

MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA EVALUACIÓN DE LA POLUCIÓN ATMOSFÉRICA CAUSADA POR LA QUEMA DE BIOMASA EN PLANTACIONES DE CAÑA DE AZUCAR*

ALTERNATIVE METHOD TO ASSESS ATMOSPHERIC POLLUTION CAUSED BY BIOMASS BURNING, IN SUGARCANE ZONES

A. A. Santucho Cainzo ^{a,b}, L. F. Calderari ^{a,b}, D. H. Corregidor Carrió ^{a,b} y E. M. Jaén ^{a,b}, **

a Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión e Instituto de Luz, Ambiente y Visión
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología - Universidad Nacional de Tucumán – CONICET -
b Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología – Universidad Nacional de Tucumán
Av. Independencia 1800 - (4000) Tucumán - Argentina

Recibido: 23/07/18; aceptado: 21/03/19

Se describe un método alternativo para la evaluación de los niveles de polución atmosférica causada por la quema de cañaverales en época de zafra, que disminuyen la visibilidad en poblaciones aledañas. Para ello se recopilan muestras de depósito del material dispersado en la atmósfera, sobre portaobjetos expuestos, con distintos tiempos de integración. Se mide luego, la distribución de la luz difundida por estas muestras con un dispositivo goniométrico digital, que desplaza una CCD alrededor de la muestra, con resolución de 2,0 min arco. Las mediciones de difusión revelan que es posible discriminar entre muestras de 12, 24, 36 y 48 horas de integración. El método resulta más sensible porque integra en el tiempo, aún concentraciones pequeñas de contaminantes. A partir del modelo de difusión de Beer-Lambert, se relaciona la luz difundida por las muestras con el coeficiente de extinción atmosférica y la visibilidad meteorológica medida en esos mismos días, obteniendo un buen ajuste lineal para los distintos tiempos de integración ($R^2 > 0,94$). Finalmente, los niveles de difusión medidos se comparan con los de la difusión intraocular, calculados a partir de la ecuación CIE, obteniéndose valores similares a los de ojos de personas de 80 años de edad.

Palabras claves: visibilidad, polución atmosférica, difusión de la luz.

This paper describes an alternative method to assess atmospheric pollution levels caused by the burning of sugar cane fields during the harvest, affecting visibility in nearby residential areas. The samples of atmospheric dispersed material were taken on glass slides exposed to the environment on different periods of time. The scattered light by these samples is measured using a digital goniometric device that moves a CCD around each sample with 2,0 arc min resolution. Scattering measurements reveals that it is possible to differentiate between the samples of 12, 24, 36 and 48 hours of integration. This method is more sensitive because it integrates through time, even when the concentrations of contaminants are low. Based on Beer-Lambert scattering model, the scattered light on the samples is related to the atmospheric extinction coefficient and the meteorological visibility measured in the same days. A good linear correlation for the different time periods ($R^2 > 0.94$) was obtained. Finally, measured scattering levels were been compared to the intraocular scattering ones calculated from CIE equation, obtaining similar values to eyes of 80 years old people.

Keywords: visibility, atmospheric pollution, light scattering.

I. INTRODUCCIÓN

El problema de la polución atmosférica y la visibilidad en rutas.

La quema de biomasa, que incluye vegetación viva o muerta, por medio de incendios es una práctica común que no está restringida a una región geográfica en especial, se produce en todo el mundo, es generadora de gases de efecto invernadero y la mayor fuente de contaminación atmosférica a escala continental.

Los aerosoles liberados por la quema de biomasa contienen gases de efecto invernadero, gases

químicamente activos, material de particulado fino y compuestos gaseosos como óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y una serie de compuestos volátiles y semi volátiles conocidos por sus efectos adversos sobre la salud¹.

La quema de pastizales y bosques asociados al avance de la frontera agrícola y las prácticas de quemados de residuos agrícolas son relevantes en la región, producen contaminación con impacto sobre los ecosistemas, sobre la salud de las poblaciones cercanas, con efectos tales como irritación de ojos y piel, disminución de la visibilidad en

*Una versión preliminar de este trabajo fue presentada en el 1er. Taller latinoamericano sobre Ciencias de la Visión - In VisionT-. San Miguel de Tucumán, Octubre de 2017.

**mjaen@herrera.unt.edu.ar

rutas y caminos, dificultades respiratorias, daños directos en plantas, animales y personas en general, llegando a generar efectos en el clima global¹.

En la provincia de Tucumán, una práctica generalizada es la quema de caña de azúcar en pie (Fig.1), con el objeto de eliminar residuos vegetales y malezas que interfieren en la cosecha de los tallos, aumentando así, la eficiencia de la recolección. Los desechos provenientes de estas quemaduras se diseminan en la ciudad de San Miguel de Tucumán, durante la época de zafra, (entre los meses de Julio a Septiembre de cada año), como finas partículas carbonizadas que permanecen suspendidas en la atmósfera, con una precipitación lenta en general, a menos que sean arrastradas por lluvia. Esto ocasiona una disminución global de la visibilidad de los conductores de vehículos en una ruta, de peatones en una ciudad o de obreros en sus puestos de trabajo.



Figura 1. La quema de cañaverales en Tucumán produce una reducción muy grande de la visibilidad. Imagen extraída del diario "La Gaceta" del 22-8-17.

Las partículas sólidas se depositan, por ejemplo, en parabrisas de automóviles, dando lugar a efectos perceptuales adversos tales como deslumbramiento, molestias visuales del conductor o disminución del contraste, en especial de las frecuencias espaciales más altas de la escena visual.

En este trabajo se analiza especialmente el efecto visual de la contaminación atmosférica que se interpone en el camino de la información visual que va desde el estímulo hasta el sistema visual y que produce difusión (scattering, en inglés) de la luz. Como consecuencia, se constata una disminución del contraste del estímulo respecto al fondo y la pérdida de los detalles más finos del estímulo. Esto puede dar origen, también, a una errónea estimación de tamaños y distancias (y por lo tanto de velocidades), por parte de los conductores en rutas, con peligrosas consecuencias.

El único parámetro relacionado con el fenómeno de la quema de biomasa que es monitoreado de manera regular en el Aeropuerto Benjamín Matienzo (a 10 km al SE de la ciudad de San Miguel de Tucumán) por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), es la medida de la visibilidad meteorológica, in situ y en tiempo real².

La visibilidad, definida originalmente con fines meteorológicos como una magnitud que debe estimar un observador humano, involucra factores físicos y

psicofísicos^{3,4}. La Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) define la "visibilidad meteorológica" como la distancia horizontal a la que un objeto negro de dimensiones adecuadas puede verse y reconocerse contra el cielo del horizonte^{5,6}. La "visibilidad meteorológica durante el día" y la "visibilidad meteorológica durante la noche" se definen de igual manera, referidas a "un fondo de cielo claro (durante el día)" o "que puede reconocerse durante la noche, si la iluminación general se elevase al nivel diurno normal"^{3,6}. Pero si la estimación de la visibilidad la realiza un ser humano, ésta queda sujeta no sólo al factor de transmisión del medio o a las características de la fuente de luz, sino también a la percepción visual del individuo (sensibilidad al contraste, agudeza visual)⁷ y a su capacidad interpretativa (subjetiva). Es de esperar, entonces, que toda estimación visual de la visibilidad realizada por un observador humano resulte subjetiva, aunque se consiga un buen entrenamiento. Sin embargo, se sigue usando y dentro de la precisión con que se determina, resulta útil porque, en el momento y en el lugar adecuado, reproduce la visibilidad de un piloto en maniobras de despegue o aterrizaje en pista.

