

## ÍNDICE DEL CAPÍTULO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 9. MEDICIÓN DE LA VISIBILIDAD .....	314
9.1 Generalidades .....	314
9.1.1 Definiciones .....	314
9.1.2 Unidades y escalas .....	315
9.1.3 Requisitos meteorológicos .....	315
9.1.4 Métodos de medición .....	316
9.2 Estimación visual del alcance óptico meteorológico .....	319
9.2.1 Generalidades .....	319
9.2.2 Estimación del alcance óptico meteorológico durante el día .....	320
9.2.3 Estimación del alcance óptico meteorológico durante la noche .....	320
9.2.4 Estimación del alcance óptico meteorológico en ausencia de objetos distantes .....	322
9.2.5 Exactitud de las observaciones visuales .....	323
9.3 Medición del alcance óptico meteorológico con instrumentos .....	324
9.3.1 Generalidades .....	324
9.3.2 Instrumentos para medir el coeficiente de extinción .....	324
9.3.3 Instrumentos para medir el coeficiente de dispersión .....	326
9.3.4 Emplazamiento y exposición .....	329
9.3.5 Calibración y mantenimiento .....	329
9.3.6 Fuentes de error en las mediciones del alcance óptico meteorológico y estimaciones de exactitud .....	330
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA .....	334

## CAPÍTULO 9. MEDICIÓN DE LA VISIBILIDAD

### 9.1 GENERALIDADES

#### 9.1.1 Definiciones

La visibilidad se definió por primera vez con fines meteorológicos como una magnitud que debe estimar un observador humano, y las observaciones así realizadas tienen diversas y numerosas aplicaciones. Sin embargo, la estimación de la visibilidad abarca muchos factores subjetivos y físicos, y la magnitud meteorológica esencial, que es la transparencia de la atmósfera, puede medirse objetivamente, y está representada por el alcance óptico meteorológico (MOR, por sus siglas en inglés).

El *alcance óptico meteorológico* es la longitud del trayecto en la atmósfera, necesario para reducir el flujo luminoso de un haz colimado procedente de una lámpara de incandescencia, a una temperatura de color de 2 700 K, hasta el 5% de su valor inicial, evaluándose el flujo luminoso por medio de la función de luminosidad fotométrica de la Comisión Internacional de Iluminación (CII).

La *visibilidad*, la *visibilidad meteorológica (durante el día)* y la *visibilidad meteorológica durante la noche*<sup>1</sup> se definen como la máxima distancia a la que puede verse y reconocerse un objeto negro de dimensiones adecuadas (situado cerca del suelo) cuando se observa contra un fondo de cielo durante el día o que podría verse y reconocerse durante la noche si la iluminación general se elevase al nivel diurno normal (OMM, 1992a y 2010a).

El *alcance visual (meteorológico)* es la distancia a la que el contraste entre un objeto y su fondo es exactamente igual al umbral de contraste visual de un observador (OMM, 1992a).

La *luz del aire* es la luz procedente del Sol y el cielo que se difunde hacia los ojos de un observador por las partículas suspendidas en la atmósfera (y, hasta cierto punto, por moléculas del aire) que se encuentran en el cono de visión del observador. Es decir, la luz del aire llega al ojo en la misma forma que la radiación celeste difusa llega a la superficie terrestre. La luz del aire es el principal factor que limita la visibilidad horizontal diurna de objetos negros, porque sus contribuciones, integradas a lo largo del cono de visión entre el ojo y el objeto, elevan la luminancia aparente de un objeto negro suficientemente alejado a un nivel indistinguible desde el cielo del fondo. A diferencia de la estimación subjetiva, la mayor parte de la luz del aire que penetra en el ojo del observador tiene su origen en porciones de su cono de visión que se encuentran bastante cerca de él.

Las cuatro magnitudes fotométricas siguientes se definen en detalle en diversas normas, tales como las de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, 1987):

- a) El *flujo luminoso* (símbolo:  $F$  (o  $\Phi$ ), unidad: lumen) es una magnitud que se obtiene a partir del flujo radiante, evaluando la radiación con arreglo a su acción sobre el observador fotométrico estándar de la CII.
- b) La *intensidad luminosa* (símbolo:  $I$ , unidad: candela o lúmenes por estereorradián) es el flujo luminoso por unidad de ángulo sólido.

---

<sup>1</sup> Con objeto de evitar confusiones, por regla general, la visibilidad durante la noche no debería definirse como “la distancia máxima a la que pueden ser vistas e identificadas (...) las luces de intensidad moderada de terminal” (véase el *Informe final abreviado de la undécima reunión de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación* (OMM-N° 807)). Si las observaciones sobre visibilidad tuvieran que hacerse sobre la base de una evaluación de las fuentes de luz, se recomienda definir el alcance visual especificando con precisión la intensidad adecuada de luz y su aplicación, como en el caso del alcance visual en pista. Sin embargo, en su undécima reunión, la CIMO acordó seguir investigando en los ámbitos que así lo requirieran, para resolver las dificultades prácticas que plantea la aplicación de esta definición.

- c) La *luminancia* (símbolo:  $L$ , unidad: candelas por metro cuadrado) es la intensidad luminosa por unidad de superficie.
- d) La *iluminancia* (símbolo:  $E$ , unidad: lux o lúmenes por metro cuadrado) es el flujo luminoso por unidad de superficie.

El *coeficiente de extinción* (símbolo  $\sigma$ ) es la proporción de flujo luminoso perdido por un haz colimado, emitido por una fuente incandescente a una temperatura de color de 2 700 K, al recorrer el trayecto de una unidad de distancia en la atmósfera. El coeficiente es una medida de atenuación debida a la absorción y a la dispersión.

El *contraste de luminancia* (símbolo  $C$ ) es el cociente de la diferencia entre la luminancia de un objeto y su fondo, y la luminancia del fondo.

El *umbral de contraste* (símbolo  $\varepsilon$ ) es el valor mínimo del contraste de luminancia que puede detectar el ojo humano, es decir, el valor que permite distinguir un objeto de su fondo. El umbral de contraste varía según el individuo.

El *umbral de iluminancia* (símbolo  $E_v$ ), es la mínima iluminancia, en el ojo, para la detección de focos luminosos puntuales en un fondo de luminancia especificada. Por lo tanto, el valor  $E_v$ , varía según las condiciones de iluminación.

El *factor de transmisión* (símbolo  $T$ ) se define, para un haz colimado procedente de un foco incandescente a una temperatura de color de 2 700 K, como la fracción de flujo luminoso que permanece en el haz después de atravesar un recorrido óptico de determinada longitud en la atmósfera. El factor de transmisión se denomina también coeficiente de transmisión. Los términos transmitancia o fuerza transmisiva de la atmósfera se utilizan también cuando está definido el trayecto, es decir, cuando tiene una longitud específica (por ejemplo, en el caso del transmisómetro). En este caso,  $T$  se multiplica a menudo por 100 y se expresa en porcentaje.

Un *aeródromo* es un área definida de tierra o de agua (que incluye todas sus edificaciones, instalaciones y equipos) destinada total o parcialmente a la llegada, salida y movimiento en superficie de aeronaves (Organización de Aviación Civil Internacional, 2013).

### 9.1.2 Unidades y escalas

La visibilidad meteorológica o MOR se expresa en metros o kilómetros. La distancia de medición varía según la aplicación. En tanto que para los fines de la meteorología sinóptica la escala de lecturas del MOR se extiende desde menos de 100 m hasta más de 70 km, el rango de medición puede ser más restringido en otras aplicaciones. Así ocurre con la aviación civil, donde el límite superior puede ser de 10 km. Este rango puede reducirse aún más cuando se aplica a la medición del alcance visual en pista en condiciones de aterrizaje y despegue con visibilidad reducida. Para el alcance visual en pista solo se requiere entre 50 y 1 500 m (véase el capítulo 2 de la parte II). Para otras aplicaciones, como el tráfico por carretera o marítimo, pueden aplicarse diferentes límites, según las necesidades y los lugares en que se efectúen las mediciones.

Los errores de medición de la visibilidad aumentan en proporción con la misma, lo cual se tiene en cuenta en las escalas de medición. Tal hecho se refleja en la clave utilizada para los informes sinópticos, empleando tres segmentos lineales con una resolución decreciente, a saber, de 100 m a 5 000 m en intervalos de 100 m, de 6 km a 30 km en intervalos de 1 km, y de 35 km a 70 km en intervalos de 5 km. Esta escala permite comunicar la visibilidad con una resolución mejor que la exactitud de la medición, salvo cuando la visibilidad es inferior a unos 1 000 m.

