

Correlação do fluxo de múons com a pressão e a temperatura na cidade de Santo André

RENAN DE AGUIAR e MARCELO AUGUSTO LEIGUI DE OLIVEIRA.

Centro de Ciências Naturais e Humanas, Universidade Federal do ABC - UFABC

20 de Dezembro de 2017

Resumo

Os chuviros atmosféricos extensos são produzidos quando os raios cósmicos primários de alta energia interagem com os núcleos contidos na atmosfera terrestre e, por meio das informações de tais chuviros, é possível estimar a energia e a direção de chegada do raio cósmico primário que deu origem ao chuviro atmosférico extenso. Os chuviros que contêm apenas pósitrons, elétrons e raios gama são denominados de chuviros eletromagnéticos, enquanto que os chuviros hadrônicos são cascatas iniciadas por interações de hádrons com núcleos contidos na atmosfera, neste último, uma das partículas secundárias produzidas no processo são os múons. O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é o de mostrar a correlação entre o fluxo de múons da cidade de Santo André medidos por meio do conjunto de Tanques Cherenkov da Universidade Federal do ABC com a pressão e a temperatura local e, posteriormente, com a densidade atmosférica. Por meio do método do produto-momento de Pearson, concluiu-se que as contagens de múons possuíam uma correlação moderada com a pressão e densidade e uma anti-correlação moderada com a temperatura.

I. INTRODUÇÃO

Em 1912, Hess determinou que uma fração da radioatividade natural era de origem extraterrestre, originando o conceito de raios cósmicos, sendo estes distinguíveis das demais radiações devido a sua alta energia [1]. Quando raios cósmicos primários com energia maior do que, aproximadamente, 10^6 GeV interagem com os núcleos contidos na atmosfera terrestre ocorre a formação de chuviros atmosféricos extensos. [1, 2, 3]

A descoberta destes chuviros foi feita no final da década de 1930 por Pierre Auger e seus colaboradores [3]. Os chuviros são compostos por: fótons, elétrons, pósitrons, múons, neutrinos, entre outros, sendo que, todos componentes viajam, aproximadamente, na mesma direção dos raios cósmicos primários com velocidade próxima à da luz [1].

Os chuviros que contêm apenas pósitrons, elétrons e raios gama são denominados de chuviros eletromagnéticos. Uma forma de descrever os chuviros eletromagnéticos de modo simplificado é através do modelo de Heitler. Neste modelo, a evolução da cascata eletromagnética é descrita como uma árvore binária perfeita, onde um elétron inicial interage com a atmosfera após passar por determinados 'degraus' e produz duas novas partículas, cada uma com metade da energia da partícula inicial, sendo que o

restante da energia é perdida via emissão bremsstrahlung. [1]

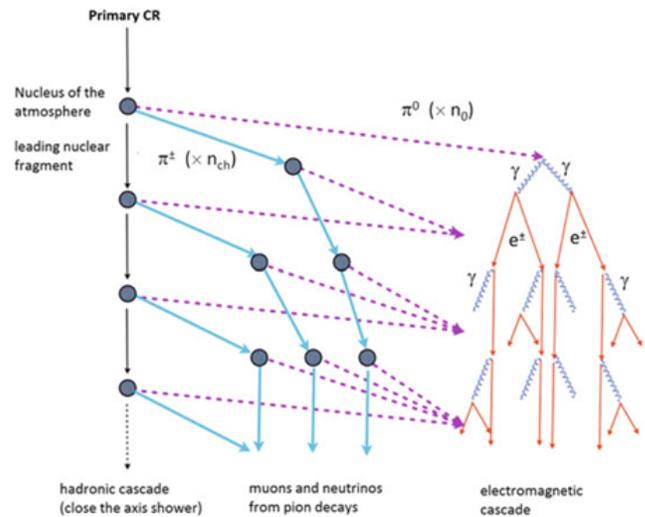


Figura 1: Modelo de evolução da cascata hadrônica [3].

