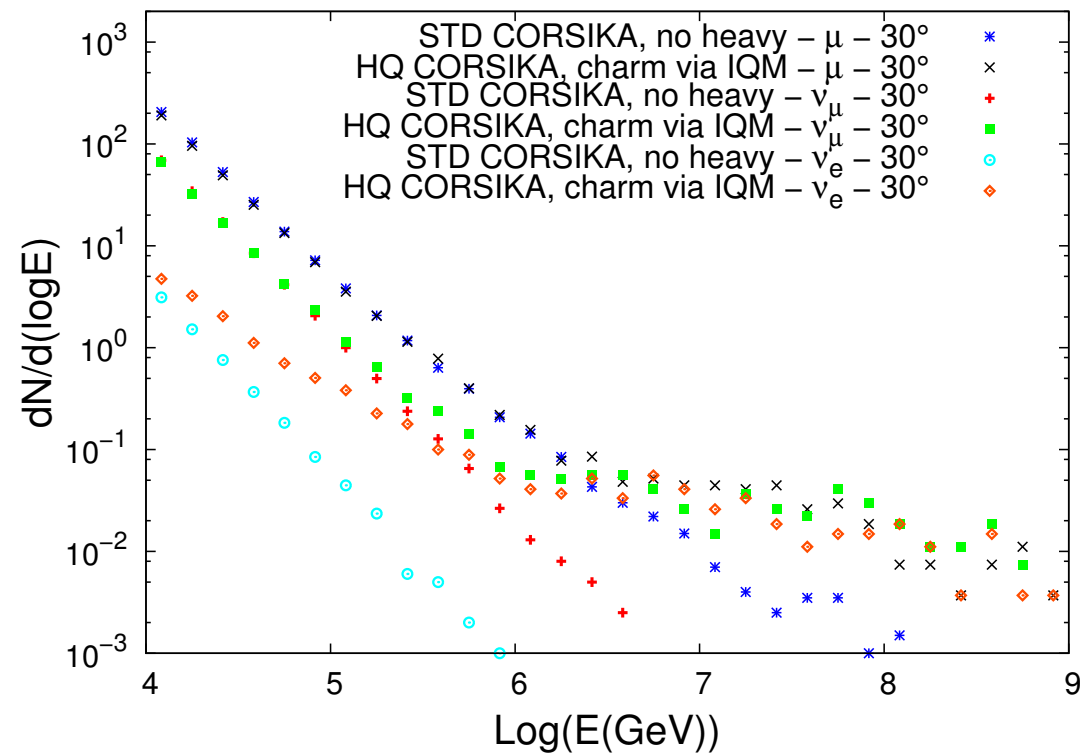
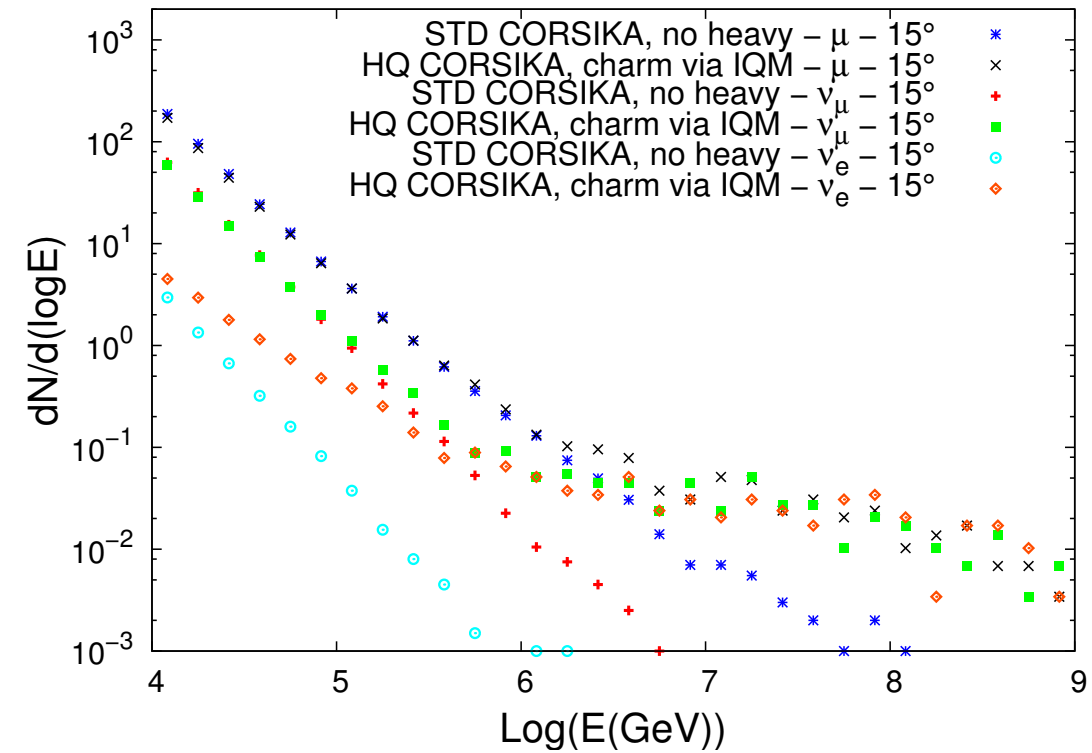
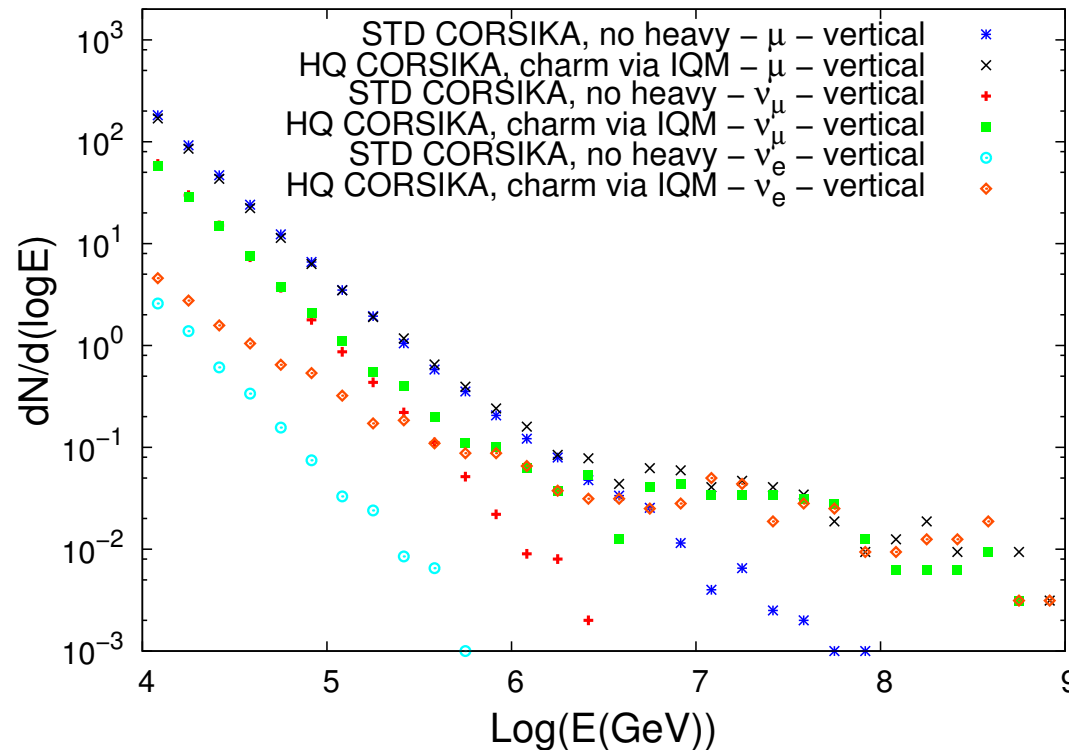
## II. DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA DE MÚONS E NEUTRINOS

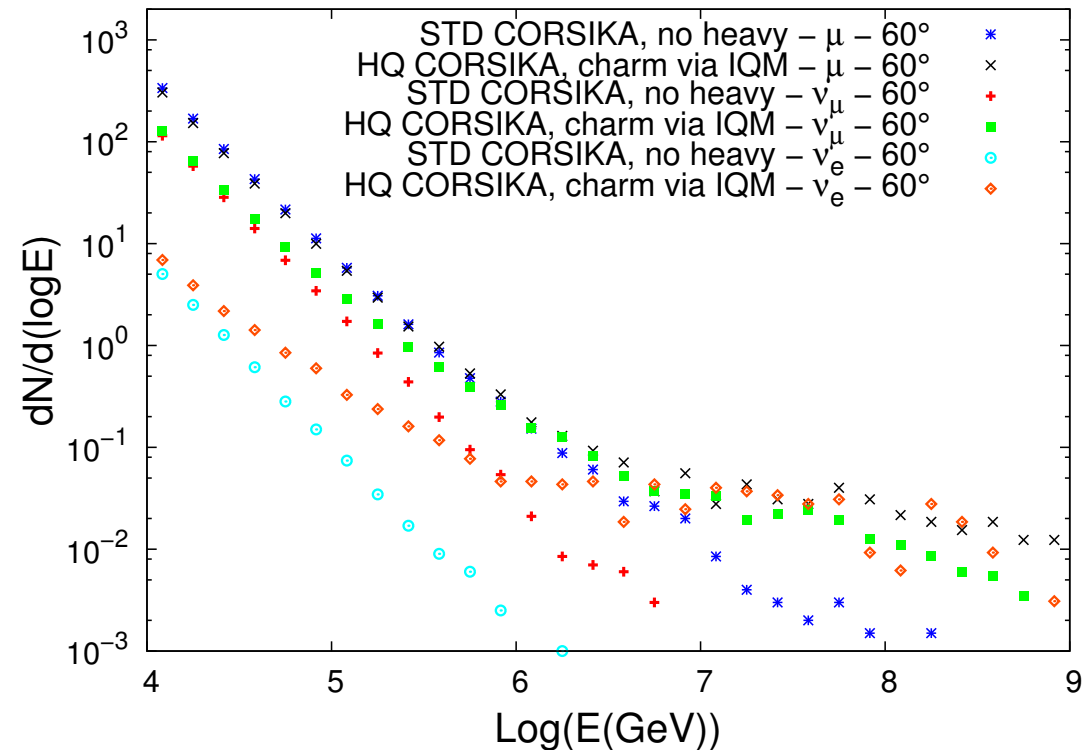
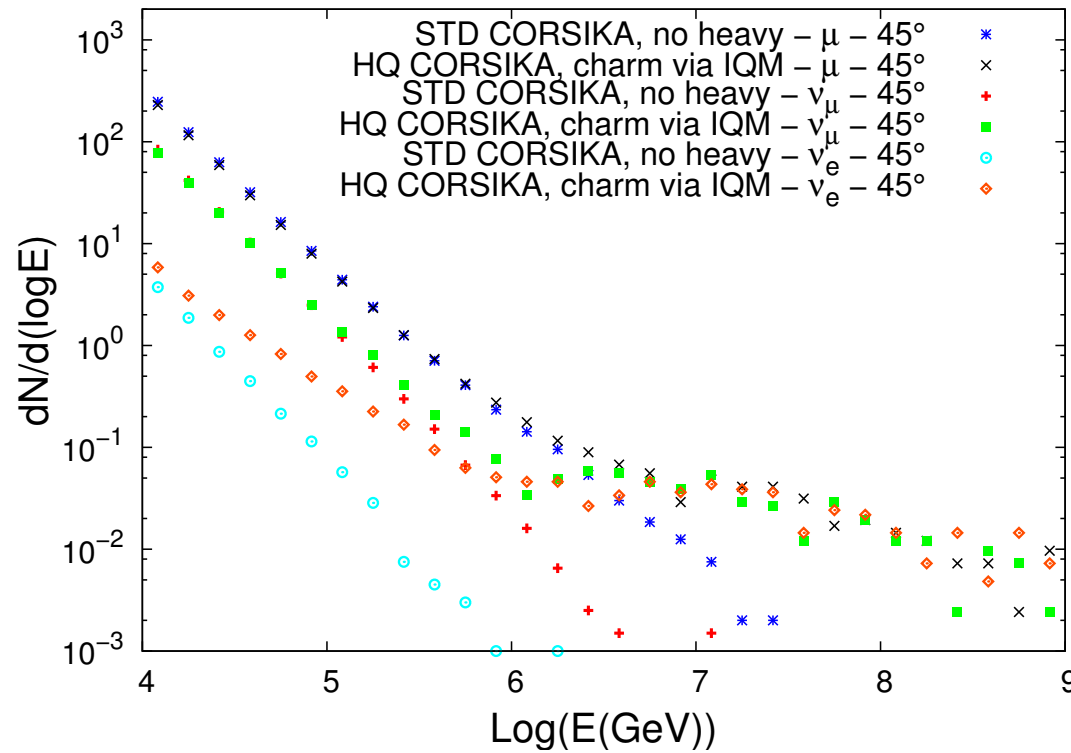
- A seguir nós mostramos a distribuição de energia de partículas para vários ângulos zenitais da partícula primária. Comparações entre HQ CORSIKA e STD CORSIKA.