### 9.1.3 Requisitos meteorológicos

El concepto de visibilidad se utiliza ampliamente en meteorología de dos modos diferentes. En primer lugar, es uno de los elementos que sirven para identificar las características de una masa de aire, especialmente para las necesidades de la meteorología sinóptica y la climatología. En

este caso, la visibilidad debe ser representativa del estado óptico de la atmósfera. En segundo término, es una variable operativa que corresponde a criterios específicos o aplicaciones especiales. Para este fin, se expresa directamente en términos de la distancia a la que pueden verse señales o luces específicas.

Una de las aplicaciones especiales más importantes corresponde a los servicios meteorológicos para la aviación (véase el capítulo 2 de la parte II).

La medición de la visibilidad utilizada en meteorología debería estar exenta de la influencia de condiciones extrameteorológicas, pero relacionada simplemente con los conceptos intuitivos de visibilidad y con la distancia a la que pueden verse objetos comunes en condiciones normales. El alcance óptico meteorológico se ha definido para atender tales requisitos, es adecuado para métodos instrumentales de día y de noche, y tiene relaciones bien comprendidas con otras mediciones de visibilidad. El MOR ha sido adoptado oficialmente por la OMM como la medición de la visibilidad para usos generales y aeronáuticos (OMM, 2014). También ha sido reconocido por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, 1987) para aplicaciones relativas a óptica atmosférica y señalización visual.

El MOR está relacionado con la noción intuitiva de visibilidad a través del umbral de contraste. En 1924, Koschmieder, seguido por Helmholtz, propuso un valor de 0,02 para  $\epsilon$ . Otros autores han propuesto valores distintos, que varían entre 0,007 7 y 0,06, e incluso 0,2. El valor más pequeño produce una estimación mayor de la visibilidad en determinadas condiciones atmosféricas. Para fines aeronáuticos, se acepta que  $\epsilon$  es mayor que 0,02, y se considera como 0,05 puesto que, para un piloto, el contraste de un objeto (señales en la pista) con respecto al terreno circundante es muy inferior al de un objeto contra el horizonte. Se supone que cuando un observador puede ver y reconocer un objeto negro contra el horizonte, el contraste aparente del objeto es 0,05 y, conforme se explica a continuación, esto lleva a la elección de 0,05 como factor de transmisión adoptado en la definición del MOR.

En el capítulo 1 de la parte I se tratan los requisitos de incertidumbre.

#### 9.1.4 Métodos de medición

La visibilidad es un fenómeno psicofísico complejo, regido principalmente por el coeficiente de extinción atmosférica asociado con partículas sólidas y líquidas mantenidas en suspensión en la atmósfera; la extinción se debe principalmente a la dispersión, más que a la absorción de la luz. Su estimación está sujeta a variaciones en la percepción individual y en la capacidad interpretativa, así como en las características del foco luminoso y el factor de transmisión. Por consiguiente, toda estimación visual de la visibilidad es subjetiva.

Cuando la visibilidad es estimada por un observador humano no depende solo de las características fotométricas y de las dimensiones del objeto que se percibe, o debe percibirse, sino también del umbral de contraste del observador. De noche, depende de la intensidad de los focos luminosos, de la iluminancia de fondo y, si es estimada por un observador, de la adaptación a la oscuridad de los ojos del observador y del umbral de iluminancia de este. La estimación de la visibilidad durante la noche es particularmente problemática. En la sección 9.1.1, la primera definición de visibilidad durante la noche se da en términos de visibilidad equivalente de día, para tener la seguridad de que no se producen cambios artificiales al estimar la visibilidad al amanecer o al anochecer. La segunda definición tiene aplicaciones prácticas, especialmente con fines aeronáuticos, pero no es la misma que la primera, y normalmente da resultados distintos. Por supuesto, ambas son imprecisas.

Hay métodos instrumentales para medir el coeficiente de extinción a partir del cual puede calcularse el MOR. Esto permite calcular la visibilidad, conociendo los umbrales de contraste y de iluminancia, o asignándoles valores convenidos. En Sheppard (1983) se señala que:

[p]ara atenerse estrictamente a la definición (del MOR) habría que montar un proyector y un receptor de características espectrales apropiadas en dos

plataformas que pudieran separarse, por ejemplo a lo largo de una vía férrea, hasta que la transmitancia sea del 5 por ciento. Cualquier otro método da solo una estimación del MOR.

Sin embargo, se utilizan instrumentos fijos porque se supone que el coeficiente de extinción es independiente de la distancia. Algunos instrumentos miden la atenuación directamente, y otros miden la dispersión de la luz para obtener el coeficiente de extinción. Esto se describe en la sección 9.3. El breve análisis de la física de la visibilidad, en este capítulo, puede ser útil para comprender las relaciones entre las diversas mediciones del coeficiente de extinción, y para considerar los instrumentos utilizados para medirlo.

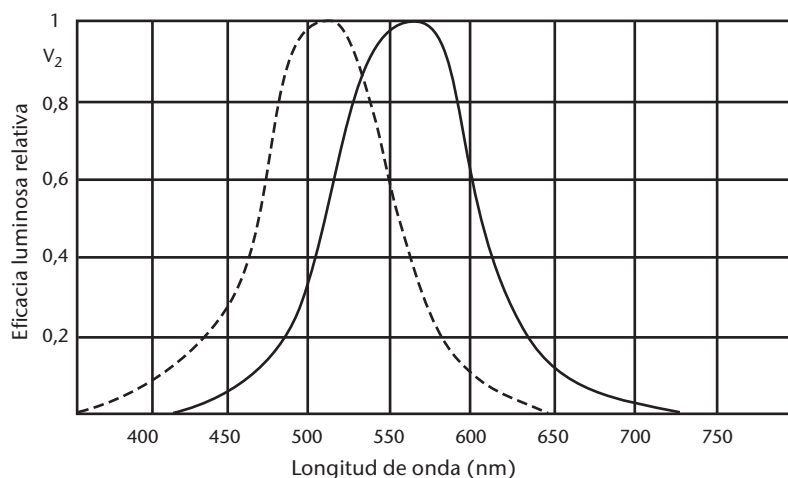
### Percepción visual: visión fotópica y escotópica

Las condiciones de percepción visual se basan en la medición de la eficiencia fotópica del ojo humano con respecto a la radiación monocromática en el espectro de luz visible. Los términos *visión fotópica* y *visión escotópica* se refieren a las condiciones diurnas y nocturnas, respectivamente.

El adjetivo *fotópico* se refiere al estado de adaptación del ojo a las condiciones diurnas de luminancia ambiente. De manera más precisa, el estado fotópico se define como la respuesta visual de un observador con visión normal al estímulo luminoso incidente sobre la fóvea retiniana (la parte central más sensible de la retina). La fóvea permite distinguir detalles finos y colores en estas condiciones de adaptación.

En el caso de visión fotópica (visión por medio de la fóvea), la eficacia luminosa relativa del ojo varía con la longitud de onda de la luz incidente. La eficacia luminosa del ojo en la visión fotópica presenta un máximo para la longitud de onda de 555 nm. La curva de respuesta para la eficacia relativa del ojo en las diversas longitudes de onda del espectro visible puede establecerse tomando como valor de referencia la eficacia a una longitud de onda de 555 nm. Así se obtiene la curva de la figura 9.1, adoptada por la CIE para un observador normal.

Se dice que la visión nocturna es escotópica (visión en que intervienen los bastones de la retina en lugar de la fóvea). Los bastones, la parte periférica de la retina, no tienen sensibilidad a colores ni a detalles finos, pero son particularmente sensibles a intensidades luminosas bajas. En la visión escotópica, la máxima eficacia luminosa corresponde a una longitud de onda de 507 nm.



**Figura 9.1.** Eficacia luminosa relativa del ojo humano para la radiación monocromática. La línea continua indica la visión durante el día, mientras que la línea de puntos se refiere a la visión nocturna.

Para la visión escotópica se requiere un largo período de adaptación, de hasta 30 minutos, en tanto que para la visión fotópica se necesitan solo 2 minutos.

### Ecuaciones básicas

Las ecuaciones básicas para medir la visibilidad son las de la ley de Bouguer-Lambert:

$$F = F_0 e^{-\sigma x} \quad (9.1)$$

donde  $F$  es el flujo luminoso recibido tras una longitud de trayecto  $x$  en la atmósfera y  $F_0$  es el flujo para  $x = 0$ . Diferenciando, se obtiene:

$$\sigma = \frac{-dF}{F} \cdot \frac{1}{dx} \quad (9.2)$$

Obsérvese que esta ley es válida únicamente para la luz monocromática, pero puede aplicarse a un flujo espectral con buena aproximación. El factor de transmisión es:

$$T = F/F_0 \quad (9.3)$$

Las relaciones matemáticas entre el MOR y las diversas variables que representan el estado óptico de la atmósfera pueden deducirse de la ley de Bouguer-Lambert. La relación entre el factor de transmisión y el MOR es válida para las gotitas de niebla, pero cuando la visibilidad se reduce a causa de otros hidrometeoros, como la lluvia o la nieve, o litometeoros, como la ventisca alta de arena, los valores del MOR deberían tratarse con más atención.

