

# Decrecimiento Forbush en los datos de los detectores de superficie del Observatorio Pierre Auger

**Brayan Santiago Amorocho Lizcano**  
**María Sofía Cárdenas Canchón**  
**Jhonatan Stiven Blanco Melo**  
*Universidad Industrial de Santander*

13/07/2023

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Metodología</b>	<b>2</b>
<b>3. Procedimiento y análisis de resultados</b>	<b>3</b>
3.1. Comparación de ciclos solares . . . . .	3
3.2. Comportamiento según las estaciones . . . . .	4
3.3. Comportamiento con un máximo solar . . . . .	5
3.4. Comportamiento según la actividad solar . . . . .	5
<b>4. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>7</b>

## Resumen

## 1. Introducción

Monitorear el clima solar es de gran importancia debido a su impacto directo e indirecto en diversos aspectos de la vida cotidiana. El sol, como fuente primaria de energía, tiene variaciones que afectan desde la meteorología hasta la tecnología espacial<sup>1</sup>.

El observatorio Pierre Auger ha estado realizando un seguimiento de las variaciones en el flujo de partículas en la superficie, asociadas a la dinámica solar. Los datos abiertos del Auger Scaler consisten en más de  $10^{15}$  eventos destacados desde marzo de 2005 hasta diciembre de 2020.

Estos datos<sup>2</sup> se presentan en modo de “conteo de partículas”, donde se registran partículas que impactan cada uno de los detectores de agua Cherenkov en un segundo.

Por otra parte, el fenómeno principal del presente proyecto, el decrecimiento Forbush<sup>3</sup>, es un decaimiento de la tasa de partículas cósmicas cargadas, medidas por los observatorios terrestres, en consecuencia de las interacciones con el campo magnético del viento solar. Este suceso ocurre cuando una eyección de masa coronal y su campo magnético interactúa con el campo magnético terrestre, lo que desemboca en una disminución temporal en el flujo de partículas cósmicas de alta energía que se miden desde la Tierra.

En ese orden de ideas, con base en las investigaciones de Schimassek<sup>4</sup> y a partir de los datos tomados por el observatorio Pierre Auger, se propone como objeto de estudio las variaciones transitorias y estacionales (largo plazo) del flujo de partículas asociadas a decrecimientos Forbush y al ciclo solar, respectivamente. Es así como en el presente estudio se reproducen las variaciones asociadas al ciclo solar, se comprueba el decrecimiento Forbush y, a manera general, se corroboran las conclusiones de M. Schimassek. De esta manera en la Sección [2] se discute la metodología empleada, mientras que en la Sección [??] se muestran los datos libres ya mencionados. En la sección [3] se presenta el análisis del problema y los resultados del mismo, donde se abordan los objetivos rigurosamente. Se finaliza el artículo con las conclusiones y recomendaciones en la Sección [4].

## 2. Metodología

El Observatorio Pierre Auger está ubicado en la ciudad de Malargüe, Argentina, y está diseñado para medir rayos cósmicos de alta energía. El detector utilizado en este proyecto tiene 1500 metros cuadrados de espacio y consta de 1660 detectores de agua-Cherenkov, que miden continuamente la tasa de partículas.

Como ya se mencionó, para el presente proyecto se cuenta con los más de  $10^{15}$  eventos capturados por el observatorio Pierre Auger. Estos datos abiertos contienen información sobre el tiempo, la tasa de correlación, la fracción de información de operación y la presión.

Con el objetivo de reproducir las variaciones asociadas al ciclo solar, se importan todos los datos a Python, un lenguaje de alto nivel de programación que se utiliza como herramienta para trabajar en ciencia de datos. Se tiene en cuenta únicamente la información sobre el tiempo y la tasa de correlación.

---

<sup>1</sup>Space weather: The solar perspective. [1]

<sup>2</sup>[Auger open data.](#)

<sup>3</sup>Forbush decreases in the cosmic radiation. [2]

<sup>4</sup>Analysis of Data from the Low-Energy Modes of the Surface Detector of the Pierre Auger Observatory. [3]

Estas dos columnas se utilizan para generar gráficos que ilustran la cantidad de datos disponibles y facilitan el análisis, como se muestra en la Figura (1).