Por otra parte, la magnitud meteorológica correspondiente, que es la transparencia de la atmósfera, representada por el alcance óptico meteorológico (MOR, por sus siglas en inglés)^{3,4} puede medirse objetivamente y no se identifica necesariamente con la "visibilidad meteorológica". El MOR se define como el espesor de la capa de atmósfera necesaria para reducir el flujo de un haz de luz colimado procedente de una lámpara incandescente (temperatura de color 2700K), hasta el 5% de su valor inicial en luminancia, según la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)^{5,6}.

El tema se viene estudiando desde hace mucho tiempo, especialmente en referencia a medios con altas concentraciones de centros difusores, tales como la niebla o el humo, se han desarrollado nuevos dispositivos de medición, sin embargo, siguen vigentes las dificultades prácticas que se plantean con las mediciones y la validez de los modelos que se usan.

Tanto la visibilidad meteorológica como el MOR están determinados, principalmente, por la presencia de partículas sólidas y líquidas que se mantienen en suspensión en la atmósfera. La atenuación de un haz de luz que atraviesa una atmósfera de estas características se debe tanto a la absorción de la luz por parte del material sólido disperso, como al cambio en la dirección de propagación del haz incidente - difusión de la luz - por interacciones reiteradas con los centros difusores sólidos o líquidos.

En general, puede modelarse en forma sencilla, la atenuación que sufre un haz de luz monocromática de intensidad I_0 en un medio homogéneo con partículas distribuidas al azar que no interactúan entre sí, suponiendo un decrecimiento exponencial de la intensidad de luz que llega al detector (ojo del observador). Esto se expresa en la ley de Beer-Lambert⁸ (ec. 1), donde I_x es la intensidad de luz de la fuente luego de atravesar el medio de espesor "x" con partículas suspendidas que difunden y absorben la luz, caracterizado por el coeficiente de extinción σ_{ext} que puede considerarse como suma de estos dos efectos. Entonces:

$\sigma_{ext} = \sigma_{abs} + \sigma_{dif}$, donde σ_{abs} representa el coeficiente de absorción y σ_{dif} el coeficiente de difusión^{5,6}.

$$I_x = I_o \cdot e^{(-\sigma_{ext} \cdot x)} \quad (1)$$

La CIE⁶ y la Organización Meteorológica Mundial (WMO)^{3,4} establecen que el contraste mínimo que debe tener un objeto negro respecto al cielo claro (fondo), para ser visto, es del 5%, valor que se toma como referencia en la ley de Koschmieder⁴⁻⁶ (ec. 2). Esta ley, derivada de la ec. 1, define entonces, la visibilidad meteorológica (V_{met}) como la distancia máxima a la cual se reconoce un objeto, con un contraste $C = 0,05$ respecto al fondo del cielo claro, siendo σ_{ext} el coeficiente de extinción del medio.

$$V_{met} = -\frac{\ln 0,05}{\sigma_{ext}} \quad (2)$$

Otros autores, sin embargo, consideran más adecuado un contraste $C = 0,02$ como referencia en la ley de Koschmieder (ec. 2)^{8,9}. En realidad, el problema es, como se dijo antes, que el contraste umbral, contraste mínimo requerido para diferenciar un objeto del fondo, varía de un sujeto a otro.

En general, los instrumentos usados para medir el coeficiente de extinción (σ_{ext}) de la atmósfera y determinar la visibilidad⁸⁻¹⁴, miden la atenuación de la intensidad de un haz de luz debida a la absorción y a la difusión de la atmósfera. Entre ellos se pueden distinguir: a) los de tipo telefotométricos, que comparan la luminancia aparente de un objeto distante con la del fondo del cielo; b) los transmisómetros, que miden en línea recta la pérdida de intensidad de un haz luminoso colimado; c) los medidores de difusión, análogos a los transmisómetros, pero donde el transmisor y el receptor forman un ángulo entre 90° y 120° entre sí; d) los de tecnología LIDAR, que pueden usarse para medir visibilidad cuando el haz se dirige horizontalmente, miden la intensidad de una señal retrodifundida a una distancia conocida⁴.

En los instrumentos del primer tipo (a) se utilizan cámaras automatizadas que monitorean la visibilidad diurna enfocando un objeto a distancia conocida y midiendo su contraste con el cielo de fondo. En particular, Du⁹ propone medir la luminancia de dos objetos en línea recta y comparar con la luminancia del cielo de fondo para determinar su contraste. Instrumentos de tipo (b) miden la intensidad de luz que llega a una cámara CCD u otro tipo de sensor, ubicado en línea recta con el emisor, en cambio instrumentos de tipo (c) ubican el sensor en diferentes ángulos respecto a la dirección de emisión y de este modo se mide, no sólo la transmitancia del medio en la dirección de visión, sino también la intensidad de luz difundida en diferentes ángulos^{12,15,16}. Los sistemas actuales emplean sensores en ángulos fijos de medición en forma automatizada, donde el rango y la resolución de las mediciones están limitados por el número de sensores¹²⁻¹⁶. Estos métodos permiten, además, estudiar concentraciones, distribuciones de tamaños de partículas y su composición, mediante modelos simplificados y empleando dispositivos que miden, además, algunas características de las partículas.

En Argentina, el SMN mide y publica los datos oficiales de visibilidad meteorológica, registrando, cada hora, la visibilidad: a) por "estima", b) por "estima e instrumento", c) por "instrumento", en todos los

aeropuertos del país, ya que son cruciales en los procedimientos de despegue y aterrizaje de aviones. Únicamente los tres principales aeropuertos de Argentina utilizan sistemas tipo (b) y (c), el resto sólo cuenta con el método (a)².

En particular, en el aeropuerto de Tucumán, la visibilidad se determina por estima: el operador de turno observa el horizonte a intervalos de una hora y determina la visibilidad mínima tomando como referencia el objeto más lejano de los que le son visibles a su alrededor. Durante la noche se toman como referencia objetos luminosos lejanos. Como se analizó anteriormente, las estimaciones realizadas por un observador dependen de las capacidades visuales del sujeto, lo cual limita esta metodología a los fines para los que se usa⁴.

El objetivo de este trabajo es, entonces, proponer una forma más adecuada de evaluar los efectos producidos por la quema de cañaverales en la visibilidad de las personas, en especial conductores de vehículos, caracterizando ópticamente la luz difundida por los depósitos originados en estos procesos. Se tratarán de correlacionar luego, los resultados obtenidos con datos de la visibilidad del SMN.

En una comparación de distintos métodos de medición de la visibilidad, reciente¹², se muestra que los métodos de estimación de la polución ambiental son locales y se llevan a cabo en tiempo real, miden la visibilidad en un momento y en un lugar determinado y no son sensibles a bajas concentraciones de contaminantes. Xu, en ese estudio, encuentra buena coincidencia entre mediciones de bajas visibilidades (alta contaminación) pero para visibilidades mayores a 7 km, los resultados son muy divergentes.

A partir de este análisis, se propone un método alternativo para evaluar la polución atmosférica, aún en condiciones de baja concentración de contaminantes, introduciendo una "integración temporal" que considera los efectos acumulativos de la polución, tal como sucede en el parabrisas de un automóvil en el que se depositan partículas durante el tiempo en que está expuesto. La hipótesis planteada considera que una medición de este tipo puede estimar mejor la afectación del estado general del ambiente, caracterizando periodos de tiempos mayores, que consideran los efectos globales de la quema, teniendo en cuenta el impacto que produce la suma de pequeñas quemadas cercanas, en este caso, a la ciudad de San Miguel de Tucumán¹. Como resultado se obtiene un método más sensible a bajos niveles de polución ya que acumula las partículas de contaminantes, aun cuando su cantidad en el ambiente es reducida.

Con este propósito, se recolectan muestras de depósito de polución en portaobjetos de vidrios colocados al aire libre durante distintos periodos de tiempo y se mide la difusión de la luz, producida por las partículas acumuladas, en distintas direcciones y en forma automatizada. De esta manera, el método no está limitado a medir sólo extinción por absorción, pudiéndose caracterizar mejor el medio difusor. A partir de estos datos se puede construir una función que permita comparar los resultados con la visibilidad meteorológica.