A partir de las ecuaciones 9.1 y 9.3 puede escribirse:

$$T = F / F_0 = e^{-\sigma x} \quad (9.4)$$

Si se aplica esta ley a la definición del MOR,  $T = 0,05$ , entonces  $x = P$  y puede escribirse lo siguiente:

$$T = 0,05 = e^{-\sigma P} \quad (9.5)$$

Por lo tanto, la relación matemática del MOR respecto del coeficiente de extinción es:

$$P = (1/\sigma) \cdot \ln(1/0,05) \approx 3/\sigma \quad (9.6)$$

donde  $\ln$  es el logaritmo en base  $e$  o logaritmo natural. Combinando la ecuación 9.4, después de deducida de la ley de Bouguer-Lambert, y la ecuación 9.6, se obtiene la siguiente ecuación:

$$P = x \cdot \ln(0,05)/\ln(T) \quad (9.7)$$

Esta fórmula se utiliza como base para medir el MOR con transmisómetros, en donde  $x$  es, en este caso, igual a la línea de base del transmisómetro  $a$  en la ecuación 9.14.

### Visibilidad meteorológica diurna

El contraste de luminancia es:

$$C = \frac{L_b - L_h}{L_h} \quad (9.8)$$

donde  $L_h$  es la luminancia del horizonte y  $L_b$  es la luminancia del objeto.

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

Cabría señalar que si el objeto es más oscuro que el horizonte, entonces  $C$  es negativo, y si el objeto es negro ( $L_b = 0$ ) entonces  $C = -1$ .

Koschmieder estableció en 1924 una relación, conocida posteriormente como ley de Koschmieder, entre el contraste aparente ( $C_x$ ) de un objeto, visto contra el cielo sobre el horizonte

por un observador distante, y su contraste inherente ( $C_0$ ), es decir, el contraste que tendría el objeto contra el horizonte visto desde una distancia muy corta. La relación de Koschmieder puede expresarse así:

$$C_x = C_0 e^{-\sigma x} \quad (9.9)$$

Esta relación es válida siempre y cuando el coeficiente de dispersión sea independiente del ángulo del acimut, y que haya iluminación uniforme a lo largo de todo el trayecto entre el observador, el objeto y el horizonte.

Cuando se ve un objeto negro contra el horizonte ( $C_0 = -1$ ), y el contraste aparente es de  $-0,05$ , la ecuación 9.9 se reduce a:

$$0,05 = e^{-\sigma x} \quad (9.10)$$

Si se compara este resultado con la ecuación 9.5, se verá que cuando la magnitud del contraste aparente de un objeto negro, visto contra el horizonte, es 0,05, ese objeto se encuentra en el MOR ( $P$ ).

### Visibilidad meteorológica nocturna

La distancia a que puede verse de noche una luz (señal de visibilidad nocturna) no está simplemente relacionada con el MOR. No solo depende del MOR y de la intensidad de la luz, sino también de la iluminancia en el ojo del observador procedente de otras fuentes luminosas.

En 1876, Allard propuso la ley de atenuación de la luz desde un foco puntual de intensidad conocida ( $I$ ) como una función de la distancia ( $x$ ) y del coeficiente de extinción ( $\sigma$ ). La iluminancia ( $E$ ) de un foco luminoso puntual viene dada por:

$$E = I \cdot x^{-2} \cdot e^{-\sigma x} \quad (9.11)$$

Cuando la luz es apenas visible,  $E = E_t$  y puede escribirse:

$$\sigma = (1/x) \cdot \ln \left\{ I / (E_t \cdot x^2) \right\} \quad (9.12)$$

Teniendo en cuenta que  $P = (1/\sigma) \cdot \ln (1/0,05)$  en la ecuación 9.6, puede escribirse:

$$P = x \cdot \ln(1/0,05) / \ln \left( I / (E_t \cdot x^2) \right) \quad (9.13)$$

Esta relación entre el MOR y la distancia a la que pueden verse las luces se presenta en la sección 9.2.3. La aplicación de esta ecuación a las observaciones visuales se describe en la sección 9.2.

## 9.2 ESTIMACIÓN VISUAL DEL ALCANCE ÓPTICO METEOROLÓGICO

### 9.2.1 Generalidades

Un observador meteorológico puede medir la estimación visual del MOR utilizando objetos naturales o artificiales (grupos de árboles, rocas, torres, campanarios, iglesias, faros, etc.).

Cada estación debería preparar un diagrama o plano de los objetos utilizados para las observaciones, mostrando sus distancias y posiciones con respecto al observador. El plano habría de incluir los objetos adecuados para las observaciones diurnas y nocturnas. El observador ha de prestar también especial atención a las variaciones direccionales significativas del MOR.

Las observaciones deberían hacerlas observadores con visión "normal", debidamente entrenados y, además, deberían realizarse habitualmente sin ayuda de ningún sistema óptico adicional (prismáticos, telescopio, teodolitos, etc.) y, preferiblemente, no a través de una ventana, sobre todo cuando se observan los objetos por la noche. Sería preciso que el ojo del observador



se encontrase a una altura normal sobre el suelo (alrededor de 1,5 m); por consiguiente, las observaciones no deberían efectuarse desde plantas superiores de torres de control u otros edificios elevados. Esto es particularmente importante cuando la visibilidad es deficiente.

Cuando la visibilidad varía entre diferentes direcciones, el valor registrado o comunicado puede depender del uso que se piense hacer del informe. En los mensajes sinópticos, debería comunicarse el valor más bajo, pero en los informes para la aviación habría que seguir las orientaciones dadas en OMM (2014).

### 9.2.2 **Estimación del alcance óptico meteorológico durante el día**

En las observaciones diurnas, las estimaciones visuales constituyen una buena aproximación del verdadero valor del MOR.

Siempre que reúnan los requisitos que se especifican a continuación, para las observaciones diurnas debería seleccionarse el mayor número posible de objetos a diferentes distancias y elegirse únicamente objetos negros, o casi negros, que resalten sobre el horizonte contra el cielo. Los objetos de color claro o situados cerca de un fondo terrestre deberían evitarse en la medida de lo posible. Esta precaución es particularmente importante cuando el sol da directamente sobre el objeto. Si el albedo de este no excede del 25% aproximadamente, no se producirá un error superior al 3% cuando el cielo esté cubierto, pero podría ser mucho mayor si brilla el sol. Así pues, un edificio de color blanco no constituiría una referencia apropiada, pero en cambio un grupo de árboles oscuros sería adecuado, excepto cuando estuviera fuertemente iluminado por la luz solar. Si ha de utilizarse un objeto situado contra un fondo terrestre, tendría que hallarse bastante separado del fondo, es decir, a una distancia de al menos la mitad de la que existe entre el objeto y el punto de observación. Un árbol situado en el borde de un bosque, por ejemplo, no representaría una referencia apropiada para observaciones de visibilidad.

Para que las observaciones sean representativas deberían efectuarse utilizando objetos que abarquen un ángulo superior a  $0,5^\circ$  desde el ojo del observador. Un objeto que abarque un ángulo inferior a este se hace invisible a una distancia menor que otros de mayores dimensiones en las mismas circunstancias. Puede ser útil advertir que un orificio de 7,5 mm de diámetro practicado en una cartulina y mantenido a la distancia del brazo abarca este ángulo aproximadamente; por lo tanto, un objeto de referencia visual observado a través de una abertura de este tipo debe ocuparla por completo. Al mismo tiempo, sin embargo, un objeto de esta clase no debería abarcar un ángulo superior a  $5^\circ$ .

### 9.2.3 **Estimación del alcance óptico meteorológico durante la noche**

A continuación se describen varios métodos que pueden utilizarse para estimar el MOR por la noche a partir de observaciones visuales de la distancia de percepción de fuentes luminosas.

Cualquier fuente de luz puede emplearse como objeto de visibilidad, siempre que la intensidad en la dirección de observación esté bien definida y sea conocida. No obstante, por lo general es conveniente utilizar luces que puedan considerarse como fuentes puntuales, y cuya intensidad no sea mayor en ninguna dirección que en otra, y no se encuentre confinada en un ángulo sólido demasiado pequeño. Debe tenerse cuidado para garantizar la estabilidad óptica y mecánica de la fuente luminosa.

Sería necesario establecer una clara distinción entre las fuentes conocidas como focos puntuales, en cuyas proximidades no existan otras fuentes o áreas luminosas, y los grupos de luces, aun cuando estén separados entre sí. En el último caso, una disposición de tal naturaleza puede afectar a la visibilidad de cada fuente considerada por separado. Para las mediciones de la visibilidad por la noche, únicamente se recomienda el empleo de focos puntuales debidamente distribuidos.

