

# **Relatório Final**

## **DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DE CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS INDUZIDOS POR RAIOS CÓSMICOS E DETECTADOS NO OBSERVATÓRIO PIERRE AUGER**

**Aluna: Yasmin Matos Amado**

**yasmin\_amado & hotmail.com**

**Orientadora: Profa. Carola Dobrigkeit**

**carola & ifi.unicamp.br**

**10 de junho de 2013**



### **RESUMO**

Por meio deste projeto de iniciação científica foi possível analisar alguns chuviros atmosféricos detectados no Observatório Pierre Auger a partir dos sinais que as partículas do chuviro deixam nos detectores de superfície do Observatório. A análise é feita a partir de dados de chuviros detectados pelo Observatório Auger disponíveis na sua página pública. Primeiramente foi possível determinar o centro de incidência de alguns chuviros. Os resultados obtidos foram satisfatórios com erros relativos inferiores a 1%. Entretanto, o principal objetivo é determinar a direção de incidência do raio cósmico que deu origem ao chuviro. Essa reconstrução envolve aproximar a frente de partículas descendo ao solo com

velocidade da luz por um plano, e, impondo uma condição de mínimos, encontrar a direção da normal ao plano. Por hipótese, a direção normal ao plano corresponde à direção de incidência do raio cósmico.

## **DETECTANDO OS CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS NO OBSERVATÓRIO PIERRE AUGER**

Os raios cósmicos são partículas que chegam à Terra vindas do cosmos com altas energias e origens muito diversas. Quando uma dessas partículas se choca com um núcleo atômico presente na atmosfera, parte da energia é transformada em massa, ou seja, em novas partículas, com energias menores. Essas novas partículas, por sua vez, podem interagir com outros núcleos em efeito cascata, formando o assim chamado chuva atmosférica extenso. Para uma partícula primária de alta energia, uma enorme quantidade de partículas é detectada no solo.

O Observatório Pierre Auger (OPA) permite estudar as partículas da radiação cósmica com energia ultra-altas, em torno e acima de  $10^{18}$  eV [1]. Esses raios cósmicos são muito raros, e seu fluxo médio é de três partículas por  $\text{km}^2$  por ano. Por essa razão, o OPA cobre uma área total de  $3000 \text{ km}^2$ .

O Observatório Auger caracteriza-se por ser híbrido, ou seja, ter dois tipos de detectores: telescópios de fluorescência e detectores de superfície, que se complementam. Neste projeto são utilizados somente dados dos detectores de superfície.

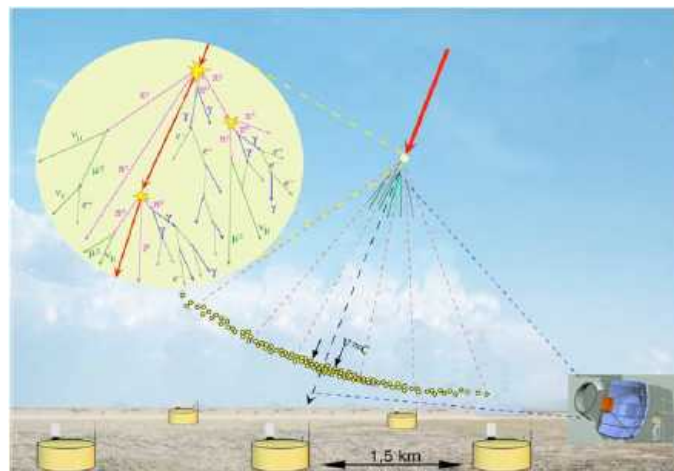


Figura 1. Esquema de uma frente de um chuva de partículas chegando aos detectores de superfície [2].