Finalmente, para evaluar el efecto de la polución en la percepción visual, se compara la difusión que provoca un depósito de polución ambiental (externa al ojo) con la

difusión intraocular en el ojo humano, que se genera por la opacidad natural del cristalino con la edad. Los datos de la difusión intraocular se obtienen a partir del modelo de Vos y van den Berg¹⁷, aceptado por la CIE y siguiendo el criterio de De Wit¹⁸.

II. METODOLOGIA Y ARREGLO EXPERIMENTAL

Dispositivo goniométrico automatizado.

Para llevar a cabo las mediciones de la luz difundida por las muestras con polución se utilizó un dispositivo goniométrico digital (también conocido como escatómetro), desarrollado previamente¹⁹ (Fig.2).

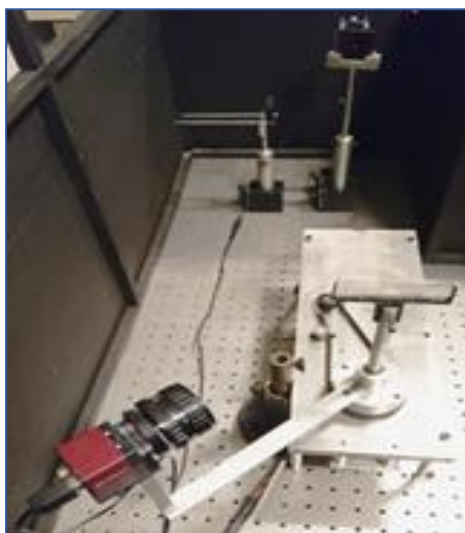


Figura 2. Dispositivo goniométrico digital (escatómetro) desarrollado en el Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión (UNT-CONICET) en colaboración con el Centro de Desarrollo de Sensores Ópticos de la Universidad Politécnica de Cataluña (Terrassa, España).

Este dispositivo permite medir la distribución angular de la radiación difundida por una muestra iluminada con un haz de luz monocromático colimado, proveniente de un diodo láser colocado en una posición fija. La muestra del material a ser analizado se coloca en un soporte, alrededor del cual se desplaza una cámara CCD que se utiliza como sensor, accionada por un motor paso a paso, que permite un amplio rango angular de registro (340°), según se indica en la Fig. 3.

Una cámara CCD con un objetivo enfocado al infinito, registra y almacena los datos de la distribución de la radiación incidente en el plano focal imagen, posibilitando de esta manera una mejor discriminación de la luz procedente desde distintos ángulos. El funcionamiento del dispositivo y el registro de los datos se controlan con un software desarrollado para tal fin¹⁹.

Dado que el paso del motor es de $0,5^\circ$, las sucesivas mediciones de la CCD se solapan y se dispone de registros diferentes correspondientes a un mismo ángulo, medidos desde posiciones contiguas de la CCD, que pueden ser promediados. Al finalizar cada medición, el software guarda los datos que proveen la información de la intensidad registrada correspondiente a cada ángulo con una resolución de $2,0$ min de arco.

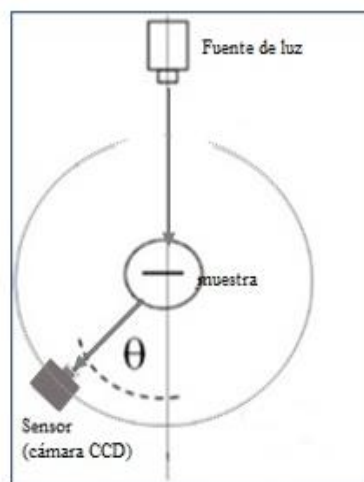


Figura 3. Esquema del dispositivo goniométrico donde se indican las posiciones relativas de la fuente de luz, el soporte porta-muestras, la cámara CCD y su desplazamiento angular.

Recolección y medición de muestras de depósito de polución ambiental

Se recogen muestras de depósito del producto de la quema de caña colocando portaobjetos de vidrio en dos lugares diferentes de la ciudad de San Miguel de Tucumán: uno ubicado en un barrio periférico de la ciudad (sitio A) y otro en la zona céntrica (sitio B). Estas ubicaciones fueron seleccionadas teniendo en cuenta las siguientes condiciones: que fueran lugares abiertos que permitieran una libre deposición de las partículas en suspensión, que no presentaran interferencia de techos o árboles y a la vez que estuvieran, en lo posible, protegidas del viento. La recolección se realiza en días sin lluvias, sin viento y con humedad ambiente inferior al 50%, según datos del SMN²⁰. Los portaobjetos de vidrio son expuestos en períodos de tiempo de: 12, 24, 36, 48, 60, 72 y 84 horas.

La recolección de las muestras se realiza en los dos sitios en forma programada e ininterrumpida a las 7:00 h y a las 19:00 h, cada día. El período total de recolección de muestras se extiende por 4 días desde el 4/9 al 8/9 de 2017, dentro del período de zafra de ese año. En total, en los dos sitios se recogen 34 muestras distribuidas de la siguiente manera: 16 muestras de 12 h de depósito (8 en el sitio A y 8 en el sitio B), 6 muestras de 24 h de depósito (3 en A y 3 en B), 3 muestras de 36 h de depósito recogidas en B (se tuvieron que descartar las muestras recogidas en A), 4 muestras de 48 h de depósito (1 en A y 3 en B), 2 muestras de 60 h de depósito (1 en A y 1 en B), 2 muestras de 72 h de depósito (1 en A y 1 en B) y 1 muestra de 84 h de depósito recogida en B. Al momento de la recolección, sobre cada portaobjetos que contiene el depósito de polución se coloca otro portaobjetos de vidrio nuevo y se sellan los bordes asegurando la inmovilización de las partículas depositadas y posibilitando su posterior medición. También se armaron tres muestras con portaobjetos limpios (sin uso) para corregir los datos por difusión de la luz en el vidrio limpio.

Las mediciones realizadas en el sistema goniométrico descrito más arriba permiten caracterizar la difusión producida por las muestras recolectadas. Se determina así,

la Función de Distribución Bidireccional de Difusión (BSDF- Bidireccional Scattering Distribution Function)²¹ que incluye tanto la distribución de la radiación reflejada como de la radiación transmitida por el difusor y depende de la posición angular del haz incidente y del emergente en el punto de medición ($\theta_i, \phi_i, \theta_e, \phi_e$).

Como la muestra a medir se coloca en un plano perpendicular al haz incidente y la geometría del sistema tiene simetría de revolución, la BSDF es sólo función de θ_e y resulta equivalente a la Función de Punto Extendido (Point Spread Function), PSF (θ)^{22,23}, medida en el plano focal del sistema óptico, que coincide con el plano de los sensores CCD.