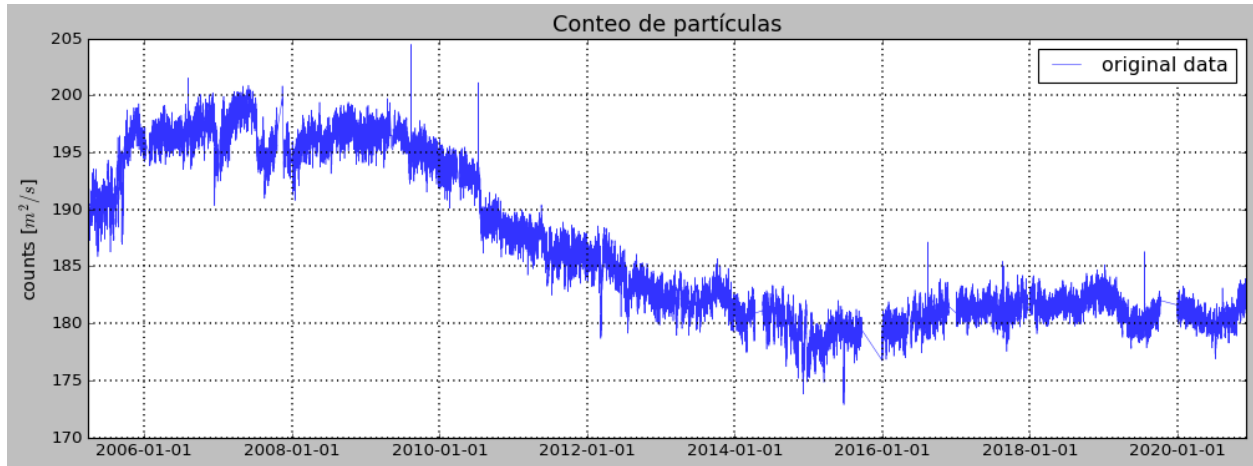


Figura 1: Datos medidos de conteo de partículas por el Observatorio Pierre Auger desde el 2005 hasta el 2020

La figura (1) ilustra los datos y el comportamiento de estos a lo largo de 15 años. Ahora bien, para el desarrollo de un pertinente análisis del fenómeno, se descompone la gráfica en distintas fuentes de información. Se evalúan y grafican años comparativos de dos ciclos solares distintos, se propone analizar los datos por estaciones de un año (2015), con el objetivo de encontrar otras causas que puedan explicar el comportamiento del conteo de partículas. Finalmente, se realiza un análisis entre los datos del conteo de partículas con una base de datos del SIDC<sup>5</sup> que registra manchas solares, el fin de relacionar la actividad solar con el decaimiento Forbush.

### 3. Procedimiento y análisis de resultados

El decaimiento Forbush se aprecia con una disminución del conteo de partículas que se detecta desde la Tierra. Teniendo en cuenta que el objetivo del proyecto es analizar este fenómeno y relacionarlo con el ciclo solar, se hacen distintos análisis desde distintas perspectivas con el propósito de identificar relaciones directas asociadas a este. Dichas comparaciones son las que se aprecian a continuación:

#### 3.1. Comparación de ciclos solares

Un ciclo solar hace referencia al ciclo que completa el campo magnético del sol cada 11 años, aproximadamente<sup>6</sup>. Este ciclo afecta la actividad de la superficie del sol, dado que las manchas solares son causadas por los campos magnéticos. A medida que estos cambian, también lo hacen las manchas solares. La mitad del ciclo solar es llamado el máximo solar y es cuando el sol tiene mayor cantidad de manchas solares.

