

Licenciatura en Física - FACET - UNT
Tesis de Licenciatura

Difusión de la radiación óptica.
Propuesta de una metodología óptica
alternativa para caracterizar la polución
ambiental en época de zafra, en Tucumán.

Tesista: B.U.F. Luis Fernando Calderari

Directora: Dra. Mirta Jaén

Marzo de 2019



Universidad Nacional de
Tucumán

TESIS LICENCIATURA EN FÍSICA
"Propuesta de una metodología óptica alternativa para caracterizar la polución
ambiental en época de zafra, en Tucumán."



Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnología



Universidad Nacional de
Tucumán

TESIS LICENCIATURA EN FÍSICA
"Propuesta de una metodología óptica alternativa para caracterizar la polución
ambiental en época de zafra, en Tucumán."



Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnología

DEDICATORIA

- **A mis padres Luis R. Calderari y María Salomé Boto.**

AGRADECIMIENTOS

- **Al Estado argentino por haberme concedido la educación universitaria pública y gratuita, necesaria para obtener mi título de Bachiller Universitario en Física y por haberme permitido continuar con mi formación académica y profesional hasta la presentación de este trabajo.**
- **A la Universidad Nacional de Tucumán por haberme otorgado la beca de iniciación en la investigación por medio del Consejo de Investigaciones de la UNT (CIUNT).**
- **A la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología por brindarme el espacio de trabajo y formación, y los elementos de desarrollo.**
- **Al Departamento de Física, FACET - UNT.**
- **Al Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión (UNT) y al Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión (CONICET).**
- **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.**
- **A la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres por los datos brindados.**
- **Al Instituto Miguel Lillo y la cátedra de Histología - FBQF (Hospital Zenón Santillán) por el acceso a los microscopios ópticos utilizados en esta investigación.**
- **Al equipo de investigación al cual pertenezco, integrado por Diego, Álex y mi Directora: Mirta Jaén.**
- **A mis familiares, con mucho cariño y afecto: Enzo, José, Emilia, Noelia, Aty, Fernando, Mira. A mis padrinos Francisco y Ana Lía.**
- **A mis amigos, compañeros y colegas: Enrique, Karín, Cristian, Vencha, Nico, Bruno, Lucio, Javier, Gustavo, Marcos, Darío, Pablo, Otti y Aníbal.**
- **A mi futuro Director de Doctorado, Luis Issolio.**
- **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.**

RESUMEN

El objetivo de esta Tesis de Licenciatura en Física es analizar la factibilidad de una metodología óptica, alternativa a las usadas actualmente, basada en la medición de la radiación óptica (RO) difusa, para la evaluación de los niveles de polución atmosférica causada por la quema de cañaverales en época de zafra, en San Miguel de Tucumán, que disminuyen la visibilidad atmosférica en poblaciones aledañas.

El método se basa en la medición de la luz que difunden muestras de material suspendido en la atmósfera que se ha depositado sobre placas de vidrio, durante diferentes tiempos de integración. Para ello se recolectan muestras de depósito en distintos lugares de la ciudad, durante tres periodos de zafra, con distintos intervalos de exposición. Al recoger las muestras se sellan usando otro vidrio limpio y el precintado de sus bordes.

Se mide luego, la distribución de la luz difundida por estas muestras con un dispositivo goniométrico digital, que desplaza una cámara CCD alrededor de la muestra, con resolución de 3,0 min arco, en un rango de 340°, usando como fuente de luz, un láser rojo de 1mW y $\lambda = 635\text{nm}$, que ha sido desarrollado en el DELLYV – ILAV, en investigaciones previas.

Se analizaron comparativamente las funciones de difusión obtenidas de muestras con distinto tiempo de acumulación de depósitos (entre 3 h y 84 h). Se encontró un buen ajuste lineal de los valores de la función de difusión, para algunos ángulos seleccionados, con el tiempo de integración de los depósitos. El método propuesto discrimina muestras de entre 6 y 48 horas de integración. El método resulta más sensible porque integra en el tiempo, aún concentraciones pequeñas de contaminantes. Depósitos de más de 48 h mostraron una clara saturación.

Se verificó que no eran significativamente distintas las muestras recogidas en distintos puntos de la ciudad, confirmando que el método evalúa un comportamiento más general de la polución, registrando el aporte de varios focos de incendios en las zonas aledañas.

De la comparación de nuestros resultados con las mediciones de visibilidad meteorológica del SMN se concluye que no existe una correlación directa con valores de visibilidad mínimos, como podría esperarse. Pero si se calcula el coeficiente de extinción atmosférica (σ_{ext}) en el modelo de difusión de Beer-Lambert, a partir de los valores de visibilidad, medida en esos mismos días por el SMN, se obtiene un buen ajuste lineal para distintos tiempos de integración ($R^2 > 0,94$).

Los niveles de difusión medidos se compararon con los obtenidos en difusión intraocular, calculados a partir de la ecuación CIE, encontrándose valores similares a los de ojos de personas de 80 años de edad. Este trabajo puede servir de referencia para posteriores investigaciones sobre la incidencia de estos efectos en la percepción y en el estrés visual de conductores en rutas.

Como conclusión general, puede decirse que se espera poder realizar aportes para complementar las mediciones de visibilidad in situ y en tiempo real, que se realizan actualmente en el aeropuerto provincial en casos de contaminación atmosférica por quema de cañaverales, en donde será de interés disponer de información relevante sobre los niveles de visibilidad en zonas aledañas para la creación de alertas en rutas.

CONTENIDO

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN. PLANTEO DEL PROBLEMA. HIPÓTESIS.	7
1.1 Planteo del problema.	7
1.2 Antecedentes y objetivos.	9
1.3 Objetivos, planteo de las hipótesis y contenido de cada capítulo.	11
Capítulo 2: MODELOS Y DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE LA VISIBILIDAD.	14
2.1 Modelos de visibilidad.	14
2.2 Medición de visibilidad. Dispositivos.	17
2.3 Propuesta de medición de la difusión.	24
Capítulo 3: MODELOS Y DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE LA DIFUSIÓN DE LA RO.	26
3.1 Introducción. Conceptos básicos.	26
3.2 Modelos teóricos de difusión de la RO.	35
3.3 Modelos semiempíricos de difusión de la RO.	37
3.4 Estado del arte de los dispositivos de medición de luz difusa.	38
Capítulo 4: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.	42
4.1 Descripción del escatómetro.	42
4.2 Diseño de los experimentos.	47
4.3 Obtención de datos.	49
Capítulo 5: RESULTADOS.	52
5.1 Experimento 1.	52
5.2 Experimento 2.	56
5.3 Experimento 3.	63
5.4 Comparación con curvas de edad.	70
Capítulo 6: CONCLUSIONES, DISCUSIÓN Y PERSPECTIVAS.	73
BIBLIOGRAFÍA	78

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN. PLANTEO DEL PROBLEMA. HIPÓTESIS.

1.1 Planteo del problema.

La quema de biomasa es una de las principales fuentes de contaminación del entorno atmosférico. Los incendios a cielo abierto, causados por factores naturales o humanos, liberan grandes cantidades de partículas a la atmósfera, las cuales permanecen en el ambiente por extensos períodos, que pueden prolongarse hasta por varios meses y pueden ser transportadas, por corrientes de viento, hasta miles de kilómetros de distancia del lugar de origen. Estas partículas absorben y difunden la radiación solar y por lo tanto alteran el balance energético en las capas inferiores de la atmósfera, dando lugar a alteraciones regionales en el clima. Las partículas de carbón producidas en incendios forestales, así como las cenizas liberadas como producto de la actividad volcánica, representan un serio problema para la estabilidad del clima a gran escala, ya que su capacidad de absorción tiene efectos equivalentes a los de un gas de efecto invernadero (He et al., 2018; Otero et al., 2018; Ristori et al., 2018).

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 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 salud. La quema de pastizales y bosques asociados al avance de la frontera agrícola y las prácticas de quemas 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 rutas y caminos, dificultades respiratorias, daños directos en plantas, animales y personas en general, llegando a generar efectos en el clima global (Cremades et al., 2011).

En Argentina, los incendios, que ocurren frecuentemente en bosques del sur del país, generan contaminación en ciudades y zonas rurales, perjudican la visibilidad en rutas y autopistas, representando un serio peligro para las personas que viajan en vehículos. Uno de los efectos de esta quema, la deposición de partículas en parabrisas de automóviles, ocasiona molestias al conductor en rutas, porque esas partículas difunden la luz y producen deslumbramiento.

La práctica de la quema de cañaverales en Tucumán, realizada todos los años durante la cosecha de caña de azúcar (julio-septiembre), para incrementar la eficiencia de recolección es causante de la emisión al ambiente de partículas de combustión incompleta de origen vegetal y que por lo tanto producen contaminación atmosférica (Figura 1.1). En la ciudad se observa, frecuentemente, caer la ceniza en forma de lluvia; en periodos largos estas cenizas se acumulan en superficies tales como vías, techos de viviendas, desagües ocasionando diversos problemas.

La quema de cañaverales afecta principalmente a la salud de los habitantes, produce irritación de los ojos, problemas respiratorios, o en el sistema circulatorio; pero también afecta los

entornos urbanos y rurales, además de ocasionar daños en los patrimonios naturales. Uno de estos efectos negativos es la reducción de la visibilidad atmosférica, ya que este parámetro meteorológico está fuertemente vinculado al contenido de aerosoles en suspensión. Como resultado de la diseminación en el ambiente, estas partículas ocasionan una disminución de la visibilidad de los conductores de vehículos en una ruta, de peatones en una ciudad o de obreros en sus puestos de trabajo. En zonas rurales inclusive, la cantidad de cenizas que se observan a simple vista es mayor, representando un grave peligro para los conductores en rutas.



Figura 1.1 - Imágenes extraídas del diario "La Gaceta" del 22-8-17. Izquierda: La quema de cañaverales en Tucumán produce una reducción muy grande de la visibilidad. Derecha: Desde el interior de un vehículo, se observa cómo desaparecen del campo visual del conductor los vehículos más cercanos, la propia ruta y cómo se atenúa hasta la visibilidad del sol.

De todos estos efectos sobre la salud humana que producen las quemas de biomasa, este trabajo analiza especialmente el efecto visual de la polución atmosférica. El caso particular de la contaminación visual en rutas, resulta de especial interés porque está relacionado directamente a la práctica de la quema de cañaverales en campos rurales, que se extiende sobre pastizales cercanos a las vías de circulación de automóviles. Para que el manejo en rutas sea seguro, es necesario que los conductores puedan reconocer de forma adecuada el entorno visual, distinguir objetos, señales y otros vehículos. Es, por lo tanto, necesario que la información visual de ese entorno (tamaños, texturas, colores, etc.) se transmita por un medio transparente, sin alteraciones. Cuando un medio difusor de la luz se interpone en el camino óptico entre el estímulo y el detector, originando una transmisión difusa de la luz, la información recibida resulta degradada y puede llegar a anular la función visual (Vos et al., 2002).

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 real (SMN, 2017a). Estas mediciones se usan principalmente para el control del despegue y aterrizaje de aviones. Desde la estación meteorológica, el encargado informa la visibilidad a nivel del suelo, para que los pilotos conozcan la situación del ambiente en pista. Estas mediciones están, en general, estimadas por debajo del valor real según el protocolo de seguridad aeroportuaria.

Por lo tanto, resulta necesario contar con otros métodos para caracterizar la polución atmosférica en nuestra ciudad y alrededores por efecto de las quemas de biomasa en épocas de

zafra, que caracterice mejor las condiciones del medio ambiente y el tipo de material en suspensión, de modo tal que puedan aplicarse protocolos de emergencia o advertencias que puedan prever consecuencias negativas sobre la población.

Se hace necesario analizar previamente los modelos más desarrollados de medios difusores para poder predecir la distribución de la luz que lo atraviesa en cada situación. Se han descrito distintos modelos, en función de las características de las heterogeneidades, en los cuales se hacen diferentes tipos de aproximaciones. Entre los principales modelos teóricos están los electromagnéticos, como los modelos de Mie, Rayleigh y los de la óptica geométrica. Sin embargo, la mayoría de los modelos más usados en la actualidad son semiempíricos (van de Hulst, 1981; Stover, 1995).

Para introducir estos temas, se analizarán, en primer lugar, los conceptos básicos, así como las herramientas más utilizadas en el análisis de la difusión de la luz y de cómo este fenómeno afecta la vista del ser humano.

1.2 Antecedentes y objetivos.

Como es de interés en este trabajo analizar el proceso de interacción de la RO, que incluye el espectro visible junto al infrarrojo y el ultravioleta, con medios absorbentes y difusores, se revisarán los modelos básicos que permiten definir los parámetros de interés.

La visibilidad está determinada por la presencia de partículas sólidas y líquidas que se mantienen en suspensión en la atmósfera. La extinción 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).

Estos temas han sido estudiados desde hace mucho tiempo en referencia a medios con altas concentraciones de contaminantes tales como la niebla o el humo denso. Sin embargo, el problema de los métodos que se utilizan para su medición sigue vigente.

La Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) y la World Meteorological Organization (WMO, 2010) definen la “**visibilidad meteorológica**” como la distancia horizontal a la que un objeto negro de dimensiones adecuadas puede verse contra el cielo del horizonte. 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” (Illuminating Engineering Society of North America, IESNA, 2003).

Si la estimación de este parámetro la realiza un ser humano, estará sujeta a la percepción individual y a la capacidad interpretativa, así como a las características del foco luminoso y del factor de transmisión del medio. Esta metodología plantea el problema de estar sesgada por las características del observador específico, ya que el umbral de visión es característico de cada persona y por lo tanto la medición no se produce en condiciones repetibles ni podrían ser comparadas con observaciones del mismo tipo. Por ello, es de esperar que toda estimación

visual de la visibilidad realizada por un observador humano resulte subjetiva, por más que se encuentre debidamente entrenado.

Los métodos de medición de visibilidad empleados en la Argentina por el SMN son: a) por estima; b) por estima e instrumento; c) por instrumento. Los instrumentos de visibilidad están localizados en los tres aeropuertos más importantes del país (Córdoba, C.A.B.A. y Bs. As.), todos ellos operados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Aunque se están incorporando nuevos instrumentos en otros aeropuertos, todavía no están operativos. Estos instrumentos miden extinción de la luz por absorción o por difusión, en forma localizada.

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 son visibles a su alrededor. Durante la noche se toman como referencia objetos luminosos lejanos, tal como se muestra en la Figura 1.2, donde se aprecia una vista satelital del aeropuerto y las cercanías con las referencias utilizadas para esta medición.

Como se analizó anteriormente, las estimaciones realizadas por un observador no dependen sólo de las características fotométricas y geométricas del objeto sino también del umbral de contraste del sujeto, lo cual limita fuertemente esta metodología. En la medición nocturna, además, estas estimaciones dependen de la intensidad de las fuentes luminosas, de la adaptación a la oscuridad y del umbral de contraste del observador, lo que la hace más problemática. Es habitual que la visibilidad en una dirección difiera de la otra. Hay dos procedimientos distintos para registrarla, variando según el país que los aplica: Visibilidad mínima, se refiere a la más baja medida en cualquier dirección, y la visibilidad predominante, que prevalece sobre la mitad o más del horizonte, a veces se la conoce como **índice de visibilidad**. La estimación de visibilidad en los aeropuertos está limitada por el número de mojones y su espaciado.

Estas formas de determinar la visibilidad son limitadas a los fines específicos de determinar la visibilidad en pista para información del piloto. Para determinar mejor los efectos de la polución atmosférica sobre la visión humana, es necesario caracterizar ópticamente la visibilidad para poder introducir la medida de difusión de la luz en otras direcciones y no sólo considerar la pérdida de luz en línea recta. Por eso en el presente trabajo se propone un método alternativo de caracterización de la polución ambiental, que no está limitado a la medición de la pérdida de intensidad en la transmisión de un haz en el medio difusor.

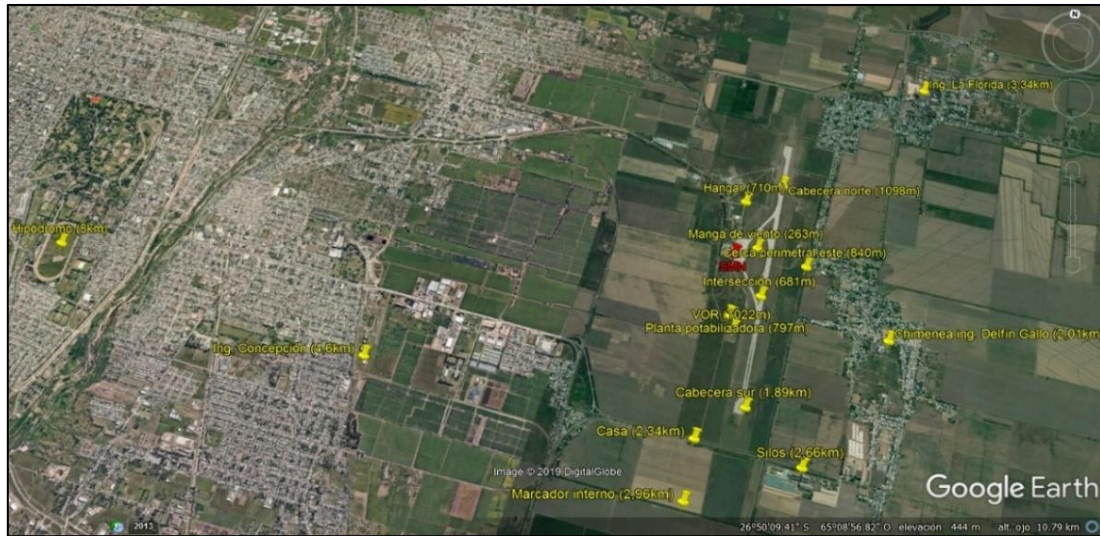


Figura 1.2 - Vista satelital del aeropuerto y cercanías. La estación de observación aparece indicada en rojo, los mojones aparecen en el mapa indicados en amarillo. Quedan fuera de la imagen los mojones más distantes (“Aeroclub Tucumán”, “Cristo del cerro San Javier” y “cerros del dique El Cadillal”).

Tabla 1.1 – Lista de objetos visibles que se toman de referencia, en orden creciente, según la distancia a la estación de observación.

REFERENCIA	Dirección	[km]
MANGA DE VIENTO	NE	0,263
INTERSECCIÓN	S.de E	0,681
HANGAR	N	0,710
PLANTA POTABILIZADORA	S	0,797
CERCA PERIMETRAL ESTE	E	0,840
VOR	S	1,022
CABECERA NORTE	N	1,098
CABECERA SUR	S	1,89
CHIMENEA ING. DELFÍN GALLO	SE	2,013

REFERENCIA	Dirección	[km]
CASA	S	2,34
SILOS	SE	2,66
MARCADOR INTERNO	S	2,96
ING. LA FLORIDA	N	3,34
ING. CONCEPCIÓN	SO	4,6
HIPÓDROMO	O	8
TCM CABECERA	NO	18
CRISTO SAN JAVIER	O	22
CADILLAL	NO	23

1.3 Objetivos, planteo de las hipótesis y contenido de cada capítulo.

A partir de la problemática planteada, se establecen los objetivos del presente trabajo y las correspondientes hipótesis de investigación.

El trabajo tiene como objetivos:

- Analizar y desarrollar una metodología experimental, alternativa a los instrumentos de alta complejidad y costos que se usan comúnmente para esos fines, de relativamente bajo costo, que resulte útil para la caracterización óptica de medios poco difusores y que permita especificar ambientes con contaminación (medios difusivos), típicos de la época de zafra en la ciudad de San Miguel de Tucumán y en rutas circundantes.
- Corroborar experimentalmente si muestras acumulativas de material suspendido en la atmósfera pueden resultar representativas y útiles para caracterizar los ambientes con contaminación en los que se han recogido.

- c) Corroborar experimentalmente si la medición de la función de distribución de la luz difundida en todas las direcciones implica una mejor caracterización del medio difusor, que las tradicionales medidas de la absorción del medio en la dirección del haz de luz incidente o la difusión en ángulos fijos.

Para alcanzar estos objetivos, se plantearon las siguientes hipótesis de investigación:

H1. La caracterización de la polución ambiental, por quema de biomasa, a través de la medición de la función de distribución de transmitancia óptica resulta más precisa que otros métodos de medición que sólo brindan la medida de un parámetro global de extinción.

H2. Las muestras acumulativas del material depositado son representativas del medio con polución. El dispositivo óptico seleccionado y adaptado permite medir la distribución de transmitancia de muestras de depósitos de polución, con una resolución adecuada y es compatible con otros resultados.

H3. Es posible correlacionar las mediciones de difusión de las muestras, con los datos de visibilidad del SMN, usando el modelo de difusión de Beer-Lambert.

H4. Las mediciones de difusión (extraocular) de las muestras pueden compararse con mediciones de difusión intraocular en ojos de personas sanas de edad avanzada.

A partir del análisis de los principales modelos teóricos de difusión de la radiación óptica, se seleccionan los más adecuados para describir la situación planteada, así como a partir del análisis de los diferentes métodos y dispositivos disponibles, se eligen los más adecuados para caracterizar el efecto visual de la polución ambiental.

Para ello se lleva a cabo la adaptación y puesta a punto de un dispositivo óptico sencillo, denominado escatómetro, que permite registrar y evaluar la función de distribución de transmitancia de medios difusores delgados, en especial de las muestras de depósitos acumulativos de polución ambiental. El método puede caracterizar con resolución adecuada las muestras y resulta comparable con otras metodologías, en particular mediciones de la visibilidad meteorológica o de absorción de la luz incidente por efecto de la polución.

El método que se propone resulta sencillo de implementar en un laboratorio y podría ser la base de un dispositivo portable, a desarrollarse más adelante, para mediciones de campo de la polución en rutas o en ciudades.

Estos objetivos y las correspondientes hipótesis se han desarrollado en la presente Tesis de Licenciatura, organizada en seis capítulos, cuyo contenido se describe brevemente, a continuación:

En el capítulo 2 se analiza la problemática de la quema de cañaverales en la provincia de Tucumán, se detallan los modelos de visibilidad atmosférica más usados y se describen los dispositivos de medición de la visibilidad.

En el capítulo 3 se explican los diferentes modelos de difusión de la luz, considerando los aspectos más importantes de los modelos de Rayleigh y de Mie. Luego se analizan algunos modelos semiempíricos de difusión, más recientes, que permiten caracterizar

experimentalmente medios difusores. Por último, se estudian los dispositivos de medición de la difusión.

En el capítulo 4 se plantea la metodología experimental. Se describe el instrumento goniométrico adaptado y puesto a punto para estas mediciones, sus principales características. Se detalla el proceso de calibración y de control de funcionamiento. Finalmente se describe el diseño del muestreo, la recolección de muestras y la toma de datos experimentales.

En el capítulo 5 se analizan los resultados de las mediciones llevadas a cabo con el escatómetro, correspondientes a las muestras recolectadas en el año 2018, teniendo en cuenta las mediciones de muestras obtenidas en los años 2015 y 2017. Se realiza una comparación de las mediciones de difusión con datos experimentales de visibilidad del SMN, evaluando una correlación según el modelo propuesto. Se comparan, además, los resultados de las muestras con datos de difusión intraocular, obtenidos por otros autores.

En el capítulo 6 se plantea una discusión entre la metodología propuesta en este trabajo y otras metodologías, posteriormente se formulan las conclusiones y las perspectivas futuras.

CAPÍTULO 2

MODELOS Y DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE LA VISIBILIDAD

A partir del planteo de la problemática y de los conceptos básicos, se presenta el estado del arte de las metodologías más usadas para la determinación de la visibilidad meteorológica. Primero se introduce la definición de visibilidad meteorológica, según la CIE y a partir de la ley de Koschmieder. Luego se describen los modelos de visibilidad, donde se analizan las limitaciones del modelo de Beer-Lambert y de Koschmieder. Se describen los modelos más recientes de determinación de la visibilidad y se clasifican los dispositivos actuales. Por último, se explica la propuesta para caracterizar la polución por quema de biomasa por la difusión de la RO en muestras de depósito de polución, comparando los resultados con otras metodologías y evaluando sus ventajas respecto al método por estima en aeropuertos.

2.1 Modelos de visibilidad.

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-Lambert (Ec. 2.1) (CIE, 2011), donde I_0 es la intensidad de luz de la fuente, I_x es la intensidad del haz de luz 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.

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\sigma_{ext} \cdot x} \quad (2.1)$$

La razón en que el haz de luz disminuye su intensidad se denomina, comúnmente, extinción. Mediante la absorción de la luz, la energía del haz se transforma en movimiento interno a escala molecular, pero parte de la pérdida de intensidad no se debe a una desaparición real de la luz, sino que resulta del hecho de que una porción del haz incidente es difundida por las partículas, desviada de su camino original y por lo tanto removida del haz incidente.

En general, suponiendo que los efectos son aditivos, puede separarse σ_{ext} en dos contribuciones: una contribución σ_a debida a la absorción y otra contribución σ_d debida a la difusión. La Ec. 2.1 se convierte entonces en:

$$I = I_0 \cdot e^{-(\sigma_a + \sigma_d) \cdot x} \quad (2.2)$$

En los casos en que la difusión sea significativamente menor a la absorción y σ_d pueda considerarse despreciable, la extinción se debe sólo a la absorción del haz, tal como en el caso de partículas de carbón o partículas sólidas en general. En el caso de partículas de agua, en la niebla o rocío, por ejemplo, las partículas son transparentes, la absorción es despreciable y la

extinción se debe prácticamente a la difusión de la luz (nube). Pero es importante notar la existencia de estos dos procesos diferentes y el hecho de que en muchos casos ambos pueden estar operando (Landsberg, 1984).