Debería advertirse que las observaciones nocturnas, utilizando objetos iluminados, pueden resultar afectadas en gran medida por la iluminación de los alrededores, por efectos fisiológicos



de deslumbramiento y por otras luces, aun cuando estas se encuentren fuera del campo de visión y, más específicamente, si la observación se realiza a través de una ventana. Así pues, solo puede realizarse una observación precisa y fiable desde una posición en la oscuridad y debidamente elegida.

Por otra parte, no puede pasarse por alto la importancia que revisten los factores fisiológicos, ya que constituyen una considerable fuente de dispersión de las mediciones. Es esencial que las efectúen únicamente observadores cualificados dotados de visión normal. Además, es preciso dejar transcurrir un período (generalmente de 5 a 15 minutos) de adaptación, durante el cual los ojos se acostumbren a la oscuridad.

A efectos prácticos, la relación entre la distancia de percepción de una fuente luminosa por la noche y el valor del MOR puede expresarse de dos modos diferentes:

- a) para cada valor del MOR, dando el valor de intensidad luminosa del foco, de modo que exista una correspondencia directa entre la distancia a la que es apenas visible y el valor del MOR;
- b) para un foco de determinada intensidad luminosa, dando la correspondencia entre la distancia de percepción de la luz y el valor del MOR.

Este segundo método es más sencillo y también más práctico, puesto que no sería fácil instalar focos luminosos de distinta intensidad a distancias diferentes. El método entraña la utilización de focos luminosos ya existentes o que se instalen en torno a la estación, y la sustitución de  $I$ ,  $x$  y  $E_t$  en la ecuación 9.13 por los valores correspondientes para las fuentes luminosas disponibles. De esta forma, los Servicios Meteorológicos pueden establecer cuadros para los valores del MOR en función de la luminancia de fondo y de las fuentes de luz de intensidad conocida. Los valores que deben asignarse al umbral de iluminancia  $E_t$  varían considerablemente de acuerdo con la luminancia ambiente. Deberían utilizarse los valores siguientes, considerados como valores medios del observador:

- a)  $10^{-6.0}$  luxes en el crepúsculo y al amanecer, o cuando exista una luz apreciable procedente de fuentes artificiales;
- b)  $10^{-6.7}$  luxes con la luz de la luna o cuando no haya oscurecido aún del todo;
- c)  $10^{-7.5}$  luxes en completa oscuridad o cuando no haya más luz que la de las estrellas.

En los cuadros 9.1 y 9.2 figuran las relaciones entre el MOR y la distancia de percepción de fuentes luminosas para cada uno de los métodos anteriores con condiciones de observación distintas. Han sido elaborados para orientar a los Servicios Meteorológicos en la selección o instalación de luces para la observación de la visibilidad nocturna y en la preparación de instrucciones relativas al cálculo de los valores del MOR para sus observadores.

Una bombilla incandescente normal de 100 W proporciona un foco luminoso de 100 cd aproximadamente.

En vista de las sustanciales diferencias producidas por variaciones relativamente pequeñas en los valores del umbral visual de iluminancia y por diferentes condiciones de iluminación general, es evidente que la finalidad del cuadro 9.2 no es proporcionar un criterio absoluto de visibilidad, sino indicar la necesidad de calibración de las luces empleadas para la estimación nocturna del MOR, y asegurar en la mayor medida posible, que las observaciones nocturnas efectuadas en diferentes lugares y por distintos Servicios sean comparables.

**Cuadro 9.1. Relación entre el MOR y la intensidad de una fuente puntual apenas visible para tres valores de  $E_t$** 

MOR	<i>Intensidad luminosa (en candelas) de lámparas apenas visibles a las distancias indicadas en la columna P</i>		
<i>P</i> (m)	<i>Crepúsculo</i> ( $E_t = 10^{-6.0}$ )	<i>Luz lunar</i> ( $E_t = 10^{-6.7}$ )	<i>Oscuridad completa</i> ( $E_t = 10^{-7.5}$ )
100	0,2	0,04	0,006
200	0,8	0,16	0,025
500	5	1	0,16
1 000	20	4	0,63
2 000	80	16	2,5
5 000	500	100	16
10 000	2 000	400	63
20 000	8 000	1 600	253
50 000	50 000	10 000	1 580

**Cuadro 9.2. Relación entre el MOR y la distancia a la cual es apenas visible una fuente puntual de 100 cd para tres valores de  $E_t$** 

MOR	<i>Distancia de percepción (en metros) de una lámpara de 100 cd en función del valor del MOR</i>		
<i>P</i> (m)	<i>Crepúsculo</i> ( $E_t = 10^{-6.0}$ )	<i>Luz lunar</i> ( $E_t = 10^{-6.7}$ )	<i>Oscuridad completa</i> ( $E_t = 10^{-7.5}$ )
100	250	290	345
200	420	500	605
500	830	1 030	1 270
1 000	1 340	1 720	2 170
2 000	2 090	2 780	3 650
5 000	3 500	5 000	6 970
10 000	4 850	7 400	10 900
20 000	6 260	10 300	16 400
50 000	7 900	14 500	25 900

#### 9.2.4 **Estimación del alcance óptico meteorológico en ausencia de objetos distantes**

En ciertos lugares (llanuras abiertas, barcos, etc.), o cuando el horizonte esté limitado (valle u hondonada), o donde no haya objetos situados a distancia tal que permita determinar la visibilidad, es imposible hacer estimaciones directas, salvo para visibilidades relativamente bajas. En tales casos, a menos que se disponga de métodos instrumentales, los valores del MOR superiores a aquellos para los que existen puntos de referencia han de estimarse a partir de la transparencia general de la atmósfera. Esto puede hacerse registrando el grado de claridad con el que se distinguen los objetos de visibilidad más lejanos. La distinción de perfiles y rasgos característicos, con pequeña o ninguna difuminación de colores, constituye una indicación de

que el MOR es superior a la distancia entre el objeto de visibilidad y el observador. Por otra parte, la observación de objetos de visibilidad indistinguibles es una indicación de la presencia de calima o de otros fenómenos que reducen el MOR.

### 9.2.5 Exactitud de las observaciones visuales

#### Generalidades

Las observaciones de objetos deberían efectuarlas observadores debidamente entrenados y dotados de lo que generalmente se denomina visión normal. Este factor humano tiene considerable importancia en la estimación de la visibilidad en condiciones atmosféricas determinadas, puesto que la capacidad de percepción y de interpretación visual varía de una persona a otra.

#### Exactitud de las estimaciones visuales del alcance óptico meteorológico durante el día

Las observaciones muestran que las estimaciones del MOR basadas en mediciones instrumentales concuerdan razonablemente con las estimaciones de visibilidad durante el día. La visibilidad y el MOR deberían ser iguales si el umbral de contraste del observador es de 0,05 (utilizando el criterio de reconocimiento) y el coeficiente de extinción es el mismo en las proximidades del instrumento y del observador.

Analizando 1 000 mediciones, Middleton (1952) llegó a la conclusión de que el umbral medio de relación de contraste en un grupo de 10 jóvenes aviadores entrenados como observadores meteorológicos era de 0,033, con un rango, para las distintas observaciones, que variaba entre menos de 0,01 y más de 0,2. En Sheppard (1983) se señala que cuando se representan los datos de Middleton en una escala logarítmica muestran una buena concordancia con una distribución gaussiana. Si los datos de Middleton representan condiciones de observación normales, cabe esperar que las estimaciones de visibilidad durante el día sean aproximadamente un 14% superiores, por término medio, a las del MOR con una desviación típica del 20% del MOR. Estos cálculos concuerdan perfectamente con los resultados de la Primera Intercomparación de Mediciones de Visibilidad (OMM, 1990), en la que se observó que durante el día las estimaciones de visibilidad de los observadores eran un 15% superiores a las mediciones instrumentales del MOR. El rango intercuartílico de las diferencias entre el observador y los instrumentos fue del orden del 30% del MOR medido, que corresponde a una desviación típica del 22%, aproximadamente, si la distribución es gaussiana.

#### Exactitud de las estimaciones visuales del alcance óptico meteorológico durante la noche

En el cuadro 9.2 de la sección 9.2.3 puede verse fácilmente lo erróneos que pueden llegar a ser los valores del MOR si se basan simplemente en la distancia a la que es visible la luz ordinaria, sin tener debidamente en cuenta la intensidad de la luz y las condiciones de visión. Esto pone de relieve la importancia de dar instrucciones precisas y explícitas a los observadores y de dispensar formación para las observaciones de visibilidad.

Debe señalarse que, en la práctica, no siempre es fácil utilizar los métodos y los cuadros descritos anteriormente para preparar diagramas de objetos luminosos. Los focos luminosos utilizados como objetos no se encuentran necesariamente bien situados pues su intensidad no es estable o conocida, ni constituyen siempre fuentes puntuales. Con respecto a este último aspecto, las luces pueden consistir en haces anchos o estrechos, agrupados, o incluso de diferentes colores con respecto a los cuales difiere la sensibilidad del ojo. Debe tenerse gran cautela en el uso de tales luces.