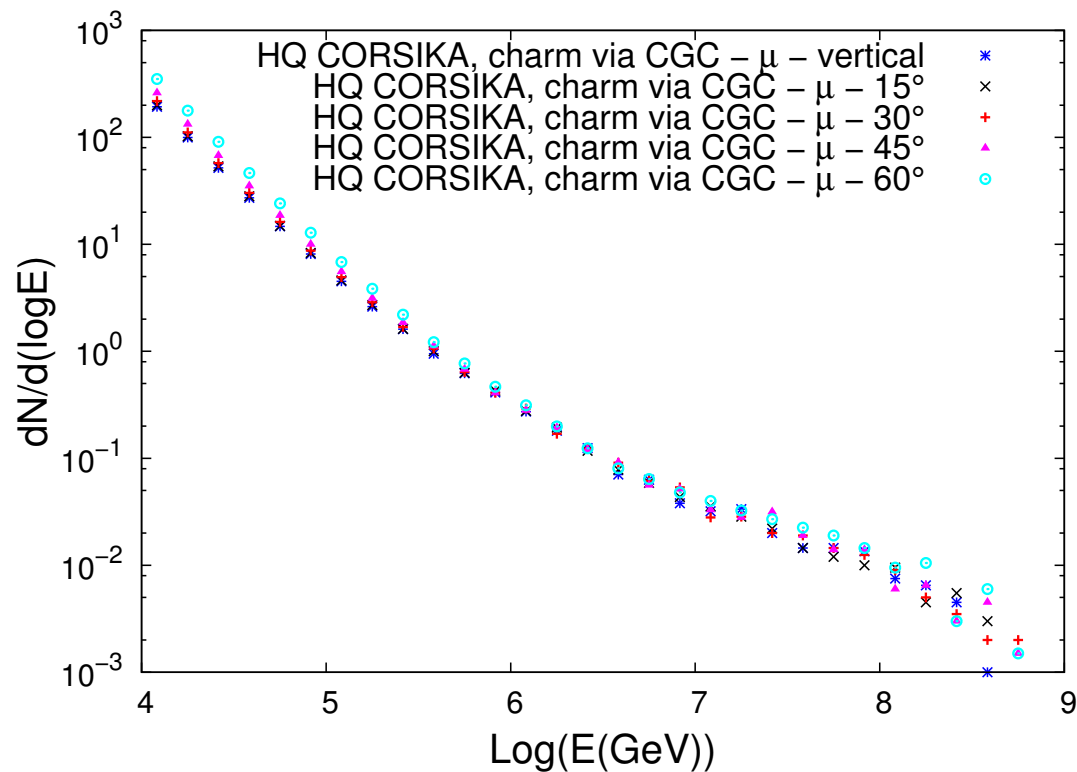
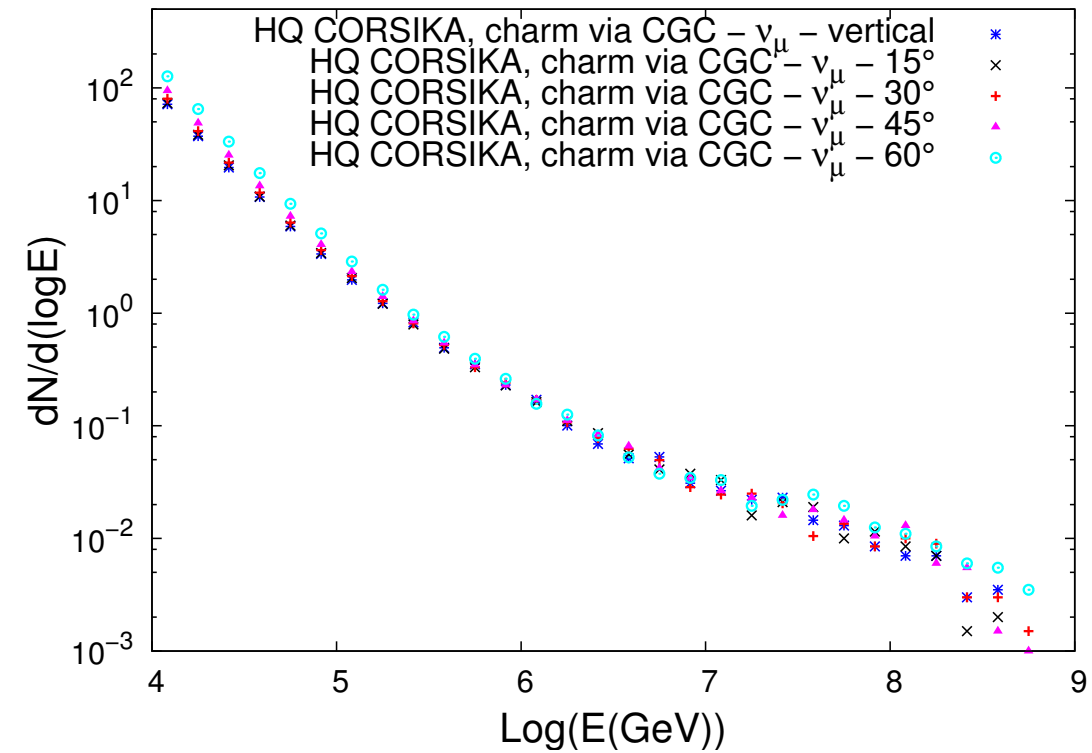
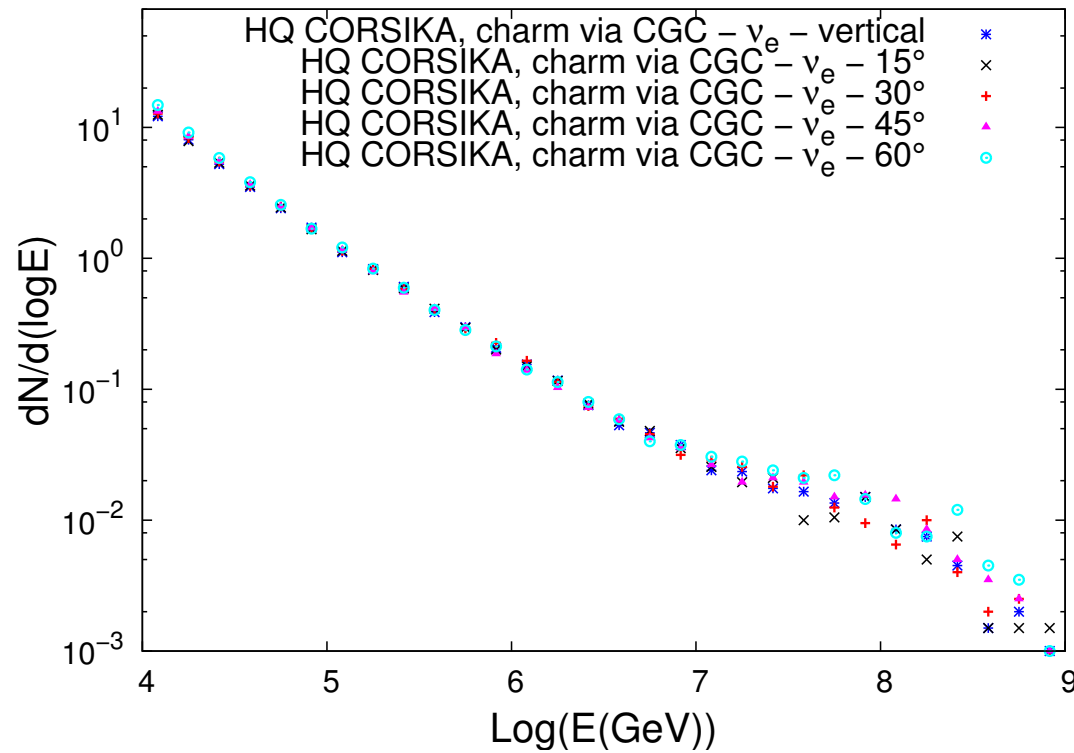


Distribuição média de  
 energia de partículas para  
 vários ângulos zenitais.  
 Comparação entre HQ CORSIKA  
 (via CGC) e STD CORSIKA.