De la Ec. 2.1, puede derivarse fácilmente la Ec. 2.3. y la ley de Koschmieder (Ec. 2.4) (Redmond et al., 2010) que define 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 (CIE, 2011; WMO, 2010).

$$\ln \left(\frac{I_x}{I_o} \right) = -\sigma_{ext} \cdot x \quad (2.3)$$

$$\text{Si } \frac{I_x}{I_o} = C_u = 0,05 \Rightarrow V_{met} = x \quad \Rightarrow \quad V_{met} = -\frac{\ln 0,05}{\sigma_{ext}} \quad (2.4)$$

Otros autores, sin embargo, consideran más adecuado un contraste $C = 0,02$ como referencia en la ley de Koschmieder (Ec. 2.4) (Redmond et al., 2010; IESNA, 2003; WMO, 2010; Du et al., 2013). En realidad, el problema reside en que, como se dijo antes, el contraste umbral, contraste mínimo requerido para diferenciar un objeto del fondo, varía de un sujeto a otro.

La definición de visibilidad meteorológica dada por la CIE y la WMO está directamente relacionada con la Ec. 2.4, y muestra que la absorción y difusión del medio determinan este parámetro. Es por ello que los visibilímetros basados en la Ec. 2.4 determinan la visibilidad midiendo la extinción de la luz en la línea de visión o a un solo ángulo fijo. 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) (Artigas et al., 1995) y a su capacidad interpretativa, aunque se consiga un buen entrenamiento.

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) (WMO, 2010) 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 (CIE, 2011).

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 a la difusión de la luz ocasionada por las reiteradas interacciones con los centros difusores sólidos o líquidos.

La definición de visibilidad tal como está planteada en la Ec. 2.4 presenta algunos inconvenientes, uno de ellos es la elección del contraste tomado como referencia. Por otro lado, cuando la medición se efectúa durante la noche, esta depende de la fuente de luz tomada como referencia. La determinación de la visibilidad a través del método de estima se encuentra sujeta

a la percepción visual de quien la realiza y por lo tanto está limitada a fines muy específicos, como alertas en rutas, control de aterrizaje o suspensión de vuelos, entre otros.

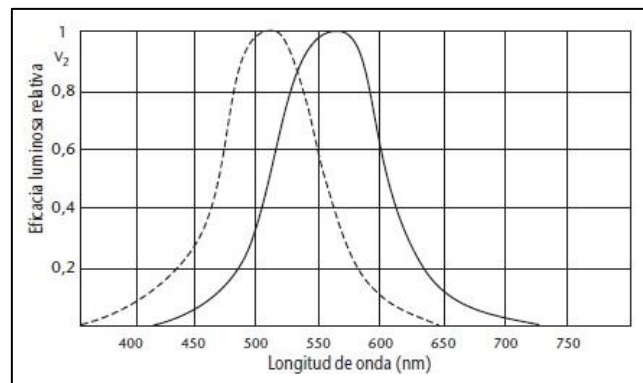


Figura 2.1 - Curvas de eficacia luminosa relativas del ojo humano para radiación monocromática. La curva lisa representa la visión fotópica y la curva de trazos la visión escotópica.

Siguiendo con el razonamiento, la proporcionalidad inversa entre la visibilidad horizontal y el coeficiente de extinción derivada por primera vez por Koschmieder en 1924 (Redmond et al., 2010), es válida únicamente bajo muy estrictas condiciones: la atmósfera debe estar iluminada homogéneamente, el coeficiente de extinción y la función de difusión no deben variar en el espacio, el objeto debe ser completamente negro y ser visualizado contra el cielo, mientras que "el ojo del observador debe poseer un umbral de contraste invariable".

A partir de mediciones de espesor óptico y difusión puede determinarse el coeficiente de extinción y usando la ley de Koschmieder, consecuentemente, la visibilidad. Si se disponen de mediciones de visibilidad, se puede, así mismo, obtener el coeficiente de extinción, que caracteriza al medio.

Las condiciones en las que es válida la ley de Koschmieder (atmósfera uniformemente iluminada, coeficientes de absorción y difusión constantes en todo el recorrido del haz de luz, objeto observado completamente negro contra el cielo de fondo y contraste umbral del ojo = 0,05) no son muy frecuentes. Horvath, realiza modificaciones a la teoría de Koschmieder que se adecuan más a condiciones más reales y cotidianas (Horvath, 1971). A partir de esta corrección es posible calcular la visibilidad, en las condiciones descritas por Horvath:

- Quando la iluminación no es uniforme, la iluminancia queda en función de la posición en la línea de observación.
- El coeficiente de extinción está representado por una función de la distancia de observación.
- Si el aerosol difunde parte de la luz y otra parte la absorbe, el cálculo anterior dará una visibilidad menor, ya que el contenido de aerosol disminuye por absorción de la luz que llega del objeto al observador, pero en el cálculo de contraste debe tenerse en cuenta que la misma proporción de luz desde el horizonte también disminuye en el recorrido hacia el observador.

- d) Para objetos no negros, se requiere una corrección de la luminancia del objeto de referencia. Para ello, es necesario realizar una medición telefotométrica. La luminancia depende de la dirección de observación al objeto.
- e) Blackwell compara más de medio millón de mediciones para evaluar el contraste umbral de observadores (Fig. 2.1). A partir de estas mediciones se calculan desviaciones respecto a la fórmula de Koschmieder.

En la medición diurna, la ley de Koschmieder puede expresarse en términos de la luminancia del objeto de referencia y la luminancia del fondo celeste (Ec. 2.5).

$$C = \frac{L_o - L_f}{L_f} \quad (2.5)$$

Con L_o la luminancia del objeto y L_f la luminancia del fondo.

La luminancia del horizonte tiene su origen en la luz difusa procedente de la atmósfera a lo largo de la línea de visibilidad del observador.

Cabe señalar que si el objeto es más oscuro que el fondo, entonces $C < 0$, y si el objeto es negro ($L_o = 0$) entonces $C = -1$.

Se define el "contraste inherente", C_o de un objeto, como el contraste que tendría el mismo con el fondo celeste, si se lo observa a una distancia muy corta. Llamando C_x al contraste cuando el observador se encuentra muy distante del objeto, entonces la ley de Koschmieder se puede escribir como:

$$C_x = C_o \cdot e^{-\sigma \cdot x} \quad (2.6)$$

El contraste varía con la distancia de la misma forma que lo hace la intensidad de luz. De acuerdo a la ley de Beer-Lambert, su atenuación es proporcional a la intensidad de luz de entrada y al camino de transmisión x . Esta relación facilita la aplicabilidad de la ley en distintos tipos de dispositivos que se construyen para medir la visibilidad en estos términos.

2.2 Medición de visibilidad. Dispositivos.

En general, los distintos autores señalan que las mediciones de visibilidad realizadas por estima están fuertemente limitadas en precisión y utilidad, puesto que el observador tiene su propio umbral de contraste de iluminancia, agudeza visual y adaptación a la oscuridad, la medición está limitada al número de objetos y su distribución a diferentes distancias, pero además influyen factores como la reflectividad del objeto, la capacidad del observador de enfocarse en una tarea, o el estrés y el estado de ánimo (Caimi et al., 2004).

Por otra parte, los instrumentos que se utilizan para medirla, tipo transmisómetros o los medidores de difusión directa, poseen elevado costo, requieren demasiado mantenimiento para su funcionamiento constante y son propensos a errores debido a cambios climáticos o condiciones inhomogéneas del ambiente.



Figura 2.2 - Transmisómetro (izquierda, AEMET) y escaterómetro (derecha, fuente: Met Office).

Los dispositivos de medición de visibilidad se distinguen entre: a) los que determinan el coeficiente de extinción y b) los que determinan el coeficiente de difusión únicamente.

Los del tipo a) (extinción) se agrupan, a su vez, en cuatro categorías, según su principio de funcionamiento:

- a) Instrumentos telefotométricos.
 - b) Medidores de extinción visual.
 - c) Transmisómetros.
 - d) Tecnología LiDAR.
- a) Instrumentos telefotométricos: Efectúan una comparación entre la luminancia aparente de un objeto distante y la del fondo celeste. Dentro de esta categoría, los visibilímetros basados en cámaras fotográficas hacen uso de la ley de Koschmieder para medir visibilidad a partir del análisis de imágenes. En la actualidad, se utilizan cámaras CCD (por sus siglas en inglés: Charge-Coupled Device, "dispositivo de carga acoplada" en español) para este propósito; en un método propuesto por Du (Du et al., 2013) se fotografía el mismo objeto con dos cámaras fijas colocadas a diferentes distancias en la misma línea de observación. Este método óptico digital se conoce como DOM-Vis (Digital Optical Method for Visibility). Por otro lado, Tang (Tang et al., 2016) fotografía, contra el cielo de fondo, un objeto negro cuya reflectancia s se determina inicialmente, a una distancia conocida x . El nivel de gris de la imagen se convierte en un valor de luminancia basado en las fotografías del objeto negro (B_L) y el cielo de fondo (B_∞) tomadas por la cámara CCD. Entonces, la visibilidad V se calcula como sigue:

$$V = x \cdot \frac{\ln 0,05}{\ln \frac{1 - \frac{B_L}{B_\infty}}{1 - s}} \quad (2.7)$$

Por otra parte, Xie, desarrolla un sistema de visibilidad por fotografía digital (DPVS por sus siglas en inglés) de funcionamiento automático por ordenador (Xie et al., 1999). A partir de las mediciones de luminancia con un sensor CCD, el sistema calcula el contraste entre el objetivo y el fondo celeste con un algoritmo propio y determina la visibilidad. Esencialmente, estos sistemas convierten la imagen en una matriz de puntos, cuyos valores

numéricos representan el nivel de gris medido por cada elemento CCD del sensor. El software opera con estas matrices para determinar parámetros específicos o características meteorológicas. Luo desarrolló un sistema calibrado para determinar la visibilidad a partir de la medición de luminancia de un objeto (Luo et al., 2002). El algoritmo permite calcular la luminancia intrínseca del objeto y posteriormente determinar la visibilidad.

En el trabajo publicado por Hautière, los autores construyen un método basado en la definición de visibilidad dada por la CIE (Hautière et al., 2006). Con este objetivo proponen un instrumento para uso en carretera que sirve para medir la visibilidad, determinando la distancia al objeto más distante y teniendo suficiente contraste con respecto a su fondo. En la Fig. 2.3, se representa un camino simplificado con marcado de carretera discontinua. Arriba, suponemos que el objeto visible más distante es la extremidad de la última marca de la carretera (podría haber sido la frontera de la carretera también). Abajo, el vehículo se ha movido y una nueva marca de camino ahora es visible. Llamamos a ésta, distancia al objeto visible más lejano, que depende de la escena del camino, la distancia de visibilidad movilizada V_{mob} . Esta distancia será comparada con la distancia de visibilidad movilizable V_{max} . Esta es la mayor distancia a la que un elemento de la imagen en la superficie de la carretera sería visible. En consecuencia, tenemos la siguiente relación: $V_{max} \geq V_{mob}$.

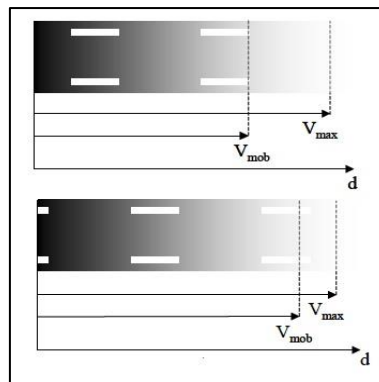


Figura 2.3 – Ejemplos de visibilidad movilizada y movilizable.

Los sensores de visibilidad por cámara digital (DCVS por sus siglas en inglés) determinan la visibilidad a partir de la toma de fotografías a objetivos fijos, las cuales son procesadas por ordenador, con algoritmos que evalúan el contraste del objeto con el cielo de fondo. Permiten estimaciones de visibilidad consistentes y precisas, como lo demuestra Caimi.

Bäumer emplea una cámara panorámica para toma de fotografías digitales (Bäumer et al., 2008). El algoritmo de procesamiento de imagen emplea el operador Sobel para identificar bordes. Este operador calcula los gradientes discretos en un mapa de píxeles de dos dimensiones en escala de grises, asociado a bordes definidos. A partir del umbral de imagen se calcula la visibilidad. El instrumento de verificación es un retrodifusor de una estación de observación meteorológica en Alemania. Babari hace uso también del operador Sobel en el algoritmo de detección de bordes para calcular la visibilidad por atenuación de contraste, mediante ley de Beer-Lambert, suponiendo superficies lambertianas (Babari et al., 2011).

b) Medidores de extinción visual: Utilizan una fuente luminosa conocida y un filtro neutro regulable. Ajustando el filtro, de absorción conocida, se atenúa la luz que llega al medidor hasta que desaparece completamente. La lectura del medidor proporciona el nivel de transparencia del volumen de aire entre la fuente y el detector, y a partir de esta medición se calcula el coeficiente de extinción.

Tanto los instrumentos de medición de extinción visual como los telefotómetros emplean técnicas pasivas, debido a que no actúan sobre la muestra de manera que esta emita. En las técnicas activas en cambio, hay emisión de la radiación absorbida por parte de las muestras. Los dos tipos de instrumentos que siguen emplean técnicas activas.

c) Transmisómetros: Existen dos tipos, el transmisómetro de dos extremos y el de único extremo. En el primero, la fuente y el detector se localizan en unidades separadas. La fuente en general es una lámpara de halógeno o tubo de descarga. El dispositivo fotodetector es generalmente un fotodiodo, que mide la pérdida de luz en todo el recorrido.

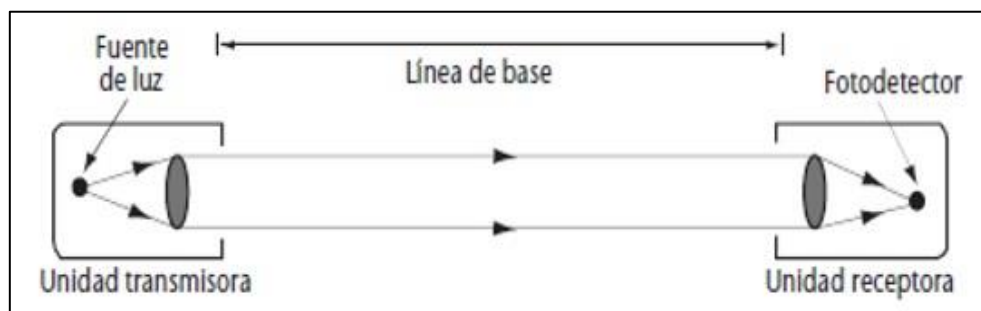


Figura 2.4 - Transmisómetro de doble extremo.

El Roadway Visual Range (RVR) es un ejemplo de transmisómetro de doble extremo, su uso se aplica principalmente en aeropuertos, ya que el ángulo de medición corresponde a la línea de visión de los pilotos de aviones durante el despegue/aterrizaje. El desarrollo del RVR comenzó en 1985: los sensores combinan difusión directa, luminancia de fondo e intensidad de luz en pista para calcular el alcance de visión para los pilotos. El RVR posee una fuente de luz propia y un detector separados a una distancia fija, y mide en el rango entre 50 y 1200 metros. Es decir, se aplica únicamente en el rango de visibilidad baja. Estos instrumentos brindan información, en tiempo real, del estatus de visibilidad en la pista de aviones. Sin embargo, las mediciones contienen muchas imprecisiones debido a que el volumen de medición es demasiado pequeño, no superior al metro. A diferencia de otros dispositivos de medición de visibilidad horizontal, el RVR mide la visibilidad a un pequeño ángulo de 3° y 5° sobre la superficie.



Figura 2.5 - Transmisómetro de un solo extremo.

Por otro lado, el transmisómetro de extremo único consiste en un doble paso de luz, la fuente y el detector están en la misma unidad. La luz de la fuente se refleja a una distancia conocida, denominada línea de base, y vuelve al detector.

- d) **Técnica LiDAR:** La técnica LiDAR (Light Detection and Ranging) mide la retrodifusión de luz láser dirigida a la atmósfera. La emisión de luz de la fuente no es continua, durante periodos breves de tiempo, por ejemplo 15 minutos, el sistema activa una serie de pulsos cortos y de alta frecuencia (hasta 150 mil pulsos por segundo) durante 1 minuto hasta la siguiente medición. También disponen de distintas longitudes de onda, lo que permite la caracterización de composiciones gaseosas y líquidas mediante un análisis espectral discreto. En función de la respuesta de las moléculas a las distintas longitudes de onda, se puede caracterizarlas y determinar su abundancia en función de la amplitud detectada por el sensor. El sistema calcula la distancia de la capa atmosférica difusora según el tiempo de recorrido del pulso láser, que se encuentra en el orden de unos cuantos microsegundos, desde el momento en que es emitido a nivel del suelo, hasta que la señal retrodifundida regresa a la estación. Se utiliza para determinar número de partículas, composición y la visibilidad vertical. Además, puede emplearse para medir visibilidad horizontal con un láser orientado en dirección paralela a la superficie terrestre, de forma similar a un transmisómetro.

Existe una red de monitoreo atmosférico por LiDAR en Latinoamérica, la cual se encuentra en estado de desarrollo (Ristori et al., 2018). La problemática de la emisión de partículas a causa de los incendios o la actividad volcánica es un tema importante a escala mundial, así como también la contaminación asociada al desarrollo no sostenible, cada vez más acelerado, que contribuye al cambio climático y genera una marcada preocupación en la comunidad científica. Es por esto que muchos investigadores participan en estudios de este tipo y es importante remarcar la investigación que se realiza entre países sudamericanos a nivel regional. La problemática local de esta tesis de Licenciatura no está relacionada únicamente a la quema de cañaverales, sino más bien está enmarcada en una problemática a nivel global.

El grupo de investigación de Otero realizó un estudio con LiDAR (instrumento activo) y fotómetro solar (pasivo) de la visibilidad y contenido atmosférico de aerosoles en la ciudad de Neuquén, en la Patagonia (Otero et al., 2018). Las partículas producto de la combustión en bosques son arrastradas por el viento, y a los tres días alcanzan la ciudad de Neuquén, donde permanecen unos 4 días. El LiDAR presenta la ventaja de que permite el monitoreo

remoto en tiempo real a través del sistema de teledetección, permitiendo obtener, mediante uso de múltiples longitudes de onda, una distribución espacial y temporal de los aerosoles atmosféricos. El fotómetro solar presenta la ventaja de que puede medir la absorción en varias longitudes de onda, debido a que emplea la luz solar como fuente. Las mediciones de los instrumentos son comparadas con mediciones satelitales. Otro estudio presenta la relación entre retrodifusión e incremento de temperatura (Chen et al., 2016).

La ley de Beer-Lambert posee limitación de aplicabilidad sobre las metodologías por medición del coeficiente de extinción, ya que el tratamiento del proceso de difusión no es adecuado, el cual es dependiente únicamente de la señal de entrada. En el caso de formaciones de niebla y de distintas clases de nubes, donde no existe un término predominante de luz no difusa, el único responsable de la señal recibida es el proceso de difusión en la capa atmosférica en estudio. Los modelos utilizados consideran principalmente los procesos de retrodifusión: Tam propone un modelo electromagnético de retrodifusión basado en la ecuación de transferencia de radiación, considerando difusión múltiple en ángulos pequeños, condición válida para medios con una función de fase de difusión muy anisotrópica, que ocurre cuando la longitud de onda del láser es menor al tamaño de los centros difusores (Tam & Zardecki, 1982). Es una aproximación asintótica de la ecuación general de retrodifusión.

Para medición en condiciones de niebla, donde la intensidad de la RO difusa tiene simetría esférica, es decir de la misma intensidad para cualquier dirección, la intensidad sólo decrece radialmente. Los instrumentos miden en pocos ángulos fijos y en volumen de muestreo pequeño. Entonces la intensidad medida es baja, pero presentan la ventaja de poseer mayor resolución temporal con mediciones en tiempo real. Estas mediciones, sin embargo, no se realizan por acumulación. La neblina tampoco absorbe la RO, estas partículas al ser más chicas difunden más y el coeficiente de difusión predomina sobre el de absorción, son más efectivos los instrumentos de visibilidad que miden por difusión de la luz. La difusión aumenta cuando las partículas son más pequeñas. Si la cantidad de partículas transparentes (niebla o lluvia, por ejemplo) es muy elevada, la reflexión que estas producen puede bloquear completamente el campo de visión. Es por esto que se emplean como controles en rutas, para seguridad de los conductores, donde existen eventualmente condiciones de niebla o lluvia. Cuando las condiciones climatológicas son extremas, desde el asiento del conductor no se ve la carretera, imposibilitando el manejo.

La difusión que produce la niebla es isotrópica: la distribución de la RO difundida posee simetría esférica, por lo que es la misma a cualquier dirección. Los instrumentos de medición de difusión de la RO en general poseen sensores en pocos ángulos fijos, están limitados por un volumen de muestreo pequeño, en consecuencia la intensidad detectada es baja. Si bien el espacio de medición es reducido, permiten la determinación en tiempo real. Algunos modelos son compactos. Dentro de esta clase de visibilímetros existen tres tipos de instrumentos:

- Retrodifusión.
- Difusión frontal o directa.
- Difusión integrada en un ángulo de gran apertura.

Los instrumentos de medición por retrodifusión poseen la fuente y el detector en el mismo compartimento. El dispositivo de detección está localizado debajo de la fuente luminosa. El haz de luz se concentra en un pequeño volumen de luz delante del transmisor. La difusión debida a la reflexión, refracción o difracción por las gotas de agua (niebla) es la principal causa de reducción de visibilidad, por ello se puede considerar que el coeficiente de difusión es igual al coeficiente de extinción, y utilizarlo para estimar la visibilidad, o como un RVR, es decir para determinar el alcance visual en pista.

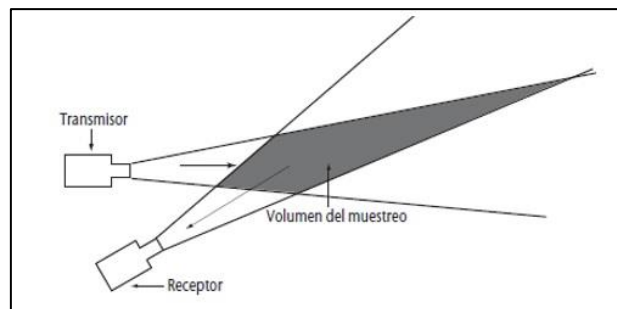


Figura 2.6 - Escaterómetro por retrodifusión.

Los de difusión directa miden la luz difundida a un pequeño ángulo respecto a la dirección del haz. Algunos dispositivos emplean un diafragma para bloquear la luz directa que proviene de la fuente. Los ángulos más efectivos para la medición están entre 20° y 50° .

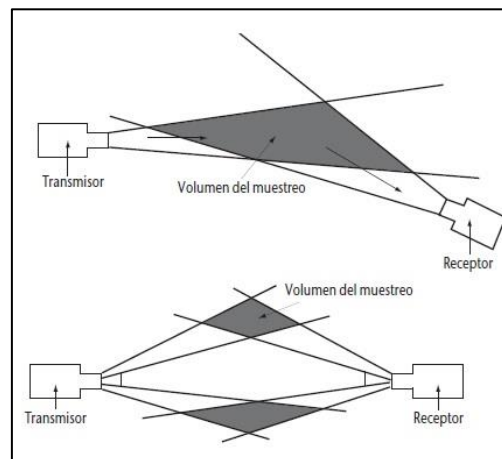


Figura 2.7 - Escaterómetro por difusión directa. En el diseño de arriba, el transmisor emite luz hacia la muestra y el receptor, ubicado al otro lado del volumen de muestra, mide a un pequeño ángulo la difusión. En el diseño de abajo, el receptor mide la luz que proviene de ambos lados del diafragma colocado justo delante del sensor. El transmisor posee un diafragma para reducir la cantidad de luz difusa.

Por último, los instrumentos con ángulo de gran apertura, poseen la fuente luminosa entre el transmisor y el detector distanciada del camino entre uno y otro.

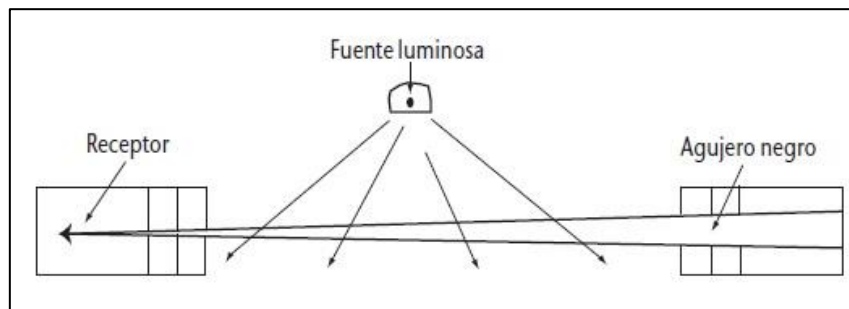


Figura 2.8 - Escaterómetro de gran apertura.