Para detectar a chegada de chuvas atmosféricas na superfície terrestre, são utilizadas 1600 estações separadas por 1500 m, em um arranjo triangular. Cada estação consiste de um tanque em polietileno, medindo 3,6 m de diâmetro e 1,6 m de altura, com capacidade para armazenar 12.000 litros de água com alto grau de pureza [3]. Os tanques são instrumentados com três sensores fotomultiplicadores instalados na parte interna e mergulhados na água. Quando as partículas carregadas de um chuva chegam ao solo, atravessam a água dos tanques com velocidades próximas à velocidade da luz. Algumas delas terão velocidades maiores do que a velocidade da luz na água e causarão a emissão de radiação ultravioleta. Esse efeito é chamado de emissão de luz Cherenkov, e foi descoberto em 1934 pelo soviético

Pavel Cherenkov. Os sensores fotomultiplicadores das estações medem e convertem essa radiação em sinais elétricos, que são instantaneamente enviados para a central de aquisição de dados.

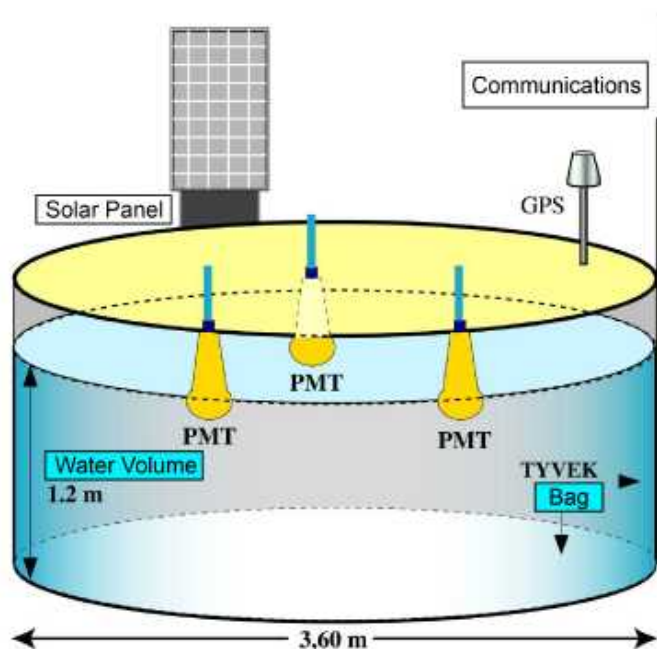


Figura 2 - Representação esquemática de uma estação do OPA [3].

A partir do valor encontrado para a intensidade dos sinais medidos nas estações e de suas localizações, é possível determinar o centro do chuveiro, que corresponde ao ponto no solo que o raio cósmico primário teria atingido se não tivesse dado origem ao chuveiro atmosférico.

## DETERMINAÇÃO DO CENTRO DE UM CHUVEIRO ATMOSFÉRICO

Para esse projeto foram utilizados os dados públicos de eventos do OPA, que podem ser obtidos na página do Observatório Auger [4]. Cada chuveiro é identificado por um número e é apresentado da seguinte maneira:

auger\_public\_event\_000011966500, tal que 000011966500 é o número referente a este evento.

Cada evento é descrito pelos seguintes parâmetros:

1. Número de identificação das estações que deram sinal (#Id);
2. Intensidades do sinal medido por cada estação;
3. Tempos em que os sinais em cada estação foram registrados;
4. Coordenadas em que as estações que mediram o sinal estão localizadas.

### 1. NÚMERO DA ESTAÇÃO

Cada estação no OPA tem um número de identificação o qual é definido de acordo com a posição no observatório. É identificada como #Id.

## 2. INTENSIDADE DO SINAL RECEBIDO

A intensidade do sinal é medida em uma unidade chamada VEM, ou seja, *vertical equivalent muon*. Esta unidade corresponde à intensidade do sinal que um múon deixa ao atravessar a estação verticalmente pelo seu centro. É identificada como Signal (VEM).

## 3. TEMPO EM QUE O SINAL FOI DETERMINADO

Cada estação tem um aparelho de GPS que marca a hora exata em tempo UNIX em que o sinal foi obtido por cada estação. Esses valores de tempo serão usados para determinar a direção do chuveiro atmosférico. É possível identificar o tempo em segundos e em nano segundos.