Por outro lado, os chuviros hadrônicos são cascatas iniciadas por interações de hádrons com núcleos. Na primeira interação, cerca de metade da energia dos núcleos é transferida aos mésons secundários, como píons carre-

gados ou neutros, por exemplo. O restante da energia é acumulada em núcleos secundários, os quais, podem interagir novamente produzindo uma segunda geração de mésons. Já os mésons secundários interagem entre si, formando uma cascata de hádrons secundária. Tal processo está ilustrado na Figura 1. [3]

O modo com que cascatas hadrônicas se desenvolvem depende da interação ou decaimento dos píons carregados, pois devido ao longo caminho de decaimento eles podem tanto interagir como decair. Assim, píons carregados com altas energias, devido a dilatação do tempo, tendem a interagir, enquanto que os de baixa energia decaem em múons e neutrinos muônicos. [3]

Outro fator que pode estar relacionado ao desenvolvimento das cascatas secundárias é a quantidade de matéria acima de cada camada atmosférica que interage com os raios cósmicos, pois isto pode afetar na quantidade de interações ocorridas. [1]

Considerando o ar como um gás ideal, através dos princípios da termodinâmica é possível demonstrar que a densidade do ar é uma função da pressão e da temperatura local. Como os chuueiros são processos que ocorrem ao longo da atmosfera, para o estudo da densidade atmosférica em determinada altitude é necessário compreender o comportamento das variáveis pressão e temperatura na altitude em que as medições forem realizadas.

No caso da pressão atmosférica, há uma queda exponencial com o aumento da altitude. Porém tal característica não é observável para a temperatura. Na troposfera (0-14.5 km), há um decaimento da temperatura em torno de $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ com o aumento da altitude. Porém na estratosfera (14.5-50 km), a temperatura mantém-se constante até cerca de 20 km, entre 20-30 km há um aumento linear da temperatura de acordo com o aumento da altitude, chegando a temperaturas próximas de -42°C , na faixa restante, ainda há uma aumento linear, porém, maior, no qual a temperatura atinge valores em torno de -3°C na região dos 50 km. Acima da estratosfera, encontra-se a mesosfera (50-85 km), onde a temperatura permanece constante nos primeiros 5 km e entre 55-60 km, aproximadamente, a temperatura chega a diminuir em cerca de 20°C , posteriormente, a queda é mais brusca, chegando a atingir um mínimo de, aproximadamente, -93.15°C em 85 km. Por fim, na termosfera (85-600 km), devido a absorção da radiação solar, a temperatura volta a aumentar linearmente com o aumento da temperatura a contar da faixa dos 90 km, pois antes ela mantém-se constante. [4, 5]

Em geral, os experimentos que buscam estudar os raios

cósmicos de alta energia são realizados na troposfera e são feitos a fim de caracterizar os chuueiros atmosféricos extensos [3, 6]. Uma maneira de se coletar dados é por meio de experimentos de detecção indireta, os quais procuram por coincidências de sinais a partir de contadores instalados no solo a uma mesma distância entre si [3, 1].

Um exemplo de experimento de detecção indireta envolve a utilização de Tanques Cherenkov, como os utilizados nos experimentos de raios cósmicos do Observatório Pierre Auger, onde mais de 1600 tanques cobrem uma área de aproximadamente 3000 km^2 [6]. Nestes tanques, são feitas amostragens da densidade e do tempo de disparo dos sinais destes detectores, obtidos a partir da luz Cherenkov que é gerada na água pelas passagens de partículas ultrarrelativísticas carregadas (principalmente múons). É possível, então, inferir-se a energia e a direção de chegada do raio cósmico primário que deu origem ao chuueiro atmosférico extenso.

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, foi feito o uso dos dados do arranjo de tanques Cherenkov da Universidade Federal do ABC (UFABC), o LIDRAE (Laboratório para Instrumentação de Detectores de Radiações de Altas Energias) [8], para monitorar o fluxo de múons na cidade de Santo André. Ademais, foram realizadas as reconstruções dos dados a fim de correlacionar as contagens de sinais com os valores de pressão e temperatura locais e, com tais dados, foi analisado a hipótese de que com o aumento da densidade atmosférica, aumenta-se a quantidade de partículas detectadas.