En todos los instrumentos anteriores, como en caso de la mayoría de los transmisómetros, los receptores comprenden células fotodetectoras o fotodiodos. Se utiliza luz pulsada (por ejemplo, una descarga de elevada intensidad en xenón).

Estos instrumentos requieren poco espacio (en general de 1 a 2 metros) y pueden ser colocados fácilmente en cualquier superficie plana y estable. Por eso son útiles cuando no se dispone de objetos de visibilidad o fuentes de luz (barcos). Como la medición se refiere a un volumen de aire muy pequeño, la representatividad de las mediciones sobre el estado general de la atmósfera en el emplazamiento puede ponerse en duda. Sin embargo, esta representatividad puede mejorarse promediando varias muestras o mediciones. A veces, también pueden suavizarse los resultados eliminando valores extremos, que pueden deberse a eventos fortuitos como la obstaculización o contaminación local.

2.3 Propuesta de medición de la difusión.

Dado que la visibilidad debe ser observada con referencia a objetos cuya distancia desde el punto de observación es conocida y que se observan también variaciones significativas de la visibilidad con la dirección, es de especial importancia cualquier variación en el área de aproximación a la línea de visión (ángulos pequeños). En la mayor parte de los casos, la visibilidad y sus variaciones con la dirección pueden ser determinadas por observaciones visuales, pero cada vez es más frecuente la utilización de sensores automáticos, de gran utilidad en condiciones de baja visibilidad. En la actualidad existe una tendencia a la medición de visibilidad mediante dispositivos de cámara digital, siendo cada vez más infrecuentes los métodos por estima. Como se dijo en 2.1, el coeficiente de extinción (σ) determinado en la línea de visión permite obtener la visibilidad meteorológica. En la práctica, además, los visibilímetros actuales utilizan cámaras automatizadas que monitorean la visibilidad diurna enfocando un objeto a distancia conocida y midiendo su contraste con el cielo de fondo.

Otros métodos miden la intensidad de luz que llega a una cámara CCD (o cualquier otro tipo de sensor) ubicada en diferentes ángulos respecto a la línea de visión del objeto de referencia. De este modo se mide, no sólo la transmitancia del medio en la dirección de visión, sino la luz difundida en diferentes ángulos. Estos métodos permiten estudiar concentraciones y distribuciones de tamaños de partículas, además de su composición, mediante modelos

simplificados de extinción y empleando dispositivos que miden alguna característica de las partículas (Sánchez-Capuchino & Arasa, 2003).

En general, estos dispositivos están limitados a la medición de un único parámetro global, como ser el coeficiente de difusión o absorción. Aunque esta característica puede ser suficiente para funciones específicas como alertas meteorológicas, señalización en rutas y autopistas, o en pistas de aeropuertos, no proporcionan la información suficiente como para caracterizar los aerosoles en suspensión, ni poseen la resolución adecuada para estudiar los cambios en el ambiente, contrastar modelos u otros instrumentos, calibrar otros dispositivos, medir concentraciones de contaminantes con mayor o igual precisión que en laboratorio, determinar composiciones del particulado, etc. Algunos de los inconvenientes recién mencionados: problema de la falta de resolución temporal, la falta de información respecto a la concentración de partículas y su caracterización, pueden resolverse midiendo la distribución angular de luz difusa en el espectro visible. Se propone el uso de un instrumento goniométrico que mide la difusión con gran resolución angular.

Las mediciones de visibilidad por instrumento o estima comúnmente utilizadas son localizadas al limitarse al espacio de visión, o el volumen de muestreo en el caso de los instrumentos (aunque en el caso de los instrumentos el espacio es más reducido). La medición por estima no tiene en cuenta la difusión de la luz, ya que depende del contraste umbral, el cual está fijado por el observador porque se trata de una característica fisiológica intrínseca del mismo. La visibilidad en este método está determinada por la pérdida de contraste, que está ocasionada principalmente por la absorción de la RO. Sin embargo, la difusión de la RO produce una degradación de la información que se traduce en una pérdida de frecuencias espaciales, efecto que no es tenido en cuenta por el observador. Cuando el medio es difusor, la pérdida de contraste no es la misma para distintas frecuencias espaciales, pero el observador en pie considera el contraste globalmente, es decir, independientemente de la frecuencia espacial.

Mediante el muestreo de partículas en el ambiente recolectadas por deposición en una superficie, puede caracterizarse la polución del aire. Para ello, se mide en laboratorio la difusión de la luz que producen estas muestras, bajo condiciones controladas. Este método representa una ventaja respecto a otros métodos de medición en cuanto a que no está localizado: la medición de muestras de deposición integra todas las contribuciones de las fuentes de contaminación que emiten las partículas difusoras a la atmósfera, como las quemadas de pastizales a cielo abierto aledañas a la región de muestreo.

CAPÍTULO 3

MODELOS Y DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE LA DIFUSIÓN DE LA RO

3.1 Introducción. Conceptos básicos.

En el capítulo anterior se analizaron los modelos teóricos e instrumentos de medición de la visibilidad. A partir de lo visto puede decirse que las mediciones de visibilidad por instrumento o estima, comúnmente utilizadas, son localizadas, ya que el espacio de visión o el volumen de muestreo, en los instrumentos, queda limitado. La medición por estima no tiene en cuenta la difusión de la luz, depende del contraste umbral característico de cada observador, tal como se explicó en 1.2. La medición de visibilidad en este método está asociada a la pérdida de contraste, debida principalmente a la absorción de la RO y no a la difusión. Sin embargo, la difusión de la RO produce la pérdida de contraste de diferente magnitud en las diferentes frecuencias espaciales que componen la escena visual, lo que se traduce en una degradación selectiva de la información visual, efecto que no es tenido en cuenta por el observador. La difusión reduce, principalmente, el contraste en las frecuencias espaciales más altas de la escena visual, las cuales proporcionan la información de los detalles más finos de la escena, tales como bordes o vértices.

El objetivo de este capítulo es analizar los modelos de difusión de la RO y los dispositivos actuales más usados en su medición. Entre los modelos teóricos de difusión, están los que parten de la teoría electromagnética clásica y de la óptica geométrica, para el caso de centros difusores muy grandes. Por otro lado, los modelos semiempíricos son más actuales y describen fenómenos difusivos múltiples. A partir de estos modelos, se presenta el estado del arte de los dispositivos de medición de la difusión.

La reflexión difusa de la luz proporciona al ser humano la información visual básica sobre los objetos y sobre el medio ambiente que lo rodea; le permite distinguir formas, bordes y texturas de los objetos que se presentan en su campo visual. Pero la luz, que se ha reflejado en forma difusa en los objetos, necesita transmitirse sin perturbaciones por el medio circundante (en general aire, agua o materiales transparentes) para llevar la información hasta el ojo del sujeto, donde se encuentran los receptores de esta información. Si un medio difusor de la luz se interpone en el camino óptico entre el estímulo y el detector, originando una transmisión difusa de la luz, la información recibida resulta degradada y puede llegar a inhabilitar la función visual (Artigas et al., 1995). Por lo tanto, la difusión en el ambiente y en el sistema óptico no es deseable.

Por otra parte, la luz que percibimos en un ambiente natural, proveniente del cielo (no directamente del sol) es principalmente luz difundida por las partículas atmosféricas o por las moléculas de los gases que componen la atmósfera, en todas direcciones. Estos fenómenos difusivos son también responsables de que el cielo sea azul y los atardeceres rojizos o la luz proveniente de una nube más blanca o grisácea. La luz natural difusa ilumina los objetos y el medio ambiente en forma homogénea, en todas las direcciones, dando lugar a una buena visibilidad y permitiendo que el ser humano realice tareas visuales en forma eficiente, en estas

condiciones. Sin embargo, los medios difusores, en especial la atmósfera, pueden contener distintos tipos de partículas sólidas o líquidas en suspensión que varían en cantidad, forma, tamaño y estructura o composición química, que modifican el efecto de difusión de la luz. De acuerdo a las características de las partículas suspendidas se producirán distintos tipos de fenómenos difusivos y de ellos dependerán las características de las pérdidas visuales producidas. Estas partículas suspendidas pueden ser de vapor de agua en la niebla, partículas sólidas en el humo, en una atmósfera con polución o con lluvia ácida o directamente pequeñas gotas de agua en una nube, en el rocío o en la lluvia. En estas condiciones, se produce una pérdida apreciable de definición de los detalles más finos de los objetos, esto sucede así cuando el medio difusor presenta bajas densidades de centros difusores (niebla, humo, materiales translúcidos, etc.).

En la atmósfera, la presencia de partículas sólidas y líquidas suspendidas determina la visibilidad. Cuando la densidad de las partículas suspendidas aumenta, la visibilidad disminuye drásticamente hasta casi unos pocos metros por delante de la persona y las funciones visuales se ven seriamente afectadas. Si se trata de un medio turbio de alta densidad (niebla espesa, medios líquidos orgánicos o materiales con alta densidad de inhomogeneidades) puede verse afectada la información contenida hasta en las componentes de frecuencias espaciales más bajas del estímulo, impidiendo ya su detección. Más aún, se modifica la percepción de los tamaños y las distancias relativas (Landsberg, 1984).

El mismo fenómeno difusivo se presenta en los medios oculares internos que forman parte de la óptica del sistema visual. Una problemática muy específica se presenta con la difusión intraocular de luz, producida por la opacidad del cristalino (enfermedad de cataratas), que se traduce frecuentemente en una disminución de la capacidad visual de los adultos mayores y llega a producir la pérdida total de la visión si no se remueve a tiempo la lente intraocular (Vos et al., 2002).

Por otra parte, la eficiencia en las tareas visuales que normalmente se desarrollan en un medio ambiente iluminado dependen, en gran medida, del aprovechamiento de la información disponible en el ambiente y muchas limitaciones a este aprovechamiento pueden provenir de los procesos ópticos refractivos y difusivos presentes en el camino visual intraocular hasta los foto-detectores. El estudio de estos procesos ha sido en general resuelto a partir de los desarrollos de la óptica visual, relacionados a procesos refractivos. Los procesos difusivos, bastantes más complejos de modelar, no han sido totalmente resueltos, por lo que siguen siendo objeto de análisis.

La difusión intensa de la luz a causa de heterogeneidades ópticas originadas en forma natural, se produce en los llamados medios turbios tales como el humo (partículas sólidas en gas) o la niebla (gotas de líquido en aire), las suspensiones (partículas sólidas en líquido) o las emulsiones (suspensiones de gotas de líquido en otro líquido que no las disuelve). En estos medios, las partículas son pequeñas respecto a la longitud de onda de la radiación luminosa. Originalmente estudiada por Tyndall, hacia fines del siglo XIX, describe la variación de color de la luz difundida por partículas pequeñas respecto a la longitud de onda de la luz visible que, en la dirección perpendicular a la del haz incidente, se torna azulada y totalmente (o casi totalmente)

polarizada, aunque la fuente de luz sea blanca y no polarizada. La distribución angular de la intensidad de luz difundida resulta simétrica respecto a la dirección del haz incidente y al eje perpendicular. Más adelante, Rayleigh, en 1899, desarrolla un modelo teórico para determinar la intensidad de la luz difundida por partículas esféricas cuyas dimensiones son pequeñas comparadas con la longitud de onda de la luz incidente (Landsberg, 1984).

De esta manera comienzan a evolucionar las distintas propuestas teóricas para explicar y predecir este tipo de interacción entre la luz y los medios materiales. Paralelamente han ido evolucionando los dispositivos experimentales y las técnicas desarrolladas para medir ya sea, la función de difusión de materiales y medios ópticos como sus efectos y aplicaciones.

El estudio de los problemas asociados a la difusión de la luz se ha desarrollado en campos muy diversos y ha dado lugar a aplicaciones tecnológicas muy disímiles. Desde la detección de compuestos específicos en soluciones químicas, la detección de objetos en medio turbios o la caracterización de superficies hasta la identificación de cultivos por teledetección. En todos los casos interesa conocer cómo la radiación o el estímulo original se ven afectados por la presencia del medio difusor. La especificación de una función de distribución espacial de reflectancia y de transmitancia anisótropa requiere un modelado específico, vinculado no sólo a la estructura característica del material, sino teniendo en cuenta, además, la aplicación que se considere.

La tecnología existente para la caracterización de la transmitancia y/o la reflectancia de medios difusores es muy sofisticada pero en general orientada a aplicaciones tecnológicas específicas y de altos costos (teledetección, nefelómetros, medición de rugosidad o control de pulido de superficies, etc.). Desde el punto de vista teórico, la difusión es estudiada a partir de modelos de colisiones simples que permiten obtener distribuciones de difusión exactas pero muy simplificadas (modelos de Mie y de Rayleigh), o de modelos de difusión múltiple donde la distribución angular exacta de la difusión no es determinante y se trabaja sólo con parámetros globales característicos (parámetro S de difusión, distancia de extinción, etc.), dejando de lado casos intermedios tales como los de pocas colisiones difusivas, en los que resulta necesario todavía conocer la forma de la distribución angular de cada centro difusor.

Por otra parte, los modelos existentes no correlacionan de forma clara las características del difusor con efectos perceptuales específicos apreciables en la visión, como la pérdida de sensibilidad al contraste en diferentes frecuencias espaciales, el efecto sobre el deslumbramiento (glare) o la percepción incorrecta de tamaños y distancias cuando un medio difusor se interpone en el camino visual. Resulta indispensable para avanzar en la descripción de estos efectos, el desarrollo de un modelo que permita explicar el comportamiento de la radiación visible al atravesar un medio difusor y cuyos parámetros característicos permitan sistematizar efectos visuales conocidos, de utilidad en el estudio de la percepción visual. Un estudio de este tipo permitiría generar nuevas herramientas para predecir y/o reproducir comportamientos que pueden correlacionarse con resultados psicofísicos obtenidos a partir de la respuesta de observadores.

Desde el punto de vista teórico, la difusión de la radiación óptica es estudiada a partir de distintos modelos que van desde los de colisiones simples que obtienen distribuciones de

difusión exactas pero muy simplificadas hasta modelos de difusión múltiple donde se trabaja sólo con parámetros globales característicos.

En este capítulo se analizan los conceptos y las definiciones básicas que dan lugar a los dispositivos más utilizados recientemente en el estudio de la difusión. Los resultados de los estudios teóricos y experimentales de la difusión se representan de formas diferentes según su objetivo y entorno de aplicación. Algunos estudios simplemente dan como resultado una magnitud escalar que representa alguna característica de todo el proceso de difusión en conjunto; en cambio, en estudios más avanzados lo que interesa conocer en detalle es la distribución espacial de la radiación al final del proceso.

Función de distribución bidireccional de difusión (BSDF).

Para medir la difusión, es de utilidad la función de distribución bidireccional de difusión (BSDF por sus siglas en inglés: Bidirectional Scattering Distribution Function). Es una de las posibles representaciones que sistematiza Nicodemus para mediciones ópticas, indicando que tanto la radiación incidente y la radiación emergente son direccionales (Nicodemus, 1977). Es la relación de la radiancia que se obtiene para una dada dirección emergente en función de la irradiancia de la RO proveniente del espacio de entrada, el espacio objeto, la cual incide sobre el sistema óptico. El sistema óptico determina la distribución de radiancia en el espacio de salida, conocido como espacio imagen.

En el problema directo de la difusión, a partir de una fuente conocida del espacio objeto, que emite RO propia o la refleja, y un sistema óptico determinado, con características también conocidas, puede obtenerse matemáticamente la distribución de radiancia en el espacio imagen, a partir de los parámetros conocidos del sistema óptico y en función de la irradiancia de entrada (Hecht, 2000).

Sin embargo, los dispositivos de difusión empleados para caracterizar polución ambiental responden al problema inverso que es, resolver matemáticamente las propiedades del medio difusor a partir de una fuente de irradiancia controlada, y por lo tanto conocida, y una distribución de luz medida con el dispositivo experimental.

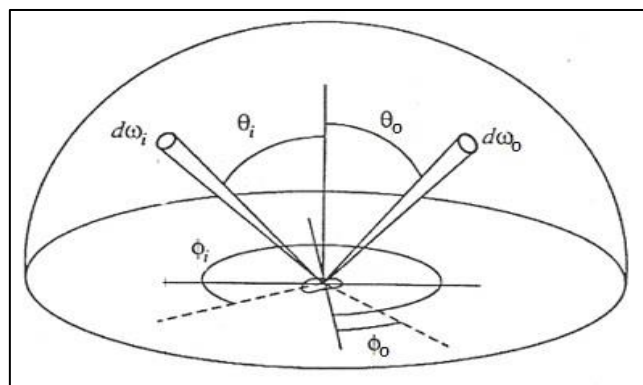


Figura 3.1 – Representación utilizada por Nicodemus para definir la BSDF.

La Ec. 3.1 muestra la forma general de la relación bidireccional de la radiación. La función f_r es la relación del elemento de radiancia dL_r que se obtiene para una dada dirección emergente en función del elemento de irradiancia dE_i que incide sobre la muestra donde:

- Los ángulos θ_i y ϕ_i , determinan la dirección de la radiación incidente.
- Los ángulos θ_o y ϕ_o , determinan la dirección de la radiación emergente.

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o; E_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} [sr^{-1}] \quad (3.1)$$

Nicodemus utiliza la forma f_r para la función general sin restricciones, para luego determinar si se considera reflectancia, transmitancia o la función completa, bidireccional, normal o integral, etcétera.

En general, para los estudios sobre difusión, la radiación incidente tiene una única dirección, aunque puede hacerse el análisis para cualquier dirección incidente. La resolución completa del sistema difusor implica conocer la f_r para todas las direcciones de incidencia posibles.

El término BSDF se usa de forma genérica para hacer referencia tanto a la difusión producida por reflexión, BRDF (función de distribución bidireccional de reflectancia, de sus iniciales en inglés), como a la producida en la transmisión de un haz, BTDF (función de distribución bidireccional de transmitancia, de sus iniciales en inglés) (Nicodemus, 1977).

Stover sostiene que la utilización de cantidades no diferenciales es más razonable para trabajar con equipos experimentales y define la BSDF como:

$$BSDF = \frac{P_o / \Omega_o}{P_i \cdot \cos \theta_o} \quad (3.2)$$

Donde P_o es el flujo de RO difusa (Watt), Ω_o es el ángulo sólido en el que se redirige la RO difundida (en la Figura 3.1, $d\omega_i$ representa el elemento diferencial de entrada y $d\omega_o$ el de salida), P_i es el flujo de RO incidente (Watt), y θ_o es el ángulo de difusión (Stover, 1995).

La forma diferencial es muy similar:

$$BSDF = \frac{dP_o / d\Omega_o}{P_i \cdot \cos \theta_o} \quad (3.3)$$

La definición puede explicarse por tres partes: (1) La proporción entre el flujo entrante y saliente, P_o/P_i , es la definición clásica de transmitancia y reflectancia; (2) el término $1/\Omega_o$ incorpora el ángulo sólido de salida de RO difusa; (3) el factor $1/\cos \theta_o$ da la proyección del ángulo sólido con respecto a la superficie de difusión.

Comúnmente la BSDF se escribe como dependiente de los cuatro parámetros mencionados, los ángulos de incidencia y los ángulos de difusión. Además, la BSDF depende implícitamente de la longitud de onda y el estado de polarización de la RO incidente.

Para materiales dispersores, se define la función de distribución de dispersión bidireccional espectral (BSDF espectral) que incluye la información de longitud de onda en la interacción de la radiación con el medio a estudiar. Esta función relaciona la irradiancia incidente con la radiancia dispersada por el material. Permite evaluar la difusión de la RO en términos de longitud de onda, proporcionando así una descripción completa para el estudio y la comparación de materiales difusores determinando sus características ópticas tanto espectrales como espaciales. En efecto, cualquier medición de brillo y color puede estar relacionada con un valor particular de la BSDF espectral.

Función de punto extendido (PSF).

El concepto de Función de Punto Extendido, PSF (Point Spread Function), proviene de la óptica y resulta fundamental para la especificación de la calidad óptica de muchos sistemas. Cualquier sistema óptico (una cámara fotográfica, un telescopio, un microscopio o el ojo humano) produce una imagen "más o menos borrosa" de un objeto puntual, debido en parte a las aberraciones, en parte a la difracción (Kenyon, 2008).

La PSF es la respuesta de un sistema cualquiera a una señal de entrada de tipo "función impulso" que se representa matemáticamente con la función Delta de Dirac. La caracterización de los medios difusores a través de la PSF es sumamente útil y es equivalente a la BSDF bajo ciertas condiciones de simetría del sistema, que se analiza más adelante. Por otra parte el conocimiento de cómo los medios difusores externos o internos al sistema visual modifican las características de la PSF del sistema visual es fundamental para explicar el efecto perceptual que estos medios pueden producir en el sujeto receptor de la información.

La función de punto extendido tiene una forma idéntica a la imagen formada cuando la fuente es una función impulso. La PSF es la imagen que se obtiene en un sistema óptico centrado, de un punto objeto (representado matemáticamente por la función Delta de Dirac) y depende de las coordenadas del objeto y de la imagen ($\alpha_o, \beta_o, \gamma_o, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i$). La imagen obtenida es por lo tanto la respuesta impulso del sistema, $PSF(x, y, X, Y)$, como se esquematiza en la Fig. 3.2, donde (X, Y) son las coordenadas en el plano imagen Σ_i correspondientes a las coordenadas (x, y) en el plano objeto Σ_o .

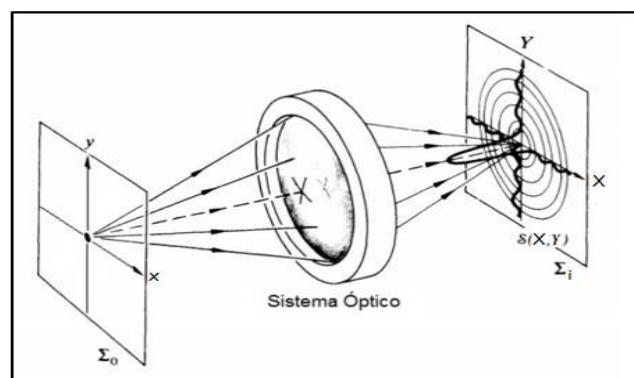


Figura 3.2 - Representación de la PSF. Si la fuente en el espacio objeto es puntual, la imagen obtenida a través del sistema óptico es directamente la PSF.

La forma de esta función, que representa la distribución de la intensidad de la RO en el plano Σ_i , dependerá tanto de la difracción como de las aberraciones presentes en el sistema óptico. En general, la función de punto extendido resulta ser el patrón de Airy (difracción pura) si las aberraciones son despreciables, pero se deformará si hay aberraciones considerables (Hecht, 2000).

Si el sistema óptico es lineal y además invariante en el espacio (esto es, si cambiando la posición de la función de entrada únicamente cambia la posición de la salida, sin alterar su forma funcional), entonces la salida del sistema óptico puede ser tratada como una superposición lineal de las salidas de cada uno de los puntos individuales del objeto. En este caso, el objeto puede dividirse en un conjunto de objetos discretos puntuales de intensidad variable y como la PSF queda determinada enteramente por el sistema, la imagen puede calcularse como la suma de las PSF de cada punto y puede ser descrita conociendo las propiedades ópticas del sistema (Kenyon, 2008).

Este proceso se describe matemáticamente por una operación de convolución \otimes . Si se realiza la convolución de la función que describe el objeto $O(x, y)$ con la $PSF(x, y, X, Y)$ del sistema óptico se obtiene la imagen del objeto producida por ese dispositivo (Ec. 3.4).

$$PSF(x, y, X, Y) \otimes O(x, y) = I(X, Y) \quad (3.4)$$

Entonces, se puede ver que la PSF es una herramienta muy útil para obtener “la respuesta” del sistema a cualquier estímulo y es ampliamente utilizada en óptica visual.

Existe la posibilidad de obtener la PSF de un sistema óptico o de una muestra difusora a partir de datos de la BSDF, ya que esta última tiene mayor generalidad. Por ejemplo, esto ocurre si una muestra en particular, cuya difusión se desea medir, se coloca en el plano perpendicular a un haz incidente de sección transversal despreciable respecto a la superficie de la muestra y si el sistema de medición está centrado en el eje óptico (Hecht, 2000). Entonces puede calcularse la BSDF usando la relación descrita en la Ec. 3.5 donde T es la transmitancia de la muestra y se obtiene la $PSF(\theta)$ para una imagen en el infinito.

$$PSF(\theta_e, \varphi_e) = \frac{BSDF(0,0; \theta_e, \varphi_e)}{T} \quad (3.5)$$

Como se mencionó anteriormente, la BSDF incluye tanto la distribución de la radiación reflejada como la transmitida por el medio difusor y depende de la posición angular del haz incidente y del emergente en el punto de medición $(\theta_i, \varphi_i, \theta_e, \varphi_e)$. En este caso la BSDF, con dos variables menos, posee únicamente dos grados de libertad y depende únicamente del plano de medición. Los ángulos θ_e y φ_e , definidos sobre el plano de la muestra, corresponden a la radiación emergente de un filtro difusor, por ejemplo, y los ángulos que forma el haz de radiación incidente son nulos. Los ángulos θ_e y φ_e se usan para describir la distribución de la radiancia (o luminancia si el detector posee filtro V_λ) a la salida del medio óptico o, haciendo la transformación correspondiente, sobre el plano imagen del detector en donde queda definida la $PSF(\theta_e, \varphi_e)$ del sistema (Ditchburn, 1982).