En los sistemas ópticos es común trabajar con la PSF(θ) para caracterizar la función de transferencia de un sistema óptico centrado, ya que la PSF se define como la función imagen de un objeto puntual y depende de las coordenadas espaciales del objeto y de la imagen^{22,23}. Esta función puede calcularse, por lo tanto, usando la ec. 3, donde T es la transmitancia (medida) de la muestra.

$$PSF(\theta) = \frac{BSDF(\theta)}{T} \quad (3)$$

Para corregir estos valores por la difusión del vidrio que se usa como soporte de las muestras de depósito y el haz directo de la fuente, se mide la función $PSF_o(\theta)$ de muestras limpias, con vidrios nuevos y se restan, punto a punto, del valor medido de la función $PSF(\theta)$. Finalmente se normalizan los datos al valor máximo, obtenido para ángulos próximos a 0° , definiendo de esta manera la función $f(\theta)$ según la ec. 4, donde el subíndice n denota el tiempo de integración en horas ($n= 12, 24, 36, 48, 60, 72$ y 84) y permite identificar las funciones $f(\theta)$ obtenidas.

$$f_n(\theta) = \frac{(PSF_n(\theta) - PSF_o(\theta))}{PSF_{max}(\theta_{max})} \quad (4)$$

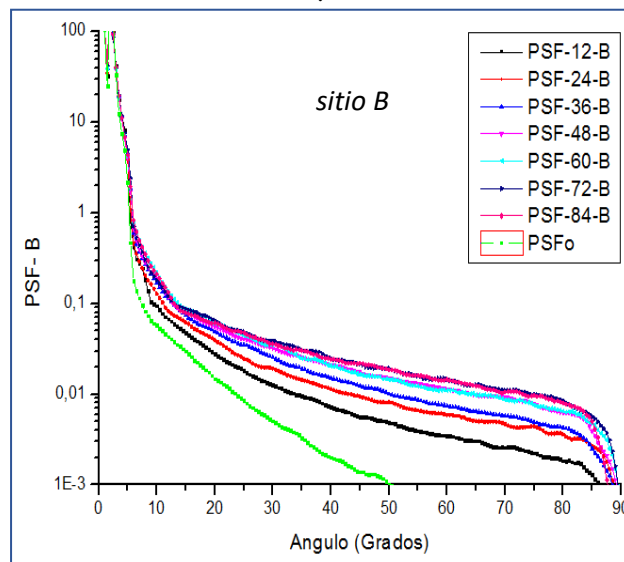
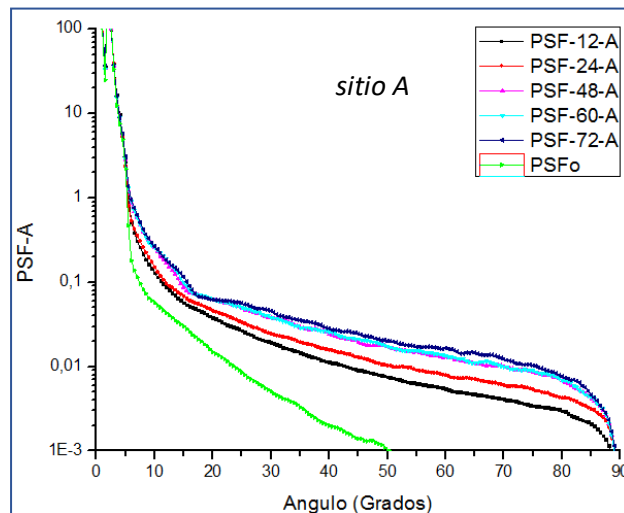
Se utiliza, además, el promedio de las mediciones correspondientes a cada ángulo, en muestras de igual período de integración.

III. RESULTADOS

Análisis comparativo de muestras de distintos tiempos de integración. Efecto de saturación.

Utilizando el dispositivo goniométrico descrito en la sección 1, se miden las funciones BSDF (θ) de todas las muestras recolectadas con depósitos de diferentes tiempos de integración, así como las muestras limpias de referencia. En este caso se utilizan los datos de la BSDF(θ) correspondientes a la transmisión, medidos desde la dirección del haz incidente (0°) hasta el plano de la muestra (90°) y se calculan las funciones PSF(θ) (ec. 3), para cada tiempo de acumulación y para cada sitio de recolección (Figs 4 y 5). En ambas figuras se observa que la difusión de las distintas muestras puede discriminarse para ángulos mayores a 20° . Para esos ángulos se distingue, claramente, que las muestras con mayor tiempo de depósito presentan valores de PSF más altos, o sea, mayor difusión de la luz. Las PSF(θ) correspondientes a las muestras de 12, 24, 36 y 48 horas de depósito se identifican fácilmente, sin embargo las de 60, 72 y 84 horas se superponen en casi todo el rango de medición. Esto puede interpretarse como un efecto de saturación debido a una posible superposición de partículas

en muestras con tiempos de exposición prolongados, pero también a una equiparación de las tasas de depósito y de extracción de las partículas de la superficie de la muestra por corrientes de aire.



Figuras 4 y 5. Funciones PSF (θ) entre 5° y 90° , para muestras de 12, 24, 36, 48, 60, 72 y 84 horas de depósito recogidas en los sitios: A (Fig. 4) y B (Fig. 5). Se agrega la $PSF_o(\theta)$, promedio de tres muestras limpias.

Para analizar el efecto del sitio de recolección se realiza un análisis ANOVA de los datos obtenidos en el sitio A y en el sitio B para las muestras de 12 h, 24 h y 48 h de integración, obteniéndose probabilidades muy altas de que ambos grupos de muestras sean parte de una misma distribución (con $p > 0,7$ en todos los casos). Teniendo en cuenta estos resultados, queda claro que los sitios son indistinguibles y en adelante se consideran los promedios de todas las muestras, para cada tiempo de integración.

Las funciones de difusión $f_n(\theta)$ calculadas según la ec. 4, medidas para ángulos entre 20° y 80° (Fig. 6), evidencian que la difusión de las muestras en estas direcciones es significativa para todos los tiempos de integración utilizados (entre 12 y 84 h).

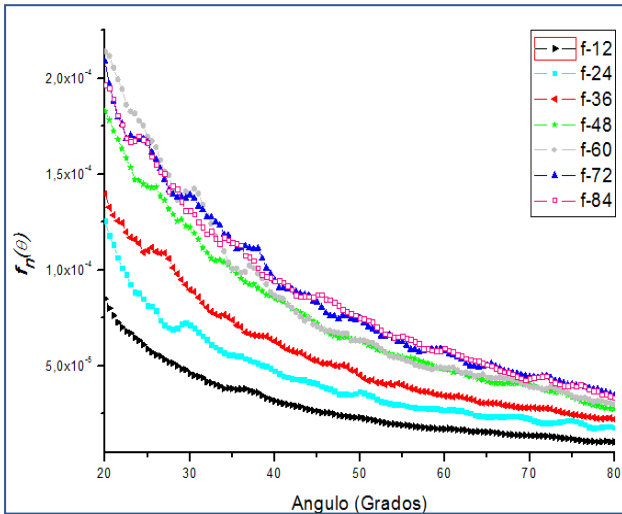


Figura 6. Funciones de difusión $f_n(\theta)$ entre 20° y 80° , de las muestras correspondientes a todos los tiempos de integración utilizados. Se identifica claramente el comportamiento de las muestras de 12, 24, 36 y 48 horas, sin embargo, se hace difícil diferenciar las muestras de 60, 72 y 84 horas.

En la Fig. 6 pueden verse claramente diferenciados los comportamientos de las muestras de 12, 24, 36 y 48 horas y aun cuando los valores de las $f_n(\theta)$ decaen mucho en las proximidades de 80° , las diferentes funciones no se superponen. Para tiempos de integración de 60, 72 y 84 horas, en cambio, la difusión producida por las diferentes muestras, es similar y las gráficas se superponen en todo el rango de medición.