II. METODOLOGIA

Durante o período de uma semana, foram realizadas as contagens a respeito do fluxo de múons por meio de um conjunto de três tanques Cherenkov. Ao mesmo tempo, foram coletadas informações sobre a temperatura e pressão barométrica, por meio de um Arduíno Uno [9] junto a um sensor digital, BPM085 [10].

O LIDRAE é composto por três tanques de água-Cherenkov preenchidos com 1000 litros de águas e enterrados em um arranjo triangular no jardim da UFABC. Cada tanque foi equipado com um fotomultiplicador de 8" de diâmetro, Hamamatsu R5912 [11], e foram ligados a uma central de aquisição de dados, localizada no centro do arranjo triangular por cabos de alta tensão e de sinais no subsolo. Os sinais gerados nos detectores dos tanques são amplificados e filtrados por um módulo discriminador sensível a corrente (dsc), o pulso resultante é, então,

enviado a uma caixa lógica que buscará por coincidências triplas. Um conversor tempo para digital (TDC) é iniciado pelo sinal de tripla coincidência que também é utilizado como porta de um conversor carga-digital (QDC), além de ser realizado as contagens deste sinal. Para parar o TDC, os sinais discriminados de cada detector são empregados, ademais, no QDC, os sinais analógicos de cada detector são integrados. Por fim, um discriminador de sinais de saída em cada canal é empregado para contar a taxa de disparo de cada detector a cada 10 s. [12]

A Figura 2 ilustra o processo descrito para a aquisição dos dados no LIDRAE.

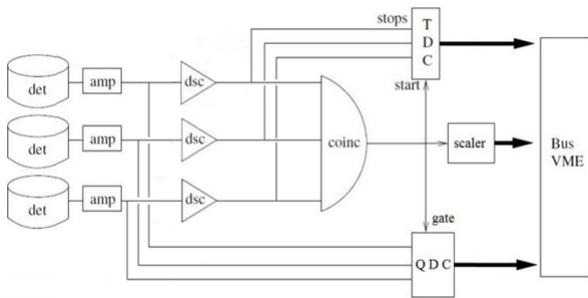


Figura 2: Diagrama de blocos da aquisição de dados do LIDRAE [12].

Assim, do LIDRAE extraíram-se informações sobre as contagens de coincidências com relação ao tempo, e, a fim de análise, foram determinadas as médias das contagens de coincidências por minuto.

Já o conjunto Arduino e módulo BPM085 foi configurado de acordo com o esquema ilustrado pela Figura 3 e instalado junto ao computador da central de aquisição de dados do LIDRAE em um local protegido do sol e de intempéries.

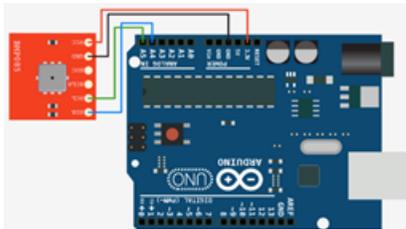


Figura 3: Modelo esquemático do conjunto Arduino e módulo BPM085 [13].

O Software Arduino (IDE) [14] foi utilizado para converter os sinais gerados pelo conjunto Arduino e módulo BPM085 em informações sobre a pressão e temperatura e a

rotina foi adequada para calcular a média destas grandezas por minuto. Posteriormente, foi elaborado um script em linguagem C para produzir um arquivo por dia com os dados gerados pelo arduíno junto ao horário indicado no computador.

Com o arquivo produzido pelo LIDRAE e o gerado pelo Arduino, foi escrito uma rotina em Python para unir os dois arquivos em apenas um, por meio de uma função do tipo *left join*, cujo parâmetro de referência era o horário do arquivo com as contagens dos tanques. E, por fim, os cálculos e os gráficos foram feitos por meio de um script escrito na linguagem R.

