# INTERCOMPARACIÓN DE DOS FOTÓMETROS SOLARES.

C. Esteban[1], B. Milicic[2], J.Tocho[3], S. Díaz[4]
[1]Universidad Nacional de San Luis, Chacabuco 917, San Luis, cesteban@unsl.edu.ar
[2] U. N. Patagonia Austral-c.c.547 –9400 Río Gallegos, 02966-427626, beatrizm@internet.siscotel.com
[3]Departamento de Física, Universidad Nacional de La Plata y CIOp, c.c 124, 1900 La Plata, Argentina.
[4]CADIC, c.c.92 – 9410 Ushuaia, 029401-430526, subediaz@satlink.com

**RESUMEN**

Se intercompararon los fotómetros solares que se encuentran en la Universidad Nacional de San Luis y en la de la Patagonia Austral (UNPA), en la Unidad Académica Río Gallegos. En San Luis se operan dos fotómetros que miden la atenuación de la radiación solar directa a las longitudes de onda de 380, 500, 770, 860, 1060 y 940 nm, la recolección de datos está automatizada. El que posee la UNPA fue donado por la NOAA (USA). Es un fotómetro manual serie J, de dos canales de 380 y 500 nm de longitud de onda. En diciembre de 1998 y en julio de 1999 en la ciudad de San Luis, se compararon los valores de atenuación obtenidos, la proporcionalidad de los datos y los programas utilizados para el procesamiento de los mismos. Las comparaciones realizadas entre los valores de las señales mostró un coeficiente de correlación de 0.99996 y entre los coeficientes de atenuación obtenidos fue superior a 0.98356.

## INTRODUCCIÓN

Los fotómetros solares son equipos que permiten medir la atenuación atmosférica de la irradiancia solar para ciertas longitudes de onda, a partir de la cual y mediante una selección adecuada de las longitudes de onda, se puede caracterizar a los aerosoles, vapor de agua, ozono, oxígeno, y otros gases, en una columna vertical a través de la atmósfera. Se basan en que la atmósfera es tan delgada que puede ser considerada plana, lo cual permite calcular la transmitancia de la irradiancia solar con las mismas ecuaciones que se utilizan cuando la luz atraviesa una lámina delgada de material coloreado. Cuando se analiza la irradiancia atmosférica, se tiene la siguiente expresión (Iqbal, 1983):

$$I_\lambda = I_{o\lambda}\ e^{(-\tau\lambda\ m_r)} \qquad (1)$$

donde: $I_{0\lambda}$ es el valor de la irradiancia espectral fuera de la atmósfera, $\tau_\lambda$ es la profundidad óptica atmosférica para una longitud de onda dada, $m_r$ es la masa de aire relativa.

Debido a la respuesta lineal del fotómetro, se pueden utilizar las tensiones de salida en lugar de la irradiancia:

$$V_\lambda = V_{o\lambda}\ e^{(-\tau\lambda\ m_r)} \qquad (2)$$

Para resolver esta ecuación se utiliza el diagrama de Langley, en el cual se grafica el logaritmo de V en función de $m_r$

$$\ln (V_\lambda) = \ln (V_{o\lambda}) - \tau_\lambda\ m_r \qquad (3)$$

Si se realizan varias lecturas de $V_\lambda$ para diferentes $m_r$, siempre que las condiciones atmosféricas se mantengan lo suficientemente estables, aplicando la técnica de mínimos cuadrados se obtendrá una recta cuya pendiente será $\tau_\lambda$ y la ordenada al origen, $\ln V_o$.

Para la caracterización de aerosoles atmosféricos se seleccionan las longitudes de onda donde la absorción molecular está ausente o es mínima. Generalmente se realizan lecturas para masas atmosféricas relativas entre 2 y 6, lo que corresponde a ángulos solares cenitales en un rango de 60º a 80º. Se elige este rango debido a que las condiciones atmosféricas son más estables y las masas relativas de los diferentes componentes atmosféricos son aproximadamente iguales.

El Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Nacional de San Luis (UNSL) y la Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA) poseen fotómetros solares diseñados especialmente para determinar el contenido de aerosoles en la atmósfera. Estos fotómetros tienen características electrónicas y de manejo distintas, por lo que una comparación de los datos obtenidos con ambos fotómetros funcionando en el mismo sitio y en los mismos intervalos de tiempo, nos permite poder estimar si los resultados obtenidos dependen de la electrónica de los instrumentos. También se puede analizar la influencia en los resultados del procesamiento de datos, del tipo de fotómetro y la forma de recolección de datos.