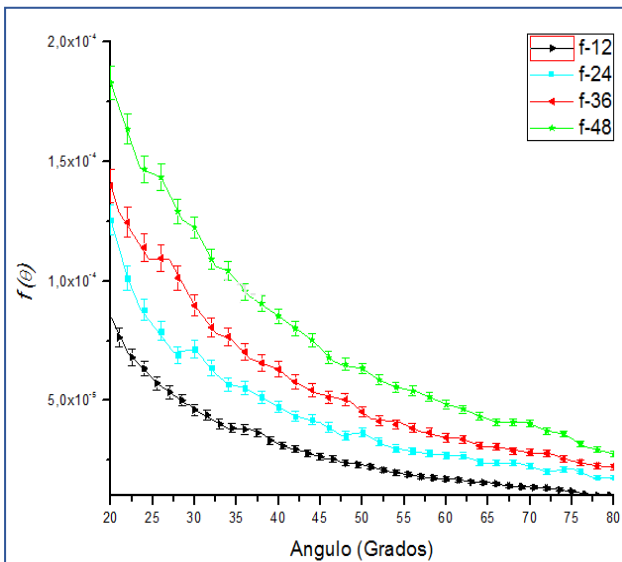


Figura 7. Funciones $f_n(\theta)$ entre 20° y 80° , correspondientes a muestras con tiempos de integración de 12, 24, 36 y 48 horas, seleccionadas para el análisis. Se indica la desviación estándar de los datos en cada punto medido experimentalmente.

Este comportamiento, como ya se dijo, puede interpretarse como efecto de una saturación en las muestras con mayores tiempos de exposición, de lo cual se podría concluir, en esta primera aproximación, que depósitos de menos de 48 h son los que resultan de utilidad a los fines de este trabajo.

A partir de estos resultados, se seleccionan para el análisis posterior las funciones $f_n(\theta)$ correspondientes a muestras con tiempos de integración entre 12 y 48 horas, en el intervalo $(20^\circ, 80^\circ)$, que se representan en la Fig.7. En ellas se muestra la desviación estándar de los datos en cada punto, lo que confirma una adecuada resolución de las distintas funciones de difusión.

Para evaluar la dependencia de las funciones $f_n(\theta)$ con el tiempo de integración se analiza la evolución de los valores de $f_n(\theta)$ entre 12 h y 48 h, para diferentes ángulos seleccionados entre 20° y 80° y los correspondientes ajustes (Fig. 8).

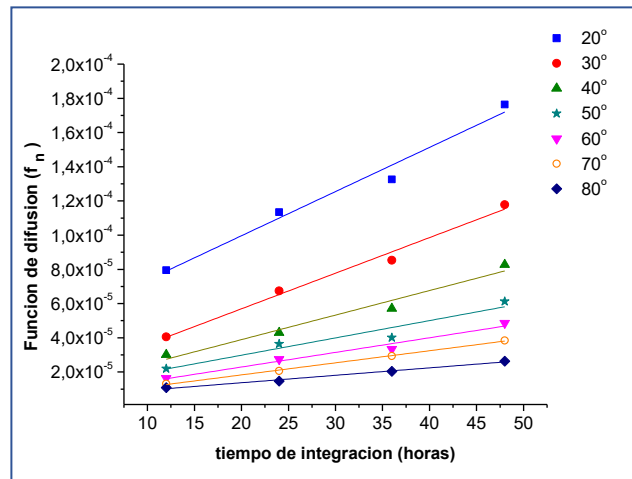


Figura 8. Evolución de los valores que toma la función $f_n(\theta)$ en función del tiempo de integración, entre 12 h y 48 h. (para ángulos θ entre 20° y 80°). Se agregan las rectas de ajuste correspondientes a todos los ángulos seleccionados.

Se observa, en efecto, un claro incremento lineal de los valores de $f_n(\theta)$ con el tiempo de integración, en el intervalo seleccionado y para todos los ángulos representados. En particular, para ángulos pequeños (20° , 30° y 40°) el crecimiento es mayor: el valor de $f_n(20^\circ)$ para muestras de 48 horas de depósito es más del doble que para muestras de 12 horas. Para ángulos más grandes, el crecimiento es menor, pero los datos no se cruzan y las rectas de ajuste tampoco (Fig. 8).

Para mayor detalle, en la Tabla I se especifican los valores de los parámetros de cada recta de ajuste y los coeficientes de regresión correspondientes. Las pendientes decrecen desde $(2,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-6}$ a $(0,43 \pm 0,03) \cdot 10^{-6}$ en forma sistemática, por lo tanto, no se confunden. Se corrobora, de esta manera, que la medición de la luz difundida en ángulos mayores a 20° permite discriminar con claridad la integración de los depósitos.

Si bien se esperaría que, para tiempos de integración muy pequeños, la función de difusión tienda a cero, las intersecciones con el eje de las diferentes rectas de ajuste no son nulas (Tabla I) y asumen valores diferentes.

Si se hace el análisis considerando los datos de todas las muestras medidas, incluyendo las muestras con tiempos de integración entre 60 h a 84 h, el ajuste más apropiado resulta ser de tipo: $y = A(1 - e^{-bt})$, lo que confirmaría la hipótesis de la saturación de las muestras para esos tiempos de integración, con una dependencia casi lineal para valores de tiempo pequeños.

TABLA I. PARÁMETROS DE AJUSTE Y COEFICIENTES DE REGRESIÓN CORRESPONDIENTES A $f_n(t)$ PARA LOS ÁNGULOS SELECCIONADOS (FIG. 8).

Ángulo	$f_n = A \cdot t + B$		
	A ($\times 10^{-06}$) (pendiente)	B ($\times 10^{-5}$) (intersección)	R ²
20°	(2,6 ± 0,3)	(7 ± 1)	0,969
30°	(2,1 ± 0,2)	(3,5 ± 0,5)	0,983
40°	(1,4 ± 0,2)	(2,8 ± 0,6)	0,954
50°	(1,0 ± 0,2)	(2,0 ± 0,6)	0,904
60°	(0,9 ± 0,1)	(1,8 ± 0,3)	0,960
70°	(0,71 ± 0,02)	(1,6 ± 0,6)	0,998
80°	(0,43 ± 0,03)	(1,0 ± 0,1)	0,986

Para corroborar estos resultados será necesario contar con datos de nuevas muestras que confirmen (o no) este comportamiento.

Comparación de los resultados con datos de visibilidad meteorológica

Para analizar una posible correlación entre la difusión de la luz que producen las muestras de polución acumulada y la visibilidad meteorológica, es necesario hacerlo a partir del modelo y las leyes de Beer – Lambert (ec. 1) y de Koschmieder (ec. 2), que suponen que $\sigma_{ext} = (\sigma_{abs} + \sigma_{dif})$ es el parámetro que da cuenta de la concentración de partículas suspendidas en la atmósfera, que da origen a una determinada visibilidad atmosférica^{5,8}.

TABLA II. INVERSA DE LA VISIBILIDAD METEOROLÓGICA, MEDIDA POR EL SMN²⁰ CADA HORA, EN LAS FECHAS DEL EXPERIMENTO Y TOTAL CORRESPONDIENTE A CADA INTERVALO DE 12h.

Hora/ Intervalo	V ⁻¹ [$10^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$]						
	1	2	3	4	5	6	7
1:00	1,43	1,67	1,25	10,0	2,00	2,00	2,00
2:00	2,00	1,67	1,25	5,00	2,50	1,67	2,00
3:00	1,67	1,67	1,67	2,50	2,50	1,67	2,00
4:00	1,67	1,43	1,25	2,50	2,00	1,67	2,00
5:00	1,67	1,43	1,67	2,00	2,50	1,67	2,00
6:00	0,77	1,43	1,67	2,00	2,50	1,67	2,00
7:00	2,00	1,43	1,67	2,00	2,50	1,67	1,67
8:00	2,00	1,43	2,00	2,00	1,43	1,67	1,67
9:00	2,00	1,43	2,50	2,00	1,43	1,67	2,00
10:00	2,50	1,11	2,50	2,00	1,43	1,67	2,00
11:00	2,50	1,11	2,50	2,00	2,00	1,67	1,67
12:00	2,00	1,11	2,50	2,00	2,00	1,67	1,67
$\sum_{j=1}^{12} V_j^{-1}$	22,2	16,9	22,4	36,0	24,8	20,3	22,7

A partir de la ec. 2 y utilizando los datos de la visibilidad meteorológica del SMN²⁰, se pueden calcular los valores $\sigma_{ext,j}$, según se indica en la ec. 5, donde V_j^{-1} es la inversa de la visibilidad meteorológica medida cada hora por el SMN (TABLA II) y $A = (-\ln 0,050) = (3,00 \pm 0,01)$.

$$\sigma_{ext,j} = A \cdot (V_j^{-1}) \quad (5)$$

A partir del modelo de Beer – Lambert y de Koschmieder⁵, se podría definir un parámetro equivalente para las muestras acumulativas: σ_n , según la ec.6, para cada tiempo de integración (donde n es el tiempo de integración en horas).

$$\sigma_n = \sum_{j=1}^n (\sigma_{ext,j}) \quad (6)$$

Si se plantea, como hipótesis, que la función $f_n(\theta)$, para ángulos mayores a 20°, es representativa de la difusión de la muestra y esta difusión es una parte significativa del factor σ_{ext} , que caracteriza la transparencia de la atmósfera, podría esperarse que presente una correlación positiva con el parámetro σ_n que se calcula a partir de la visibilidad meteorológica (ec. 6) en el mismo período de integración.