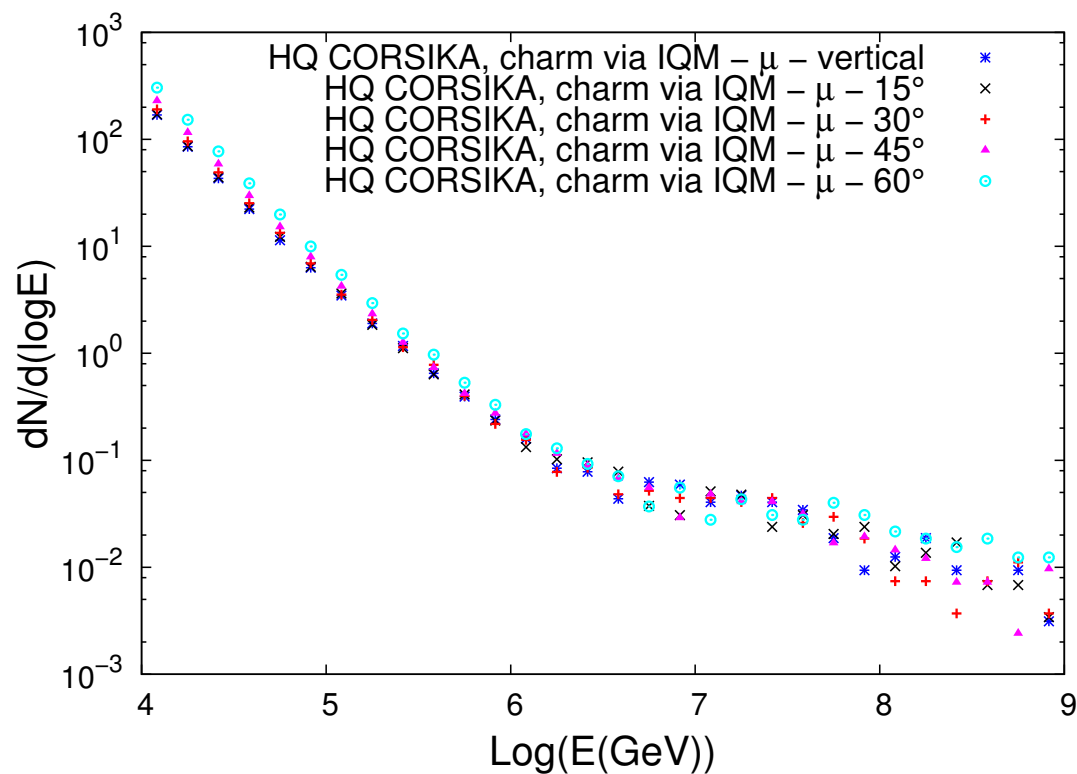
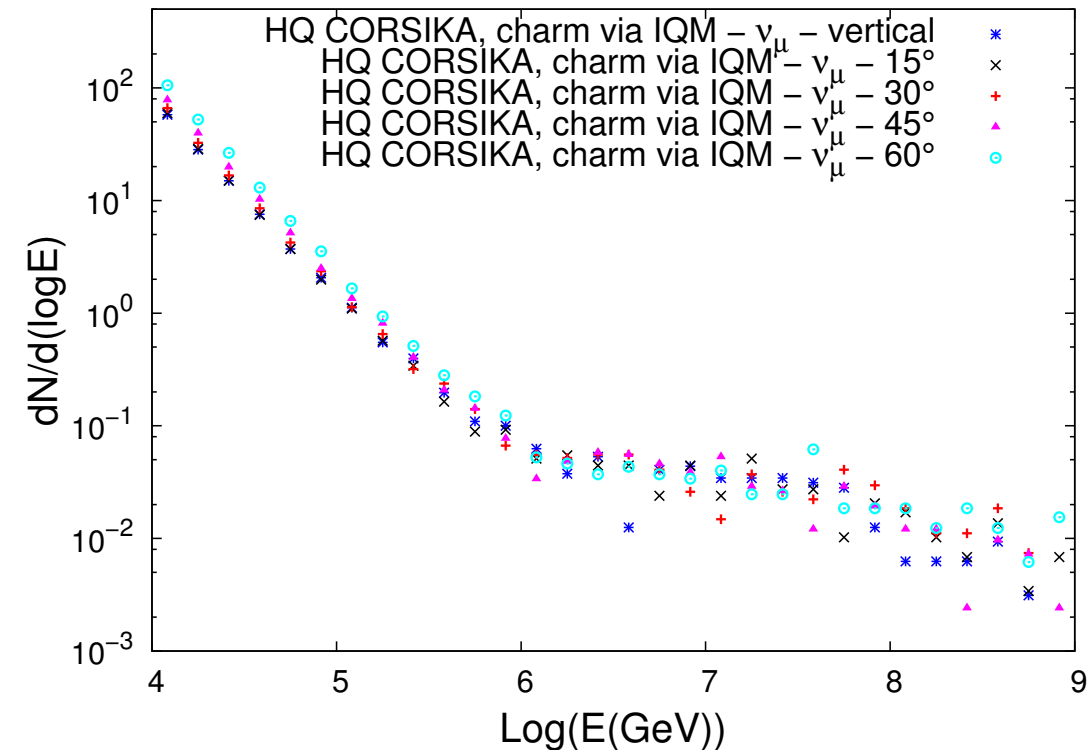
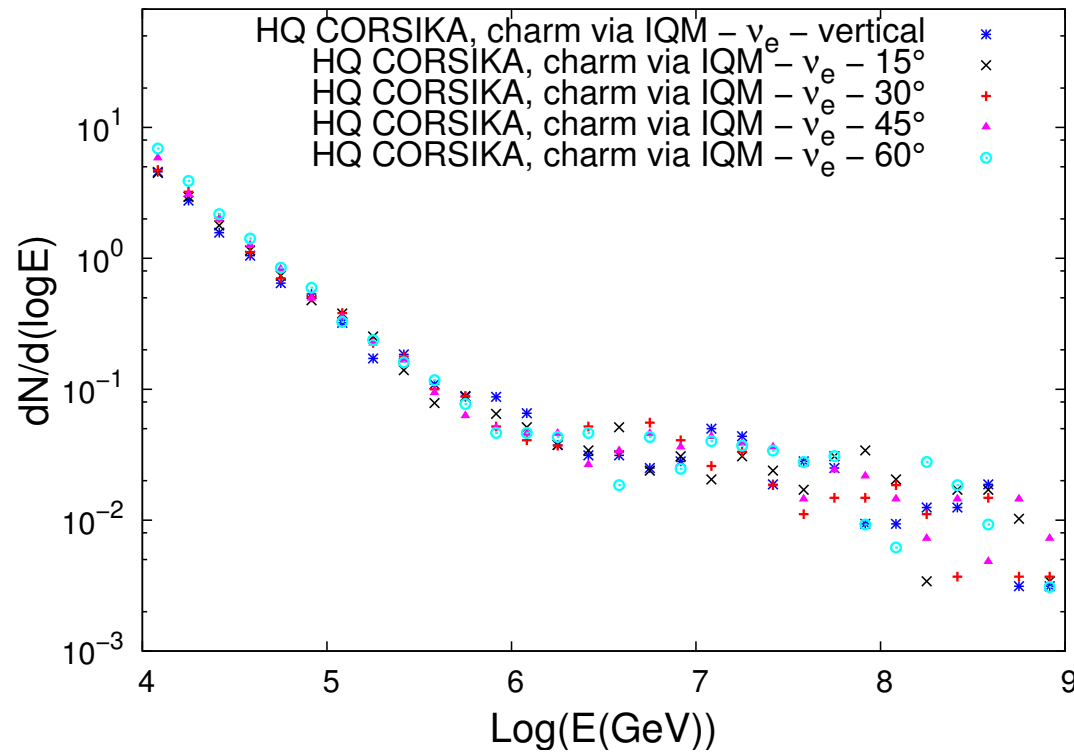


- Distribuição média de energia de partículas para vários ângulos zenitais. Comparação entre HQ CORSIKA (via IQM) e STD CORSIKA.
- Comparando HQ CORSIKA (via CGC e IQM) e STD CORSIKA vemos que para quaisquer ângulos zenitais nós temos um excesso de múons, neutrinos eletrônicos e muônicos para o HQ CORSIKA.



Distribuição média de  
 energia das partículas.  
 HQ CORSIKA via CGC.



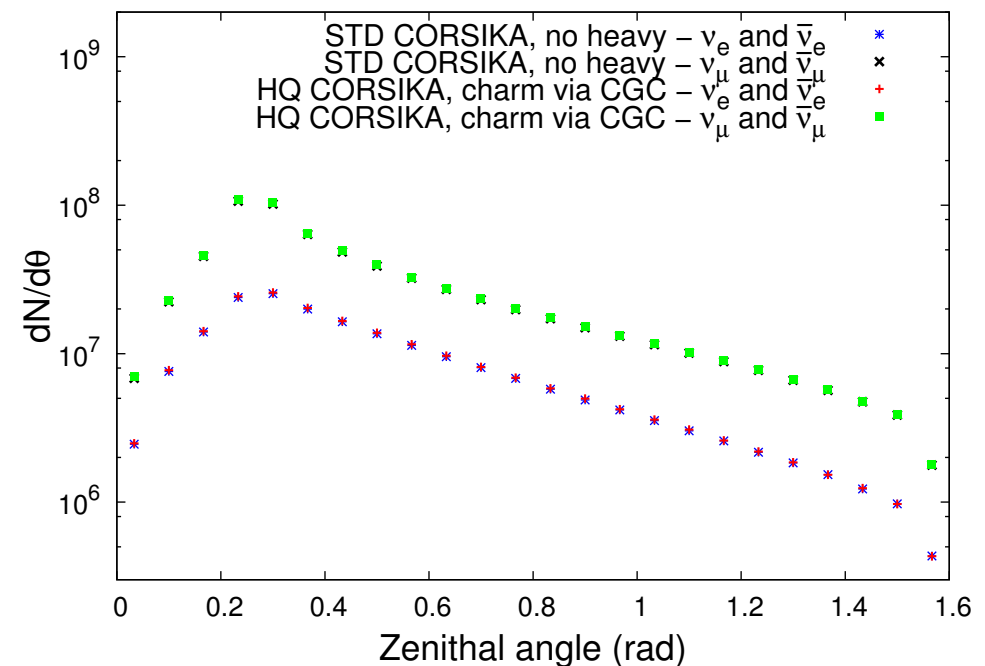
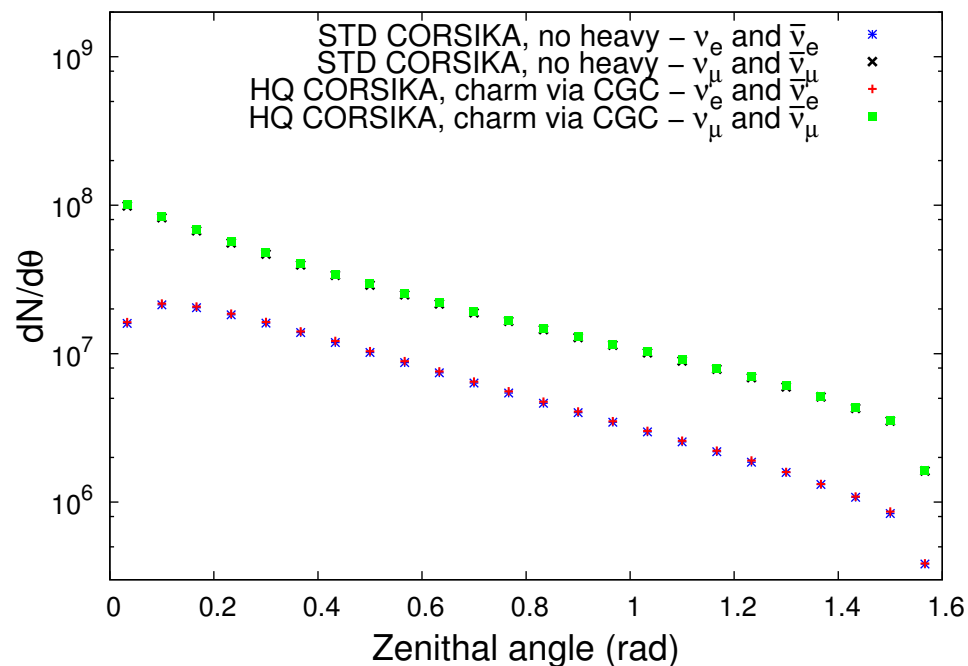


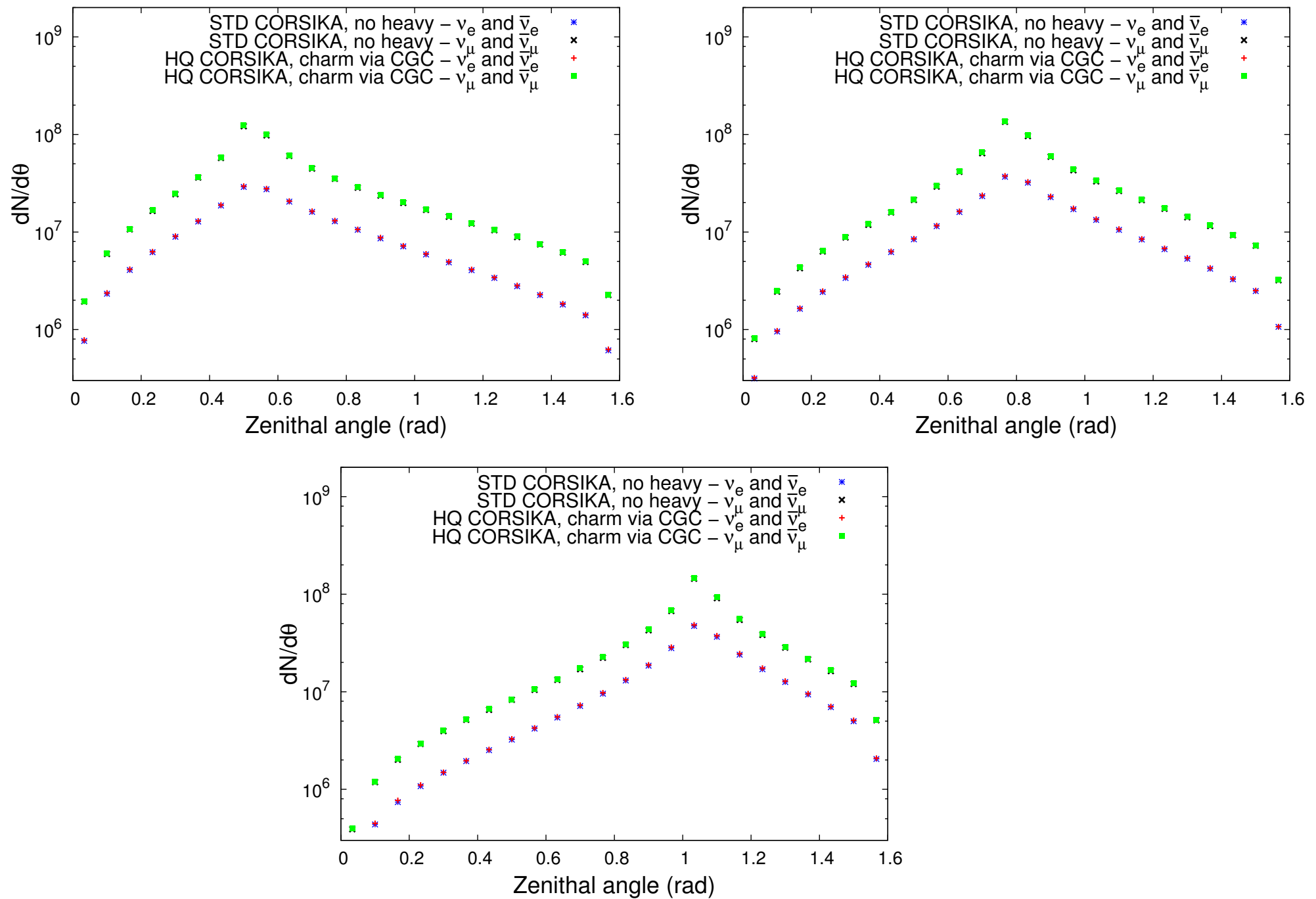
Distribuição média de  
 energia das partículas.  
 HQ CORSIKA via IQM.