Cuando el sistema óptico, que separa el espacio objeto del espacio imagen, está enfocado al infinito, es decir que el plano de detección está localizado en el foco del sistema óptico, la distribución de luz no corresponde a la imagen del objeto cercano, sino más bien a su transformada de Fourier. Es por este motivo que ese plano recibe también el nombre de plano de Fourier. El plano focal tiene la propiedad de discriminar direcciones en función de la posición en el plano.

Función de Tránsito de Modulación (MTF), su utilidad en el estudio de medios difusores.

Continuando con el análisis de los sistemas ópticos, supuestos lineales e invariantes como en el apartado anterior y teniendo en cuenta que los elementos ópticos que funcionan como operadores lineales transforman una entrada senoidal en una salida senoidal no distorsionada, esto significa que, independientemente de la forma que tenga la PSF del sistema, la imagen será armónica si el objeto es armónico. A pesar de esto, las distribuciones de radiancia a la entrada y a la salida no serán idénticas.

Si se considera el objeto como integrado por componentes armónicas de Fourier, la función que indica la forma en que estas componentes son transformadas en las correspondientes componentes armónicas de la imagen, se conoce como función de transferencia óptica (OTF) (Ec. 3.6). Esta es una función compleja que depende de la frecuencia espacial cuyo módulo es la función de transferencia de modulación (MTF) y cuya fase es la función de transferencia de fase (PTF).

$$O^*(f_x, f_y) * OTF = I^*(f_x, f_y) \quad (3.6)$$

Comúnmente es de mayor uso el módulo de la OTF, o sea la función MTF, que se define como el cociente entre la modulación o contraste de la imagen y la modulación o contraste del objeto para cada una de las componentes de frecuencia espacial, según se define en las Ecs. 3.7 y 3.8 (Hecht, 2000; Kenyon, 2008).

$$M(f_x, f_y) = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (3.7)$$

$$MTF(f_x, f_y) = \frac{M_I(f_x, f_y)}{M_O(f_x, f_y)} \quad (3.8)$$

Esta función describe la capacidad de un sistema óptico de transmitir las diferentes componentes de frecuencia espacial a través del sistema óptico. Como la MTF es la parte real de la función OTF, se puede reemplazar en la Ec. 3.6 y calcular la “salida” del sistema para cada componente de frecuencia espacial (f_x, f_y) como el producto de la función objeto $O^*(f_x, f_y)$ y la $MTF(f_x, f_y)$ del sistema (Ec. 3.9). Esta función “de salida”, no es más que la transformada de Fourier de la función imagen (Ec. 3.10).

$$O^*(f_x, f_y) * MTF = I^*(f_x, f_y) \quad (3.9)$$

$$\mathcal{F}^{-1}(I^*(f_x, f_y)) = I(x, y) \quad (3.10)$$

Entonces, las funciones $O^*(f_x, f_y)$ e $I^*(f_x, f_y)$ representan los espectros de Fourier de las funciones de entrada y salida del sistema óptico, respectivamente.

Por lo tanto, las funciones PSF y MTF permiten obtener la respuesta del sistema óptico, la primera en el espacio real del objeto y la segunda en el espacio de frecuencias, es decir que un sistema puede ser caracterizado tanto por su PSF como por su MTF, ya que esta última puede obtenerse como la transformada de Fourier de la primera. La especificación de cada una de estas funciones dependerá del dispositivo óptico particular que se quiere caracterizar, del tipo de iluminación que se use (coherente o incoherente) y del control de la validez de los supuestos del modelo teórico utilizado.

Las barras de Foucault representan un claro ejemplo de evaluación de calidad óptica. Se trata de una serie alternada de barras claras y oscuras con distintas frecuencias de espaciado. La evaluación del poder de resolución de sistemas ópticos consiste en determinar la frecuencia espacial mínima de las barras de Foucault, por la cual ya no es posible para el sistema en cuestión resolver dos barras próximas del mismo color. Esta frecuencia espacial mínima se denomina frecuencia de corte del sistema óptico. El poder de resolución del sistema óptico estudiado está limitado entonces, por la frecuencia de corte.

Para un sistema óptico perfecto, la frecuencia de corte está determinada exclusivamente por el límite de difracción del sistema óptico y depende fundamentalmente del diámetro de la pupila de entrada. En sistemas reales, además, la señal se ve alterada por la presencia de ruido incoherente, lo que degrada la información inicial que ingresa al sistema, limitando aún más la calidad de la transferencia de información. En la detección, la difusión producida por las fluctuaciones aleatorias (como, por ejemplo, variaciones en el índice de refracción) en un medio es causa de ruido incoherente (Ditchburn, 1982). La curva MTF en función de la frecuencia espacial puede determinarse en forma precisa con mediciones de laboratorio, lo que permite una revisión completa de sistemas ópticos ya fabricados, como control de calidad. Por ejemplo, Kopeika mide la MTF en el espectro infrarrojo para evaluar cómo la presencia de partículas en suspensión en la atmósfera afecta a la calidad visual (Kopeika et al., 2014).

Para explicar los procesos de interacción de la luz con la materia en un volumen difusor, los modelos de difusión de la luz caracterizan los centros difusores que componen el medio y determinan la distribución de luz resultante. Cuando el proceso ocurre en superficies, los modelos describen los procesos de interacción involucrados en la reflexión superficial y en la refracción en capas internas, según el material difusor y la rugosidad.

A partir de la caracterización de los medios difusores es posible predecir el cambio en la distribución de luz cuando se propaga a través del volumen de la muestra, pero más comúnmente los modelos se utilizan para resolver el problema inverso de determinar las propiedades ópticas de los medios que se desean estudiar, a partir de las mediciones de luz difusa, lo que tiene mayor utilidad en la investigación. Los modelos de difusión de la radiación

óptica pueden clasificarse en dos grandes grupos: los modelos de interacción simple y los modelos de interacción múltiple.

3.2 Modelos teóricos de difusión de la RO.

La difusión es un proceso complejo, por lo que es necesario hacer supuestos que simplifiquen el análisis. El modelo que se elige para representar un difusor dependerá fuertemente de los supuestos que se puedan hacer sobre el medio material en cada caso.

En el proceso de interacción con la materia, la radiación puede ser absorbida, lo que implica una pérdida de energía del haz incidente y que por lo tanto puede variar su frecuencia, o, por el contrario si las pérdidas por absorción son despreciables, se puede considerar el proceso de interacción con la materia como un proceso elástico. Los estudios de difusión de la luz se refieren generalmente a este último tipo de procesos.

Además, según los otros supuestos que se adopten, pueden distinguirse modelos de interacción simple, modelos de interacción múltiple y modelos mixtos.

Los modelos teóricos de difusión abarcan exhaustivamente la difusión por interacción simple. El fenómeno puede observarse en dos situaciones:

- En un volumen donde hay muy baja densidad de centros dispersores.
- En superficies irregulares, ya sea en la reflexión o en la refracción.

Para el caso de la difusión en una muestra volumétrica, los modelos cambian notoriamente según la relación entre el tamaño de los centros difusores y la longitud de onda de la luz interactuante. Se identifican tres regímenes principales:

- El modelo de difusión de Rayleigh, en el cual se consideran centros difusores mucho más chicos que la longitud de onda de la radiación incidente.
- El modelo de Mie, en donde los centros difusores son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la radiación incidente.
- Las soluciones de la óptica geométrica que se aplican a centros difusores más grandes que la longitud de onda de la radiación incidente.

En el primer caso, el modelo de Rayleigh establece que la intensidad I de la luz difundida por una pequeña partícula, de diámetro d y a una distancia r , en un haz de luz no polarizada de longitud de onda λ e intensidad I_0 viene dada por:

$$I = I_0 \cdot \frac{1 + (\cos \theta)^2}{2 \cdot r^2} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda}\right)^4 \cdot \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^6 \quad (3.11)$$

Debido a la emisión dipolar de la partícula en el medio de índice de refracción macroscópico n . La dependencia de la intensidad con la inversa de λ elevada a la cuarta potencia y con el diámetro elevado a la sexta potencia permite concluir que la difusión disminuye notablemente para longitudes de onda más grandes o partículas más pequeñas (Landsberg, 1984).

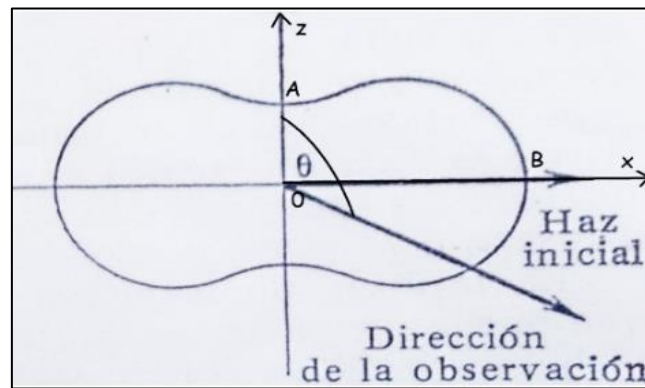


Figura 3.3 - Diagrama de difusión de Rayleigh, donde la distancia de un punto de la curva al centro (donde se encuentra el dipolo) representa la intensidad.

En el punto A de la Figura 3.3 se observa la mitad de la luz difundida en B, ya que el término coseno se anula a 90° y se observa la luz polarizada del dipolo transversal al plano únicamente. En el punto B se observa la combinación de las componentes de campo eléctrico paralela y perpendicular a la dirección de propagación, que al ser de igual amplitud, su contribución a la intensidad resulta en un valor igual al doble de A.

En la teoría de Mie, se determinan los coeficientes S_1 y S_2 a partir de las condiciones de borde para los campos interactuantes con las partículas:

$$I = I_0 \cdot \frac{1}{k^2 \cdot r^2} \cdot (|S_1(a, \theta)|^2 + |S_2(a, \theta)|^2) \quad (3.12)$$

$$S_1(a, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot n + 1}{n \cdot (n + 1)} \cdot (a_n(a) \cdot \pi_n(\theta) + b_n(a) \cdot \tau_n(\theta)) \quad (3.13)$$

$$S_2(a, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot n + 1}{n \cdot (n + 1)} \cdot (b_n(a) \cdot \pi_n(\theta) + a_n(a) \cdot \tau_n(\theta)) \quad (3.14)$$

Donde los polinomios se denotan como π_n (π) y τ_n (τ) debido al campo paralelo y tangencial a la interfaz (Videla & Schinca, 2011).

Para partículas varias veces más grandes que la longitud de onda de la radiación incidente, la difusión podrá ser descrita por los procesos de reflexión y refracción de acuerdo al modelo de la óptica geométrica. En cada interacción con la superficie se divide el haz en refractado y reflejado.

Las soluciones de difusión para partículas grandes dependen fuertemente de la forma del difusor, pero no hay soluciones generales para este caso. Puede mencionarse que algunos fenómenos como el arcoíris y el efecto gloria se explican con este modelo (Samego & Barrachina, 1994; van de Hulst, 1981).

3.3 Modelos semiempíricos de difusión de la RO.

Si en un volumen aumenta la densidad de centros difusores, un haz puede comenzar a sufrir una sucesión de eventos difusivos hasta que finalmente abandona el material o es absorbido. Si la densidad de centros difusores aumenta lo suficiente, se puede llegar al caso en que la mayor parte de la radiación tiene más de un evento de difusión. Se debe tener en cuenta que la difusión de interacción múltiple es intrínsecamente volumétrica.

Los modelos de difusión por interacción múltiple están clasificados en tres grupos:

- Los modelos de extinción, que consideran al medio difusor como un monobloque.
- Los modelos de capas, donde el monobloque es dividido en capas sucesivas y se relaciona, capa a capa, la evolución del flujo de fotones.
- Los modelos de transporte o de camino libre medio, que representan al bloque difusor como formado por un arreglo de bloques pequeños que se relacionan con todos los bloques de su entorno.

Según la teoría electromagnética clásica, cuando la luz interactúa con los materiales reales una fracción de la energía de la onda es atenuada al viajar a través de un medio que tiene propiedades ópticas intrínsecas no dependientes de la geometría. La forma más simple para conocer las propiedades generales del medio, es utilizar la ley de Beer-Lambert que asocia la intensidad original I_0 y la I_{medida} , luego de que la radiación recorre una distancia x con partículas suspendidas que difunden y absorben la luz.

Los modelos de capas más extendidos están basados en la teoría de Kubelka – Munk, (Kubelka, 1948). Este es un método que no resuelve la dependencia angular de la difusión y es aplicable a geometrías planas. Los modelos de capas han evolucionado desde K-M, hasta los modelos actuales que consideran la posibilidad de flujos angulares y de que las capas sean diferentes.

Cuando los medios difusores son muy concentrados, es decir que poseen un elevado número de centros difusores por unidad de volumen, no son adecuados los modelos de extinción y de capas. En este caso, los modelos de transporte o camino libre medio describen correctamente los procesos difusivos. Cabe destacar que estos modelos en el caso límite son empíricos.

El modelo formal de transporte utilizado para resolver medios difusores de alta difusión es el llamado “de difusión de partículas” (MDP). Este tiene la ventaja de dar como resultado ecuaciones diferenciales de segundo orden de resolución conocida y que pueden ser aplicadas

a cualquier geometría, pero para regímenes de alta difusión (Di Rocco et al., 2007; Jansen et al., 2001).

Este modelo MDP supone que cuando la luz atraviesa un medio turbio, su evolución es descripta mejor por procesos estadísticos, en los cuales las magnitudes a determinar son la intensidad promedio, la densidad de flujo y la función de vector electromagnético.

3.4 Estado del arte de los dispositivos de medición de luz difusa.

La tecnología actual destinada a la determinación de la transmitancia y/o la reflectancia de medios difusores es muy sofisticada y en general orientada a aplicaciones tecnológicas específicas y de altos costos. Los desarrollos experimentales aplicados al registro y cuantificación de la difusión dependen del sistema que se estudia y de los supuestos que se adoptan. Estos dispositivos han tenido un desarrollo creciente y ordenado según los requerimientos dados por el avance de su estudio. En los estudios ambientales y de la atmósfera el rango de tamaños de partículas involucrado es muy grande, por lo que una única metodología no es suficiente para la caracterización del medio (Sabbagh-Kupelwieser et al., 2011).

Los estudios de visibilidad atmosférica por mediciones de extinción de la luz han ido incrementando en los últimos años. En China, por ejemplo, el rápido crecimiento de la población conlleva el aumento de vehículos y demandas energéticas, lo que ocasiona problemas ambientales. Las tareas y proyectos de investigación muestran un especial interés en el estudio de la contaminación debido a la presencia de partículas de carbón en la atmósfera. Sin embargo, los dispositivos de medición de la visibilidad funcionan en condiciones de baja visibilidad, donde la contaminación no está limitada exclusivamente a partículas de carbón vegetal (Jing et al., 2015; Tang et al., 2016; Zhang et al., 2015; Liu et al., 2015; Tian et al., 2015; Ji et al., 2017).

Por otro lado, como se vio en capítulo anterior, los dispositivos de medición de visibilidad por difusión miden un único parámetro global que caracteriza el medio: el coeficiente de difusión. Los sistemas más utilizados actualmente en aplicaciones tecnológicas de envergadura y de investigación son los dispositivos conocidos como escatómetros goniométricos. Estos miden la distribución angular de la radiación generada por una muestra difusiva. Por lo tanto, a diferencia de los dispositivos lineales vistos anteriormente, no están limitados a la medición de un único parámetro.

Zerrad describe el principio de funcionamiento de un nuevo sistema de medición de la BRDF. Como se mencionó, la BRDF es la función en dos dimensiones que relaciona la luz reflejada y la luz de entrada. El sistema de medición incluye una iluminación móvil y una matriz de CCD fija con resolución adecuada para caracterizar la rugosidad de superficies difusoras (Zerrad et al., 2008). Este dispositivo cuenta con una fuente láser, un brazo de detección que se fija en la dirección de incidencia, mientras que el brazo de iluminación se vuelve móvil alrededor de la muestra. Por lo tanto, la medición se efectúa para todos los ángulos de incidencia de la RO pero para un único ángulo de registro, el ángulo 0. El sistema de detección es un CCD retroiluminado que permite obtener imágenes de la superficie óptica, muestrearla en aproximadamente un

millón de píxeles elementales, alcanzar niveles ultra bajos de BRDF y registrar el patrón de difracción de cualquier defecto en la muestra.

Por otro lado, el instrumento presentado por Leloup permite una determinación absoluta de la BSDF espectral con una cobertura espacial tridimensional completa en modo de reflectancia y transmitancia. Para ello, utiliza una lámpara de xenón, cuya radiación UV emitida es filtrada, y un sistema de detección integrado que incluye un sensor CCD y un espectrómetro. El sistema óptico cuenta con un colimador para la fuente de iluminación y un conjunto de filtros posteriores que permiten atenuar el haz colimado incrementando el rango dinámico de la CCD. El sensor CCD y la muestra poseen cada uno dos ejes de giro, cubriendo la BSDF completa. El espectrómetro, al ser muy pesado y voluminoso para el brazo goniométrico, está separado del sensor CCD. La luz de la fuente es recogida por una lente y dirigida al espectrómetro a través de un cable de fibra óptica. Para evitar las pérdidas grandes en los bordes de la lente, se utiliza un cilindro integrador que incrementa la eficiencia de recolección de luz. Como resultado, este instrumento cuenta con una cobertura espectral de banda ancha, un amplio rango dinámico que abarca 7 órdenes de magnitud, un tiempo de adquisición razonable y un área de iluminación de muestra grande (Leloup et al., 2008).

Chen presenta un modelo de instrumento con fuente de luz con haz divergente (Figura 3.4). Se trata de un nuevo sistema óptico de análisis de partículas por difusión de la luz, con un haz divergente como luz incidente y un detector de 15,9 mm de diámetro con 31 anillos concéntricos. En el arreglo a), la lente convergente concentra el haz sobre el detector de transmisión (en el centro del área de detección) en caso de no haber difusión (sin muestra). El detector de anillos concéntricos se encuentra en el plano focal de la lente, de manera que la posición de medición se relaciona con el ángulo de difusión. Además, no importa la posición de la partícula en el haz colimado. En b), están intercambiadas la posición de la lente y la muestra. Sobre la muestra incide un haz convergente, y va directamente al detector (ya no hay lente antes del detector). En c) se muestra el arreglo experimental con haz divergente.

El volumen difusor se encuentra delante del detector y la lente, y su distancia focal efectiva f_{eff} está definida:

$$f_{eff} = \frac{u - a}{u - f} \cdot f$$

Bajo la aproximación paraxial: rayos cercanos al eje óptico y sistema sin aberraciones.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$$

Siendo a la distancia entre la muestra y la lente, u la distancia entre O_1 y la lente y v la distancia entre la lente y O_2 . La distancia focal efectiva varía acercando o alejando la muestra hacia el detector, es decir, queda determinada por la ubicación del volumen difusor en el eje óptico. Este sistema resulta conveniente en la medición de partículas esféricas pequeñas porque se evitan las influencias de múltiples reflexiones presentes en la óptica de Fourier inversa. La difracción depende del diámetro de las partículas: variando la distancia focal efectiva se modifica el rango de tamaños de partículas (Chen et al., 2012).

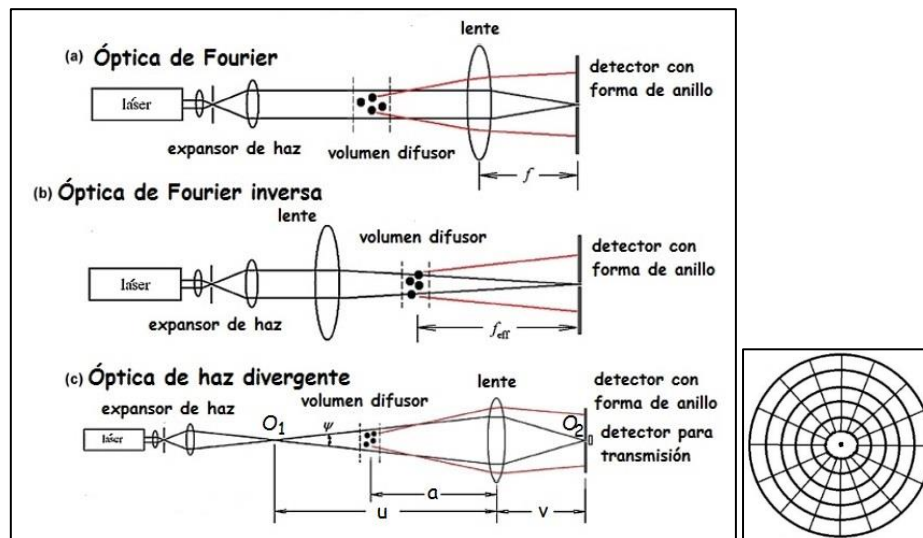


Figura 3.4 - Tres arreglos ópticos de difracción láser: (a) óptica de Fourier, con distancia focal f , (b) óptica de Fourier inversa, con f_{eff} la distancia focal efectiva y (c) el último arreglo, con ψ como la divergencia. Esquema representativo del detector con forma de anillo mostrado a la derecha.

La difusión en condiciones estáticas se da cuando la muestra contiene partículas en posición fija. En este caso, la posición de las partículas es independiente del tiempo y también lo es la difusión. Es un caso particular del caso más general de difusión dinámica, donde hay movimiento de partículas: la medición por toma de fotografías y procesamiento de imágenes permite estudiar la difusión estática ya que el procedimiento se lleva a cabo en un instante definido de tiempo.

Por último, Xu recopila y describe los instrumentos de medición de difusión más actuales. Los avances tecnológicos permiten cada vez en mayor medida las metodologías de bajo costo, así como también el surgimiento de nuevas técnicas que permiten la caracterización de medios difusores, como el movimiento electroforético (consistente en el desplazamiento de moléculas por campo eléctrico) y otras que utilizan partículas cargadas (Xu, 2015). Mediante la combinación de los métodos por difusión de la luz y otros de campo eléctrico se consigue una representación más completa del medio estudiado (Sabbagh-Kupelwieser et al., 2011).

En este trabajo se consideró un método alternativo para evaluar la contaminación por partículas en el ambiente, que consiste en la medición de muestras de contaminación ambiental con un dispositivo goniométrico desarrollado en el ILAV – CONICET. A partir de las mediciones de la BSDF de las muestras de contaminación con este instrumento, se busca caracterizar la contaminación en el aire producida principalmente por la quema de cañaverales en Tucumán.

El instrumento cuenta con un sistema mecánico que permite desplazar el sensor alrededor de la muestra difusora, permitiendo realizar mediciones a muchos ángulos a un bajo costo respecto a instrumentos comerciales análogos que emplean sensores CCD en ángulos fijos: estos instrumentos de medición de difusión son más costosos que aquellos que miden absorción en una sola dirección; los sistemas actuales de medición de difusión 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 sensores.



Un programa desarrollado previamente y un controlador electrónico conectado al ordenador comandan y ejecutan la medición de forma automatizada permitiendo completar la función de difusión de las muestras en un rango establecido de ángulos, en tiempo corto. El programa y el dispositivo mecánico están diseñados para capturar múltiples fotografías de la muestra mientras el sensor hace el recorrido en círculo alrededor de la muestra, lo que permite promediar más de una medición para un mismo ángulo.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1 Descripción del escatómetro.

Se utiliza un diseño previo elaborado por Diego Corregidor Carrió, que fue puesto a punto en el Laboratorio de Óptica Aplicada del Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión - Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión (UNT – CONICET), en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la UNT (Corregidor Carrió, 2012).

El sistema experimental cuenta con una fuente de luz láser en el espectro visible, un sistema óptico con sensor CCD, un dispositivo mecánico que permite girar por separado la cámara CCD y el porta-muestras, mediante motores paso a paso de 1,8 grados y un controlador que activa los motores. Además, el sistema está cubierto por una caja de 0,5x0,6x1,0 metros que elimina toda fuente de ruido externo.

El registro de la intensidad de luz transmitida por la muestra se obtiene con la cámara CCD enfocada al infinito. Estas imágenes obtenidas pueden almacenarse por software en una computadora en la que luego se analizan y procesan los datos. Se busca determinar de esta manera las funciones de distribución de transmitancia de diferentes filtros de materiales difusores primero, como método de calibración, y luego específicamente de muestras con depósito de material sólido de la polución ambiental en época de zafra en la ciudad de San Miguel de Tucumán.

Para incorporar el objetivo a la cámara CCD, se diseñó un adaptador de rosca en lenguaje OpenSCAD para fabricarlo por impresión 3D. El adaptador permite unir el objetivo con rosca C a la cámara CCD con rosca Pentax. Para imprimir el adaptador con las dimensiones requeridas, se compila el diseño en el programa Slic3r que luego se introduce en el software de comandos Repetier Host utilizado por la impresora. La impresora 3D funciona con extrusor de resina, de precisión suficiente para la fabricación del componente.