As correlações entre as contagens de múons com a temperatura e a pressão foram calculadas a partir do método do produto-momento de Pearson [7].

Este método mostra o grau com que duas variáveis (x,y) estão associadas linearmente e o coeficiente de correlação (ρ) é dado segundo a Equação 1.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (1)$$

Os possíveis resultados de ρ encontram-se no intervalo de -1 e 1. Quando o ρ resulta em 1 ou -1, é dito que as variáveis possuem correlação e anti-correlação perfeita, respectivamente. Caso o coeficiente resulte em 0, então não há correlação entre os elementos analisados. Os demais casos são:

- $|\rho| > 0.7$ a correlação, ou anti-correlação, é denominada forte;
- $0.3 \leq |\rho| \leq 0.7$ indica correlação, ou anti-correlação, moderada;
- $|\rho| < 0.3$ a correlação ou anti-correlação é dita fraca.

Além do mais, foi calculado a correlação entre a densidade atmosférica local com o fluxo de partículas. A estimativa da densidade local, d , do ar atmosférico foi feito aproximando-o a um gás ideal, no qual, pela termodinâmica, é descrito de acordo com a Equação 2.

$$d = \frac{Mp}{kT}, \quad (2)$$

no qual p, T, k e M representam a pressão, temperatura, constante de Boltzman e massa molecular média da atmosfera, respectivamente. Como a atmosfera terrestre é composta por, aproximadamente 78% de nitrogênio e 21% de oxigênio e, a maioria das moléculas são diatômicas, logo, $M \approx 4.8 \times 10^{-23}$ g [1].