- Nas figuras anteriores, para todas as distribuições de partículas, vemos que para CAEs mais inclinados ( $60^\circ$ ) um pequeno aumento do fluxo para ambas, baixas energias ( $\approx 10^4 \text{ GeV}$  no nosso caso) e altas energias ( $\approx 10^8 \text{ GeV}$  no nosso caso).

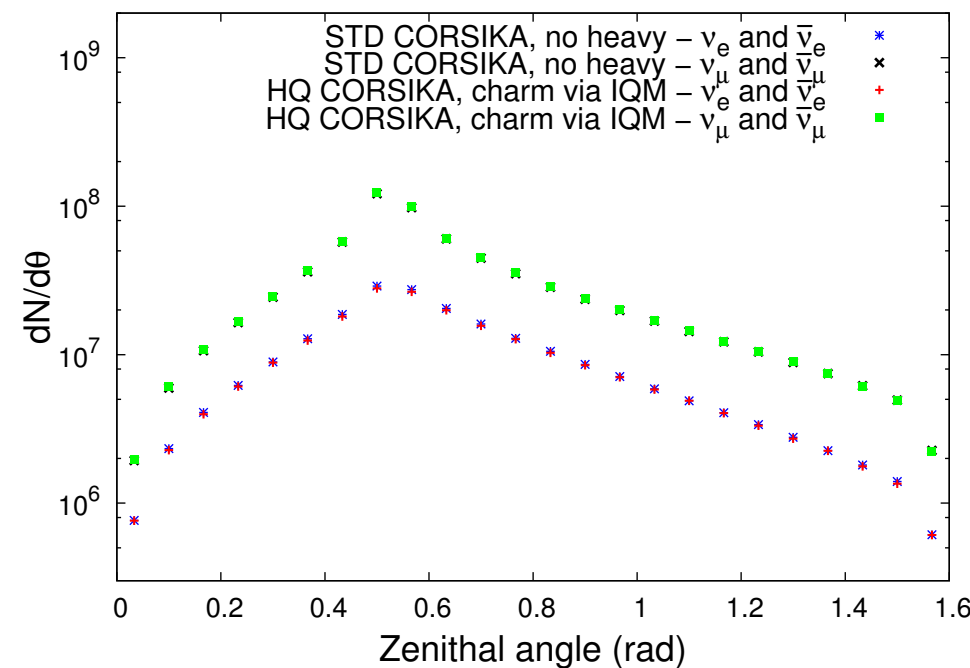
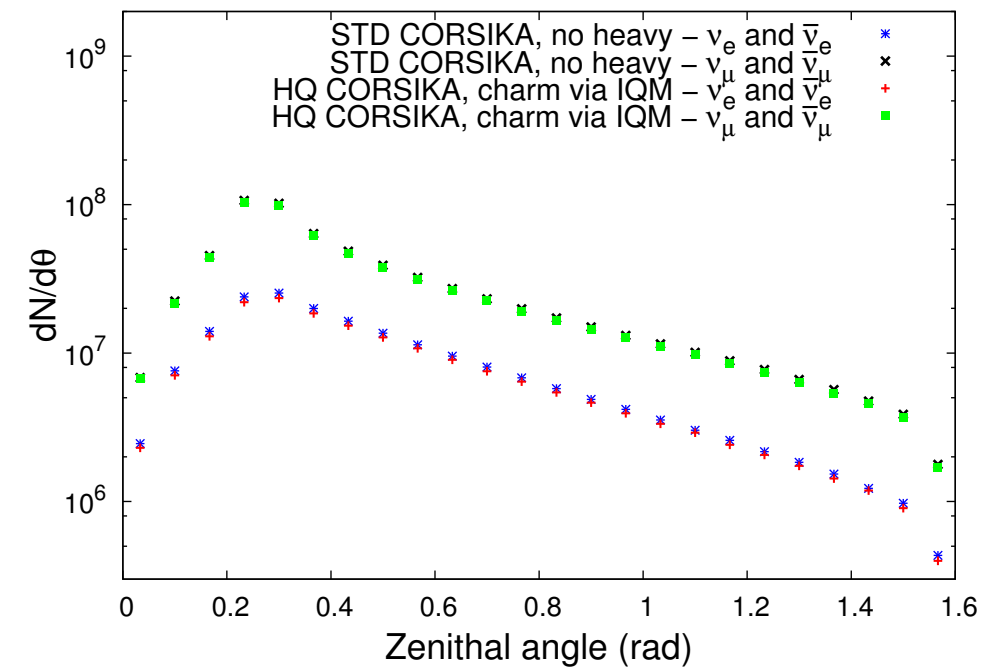
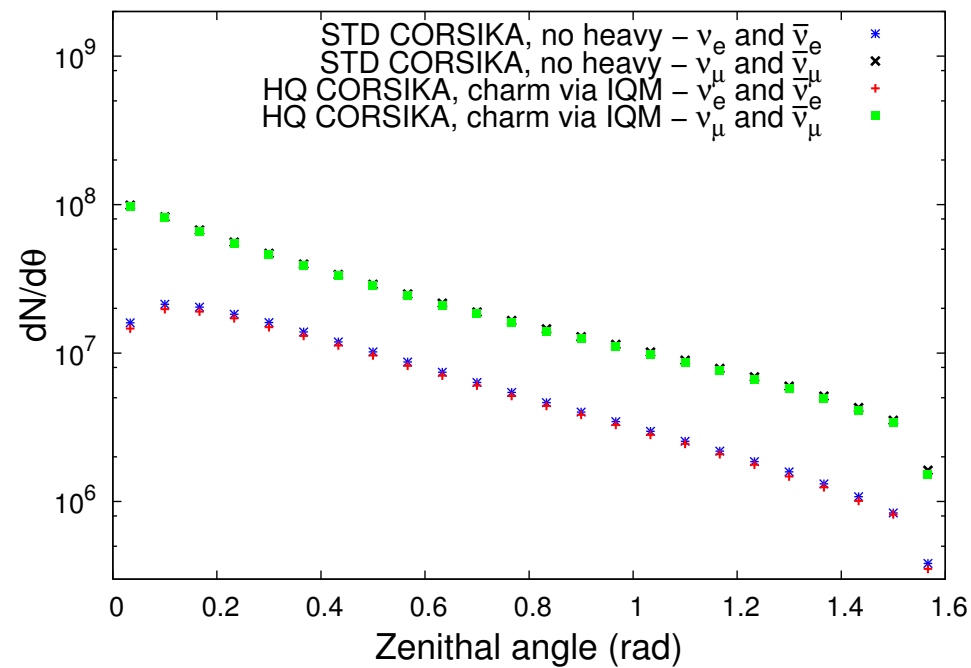
### III. DISTRIBUIÇÃO ANGULAR ZENITAL DE NEUTRINOS

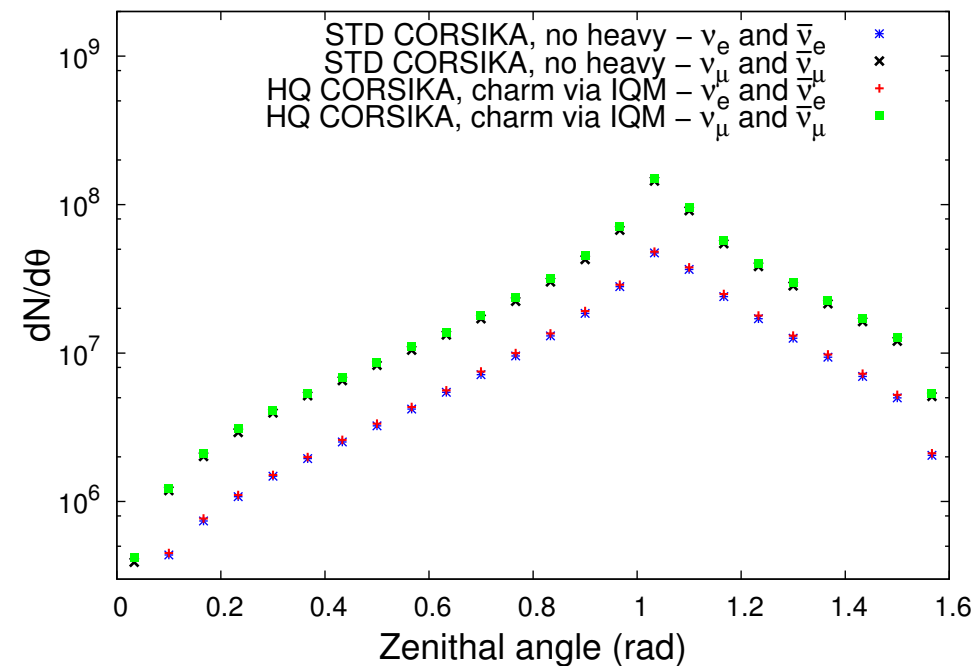
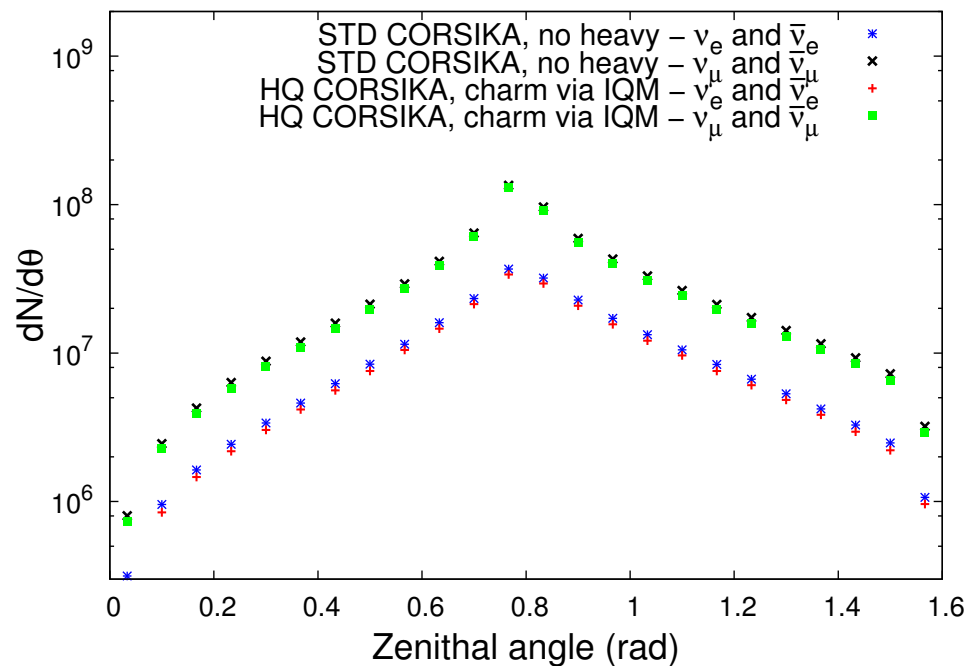
- A distribuição angular zenital de neutrinos eletrônicos e muônicos é mostrado nesta seção.
- As energias dos neutrinos são apresentadas sem filtro, ie, todos os neutrinos que chegam ao chão são levados em conta.
- Distribuição para vários ângulos zenitais da partícula primária. Comparações entre HQ CORSIKA e STD CORSIKA.





- Distribuição angular de partículas (vertical,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$  respectivamente). Comparações entre HQ CORSIKA (via CGC) e STD CORSIKA.