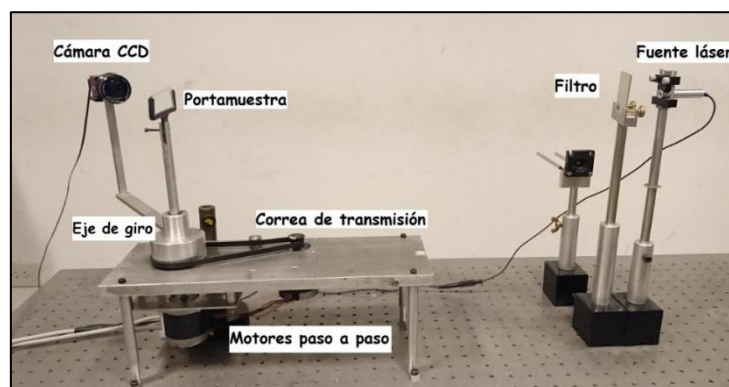


Figura 4.1 - Dispositivo goniométrico de medición de difusión de la luz con sus componentes.

El instrumento está diseñado de modo que la luz del láser incida en la muestra y se mida a distintos ángulos la intensidad de luz difundida. La interacción de la luz con las pequeñas partículas en la muestra es el objeto de estudio, simulando la situación en la realidad, donde las partículas en el aire afectan la visión humana al interactuar con la luz del espectro visible. Es más conveniente medir la difusión de la luz en las frecuencias correspondientes al rojo, verde y azul, de manera que se estudie el fenómeno en regiones bien diferenciadas del espectro de luz. El sistema cuenta con tres fuentes láser disponibles en laboratorio:

- Láser rojo de 635 nanómetros, 1,3.mWatt. CPS 635R
- Láser verde de 532 nanómetros, 0,8.mWatt. CPS 532-C2
- Láser azul de 450 nanómetros, 1,0.mWatt.

Estas fuentes láser (que emiten RO en frecuencias del espectro visible) representan una porción del espectro que se observa en la luz natural. Como el experimento está limitado a un número discreto de frecuencias de luz, no resulta posible representar por completo toda la región del espectro visible. Si se toma el centro de esta región del espectro y sus extremos, se logra mayor representatividad de la luz natural difundida en el ambiente y posibilita un mejor análisis de cómo depende la difusión respecto a la longitud de onda. Sin embargo, este trabajo se limitó a la medición de las muestras de difusión con una sola longitud de onda. Inicialmente en la etapa de puesta a punto del instrumento se contaba únicamente con el láser rojo de 635.ηm, disponible para efectuar las mediciones, por lo que se escogió esta longitud de onda para realizar todas las mediciones y poder así compararlas.

El rango angular de medición de la difusión está definido por el recorrido de la cámara CCD contenido en el plano horizontal. El sistema de motores permite girar la cámara en el mismo plano, abarcando un rango de 340 grados, lo que permite medir la difusión en los 180° de recorrido dentro del espacio imagen, y la retrodifusión en los 160° restantes.

El sistema permite girar la muestra, colocada en el centro, en ángulos de 1,8 grados, definidos por el paso del motor. La muestra se coloca de manera que el láser incide sobre esta de forma perpendicular. La cámara gira en pasos de 0,5 grados, gracias a un sistema de poleas y una correa de transmisión que convierte el paso del motor a medio grado.

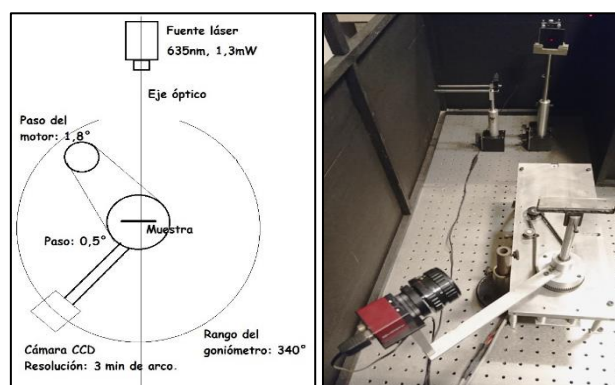


Figura 4.2 - Izquierda: Esquema del dispositivo goniométrico con sus características. Derecha: Medición de una muestra, justo delante del láser está colocado un filtro para atenuación de intensidad.

El sistema óptico del goniómetro está compuesto por una lente convergente de distancia focal f y el sensor CCD centrado respecto al eje óptico, al igual que la lente, como se muestra en la Figura 4.3. En vez de tomar de forma directa la imagen de la muestra, la cámara digital (formada por la lente y el CCD) se enfoca al infinito. De esta manera el sistema óptico, que como se dijo, consiste en la matriz de elementos CCD de la cámara digital y la lente convergente delante del sensor, forma una imagen en el plano del CCD que representa la transformada de Fourier de la imagen de la muestra. Según la dirección de incidencia sobre la lente convergente, los rayos son enfocados en un punto del plano CCD ubicado a una distancia del eje óptico que depende del ángulo que estos mismos forman respecto al mencionado eje. Si los rayos son paralelos al eje óptico, al atravesar la lente coinciden en el centro del plano CCD. En el ejemplo de la Figura 4.3, los rayos con un ángulo α convergen en un punto a una distancia d respecto al eje óptico. Por lo tanto, al posicionarse los sensores CCD en el plano focal del objetivo, la distribución de luz obtenida permite la discriminación de la intensidad de luz que procede desde distintos ángulos de incidencia.

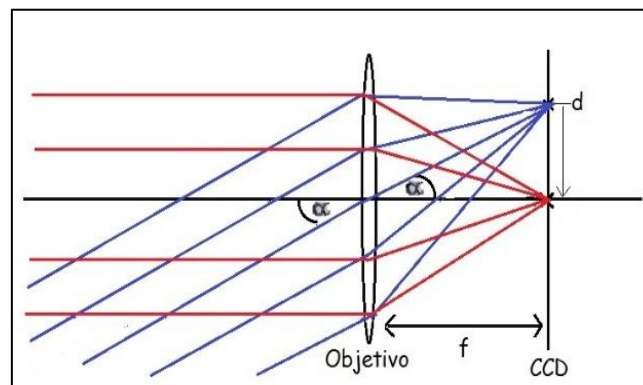


Figura 4.3 - Sistema óptico compuesto por una lente convergente y un sensor colocado en el plano focal.

La imagen que captura la cámara cubre toda la muestra. Sin embargo, la región de medición sólo incluye la porción central de la muestra (Figura 4.4). A partir de las mediciones de nivel de gris obtenidas por la CCD, se calcula la función de distribución de difusión bidireccional.

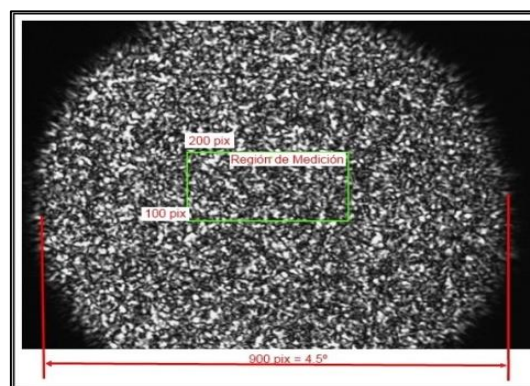


Figura 4.4 - Imagen obtenida en una medición de la CCD. En el centro del círculo se indica la región seleccionada para promediar el valor de la intensidad medida, correspondiente a un rectángulo de 200 px x 100 px. La imagen completa abarca 4.5° y la región central 1°.

Como se mencionó, el sistema experimental cuenta con un programa que procesa la información adquirida por la cámara digital: convierte las mediciones de nivel de gris del sensor en una matriz de puntos. Cada elemento de la matriz corresponde a un valor en escala de grises de la fotografía (Fig. 4.5). Luego, el programa calcula la intensidad de medición en 20 bandas verticales de la región central de medición. A cada banda le corresponde un ángulo de medición según la posición en que se encuentre la CCD. El promedio de los niveles de gris de los pixeles de cada banda se escribe en un archivo junto a sus respectivos ángulos de medición.

Cada medición completa de muestra se realiza tomando una fotografía cada medio grado de recorrido del CCD. Si se efectúa una medición completa de la difusión, que incluye la difusión directa y la retrodifusión, el recorrido total de 340° de la cámara provee 680 fotografías como resultado. Debido a que en cada fotografía se determina la luminancia en 20 ángulos pequeños, el total de valores de luminancia que corresponde a cada muestra es de 13600.

Del registro completo de la CCD (Fig. 4.4) se selecciona la región central como región efectiva de medición (100 pixeles x 200 pixeles) para evitar el uso de los bordes, donde la intensidad decae. Como se mencionó anteriormente, la región central de cada imagen se subdivide en 20 bandas verticales (la región de medición abarca 1° , entonces cada banda vertical abarca $0,05^\circ$, o $3'$) y la intensidad registrada dentro de cada banda vertical se integra para obtener la energía total correspondiente a cada ángulo de incidencia. Cada banda vertical tiene un ancho de 10 pixeles, por lo tanto, el valor angular de pixel es de $0,005^\circ$, o $18''$.

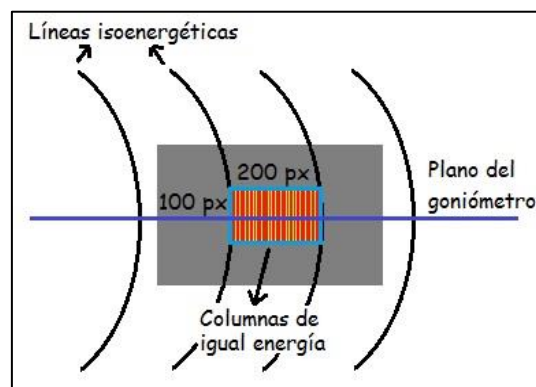


Figura 4.5 - Representación del plano de medición. La BSDF decae en función de la distancia al eje óptico, por lo que esta posee una simetría de revolución respecto al eje y es independiente del ángulo azimutal. Como la región de medición es muy pequeña las columnas pueden ser consideradas de igual energía como aproximación.

Debido a que el paso angular de la cámara es menor a su ángulo de apertura, las sucesivas mediciones se solapan y se dispone de registros diferentes correspondientes al mismo ángulo, medidos desde posiciones contiguas de la CCD que pueden ser promediados. Como la región de medición abarca 1° y el paso de cámara es la bisectriz, el sistema de registro obtiene dos mediciones para cada ángulo. 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 $0,3$ min de arco por pixel y 3 min de arco para cada banda vertical.

Como la intensidad del láser es muy elevada como para que incida de forma directa en la cámara CCD, se coloca un filtro espejado delante del láser. Se desea determinar la atenuación del haz

debida al filtro, que se utiliza en todas las mediciones de las muestras, ya que se necesita calcular la intensidad que se obtendría a ángulos próximos a 0° si el mismo no estuviera colocado. Es necesario medir la intensidad con el filtro colocado durante todo el recorrido del sensor, y después medir nuevamente, sin el filtro cuando el sensor se encuentra apartado de la dirección de incidencia del haz.

Las pruebas realizadas con filtro mostraron que este posee un poder de atenuación del 82%, obtenido como el cociente entre los valores obtenidos con filtro y sin filtro. Es decir que se atenúa hasta un valor de aproximadamente la quinta parte de la radiación total incidente, suficiente para efectuar las mediciones.

Se midió la intensidad de las fuentes láser rojo y verde con un sensor fotoeléctrico para determinar la intensidad total de luz incidente sobre las muestras que se estudian. Cada sensor presenta su propia curva de calibración, con distinta sensibilidad para cada longitud de onda. Para escoger el sensor adecuado se toma en cuenta el rango de medición de intensidad de luz.

Tanto para el láser rojo como para el láser verde corresponde utilizar el sensor E2V con fotodiodo modelo 52386-5K. Este fotodiodo tiene sensibilidad máxima en los 960 nanómetros, que corresponde al infrarrojo. Como la sensibilidad del fotodiodo cambia con la longitud de onda de la RO incidente, la respuesta del sensor será diferente para el láser rojo y verde. Para el cálculo de la intensidad total de la fuente utilizada debe tenerse en cuenta la sensibilidad para cada longitud de onda.

La fuente de alimentación del láser rojo es de 330.mAmp y 5,0.Volt. La sensibilidad s a 635.nm es:

$$s = 6,6 \frac{\text{Volt}}{\text{mWatt}}$$

Las fuentes láser utilizadas en el escatómetro deben ser estables ya que la intensidad de la luz debe permanecer constante durante cada medición, de 5 minutos de duración. Además, el proceso de medición es más extenso, en cada jornada de medición se miden entre 10 y 20 muestras por una cuestión de eficiencia, por lo que el láser debe tener un comportamiento estable en el lapso de unas cuantas horas. Por lo tanto, las mediciones de estabilidad se realizaron en periodos largos, de hasta 3 horas con 20 minutos, lo que brinda un margen considerable de confianza.

Para verificar la estabilidad, se emplea un sensor Spindler & Hoyer que consiste en una célula fotoeléctrica. El detector activo E2V da una tensión de salida como resultado de la radiación incidente de entrada. Como el escatómetro cuenta con una estructura de color negro que lo recubre por completo, las mediciones de estabilidad se realizan en el interior de la misma (Fig. 4.2). De esta manera, se disminuyen los efectos de ruido por reflexiones no deseadas y de cualquier fuente externa al instrumento. Además, la estructura mantiene estable el entorno del láser, mientras que el laboratorio se mantiene a 25°C de temperatura durante las mediciones.

La salida del sensor se conecta a un multímetro para observar los cambios de tensión como medida de la estabilidad. Para la fuente láser rojo (635.nm) se midió la estabilidad tres veces, lo mismo para el láser verde (538.nm). Antes de comenzar a tomar las mediciones, se contempla

un lapso de 15 minutos para asegurar que el láser se encuentre estabilizado antes de iniciar las mediciones.

Las mediciones de estabilidad muestran que el láser rojo es mucho más estable que el verde. Se escogió entonces el láser rojo para realizar las mediciones de difusión de las muestras, a pesar de que la luz verde es más representativa del fenómeno difusivo debido a que la visión humana tiene máxima sensibilidad en esta longitud de onda (Fig. 2.1). La calibración del instrumento se limitó al láser rojo, si bien se realizó una medición de prueba con el láser azul, adquirido posteriormente. Todas las mediciones posteriores en este trabajo se realizaron con láser rojo.

Para calibrar el instrumento, se efectuaron mediciones de filtros difusores, BPM1 y BPM2, con funciones de difusión conocida. Estos filtros simulan una catarata en el ojo con diferentes grados de avance.

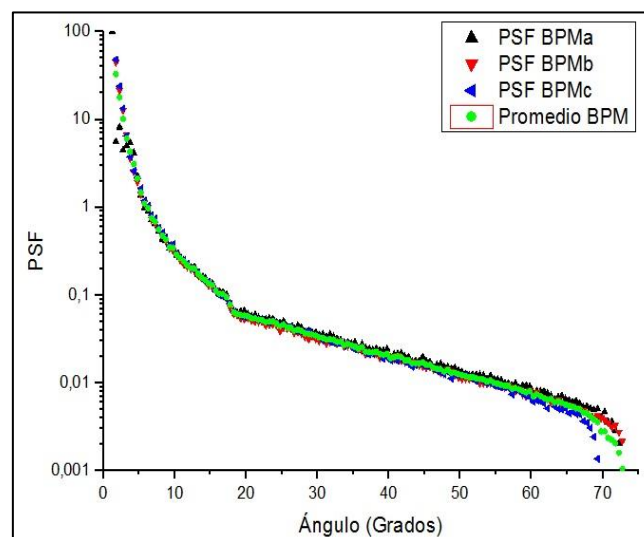


Figura 4.6 - Mediciones del filtro BPM2 para calibración del dispositivo goniométrico.

Se midió tres veces la BSDF con el filtro BPM2, posteriormente se determinaron las curvas PSF a partir de estas mediciones y se calculó el promedio (Fig. 4.6).

4.2 Diseño de los experimentos.

El objetivo del trabajo es caracterizar las condiciones del medio ambiente visual, con visibilidad disminuida en ciudades y rutas, a partir de mediciones ópticas en laboratorio, de modo de facilitar una medición objetiva de la polución ambiental y caracterizar la misma por medio de un dispositivo óptico. Se busca además comparar estas mediciones con otros resultados, obtenidos con otras metodologías.

Se diseñaron tres experimentos para evaluar la metodología de medición de polución por recolección de muestras. En cada experimento se evalúan los distintos aspectos y se va desarrollando la metodología.

Experimento n° 1.

Los objetivos de este primer experimento son seleccionar las variables relevantes que puedan caracterizar las muestras de depósito de polución, determinar la sensibilidad del método a depósitos de diferentes tiempos de acumulación y a la ubicación geográfica de los lugares de recolección, respecto a los focos de quema de biomasa. Cumple la función de un experimento piloto.

Se recolectaron, para ello, muestras de 24 y 48 horas de acumulación de depósito de polución en tres lugares distintos, distribuidas de la siguiente manera: 120 muestras recogidas en el predio del DELLYV – ILAV (sitio D), 39 muestras en zona del microcentro de S.M. de Tucumán (sitio L) y 10 muestras en un sitio alejado de la ciudad (sitio J), libre de la polución por quema de pastizales, como muestras de control.

Para escoger los sitios se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones: que los lugares fueran abiertos de modo 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, protegidos del viento. La recolección se realiza en días sin lluvias, sin viento y con humedad ambiente menor al 50%, según datos del SMN.

Al momento de la recolección, sobre el portaobjetos de vidrio con material depositado se colocó un portaobjetos limpio y se sellaron los bordes con cinta adhesiva, de manera de asegurar la inmovilización de las partículas y posibilitando su posterior medición en el escatómetro.

Por otra parte, se midieron todas las muestras con una balanza de 5 dígitos (apreciación: 0,01.mg), con el objeto de tratar de comparar la masa del material depositado en los portaobjetos.

Luego se midieron con el escatómetro todas las muestras recolectadas en el sitio D. Se compara la difusión medida en muestras de 24 y de 48 horas de acumulación y entre las muestras de 24 horas de un mismo día. También se midieron estas muestras con un microscopio óptico de aumento x4, para corroborar la distinguibilidad entre depósitos de 24 y 48 horas, y para realizar una comparación entre muestras de 24 horas de un mismo día.

Experimento n° 2.

Los objetivos de este 2do. experimento son: confirmar que las muestras de material recolectadas en lugares diferentes, todos en San Miguel de Tucumán, son indistinguibles; determinar con más precisión las características del método (alcance, resolución, etc.), y repetibilidad de resultados.

Para ello se recolectaron las muestras en dos sitios diferentes alejados, uno en un barrio periférico, zona sur (sitio A) y el otro, al igual que en el experimento anterior, en el centro de la ciudad (sitio B). Se diseñó cuidadosamente la recolección de muestras de 12, 24, 36, 48, 60, 72 y 84 horas de integración de los depósitos de polución en los portaobjetos. Las ubicaciones fueron seleccionadas teniendo en cuenta las mismas condiciones del primer experimento.

La recolección de las muestras se realizó 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 35 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), 4 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. Estas muestras se recolectaron y sellaron de la misma manera que en el experimento anterior. Las muestras que faltan en el listado anterior fueron desechadas en el momento de la recolección por alguna anomalía en el proceso de depósito y recolección de las mismas. También se armaron tres muestras con portaobjetos limpios (sin uso) para analizar y corregir, si correspondiera, los datos por difusión de la luz en el vidrio limpio de los portaobjetos que soportan las partículas depositadas.

Experimento n° 3.

Los objetivos del tercer experimento son: determinar el depósito mínimo que es capaz de identificar el método, así como la capacidad de discriminación entre muestras de distintos tiempos de integración (o sea el poder de resolución); la reproducibilidad y repetitividad de las mediciones.

Para ello se diseña la recolección en tres sitios diferentes en el ámbito de la ciudad y en tiempos de integración mucho menores que los del Experimento 1 (3, 6, 9, 12, 18 y 24 horas).

Los lugares seleccionados fueron: en un barrio periférico (zona S de la ciudad) (sitio A), en la zona céntrica (sitio B) y en el barrio norte de la ciudad (sitio C), siempre respetando las mismas condiciones de los dos experimentos anteriores.

La recolección de las muestras se realiza en los tres sitios en forma sucesiva e ininterrumpida en agosto de 2018, dentro del período de zafra de ese año.

En total, en los tres sitios se recogen 90 muestras, cinco muestras por cada tiempo de integración y por cada lugar. Se armaron nuevamente tres muestras con portaobjetos limpios (sin uso) para corregir los datos por difusión en el vidrio limpio.

4.3 Obtención de datos.

Las mediciones realizadas en el sistema goniométrico descrito anteriormente permiten caracterizar la difusión producida por cada una de las muestras recolectadas. En todos los casos se determina la función BSDF de transmitancia, en un plano perpendicular al eje óptico y al haz de radiación incidente, en un rango de 100° y con una resolución de $3'$ de ángulo. Como se trabaja con el sistema óptico enfocado al infinito puede medirse en el plano focal del sistema la distribución de intensidades (niveles de gris) en cada muestra, colocando sobre ese plano los sensores de la CCD. A partir de estos datos se puede calcular, luego, el valor de la PSF en cada punto del plano de detección (Ec. 3.5). Se emplea una fuente láser en el arreglo experimental, ya que ésta puede aproximarse como un objeto puntual de RO colimada, si bien el haz posee una cierta divergencia de modo que los haces que llegan a la muestra estudiada no son

exactamente paralelos. Dentro de una aproximación aceptable, puede decirse que el sistema detector mide la PSF de las muestras, que brinda la información de la degradación de la imagen por difusión que producen las partículas en el medio.

Tal como se vio en el capítulo anterior, si la muestra a medir se encuentra en un plano perpendicular al haz incidente y la geometría del sistema tiene simetría de revolución, la BSDF depende únicamente de θ_e y su forma funcional es idéntica a la $PSF(\theta)$, medida en el plano imagen del sistema óptico que coincide con el plano de los sensores CCD. Dado que la PSF es la función imagen de un punto objeto que depende de las coordenadas espaciales del objeto y de la imagen. para un sistema óptico centrado, esta función puede calcularse usando la Ec. 4.1, donde T es la transmitancia (medida) de la muestra.

$$PSF(\theta) = \frac{1}{T} \cdot BSDF(\theta) \quad (4.1)$$

En la práctica, cada medición se realiza atenuando el haz incidente con un filtro cuya transmitancia se determinó previamente. El filtro se coloca cuando el escatómetro mide la BSDF a ángulos próximos a 0° , que corresponden a la región de mayor intensidad, ya que incluye el haz incidente. Posteriormente a cada medición, se calculan los valores de BSDF originales (sin filtro) multiplicando el valor medido por el factor de filtro (conocido).

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 a 0° , definiendo de esta manera la función $f_n(\theta)$ según la Ec. 4.2, donde el subíndice n denota el tiempo de integración en horas ($n= 12, 24, 36, 48, \dots$) y permite identificar las funciones $f_n(\theta)$ obtenidas.

$$f_n(\theta) = \frac{\overline{PSF_n(\theta)} - PSF_o(\theta)}{PSF_{max}(0)} \quad (4.2)$$

Para muestras de igual período de integración, se calcula el promedio de las mediciones correspondientes a cada ángulo. Estas funciones expresadas en las Ecs. 4.1 y 4.2 representan los datos obtenidos con el dispositivo goniométrico y caracterizan la difusión producida por las muestras recolectadas.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos en los experimentos planteados en el apartado 4.2. para la caracterización de las muestras de polución:

En el Experimento 1 se comparan las mediciones de difusión obtenidas con el dispositivo goniométrico de las muestras de 24 y 48 horas de acumulación, y se utilizan como métodos alternativos de control, las mediciones de masa (balanza) y de tamaños de partículas (microscopio).

En el Experimento 2 se realiza la comparación de la difusión, medida con el escatómetro, de nuevas muestras con tiempos de acumulación de 12 a 84 horas y en dos lugares de recolección distintos para evaluar la influencia del sitio de recolección.



En el Experimento 3 se evalúa el poder de resolución del instrumento para tiempos de acumulación menores y con menores diferencias de tiempo. Se comparan las mediciones de difusión de muestras recolectadas en tres lugares distintos.

Finalmente, como aplicación, se comparan estas últimas mediciones con las curvas de difusión intraocular.



CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran todos los datos medidos con el dispositivo goniométrico y los resultados de su procesamiento.

Una vez calibrado el dispositivo goniométrico se midieron las muestras recolectadas y se realizaron tres comparaciones en distintas etapas:

- a) entre las distintas mediciones de difusión para evaluar la resolución temporal del método,
- b) comparación entre las mediciones de difusión y los datos del SMN,
- c) comparación entre las mediciones de difusión y las curvas de difusión intraocular por envejecimiento, definidas por Vos y van den Berg.

En la subsección 5.1 se comparan las mediciones de difusión obtenidas con el dispositivo goniométrico de las muestras de depósito de contaminación de 24 y 48 horas de acumulación, y se emplean además, una balanza y un microscopio para caracterizar las muestras.

En la subsección 5.2 se realiza la comparación, a través de mediciones con el escatómetro, de nuevas muestras con tiempos de acumulación de 12 a 84 horas y en dos lugares de recolección distintos para evaluar la influencia del sitio de recolección.

En la subsección 5.3 se evalúa el poder de resolución del instrumento para tiempos de acumulación menores, con menores diferencias de tiempo y se incorpora un tercer lugar de recolección.

En la subsección 5.4 se comparan las mediciones de difusión de las muestras con las curvas de difusión intraocular, como aplicación del método propuesto.