---

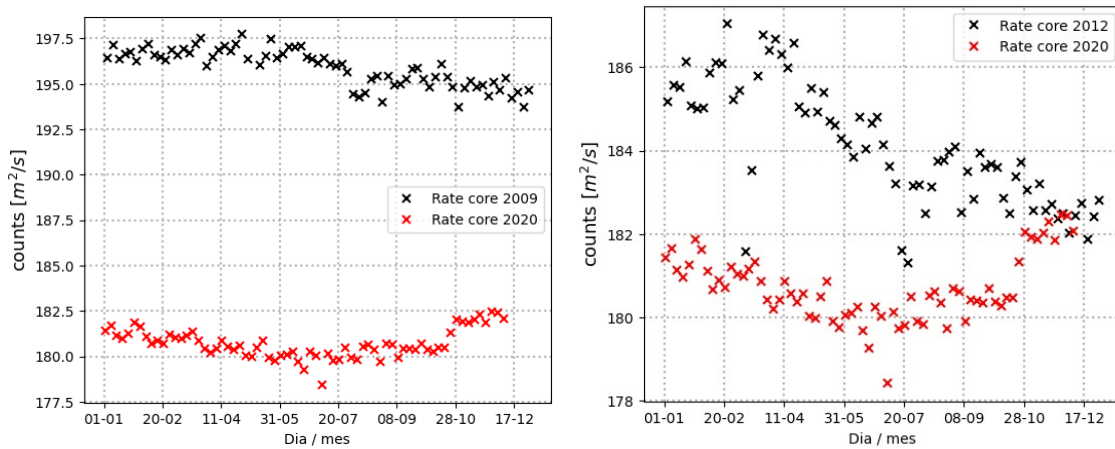
<sup>5</sup>SIDC - Sunspots

<sup>6</sup>NASA - Solar Cycles

Según la NOAA<sup>7</sup>, el ciclo solar 24, que comenzó en diciembre del 2008, llegó a su fin en diciembre del 2019. Lo que implica que se tienen suficientes datos como para compararlo con su sucesor, el ciclo solar 25, que se mantiene vigente.

En ese orden de ideas, se localizan los años donde mayor actividad solar hubo en cada ciclo. Finalmente, se opta por graficar el conteo de partículas para los años 2020 para el ciclo 25, y los años 2009 y 2012 para el ciclo 24. Esto para poder comparar la evolución temporal de los ciclos (2020 vs 2009) y también las fechas con máximos de actividad (2020 vs 2012). Los datos se encuentran en la figura (2).

Como se muestra en las gráficas, en ambos casos el número de partículas contadas en el ciclo 24 es mayor. Esto evidentemente indica que el ciclo 25 aún no llega a su máximo. Por otra parte, en la gráfica (2b) se alcanza a apreciar un decaimiento Forbush en Agosto del 2012, el cual indica que el máximo solar empieza a hacer efecto sobre las partículas que entran a la tierra.



(a) Comparación en el conteo de partículas para los años 2009 y 2020. (b) Comparación en el conteo de partículas para los años 2012 y 2020.

Figura 2: Conteo de partículas para distintos años de los ciclos solares 24 y 25.

### 3.2. Comportamiento según las estaciones

Debido a que el decaimiento Forbush se relaciona con la actividad solar, se desea analizar el conteo de partículas de dos años por estaciones, 2015 y 2020, con el fin de identificar su comportamiento en base al periodo del año y analizar los resultados.

La figura 3 analiza el conteo de partículas por estaciones. Al analizar la imagen se encuentra un comportamiento similar en los dos años de estudio. El decaimiento Forbush más marcado se encuentra medido en la temporada de invierno, característica no esperada, considerando que la raíz del fenómeno (las eyecciones de masa coronaria), se pueden producir en cualquier momento del año independiente de las estaciones, ya que estos no están relacionados directamente con cambios estacionales.