## 4. COORDENADAS

As coordenadas utilizadas no OPA são as coordenadas de Mercator, também conhecidas como UTM, Universal Transversa de Mercator, a qual é a projeção da superfície da esfera terrestre em um cilindro tangente ao meridiano central. As distorções aumentam a partir do meridiano central, tanto em escala e distância, como em direção e área. O sistema UTM resulta na composição de 60 fusos distintos, com amplitude de 6° de longitude, representados na superfície da Terra conforme a figura 2. A projeção é então dividida em retângulos identificados por uma letra e um número. O OPA está localizado no retângulo H19.

A posição sobre a Terra é dada por uma combinação de coordenadas, o *easting* e o *northing*. O *easting* é a coordenada referente a leste/oeste. Para evitar trabalhar com números negativos, adota-se uma linha vertical que passa pelo centro do retângulo, para a qual se define o valor de 500000 metros. Ou seja, um retângulo pode ter coordenadas de *easting* de 167000 m a 833000 m. Se o valor for menor que 500000, a coordenada está localizada a oeste do centro do retângulo, e se o valor for maior, está a leste. Já para o *northing* no hemisfério sul é adotado o valor de 10000000 m no equador e diminui conforme se aproxima do sul, portanto todos os valores de *northing* obtidos serão menores que 10000000 m.

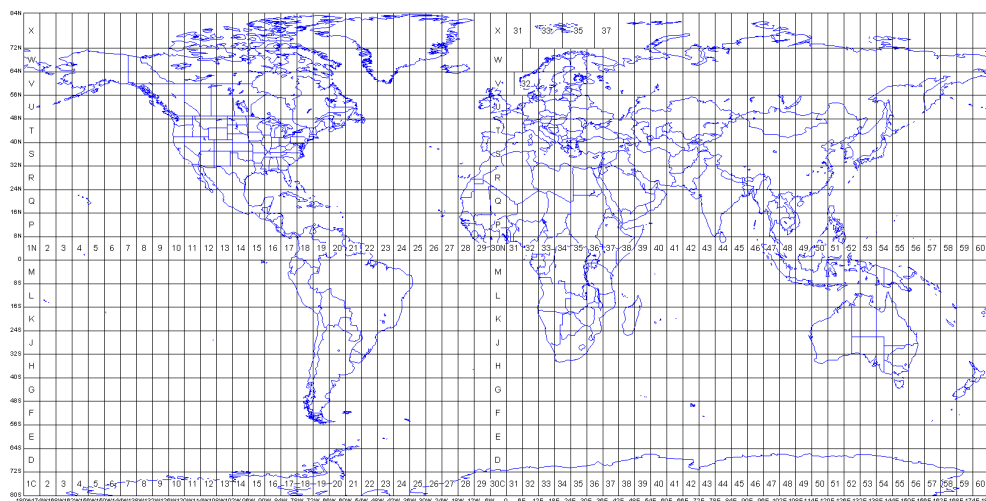


Figura 3 – Projeção de Mercator.

Os valores de altitude são os valores reais em relação ao nível do mar em que cada estação está localizada. Esses valores são muito próximos a ponto de, em uma primeira abordagem, serem descartados nas análises, e se supõe que todas as estações estão na mesma altitude.

Para determinar as coordenadas do centro do chuveiro atmosférico são necessárias algumas considerações. Como já dito anteriormente, supõe-se que todas as estações estão na mesma altitude, e também que o ângulo zenital, o ângulo entre o eixo do chuveiro atmosférico e o zênite local, é aproximadamente zero, ou seja, que o chuveiro atmosférico chega verticalmente. O centro do chuveiro atmosférico é chamado de *core* e tem coordenadas em *easting* e *northing*. Para a determinação quantitativa das coordenadas do centro é utilizada uma equação semelhante à equação para o cálculo do centro de massa de um sistema, na qual se soma o produto de todas as intensidades (massas) com suas respectivas coordenadas e se divide pela soma das intensidades (massas).

Para facilitar os cálculos, é feita uma normalização dos valores das coordenadas, ou seja, toma-se o menor valor da coordenada como zero e em seguida subtrai-se o valor dessa coordenada padrão das outras coordenadas, a fim de calcular somente os valores correspondentes à diferença entre elas.

O método utilizado é mostrado utilizando os eventos 000011966500, 00008042100, 000010998100.