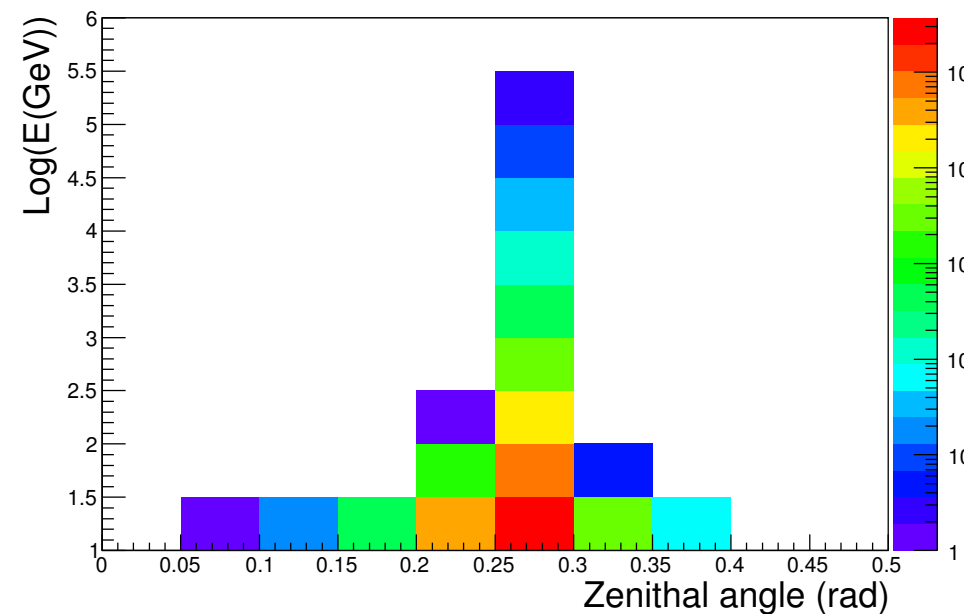
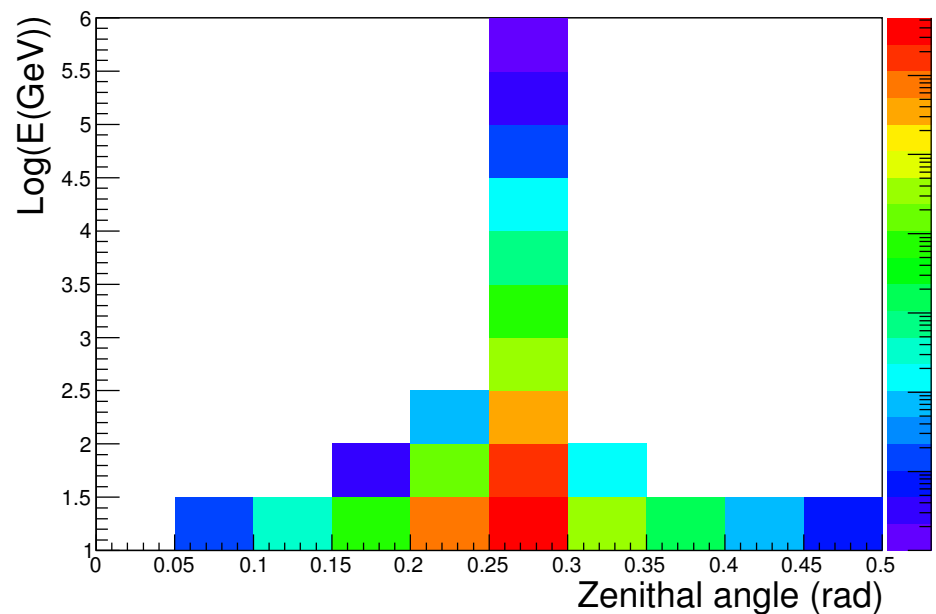
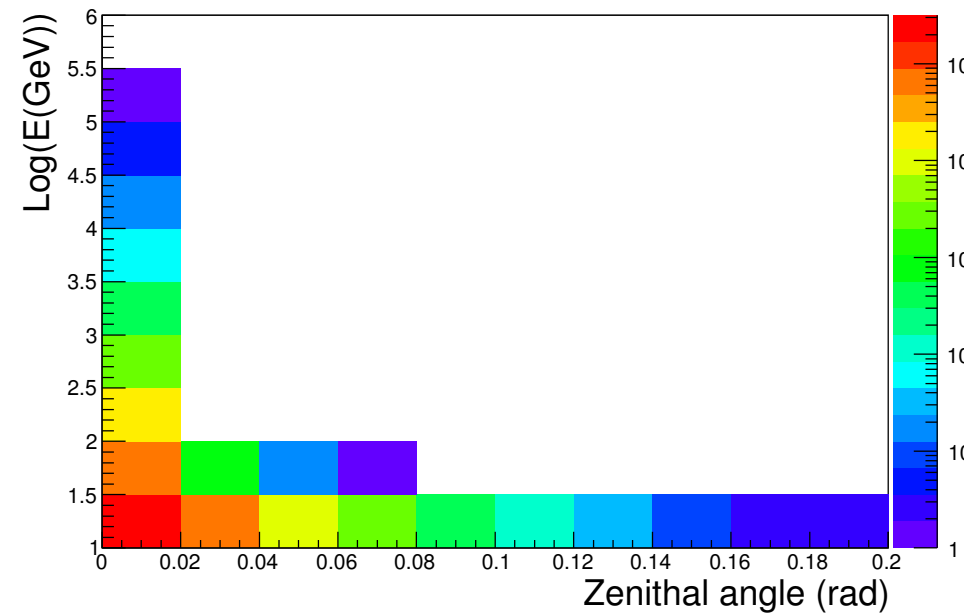
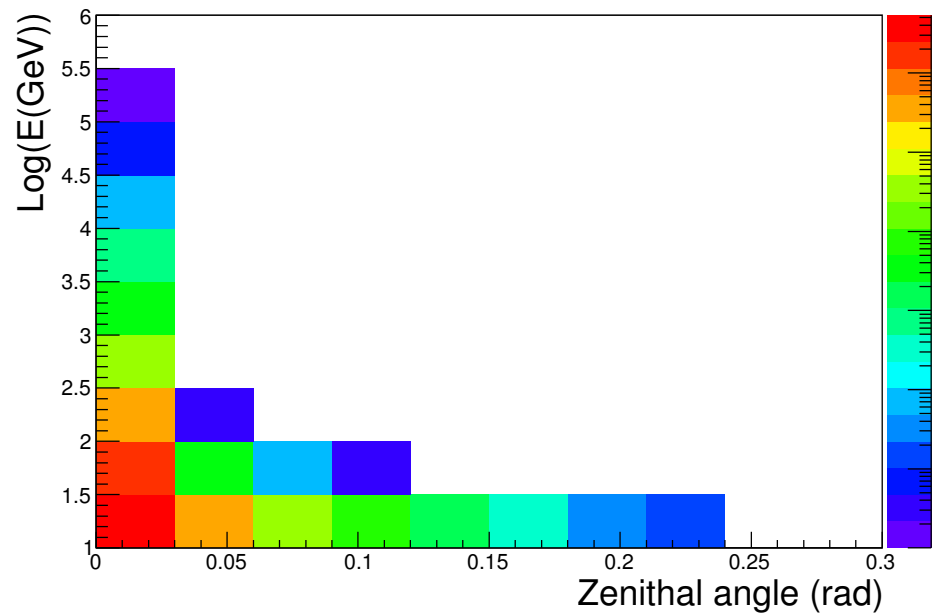
- Distribuição angular de partículas (vertical,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$  respectivamente). Comparações entre HQ CORSIKA (via IQM) e STD CORSIKA.
- Nas figuras anteriores, vemos que a maioria das partículas seguem o ângulo zenital da partícula primária do CAE, para todos os ângulos zenitais
- Iremos observar este efeito mais claramente na próxima seção.

- Não há diferença significativa entre as distribuições angulares das partículas.

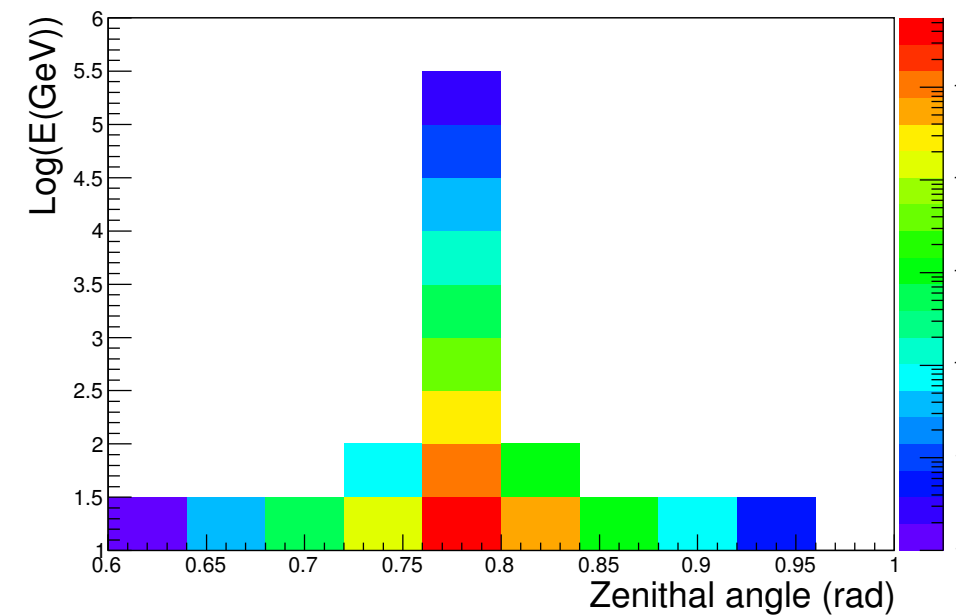
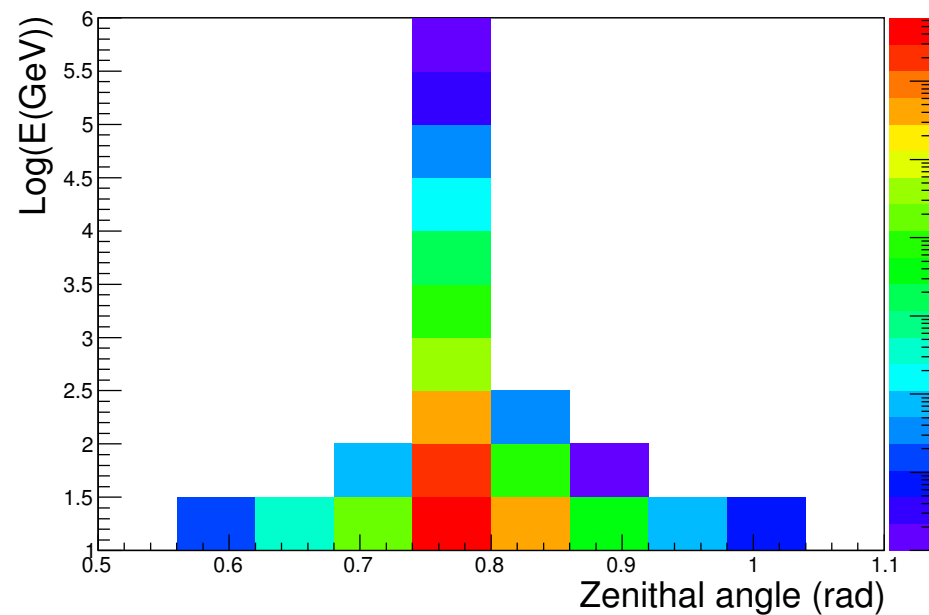
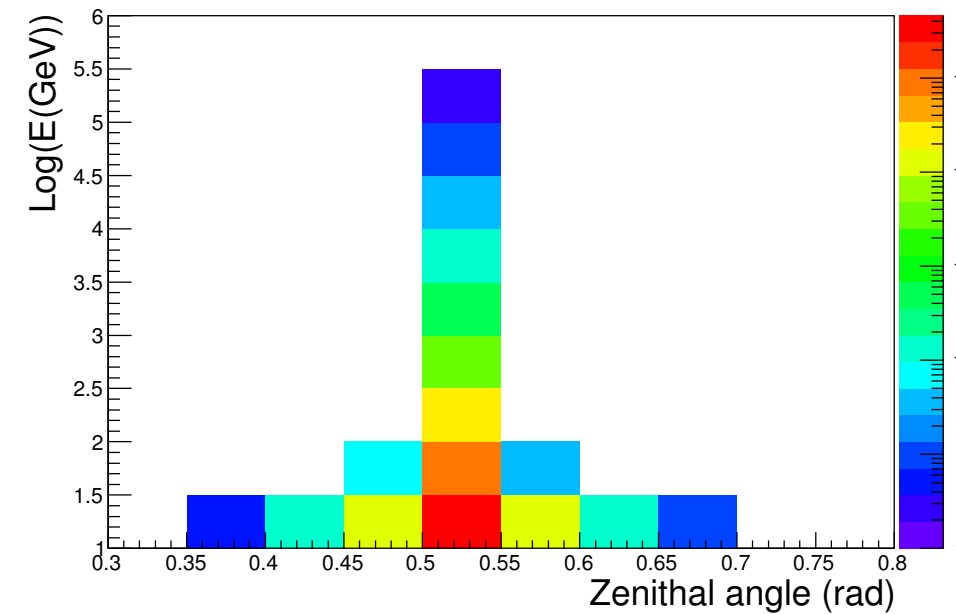
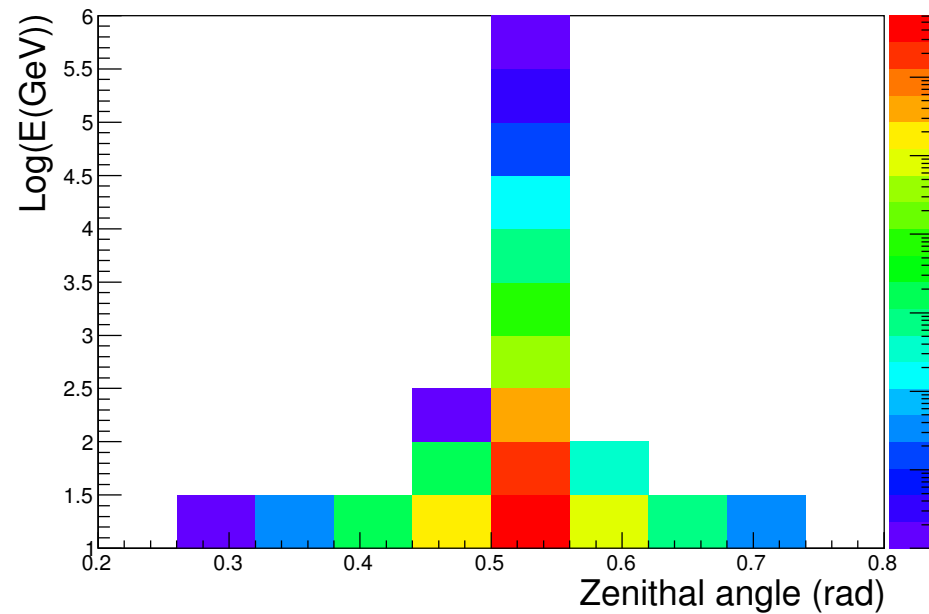
#### IV. DISTRIBUIÇÃO ANGULAR E DE ENERGIA DE NEUTRINOS