<sup>7</sup>NOAA - The big deal about solar cycles

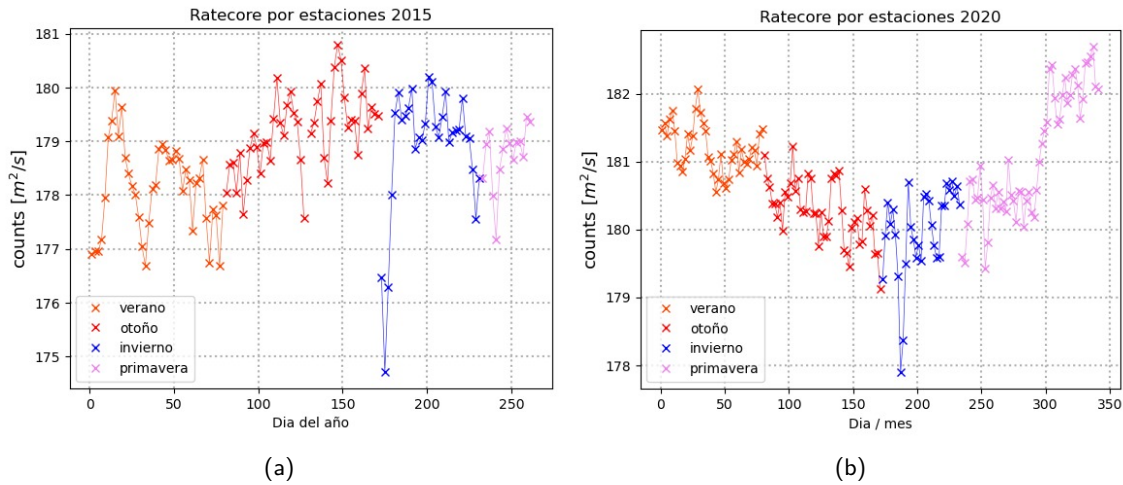


Figura 3: Conteo de partículas por estaciones del año.

### 3.3. Comportamiento con un máximo solar

Ahora bien, se propone estudiar qué sucede con el conteo de partículas cuando la actividad solar se encuentra en su punto máximo. Se optó por trabajar con el máximo ocurrido el 25 de junio del 2015. Como se muestra en la figura (4). Con el objetivo de poder apreciar mejor el decrecimiento Forbush, se graficó el conteo de partículas del día anterior y de ese. Los resultados se ven en la figura (5).

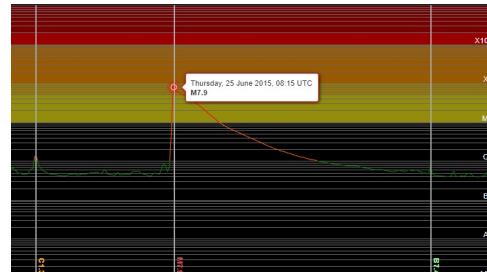


Figura 4: Máximo solar del 25/Junio/2015.

La figura muestra lo esperado. A mayor actividad solar menor será el número de partículas que entren a la tierra.

### 3.4. Comportamiento según la actividad solar

A manera más general se propone ahora comparar el conteo total de partículas tomadas desde el 2005 hasta el 2021, con el registro del número de manchas solares en estos mismos años. Teniendo en cuenta que las manchas solares son las indicadoras principales de la actividad solar, la utilización de este recurso para asociar la actividad solar con la cantidad de partículas es válido. De esta manera, se aprecia la figura 6, que con fines meramente comparativos se omite la escala en el eje y. Visualmente se percibe la relación contraria entre estas, verificando de esta manera que el decrecimiento Forbush ocurre en un máximo de actividad solar, puesto que, a mayor cantidad de manchas solares medidas, se encuentra precisamente una disminución en el conteo de partículas desde la Tierra.

Adicionalmente se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos variables, obteniendo un valor de -0.3965, lo que indica una relación lineal negativa moderada. Esto significa que a medida que

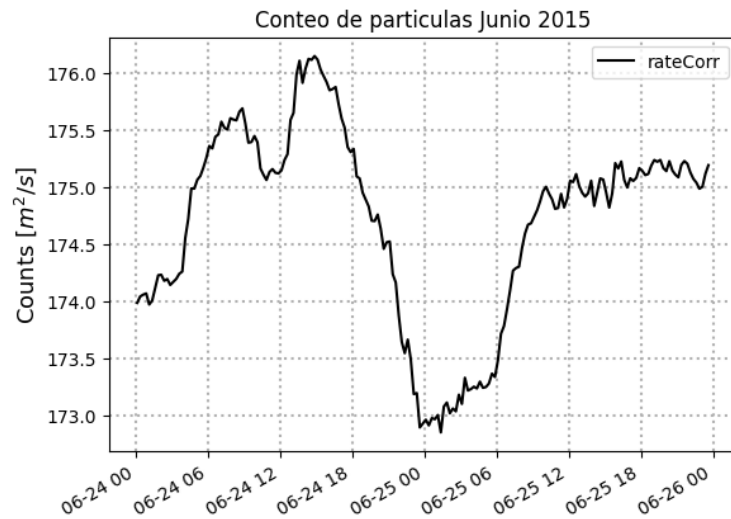


Figura 5: Decaimiento Forbush registrado a mediados de Junio del 2015.