## CARACTERÍSTICAS DE LOS FOTÓMETROS SOLARES Y DEL TRATAMIENTO DE LOS DATOS UTILIZADOS EN CADA UNIVERSIDAD.

### Fotómetro de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral

El fotómetro que posee la UNPA fue donado por la NOAA, es un fotómetro manual serie J, de dos canales, con filtros de interferencia de banda angosta de 380 y 500 nm, con ancho de banda de 10 nm, centrados en 386 y 506 nm respectivamente. Los filtros son controlados periódicamente respecto a efectos de envejecimiento y de temperatura con un espectrofotómetro Hewlett Packard HP 3553, con rango 100/1100 nm. El ángulo sólido de cada canal es de 2,5º, lo cual hace muy baja la influencia de la luz dispersada en las mediciones. Consta además de fotodetectores de silicio, electrónica digital, visor de

cristal líquido con retención del valor más alto registrado y funciona a batería. El instrumento se apunta manualmente hacia el sol, con la ayuda de una mira para facilitar la inclinación óptima del equipo (Dutton *et. al.*, 1994).
Manualmente se registra la hora de inicio y finalización de cada medición y se realizan dos mediciones con cada canal. Los datos obtenidos se promedian. La hora registrada se corrige con la hora oficial. Los datos de latitud y longitud se obtienen con un geoposicionador. Se realiza una medición cada 2 minutos, durando aproximadamente 1 minuto.

Los datos medidos son corregidos por excentricidad de la órbita terrestre en función del día del año correspondiente a la fecha (F) en que se realiza la medición según la expresión (Reddy, 1986):

$$E = \{1.0 - 0.0167 * \cos [(F-4)* 2 * \pi / 365]\}^{2} \quad (4)$$

El ángulo solar cenital y la masa atmosférica relativa para cada una de las mediciones se calcula con el programa MESOL cuyos datos de entrada son la fecha, la hora corregida, la longitud y la latitud. El cálculo de la posición solar se basa en la fórmula de Meeus presentado en el *Astronomical Formulae for Calculators Chapter* (Meeus, 1979*),* los resultados obtenidos concuerdan con el Almanaque Náutico dentro de un 0,01º . La masa de aire relativa se calcula a partir de la fórmula de Kasten (Kasten, 1966).

Debido a que en Río Gallegos hay pocos días de sol, sólo se realizan calibraciones en vez de mediciones de rutina. Se descartan los resultados obtenidos si la desviación estándar del coeficiente de profundidad óptica atmosférica es superior a 0.002 y si el coeficiente de correlación es menor que 0.9990.

**Fotómetro de la Universidad Nacional de San Luis**

En la Universidad Nacional de San Luis se operan dos fotómetros que miden la atenuación de la radiación solar directa a las longitudes de onda de 380, 500, 770, 860, 1060 y 940 nm. Los cinco primeros sirven para caracterizar aerosoles y el sexto para hacer determinaciones de contenido de vapor de agua. Los elementos sensitivos son fotodiodos de Si. Cada fotómetro consta de tres canales con un campo de vista de 4°, y filtros de interferencia de 10 nm FWHM, logrando asi la selección espectral. Cada detector tiene su propio amplificador con selección automática de ganancia. Las señales son digitalizadas mediante un conversor AD de 13 bits. Los datos son almacenados en una PC a través de una comunicación serie RS232. Se realiza una lectura de los seis canales cada 30 seg. Los fotómetros son montados en un seguidor solar marca Eppley, modelo ST-3, lo que permite automatizar la recolección de datos. Para el procesamiento de datos se construyó un programa en ORIGIN. En este programa se utilizan las expresiones de Spencer (Iqbal, 1983) para el cálculo de la ecuación del tiempo y de la declinación solar y para el cálculo de la masa de aire se utiliza la expresión de Kasten (Kasten, 1966) . En San Luis se realizan mediciones regularmente en días despejados, con el fin de lograr caracterizar los aerosoles de la zona.

**INTERCOMPARACIÓN**

La intercomparación se llevó a cabo en la ciudad de San Luis (Lat: 33° 17´ 58´´S, Long: 66° 20´ 26´´O, alt SNM 724m) , en días cerca de los solsticios de verano y de invierno (17 y 18 de Diciembre de 1998 y del 5 al 7 de julio de 1999). Se realizaron mediciones simultáneas correspondientes a los rangos de masas de aire entre 2 y 6. Se obtuvieron los valores de profundidad óptica para 380 y 500nm según los siguientes procedimientos:

- FPAM : Datos obtenidos con el fotómetro de la UNPA y procesados con el programa MESOL.
- FPAO: Datos obtenidos con el fotómetro de la UNPA y procesados con el programa ORIGIN.
- $FSLO_T$: Datos obtenidos con el fotómetro de la UNSL y procesados con el programa ORIGIN.
- $FSLO_P$: Idem anterior pero solo incluyendo los promedios de los datos correspondientes a los mismos intervalos de tiempo que los medidos por el de la UNPA.