Los registros de la visibilidad meteorológica durante el período del experimento (desde el 4/9/17 a las 19:00 h al 8/9/17 a las 7:00 h), pertenecen al SMN - Aeropuerto B. Matienzo, S. M. de Tucumán (ubicado a 10 km de los sitios de recolección)²⁰, donde se mide la V_{met} por estima. Los valores medidos cada hora se usan para calcular V_j^{-1} en cada caso y se detallan en la Tabla II donde se agrupan en períodos consecutivos de 12h.

A partir de los valores de la TABLA II se definen los sucesivos intervalos de integración: 12, 24 (12+12), 36 (24+12) hasta 84 h, para calcular los correspondientes valores de σ_n (ec.6) que se muestran en la TABLA III.

TABLA III. VALORES DEL FACTOR σ_n CALCULADOS PARA LOS PERÍODOS DE INTEGRACIÓN CORRESPONDIENTES A LAS MUESTRAS DEL EXPERIMENTO.

tiempo de depósito (h)	12	24	36	48	60	72	84
σ_n [km^{-1}]	6,66	11,7	18,4	29,2	36,7	42,8	49,6

Para contrastar esta hipótesis, en la Fig. 9 se representan los valores de $f_n(\theta)$ (entre 20° y 80°) y de σ_n , calculados para los mismos tiempos de integración (12, 24, 36 y 48 horas). En ella se observa una clara correlación lineal positiva entre estos parámetros, para todos los ángulos seleccionados. Los ajustes lineales representados, para los distintos ángulos de difusión, tienen coeficientes de regresión R² mayores a 0,94 en todos los casos. Las rectas de ajuste presentan pendientes decrecientes desde $4,1 \cdot 10^{-6}$ (para 20°) hasta $6,9 \cdot 10^{-7}$ (para 80°) claramente distinguibles. Por otra parte, las intersecciones calculadas son también decrecientes: entre $5,8 \cdot 10^{-5}$ (para 20°) hasta $6,7 \cdot 10^{-6}$ (para 80°) por lo que las rectas no se cruzan y pueden diferenciarse entre sí; aun cuando las incertezas de estos valores calculados son grandes, no pueden considerarse nulas en todos los casos, como sería de esperar a partir del modelo usado.

Estos resultados muestran una confirmación aceptable de la relación lineal propuesta, que se explicita en la ec. 7, cuyos parámetros M y N se detallan en la Tabla IV, así como los coeficientes de regresión de cada recta de ajuste.

$$f_n = M \cdot \sigma_n + N \quad (\text{para } \theta \geq 20^\circ) \quad (7)$$

De este análisis puede concluirse que los valores de la difusión medida (en ángulos entre 20° y 80°) son proporcionales a los coeficientes de extinción calculados a

partir de la visibilidad, medida por el SMN¹⁹, en los mismos tiempos de integración.

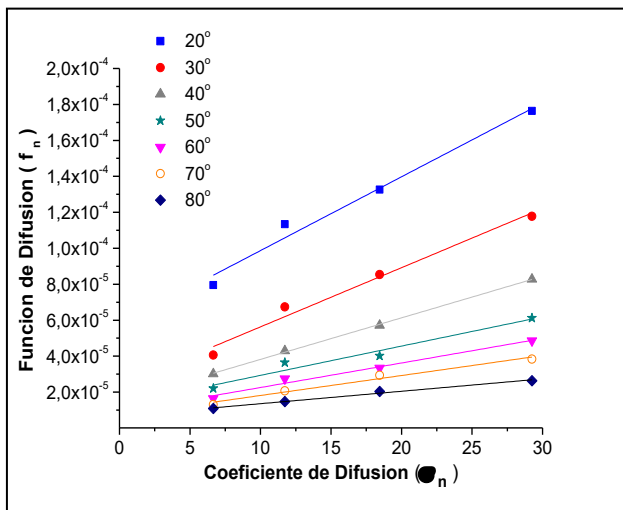


Figura 9. Correlación entre los valores de la función de difusión $f_n(\theta)$ (entre 20° y 80°) y los coeficientes de difusión (σ_n) correspondientes, calculados para los tiempos de integración de 12, 24, 36 y 48 horas. Los ajustes muestran pendientes e intersecciones decrecientes, pero las rectas no se cruzan.

Las intersecciones de cada recta con el eje (Tabla IV), si bien presentan incertezas grandes no puede concluirse que sean nulas, por lo que se necesitarían nuevas mediciones para confirmar o no estos comportamientos.

TABLA IV. PARÁMETROS DE AJUSTE Y COEFICIENTES DE REGRESIÓN CORRESPONDIENTES A $f_n(\sigma_n)$ PARA LOS ÁNGULOS SELECCIONADOS (FIG.9)

$f_n = M \cdot \sigma_n + N$			
ÁNGULO	$M (x 10^{-06})$ (pendiente)	$N (x 10^{-05})$ (intersección)	R^2
20°	$(4,1 \pm 0,4)$	$(5,8 \pm 0,7)$	0,97
30°	$(3,3 \pm 0,3)$	$(2,3 \pm 0,6)$	0,97
40°	$(2,31 \pm 0,04)$	$(1,5 \pm 0,8)$	0,99
50°	$(1,6 \pm 0,2)$	$(1,3 \pm 0,4)$	0,94
60°	$(1,4 \pm 0,1)$	$(0,9 \pm 0,2)$	0,97
70°	$(1,1 \pm 0,1)$	$(0,7 \pm 0,2)$	0,97
80°	$(0,69 \pm 0,05)$	$(0,7 \pm 0,1)$	0,98

Comparación de los resultados con datos de difusión intraocular

A partir de estos resultados de la Fig. 9, puede decirse que la difusión de la luz en ángulos mayores que 20° y menores que 80° es representativa de la muestra medida y presenta una correlación positiva con la visibilidad determinada por el SMN²⁰, tal como se explicita en la ec.7. La hipótesis más fuerte, en este caso, es el modelo aditivo para el cálculo del coeficiente de extinción a partir de los valores de visibilidad (ec 5 y ec.6).

El efecto de la difusión de la luz sobre la percepción visual ha sido muy estudiado e incluso se han comparado los efectos producidos por la presencia de un medio difusor que se interpone entre el objeto y el sujeto (externo), con el efecto de la difusión intraocular que, por opacidad del cristalino o por otras causas, degradan la calidad de la imagen que llega a la retina^{17,18,24,25}.

Resulta, por lo tanto, de interés, la comparación de estos resultados de difusión por contaminación ambiental (extra ocular) con los obtenidos por otros autores para difusión intraocular, ya que en ambos casos se procede a la medición de la función PSF(θ) generada por los medios difusores, externos o internos al ojo, que modifican la calidad óptica de la imagen retiniana.