5.1 Experimento 1.

En el primer experimento, se midieron las masas de las 169 muestras con una balanza electrónica de 5 dígitos. Para ello, se pesaron los portaobjetos limpios y luego las muestras con el material depositado. Para determinar el peso del depósito se resta el peso de la cinta y las placas de vidrio al peso total. Se comprobó que la resolución de 0,01 mg no resultó suficiente para discriminar la cantidad de material depositado en los portaobjetos con distinto tiempo de acumulación de material. La masa de las partículas en acumulaciones mayores a 48 horas, incluso, está por debajo o cerca del límite de apreciación de la balanza. La variación del peso de los portaobjetos de vidrio es más significativa que la variación del peso del material depositado, mientras que la inclusión del peso de las placas de vidrio en la medición aporta una incerteza experimental aún mayor. Es por este motivo, que las mediciones con el escatómetro representan una gran ventaja respecto a las mediciones con balanza, ya que el vidrio es transparente y no altera significativamente al haz incidente del láser en la medición.

Se midieron, con el escatómetro goniométrico, las muestras de 24 horas y 48 horas de integración, recolectadas en el DELLYV – ILAV. Se incluyó la medición de muestra con portaobjetos limpios como referencia. Se comprobó, mediante un test ANOVA, que el escatómetro posee la resolución suficiente para discriminar muestras de distinta acumulación (test Tukey, $p < 8.10^{-7}$) en el intervalo de ángulos con menor error, correspondiente a 20-80 grados. A su vez, las mediciones de difusión no permiten distinguir muestras de 24 horas de un mismo día (test Tukey, $p > 0,7$).

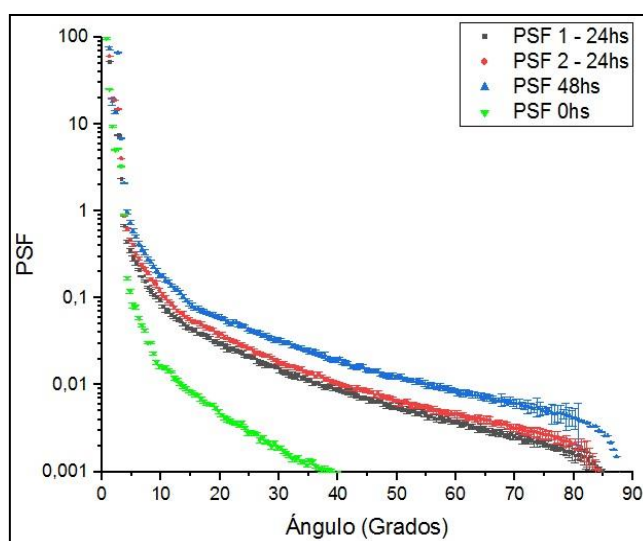


Figura 5.1 - Representación gráfica de las PSF de difusión de dos muestras recogidas en días distintos (1 y 2) y de una muestra de 48 horas que abarca ambos días. Se grafica la PSF de portaobjetos limpios para comparación.

A partir de mediciones con microscopio, se determinó la distribución de tamaños de las partículas de las diferentes muestras. Esta distribución resultó ser de tipo exponencial decreciente con el tamaño y no se modifica significativamente con el tiempo de acumulación. La forma de las partículas observadas es irregular y el rango de tamaños muy grande (Fig. 5.2). Al igual que las mediciones de difusión, es posible discriminar muestras de 24 y 48 horas, pero no es posible discriminar las muestras de 24 horas del mismo día. Se observaron grandes cantidades de partículas de carbón, pero también partículas de polvo.

Se emplearon dos microscopios ópticos:

- * Microscopio Axio Imager del Instituto Miguel Lillo.
- * Microscopio Olympus BX51 (Cámara Digital Olympus DP71) del Hospital Centro de Salud.

El microscopio Axio Imager cuenta con el software Zeiss para tomar fotografías de las muestras y guardarlas en una PC. Se utilizó el programa ImageJ de Fiji para procesar las fotografías obtenidas con el microscopio.

Se utilizó un aumento x4 de objetivo y x1 de ocular con el microscopio Axio Imager. El otro microscopio dispone un aumento x10 de objetivo y x1 de ocular. Se escogieron esos aumentos

porque permiten tomar una imagen amplia de la muestra y con el detalle suficiente como para distinguir pequeñas partículas.

Con el sistema enfocado en un plano intermedio a los dos portaobjetos de la muestra se tomó una fotografía de la región central del campo de visión, para cada muestra. Posteriormente se desplazó la muestra para observar una nueva región. Se escogió inicialmente una región central al azar para tomar una primera fotografía. A partir de esa región central se toman dos fotografías más, una a cada lado, obteniéndose de esta manera tres fotografías para cada muestra. Cada una de estas fotografías se convierte a una matriz de puntos en escala de grises de 8 bits y se aplica un umbral de intensidad para distinguir las partículas contenidas en el plano de observación. El software ImageJ automáticamente calcula el número de partículas a partir del contraste del umbral con el fondo. A partir del conteo de partículas se elaboró un histograma (en la Figura 5.3 se muestran los histogramas de los días 3 y 4) con los números de partículas en intervalos de distintos tamaños (donde el área se determina en función del número de píxeles), habiendo tomado el promedio del número de partículas para las tres imágenes por cada muestra.

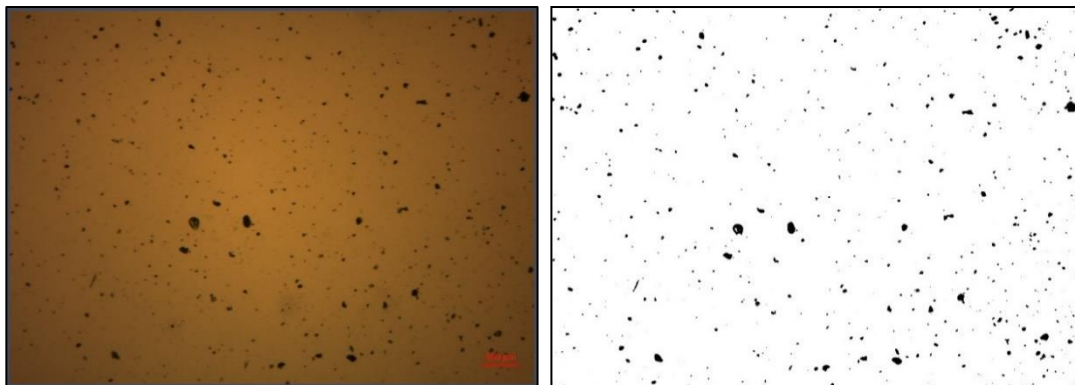


Figura 5.2 - Izquierda: Fotografía tomada con cámara de microscopio Axio Imager del Instituto Miguel Lillo, de una muestra de 12 horas de depósito de polución. En la esquina inferior derecha se aprecia la escala (100.µm), a partir de la misma se calcula el área de cada píxel. Derecha: Fotografía convertida en blanco y negro a partir del umbral. Mediante un algoritmo se calcula la superficie y el número de partículas.

En todas las fotografías se puede apreciar la distribución aleatoria de las partículas. Como se mencionó, a partir de cada imagen se efectuó un procesamiento digital para obtener el área total de partículas y su número. El programa ImageJ convierte la fotografía a una imagen en escala de grises. Luego, se ajusta el umbral (de 0 a 255) para separar las partículas del fondo. Como resultado, el contraste indica todos los píxeles por encima del umbral: por encima del umbral el programa convierte el valor del píxel a 255, y por debajo del umbral, el punto se convierte a 0 (en la imagen aparece negro). El umbral escogido corresponde a un nivel de gris igual a 55.

A partir de la escala en la fotografía de la Figura 5.2 se puede calcular el tamaño de cada píxel: el tamaño de la escala es de 100 micras, mientras que cada fotografía tiene un tamaño de (2560x1920). Por lo tanto, se obtiene para el tamaño de cada píxel:

1.pix = (0,55.µm)² con el microscopio Axio Imager, del Instituto Miguel Lillo.

Por otro lado, cada fotografía obtenida con el microscopio Olympus BX51 tiene un tamaño de 4080x3072, es decir que el tamaño de pixel en las imágenes es de:

1.pix = (0,42 μm)² con el microscopio Olympus BX51, del Hospital Zenón Santillán.

Cualquiera de estos dos instrumentos resulta válido para la caracterización de las muestras.

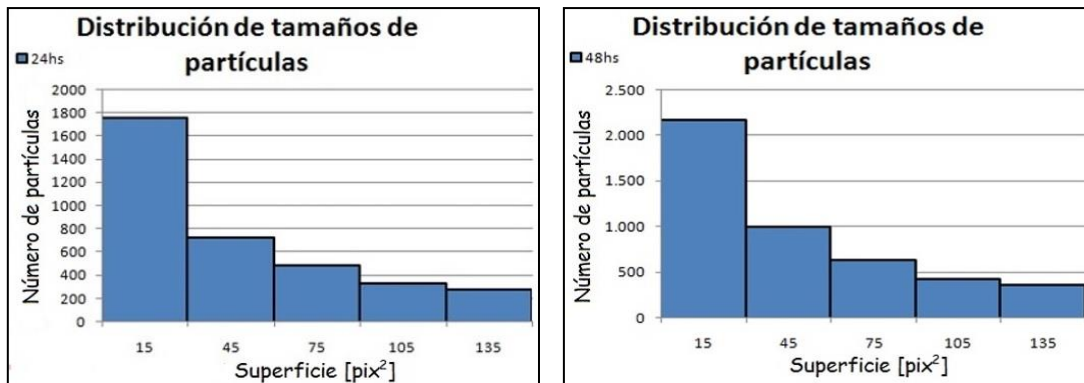


Figura 5.3 - Izquierda: Histograma de la distribución de tamaños de partículas, indicado en píxeles, para la fotografía de la Fig. 5.2. Derecha: Histograma de muestra de 48 horas de integración, que abarca las 24 horas posteriores.

La comparación de muestras de 24 y 48 horas evidencia que, si bien es apreciable la diferencia en el número de partículas, el enfoque del microscopio no tiene la profundidad de campo como para contar las partículas en cada superficie del espacio entre portaobjetos. Es decir que el enfoque está limitado únicamente a la superficie interna de uno de los portaobjetos. Por otro lado, el número de partículas en muestras de 48 horas es menor del doble comparado al número de partículas en muestras de 24 horas, quizás porque no es posible discriminar partículas superpuestas en la región de observación o porque partículas muy juntas se contabilizan como una de mayor tamaño. En el microscopio sólo se observan las partículas que cubren la superficie de observación, pero no las partículas que están superpuestas, por lo que sólo se puede observar el área cubierta. El número de partículas está limitado por la superficie ocupada por estas, por lo que la medición de la acumulación de partículas en la superficie no tiene un comportamiento lineal en el tiempo de depósito.

Como conclusiones del **Experimento 1**, se puede afirmar que:

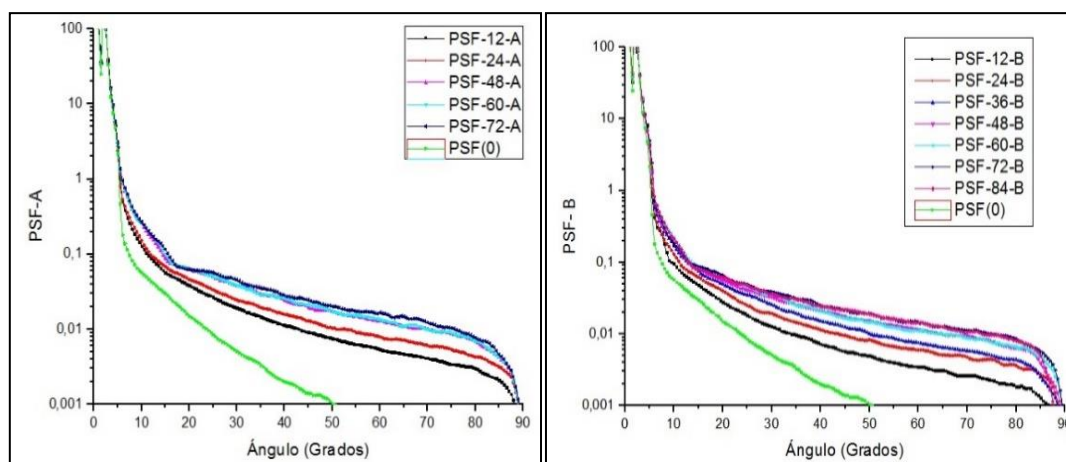
- La metodología de caracterización de las muestras por medición con balanza electrónica no resultó adecuada porque la apreciación del instrumento no era suficiente.
- Las mediciones con el microscopio permiten discriminar las muestras de 24 y 48 horas de integración de depósito.
- Las mediciones con escatómetro de las muestras de integración pueden compararse con las de portaobjetos limpios.

Para el siguiente experimento se amplió el rango de mediciones del escatómetro y se utilizó un promedio de PSF de muestras limpias tomado como referencia, para separar el efecto de la difusión del vidrio y de las partículas.

5.2 Experimento 2.

En el segundo experimento se recolectaron y midieron muestras con tiempos de acumulación de 12, 24, 36, 48, 60, 72 y 84 horas. De acuerdo al objetivo propuesto, se buscó comprobar, en primer lugar, que el instrumento posee una mejor resolución que la medida en el Experimento 1 y comparar la recolección en dos lugares, suficientemente distanciados, dentro de la ciudad de San Miguel de Tucumán. Por ello se recogieron muestras de depósito de biomasa de la quema de caña, colocando portaobjetos de vidrio en dos lugares: uno ubicado en la zona suroeste de la ciudad (sitio A) y otro en el microcentro (sitio B).

Utilizando el dispositivo goniométrico descrito en el capítulo 4, se midieron las funciones $BPDF(\theta)$ 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 $BPDF(\theta)$ correspondientes a la transmisión, medidos desde la dirección del haz incidente (0°) hasta el plano de la muestra (90°) y se calculan las funciones $PSF(\theta)$ (Ec. 4.1), para cada tiempo de acumulación y para cada sitio de recolección (Fig. 5.4). 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 $PSF(\theta)$ 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 5.4 - Funciones $PSF(\theta)$ entre 5° y 90° , para muestras de 12, 24, 36, 48, 60, 72 y 84 horas de depósito recogidas en los sitios: A (izquierda) y B (derecha). Se agrega la $PSF_0(\theta)$, promedio de tres muestras limpias.

Se realizó también un análisis de la varianza (ANOVA) para comparar las muestras recolectadas en el sitio A y las muestras recolectadas en el sitio B para los tiempos de acumulación de 12, 24 y 48 horas (no se puede realizar la comparación en 36 horas porque en el sitio A no existen muestras de ese periodo de recolección), obteniéndose probabilidades muy altas de que ambos

grupos de muestras sean parte de una misma distribución ($p > 0,7$ en todos los casos). Las mediciones de ambos sitios son equivalentes, por lo tanto, se considerarán únicamente las muestras del sitio B para análisis posteriores ya que en el sitio B se recolectaron muestras en todos los tiempos de acumulación.

Las funciones de difusión $f_n(\theta)$ calculadas según la ec. 4.2, medidas para ángulos entre 20° y 80° (Fig. 5.5), evidencian que la difusión de las muestras en estas direcciones es significativa para todos los tiempos de integración utilizados (entre 12 y 84 h).

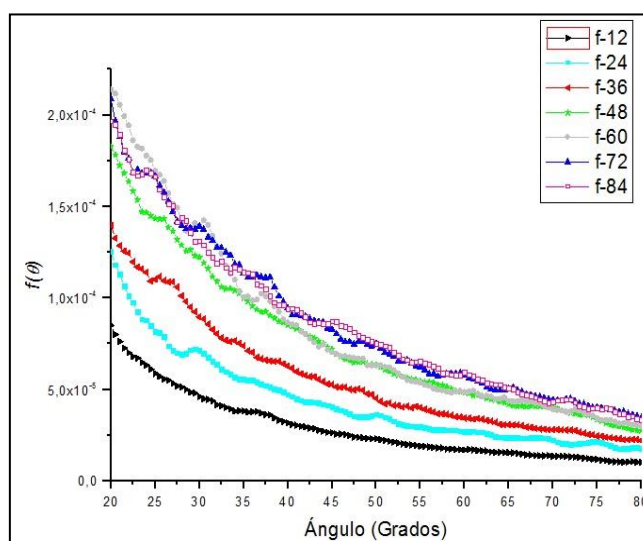


Figura 5.5 - Funciones de difusión $f_n(\theta)$ entre 20° y 80° de las muestras correspondientes a todos los tiempos de integración utilizados. Se identifica claramente el comportamiento de las muestras de 12, 24, 36 y 48 horas, sin embargo, se hace difícil diferenciar las muestras de 60, 72 y 84 horas.

En la Fig. 5.5 pueden verse claramente diferenciados los comportamientos de las muestras de 12, 24, 36 y 48 horas y aún, 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. Este comportamiento 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 resultarán de utilidad a los fines de este trabajo.

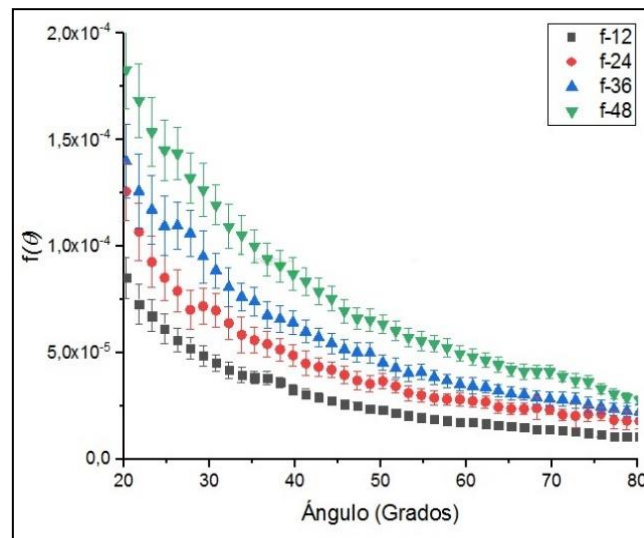


Figura 5.6 - Funciones $f_n(\theta)$ entre 20° y 80° , correspondientes a muestras con tiempos de integración de 12, 24, 36 y 48 horas, seleccionadas para el análisis. Se indica la desviación estándar de los datos en cada punto medido experimentalmente.

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 en la Fig. 5.7.

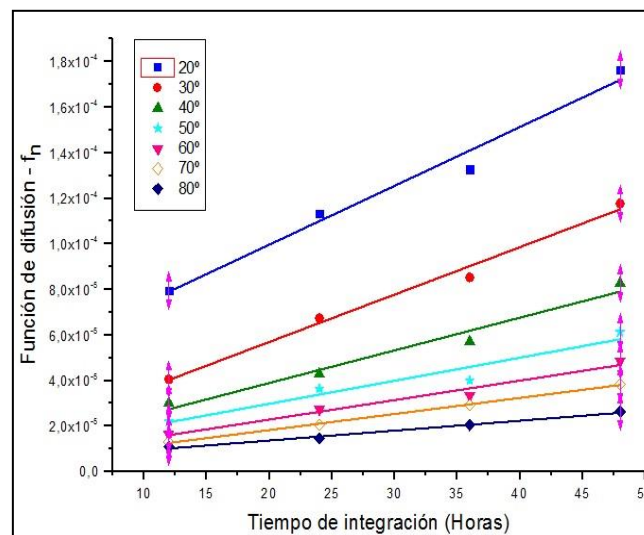


Figura 5.7 - Evolución de los valores que toma la función $f_n(\theta)$ en función del tiempo de integración, entre 12 h y 48 h (para ángulos θ entre 20° y 80°). Se agregan las rectas de ajuste correspondientes a todos los ángulos seleccionados.

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. 5.7).

Para mayor detalle, en la Tabla 5.1 se especifican los valores de los parámetros de cada recta de ajuste y los coeficientes de regresión correspondientes. Al considerar ángulos cada vez mayores para el ajuste lineal, 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 5.1) 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: $y = A \cdot (1 - e^{-b \cdot t})$, 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 5.1 - Parámetros de ajuste y coeficientes de regresión correspondientes a $f_n(t)$ para los ángulos seleccionados (Fig. 5.7). Para corroborar estos resultados será necesario contar con datos de nuevas muestras que confirmen (o no) este comportamiento.

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

Se analiza la posible correlación entre los valores medidos de la función de difusión entre 20° y 80° en las muestras de polución acumulada y la visibilidad meteorológica, a partir del modelo y las leyes de Beer-Lambert y de Koschmieder (Ec. 2.2 y Ec. 2.4), que suponen que $\sigma_{ext} = \sigma_a + \sigma_d$ es el parámetro que da cuenta de la concentración de partículas suspendidas en la atmósfera que da origen a una determinada visibilidad atmosférica.

Tabla 5.2 - Inversa de la visibilidad meteorológica, medida por el SMN cada hora, en las fechas del experimento y total correspondiente a cada intervalo de 12 h.

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

Los valores $\sigma_{ext,j}$ se pueden calcular a partir de la Ec. 2.4, utilizando los datos de la visibilidad meteorológica del SMN según se indica en la Ec. 5.1, donde A se calcula como: $A = (-\ln 0,050) = (3,00 \pm 0,01)$ y V_j^{-1} es la inversa de la visibilidad meteorológica medida cada hora (SMN, 2017b).

$$\sigma_{ext,j} = A \cdot (V_j^{-1}) \quad (5.1)$$

A partir del modelo de Beer-Lambert y de Koschmieder se puede definir un parámetro equivalente para las muestras acumulativas, σ_n , definido según la Ec. 5.2 para cada tiempo de integración (donde n es el tiempo de integración en horas).

$$\sigma_n = \sum_{j=1}^n (\sigma_{ext,j}) \quad (5.2)$$

Se plantea, entonces, como hipótesis, que la función $f_n(\theta)$ para ángulos mayores a 20° es representativa de la difusión de la muestra y puede ser considerada una medida adecuada de la misma y que, por lo tanto, podría esperarse que presente una correlación lineal positiva con el parámetro σ_n que se calcula a partir de la visibilidad meteorológica (Ec. 5.2) determinada en el mismo período de integración.

Los registros de la visibilidad meteorológica durante el período del experimento (4/9 al 8/9 de 2017), pertenecen al SMN - Aeropuerto B. Matienzo, S. M. de Tucumán (ubicado a 10 km de los sitios de recolección), 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 5.2 donde se agrupan en períodos consecutivos de 12 h.

A partir de los valores de la Tabla 5.2 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. 5.2) que se muestran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 - 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. 5.8 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 R^2 mayores a 0,94 en todos los casos.

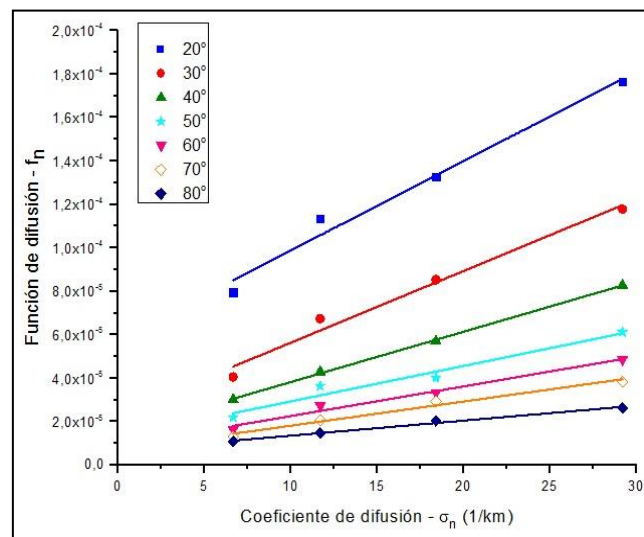


Figura 5.8 - Evolución de los valores que toma la función $f_n(\theta)$ en función del coeficiente de difusión, entre 12 h y 48 h (para ángulos θ entre 20° y 80°). Se agregan las rectas de ajuste correspondientes a todos los ángulos seleccionados.

Tal como se observa en la Fig. 5.8, 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, por lo tanto, una confirmación aceptable de la relación lineal propuesta, que se explicita en la Ec. 5.3, cuyos parámetros M y N se detallan en la Tabla 5.4, así como los coeficientes de regresión de cada recta de ajuste.

$$f_n = M \cdot \sigma_n + N \quad (5.3)$$

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 SMN, en los mismos tiempos de integración.

Las intersecciones de cada recta con el eje (Tabla 5.4), 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 5.4 - Parámetros de ajuste y coeficientes de regresión correspondientes a f_n (σ_n) para los ángulos seleccionados (Fig.5.8).

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

Las mediciones de difusión de muestras recogidas cada 12 horas determinan las contribuciones durante el día y la noche. Para realizar un análisis por separado de la contribución del depósito de contaminación en los períodos diurno y nocturno, se calcularon los valores de pendiente de las $PSF(t)$ para distintos ángulos, en cada intervalo de 12 horas, para determinar el incremento de la difusión en cada acumulación extra de 12 horas.

