



# LA DETERMINACION DEL CONTENIDO DE AEROSOLES EN LA ATMOSFERA SOBRE TUCUMAN

**Grimolizzi, Otón Matías**

Laboratorio de Estudios de Baja Atmósfera (LEBA) - Instituto de Riesgo Geológico y Sistematización Territorial (IRGIST) – Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo – Universidad Nacional de Tucumán, Miguel Lillo 205, Tucumán, Argentina. CONICET  
*Email: grimolizzi@aol.com*

---

## Resumen

Este trabajo presenta aspectos técnicos y algunos resultados obtenidos de la determinación del contenido de aerosoles de humo y polvo en la atmósfera sobre Tucumán. El método propuesto para cálculo del contenido - por determinación de transparencia atmosférica entre dos sitios - demuestra su eficacia. La transparencia resultante en días claros entre Ampimpa (sitio de referencia, en los cerros) y Famaillá en la llanura de piedemonte tomó valores próximos a 1. En días de contaminación en la llanura, esta relación decrece notablemente. Se ensayó un método para el cálculo preliminar de la densidad de contaminantes en la atmósfera, con un fuego próximo a la estación. Para este ensayo, la densidad calculada de contaminantes en el aerosol superaba en dos veces lo permitido en tablas de la EPA (Agencia Nacional de Protección del Medio Ambiente de los EEUU de América). Se incluyen registros de transparencias con valores aún más bajos.

Palabras claves: aerosol, transparencia.

---

## Abstract

Some technical aspects and results from dust and smoke aerosol content determinations in the atmosphere above Tucumán are presented in this paper. The proposed method of content calculation – by determination of air transparency between two sites – proved its efficiency. The resulting transparency between the reference site – Ampimpa, well into the hills – and the tested site – Famaillá, in the foothill plains - in clear days was very close to unity. In polluted days, this quotient decreases notoriously. A method for preliminary computation of atmospheric pollutant density was essayed, following the circumstance of detecting a fire close to the station. For this essay, the resulting pollutant density was twice as large as that allowed by EPA once a year for 24 hours. Data graphics exhibiting very low air transparency are also included.

Keywords: aerosol, transparency.

---

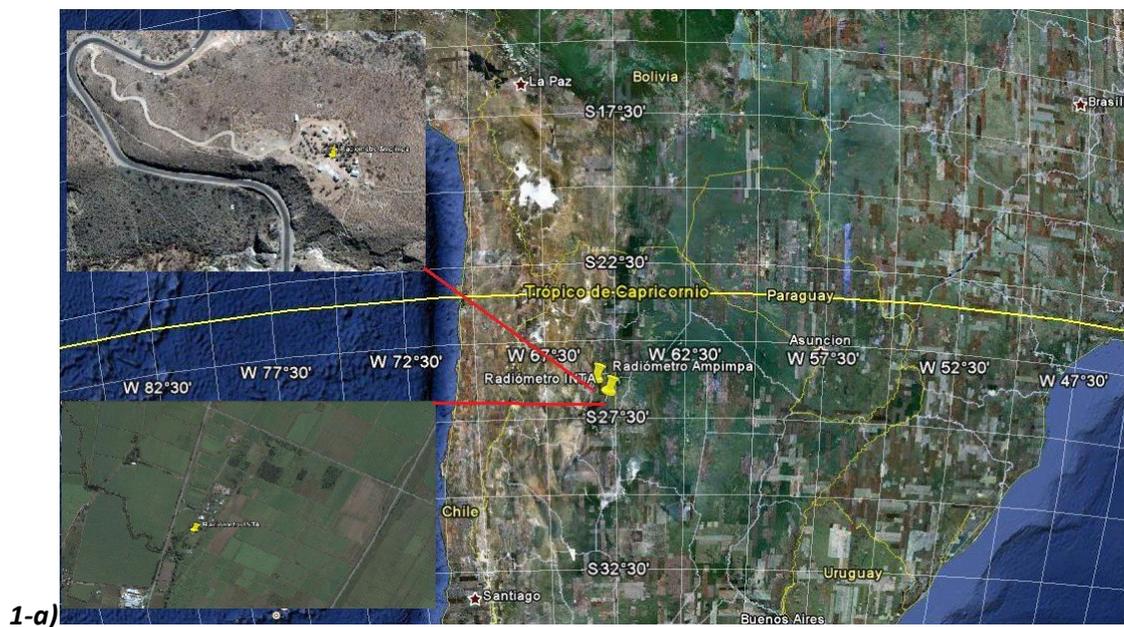
## INTRODUCCION

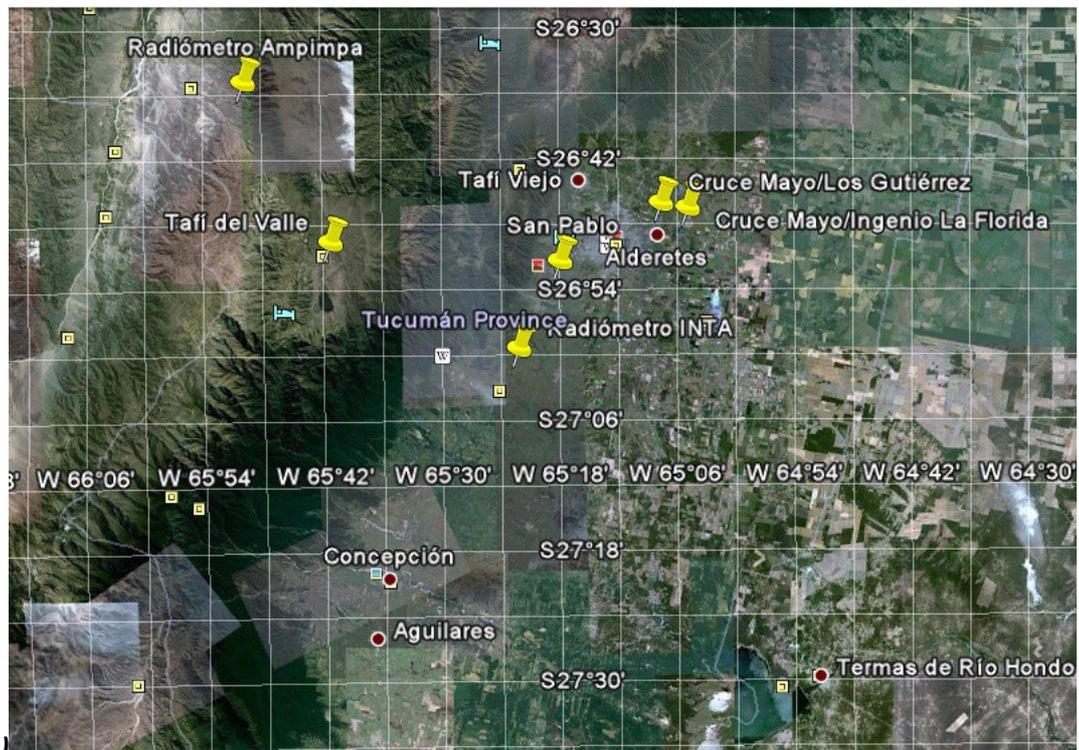
Se realizaron pruebas de campo de nuevos radiómetros con capacidad de