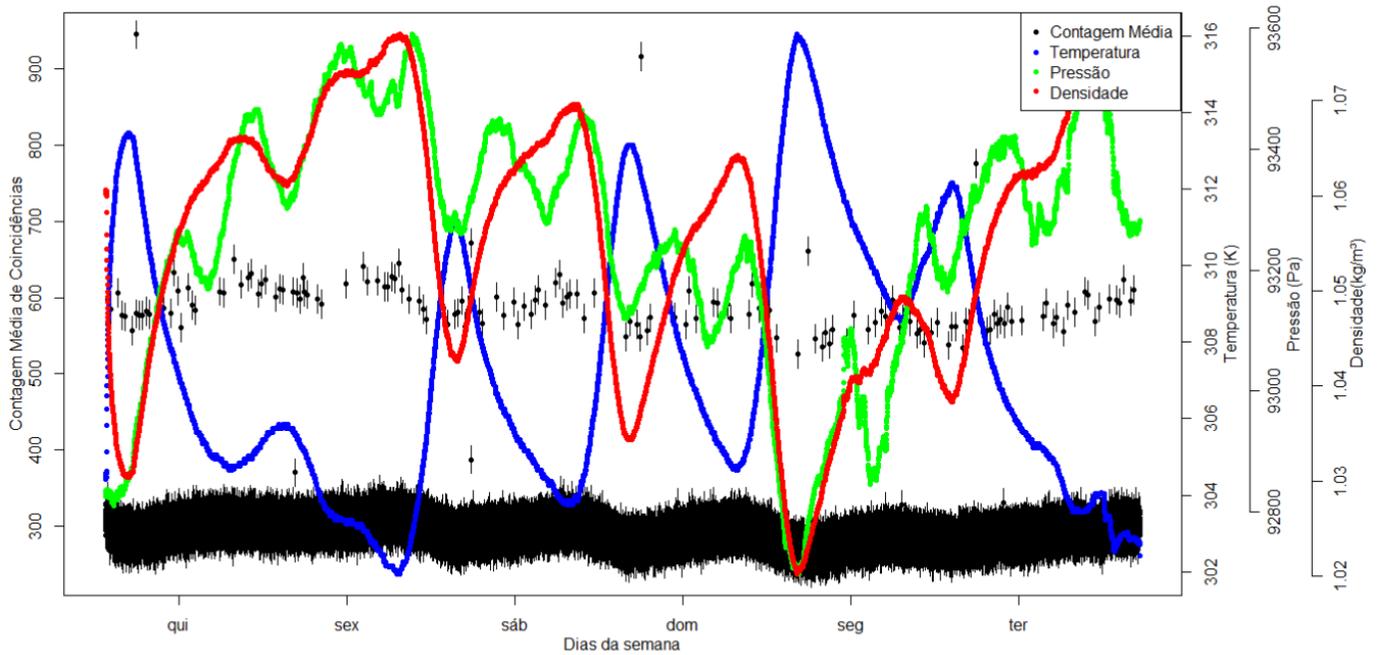


Figura 4: Contagens, Temperatura, Pressão e Densidade Atmosférica local entre 09/08/2017 e 15/08/2017.

III. ANÁLISE DOS DADOS

Na Figura 4, estão ilustrados os dados reconstruídos da contagem média de múons a partir das medições do LIDRAE, além da temperatura, pressão local e densidade atmosférica calculada de acordo com a Equação 2. Tais informações são referentes a um período de 7 dias que se iniciou às 13:36 do dia 09/08/2017 e findou-se às 17:14 em 15/09/2017.

A contagem média de múons no local onde realizou-se o experimento foi de 293.4 ± 0.7 , tal valor encontra-se na região mais densa do gráfico de dispersão, como mostrado pelas Figura 4. Além do mais, nesta figura, também há um agrupamento de dados, menos denso do que o anterior, nas proximidades de 600 contagens. A região mais densa indica os eventos de menor energia, que são mais frequentes, enquanto que a região menos densa está relacionada aos eventos de maior energia que são mais raros em comparação ao anterior.

Adicionalmente, verificou-se que a temperatura local variou foi cerca de 12 K, durante a semana em que as informações foram obtidas, enquanto que a variação da pressão foi de 900 Pa. Ou seja, a grandeza que mais influenciou na variação da densidade no período estudado foi a temperatura.

Visualmente, de acordo com a Figura 4, as oscilações da temperatura e da contagem de múons não apresentaram semelhanças, ou seja, o aumento da temperatura não era acompanhado pelo aumento na quantidade de partículas detectadas. No caso, em alguns períodos há indícios de uma relação inversamente proporcional destas variáveis como é observado, por exemplo, no período entre domingo e segunda-feira. Entretanto, a forma com que a pressão atmosférica local, assim como a densidade atmosférica, variaram em relação as contagens sugere uma associação proporcional entre tais variáveis, porque em alguns períodos o aumento de uma variável é seguido pelo aumento da outra, assim como as quedas, como ilustrado na Figura 4.

Os resultados obtidos através do método do produto-momento de Pearson junto a sua interpretação foram dados pela Tabela 1.

Tabela 1: Correlação entre a contagem e as grandezas analisadas.

| | ρ | Grau de correlação |
|-------------|------------|--------------------------|
| Temperatura | -0.4071083 | Anti-correlação moderada |
| Pressão | 0.3121681 | Correlação moderada |
| Densidade | 0.403656 | Correlação moderada |

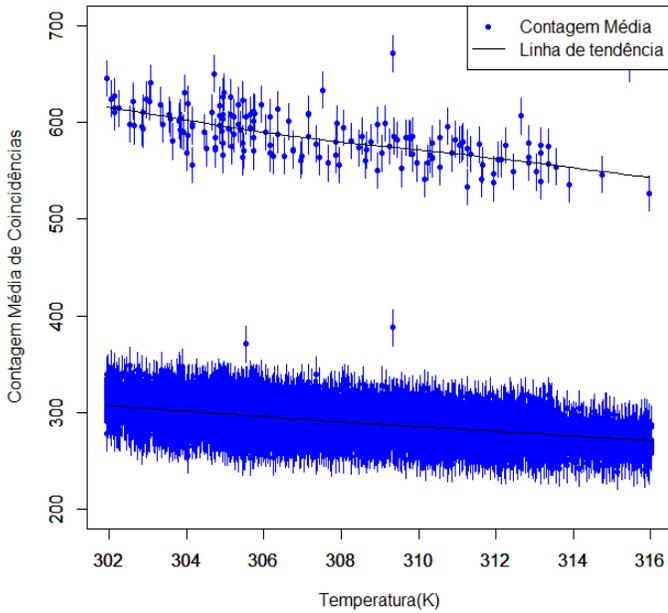


Figura 5: Contagens em função da temperatura.