Los resultados obtenidos, con sus respectivas desviaciones estándar, se encuentran en la Tabla 1. En la Figura 1 están representadas las profundidades ópticas correspondientes a 380nm, mientras que en la Figura 2 las que corresponden a 500nm.

Tabla 1. Profundidades ópticas correspondientes a 380 y 500nm para los distintos días de comparación.

| fecha | $m_r$ | λ(nm) | FPAM | FPAO | $FSLO_T$ | $FSLO_P$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 17/12/98 mañana | 3.55 - 2.00 | 380 | 0.4127±0.0015 | 0.3648±0.0014 | 0.3921±0.0006 | 0.3922±0.0012 |
| | | 500 | 0.1688±0.0016 | 0.1478±0.0018 | 0.1513±0.0004 | 0.1510±0.0008 |
| 18/12/98 mañana | 2.73 - 2.00 | 380 | 0.4686±0.0016 | 0.4282±0.0020 | 0.4494±0.0014 | 0.4491±0.0021 |
| | | 500 | 0.1971±0.0018 | 0.1825±0.0020 | 0.1869±0.0011 | 0.1865±0.0018 |
| 5/7/99 mañana | 6.13 - 2.32 | 380 | 0.3986±0.0011 | 0.4038±0.0011 | 0.3906±0.0006 | 0.3908±0.0011 |
| | | 500 | 0.1395±0.0015 | 0.1413±0.0016 | 0.1540±0.0010 | 0.1540±0.0010 |
| 5/7/99 tarde | 2.17 - 5.58 | 380 | 0.3906±0.0009 | 0.3850±0.0010 | 0.3808±0.0006 | 0.3785±0.0012 |
| | | 500 | 0.1371±0.0015 | 0.1345±0.0014 | 0.1409±0.0006 | 0.1412±0.0004 |
| 6/7/99 mañana | 5.11 - 2.18 | 380 | 0.4068±0.0013 | 0.4180±0.0012 | 0.4025±0.0007 | 0.4019±0.0013 |
| | | 500 | 0.1491±0.0009 | 0.1545±0.0009 | 0.1544±0.0006 | 0.1541±0.0011 |
| 6/7/99 tarde | 2.20 - 5.62 | 380 | 0.4067±0.0009 | 0.3968±0.0017 | 0.3956±0.0005 | 0.3933±0.0010 |
| | | 500 | 0.1517±0.0008 | 0.1479±0.0009 | 0.1520±0.0002 | 0.1513±0.0004 |