registro automático para un estudio de contaminación atmosférica por aerosoles en la temporada seca en la provincia de

Tucumán. Los sitios de referencia o de contaminación cero elegidos en este trabajo fueron el observatorio astronómico Ampimpa (26° 48' 03,43" S, 65° 50' 36,32" O, elevación: 2458 m.s.n.m) y un sitio en Taff del Valle (26° 51' 33,89" S, 65° 41' 49,58" O, elevación: 2032 m.s.n.m.). Los sitios de llanura de piedemonte contaminados fueron: San Pablo (26° 53' 09,91" S, 65° 18' 32,80"

O, elevación: 417 m.s.n.m); cruce Mayo/Los Grutiérrez (26° 47' 24,52" S, 65° 08' 07,41" O, elevación: 463 m.s.n.m.); cruce Mayo/Ingenio La Florida (26° 48' 27,52" S, 65° 05' 25,59" O, elevación: 471 m.s.n.m.) y observatorio INTA Famaillá (27° 01' 08,85" S, 65° 22' 49,99" O, elevación: 373 m.s.n.m.) (Figuras 1-a y 1-b).





1-b)

Figura 1-a. Imagen mapa de Google Earth mostrando sitios de medición; 1-b. Ídem figura 1-a).

## MATERIALES Y METODOS

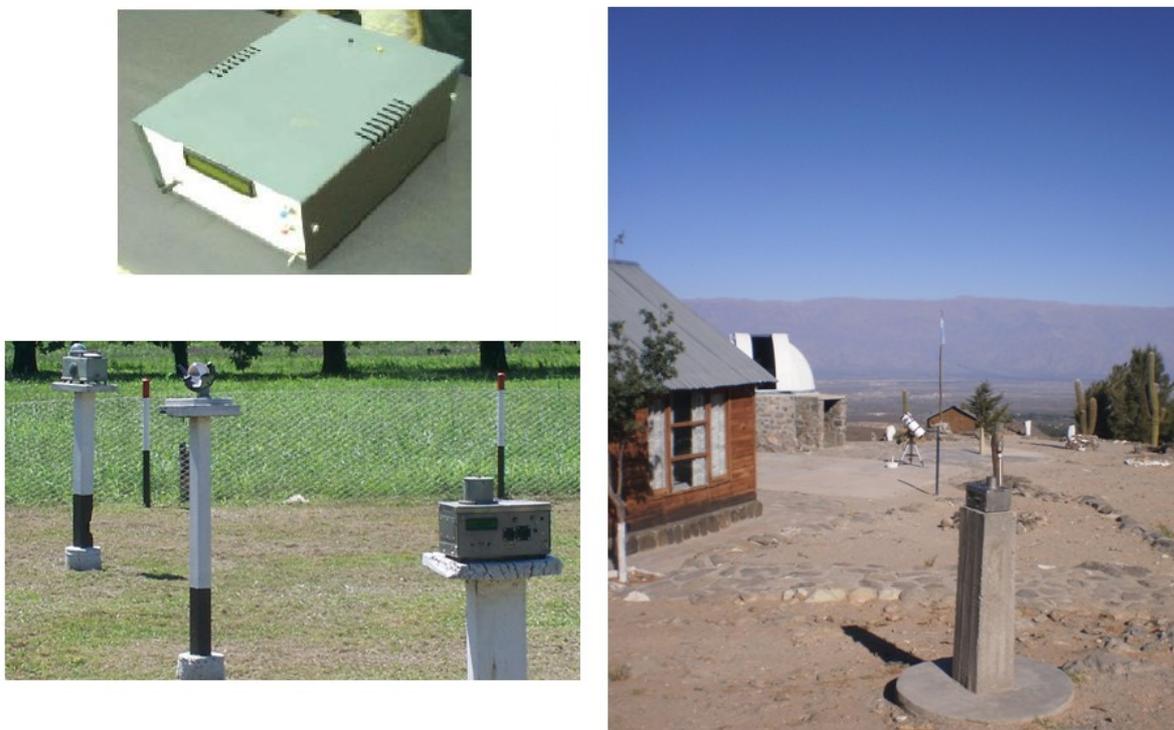
Los aerosoles son suspensiones de partículas sólidas o gotitas de líquido, o ambas, en un gas, como por ejemplo la niebla oceánica, contaminación, humo, smog, gas CS. Constituyen una de las mayores fuentes de incerteza en el modelado climático; varían en tiempo y espacio y pueden generar variaciones en microfísica de nubes. Impactan en las propiedades radiativas de las nubes y el clima.