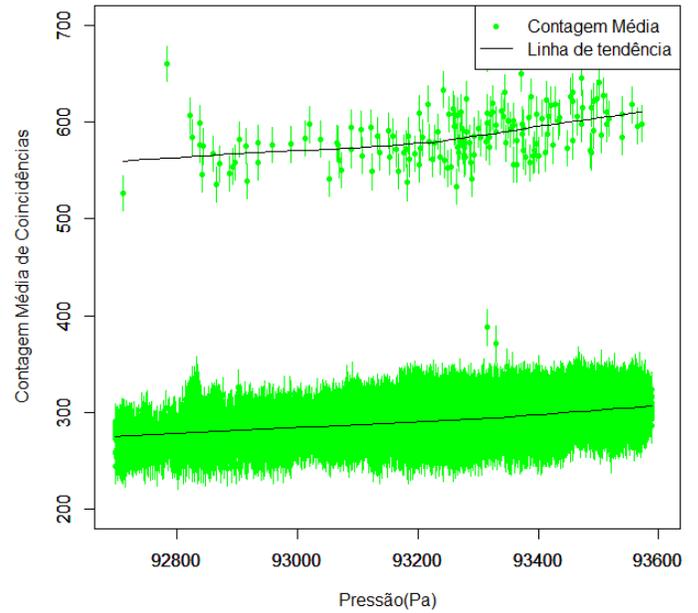


Figura 6: Contagens em função da pressão.

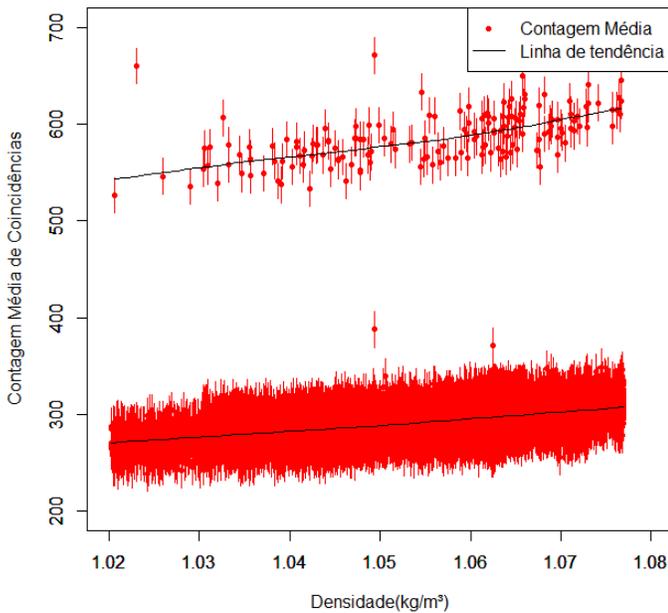


Figura 7: Contagens em função da densidade atmosférica.

Porém, uma limitação que o método do produto-momento de Pearson apresentou foi que ele não distinguia os eventos de baixa com os de alta energia. Na utilização deste método, uma média de todos os dados é calculada e são determinadas as variâncias a partir de tal valor. Como

já mencionado, a média das contagens calculadas foi de 293.4 ± 0.7 . Assim, ao varrer os dados, em determinado instante, o valor das contagens aumentava bruscamente - aumentando a variância - devido a identificação de um evento mais energético, e este aumento não era seguido, necessariamente, por um incremento na pressão ou decréscimo da temperatura. A razão disto é que a energia destes eventos não está relacionada às propriedades da atmosfera terrestre, e sim à natureza dos raios cósmicos primários que os geraram. O resultado desta limitação é um valor menor do que esperado para a correlação.