- EVENTO 000011966500 (3 estações com sinal)

Dados obtidos pelo OPA:

#Id	Signal(VEM)	Time(sec)	Time(ns)	Easting(m)	Northing(m)	Altitude(m)
351	10.36	1308400072	98973360	476128.06	6073663.02	1367.93
349	6.87	1308400072	98976831	474651.33	6073709.12	1368.52
358	4.36	1308400072	98973968	475377.13	6074955.81	1369.02

A coordenada de referência é o menor valor do easting, nesse caso, 474651.33m, por isso esse valor é tido como zero e as outras coordenadas são referenciadas a elas. O mesmo ocorre para o menor valor de northing que é 6073663.02. Os valores relativos estão dispostos abaixo:

#Id	Intensidade(VEM)	Time(sec)	Time(ns)	Easting(m)	Northing(m)	Altitude(m)
351	10.36	1308400072	98973360	1476.73	0	0
349	6.87	1308400072	98976831	0	46.1	0
358	4.36	1308400072	98973968	725.8	1292.79	0

$$\text{CoreEasting}' = [I_1.E_1 + I_2.E_2 + I_3.E_3] / (I_1 + I_2 + I_3) = 855,5797\text{m}$$

$$\text{CoreNorthing}' = [I_1.N_1 + I_2.N_2 + I_3.N_3] / (I_1 + I_2 + I_3) = 275,8485\text{m}$$

Os valores acima correspondem aos valores relativos das coordenadas (easting, northing) do centro desse chuveiro. Para determinar as coordenadas reais finais é

necessário somar os valores (easting, northing) das coordenadas de referência. Obteve-se então:

CoreEasting = 475506,91m                      CoreNorthing = 6073938,87m

Os valores determinados pelo OPA foram os seguintes:

OPA-CoreEasting = (475580±47)m      OPA-CoreNorthing = (6074094±110)m

Obteve-se, portanto um erro relativo de:

Erro Relativo CoreEasting = 0,015%      Erro Relativo CoreNorthing = 0,0003%

Analisando os erros encontrados, foi possível determinar com boa precisão o core do evento. Isso mostra que a metodologia usada é muito boa para o procedimento. Portanto:

	CoreEasting (m)	CoreNorthing (m)
Obtido	475506,91	6073938,87
OPA	475580	6074094
ErroRelativo	0,015%	0,0003%

- EVENTO 00008042100 (7 estações com sinal)

Utilizando a mesma metodologia do evento anterior, foram feitas tabelas no software Excel para facilitar as contas de um evento constatado em mais estações.

Signal(VE M)	Easting(m)	Northing(m)	Eastin g'	Northin g'	SomaEasti ng	SomaNorthi ng	Soma l
3927,3	480628,13	6086648,24	2243,57	1304,25	9114528,298	5403258,248	4084,03
76,23	479879,11	6087947,59	1494,55	2603,6			
32,4	479877,51	6085343,99	1492,95	0	Core Easting'	Core Northing'	
22,56	481377,62	6087946,35	2993,06	2602,36	2231,748616	1323,021194	
10,96	482127,55	6086642,45	3742,99	1298,46			
10,86	481377,94	6085344,54	2993,38	0,55	Core Easting	Core Northing	
3,72	478384,56	6087940,35	0	2596,36	480616,3086	6086667,011	

Portanto, os valores obtidos foram:

	CoreEasting (m)	CoreNorthing (m)
Obtido	480616,31	6086667,11
OPA	480315	6086814
ErroRelativo	0,063%	0,0002%

Novamente, os erros indicam uma boa aproximação do resultado obtido pelo OPA comparado com o resultado obtido pela metodologia utilizada.