Los aerosoles en la atmósfera sobre Tucumán son abundantes durante la estación seca, meses de otoño, invierno y comienzos

de primavera, por quema de biomasa (caña en pie, rastrojos, pastizales, banquinas y los aportes de chimeneas). Más aún, al coincidir con la estación seca, el polvo es otra componente del aerosol.

El objetivo de este trabajo es mostrar una de las técnicas que permiten la determinación del contenido de aerosoles en la atmósfera mediante el uso de radiómetros capaces de medir la irradiación solar en bandas UV: de 200 a 400 nm.

Los radiómetros son instrumentos que miden la irradiación solar a nivel del suelo, para la mayor parte de la semiesfera celeste por encima del instrumento. Dos tipos de radiómetro se construyeron a estos fines (Figura 2).



**Figura 2.** Los dos tipos de radiómetros utilizados. Arriba izquierda en Tafi del Valle, cruce Mayo/Los Gutiérrez y cruce Mayo/Ingenio La Florida. Es de operación manual y tiene sensor de temperatura en su parte superior izquierda, al lado del elemento fotodetector. El segundo tipo, de registro y almacenamiento automático de datos se presenta en las otras dos imágenes. A la derecha, el instalado en Ampimpa y abajo, el instalado en Famaillá (primer plano).

El primer tipo (izquierda arriba) es de operación y registro manual de datos, es empleado actualmente para pericias. El segundo tipo es de operación y registro automático de datos y es del tipo que está en funcionamiento en Ampimpa y Famaillá.

Los datos reunidos comprenden dos períodos: una breve campaña en agosto de 2006 con radiómetros de operación manual y otra con radiómetros de operación y registro automático, entre setiembre y octubre de 2010.

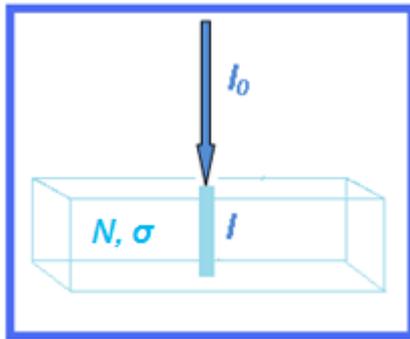
La ley de Beer – Lambert:

Los efectos de la atmósfera sobre la radiación solar son: dispersión y absorción, mientras más atmósfera atraviesa, mayor atenuación. La atenuación, conocida como extinción atmosférica está descrita cuantitativamente por la ley de Beer – Lambert.

El proyecto descripto trata primero la determinación de la transparencia de la

atmósfera contaminada por comparación de datos de irradiación para luego estimar el contenido de aerosoles.

La técnica empleada para la determinación de la densidad de hollín y polvo atmosférico parte entonces de las lecturas comparadas de transparencia del aire a la irradiación solar UV. Se trata de acceder de manera inmediata a la cantidad  $I/I_0$  de la Ley de Lambert-Beer que define la transmisividad óptica de un medio utilizando la relación entre la intensidad de luz incidente con la intensidad que resulta luego de que la luz atravesó un cierto recorrido  $l$  en dicho medio (Figura 3).



**Figura 3.** Diagrama para comprensión de la ley de Beer Lambert.

Las gráficas de tensión vs hora local están invariablemente afectadas por el ángulo de aspecto del sol respecto del fotodetector: este ángulo es la elevación solar que es el ángulo entre una superficie nivelada y la posición del sol en ese punto. El ángulo cenital es el complemento de ese ángulo de elevación y es el que se emplea en correcciones fotométricas. Es posible calcularlo y graficar su variación diaria en función de la hora local (Figura 8 – izquierda). La relación entre el ángulo de elevación solar  $h$  y el ángulo cenital  $z$ , es:

$$h = 90^\circ - z$$

La cantidad  $I/I_0$  se denomina transmisividad ( $T$ ). Explícitamente, la ley de Beer-Lambert es:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha \ell} = e^{-\sigma N \ell} \quad \longrightarrow \quad N = -\frac{1}{\sigma \ell} \ln \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción =  $\sigma N$ ;  $\sigma$  [magnitud / airmass] = coeficiente de extinción;  $\ell$  = airmass = recorrido en aire de la radiación solar;  $N$  = contenido de aerosol. El exponente completo es la Absorbancia o Coeficiente de Åmstrong.  $I_0$  lo proporcionan los datos de Ampimpa, I, los de Famaillá y Tucumán. Para el año

2006, los de Tafí del Valle para  $I_0$  y el resto de los sitios, I.

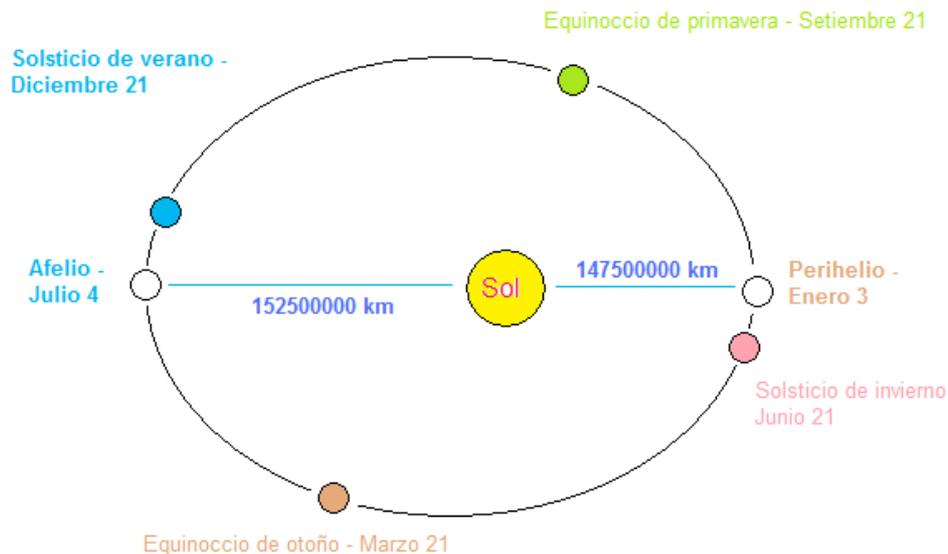
El término “airmass” indica normalmente airmass relativo, es decir la longitud de camino relativa a aquella del cenit a nivel del mar, así que, por definición, el airmass a nivel del mar y en el cenit es 1. El airmass crece a medida que el ángulo entre la fuente y el cenit crece, alcanzando un valor de aproximadamente 38 en el horizonte. Los valores de ángulo cenital calculados para este trabajo iban de bajo a moderados, con los cuales es una buena aproximación suponer una atmósfera homogénea, plano paralela; esto es, densidad constante y curvatura de la Tierra despreciable. Así, el airmass está dado por:

$$X = \sec(z)$$

Para un ángulo cenital de 1 radián, el airmass es 1,8. La aproximación de tierra plana admite el uso de ángulos cenitales entre  $60^\circ$  y  $75^\circ$ , lo que excede los valores calculados hasta las 19 horas, esto es, la aproximación es acertada. Hay correcciones que proporcionan mejores valores (Green, 1992).

### **La irradiación solar ultra violeta (UV)**

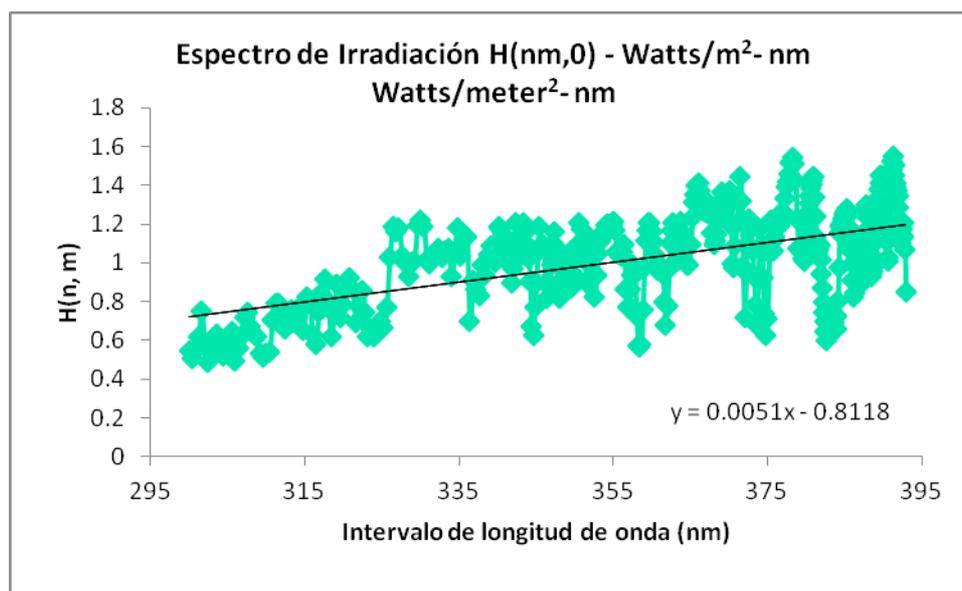
La irradiación solar varía con la inversa del cuadrado de la distancia. Esto causa que haya menor intensidad durante el perihelio que durante el afelio. Pero la variación del radio solar entre estos puntos es de un 1,36 %, o sea que la mayor variación de intensidad (potencia radiada por unidad de superficie) por esta diferencia estaría en el orden del 1,5 % si se midiese entre estos puntos más alejados. El criterio de toma de datos adoptado garantiza que el error que pudiera cometerse por época del año sea en todo momento menor que el 1 % (Figura 4).



**Figura 4.** La Tierra en su órbita alrededor del Sol.

La figura 5 da una idea de la irradiación UV solar al tope de la atmósfera. Las mediciones se efectuaron desde un avión volando entre 11.500 y 12.600 m de altura en época del radio de la órbita igual a la distancia media sol – tierra. A estas alturas, se estima que más del 99 % del contenido de polvo de la atmósfera queda por debajo de la medición (Arvensen y otros,

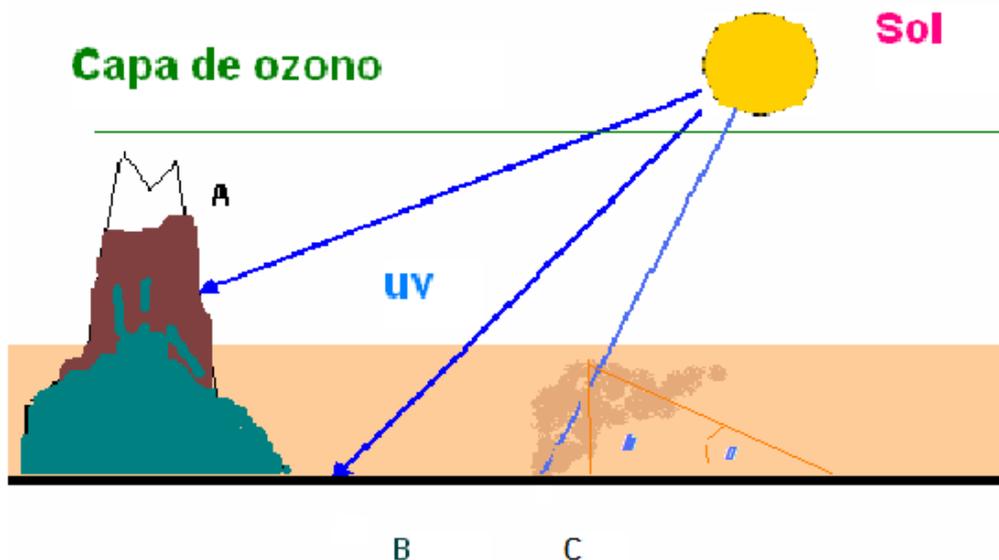
1969). Estos autores determinaron la irradiación solar para el intervalo de longitudes de onda entre 300-2500 nm, es decir entre la banda del UV y el infrarrojo lejano, con una precisión absoluta de  $\pm 3\%$  sobre la mayor parte del rango de medición. Los resultados se publicaron a intervalos de 0,1 nm para la región del espectro solar UV.