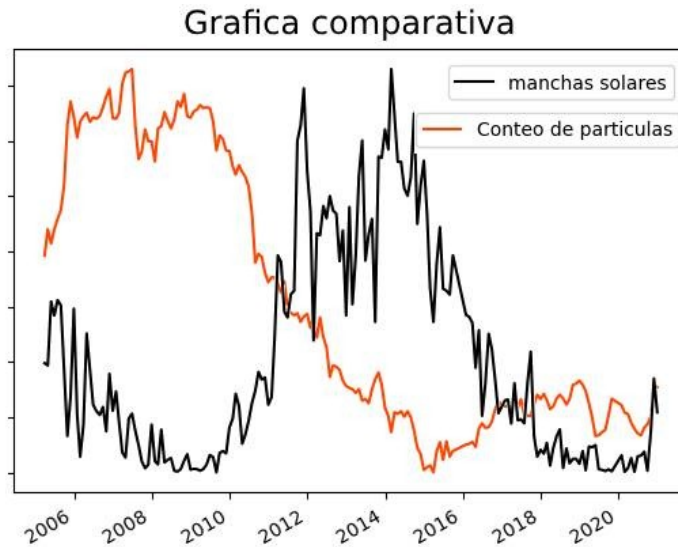


Figura 6: Comparación cantidad de partículas medidas vs cantidad de manchas solares

el número de manchas solares aumenta, el conteo de astropartículas disminuye, y viceversa. Además, se obtuvo un valor  $p$  muy pequeño ( $2.519e-08$ ), lo que implica que la correlación es estadísticamente significativa y no se debe al azar.

Estos resultados sugieren que existe una influencia del ciclo solar sobre el flujo de astropartículas que llegan a la Tierra, posiblemente debido a los cambios en el campo magnético solar y en el viento solar.

## 4. Conclusiones y Recomendaciones

El monitoreo del clima solar es esencial debido a su impacto directo e indirecto en diversos aspectos de la vida cotidiana, desde la meteorología hasta la tecnología espacial. El artículo presenta los resultados de los datos del conteo de partículas realizado durante 15 años, con el objetivo de analizar la relación o influencia de una disminución en la toma de la cantidad de partículas con el ciclo solar.

Los análisis realizados verifican la existencia del decaimiento Forbush y al mismo tiempo, sugieren una relación entre la actividad solar y las variaciones del flujo de partículas. Se observa que el conteo de partículas disminuye durante los máximos de actividad solar, puesto que existe una relación lineal negativa moderada entre la cantidad de manchas solares y el conteo de partículas.

Estos hallazgos resaltan la importancia de seguir investigando y desarrollando técnicas de monitoreo avanzadas para mejorar la capacidad de detectar y comprender fenómenos externos a la tierra y su impacto sobre ella.

Finalmente, a manera de recomendación, se propone seguir tomando datos con el fin de realizar posteriormente un análisis más exhaustivo respecto al comportamiento de la actividad solar de estos últimos años. Se espera una mejor comparación entre los ciclos solares 24 y 25, dado que en la actualidad la actividad solar está empezando a llegar a un máximo.

## Referencias

- [1] Rainer Schwenn. Space weather: The solar perspective. *Living reviews in solar physics*, 3(1):1–72, 2006.
- [2] John A Lockwood. Forbush decreases in the cosmic radiation. *Space Science Reviews*, 12(5):658–715, 1971.
- [3] Martin Schimassek. Analysis of data from the low-energy modes of the surface detector of the pierre auger observatory. In *36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019)*, volume 36, page 1147, 2019.