A partir del modelo de deslumbramiento de J. Vos y T. van den Berg¹⁷ se puede calcular la “luz extraviada” o difundida (straylight, en inglés) usando la función $S(\theta)$ que caracteriza la difusión intraocular (ec. 8), donde, debe aclararse, θ se mide en grados^{18,24}.

$$S_n(\theta) = f_n(\theta) \cdot \theta^2 \quad (8)$$

A partir de las funciones $f_n(\theta)$, correspondientes a todas las muestras seleccionadas (Fig. 6), se calculan las correspondientes funciones $S_n(\theta)$ para cada tiempo de integración (n) y se representan en la Fig. 10, lo que permitirá comparar resultados.

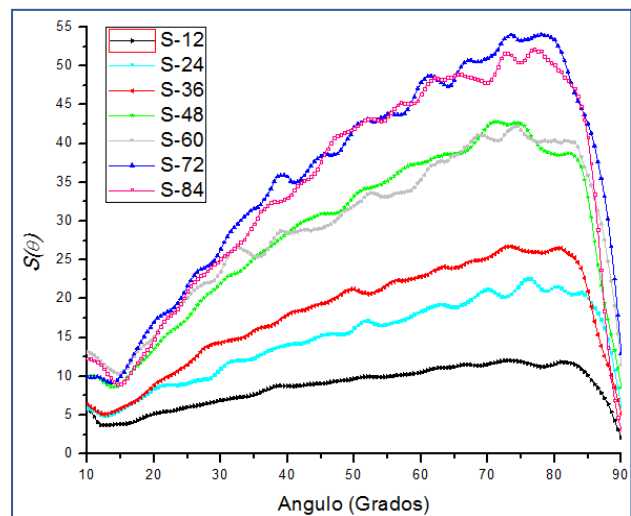


Figura 10. Representación de funciones $S(\theta)$ correspondientes a muestras de distintos tiempos de integración (entre 12 y 84 horas), en función del ángulo de medición.

Se observa que las curvas correspondientes a menores tiempos de integración (12, 24, 36 y 48 horas) son claramente diferenciables entre sí en todo el intervalo [20° , 80°], la curva correspondiente a depósitos de 60 h se confunde con la de 48 h pero se diferencia claramente de la de 72 h, que a su vez se superpone con la de 84 h. Si bien estos comportamientos son similares a los observados en las funciones $f_n(\theta)$ de la Fig. 6, se introducen las funciones $S(\theta)$ porque permiten una mejor caracterización de la difusión para ángulos grandes (entre 40° y 80°).

Finalmente, las funciones $S_n(\theta)$, obtenidas de esta manera, se comparan con curvas de difusión intraocular para el ojo humano^{17,18}, en la Fig. 11. En ella se representan

las curvas $S(\theta)$ para ojos de sujetos de 20, 40, 60 y 80 años, obtenidas a partir de la ecuación CIE¹⁷ y se comparan con las funciones $S_n(\theta)$ con $n = 12, 24$ y 36 , que son las que muestran valores similares a los de referencia.

Puede verse que la difusión producida por la muestra de 12h de depósito (medida entre 40° y 80°) queda completamente contenida entre las curvas de difusión intraocular correspondientes a 60 y 80 años, de lo que se infiere que la polución acumulada en los vidrios durante ese tiempo resulta equivalente al efecto del envejecimiento de los medios oculares entre 60 y 80 años^{17,18}.

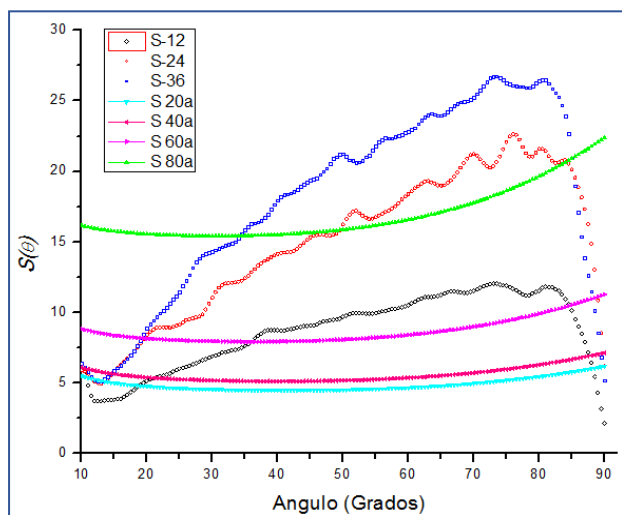


Figura 11. Funciones $S(\theta)$ correspondientes a sujetos de 20 años (S_{20a}) a 80 años (S_{80a}), calculadas a partir de la ecuación CIE¹⁷ se comparan con las funciones $S(\theta)$ para las muestras de polución de 12h (S_{12}) a 36h (S_{36}), en función de los ángulos de medición.

IV. DISCUSIÓN y CONCLUSIONES

La polución ambiental no sólo origina pérdida de la visibilidad, entendida como disminución del contraste de la escena visual, sino también otros efectos perceptuales negativos, tales como deslumbramiento o estimaciones erróneas de distancias, tamaños y por lo tanto de la velocidad de los objetos que se encuentran en el campo visual del sujeto. Sin embargo, estos efectos han sido poco estudiados, según se desprende de la bibliografía.

Por otra parte, la visibilidad atmosférica se sigue midiendo en la dirección de visión, cuando en realidad, es importante considerar la distribución de la luz en otras direcciones por efecto de la difusión, para saber cómo ésta afecta a la visión foveal, pero también a la visión periférica.

Dada la dificultad que presentan los diferentes métodos de determinación de la visibilidad atmosférica, sobre todo para bajas concentraciones de contaminantes, se ha analizado la posibilidad de caracterizar la polución ambiental a través de un método alternativo, basado en la acumulación de partículas ambientales en suspensión sobre placas de vidrio, expuestas durante diferentes tiempos de integración. Se consiguen así, muestras más concentradas que pueden caracterizarse ópticamente a través de la medición de la distribución de la luz difundida, en forma automatizada. El dispositivo utilizado para estas determinaciones (Figs. 2 y 3) posibilita mayor resolución

angular que otros sistemas similares donde el o los sensores tienen posiciones fijas. Ello se logra usando una cámara CCD que se desplaza de forma automática alrededor de la muestra, midiendo con una resolución de 2,0 min de arco^{19, 26}. Sería de gran utilidad poder adecuar el dispositivo experimental desarrollado como sistema de medición portátil, tal que permita realizar mediciones en tiempo real de la contaminación en rutas, en las cercanías de un ingenio o en la ciudad. Al poder caracterizar la distribución angular de la luz difundida, brindaría información más útil que la medición de un único parámetro de absorción y difusión en la línea de visión.

Del primer análisis de los datos se concluye que las muestras recolectadas en los dos sitios de medición (A y B) no presentan diferencias significativas para los diferentes tiempos de integración: esto revela que el método integra globalmente la polución proveniente de diferentes focos de quemas de cañaverales en época de zafra y por lo tanto la medición no está tan localizada como las mediciones de visibilidad meteorológica del SMN en los aeropuertos.

Por otra parte, las funciones de difusión $f_n(\theta)$ medidas, muestran que el método puede discriminar fácilmente depósitos de entre 12 y 48 horas (Figs. 4 a 7). Introduciendo la función $S(\theta)$ (ec. 8), que permite caracterizar mejor la difusión para ángulos grandes, se logra una mejor resolución de las curvas de mayor tiempo de acumulación y el efecto de saturación se detecta claramente (Fig. 10). Esta saturación en depósitos mayores a 48 horas, en los cuales la concentración de partículas ya no crece linealmente con el tiempo de exposición, puede deberse a que crece, con el tiempo, la probabilidad de superposición de partículas, pero también la probabilidad de que la tasa de depósito y de extracción de las partículas se igualen, lo que limita el método a concentraciones no muy altas de partículas. Será de importancia estudiar más en detalle los niveles de saturación y las condiciones en que ésta ocurre.