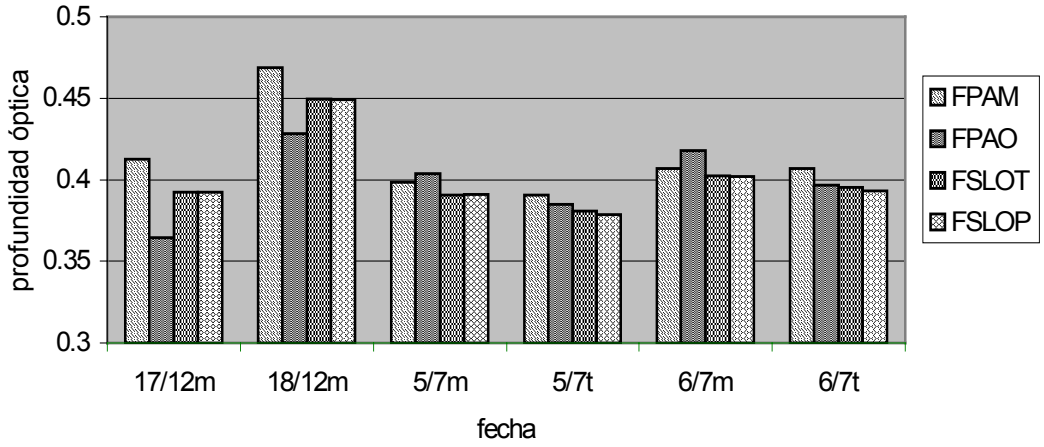


**Figura 1**. Profundidad óptica obtenida para el canal de 380nm.

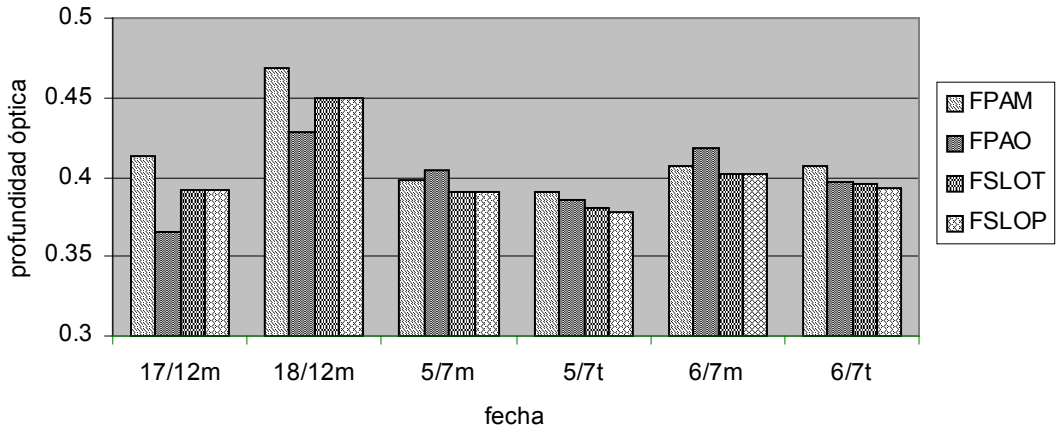


**Figura 2**. Profundidad óptica obtenida para el canal de 500nm

**RESULTADOS OBTENIDOS**

Se compararon los valores de la profundidad óptica para 380 y 500 nm, obtenidos bajo la aplicación de los distintos tipos de procesamiento de datos. En la Tablas 3 se encuentran los resultados obtenidos:

**Tabla 3.** Variaciones porcentuales de los valores de profundidades ópticas obtenidas para los canales de 380 y 500nm

| λ (nm) | Fecha | FPAM c/ $FSLO_T$ (%) | FPAO c/ $FSLO_T$ (%) | FPAM c/ FPAO (%) | $FSLO_T$ c/ $FSLO_P$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 380 | 17/12/98 m | -5.3 | 7.0 | -12.2 | -0.03 |
| | 18/12/98 t | -4.3 | 4.7 | -9.0 | 0.07 |
| | 5/7/99 m | -2.0 | -3.4 | 1.3 | -0.05 |
| | 5/7/99 t | -2.6 | -1.1 | -1.5 | 0.60 |
| | 6/7/99 m | -1.1 | -3.9 | 2.8 | 0.15 |
| | 6/7/99 t | -2.8 | -0.3 | -2.5 | 0.58 |
| 500 | 17/12/98 m | -11.6 | 2.3 | -13.9 | 0.20 |
| | 18/12/98 t | -5.5 | 2.4 | -7.8 | 0.21 |
| | 5/7/99 m | 9.4 | 8.2 | 1.2 | 0.00 |
| | 5/7/99 t | 2.7 | 4.5 | -1.8 | -0.21 |
| | 6/7/99 m | 3.4 | -0.1 | 3.5 | 0.19 |
| | 6/7/99 t | 0.2 | 2.7 | -2.5 | 0.46 |

Las comparaciones realizadas son:

- FPAM con $FSLO_T$. Esta comparación permite cuantificar la diferencia entre las profundidades ópticas obtenidas cuando los datos de cada fotómetro son procesados con su programa habitual. El coeficiente de correlación entre ambas columnas es de 0.99602.

Se observa para el canal de 380 nm que los valores de $\tau$ son siempre más altos los de FPAM respecto a los $FSLO_T$, en un rango que va de -1.1 a -5.3%.. Para el canal de 500nm en diciembre, es más alto FPAM hasta -11.6% , la situación se invierte en julio donde $FSLO_T$ es mayor en un rango de 0.2 a 9.4%.
Con respecto a los valores de dispersión (Tabla 1), los FPAM son mayores debido a que al ser manual, se toma una medición cada dos minutos en vez de una cada 30 segundos correspondientes a $FSLO_T$.