**Figura 5.** Espectro de irradiación solar UV entre 300 y 400 nm al tope de la atmósfera.

Cabe destacar que a los fines de las mediciones realizadas en Tucumán, las longitudes de onda del UV solar que se

detectan a nivel del suelo van de 300 a 400 nm por la absorción en la atmósfera superior, principalmente por ozono (Figura 6).



**Figura 6.** Esquema del método de mediciones empleado. Para un penacho de humo, conociendo la distancia y el ángulo es posible determinar su altura y su contribución en masa de contaminantes.

### Los datos

Los datos se componen de registros de un máximo de 10 horas de duración con lecturas cada 5 minutos de la tensión amplificada producida al excitarse el fotodetector, en función de la hora local. La curva construida con esta tensión representa a de la potencia irradiada sobre la superficie activa del fotodetector vs hora local. Las lecturas diarias comienzan a las 9 de la mañana (hora local) y terminan a las 19 hora local.

### Determinación inicial de la concentración de contaminantes

La determinación de la concentración del aerosol a nivel del suelo se realiza aspirando muestras del aire a través de papel de filtro con una aspiradora de flujo conocido (Figura 13). La aspiradora tiene un caudal de aire conocido. La técnica consiste en pesar en seco un papel de filtro, aspirar el aerosol una cierta cantidad de tiempo y pesarlo

nuevamente en seco. Esto permite calcular la densidad del aerosol en el volumen de atmósfera aspirado, el filtro empleado es el que aparece más arriba en la figura 7, al lado de la boquilla de la aspiradora. El otro tipo de filtro que se aprecia en la figura permite determinar el tamaño de las partículas aspiradas. El de la figura es de  $0,45 \mu$ , es el menos empleado, porque lo que interesa es la clasificación de lo que se conoce como "materia en partículas" (particulate matter), concepto con que los autores se refieren a los componentes de este tipo de aerosoles. Está tipificado en dos clases: fino o  $PM_{2,5}$ , con tamaños menores que  $2,5 \mu$  y grueso o  $PM_{10}$ , con tamaños de hasta  $10\mu$  (EPA, 2010).



**Figura 7.** Aspiradora y papeles de filtro. El de arriba es para determinar el peso del residuo aspirado; el de abajo permite determinar los tamaños de las partículas.

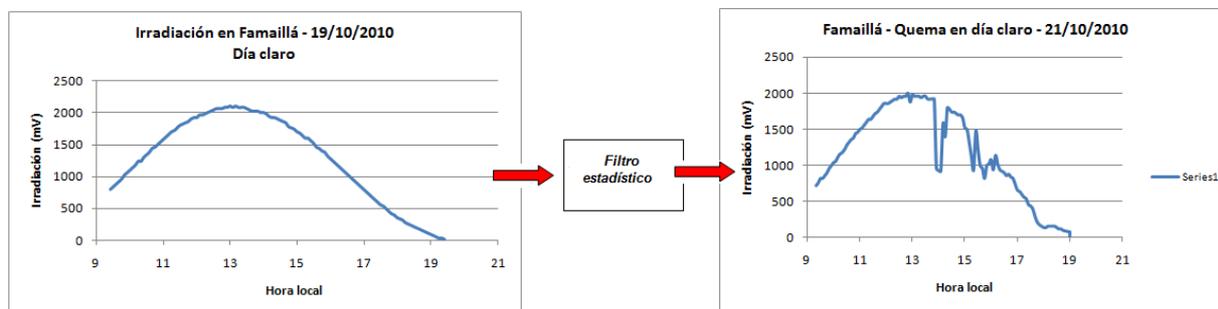
## RESULTADOS

Los datos para 2006 corresponden al mes de agosto, una etapa de plena actividad azucarera y quema masiva de campos en la provincia, dando como resultado una atmósfera más homogénea y altamente contaminada.

Los datos para 2010 comprenden el mes de agosto para la ciudad de Tucumán,

coincidente con actividad azucarera (que inició más temprano) y con el alistamiento de los equipos; las operaciones de campo comenzaron en setiembre de 2010, con quemas más dispersas y en menor número. Esto permitió el registro de días claros, pero complicó el método de determinación del contenido de aerosoles (Figura 6).

La figura 8 permite apreciar, para el caso de Famaillá, la diferencia en registros del radiómetro entre un día claro y un día claro con una quema próxima. Para este último caso, del 21 de octubre de 2010, la cantidad de partículas aspiradas fue de 0,0048 g para un volumen de 18 litros. Al momento de las mediciones (15 horas), el humo del fuego próximo alcanzaba el sitio de radiómetro. También indica la manera en que un modelo de tipo estadístico, es decir que adicionando pesos, puede explicar la curva obtenida en condiciones de contaminación.



**Figura 8.** Caso de dos series de datos para Famaillá, con quema a la derecha y sin quema, a la izquierda. Un filtro (o pesos) estadístico debe ser capaz de explicar la serie de la derecha a partir de la de la izquierda.

La Tabla 1 es un modelo fraccional de atmósfera en función de la altura y su contrapartida en masa de contaminantes sustentada. Esto se basa en el supuesto que si una cierta densidad de aire a una dada temperatura y humedad es capaz de sustentar cierta masa de contaminantes, esta capacidad variará, por consiguiente, con la fracción de atmósfera según se detalla en la tabla. Se parte de una determinación de arranque de 0,0048 g en 18 litros de aire. Sumando y calculando para una columna de 1 m<sup>2</sup> de sección y 200 m de alto, se obtiene una densidad de contaminantes de 340 mg/m<sup>3</sup>.