La estimación del alcance visual de las luces puede producir estimaciones fiables de visibilidad únicamente de noche, cuando las luces y su fondo se eligen cuidadosamente, las condiciones de visión del observador se controlan con sumo cuidado y puede consagrarse considerable tiempo a la observación, para tener la seguridad de que los ojos del observador se adaptan plenamente

a las condiciones de visión. Los resultados de la Primera Intercomparación de Mediciones de Visibilidad de la OMM (OMM, 1990) muestran que durante las horas de oscuridad, las estimaciones de visibilidad de los observadores eran aproximadamente un 30% más altas que las mediciones instrumentales del MOR. El rango intercuartílico de diferencias entre el observador y los instrumentos fue solo ligeramente mayor que el observado durante el día (entre el 35% y el 40%, aproximadamente, del MOR medido).

### 9.3 **MEDICIÓN DEL ALCANCE ÓPTICO METEOROLÓGICO CON INSTRUMENTOS**

#### 9.3.1 **Generalidades**

La adopción de ciertas hipótesis permite convertir las mediciones con instrumentos en el MOR. No siempre conviene utilizar un instrumento para las mediciones diurnas si en las observaciones directas puede emplearse un número adecuado de objetos de visibilidad. Sin embargo, un instrumento para la medición de la visibilidad es con frecuencia útil en las observaciones nocturnas, o cuando no se dispone de objetos de visibilidad, o bien para sistemas automáticos de observación. Los instrumentos para la medición del MOR pueden clasificarse en una de las dos categorías siguientes:

- a) los que miden el coeficiente de extinción o el factor de transmisión de un cilindro horizontal de aire, donde la atenuación de la luz se debe tanto a la dispersión como a la absorción por partículas en el aire a lo largo del trayecto del haz luminoso;
- b) los que miden el coeficiente de dispersión de la luz de un pequeño volumen de aire; en la niebla natural, la absorción es con frecuencia insignificante y puede considerarse que el coeficiente de dispersión es el mismo que el coeficiente de extinción.

Ambas categorías comprenden instrumentos utilizados para mediciones visuales por un observador e instrumentos que utilizan una fuente luminosa y un dispositivo electrónico con una célula fotoeléctrica o un fotodiodo para detectar el haz de luz emitido. El principal inconveniente de los tipos visuales es que pueden producirse sustanciales errores si el observador no dispone de tiempo suficiente para que sus ojos se adapten a las condiciones (particularmente de noche).

A continuación se describen las principales características de estas dos categorías de instrumentos para medir el MOR.

#### 9.3.2 **Instrumentos para medir el coeficiente de extinción**

##### **Instrumentos telefotométricos**

Se han diseñado diversos telefotómetros para efectuar la medición diurna del coeficiente de extinción comparando la luminancia aparente de un objeto distante con la del fondo celeste (por ejemplo, telefotómetro de Lohle), pero no se utilizan normalmente para las mediciones corrientes debido a que, como ya se ha dicho, es preferible emplear las observaciones visuales directas. No obstante, estos instrumentos pueden ser útiles para extrapolar el MOR más allá del objeto más alejado.

##### **Medidor de extinción visual**

Es un instrumento que se utiliza muy fácilmente de noche, con una luz distante que reviste la forma de un filtro neutro graduado, que reduce la luz en una proporción conocida y puede ajustarse hasta que la luz empieza a dejar de ser visible. La indicación del medidor proporciona una medida de la transparencia del aire entre la luz y el observador y, a partir de esta, puede calcularse el coeficiente de extinción. La exactitud global depende fundamentalmente de las variaciones de sensibilidad del ojo y de las fluctuaciones de la intensidad radiante del foco luminoso. El error aumenta proporcionalmente al MOR.

La ventaja de este instrumento es que permite medir valores del MOR con razonable grado de exactitud en una distancia de 100 m a 5 km, utilizando solamente tres luces bien espaciadas, en tanto que sin él, si se quiere lograr el mismo grado de exactitud, es indispensable emplear una serie más compleja de luces. Sin embargo, el método de utilización de este instrumento (determinando el punto de aparición o desaparición de la luz) influye considerablemente en la exactitud y en la homogeneidad de las medidas.

### Transmisómetros

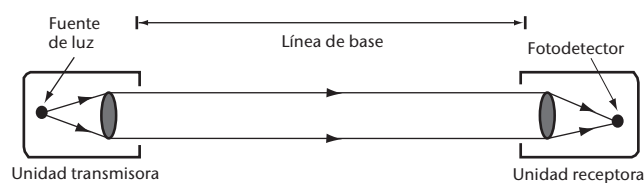
La utilización de un transmisómetro es el método más común para medir el coeficiente de extinción medio en un cilindro horizontal de aire entre un transmisor, que proporciona un foco luminoso modulado de potencia media constante, y un receptor provisto de un fotodetector (generalmente un fotodiodo en el punto focal de una lente o espejo parabólico). La fuente luminosa más utilizada es una lámpara halógena o tubo de descarga de pulsos de xenón. La modulación del foco luminoso impide la perturbación causada por la luz solar. El factor de transmisión lo determina la salida del fotodetector, lo que permite calcular el coeficiente de extinción y el MOR.

Como las estimaciones del MOR por transmisómetros se basan en la pérdida de luz procedente de un haz colimado, que depende de la dispersión y de la absorción, están estrechamente relacionadas con la definición del MOR. Un buen transmisómetro, debidamente mantenido, que funcione en su rango de mayor precisión, proporciona una aproximación muy buena al MOR real.

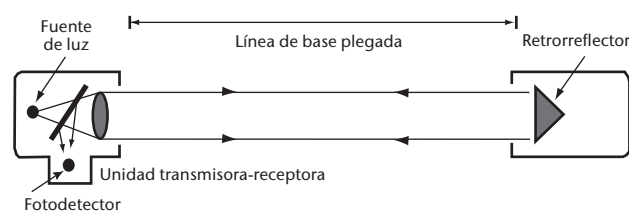
Existen dos tipos de transmisómetros:

- aquellos en que el transmisor y el receptor se encuentran en unidades diferentes y a una distancia conocida entre sí, representados en la figura 9.2;
- aquellos en que el transmisor y el receptor se encuentran en la misma unidad, reflejándose la luz emitida por un espejo o retroreflector remoto (el haz de luz se desplaza hasta el reflector y vuelve), representados en la figura 9.3.

La distancia cubierta por el haz luminoso entre el transmisor y el receptor se denomina generalmente línea de base, y puede variar entre unos pocos metros y 150 m (incluso 300 m), según el rango de valores del MOR que deba medirse y las aplicaciones a las que estén destinadas las mediciones.



**Figura 9.2. Transmisómetro de doble extremo**



**Figura 9.3. Transmisómetro de un solo extremo**

Como se ha visto en la expresión del MOR en la ecuación 9.7, la relación:

$$P = a \cdot \ln(0,05) / \ln(T) \quad (9.14)$$

donde  $a$  es la línea de base del transmisómetro, es la fórmula básica para las mediciones con transmisómetros. Su validez depende de los supuestos de que la aplicación de las leyes de Koschmieder y de Bouguer-Lambert es aceptable y que el coeficiente de extinción a lo largo de la línea de base del transmisómetro es la misma que en la trayectoria entre un observador y un objeto en el MOR.

Para que las mediciones sean aceptables durante un largo período, el flujo luminoso debe permanecer constante durante ese período. Cuando se utiliza luz halógena, el problema del envejecimiento del filamento de la bombilla es menos importante y el flujo permanece más constante. Ahora bien, algunos transmisómetros utilizan sistemas de retroalimentación (detectando y midiendo una pequeña porción del flujo emitido), lo que da más homogeneidad del flujo luminoso en función del tiempo o permite compensar cualquier cambio.

Como veremos en la sección relativa a la exactitud de las mediciones del MOR, el valor adoptado para la línea de base del transmisómetro determina el rango de mediciones del MOR. En general, se acepta que este rango es de entre 1 y 25 veces, aproximadamente, la longitud de la línea de base. Sin embargo, los instrumentos optoelectrónicos modernos pueden dar resultados más exactos con un rango más amplio (véanse la sección 9.3.6 y OMM, 1992b).

Otro perfeccionamiento del principio de medición con transmisómetros consiste en utilizar dos receptores o retrorreflectores a diferentes distancias para ampliar el límite inferior (línea de base corta) y el límite superior (línea de base larga) del rango de medición del MOR. Estos instrumentos se denominan "de línea de base doble".

Muchos de los transmisómetros más modernos utilizan LED como fuentes luminosas. En general, se recomienda utilizar luz policromática en el espectro visible con el fin de obtener un coeficiente de extinción representativo.