- EVENTO 000010998100 (9 estações com sinal)

Signal(VE M)	Easting(m)	Northing(m)	Eastin g'	Northing '	Soma Easting	Soma Northing	Soma l
2517,46	467881,95	6116530,25	2337,54	2610,78	6331821,207	6896002,549	2701
79,9	468639,74	6115238,17	3095,33	1318,7			
40,15	467101,1	6115201,08	1556,69	1281,61	Core Easting'	Core Northing'	
20,21	469383,72	6116533,94	3839,31	2614,47	2344,250725	2553,129415	
17,39	466392,68	6116539,71	848,27	2620,24			
11,57	468622,24	6117820,01	3077,83	3900,54	Core Easting	Core Northing	
5,9	467135,16	6117837,08	1590,75	3917,61	467888,6607	6116472,599	
4,95	465544,41	6115210,6	0	1291,13			
3,47	466375,54	6113919,47	831,13	0			

	CoreEasting (m)	CoreNorthing (m)
Obtido	467888,66	6116472,60
OPA	467953	6116146
ErroRelativo	0,014%	0,053%

Nesse caso os erros ainda indicam resultados muito bons, entretanto o erro relativo da coordenada northing foi maior que anteriormente. Isso pode ter ocorrido, pois o ângulo de incidência real do chuveiro atmosférico é relativamente grande a ponto de não ser possível aproximá-lo para zero.

Nos três chuveiros analisados os erros relativos encontrados são pequenos, mas ainda existem. Isso ocorre, pois na análise do OPA, a frente dos chuveiros é aproximada para uma secção cônica e não para um plano. Essa diferença causa uma mudança nas equações de modo que existem mais graus de liberdade no problema, e, portanto um valor do core diferente do encontrado.

## DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DE UM CHUVEIRO ATMOSFÉRICO

Para determinar a direção de um chuvaire atmosférico é necessário conhecer os ângulos nos quais se baseiam as análises e direções. A partir dos dados públicos do OPA, é possível aproximar a frente de partículas descendo ao solo com velocidade da luz por um plano, e, impondo uma condição de mínimos, encontrar a direção da normal ao plano. Por hipótese, a direção normal ao plano corresponde à direção de incidência do raio cósmico, que segundo a figura 4, é a direção de  $\theta$ .

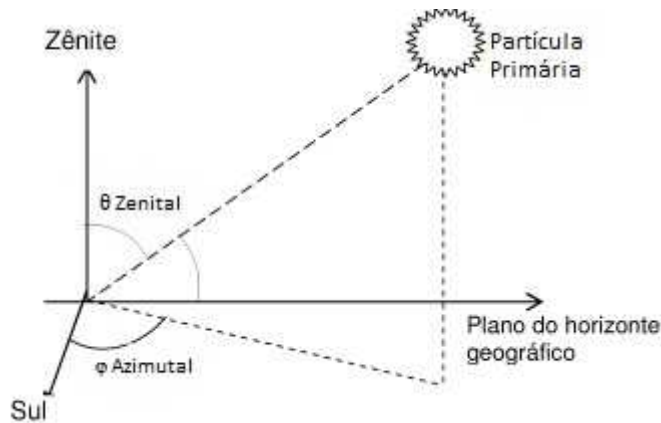


Figura 4 - Ângulos usados para a determinação da direção do chuvaire.

A equação do plano usada está na forma normal, ou seja, o plano é definido pelos ângulos entre o eixo  $x$  ( $\alpha$ ), eixo  $y$  ( $\beta$ ), eixo  $z$  ( $\gamma$ ) e pela distância entre o plano e a origem ( $d$ ) da forma:

$$x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma - d = 0 \quad (1)$$

A direção em si é determinada a partir dos cossenos diretores, de modo que a soma de seus quadrados é igual a um. Portanto conhecendo dois dos ângulos, nesse caso, o  $\alpha$  e  $\beta$ , é possível determinar o  $\gamma$  que corresponde ao ângulo zenital  $\theta$ . Para encontrar o ângulo azimutal, é feita uma análise do sinal dos valores de  $\cos \alpha$  e  $\cos \beta$ . Se ambos forem positivos, o ângulo  $\varphi$  está no primeiro quadrante, se  $\cos \alpha < 0$  e  $\cos \beta > 0$ ,  $\varphi$  está no segundo quadrante. Se  $\cos \alpha > 0$  e  $\cos \beta < 0$ ,  $\varphi$  está no terceiro quadrante, e, por fim se ambos forem negativos,  $\varphi$  está no quarto quadrante. O ângulo azimutal é determinado pelo seu arco tangente, de modo que  $\cos \beta / \cos \alpha = \sin \varphi / \cos \varphi = \tan \varphi$ .