Sin embargo, no se encontró ninguna limitación respecto a las muestras con menos concentración de partículas, por lo que será necesario determinar cuál es la concentración mínima de partículas que el método es capaz de discriminar.

Analizar, en detalle, las desviaciones de los datos respecto a las predicciones del modelo de Beer Lambert (ec. 1 y 2) quizás permita generalizar el uso del método integrativo para otros tipos de partículas más pequeñas, que incluyan la polución atmosférica. Podría convalidarse, además, la relación entre la difusión de las muestras acumulativas y los coeficientes de extinción calculados a partir de la visibilidad meteorológica.

La medición por estima de la visibilidad meteorológica considera otras condiciones y otros factores atmosféricos: no sólo la polución por partículas contaminantes, sino también el efecto de la difusión de la luz por partículas líquidas en suspensión (niebla, por ejemplo), que no es considerado en las mediciones del método alternativo. Más aún, dada la función que cumplen las mediciones de visibilidad en los aeropuertos, las mismas son subestimadas por debajo del valor real, debido a protocolos de seguridad aeroportuaria. Entonces, la medición de tipo integración temporal desarrollada podría ayudar a estimar

la afectación al estado general del ambiente, en un ámbito geográfico mayor, permitiendo caracterizar períodos de tiempos más largos y evaluar el impacto que producen la suma de pequeñas quemadas de biomasa cercanas a la ciudad.

Si existe contaminación por quema de cañaverales, será de interés disponer de información fehaciente sobre los niveles de visibilidad en zonas aledañas, poder describir el fenómeno con más detalle, para la creación de alertas en rutas y en aeropuertos, ya que las situaciones pueden resultar críticas y deben poder preverse. En este sentido, se esperaría poder realizar aportes para complementar las mediciones de visibilidad que se realizan actualmente en el aeropuerto provincial.

Las curvas $S_n(\theta)$ correspondientes a depósitos de 12 h y 24 h son comparables con las curvas de ojos envejecidos por opacidad del cristalino, de lo que se puede concluir que la presencia de depósitos de polución tiene una influencia en el deslumbramiento del sistema visual casi equivalente a la de un ojo de 80 años²⁴⁻²⁶, siendo éste un factor de riesgo, especialmente, para conductores de vehículos con iluminación nocturna. Este trabajo podría servir de referencia para posteriores investigaciones sobre el estrés visual en conductores, así como la incidencia de estos efectos en la percepción visual subjetiva²⁴.

V. REFERENCIAS

1. Cremades P., Allende D., Puliafito E., "Integración de modelos para la estimación del impacto en la calidad de aire de la quema de biomasa en el norte argentino", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 15, 01-37-44. Argentina. ISSN 0329-518401.37 (2011).
2. Servicio Meteorológico Nacional, "Métodos y dispositivos empleados para medir la visibilidad", Expediente No.162.011, SMN - Buenos Aires (2017).
3. World Meteorological Org., "Measurement of visibility", Chap. 9 in "Guide to Meteorological Instrumental Methods of Observation", WMO-No.8, 2008, updated in 2010, Geneva, Switzerland (2012).
4. Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza (2010), http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_es.html.
5. The IES Lighting Handbook, Illuminating Engineering Society of North America, 9, 94-95 (2003).
6. Commission Internationale de l'Éclairage, Standard CIE S 017/E:2011 International Lighting Vocabulary, CIE Central Bureau, Viena, Austria (2011).
7. Artigas J.M., Capilla P., Felipe A., Pujol J., "Óptica fisiológica. Psicofísica de la visión". Interamericana McGraw-Hill Ed., España, 1995.
8. Redmond H.E., Dial K.D., Thompson J.E., "Light scattering and absorption by wind-blown dust: Theory, measurement and recent data". *Aeolian research*, 2, 5-26 (2010).
9. Du K., Wang K., Shi P., Wang Y., "Quantification of atmospheric visibility with dual digital cameras during daytime and nighttime", *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2121-2130 (2013).
10. Luo C.H., Liu S.H., Yuan C.S., "Measuring atmospheric visibility by digital image processing", *Aerosol and Air Quality Research*, 2(1), 23-29 (2002).
11. Xie X.S., Tao S.C., Zhou X.J., "Measuring visibility using digital photography", *Chin. Sci. Bull.*, 44, 1130-1134 (1999).
12. Xu R., "Light scattering: A review of particle characterization applications", *Particuology*, 18, 11-21 (2015).
13. Chen J., Wang H., Shen J., "Light scattering of particles illuminated by divergent beam", *Optics and Lasers in Engineering*, 50, 1410-1415 (2012).
14. Tang F., Ma S., Yang L., Du C., Tang Y., "A new visibility measurement system based on a black target and a comparative trial with visibility instruments", *Atmospheric Environment*, 143, 229-236 (2016).
15. Sánchez-Capuchino J., Arasa J., "A method of characterization of diffusing thin films used as active elements of optical systems", *Meas. Sci. Technol.*, 14, 346-356 (2003).
16. Zerrad M., Lequime M., Deumié C., Amra C., "Development of a goniometric light scatter instrument with sample imaging ability", *SPIE Vol. 7102(7)*, 1-15 (2008).
17. Vos J.J., Cole B.L., Bodmann H.W., Colombo E., Takeuchi T., van den Berg T.J.T.P., "Equations for Disability glare", CIE Collection on Glare 2002, Technical Committees Division 1 and 3. Publication CIE 146 and 147, ISBN 3 901 906 15 0 (2002).
18. De Wit G.C., Coppens J.E., "Stray light of spectacle lenses compared with stray light in the eye", *Optom Vis Sci*, 80(5), 395-400 (2003).
19. Corregidor Carrió D.H., "Caracterización óptica y modelado de medios difusores", Tesis de Doctorado, UNT, San Miguel de Tucumán (2012).
20. Servicio Meteorológico Nacional (SMN), "Datos de visibilidad de Setiembre de 2017", Expediente No.168.671, Tucumán, Argentina (2017).
21. Nicodemus, F.E., "Geometrical considerations and nomenclature for reflectance". U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards (1977).
22. Hecht E., en "Óptica", Addison Wesley, Madrid (2000).
23. Ditchburn R., "Óptica", Ed. Reversé S.A., Barcelona (1982).
24. van den Berg T.J.T.P., van Rijn L.J., Kaper-Bongers R., Vonhoff D.J., Völker-Dieben H.J., Grabner G., Nischler C., Emesz M., Wilhelm H., Gamer D., Schuster A., Franssen L., de Wit G.C., Coppens J.E., "Disability glare in aging eye. Assessment and Impact on Driving", *J Optom*, 2, 112-118 (2009).
25. Barrionuevo P., Colombo E., Corregidor D., Jaén M., Issolio L., "Evaluation of the intraocular scattering through brightness reduction by glare using external diffusers to simulate cataracts", *Optica Applicata*. Vol. XL, No. 1, 63-75, (2010).
26. Santucho Cainzo A., Calderari L.F., Corregidor Carrió D.H., Soria M.G., Jaén E.M., "Evaluación de la visibilidad en rutas a partir de mediciones de luz difusa", 101ª Reunión de la Asociación Física Argentina, 149 (2016).

VI. AGRADECIMIENTOS

- Al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) por la información sobre metodologías de medición y la provisión de datos de la visibilidad medida en S.M. de Tucumán.
- Este trabajo se llevó a cabo en el marco de los Proyectos: PIUNT Código 26/E519 – UNT – 2014-2018; Proyectos de Investigación Institucional PIP 22920160100114CO y PIP 11220120100553.