A estratégia tomada, então, foi a de calcular, separadamente, as correlações para a faixa de eventos mais comuns (até 400 contagens) e para a faixa de eventos mais raras (entre 500 e 700 contagens). Os resultados destas correlações podem ser conferidos nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Correlação de contagens para as grandezas analisadas em eventos de baixa energia.

| | ρ | Grau de correlação |
|-------------|------------|--------------------------|
| Temperatura | -0.6313528 | Anti-correlação moderada |
| Pressão | 0.4828127 | Correlação moderada |
| Densidade | 0.6257909 | Correlação moderada |

Tabela 3: Correlação de contagens para as grandezas analisadas em eventos de alta energia.

| | ρ | Grau de correlação |
|-------------|------------|--------------------------|
| Temperatura | -0.5763169 | Anti-correlação moderada |
| Pressão | 0.4112364 | Correlação moderada |
| Densidade | 0.5693794 | Correlação moderada |

Além do mais, para uma melhor visualização da relação entre as contagens com as grandezas analisadas, foram plotados os gráficos das contagens em função da temperatura, pressão e densidade, como indicado nas Figuras 6, 5 e 7.

Nestes gráficos são observados que, assim como na Figura 4, existe uma discretização dos dados em duas regiões de contagens: uma mais densa e outra menos. Também observa-se que estas regiões não são funções lineares, mas, sim, dispersões com tendência de crescimento, aproximadamente, linear com o aumento da densidade e da pressão, mas que possuem uma tendência, aproximadamente, linear negativa com relação a temperatura. Para elucidar tal ideia, foram traçadas as linhas de tendência citada, como pode ser observado nas Figuras 5, 6 e 7.

IV. CONCLUSÃO

A partir da Figura 4 foi possível inferir que havia uma relação entre as variáveis analisadas, sendo que, provavelmente, existia uma relação proporcional entre a pressão e a densidade com as contagens feitas pelo conjunto de tanques Cherenkov e inversamente proporcional entre a temperatura e as contagens.

O principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso era o de calcular a correlação entre o fluxo de múons na cidade de Santo André com a temperatura e a pressão. O valor de ρ , -0.4071083 e 0.3121681, para a temperatura e pressão, respectivamente, indicaram uma correlação negativa e uma relação linear moderada para fraca entre estas variáveis com as contagens de múons, comportando-se, assim, de maneira oposta.

Porém, ao se considerar a discretização, determinou-se que o coeficiente de correlação da região mais densa da Figura 4 para a temperatura e pressão eram iguais a -0.6313528 e 0.4828127, respectivamente, e iguais a -0.5763169 e 0.4112364 para a região menos densa. Apesar das correlações e a anti-correlações ainda estarem na faixa considerada moderada, nota-se um aumento considerável, principalmente, nos módulos dos coeficientes relacionados a temperatura, o que os deixaram mais próximos do

intervalo da anti-correlação forte.

É importante ressaltar, porém, que os resultados encontrados não indicam causa e efeito, mas eles dão indícios sobre de que maneira a pressão e a temperatura afetam no fluxo de múons. Para complementar esta análise foram confeccionados os gráficos das contagens em função da temperatura e pressão, Figuras 5 e 6. Por meio destas, não é possível concluir que tipo de função as contagens são da temperatura e pressão, porém, pode-se notar que o ponto médio da faixa dos eventos mais e menos frequentes possuem uma tendência de crescimento linear no gráfico da Figura 6 e de decréscimo na Figura 5.

Uma suposição sobre a maneira com que as grandezas estudadas afetam na contagem de múons seria que as variações na temperatura e pressão local alterariam a densidade atmosférica da região e esta poderia estar relacionada à variação de partículas produzidas por afetar na quantidade de interações entre os componentes oriundos dos chuviscos atmosféricos com as moléculas que compõem atmosfera. Assim, optou-se por calcular a densidade do ar aproximando-o a um gás ideal para determinar, também, a correlação entre a densidade com o fluxo de múons.