É necessário que pelo menos três estações tenham registrado o sinal do chuvaire. A partir dos valores de Easting, Northing e do tempo em nano segundos é possível descrever um sistema de equações. O valor da altitude não é usado, pois se supõe que todas as estações estão no mesmo plano, portanto a componente  $z \cos \gamma = 0$ . O valor do tempo deve ser em nano segundos, pois como se trata de partículas as quais viajam na velocidade da luz, todos os tanques recebem o sinal no mesmo instante em segundos.

Os valores de Easting correspondem aos valores de  $x$ , os valores de Northing correspondem ao  $y$ . A distância  $d$  corresponde a um valor de uma constante  $D$  menos a distância na qual o plano desceu, portanto corresponde a  $D$  menos a



velocidade da luz vezes o tempo. A velocidade da luz utilizada nos cálculos é  $v = 0,3$  m/ns.

#### DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO PARA APENAS TRES TANQUES

Para apenas três tanques é utilizado um sistema de equações e três incógnitas.

- Evento 000011966500

#Id	Signal(VEM)	Time(sec)	Time(ns)	Easting(m)	Northing(m)	Altitude(m)
351	10.36	1308400072	98973360	476128.06	6073663.02	1367.93
349	6.87	1308400072	98976831	474651.33	6073709.12	1368.52
358	4.36	1308400072	98973968	475377.13	6074955.81	1369.02

Sistema de equações:

$$476128,06\cos\alpha + 6073663,02\cos\beta - [D - (0,3 * 98973360)] = 0$$

$$474651,33\cos\alpha + 6073709,12\cos\beta - [D - (0,3 * 98976831)]=0$$

$$475377,13\cos\alpha + 6074955,81\cos\beta - [D - (0,3 * 98973968)]=0$$

Resolvendo o sistema de equações é possível obter os valores de:

$$\cos\alpha = 0,713675687 \qquad \cos\beta = 0,273455481$$

$$\theta = 49,842^\circ \qquad \varphi = 21,0^\circ$$

Os valores encontrados pelo OPA foram:

$$\theta = (50,0 \pm 0,8)^\circ \qquad \varphi = (21,4 \pm 0,8)^\circ$$

Os erros relativos foram de 0,32% para o  $\theta$  e 1,8% para o  $\varphi$ .

- Evento 000004796100

#Id	Signal(VEM)	Time(sec)	Time(ns)	Easting(m)	Northing(m)	Altitude(m)
576	77.51	1207943023	918498875	485128.99	6091845.59	1370.84
508	38.23	1207943023	918500392	486626.74	6091847.59	1369.88
543	29.46	1207943023	918500015	485874.94	6093150.47	1401.41

Para este evento foram determinados:

$$\cos\alpha = -0,303620153 \qquad \cos\beta = -0,0885052611$$

$$\theta = 18,44^\circ \qquad \varphi = -163,75^\circ$$

Os valores encontrados pelo OPA foram:

$$\theta = (18,0 \pm 0,4)^\circ \qquad \varphi = (-161,2 \pm 1,5)^\circ$$

Os erros relativos foram de 2,4% para o  $\theta$  e 1,6% para o  $\phi$ .

- Evento 000014328700

#Id	Signal(VEM)	Time(sec)	Time(ns)	Easting(m)	Northing(m)	Altitude(m)
626	79.61	1334838249	250403688	449872	6103532	1494.55
634	54.53	1334838249	250401047	451382.25	6103540.31	1481.75
1072	26.99	1334838249	250401433	450636.46	6102244.15	1500.3

Para este evento foram determinados:

$$\cos \alpha = 0,525636189 \quad \cos \beta = -0,213830707$$

$$\theta = 34,6^\circ \quad \phi = -22,1^\circ$$

Os valores encontrados pelo OPA foram:

$$\theta = (35,4 \pm 0,3)^\circ \quad \phi = (-22,6 \pm 0,7)^\circ$$

Os erros relativos foram de 2,3% para o  $\theta$  e 2,2% para o  $\phi$ .

#### DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO PARA O CASO GERAL

Para determinar a direção de um chuveiro no caso de mais de três estações terem sido acionadas, é necessária a utilização do método dos mínimos quadrados, no qual a soma do quadrado das distâncias entre os pontos e a reta deve ser mínima. Neste caso utiliza-se a diferença entre o tempo teórico previsto e o tempo medido pelas estações.

$$R^2 = \sum (t_{\text{medido}} - t_{\text{teórico}})^2$$

Utilizando a equação do plano:  $x \cos \alpha + y \cos \beta + (D - ct) = 0$

Tem-se a equação do tempo teórico:  $t_{\text{teórico}} = (D - x \cos \alpha - y \cos \beta) / c$

Substituindo na razão tem-se:

$$R^2 = \sum (t_{\text{medido}} - (D - x_i \cos \alpha - y_i \cos \beta) / c)^2 = \sum (x_i \cos \alpha + y_i \cos \beta - D + ct_{\text{medido}})^2$$

As condições para que se tenham mínimos quadrados é que as derivadas parciais de  $R^2$  em relação à  $\cos \alpha$ ,  $\cos \beta$ , e  $D$  sejam iguais a zero.

Resolvendo as derivadas parciais e igualando a zero, tem-se um sistema de três equações com três incógnitas:

$$\sum (x_i^2 \cos \alpha + y_i x_i \cos \beta - x_i D + x_i ct_{\text{medido}}) = 0$$

$$\sum (x_i y_i \cos \alpha + y_i^2 \cos \beta - y_i D + y_i ct_{\text{medido}}) = 0$$

$$\sum(x_i y_i \cos\alpha + y_i^2 \cos\beta - y_i D + y_i ct_{imedido})^2 = 0$$

$$(\sum x_i^2) \cos\alpha + (\sum x_i y_i) \cos\beta - (\sum x_i) D = - \sum x_i ct_{imedido}$$

$$(\sum x_i y_i) \cos\alpha + (\sum y_i^2) \cos\beta - (\sum y_i) D = - \sum y_i ct_{imedido}$$

$$(\sum x_i) \cos\alpha + (\sum y_i) \cos\beta - N.D = - \sum ct_{imedido}$$

O valor de N corresponde ao numero de equações, na pratica é o numero de estações acionadas.

Resolvendo o sistema de equações acima é possível determinar os parâmetros  $\cos\alpha$ ,  $\cos\beta$  e D, e a partir destes, os ângulos de incidência do chuva atmosférico.

- Evento 000006359600 (5 estações com sinal)

#Id	Signal(VEM)	Time(sec)	Time(ns)	Easting(m)	Northing(m)	Altitude(m)
1418	193.53	1220207321	935333976	476839.56	6119147.13	1396.88
1287	96.68	1220207321	935335703	476033.77	6120475.3	1399.7
1438	21.29	1220207321	935335123	475374.44	6119114.06	1403.11
1273	17.52	1220207321	935335021	477539.98	6120471.88	1395.87
1301	4.78	1220207321	935336962	476788.16	6121769.78	1397.2

Para este evento foram determinados:

$$\cos\alpha = 0,197038101 \quad \cos\beta = -0,318153183$$

$$\theta = 18,6^\circ \quad \varphi = -58,2^\circ$$

Os valores encontrados pelo OPA foram:

$$\theta = (19,0 \pm 0,3)^\circ \quad \varphi = (-54,1 \pm 1,6)^\circ$$

Os erros relativos foram de 2,1% para o  $\theta$  e 7,5% para o  $\varphi$ .

- Evento 000008042100 (7 estações com sinal)

#Id	Signal(VEM)	Time(sec)	Time(ns)	Easting(m)	Northing(m)	Altitude(m)
263	3927.3	1248294419	795219569	480628.13	6086648.24	1375.45
236	76.23	1248294419	795221082	479879.11	6087947.59	1377.94
256	32.4	1248294419	795218980	479877.51	6085343.99	1377.36
455	22.56	1248294419	795221005	481377.62	6087946.35	1373.93
498	10.96	1248294419	795219954	482127.55	6086642.45	1374.22

262	10.86	1248294419	795218928	481377.94	6085344.54	1374.39
221	3.72	1248294419	795222002	478384.56	6087940.35	1379.98

Para este evento foram determinados:

$$\cos \alpha = 0,066215471 \qquad \cos \beta = -0,260750912$$

$$\theta = 15,6^\circ \qquad \varphi = -75,8^\circ$$

Os valores encontrados pelo OPA foram:

$$\theta = (15,6 \pm 0,3)^\circ \qquad \varphi = (-78,5 \pm 1,7)^\circ$$

Os erros relativos foram de 0% para o  $\theta$  e 3,4% para o  $\varphi$ .