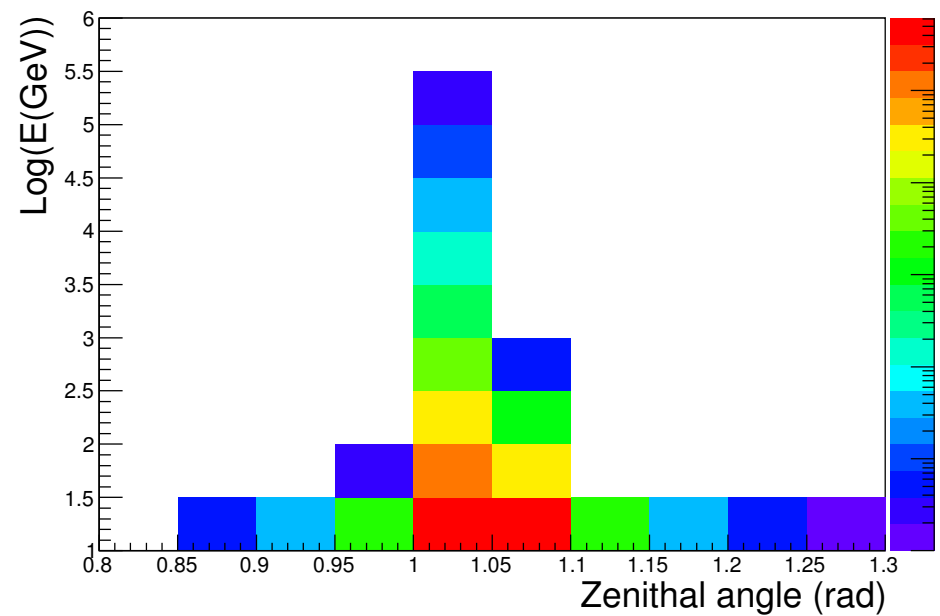
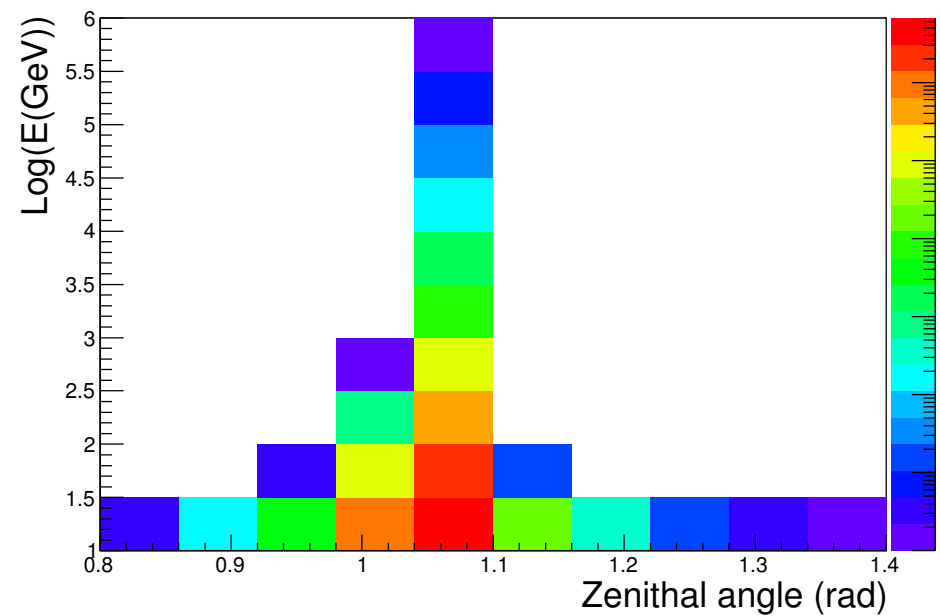
- Nas figuras seguintes, neutrinos muônicos e eletrônicos são “escritos” de acordo com seu ângulo zenital dos CAEs, em bins de  $0.3 \text{ rad}$  de ângulo zenital e meia década de energia. Para cada bin será calculado o número médio respectivo de cada respectiva partícula.
- Nosso interesse está nos neutrinos de altas energias (“prompt” neutrinos), assim um corte de energia é feito...
- ...selecionamos somente neutrinos com energia acima de  $10 \text{ GeV}$ .
- Resultados para HQ CORSIKA - via CGC e IQM.

## A. Resultados para HQ CORSIKA - via CGC

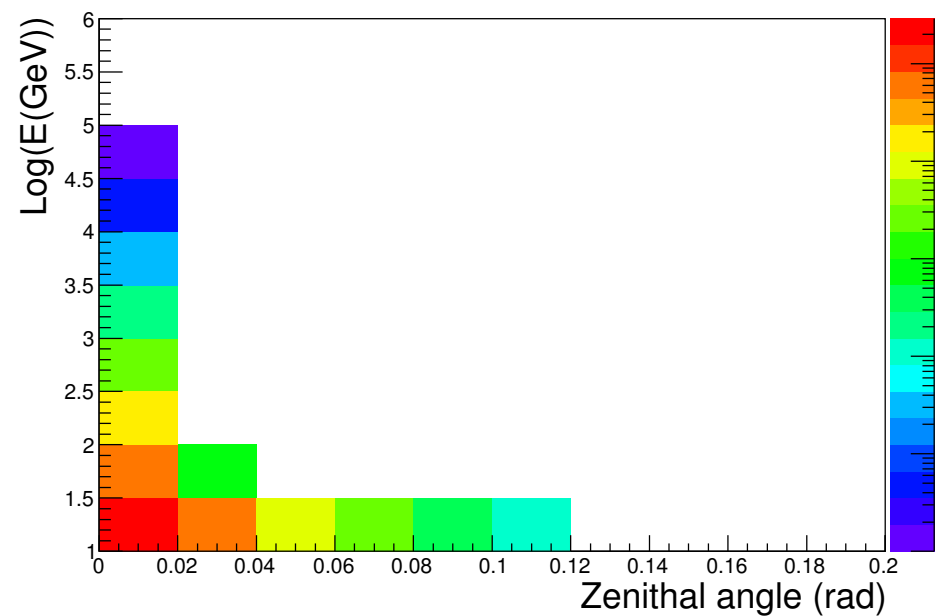
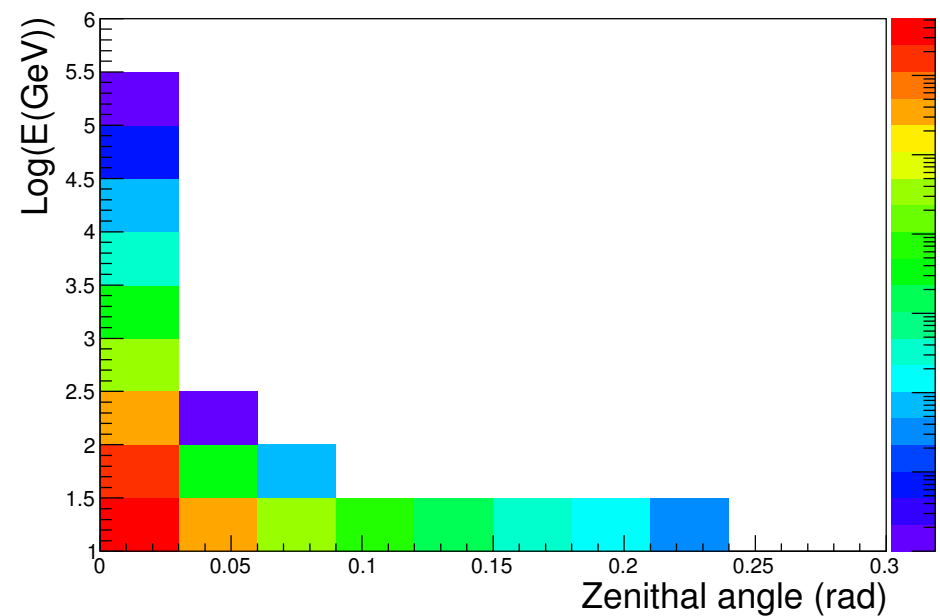