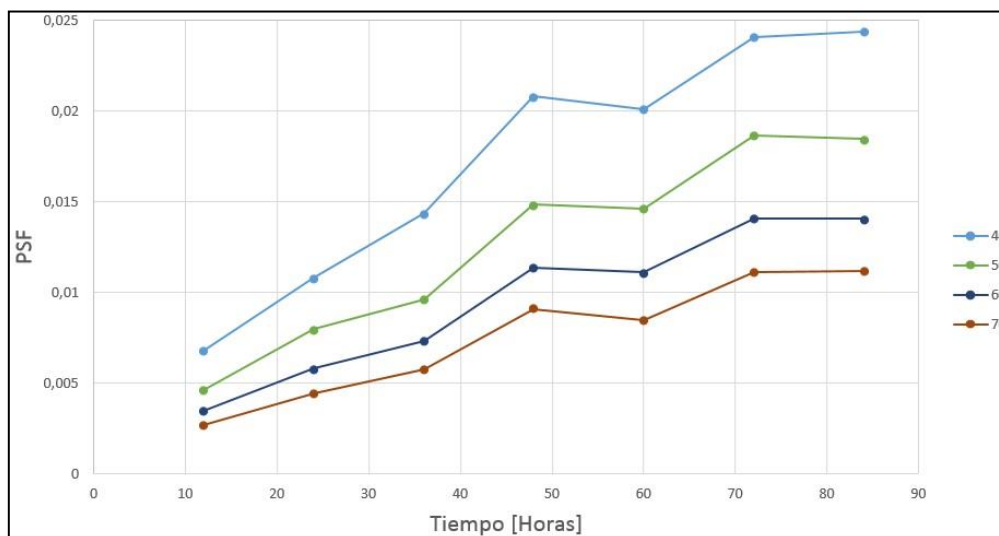


Figura 5.9 - Representación gráfica de los valores de PSF medidos para distintos ángulos (40° a 70°) en intervalos sucesivos de 12 horas donde se evidencia claramente la diferencia de pendiente en los períodos diurnos y nocturnos.

De lo que se puede concluir que:

- La metodología usada discrimina muestras con tiempos de integración entre 12 y 48 horas (Fig. 5.4).
- Se observa un efecto de saturación para depósitos mayores a 48 horas (Fig. 5.5).
- Se resta vidrio limpio para eliminar difusión del portaobjeto.
- **La difusión del vidrio limpio es despreciable a partir de los 40° o 50°.**
- **Las curvas de medición de difusión son indistinguibles entre el sitio A y el sitio B.**
- **Los valores calculados de la función $f(\theta)$ correlacionan con el coeficiente de extinción (Ec. 2.2) calculado con la hipótesis de una “visibilidad acumulativa” (Ec. 5.2) en intervalos de tiempo cortos (Fig. 5.8) para ángulos entre 40° y 80°.**
- **Se observan comportamientos diferentes en la recolección nocturna y diurna, observándose un claro aumento de la actividad de quema diurna.**
- **Para ángulos mayores a 50° no es necesaria la corrección de la $PSF(\theta)$ por difusión de los vidrios de los portaobjetos porque esta resulta despreciable y puede omitirse.**

5.3 Experimento 3.

En el tercer y último experimento se contrasta experimentalmente la hipótesis de que el sitio de recolección, bajo las condiciones detalladas en el trabajo, no afecta la cantidad de depósito de polución. La hipótesis formulada sostiene que la metodología alternativa propuesta integra todas las contribuciones de quemadas cercanas a la ciudad y que, por lo tanto, dentro del ámbito de una ciudad como la de S.M. de Tucumán, la ubicación no afecta la cantidad recolectada de partículas. Para ello, a los dos sitios de recolección del Experimento 2, se agregó un tercer sitio de recolección ubicado en la zona norte de la ciudad (sitio C), para una mejor convalidación.

En este Experimento 3 también se analizó la resolución mínima del sistema, recolectando también muestras con tiempos de acumulación menores a 12 h. Por lo tanto, en los mencionados sitios, A, B y C, se tomaron muestras de 3, 6, 9, 12, 18 y 24 horas.

De la misma manera que en el Experimento 2, se midieron con el dispositivo goniométrico las funciones $BSDF(\theta)$ de todas las muestras recolectadas y de las muestras limpias de referencia para control.

Mediante un análisis de la varianza (ANOVA) se realizó una comparación de las curvas PSF de difusión producida por las muestras entre los ángulos de 40° y 80°. El análisis mostró que las muestras del sitio A son distinguibles (test Tukey, $p < 10^{-3}$) cuando se comparan períodos de recolección de 6, 12 y 24 horas correspondientes a distintos días. Las muestras recogidas en los otros dos sitios se tomaron en el mismo día por lo que no se incluyen en esta comparación.

Luego se realizó una comparación por ANOVA entre muestras de los distintos lugares de recolección con el mismo período de acumulación. El resultado muestra que las curvas PSF son distinguibles en algunos casos y en otros no, por lo que no puede afirmarse que el sitio es indistinguible para tiempos cortos de integración.

Por último, a partir del promedio de las curvas PSF de los tres lugares se compararon los tres tiempos de acumulación, de 6, 12 y 24 horas, donde se determinó que son completamente distinguibles (test Tukey, $p < 10^{-3}$). Sin embargo, para las muestras de 3 y 6 horas el ANOVA no es concluyente, lo que pone en duda el límite de apreciación considerado.

Se incluyó una comparación con una muestra limpia de referencia, considerada como muestra de 0 horas, la cual es distinguible para los tres sitios de recolección, A, B y C (test Tukey, $p < 0,03$). Este resultado sirve como justificación del método, ya que puede tratarse la muestra limpia de 0 h, tomada como referencia, como una medición separada del resto.

Las Figuras 5.10 y 5.11 muestran las PSF de las muestras del sitio de recolección A para distintos días: 11 y 12 de agosto en la primera recolección (estas se denominaron A' para diferenciarlas de las otras) y los días 18 y 19 de agosto en la segunda recolección, realizada el siguiente fin de semana, donde en ambos casos se puede apreciar la diferencia entre los tiempos de acumulación. Las curvas de difusión (3 a 24 horas) tienen la misma forma, donde destaca en ambas figuras la curva de difusión de la muestra limpia, cuya forma es diferente.

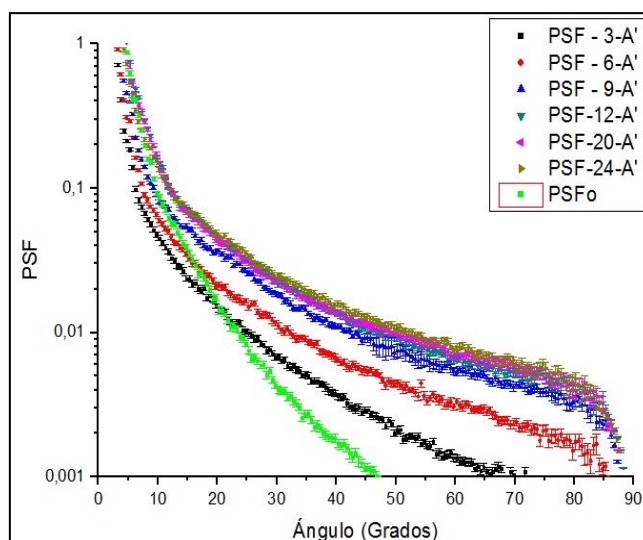


Figura 5.10 - Representación gráfica de las PSF medidas para muestras del sitio A, denotadas como A', de la primera recolección.

Las muestras recolectadas en el segundo fin de semana corresponden al mismo período de recolección de los sitios B y C. En este caso, para el sitio A se tomaron únicamente muestras de 6, 12 y 24 horas de tiempo de integración (Fig. 5.11), recolectando cinco muestras por período de exposición al igual que en los otros dos sitios. La diferencia entre las curvas PSF se puede apreciar mejor con tiempos de integración más separados entre sí.

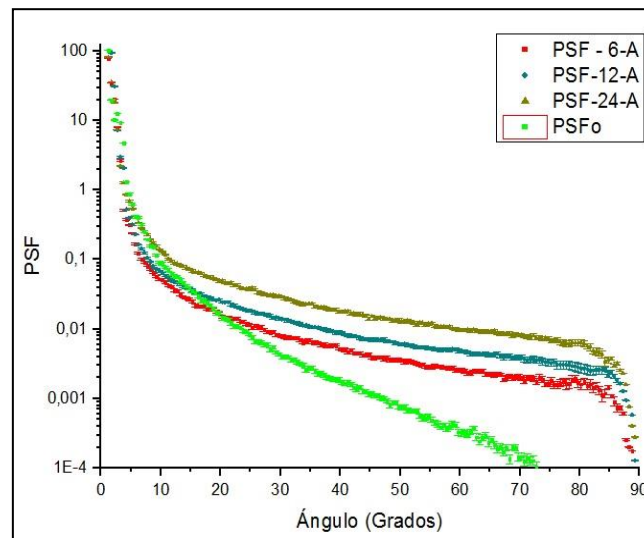


Figura 5.11 - Representación gráfica de las PSF medidas para las muestras del sitio A en la segunda recolección.

La Figura 5.12 muestra las curvas PSF del sitio B. Se aprecia el comportamiento de la curva de difusión de la muestra limpia comparativamente a la de las muestras de 3 horas y 6 horas, con las que se superpone hasta ángulos de 50°. Se infiere que la difusión producida por el vidrio es comparable con la difusión de muestras de 3 horas de integración hasta los 50°.

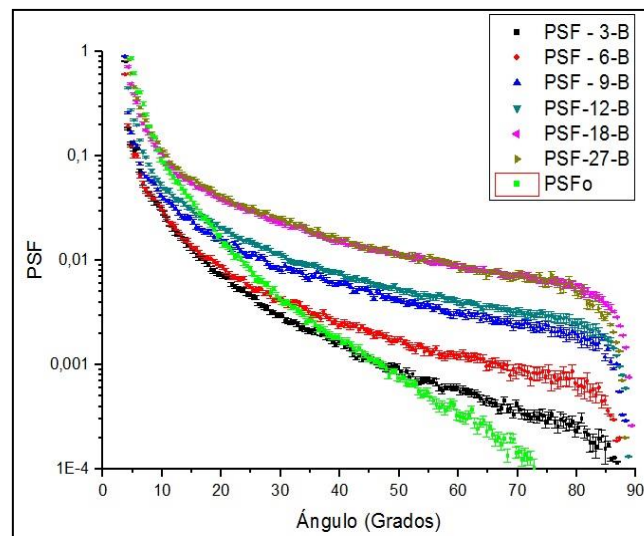


Figura 5.12 - Representación gráfica de las PSF medidas para todas las muestras en el sitio B.

En la Figura 5.13 se observa el mismo comportamiento a 30°, donde están representadas las curvas de difusión para las muestras del sitio de recolección C. Además, no son claramente distinguibles las curvas de muestras de 3 h y 6 h, lo que confirmaría que el límite de resolución del dispositivo se encuentra entre estos valores. La medición de ruido ya es significativa comparada con las PSF de muestras de 3 h de acumulación.

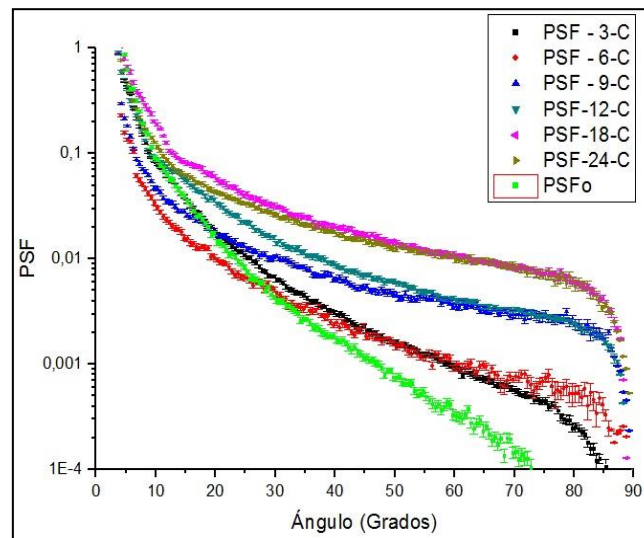


Figura 5.13 - Representación gráfica de las PSF medidas para todas las muestras en el sitio C.

Se analizó el comportamiento del promedio de las PSF de las muestras obtenidas en los tres lugares, para cada tiempo de acumulación considerado en todos los sitios (6, 12 y 24 horas) tal como se muestra en la Figura 5.14.

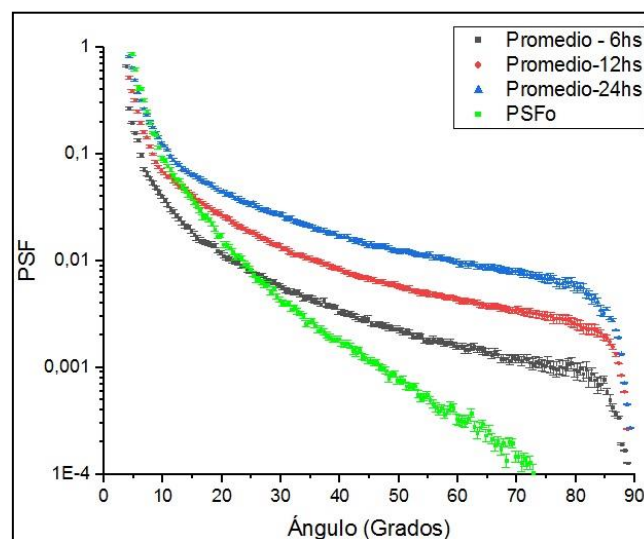


Figura 5.14 - Representación gráfica de las PSF promedio de los sitios A, B y C.

Se infiere de estos resultados que, para evaluar la difusión de las partículas sin considerar la difusión del vidrio en las muestras, el límite inferior debería tomarse en 50°, donde se aprecia que la difusión medida para el vidrio limpio es aproximadamente despreciable.

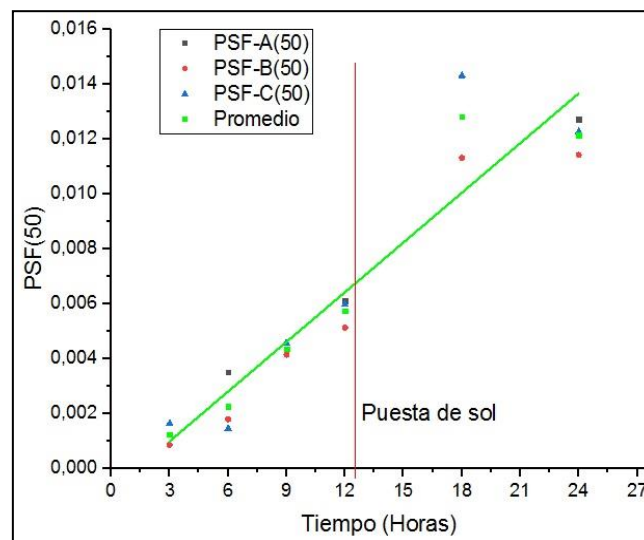


Figura 5.15 - Representación gráfica de las $PSF(50^\circ)$ de los sitios A, B, C y el promedio. Se muestra la recta de ajuste del promedio. Se destaca el valor correspondiente a la hora de la puesta del sol que coincide casi con los datos de los depósitos de 12 h.

Se analizan ahora (Fig. 5.15) los valores de la $PSF(50^\circ)$ en función del tiempo de acumulación, para los tres sitios y se muestran los valores promedios. Se destaca el valor correspondiente a la hora de la puesta del sol que coincide casi con los datos de los depósitos de 18 h. Se observa un incremento lineal en la difusión ($R^2 = 0,889$), pero el valor correspondiente a las 24 h de depósito no muestra incremento respecto a la medición anterior (18 h). Esto puede atribuirse al momento del día de la recolección y al evidente ciclo día/noche que ya se observaba en la Fig. 5.9. La muestra de 18 horas fue recogida a las 01:00 hs. y la última a las 07:00 hs. de la mañana. El incremento a las 18 horas podría explicarse por la deposición de más partículas en el atardecer, ocasionada por el fenómeno del rocío. La caída del rocío podría ocasionar que en las últimas horas del día se decante un mayor número de partículas, el aire estará entonces más limpio durante toda la noche, además de la baja de la actividad de quema en horas de la noche, lo que implica una baja acumulación en las últimas 6 horas de recolección.

En la Fig. 5.16 se representan las mediciones de la $PSF(50^\circ)$ de las muestras tomadas en los distintos sitios (A, B, C) en función del tiempo de acumulación y sus respectivas correlaciones. Se observa una clara correlación positiva entre estos parámetros, con valores R^2 que van de 0,79 a 0,92.

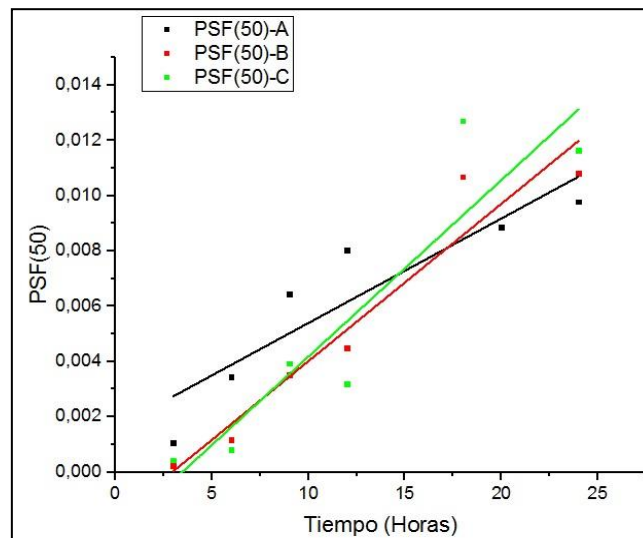


Figura 5.16 - Mediciones de la PSF de las muestras tomadas en los distintos sitios en función del tiempo de acumulación.

Para contrastar esta hipótesis se representan en la Fig. 5.17 los valores de $PSF(50)$ y los valores de σ_n , calculados para los mismos tiempos de integración de 3, 6, 9, 12, 18 y 24 horas.

En la gráfica de la Figura 5.17 se representan los mismos datos pero en función del parámetro σ para verificar las nuevas correlaciones, obteniéndose valores R^2 entre 0,80 y 0,90. Los valores de R^2 muestran que el ajuste lineal obtenido con el parámetro σ no es mejor que los correspondientes a las gráficas en función del tiempo de acumulación.

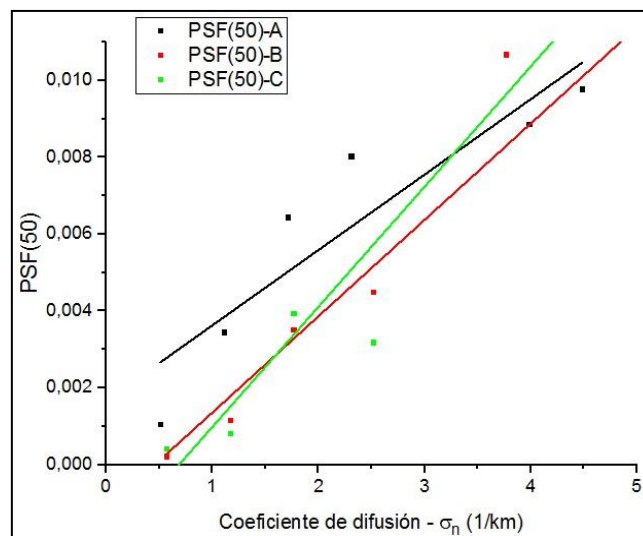


Figura 5.17 - Mediciones de la PSF de las muestras tomadas en los distintos sitios en función del coeficiente de extinción.

Se evaluó una comparación entre las muestras del segundo y las del tercer experimento, ya que corresponden a años consecutivos. Para realizar la comparación se consideraron las muestras de 12 y 24 horas de integración puesto que ambos experimentos cuentan con estos periodos de

recolección. En la Figura 5.18 están representadas las PSF promedio de los sitios de recolección para las muestras de 12 horas y 24 horas de integración.

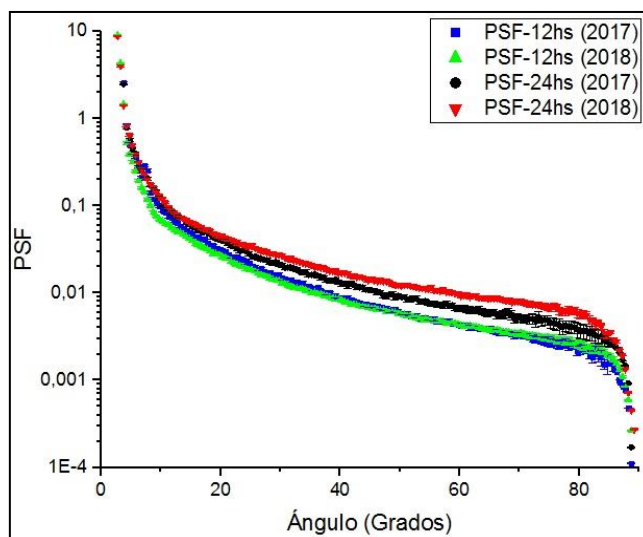


Figura 5.18 - Comparación de PSF promedio para la recolección del Experimento 2 y del Experimento 3.

El resultado de la Figura 5.18 pareciera confirmar la observación de la caída de un número mayor de cenizas el año 2018. Se observa una diferencia entre las PSF de 24 horas, lo que muestra una mayor recolección el año 2018. Sin embargo no es perceptible una diferencia entre las PSF de 12 horas, porque hace falta más integración de depósito. Existen reportes de la actividad cañera en la provincia, con los cuales es posible realizar comparaciones de años diferentes.

Datos de la EEAOC.

En Tucumán se cuenta con un informe anual sobre el área cañera quemada en la provincia de Tucumán, publicado por la EEAOC (Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes), donde se evalúa el efecto de esta práctica. En el informe del año 2017, el objetivo general del trabajo fue identificar y cuantificar el área cañera afectada por los procesos de quema en Tucumán durante la zafra 2017, y comparar los resultados con zafras precedentes (2013, 2014, 2015 y 2016).

En la Figura 5.19 se muestra una gráfica extraída del mencionado informe. Dicha figura fue realizada a partir de información obtenida a partir de la aplicación de diferentes técnicas de procesamiento de imágenes satelitales y herramientas SIG (sistemas de información geográfica), complementadas con trabajos de validación y corroboración de campo. Muestra la evolución mensual y por año del área cañera sometida a procesos de quema por departamentos, durante las zafras 2013, 2014, 2015, 2016 y 2017.

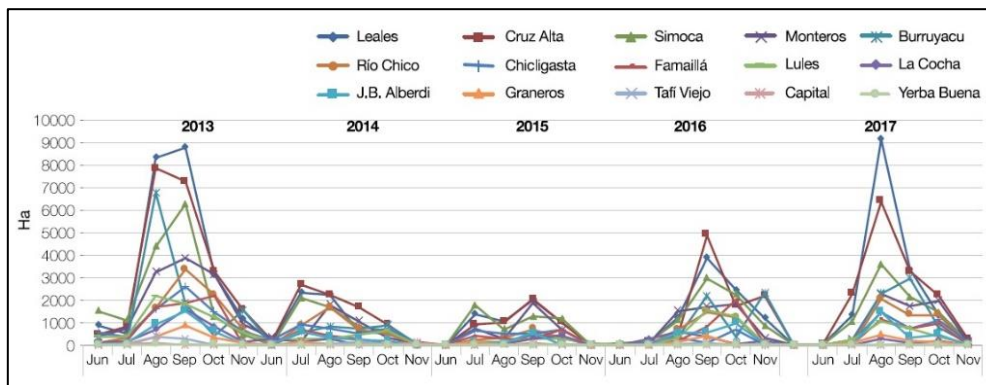


Figura 5.19 - Superficie en hectáreas del área quemada durante los períodos de zafra 2013-2017.

Se observa en la Figura 5.19 que en el año 2017 aumentó la superficie quemada de cañaverales, respecto de los años anteriores sin contar el año 2013. Se observa que el año 2013 concentró la mayor superficie quemada en todos los períodos estudiados (120.000 ha), seguido por el año 2017 (68.500 ha), en tercer lugar, el año 2016 (52.300 ha), seguido del año 2014 (40.000 ha) y finalmente el año 2015 con los valores más bajos de superficie afectada con quema (28.500 ha). El mes de septiembre resulta el mes de mayor acumulación de quemas para los años 2013, 2015 y 2016, mientras que el mes de agosto representa el de mayor concentración para los años 2014 y 2017.

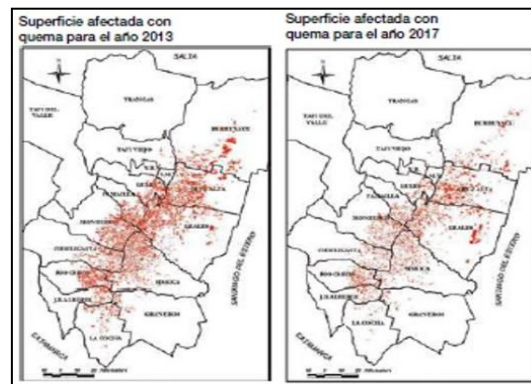


Figura 5.20 - Focos de incendio registrados en Tucumán en los años 2013 y 2017.

5.4 Comparación con curvas de edad.

El efecto de la luz difundida por la presencia de contaminación ambiental sobre la percepción visual ha sido comparado, en la bibliografía, con el efecto de la difusión intraocular producida en el ojo humano, que por opacidad del cristalino o por otras causas, degradan la calidad de la imagen que llega a la retina, lo que deriva en una disminución de la visión.