### Medición de la visibilidad con tecnología lidar

La técnica lidar (Light Detection And Ranging, es decir, detección y localización por ondas luminosas) descrita en los párrafos sobre nefobasímetros láser, en el capítulo 15 de la parte I, puede emplearse para medir la visibilidad cuando el haz se dirige horizontalmente. El perfil de resolución del alcance de la señal retrodispersada  $S$ , depende de la señal de salida  $S_0$ , de la distancia  $x$ , del coeficiente de retrodispersión  $\beta$ , y del factor de transmisión  $T$ , de modo que:

$$S(x) \sim S_0 \cdot 1/x^2 \cdot \beta(x) \cdot T^2 \quad \text{donde } T = \int -\sigma(x) dx \quad (9.15)$$

En caso de que la atmósfera presente un horizonte homogéneo,  $\beta$  y  $\sigma$  son constantes y el coeficiente de extinción  $\sigma$  está determinado por solo dos puntos del perfil:

$$\ln(S(x) \cdot x^2 / S_0) \sim \ln \beta - 2 \sigma x \quad (9.16)$$

En una atmósfera que no sea homogénea, las magnitudes que dependan del alcance de  $\beta(x)$  y de  $\sigma(x)$ , se pueden separar aplicando el algoritmo de Klett (Klett, 1985).

Cuando el MOR se acerca a los 2 000 m, se vuelve insuficiente la exactitud de la técnica lidar.

En la norma ISO 28902-1:2012 de la Organización Internacional de Normalización (ISO, 2012), se encontrará más información sobre los requisitos para realizar mediciones del alcance visual con la técnica lidar a fin de determinar el alcance óptico meteorológico dependiente de la dirección.

### 9.3.3 Instrumentos para medir el coeficiente de dispersión

La atenuación de la luz en la atmósfera se debe a la dispersión y a la absorción. Este último término puede adquirir mayor significado en presencia de contaminantes en las proximidades

de zonas industriales, cristales de hielo (niebla engelante) o polvo. Sin embargo, en general, el factor de absorción es insignificante, y el fenómeno de dispersión debido a la reflexión, la refracción y la difracción en las gotas de agua constituye el principal factor de reducción de la visibilidad. El coeficiente de extinción puede considerarse entonces igual al coeficiente de dispersión, por lo que para estimar el MOR puede utilizarse un instrumento que mida el último coeficiente.

La medición se realiza mejor concentrando un haz de luz en un pequeño volumen de aire y determinando, por medios fotométricos, la proporción de luz dispersada en un ángulo sólido suficientemente grande y en direcciones que no sean críticas. Siempre que se proteja completamente contra la interferencia de otras fuentes de luz, o que se module el foco luminoso, este tipo de instrumento puede utilizarse de día y de noche. El coeficiente de dispersión  $b$  es una función que puede escribirse como sigue:

$$b = \frac{2\pi}{\Phi_v} \int_0^\pi I(\phi) \sin(\phi) d\phi \quad (9.17)$$

donde  $\Phi_v$  es el flujo que penetra en el volumen de aire  $V$  e  $I(\phi)$  es la intensidad de la luz dispersada en dirección  $\phi$  con respecto al haz incidente.

Cabe señalar que para determinar con precisión  $b$  hay que medir e integrar la luz dispersada fuera del haz en todos los ángulos. Con los instrumentos prácticos se mide la luz dispersada en un ángulo limitado, basándose en una elevada correlación entre la integral limitada y la integral completa.

En estos instrumentos se utilizan tres métodos de medición: retrodispersión, dispersión frontal y dispersión integrada en un ángulo de gran apertura:

- a) *Retrodispersión*: en este instrumento (figura 9.4) un haz de luz se concentra en un pequeño volumen de aire delante del transmisor; el receptor está situado en el mismo compartimento, debajo del foco luminoso, donde recibe la luz retrodispersada por el volumen de aire de la muestra. Varios investigadores han tratado de hallar una relación entre la visibilidad y el coeficiente de retrodispersión, pero en general se acepta que la correlación no es satisfactoria.
- b) *Dispersión frontal*: el perfil de luz dispersada por partículas pequeñas (aerosoles, gotitas) depende del ángulo. Es más, esa dependencia del ángulo (es decir, el perfil de luz dispersada) depende, a su vez, de la composición química (p. ej., la concentración de sal), el tipo de núcleo (arena, polvo) y el tamaño de las partículas. En consecuencia, debería elegirse un ángulo de dispersión de manera que se reduzca al mínimo la dependencia del ángulo. Varios autores han mostrado que el mejor ángulo es el comprendido entre  $20^\circ$  y  $50^\circ$  (Kneizys y otros, 1983; Jia y Lü, 2014; Barteneva, 1960; Van de Hulst, 1957). Por lo tanto, los instrumentos comprenden un transmisor y un receptor; el ángulo entre los haces es de

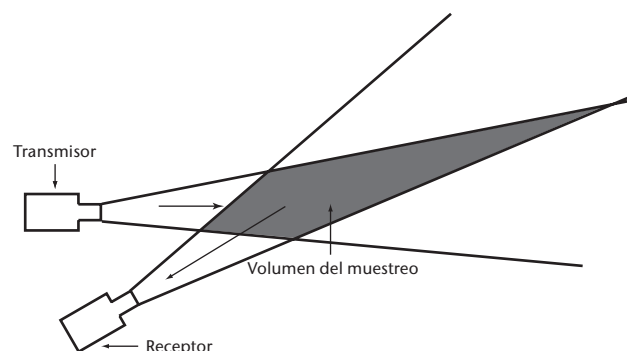
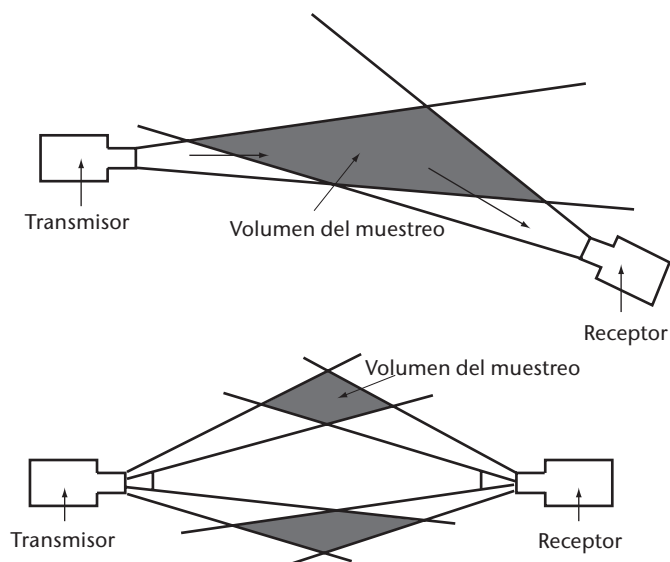


Figura 9.4. Medidor de visibilidad que mide la retrodispersión





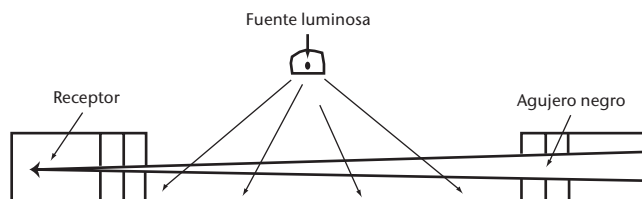
**Figura 9.5. Dos configuraciones de medidor de visibilidad que mide la dispersión frontal**

20° a 50°. Otra disposición consiste en colocar un solo diafragma a media distancia entre el transmisor y el receptor, o dos diafragmas, cada uno a corta distancia del transmisor o del receptor. En la figura 9.5 se ilustran las dos configuraciones utilizadas.

- c) *Dispersor en un ángulo de gran apertura:* este instrumento, ilustrado en la figura 9.6, conocido como nefelímetro integrador, se basa en el principio de medir la dispersión en el ángulo más abierto posible, siendo el ideal el de 0° a 180°, aunque en la práctica es de alrededor de 0° a 120°. El receptor se coloca perpendicularmente al eje de la fuente de luz que ilumina sobre un ángulo amplio. Aunque, en teoría, tal instrumento debería proporcionar una mejor estimación del coeficiente de dispersión que otro que mida un pequeño rango de ángulos de dispersión, en la práctica es más difícil impedir que la presencia del instrumento modifique el coeficiente de extinción en el aire muestreado. Los nefelímetros integradores no se usan mucho para medir el MOR, pero se emplean con frecuencia para medir contaminantes.

En todos los instrumentos anteriores, como en el 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 m). Por eso son útiles cuando no se dispone de objetos de visibilidad o fuentes de luz (barcos, arcenes, etc.). 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.