La tabla 2 proviene de la página de divulgación de la Environmental Protection Agency (EPA, 2010) de los Estados Unidos de Norteamérica y refiere sus estándares nacionales para contaminación por partículas. La cantidad detectada claramente excede estos estándares para los tipos referidos de materia en partículas (PM). El superíndice 2 en la tabla se corresponde con la observación de que dicha cantidad no debe excederse una vez al año en un promedio de tres años.

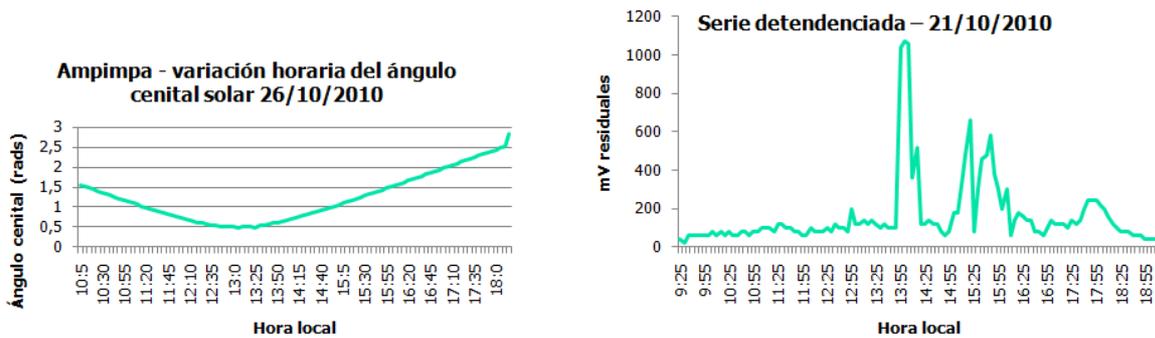
h (km)	Fracción de atmósfera	con 0,0048 grs
0,4	0,960688988	0,266666667
0,42	0,960217025	0,266535566
0,44	0,958329567	0,266011742
0,46	0,956442736	0,265487998
0,48	0,954556531	0,264964428
0,5	0,952670953	0,264441032
0,52	0,950785999	0,263917809
0,54	0,948901669	0,26339476
0,56	0,947017963	0,262871883
0,58	0,945134879	0,262349179
0,6	0,943252416	0,261826648
0,62	0,941370575	0,261304289
0,64	0,939489354	0,260782103
0,66	0,937608751	0,260260088

**Tabla 1.** cálculo fraccional de contenido de partículas en masa por unidad de volumen (densidad), con altura expresada en km y la masa de contaminantes en gramos a partir de una determinación de arranque de 0,0048 gr en 18 litros de aire.

La figura 9 muestra a la izquierda la variación diaria del ángulo cenital y a la derecha la curva remanente de la resta entre las dos series de datos correspondientes a las curvas de la figura 8, lo que estadísticamente se conoce como filtrar la tendencia de la serie de datos de la figura a mano derecha. Se distinguen claramente los picos de máxima concentración de contaminantes.

National Ambient Air Quality Standards for Particle Pollution			
Pollutant	Primary Stds.	Averaging Times	Secondary Stds.
Particulate Matter (PM <sub>10</sub> )	Revoked	Annual (Arithmetic Mean)	
	150 µg/m <sup>3</sup>	24-hour <sup>(2)</sup>	
Particulate Matter (PM <sub>2.5</sub> )	15.0 µg/m <sup>3</sup>	Annual (Arithmetic Mean)	Same as Primary
	35 µg/m <sup>3</sup>	24-hour	

**Tabla 2.** Estándares de calidad del aire para contaminación por partículas.



**Figura 9.** A la izquierda la curva de variación diaria del ángulo cenital para Famaillá el día 26 de octubre de 2010. A la derecha, la serie residual de la eliminación de la tendencia o resta de la curva de la figura 7, izquierda, menos la curva de la Figura 7, derecha, mostrando claramente los picos de máxima concentración de contaminantes.

La figura 10 presenta la transparencia calculada para Famaillá a partir de la serie de datos de Famaillá del 21 del octubre de 2010 (Figura 8, mano derecha). Esta curva presenta en su extremo derecho los efectos

de sombra del atardecer (cerros al Oeste de Famaillá), pero su tendencia a la linealidad (interrumpida por los “valles” que ocasiona el aerosol) refleja el comportamiento de la

irradiación solar al tope de la atmósfera (Figura 5).

Las figuras 11 y 12 presentan algunos resultados para Famaillá, Ampimpa y Tucumán.

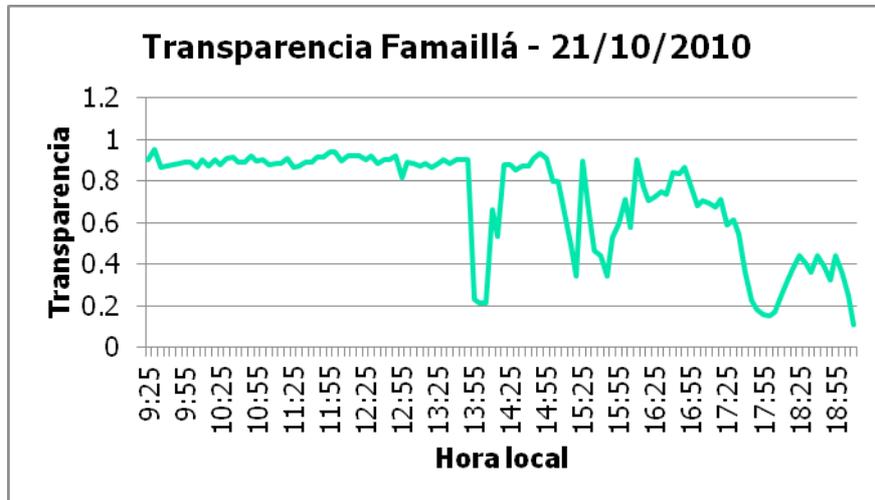


Figura 10. Transparencia calculada para Famaillá utilizando la serie de datos de la Figura 8, mano derecha.