Resulta, por lo tanto, de interés la comparación de los resultados de esta investigación, que se trata en todos los casos de una difusión extraocular de la luz incidente con los obtenidos por la CIE (Vos et al., 2002) para difusión intraocular, ya que en ambos casos se procede a la medición

de la función $PSF(\theta)$ 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 Vos y van den Berg se puede calcular el parámetro de “luz extraviada” o difundida (straylight parameter, en inglés) a partir de la función $S(\theta)$ que caracteriza la difusión intraocular (Ec. 5.4), donde θ se mide en grados (De Wit & Coppens, 2003; van den Berg et al., 2009).

$$S_n(\theta) = PSF'_n(\theta) \cdot \theta^2 \quad (5.4)$$

En este trabajo se utilizarán las funciones $PSF'_n(\theta)$ medidas para las muestras en los distintos tiempos de integración restadas con la muestra limpia, para el cálculo de las correspondientes funciones $S_n(\theta)$ tales que permitan comparar resultados.

$$PSF'_n(\theta) = \overline{PSF_n(\theta)} - PSF_0(\theta) \quad (5.5)$$

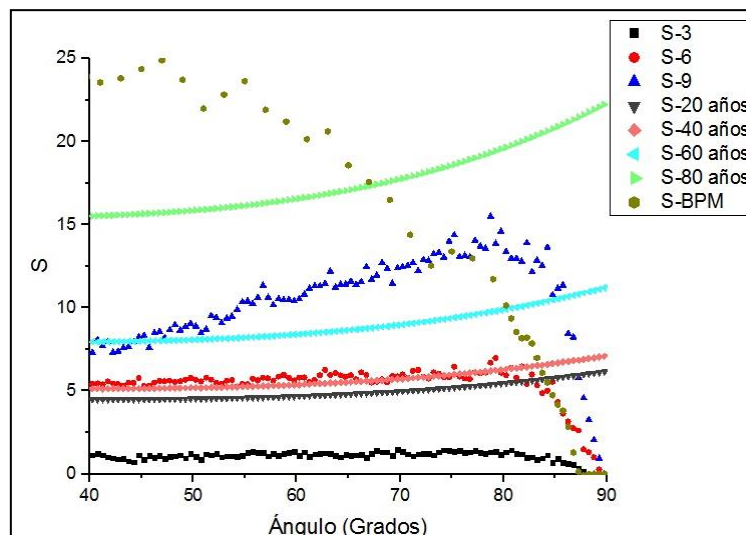


Figura 5.21 - Representación gráfica de la función S promedio de las muestras de los tres sitios de recolección comparadas con las curvas de edad. Se incluye la función S obtenida con la medición de filtro BPM1 (de calibración).

Se representan en una misma gráfica (Fig. 5.21) las curvas $S(\theta)$ de difusión intraocular en sujetos de 20, 40, 60 y 80 años, obtenidas a partir de la ecuación CIE (Vos et al., 2002) y las $S_n(\theta)$ de muestras de 3, 6 y 9 h de integración (Ec. 5.5) obtenidas a partir de la PSF promedio de los tres sitios de recolección (A, B y C), entre 40° y 90° . Se escogieron estos períodos cortos de integración porque las funciones obtenidas son comparables a las curvas de edad en este rango. Además, se incluye en esta gráfica la función S calculada a partir de la PSF del filtro BPM1 medida con el escatómetro. De este modo se efectúa una comparación con una curva de referencia, medida con el propio sistema experimental utilizado en este trabajo, que corresponde a un filtro que simula una catarata en estado leve (Barrionuevo et al., 2010).

Puede verse que la difusión producida por la muestra de 9 h de depósito queda completamente contenida entre las curvas de difusión intraocular correspondientes a 60 y 80 años, de lo que



podría deducirse que la polución acumulada en los vidrios durante ese tiempo resulta equivalente al efecto de un envejecimiento de los medios oculares de entre 60 y 80 años.

Estas comparaciones muestran el efecto adicional de la difusión cuando uno mira a través de un vidrio con partículas depositadas, que añade a la difusión intraocular la difusión extraocular de las partículas. Por lo tanto, la acumulación de las mismas es equiparable a un envejecimiento del ojo, lo que provoca una disminución de la función visual.

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

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. Los efectos de la difusión sobre la función visual han sido ampliamente estudiados. Los estudios de calidad óptica miden la MTF del medio difusor, de manera que evalúan la pérdida de frecuencias espaciales en la imagen degradada.

Por otra parte, la visibilidad se sigue midiendo en la dirección de visión (coeficiente de extinción), cuando en realidad es importante considerar la distribución de la luz en otras direcciones, por efecto de la difracción, para saber cómo afecta ésta a la visión foveal pero también a la visión periférica. La mayoría de los instrumentos destinados a la medición de la visibilidad evalúan extinción en ángulos pequeños respecto a la dirección de incidencia, o determinan únicamente la pérdida de contraste. Los dispositivos de medición de la difusión utilizan sensores en ángulos fijos, lo que brinda más precisión comparado con los goniométricos, pero resultan más costosos. Otros instrumentos emplean cámaras fotográficas y determinan la pérdida de contraste a partir de la toma de fotografías.

Sin embargo, las mediciones de difusión de la luz se pueden complementar con las mediciones obtenidas con contadores de partículas, ya que estos discriminan concentraciones de contaminantes. La estación de observación en Tucumán, operada por el SMN, que está en proceso de instalación y calibración de sus instrumentos, cuenta con un instrumento TOPAS para este propósito. En la misma estación se cuenta, además, con un sistema LiDAR.

Las mediciones con microscopio muestran la distribución de las partículas sobre las placas de vidrio de los portaobjetos y permiten discriminar las concentraciones de partículas en tiempos de exposición de 24 y 48 horas. Esta metodología está limitada por el área de observación del objetivo. En las fotografías tomadas se observan partículas de carbón vegetal pero también partículas de polvo, lo que demuestra que la composición de las muestras no proviene exclusivamente de la quema, ya que se observaron distintas clases de partículas. Evidentemente esta metodología aporta información que podría ser relevante y permitiría ampliar el estudio a la búsqueda de una posible relación entre la distribución de partículas en una muestra y el perfil de difusión obtenido con el escatómetro. Se observa cómo la metodología de recolección integra partículas de diversas fuentes de origen.

Dada la dificultad que presentan los diferentes métodos de determinación de la visibilidad atmosférica, sobre todo para bajas concentraciones de contaminantes, se ha analizado en la presente investigación, 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 (Fig. 4.2 y Fig. 4.3) posibilita mayor resolución angular que otros sistemas donde el sensor tiene una posición fija, usando una cámara CCD que puede desplazarse de forma automática alrededor de la muestra y que mide con una resolución de 3,0 min de arco.

El método óptico para determinar la difusión producida por muestras de polución decantada sobre superficies de vidrio permite discriminar distintas concentraciones de partículas. Este método es sensible para tiempos de acumulación bajos y discrimina depósitos de 6, 9 o más horas, hasta 48 h. Las muestras son integrativas, por lo que permiten medir una polución pequeña que se acumula a lo largo de varias horas hasta un límite de saturación.

Esta metodología agrega información a las mediciones clásicas en la línea de visión, las cuales determinan el coeficiente de absorción del medio o la difusión a un ángulo fijo, una curva que describe la difusión de la luz producida en ángulos grandes respecto a la dirección de propagación de la luz. La correlación obtenida con el coeficiente de extinción, obtenido del modelo de Beer-Lambert y de la ec. de Koschmieder, permite confirmar que las mediciones de difusión son compatibles con las de visibilidad.

Del primer análisis de los datos se concluye que las muestras recolectadas en los tres sitios de medición (A, B y C) no presentan diferencias significativas para los diferentes tiempos de integración: cuando se hace el análisis de los diferentes escenarios usados, la diferencia no es significativa entre las muestras de distintos lugares. Mediante un análisis de la varianza (ANOVA) se comprobó que las curvas PSF son indistinguibles para los distintos lugares de medición para tiempos elevados de deposición. 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 localizada como las mediciones de visibilidad meteorológica que realiza el SMN en el Aeropuerto Benjamín Matienzo. Permitiría definir globalmente un índice de polución debido a la quema de caña regional, tal que permita implementar políticas sanitarias o punitivas al respecto. Sin embargo, respecto a la comparación de sitios de recolección realizada con datos del año 2017 (trabajo en prensa, Anales de Física, 2019), las nuevas mediciones realizadas en 2018 no representan una mejor convalidación.

Las mediciones de difusión de la luz de muestras con 12, 24, 36, 48, 60, 72 y 84 horas de tiempo de acumulación de depósito de polución muestran que durante el período diurno ocurre una mayor acumulación respecto al nocturno. Más aun, en las mediciones con muestras de 3, 6, 9, 12, 18 y 24 horas de acumulación de depósito de polución se observa un comportamiento anómalo en la franja horaria de 7 p.m. a 1 a.m., donde ocurre la transición del período diurno al nocturno y la aparición del rocío que sin duda afecta a la decantación de las partículas sólidas suspendidas. La disminución en la acumulación en la muestra de 24 horas respecto a la de 18 horas puede atribuirse, claramente a algún evento atmosférico en la caída de la noche. Como hipótesis se atribuye a este fenómeno el rocío nocturno producido por la repentina baja de temperatura y consecuente aumento de la humedad en el medio, lo que lleva a un incremento en la acumulación de la muestra de 18 h de depósito pero una reducción en las horas siguientes debido a la ausencia de partículas en la atmósfera nocturna.

Por otra parte, las $PSF(\theta)$ medidas, muestran que el método puede discriminar fácilmente depósitos de entre 6 y 24 horas (Figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13). Introduciendo la función $S(\theta)$

(Ec. 5.4) que permite caracterizar mejor la difusión para ángulos grandes, se evidencia una mejor resolución de las curvas de menor tiempo de acumulación (Fig. 5.21).

Para depósitos de acumulación mayores a 48 horas, aparece un efecto de saturación que puede apreciarse claramente con la función de difusión $f_n(\theta)$. A partir de este límite, la concentración de partículas ya no crece linealmente con el tiempo de exposición, porque crece con el tiempo la probabilidad de superposición de partículas o también la posibilidad de que la tasa de depósito y de evacuación de la polución se igualen, lo que limita el método para concentraciones grandes de partículas.

Cuando se analizan los valores que toma $f_n(\theta)$ en función del tiempo de integración de las muestras, para ángulos entre 20° y 80° , se encuentra un crecimiento prácticamente lineal de la difusión medida (Fig. 5.7). Los ajustes obtenidos con el parámetro σ (Fig. 5.8) son mejores que los correspondientes con el tiempo de acumulación, lo que confirma el acuerdo que poseen las mediciones de difusión de muestras acumulativas con el modelo de Beer-Lambert y las mediciones locales de visibilidad. Deberá analizarse qué factores explican las desviaciones del modelo de Beer-Lambert y Koschmieder (Ecs. 2.1 y 2.4) de los datos disponibles (intersecciones no nulas de los ajustes lineales en la Fig. 5.8) y quizás esto permita generalizar el uso del método integrativo para otro tipo de partículas más pequeñas que incluya la polución atmosférica.

Las mediciones de los niveles de difusión en función de los tiempos de acumulación, que muestran la tendencia a la saturación para tiempos más grandes, serán de importancia para estudiar más en detalle los niveles de saturación y las condiciones en que esta ocurre.

Las curvas representadas correlacionan con datos de visibilidad medidos por el SMN en tiempos de integración lo suficientemente largos, desde 12 h hasta 48 h. Sin embargo, no correlacionan para tiempos mayores de integración (entre 48 y 84 h), ya que aparece una clara saturación de las muestras (Fig. 5.8), así como tampoco se observa una correlación del mismo tipo para tiempos bajos de exposición si se compara con los ajustes lineales en función del tiempo (Figs. 5.16 y 5.17).

La comparación de gráficas de difusión por muestras de 12 y 24 horas de acumulación de años 2017 y 2018, muestra que el método fue sensible para detectar un incremento promedio en el valor PSF de las muestras de 24 horas del 2018 respecto al año anterior. Sin embargo, este comportamiento no se observa de forma apreciable para las muestras de 12 horas.

El informe EEAOOC sobre el área cañera quemada en la provincia de Tucumán, concluye que en 2017 aumentó la superficie de cañaverales quemada respecto de los tres años anteriores. Todavía no se publicó el informe con datos de 2018, pero si se tiene en cuenta el incremento de la cantidad de cenizas que cayeron en la ciudad durante los meses de zafra y conforme a lo que indican las noticias periodísticas, sumado al incremento en el número de denuncias de incendios, es probable que la quema en 2018 fue aún mayor que en 2017. Esto concuerda con la información que se obtiene de las muestras recolectadas en los años 2017 y 2018, ya que, si comparamos muestras de iguales tiempos de acumulación entre los dos años, se observa en este último año un aumento de la polución.

Comparando los resultados obtenidos con los de van den Berg para difusión intraocular se encuentra que las curvas $S_n(\theta)$ calculadas para depósitos de entre 3 h y 9 h son comparables con

las curvas de ojos envejecidos por opacidad del cristalino, de lo que se concluye que la presencia de depósitos de polución tiene una influencia significativa en el deslumbramiento del sistema visual, conclusión que es especialmente importante en conductores de vehículos con iluminación nocturna, y que casi equivale a envejecimiento ocular de un ojo de 80 años (Santucho Cainzo et al., 2016).

La medición por estima de la visibilidad meteorológica considera otras condiciones y otros factores climáticos, 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 estimadas por debajo del valor real debido a protocolos de seguridad aeroportuaria. En la presente investigación se encuentra compatibilidad entre ambos métodos sólo a través de los modelos de Beer-Lambert y Koschmieder, que integran las mediciones de visibilidad en los mismos tiempos de integración de las muestras recogidas, a través del cálculo del coeficiente de extinción de la atmósfera local.

Entonces la medición de tipo integración temporal desarrollada puede ayudar a estimar la afectación al estado general del ambiente, permitiendo caracterizar períodos de tiempos mayores y evaluar el impacto que produce la suma de pequeñas quemadas cercanas a la ciudad de Tucumán.

Es posible que se instale próximamente un visibilímetro en el aeropuerto de Tucumán, lo que permitiría completar el análisis con mediciones más objetivas, aunque siguen siendo muy localizadas. De todas maneras, la metodología presentada en este trabajo sería complementaria en esta nueva situación.

Es destacable que la aplicación de esta metodología propuesta no está limitada a un control de polución y monitoreo atmosférico, sino también a visibilizar el problema de la quema de cañaverales en Tucumán, que es un problema recurrente en la provincia y que ha persistido desde hace ya mucho tiempo. Si existe contaminación por quema de cañaverales, es de mayor importancia la información de los niveles de visibilidad en zonas aledañas a la capital para la creación de alertas en rutas, ya que las situaciones resultan más críticas en comparación al manejo de vehículos dentro de la ciudad, y por lo tanto debe estudiarse el fenómeno con más detalle.

El dispositivo experimental desarrollado puede servir de precedente para un nuevo sistema de medición portátil que permita realizar mediciones in situ de la contaminación en rutas o en las cercanías de un ingenio ya que, al caracterizar la distribución angular de la luz difundida, resultaría más efectivo que la medición por absorción o difusión en la línea de visión o en ángulos pequeños.

En perspectiva de investigaciones futuras, se podrían realizar comparaciones de mediciones de difusión con datos medidos con los instrumentos TOPAS y LiDAR del SMN, donde se evalúen las posibles correlaciones entre las mediciones realizadas con el escatómetro y las mediciones de conteo de partículas y retrodifusión.

Un estudio posterior podría, también, considerar el análisis de la difusión en distintas longitudes de onda para evaluar los efectos de la polución en la función visual, empleando la misma



metodología propuesta en esta tesis. Los modelos teóricos de difusión revisados en este trabajo explican la difusión de la luz según la relación de tamaño de partícula y longitud de onda. La metodología de recolección integra partículas de distintos orígenes, y por lo tanto las muestras poseen partículas de distintas composiciones, formas y tamaños, por lo que resulta necesario evaluar la difusión con otras fuentes de luz.

Como aporte teórico, 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 subjetiva.

BIBLIOGRAFÍA

- * Artigas J.M., Capilla P., Felipe A., Pujol J. (1995). "Óptica fisiológica. Psicofísica de la visión." Interamericana McGraw-Hill Ed., España.
- * Babari R., Hautière N., Dumont É., Brémond R., Pappadimitis N. (2011). "A model-driven approach to estimate atmospheric visibility with ordinary cameras", *Atmospheric Environment*, 45, 5316-5324.
- * Barrionuevo P., Colombo E., Corregidor D., Jaén M., Issolio L. (2010). "Evaluation of the intraocular scattering through brightness reduction by glare using external diffusers to simulate cataracts", *Optica Applicata*, Vol. XL, No. 1, 63-75.
- * Bäumer D., Versick S., Vogel B. (2008). "Determination of the visibility using a digital panorama camera", *Atmospheric Environment*, 42, 2593-2602.
- * Caimi F.M., Kocak D.M., Justak J. (2004). "Remote visibility measurement technique using object plane data from digital image sensors", *IEEE*.
- * Chen B., Chen S., Zhang Y., Chen H., Guo P., Chen H. (2016). "Atmospheric temperature dependence of the aerosol backscattering coefficient", *Particuology*, 28, 72-76.
- * Chen J., Wang H., Shen J. (2012). "Light scattering of particles illuminated by divergent beam", *Optics and Lasers in Engineering*, 50, 1410-1415.
- * Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). (2011). Standard CIE S 017/E:2011 International Lighting Vocabulary, CIE Central Bureau, Viena, Austria.
- * Corregidor Carrió D.H. (2012). "Caracterización óptica y modelado de medios difusores", Tesis de Doctorado, UNT, San Miguel de Tucumán.
- * Cremades P., Allende D., Puliafito E. (2011). "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.
- * De Wit G.C., Coppens J.E. (2003). "Stray light of spectacle lenses compared with stray light in the eye", *Optom. Vis. Sci.*, 80(5), 395-400.
- * Di Rocco H.O., Iriarte D.I., Pomarico J.A., Ranea Sandoval H.F., MacDonald R., Voigt J. (2007). "Determination of optical properties of slices of turbid media by diffuse CW laser light scattering profilometry", *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 105, 68 – 83.
- * Ditchburn R. (1982). "Óptica", Ed. Reverté S.A., Barcelona.
- * Du K., Wang K., Shi P., Wang Y. (2013). "Quantification of atmospheric visibility with dual digital cameras during daytime and nighttime", *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2121–2130.



- * Hautière N., Labayrade R., Aubert D. (2006). "Real-time disparity contrast combination for onboard estimation of the visibility distance", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 7(2), 201-212.
- * He Z., Mao J., Han X., Wang H. (2018). "Retrieval of aerosol optical constants from angular light-scattering measurement signals using principal component analysis approach", Particuology (article in press).
- * Hecht E. (2000). "Óptica", Addison Wesley, Madrid.
- * Horvath H. (1971). "On the applicability of the Koschmieder visibility formula", Atmospheric Environment, 5, 177-184, Great Britain.
- * Illuminating Engineering Society of North America. (2003). "Lighting Handbook", Illuminating Engineering, 9, 94-95.
- * Jansen H.W., Marschenr S.R., Levoy M., Hanrahan P. (2001). "A Practical Model for Subsurface Light Transport", ACM SIGGRAPH 2001, Los Angeles, CA, USA.
- * Ji D., Li L., Pang B., Xue P., Wang L., Wu Y., Zhang H., Wang Y. (2017). "Characterization of black carbon in an urban-rural fringe area of Beijing", Environmental Pollution, 223, 524-534.
- * Jing J., Wu Y., Tao J., Che H., Xia X., Zhang X., Yan P., Zhao D., Zhang L. (2015). "Observation and analysis of near-surface atmospheric aerosol optical properties in urban Beijing", Particuology, 18, 144-154.
- * Kenyon I.R. (2008). "The light fantastic. A modern introduction to classical and quantum optics." Oxford University Press, UK.
- * Kopeika N.S., Zilberman A., Yitzhaky Y. (2014). "Aerosol MTF revisited", Proceedings of SPIE, 9071.
- * Kubelka P. (1948). "New contributions to the optics of intensely light-scattering materials", J. Opt. Soc. Am., 38, 448 – 457.
- * Landsberg G.S. (1984). "Óptica", Ed. MIR.
- * Leloup F.B., Forment S., Dutré P., Pointer M.R., Hanselaer P. (2008). "Design of an instrument for measuring the spectral bidirectional scatter distribution function", Applied Optics, 47(29), 5454 – 5467.
- * Liu N., Ma Y., Ma J., Wang Y., Yang S., Li L. (2015). "Atmospheric extinction properties in Shenyang, China." Particuology, 18, 120-126.
- * Luo C.H., Liu S.H., Yuan C.S. (2002). "Measuring atmospheric visibility by digital image processing", Aerosol and Air Quality Research, 2(1), 23-29.
- * Nicodemus F.E. (1977). "Geometrical considerations and nomenclature for reflectance", U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards.
- * Otero L.A., Ristori P.R., Sambueza S., Brusca S., Herrera M., Bali L., Pereyra A.F., Martorrella E., D'Elia R.L., Fierro V.E., Franchi G., Repetto C., Vilar O., Salvador J.O.,

- Raponi M.M., Quel E.J. (2018). “Detección de contaminación en la atmósfera de la ciudad de Neuquén por quema de biomasa del 18 al 22 de febrero de 2015”, *Anales AFA* (29) 1, 1-7.
- * Redmond H.E., Dial K.D., Thompson J.E. (2010). “Light scattering and absorption by wind-blown dust: Theory, measurement and recent data.” *Aeolian research*, 2, 5-26.
 - * Ristori P., Otero L., Jin Y., Barja B., Shimizu A., Barbero A., Salvador J., Bali J.L., Herrera M., Etala P., Acquesta A., Quel E., Sugimoto N., Mizuno A. (2018). “Saver.net LiDAR network in southern South America.” *EPJ Web of Conferences* 176, 09011.
 - * Sabbagh-Kupelwieser N., Maisser A., Szymanski W.W. (2011). “From micro- to nanosized particles: Selected characterization methods and measurable parameters.” *Particuology*, 9, 193-203.
 - * Samego I., Barrachina R.O. (1994). “Rainbow and glory scattering Coulomb trajectories starting from a point in space”, *Eur J. Physics*, 15.
 - * Sánchez-Capuchino J., Arasa J. (2003). “A method of characterization of diffusing thin films used as active elements of optical systems”, *Meas. Sci. Technol.*, 14, 346-356.
 - * Santucho Cainzo A., Calderari L.F., Corregidor Carrió D.H., Soria M.G., Jaén E.M. (2016). “Evaluación de la visibilidad en rutas a partir de mediciones de luz difusa”, 101^a Reunión de la Asociación Física Argentina, 149.
 - * Santucho Cainzo A., Calderari L.F., Corregidor Carrió D.H., Jaén E.M. “Método alternativo para la evaluación de la contaminación atmosférica causada por la quema de biomasa en plantaciones de caña de azúcar”, *Anales de AFA*. ISSN (online) 1850-1168. (en prensa 28/01/2019).
 - * Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2017a). “Métodos y dispositivos empleados para medir la visibilidad”, expediente número 162.011, Buenos Aires, Argentina.
 - * Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2017b). “Datos de visibilidad de Setiembre de 2017”, Expediente No.168.671, Tucumán, Argentina.
 - * Stover J.C. (1995). “Optical scattering, measurement and analysis.” McGraw-Hill, Inc., New York, USA.
 - * Tam W.G., Zardecki A. (1982). “Multiple scattering corrections to the Beer-Lambert law. 1: Open detector.” *Applied Optics*, 21(13), 2405 – 2403.
 - * Tang F., Ma S., Yang L., Du C., Tang Y. (2016). “A new visibility measurement system based on a black target and a comparative trial with visibility instruments”, *Atmospheric Environment*, 143, 229-236.
 - * Tian P., Wang G., Zhang R., Wu Y., Yan P. (2015). “Impacts of aerosol chemical compositions on optical properties in urban Beijing, China.” *Particuology*, 18, 155-164.
 - * van de Hulst H.C. (1981). “Light scattering by small particles”, Dover Publications, Inc., New York, USA.



- * 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. (2009). "Disability glare in the aging eye. Assessment and impact on driving." *J. Optom.*, 2, 112-118.
- * Videla F.A., Schinca D.C. (2011). "Desarrollo de técnicas de espectroscopía de scattering óptico y de resonancia plasmónica para la determinación de tamaño de micro y nanopartículas", Tesis de Doctorado, UNLP, La Plata.
- * Vos J.J., Cole B.L., Bodmann H.W., Colombo E., Takeuchi T., van den Berg T.J.T.P. (2002). "Equations for Disability glare", CIE Collection on Glare.
- * 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 (2010).
- * Xie X.S., Tao S.C., Zhou X.J. (1999). "Measuring visibility using digital photography", *Chin. Sci. Bull.*, 44, 1130-1134.
- * Xu R. (2015). "Light scattering: A review of particle characterization applications." *Particuology*, 18, 11–21.
- * Zerrad M., Lequime M., Deumié C., Amra C. (2008). "Development of a goniometric light scatter instrument with sample imaging ability", *SPIE Vol. 7102(7)*, 1-15.
- * Zhang X., Rao R., Huang Y., Mao M., Berg M.J., Sun W. (2015). "Black carbon aerosols in urban central China", *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Trans.*, 150, 3-11.