**Figura 9.6. Medidor de visibilidad que mide la luz dispersada en un ángulo de gran apertura**

La utilización de esta clase de instrumentos se ha limitado con frecuencia a aplicaciones concretas (por ejemplo, medir la visibilidad en carreteras o determinar si hay niebla o no) o cuando son adecuadas mediciones menos precisas del MOR. Ahora se emplean en un mayor número de sistemas automáticos de observaciones meteorológicas debido a que pueden medir el MOR sobre una gran distancia y a que son relativamente poco susceptibles a la contaminación en comparación con los transmisómetros.

#### 9.3.4 **Emplazamiento y exposición**

Los instrumentos de medición deberían situarse en posiciones que garanticen que las mediciones sean representativas para los fines perseguidos. En consecuencia, para fines sinópticos generales, los instrumentos deberían instalarse en lugares sin contaminación atmosférica local; por ejemplo, humo, contaminación industrial, polvo de las carreteras.

El volumen de aire en el que se mide el coeficiente de extinción o el coeficiente de dispersión debería encontrarse normalmente al nivel del ojo del observador; aproximadamente a 1,5 m sobre el suelo.

Habría que tener presente que los transmisómetros y los instrumentos de medición del coeficiente de dispersión deberían instalarse de modo que el sol no se encuentre en el campo óptico del detector en ningún momento del día, bien montándolo con un eje óptico norte-sur (a  $\pm 45^\circ$ ) horizontalmente, para latitudes de hasta  $50^\circ$ , o bien utilizando un sistema de pantallas o deflectores.

Para fines aeronáuticos, las mediciones han de ser representativas de las condiciones del aeródromo. Tales condiciones, que se refieren más concretamente a las operaciones en los aeródromos, se describen en el capítulo 2 de la parte II.

Los instrumentos deberían instalarse con arreglo a las indicaciones de los fabricantes. Habría que prestar especial atención a corregir la alineación de los transmisores y receptores del transmisómetro, y a corregir el ajuste del haz de luz. Los postes en que se montan los transmisores y los receptores deberían ser mecánicamente estables (aun siendo frágiles cuando se instalan en los aeródromos) para evitar toda desalineación debida al movimiento del terreno durante las heladas y, en particular, durante el deshielo. Además, la instalación no debe deformarse a causa de la tensión térmica a la que están expuestos.

#### 9.3.5 **Calibración y mantenimiento**

Con objeto de obtener observaciones satisfactorias y fiables, los instrumentos de medición del MOR deberían hacerse funcionar y mantenerse en las condiciones prescritas por los fabricantes, y conservarse continuamente en buen estado de funcionamiento. Se debería lograr un rendimiento óptimo, mediante verificaciones regulares y una calibración conforme a las recomendaciones de los fabricantes.

La calibración con muy buena visibilidad (más de 10 a 15 km) debería efectuarse regularmente. Hay que evitar calibraciones erróneas debido a las condiciones atmosféricas. Por ejemplo, en el caso de fuertes corrientes ascendentes, o después de una lluvia intensa, se producen en la capa de aire próxima al suelo considerables variaciones del coeficiente de extinción, y si se utilizan varios transmisómetros en el emplazamiento (como en el caso de los aeródromos), se observa dispersión en sus mediciones. En tales condiciones no debería procederse a realizar la calibración.

Debe señalarse que, en el caso de la mayoría de los transmisómetros, las superficies ópticas tienen que limpiarse regularmente, y ha de planificarse un servicio diario para ciertos instrumentos, sobre todo en los aeródromos. Los instrumentos deberían limpiarse durante perturbaciones atmosféricas importantes, o después de ellas, puesto que la lluvia o los chubascos violentos, unidos a un viento fuerte, pueden cubrir los sistemas ópticos con un gran número de gotas de agua y partículas sólidas, lo que origina importantes errores de medición del MOR,

y lo mismo se aplica a las nevadas, que pueden bloquear los sistemas ópticos. Con frecuencia se colocan sistemas de calefacción delante de los sistemas ópticos para mejorar el rendimiento de los instrumentos en tales condiciones. A veces se utilizan sistemas de ventilación para reducir dichos problemas y no tener que realizar limpiezas frecuentes. Sin embargo, hay que decir que esos sistemas de ventilación y de calefacción pueden generar corrientes de aire más caliente que el aire circundante e influir adversamente en la medición del coeficiente de extinción de la masa de aire. En zonas áridas, las tempestades de arena o la ventisca alta de arena pueden bloquear el sistema óptico, e incluso dañarlo.

### 9.3.6 Fuentes de error en las mediciones del alcance óptico meteorológico y estimaciones de exactitud

#### Generalidades

Todos los instrumentos operativos prácticos para las mediciones del MOR muestrean una región relativamente pequeña de la atmósfera, en comparación con la explorada por un observador humano. Los instrumentos solo pueden proporcionar una medición exacta del MOR cuando el volumen de aire que muestrean es representativo de la atmósfera en torno al punto de observación, en un radio igual al del MOR. Es fácil imaginar una situación, con niebla desigual o lluvia o tempestad de nieve local, en que la lectura del instrumento sea engañosa. Sin embargo, la experiencia ha mostrado que tales situaciones no son frecuentes y que, controlando continuamente el MOR con un instrumento, a menudo se detectan cambios del MOR antes de que pueda reconocerlos un observador sin ninguna ayuda. No obstante, hay que ser prudentes al interpretar mediciones del MOR realizadas con instrumentos.

Otro factor que debe tenerse presente al analizar la representatividad de las mediciones es la homogeneidad de la propia atmósfera. En todos los valores del MOR, el coeficiente de extinción de un pequeño volumen de la atmósfera fluctúa normalmente con rapidez y de manera irregular, y las distintas mediciones del MOR con dispersómetros y transmisómetros de línea de base corta, sin sistema incorporado de suavizado o de promediado, muestran una considerable dispersión. Por lo tanto, es necesario tomar numerosas muestras y suavizarlas o promediarlas para obtener un valor representativo del MOR. El análisis de los resultados de la Primera Intercomparación de Mediciones de Visibilidad de la OMM (OMM, 1990) indica que, en la mayoría de los instrumentos, no se consigue nada utilizando un promedio de tiempo superior a 1 minuto, pero para los instrumentos que experimentan más perturbaciones es preferible un tiempo medio de dos minutos.

#### Exactitud de los telefotómetros y de los medidores de extinción visual

Es difícil realizar mediciones visuales basadas en el coeficiente de extinción, y la principal fuente de error es la variabilidad y la incertidumbre del funcionamiento del ojo humano. Esos errores se describen en las secciones relativas a los métodos de estimación visual del MOR.

#### Exactitud de los transmisómetros

Las fuentes de error en las mediciones de los transmisómetros pueden resumirse como sigue:

- a) alineación incorrecta de transmisores y receptores;
- b) insuficiente rigidez y estabilidad de los soportes del transmisor y del receptor (congelación y deshielo del suelo, tensión térmica);
- c) envejecimiento y centrado incorrecto de las lámparas;
- d) error de calibración (visibilidad demasiado reducida o calibración realizada en condiciones inestables que afectan al coeficiente de extinción);

- e) inestabilidad de la electrónica del sistema;
- f) transmisión remota del coeficiente de extinción en forma de señal de corriente de baja intensidad que está sujeta a la interferencia de los campos electromagnéticos (sobre todo en los aeródromos); es preferible digitalizar las señales;
- g) perturbación debida a la salida o la puesta del sol, y a la deficiente orientación inicial de los transmisómetros;
- h) contaminación atmosférica que ensucia los sistemas ópticos;
- i) condiciones atmosféricas locales (chubascos de lluvia y fuertes vientos, nieve) que dan lecturas de coeficiente de extinción no representativas, o difieren de la ley de Koschmieder (nieve, cristales de hielo, lluvia, etc.). La absorción adicional por arena y polvo afecta a la visibilidad y a su medición. El principio de medición con transmisómetros tiene en cuenta esta circunstancia. (La medición con dispersómetros no puede tener en cuenta el efecto de la absorción adicional por la naturaleza propia del principio de medición). La dispersión y la reflexión causadas por partículas grandes crean cierta dispersión frontal no deseada en las mediciones con transmisómetros, lo que puede influir en la incertidumbre de dichas mediciones, según la divergencia del transmisor y el campo de visión del receptor.

El uso de un transmisómetro debidamente calibrado y bien mantenido debería proporcionar buenas mediciones representativas del MOR si el coeficiente de extinción en la trayectoria óptica del instrumento es representativo del coeficiente de extinción en todo el MOR. Sin embargo, la distancia a la que un transmisómetro puede proporcionar mediciones exactas del MOR es limitada. Puede trazarse una curva de error relativo del MOR diferenciando la fórmula del transmisómetro básica (véase la ecuación 9.7). En la figura 9.7 se muestra cómo varía el error relativo con la transmisión suponiendo que la incertidumbre en la medida del factor de transmisión  $T$  es del 1%.