Intuitivamente, espera-se que quanto maior a concentração de moléculas em determinado volume, mais interações devam ocorrer. Com isso, haveria uma relação proporcional entre a densidade atmosférica local e a quantidade de partículas secundárias na região. *A priori*, o resultado obtido para a correlação entre tais variáveis indica que havia uma associação linear de moderada para baixa entre elas, pois o coeficiente de correlação calculado foi igual a 0.403656. Por outro lado, ao se analisar os eventos de alta e baixa energia separadamente, encontrou-se graus de correlação iguais a 0.5693794 e 0.6257909, implicando em correlações moderadas mais próximas do intervalo que define a correlação como sendo forte do que fraca.

Assim, foi possível constatar a relação esperada entre a densidade e a contagem de múons, porém existem alguns fatores e causas que podem indicar o porquê do valor obtido para o coeficiente de Pearson não ter sido maior. Primeiramente, vale destacar que, como mostrado pela Figura 7, ao se plotar as contagens como uma função da densidade, não foi obtido uma função de primeiro grau, mas sim duas regiões discretizadas com flutuações as quais possuíam tendência de crescimento próximo ao linear. Além do mais, também é necessário considerar o aumento da opacidade da atmosfera à passagem dos chu-

veiros com o aumento da densidade, o que pode indicar a existência de um limite para o crescimento proporcional entre as contagens com a densidade.

Além disso, é necessário considerar as incertezas provocadas pela instrumentação, pois, há a possibilidade de que o módulo BMP085 não fosse sensível o suficiente para medir as flutuações na temperatura e pressão de maneira precisa. O ideal seria que o experimento fosse repetido em diferentes condições climáticas junto a um outro aparelho capaz de medir as oscilações da temperatura e pressão, a fim de se comparar e confirmar as medições realizadas.

Em suma, foi demonstrado que o fluxo de múons apresenta uma correlação moderada com os dados coletados para a pressão local e densidade, e apresenta uma anticorrelação moderada se comparado com a temperatura. Estes resultados constataram a relação esperada de acordo com a hipótese estudada, mas não são conclusivos para indicar causa e efeito.

REFERÊNCIAS

- [1] SPURIO, M. *Particles and Astrophysics*. [S.l.]: SPRINGER, 2016.
- [2] GREISEN, K. Cosmic Ray Showers. *Annual Review of Nuclear Science*, v. 101, n. 1, p. 63-108, 1960.
- [3] STANEV, T. *High Energy Cosmic Rays*. 2. ed. [s.l.] Springer, 2010.
- [4] WALLACE, J.; HOBBS, P. *Atmospheric science: an introductory survey*. Canada: Elsevier, 2005.
- [5] Earth's Atmospheric Layers. Disponível em: https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/atmosphere-layers2.html. Acesso em: 20 set. 2017.
- [6] ZAVRTANIK, D. Results from the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, v. 630, n. 1, p. 166-170, 2011.
- [7] MANN, P. *Introductory Statistics*. [S.L.]: John Wiley & Sons, 2017.
- [8] M. A. LEIGUI DE OLIVEIRA, Instrumentação de um Laboratório de Altas Energias e Análise de Dados do Observatório Pierre Auger, FAPESP (Grant Number 2008/00879-4).
- [9] Arduino Uno Rev3. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Acesso em: 17 dez. 2017.
- [10] BMP085 Digital pressure sensor datasheet. Disponível em: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BMP085_DataSheet_Rev.1.0_01July2008.pdf. Acesso em: 9 dez. 2017.
- [11] Hamamatsu Photonics. Disponível em: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/LARGE_AREA_PMT_TPMH1286E.pdf. Acesso em: 9 dez. 2017.
- [12] M. A. Leigui de Oliveira. The LIDRAE water-Cherenkov air shower array.
- [13] Figura disponível em: <http://bildr.org/2011/06/bmp085-arduino/>. Acesso em: 14 dez. 2017.
- [14] Arduino - Software. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. Acesso em: 14 dez. 2017.