A direção dos chuveiros analisados está muito próxima comparada a direção obtida pelo OPA. Os erros, apesar de baixos, aparecem devido ao mesmo fato de ocorrer erros na determinação do centro do chuveiro: no OPA o plano é aproximado para uma secção cônica.

## CONCLUSÃO

Através deste projeto de iniciação científica foi possível primeiramente entender como um chuveiro atmosférico extenso se comporta e como estudá-lo a partir dos dados públicos disponibilizados pelo Observatório Pierre Auger.

Os dados obtidos para o centro de alguns chuveiro diferem dos dados disponibilizados pelo OPA em menos de 1%. O erros na determinação da direção do chuveiro são de no máximo 8%. Isso mostra que a aproximação da frente do chuveiro para um plano é um método confiável. Entretanto estes valores poderiam ser mais aproximados ao real se ao invés de um plano, a frente do chuveiro fosse aproximada para uma secção cônica.

## REFERÊNCIAS

- 1) "Pierre Auger Project Design Report", [http://www.auger.org/technical\\_info/design\\_report.html](http://www.auger.org/technical_info/design_report.html), último acesso 10/05/2013.
- 2) <http://apcauger.in2p3.fr/Public/Presentation/>, último acesso 10/05/2013.
- 3) "A guide to explore the Pierre Auger Observatory public data", P. Abreu, S. Andringa, F. Diogo, M.C. Espirito Santo, Nota Interna da Colaboração Auger GAP Note 2012-137, 2012.
- 4) <http://auger.colostate.edu/ED/>, último acesso 10/05/2013.
- 5) "Cosmic Bullets: High Energy Particles in Astrophysics", Roger Clay, Paul Davies, Bruce Dawson, Ed. Perseus Pub., 1997.

**Adicionadas pelo Coordenador da disciplina, obtidas da página da disciplina:**

- [Simulação de Luz de Fluorescência e Reconstrução de Chuveiros Atmosféricos Extensos](#) (NF)

- [Estudos de chuveiros atmosféricos extensos para a calibração do tanque Auger](#)

[http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F530\\_F590\\_F690\\_F895/F530\\_F590\\_F690\\_F895\\_sem1\\_2005/WalanC-Anderson\\_F590\\_RF.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F530_F590_F690_F895/F530_F590_F690_F895_sem1_2005/WalanC-Anderson_F590_RF.pdf)

- [Parametrização de chuveiros atmosféricos horizontais do Observatório Pierre Auger](#)

[http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F530\\_F590\\_F690\\_F895/F530\\_F590\\_F690\\_F895\\_2011\\_sem1/JoaoP-Chinellato\\_RF1\\_F590.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F530_F590_F690_F895/F530_F590_F690_F895_2011_sem1/JoaoP-Chinellato_RF1_F590.pdf)

- [Reconstrução da Energia de Chuveiros Atmosféricos Extensos Utilizando Tescópios de Fluorescência](#)

[http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F530\\_F590\\_F690\\_F895/F530\\_F590\\_F690\\_F895\\_sem2\\_2004/007913Alain-CarolaRF.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F530_F590_F690_F895/F530_F590_F690_F895_sem2_2004/007913Alain-CarolaRF.pdf) (NF)

- [Estudo de Observáveis de Chuveiros Atmosféricos Extensos](#)

[http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F530\\_F590\\_F690\\_F895/F530\\_F590\\_F690\\_F895\\_2010\\_sem2/GuilhermeA-Giles\\_RF1\\_F690.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F530_F590_F690_F895/F530_F590_F690_F895_2010_sem2/GuilhermeA-Giles_RF1_F690.pdf) (NF)