- FPAO con $FSLO_T$. Esta comparación permite determinar si utilizando el mismo programa ambos conjuntos de datos conducen a un mismo valor de $\tau$. El coeficiente de correlación entre ambas columnas es de 0.99158.
  Para el canal de 380 nm se observa que en julio los FPAO son más altos en un porcentaje de -0.3 a -3.9%, en diciembre en cambio son más altos los $FSLO_T$ hasta un 7%. Para el canal de 500nm en general son mayores los $FSLO_T$.
- FPAM con FPAO. En este caso se obtiene información de la influencia de los programas ya que los datos del mismo fotómetro son procesados con MESOL y con ORIGIN. El coeficiente de correlación entre esas columnas es de 0.98356.
  Se observan variaciones que van de -12.2% a 2.8% para 380nm y de -13.9 a 3.5% para 500nm. La mayor variación se observa en diciembre para los dos canales.
  Una revisión de los resultados obtenidos para la posición solar, a partir de los algoritmos implicados en ambos programas, muestra una diferencia de hasta un 3% en el cálculo del ángulo cenital en el mes de diciembre, no habiendo prácticamente diferencia en julio, esta sería la causa de las diferencias mayores en diciembre.
- $FSLO_P$ con $FSLO_T$. Aquí se determina la influencia del número de datos utilizados en el valor de $\tau$.
  Las diferencias son menores o iguales a 0.6% para el canal de 380 nm, mientras que para el de 500 nm no llegan al 0.5%

**Proporcionalidad de las mediciones:** se compararon las señales de los radiómetros en los mismos intervalos horarios de medición para observar si eran proporcionales.

| Fecha | $m_r$ | $\lambda$(nm) | Relación | $\lambda$(nm) | Relación |
|---|---|---|---|---|---|
| 17/12/98m | 3.96 - 2.00 | 380 | 0.00170±0.00002 | 500 | 0.00113±0.00006 |
| 18/12/98m | 2.73 - 2.00 | 380 | 0.001777±0.000007 | 500 | 0.00113±0.00004 |
| 5/7/99m | 6.13 - 2.32 | 380 | 0.0014±0.0002 | 500 | 0.0090±0.0001 |
| 5/7/99t | 2.17 - 5.58 | 380 | 0.00135±0.00002 | 500 | 0.0015±0.0002 |
| 6/7/99m | 5.11 - 2.18 | 380 | 0.00150±0.00009 | 500 | 0.0015±0.0002 |
| 6/7/99t | 2.20 - 5.62 | 380 | 0.002±0.001 | 500 | 0.0015±0.0002 |

Como se observa, las lecturas de ambos canales son proporcionales, manteniéndose aproximadamente constante esta relación para los distintos días, lo que implica la linealidad en la respuesta de ambos equipos. El coeficiente de correlación entre estos valores es de 0.99996.

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se encuentra que si bien la dispersión de las mediciones obtenida con el equipo manual es un orden de magnitud mayor que con el equipo automático, se observa que muestran la misma cuando se reduce el número de mediciones en el automático. En casi todos los casos, es menor a 0,002 que es la aceptada a nivel internacional.

Se observa una relación constante entre los datos, de lo que se infiere que los equipos tienen respuestas similares ante las variaciones de la radiación incidente. La diferencia en las atenuaciones calculadas se debe a diferencias entre los algoritmos implicados en los programas utilizados, los cuales deben ser revisados para mejorar la concordancia entre ambos.

El análisis entre los datos de los fotómetros procesados con el mismo programa muestra que se pueden esperar diferencias de hasta un 7% para el canal de 380 nm y de 8.2% para el canal de 500 nm. Considerando que normalmente se estima que este tipo de fotómetro tiene un error instrumental del 5% , las diferencias encontradas están dentro del margen de error esperado.

En el futuro se deberían realizar otras intercomparaciones en distintas épocas del año para poder ampliar los resultados aquí presentados.

## BIBLIOGRAFÍA


Dutton E G, Reddy P, Ryan S, De Luisi JJ, (1994), Features and effects of aerosol optical depth observed at Mauna Loa, Hawaii: 1982-1992, J. Geophys. Res., vol 99, Nº D4, pp 8295-8306.

Iqbal M., (1983), Introduction to Radiation Solar., Academic Press.

Kasten F, (1966), A new table and approximate formula for the relative optical air mass, Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. Ser. B, 14, 206-223

Meeus J, (1979), Astronomichal formulae for calculators, Monogr. Astron. Astrofys., 4.

Reddy P.J., (1986), Instructions for J-Series Handheld Sunphotometer, NOAA, Boulder.

Tocho J., Esteban C, Fasulo A, Rodriguez E y Wolfran E, Sun-photometer for aerosol and precipitable- water measurements used in Argentina. Presentado en The European Symposium on Remote Sensing. Realizado del 21 al 25 de Setiembre de 1998 en Barcelona.