Este valor del 1% de error de transmisión, que puede considerarse correcto para muchos instrumentos más antiguos, no comprende la deriva del instrumento, la suciedad de los componentes ópticos ni la dispersión de las mediciones debidas al propio fenómeno. Si la incertidumbre aumenta hasta alrededor del 2% al 3% (teniendo en cuenta los otros factores), los valores de error relativo indicados en el eje vertical del gráfico han de multiplicarse por el mismo factor de 2 o 3. Debe señalarse asimismo que el error de medición relativo del MOR aumenta exponencialmente en cada extremo de la curva, determinando así los límites superior e inferior

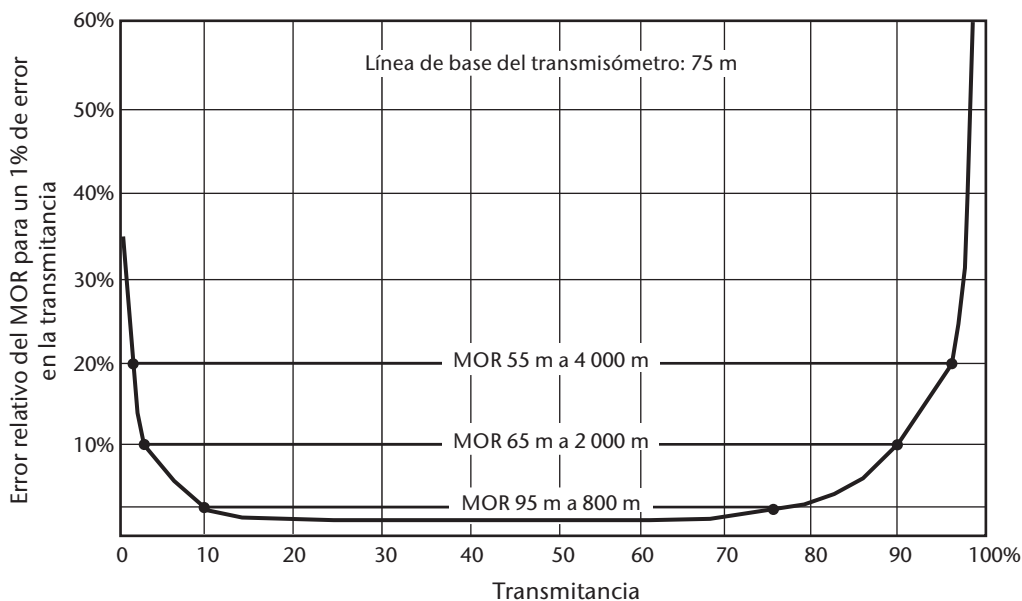


Figura 9.7. Error en las mediciones del MOR en función de un 1% de error en la transmitancia

del rango de medición del MOR. El ejemplo mostrado por la curva indica el límite del rango de medición si se acepta un error del 5%, 10% o 20% en cada extremo del rango medido, con una línea de base de 75 m. También puede deducirse que para las mediciones del MOR entre los límites de 1,25 y 10,7 veces la longitud de la línea de base, el error relativo del MOR debería ser bajo, y del orden del 5%, suponiendo que el error de  $T$  sea del 1%. El error relativo del MOR supera el 10% cuando el MOR es inferior a 0,87 veces la longitud de la línea de base, o más de 27 veces esa longitud. Cuando el rango de medición se extiende todavía más, el error aumenta rápidamente y resulta inaceptable. Sin embargo, dado que los transmisómetros contemporáneos registran errores de transmisión claramente inferiores al 1% del ejemplo, el rango de medición útil puede ampliarse oportunamente.

Los resultados de la Primera Intercomparación de Mediciones de Visibilidad de la OMM (OMM, 1990) ya mostraron que los mejores transmisómetros, debidamente calibrados y mantenidos, pueden proporcionar mediciones del MOR con un error típico del 10% aproximadamente, cuando el MOR es hasta 60 veces superior a su línea de base.

### Exactitud de los dispersómetros

Las principales fuentes de error en las mediciones del MOR con dispersómetros son las siguientes:

- a) error de calibración (visibilidad demasiado reducida o calibración realizada en condiciones inestables que afectan al coeficiente de extinción);
- b) falta de repetibilidad en el procedimiento o en los materiales cuando se utilizan dispersómetros opacos para la calibración;
- c) inestabilidad de la electrónica del sistema;
- d) transmisión remota del coeficiente de dispersión en forma de señal de corriente de baja intensidad o tensión que está sujeta a la interferencia de los campos electromagnéticos (sobre todo en los aeródromos); es preferible digitalizar las señales;
- e) perturbación debida a la salida o la puesta del sol, y a la deficiente orientación inicial del instrumento;
- f) contaminación atmosférica que ensucia los sistemas ópticos (estos instrumentos son mucho menos sensibles a la suciedad en cuanto a su óptica que los transmisómetros, pero una suciedad considerable influye);
- g) condiciones atmosféricas (lluvia, nieve, cristales de hielo, arena, contaminación local, etc.) que dan un coeficiente de dispersión diferente del coeficiente de extinción.

Los resultados de la Primera Intercomparación de Mediciones de Visibilidad de la OMM (OMM, 1990) muestran que a valores reducidos del MOR, los dispersómetros son generalmente menos exactos que los transmisómetros y presentan mayor variabilidad en sus lecturas. También hay pruebas de que los dispersómetros, como clase, resultan más afectados por la precipitación que los transmisómetros. Sin embargo, los mejores dispersómetros muestran poca o ninguna susceptibilidad a la precipitación y proporcionan estimaciones del MOR con una desviación típica de alrededor del 10% en un rango aproximado del MOR de 100 m a 50 km. Casi todos los dispersómetros de la Intercomparación presentaron un error sistemático importante en parte de su rango de medición. Los dispersómetros mostraron muy poca susceptibilidad a la contaminación de sus sistemas ópticos.

Se puede consultar información general sobre las diferencias entre dispersómetros y transmisómetros en OMM (1992*b*).

---

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Barteneva, O. D., 1960: "Scattering functions of light in the atmospheric boundary layer", en *Izv. Akad. Nauk SSR, Ser. Geofiz.* [en inglés: Bulletin of the Academy of Sciences USSR, Geophysics Series], vol. 12, págs. 1237 a 1244.
- Comisión Electrotécnica Internacional, 1987: *International Electrotechnical Vocabulary*, cap. 845: "Lighting", IEC 60050-845. Ginebra.
- Jia S-J. y D-R. Lü, 2014: "Optimal forward-scattering angles of atmospheric aerosols in North China", en *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, vol. 7, núm. 3, págs. 236 a 242.
- Klett, J. D., 1985: "Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios", en *Applied Optics*, vol. 24, núm. 11, págs. 1638 a 1643.
- Kneizys, F. X., E. P. Shettle, W. O. Gallery, J. H. Chetwynd, L. W. Abreu, J. E. A. Selby, S. A. Clough y R. W. Fenn, 1983: *Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 6*, apéndice D, AFGL-TR-83-0187, trabajo de investigación sobre el medio ambiente N° 846. Laboratorio de Geofísica de la Fuerza Aérea de Estados Unidos, Massachusetts.
- Middleton, W. E. K., 1952: *Vision Through the Atmosphere*. University of Toronto Press, Toronto.
- Sheppard, B. E., 1983: "Adaptation to MOR", en *Preprints of the Fifth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation* (Toronto, 11 a 15 de abril de 1983), págs. 226 a 269.
- Organización de Aviación Civil Internacional, 2013: *Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional*, anexo 3 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional. Decimoctava edición, Montreal.
- Organización Internacional de Normalización, 2012: *Air Quality – Environmental Meteorology – Part 1: Ground-based Remote Sensing of Visual Range by Lidar*, ISO 28902-1:2012. Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial, 1990: *The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements: Final Report* (D.J. Griggs, D.W. Jones, M. Ouldrige and W.R. Sparks). Instruments and Observing Methods Report No. 41 (WMO/TD-No. 401). Ginebra.
- , 1992a: *Vocabulario Meteorológico Internacional* (OMM-N° 182). Ginebra.
- , 1992b: "Visibility measuring instruments: Differences between scatterometers and transmissometers" (J. P. van der Meulen), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation* (TECO-92) (Vienna, Austria, 11–15 May 1992). Instruments and Observing Methods Report No. 49 (WMO/TD-No. 462). Ginebra.
- , 2010a: *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-N° 544), volumen I. Ginebra.
- , 2010b: *Guía del Sistema Mundial de Observación* (OMM-N° 488). Ginebra.
- , 2014: *Guía de sistemas meteorológicos de observación y distribución de información para los servicios meteorológicos aeronáuticos* (OMM-N° 731). Ginebra.
-