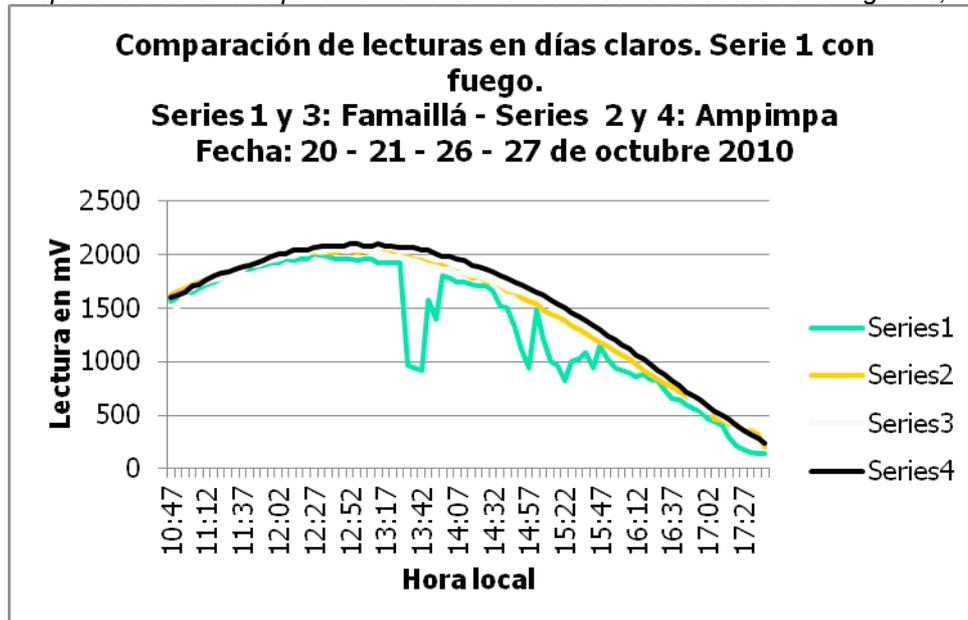
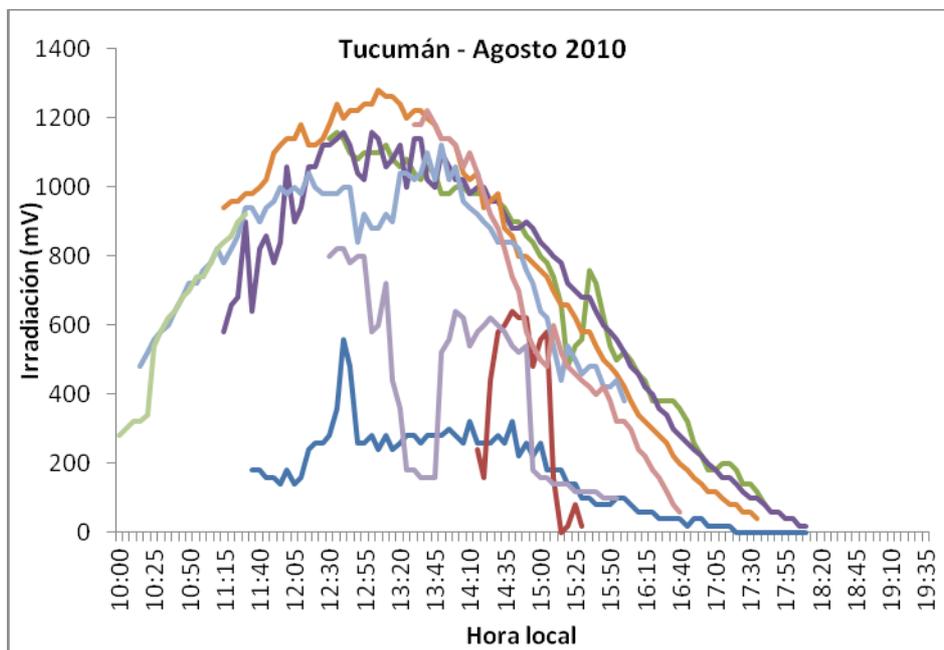


Figura 11. Comparación entre algunos días claros para Famaillá y Ampimpa. Las gráficas incluyen una quema en la llanura.



**Figura 12.** Algunos datos diarios de radiometría para la ciudad de Tucumán, agosto de 2010.

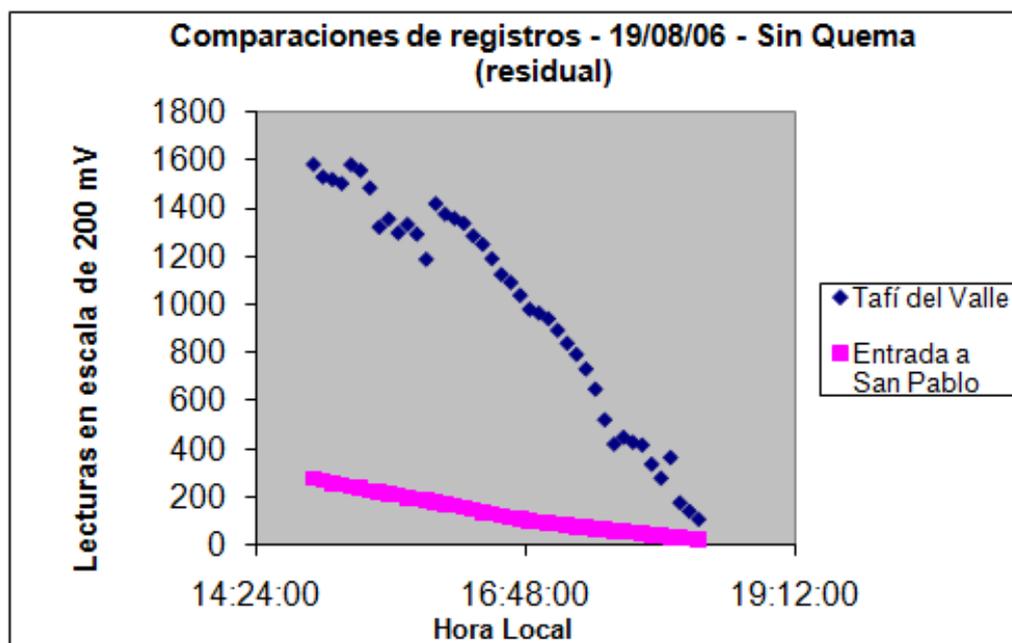
La figura 13 es una gráfica de los registros del 19 de agosto de 2006 para Tafi del Valle y San Pablo donde se aprecia la gran diferencia de valores para los dos sitios.

### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En días claros, todo indica que es muy poca la diferencia en transparencia entre Famaillá en la llanura de piedemonte y Ampimpa en los cerros. A esto se agrega que no hay diferencia entre valores del ángulo cenital solar para ambos sitios, lo que

permite concluir que es muy acertada la elección de Ampimpa como sitio de referencia. Esto coloca a Tucumán en un lugar de privilegio para estos estudios.

Cabe destacar que los productos de la quema pueden incluir partículas mayores que  $10\mu$ , incluso son transportados trozos de hoja de caña quemados (maloja), pero no se sustentan lo suficiente para ser tratados como aerosol. Si bien afectan la transparencia, su contribución a la opacidad no parece ser relevante debido a su baja densidad.



**Figura 13.** Registros del 19 de agosto de 2006; permiten apreciar la enorme diferencia en transparencia entre los dos sitios Tafi del Valle y San Pablo.

La determinación por aspirado de la cantidad de contaminantes que se incorporan a la atmósfera es sólo una calibración de las lecturas del equipo a las condiciones reales. La determinación de la altura de la columna de humo se realizó con el método graficado en la figura 6 (ángulo  $\sigma$  y distancia para determinar h).

Sin embargo, esto sólo indica el contenido de aerosoles hasta los 200 m de altura. Las vistas desde el cerro San Javier (1246 m.s.n.m.), que limita con la ciudad de San Miguel de Tucumán, muestran una atmósfera más clara por encima de esta altura, y esto es constantemente referido por los habitantes. Se ha previsto instalar otro radiómetro en ese lugar. Por ahora se acepta que la contaminación no supera los 2000 m.s.n.m. Esto no es trivial. Resultados del coeficiente de extinción y de retrodispersión con técnicas de radar de luz (LIDAR) publicados por Noh y otros (2009) con fecha del 25 de octubre de 2005, revelan valores casi nulos de ambos coeficientes a alturas de 1700 m.s.n.m. Los aerosoles que estudiaron provenían del norte y este de China y del este de Siberia (quema de bosques y pasturas). Otros autores (Murayama y otros), experimentando con LIDAR sobre Japón,

llegan a resultados similares aunque con un máximo a 1600 m.s.n.m. y un segundo máximo por arriba de los 4000 m.s.n.m. que los autores atribuyen a partículas de menor tamaño. Esto es debatible porque significa – para el caso del humo – que una cierta cantidad de partículas han sido desbastadas durante su permanencia en la atmósfera.

Volviendo sobre la determinación de la densidad de partículas sobre Famaillá del 21 de octubre de 2010: el procedimiento se empleó a los fines meramente ilustrativos. La sustentación de partículas en la atmósfera depende de temperatura y humedad (el hollín adsorbe moléculas de agua), pero es necesario asegurarse que estas correcciones no influyen mucho durante la estación seca. También está la cuestión de la altura de la capa de aerosoles. Si bien es un dato observacional que no parece ir más arriba de los 1260 m.s.n.m., el polvo sí se encuentra a alturas superiores y tampoco puede aseverarse por ahora que ese sea el límite para el humo, aunque todo indique que así sea.

Para la determinación del contenido de partículas es preferible contar con una atmósfera muy contaminada, sin quemas próximas que atraviesen el camino óptico

entre el detector y el sol, como es el caso del registro de la figura 12. Una vez determinado este contenido, queda calibrado el equipo en lo que a total de contaminantes se refiere y es inmediato aplicar estos valores a otras determinaciones de transparencia sin restricciones y calcular los contenidos correspondientes.

#### REFERENCIAS

- Arvesen, J.C., Griffin, R.N. Jr. y Pearson, B.D., Jr., 1969. *Determination of Extraterrestrial Solar Spectral Irradiance from a Research Aircraft*. *Applied Optics*, 8, (11):2215 - 2232.
- Environmental Protection Agency (EPA), 2010. *PM Standards*, página web: <http://www.epa.gov/pm/standards.html>
- Green, D. W. E., 1992. *Magnitude Corrections for Atmospheric Extinction*. *International Comet Quarterly*, 14: 55–59.
- Noh, Y.M., Müller, D., Shin, D.H., Lee, H., Jung, J.S., Lee, K.H., Cribb, M., Li, Z. y Kim, Y.J., 2009. *Optical and Microphysical Properties of Severe Haze and Smoke Aerosol Measured by Integrated Remote Sensing Techniques in Gwangju, Korea*. *Atmospheric Environment*, 43:879-888. [www.elsevier.com/locate/atmosenv](http://www.elsevier.com/locate/atmosenv)
- Murayama, T., Müller, D., Wada, K., Shimizu, A., Sekiguchi, M. y Tsukamoto, T., 2004. *Characterization of Asian dust and Siberian smoke with multiwavelength Raman lidar over Tokyo, Japan in spring 2003*. *Geophysical Research Letters*, 31:L23103, doi: 10.1029/2004GL021105.