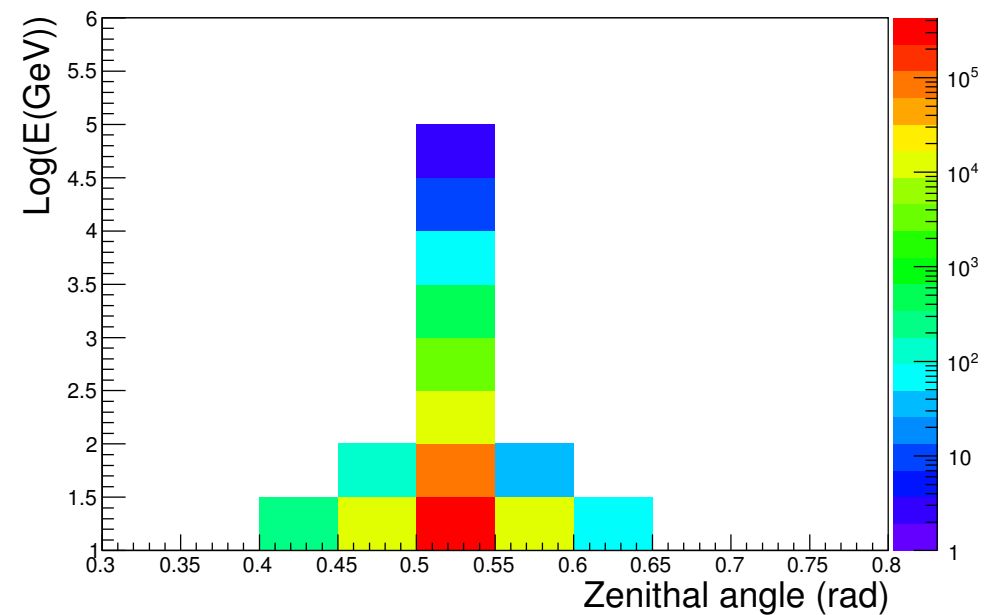
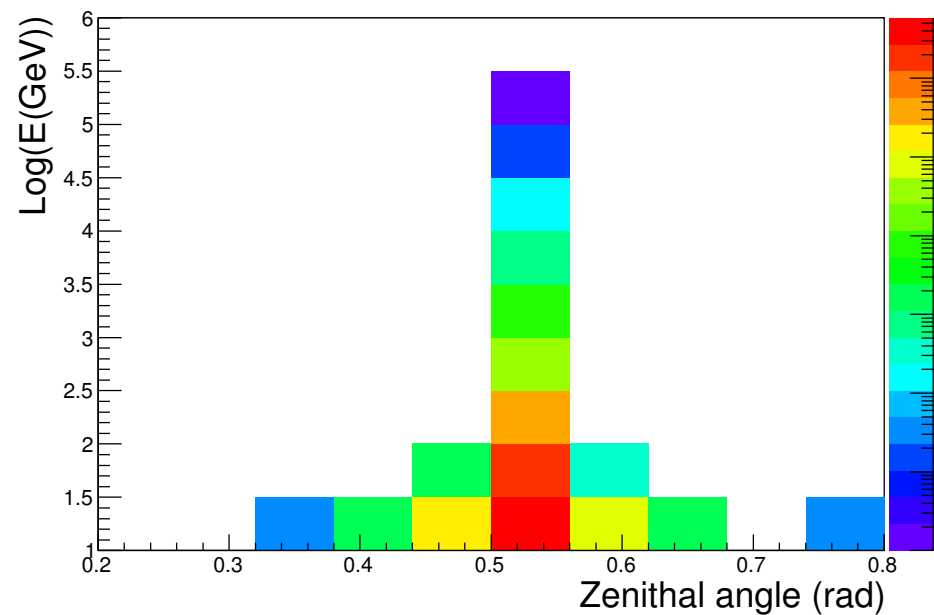
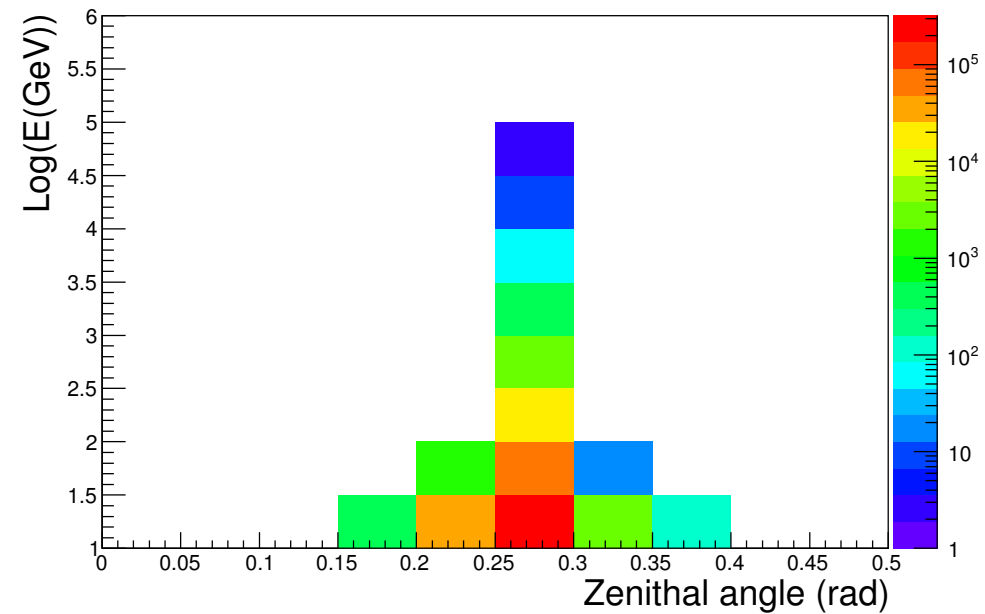
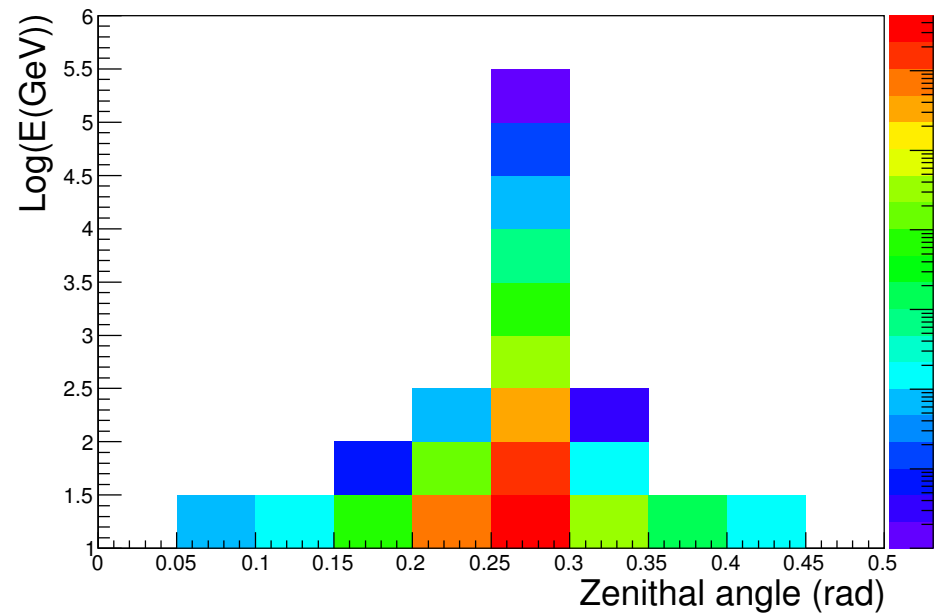


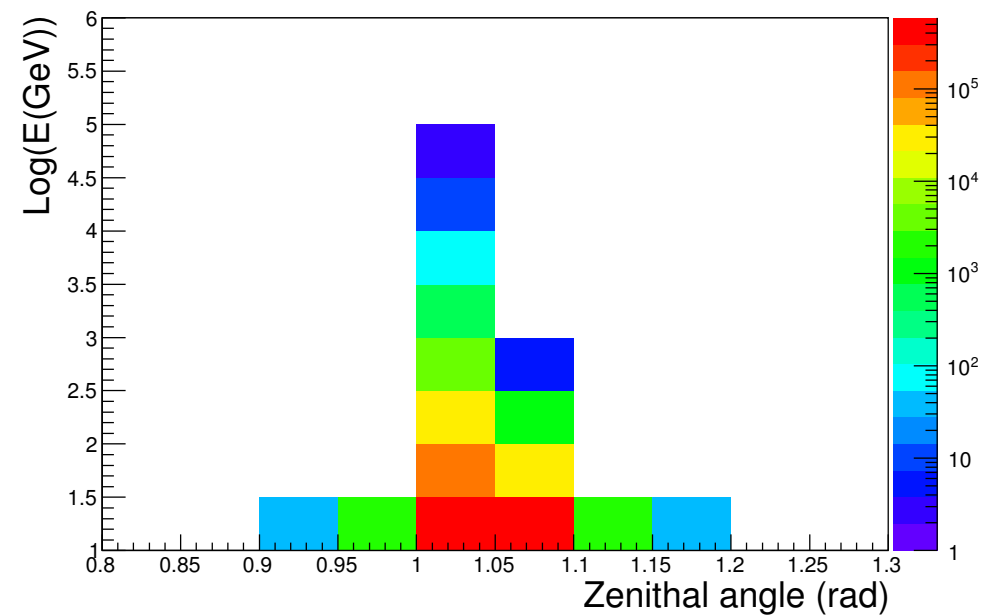
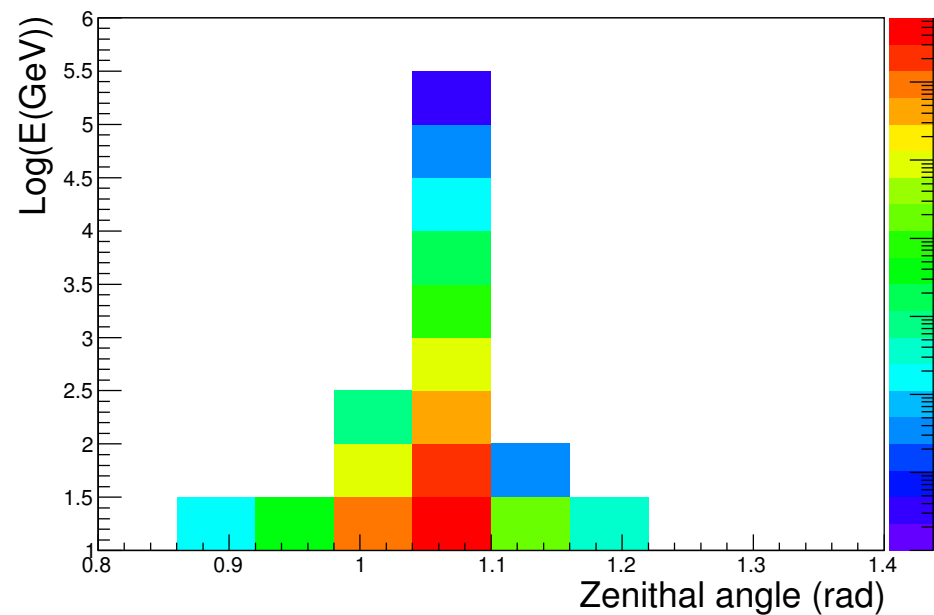
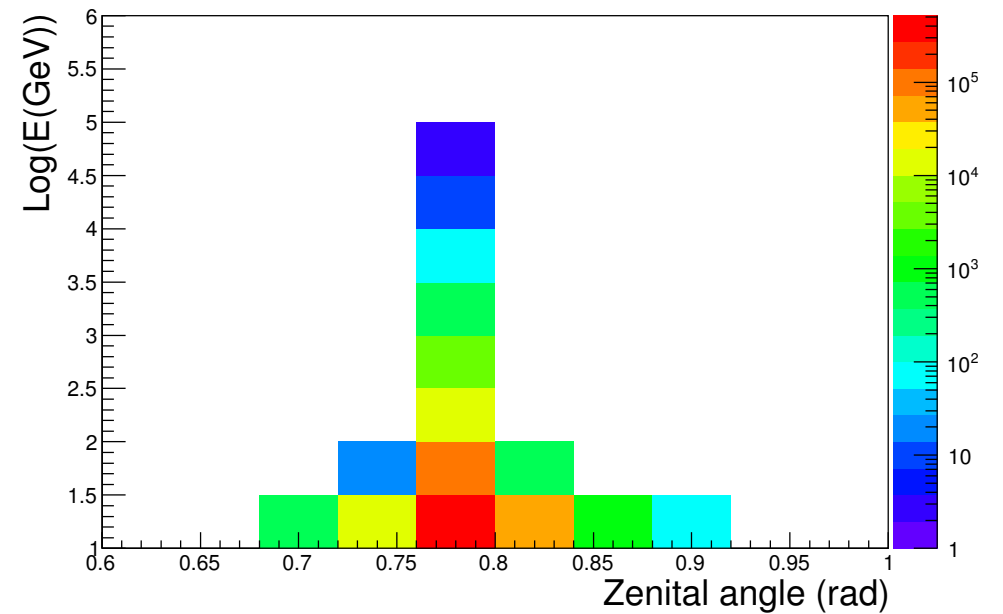
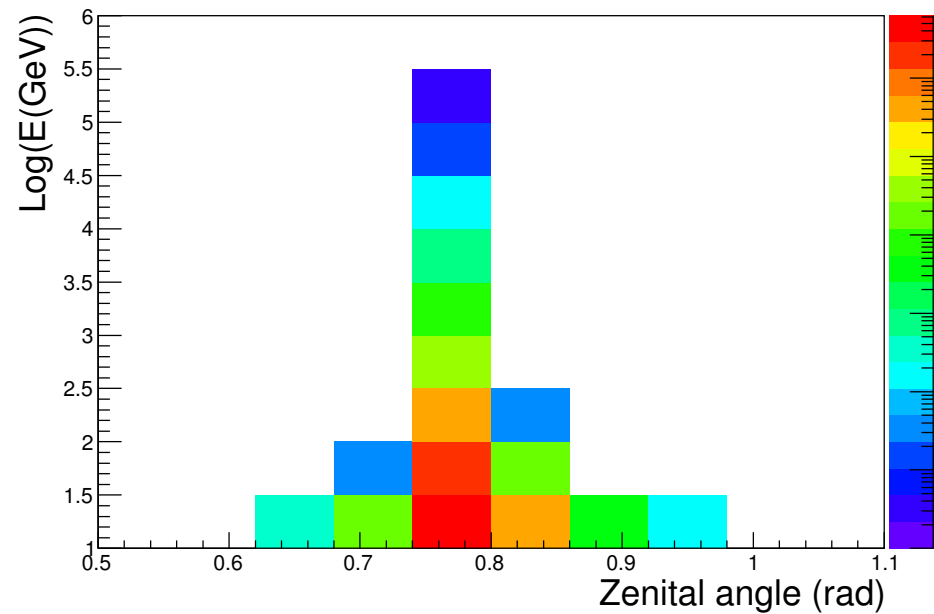




## B. Resultados para HQ CORSIKA - via IQM



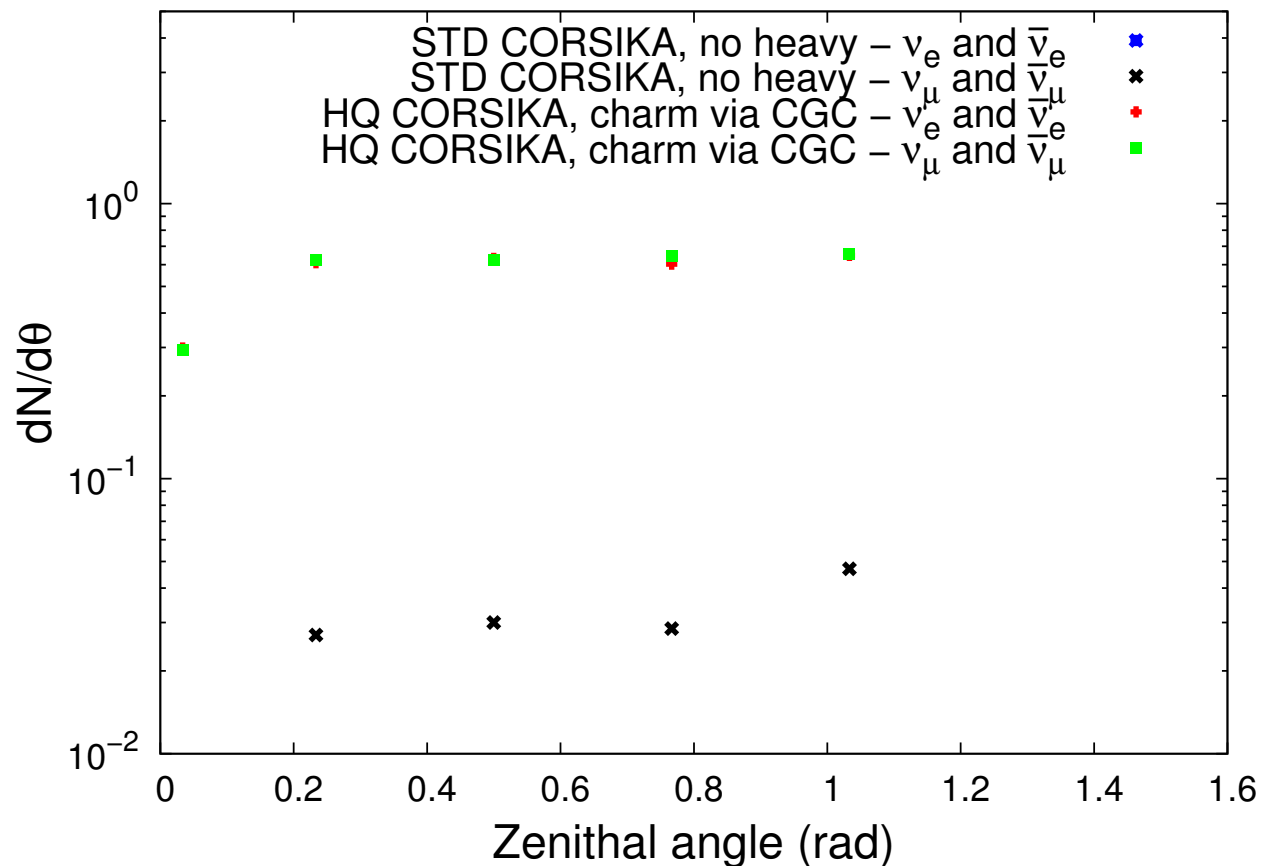




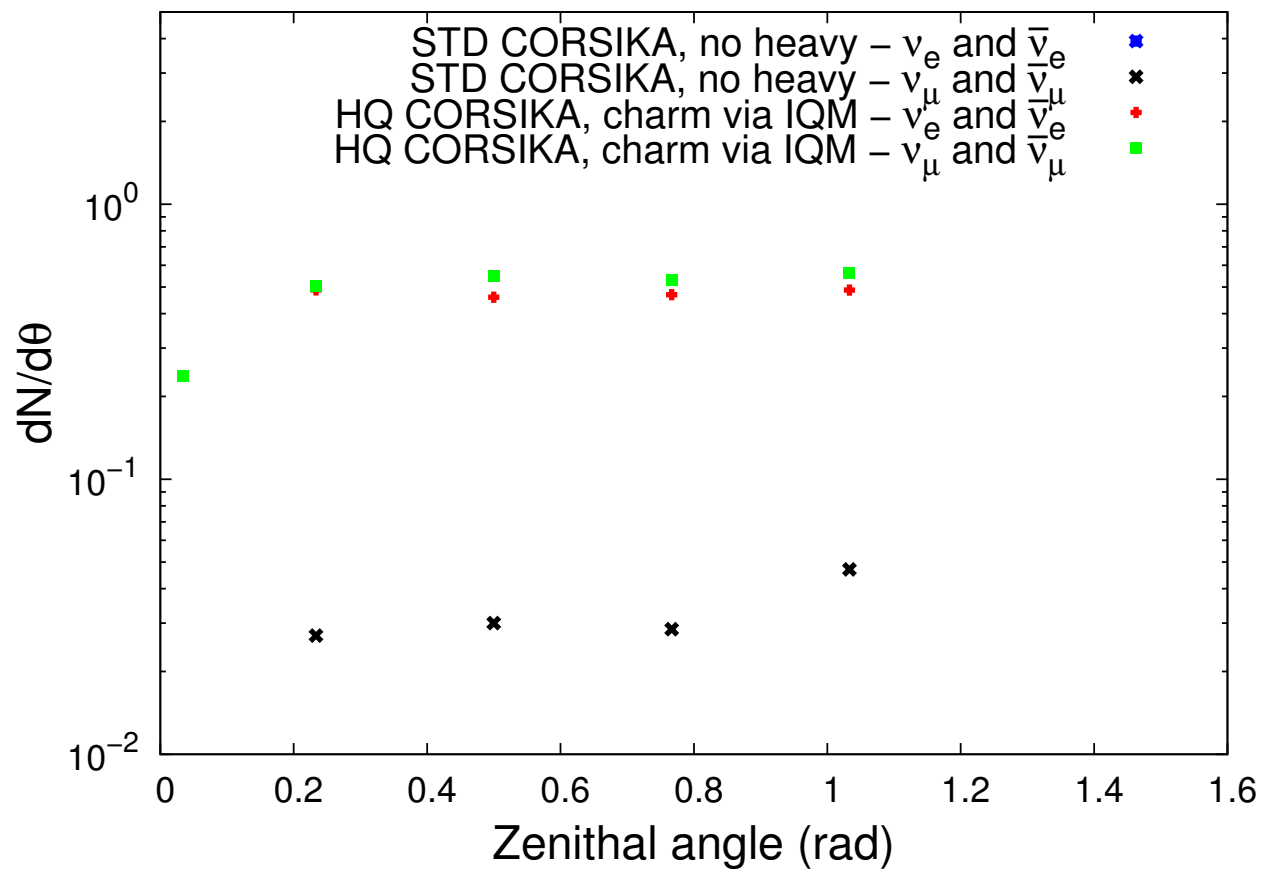
- Vemos nas figuras anteriores que neutrinos de mais altas energias seguem a direção do eixo do CAE, tendo o mesmo ângulo zenital que a partícula primária fonte.
- Podemos dizer assim que “prompt” neutrinos tem o mesmo ângulo zenital que seu CAE fonte.

V. DISTRIBUIÇÃO ANGULAR ZENITAL DE NEUTRINOS -  $\geq 1 \text{ PeV}$ 

- A distribuição angular de zenital de neutrinos eletrônicos e muônicos são mostrados nesta seção.
- Somente neutrinos que alcançam o chão com energia  $\geq 1 \text{ PeV}$  são considerados.
- Comparações entre HQ CORSIKA e STD CORSIKA.



Distribuição para HQ  
CORSIKA - via CGC



## Distribuição para HQ CORSIKA - via IQM

- Em primeiro lugar, nós notamos que somente participam da distribuição, neutrinos que estão na direção do eixo do primário.
- Chegam em média **0.7** a **0.8** neutrinos muônicos, o número é levemente maior do que o de neutrinos eletrônicos e este número é também levemente dependente do ângulo de entrada do raio cósmico primário.

- Também é levemente dependente do modelo de hadronização que nós estamos usando (HQ CORSIKA - CGC and IQM).
- Outro importante dado é que este número é **10** vezes maior que neutrinos gerados com STD CORSIKA.
- Com estes dados nós podemos considerar um maior background para neutrinos atmosféricos.

## VI. CONCLUSÃO

- Com respeito a distribuição de energia de múons, neutrinos eletrônicos e muônicos, nós observamos para CAEs mais inclinados (**60°**) um pequeno aumento no fluxo para ambas, baixas energias ( $\approx 10^4$  GeV no nosso caso) e altas energia ( $\approx 10^8$  GeV no nosso caso).



- Para a distribuição de energia de múons, neutrinos eletrônicos e muônicos. Comparando HQ CORSIKA (via CGC e IQM) e STD CORSIKA vemos que para qualquer ângulo zenital nós temos excesso para tais partículas.
- Com respeito a distribuição angular de neutrinos eletrônicos e muônicos, vemos que a maioria de tais partículas seguem o ângulo zenital do CAE, para todos os ângulos zenitais. Não há diferença significativa entre as distribuições angulares de partículas.
- Para a distribuição angular e energética de neutrinos eletrônicos e muônicos, comprovamos que neutrinos de alta energia seguem a direção do eixo do CAE. Assim, podemos afirmar que “prompt” neutrinos têm o mesmo ângulo que seu CAE fonte.

- Aplicando um corte de energia  $1 \text{ PeV}$  para os neutrinos. Nós notamos que somente participam na distribuição, neutrinos que estão precisamente na direção do eixo da partícula primária.
- Alcançam o chão em média  $0.7$  à  $0.8$  neutrinos muônicos, o número é levemente mais baixo para neutrinos eletrônicos e seu número é também levemente dependente do ângulo zenital da partícula primária e também levemente do modelo de hadronização (HQ CORSIKA - CGC e IQM).
- Outro importante dado é que este número é  $10$  vezes maior que neutrinos gerados com STD CORSIKA - um aumento do background para neutrinos atmosféricos.

#### A. Futuro

- Os resultados apresentados mostram um excesso de neutrinos. Nosso objetivo é calcular o número de neutrinos de alta energia que chegam ao detector IceCub e no futuro calcular o background de neutrinos at-

## mosféricos de alta energia ...

- ... mas um cálculo definitivo requer uma análise mais ampla, que nós faremos em um trabalho futuro.

### Agradecimentos

- Agradecimentos ao apoio financeiro da Capes.

- 
- [1] Agrawal, T. K. Gaisser, P. Lipari and T. Stanev, Phys.Rev. D, 53, 1314, 1996.
- [2] G. Battistoni, A. Ferrari, P. Lipari, T. Montaruli, P. R. Sala and T. Rancati, Astropart. Phys. 12, 2000, 315.
- [3] M. Honda, T. Kajita, K. Kasahara and S. Midorikawa, Phys. Rev. D, 52, 1995, 4985
- [4] T. K. Gaisser and M. Honda, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 52, 153, 2002.
- [5] G. Battistoni, et al, *Calculation of the TeV prompt muon component in very high energy cosmic ray showers*, Astropart. Physics, 4, 351-364, 1996.
- [6] J. I. Illana, et al, Atmospheric muon and neutrino fluxes at very high energy, Astropart. Physics, 34, 663-673, 2011
- [7] Enderg, R., Hall, M. and Sarcevic, I., *Prompt neutrino fluxes from atmospheric charm*, Phys.Rev.D, 78:043005, 2008.
- [8] P. Gondolo, G. Ingelman and M. Thunnam, *Charm Production and High Energy Atmospheric Muon and Neutrino Fluxes*, Astropart. Phys. 5, 309-, 1996.
- [9] IceCub Collaboration, *First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube*, Phys. Rev. Lett. 111, 2013.
- [10] <http://icecube.wisc.edu/>
- [11] V. P. Gonçalves and D. R. Gratieri, *Estimating nonlinear QCD effects in ultrahigh energy neutrino events at IceCube*, Phys.Rev. D, 90, 2014.

- [12] Heck, D., Knapp, J., Capdevielle, J. N., Schatz, G., and Thouw, T., Report FZKA 6019 (1998), Forschungszentrum Karlsruhe, Germany.
- [13] A. Bueno and A. Gascón, *Corsika implementation of heavy quark production and propagation in Extensive Air Showers*, Computer Physics Communications, 185, 638-650, 2014.
- [14] M. Muller and V. P. Gonçalves, *Longitudinal profiles of Extensive Air Showers with inclusion of charm and bottom particles*, in submission.
- [15] A. Gascón and A. Bueno, *Charm production and identification in EAS*, Gap Note (Internal notes of Auger Collaboration), 2011-019, 2011.

