

A vibrant rainbow arches across a clear blue sky, with a cityscape visible in the background. The rainbow's colors are bright and distinct, transitioning from red at the top to violet at the bottom. The city below features several buildings, including a prominent one with a red roof and another with a modern, glass facade. The foreground is filled with lush green foliage.

FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS

UNIDAD DIDÁCTICA

UNIDAD DIDÁCTICA FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS





Autores:
Juan Carlos Casado
Miquel Serra-Ricart

Unidad Didáctica
Fenómenos
atmosféricos
3

INTRODUCCIÓN

Cualquier persona habrá contemplado en alguna ocasión ciertos aspectos visuales que ofrece el cielo, como un arco iris, la aparición de una aureola luminosa en torno al sol o un atardecer salpicado de una variedad de tonalidades rojo-amarillentas.

Estas manifestaciones se encuadran dentro de los fenómenos ópticos de nuestra atmósfera. Se producen cuando los rayos luminosos de un foco (normalmente el Sol) interaccionan con ella y los captamos con nuestra vista.

Estamos inmersos en una masa de aire (la atmósfera) que contiene diferentes componentes, como moléculas, materias líquidas y sólidas en suspensión. Estos actúan como dispersores, reflectores y refractores de la luz. La atmósfera, preferentemente en las capas bajas, posee altas concentraciones de vapor de agua, pequeñas gotas y cristales de hielo que propician la aparición de ciertos fenómenos ópticos.

Por otra parte, la temperatura puede variar localmente de forma especial (inversiones térmicas) dando lugar a ciertas singularidades visuales conocidas por espejismos.

Todos estos elementos pueden generar fenómenos ópticos muy variados y llamativos, como veremos en la presente Unidad Didáctica.

1- La luz

La luz es una forma de energía electromagnética, representada por el espectro electromagnético. La luz visible se distingue porque su longitud de onda o color¹ está comprendida entre los 400 y 700 nanómetros (nm¹) aproximadamente.

Todas estas formas de energía electromagnética presentan unas características comunes:

- Son emitidas a partir de una fuente energética o emisor: lámpara de filamento, antena, el Sol (Figura 1).
- Se transmiten por el vacío (de forma aproximada el espacio) y pueden pasar a través de cualquier sustancia que sea "transparente".
- Se desplazan a la misma velocidad en el vacío: cerca de 300.000 Km/s. En otras materias "transparentes" (agua, aire), la velocidad disminuye.
- Son irradiadas en líneas o "rayos" rectos en el vacío.

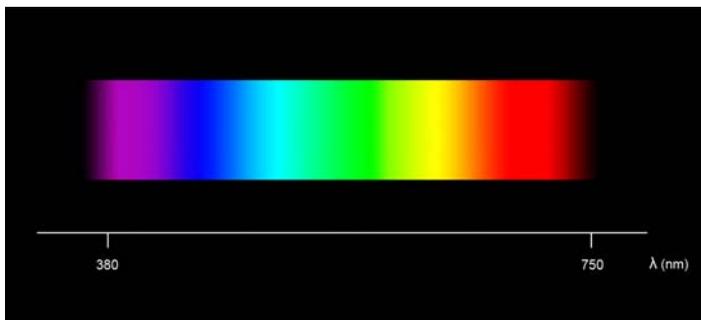


Figura 1. Fuente de radiación electromagnética.

¹Unidad de longitud que equivale a una milmillonésima de metro ($10^{-9}m$).

El espectro visible origina una variación continua de colores, sin divisiones abruptas entre diferentes longitudes de onda (Figura 2). Mezcladas en las proporciones adecuadas producen la sensación de «luz blanca». Sin embargo se puede establecer la situación de determinados colores, tal como lo ven nuestros ojos:

El «violeta» se sitúa en una franja comprendida entre los 380 y 450 nm; el «azul» entre los 450 y 500 nm; el «verde», entre los 500 y 570 nm; el «amarillo», entre los 570 y 590 nm; el «naranja», entre los 590 y 620 nm y el «rojo», entre los 620 y 750 nm².

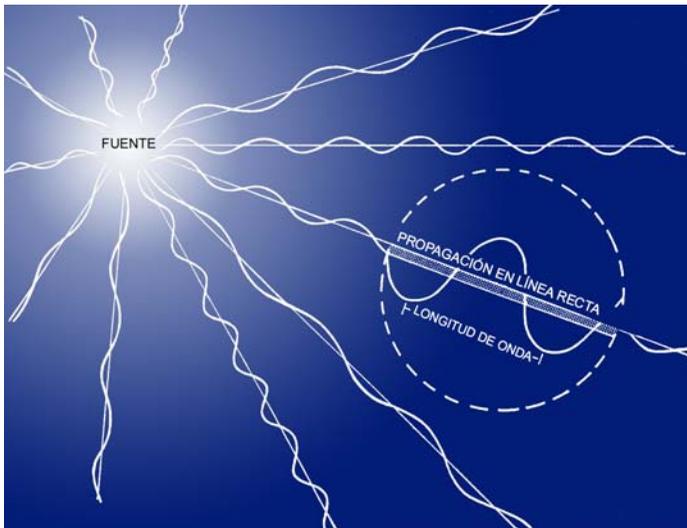


Figura 2. Espectro de la luz visible.

1.1. Fuentes de luz

La luz visible puede ser producida por diferentes fuentes de emisión. Unas son

² Una regla nemotécnica para recordar esta secuencia de colores o longitudes de onda visibles es la frase «Voy A Ver A Raquel».



naturales, como el Sol, mientras que hay otras artificiales, como la iluminación eléctrica.

Según su origen se pueden establecer diferentes categorías:

Por incandescencia. Cuando un cuerpo se calienta por encima de los $1.300\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente comienza a emitir luz propia visible. Si la temperatura va en aumento, irá emitiendo luz en diferentes colores; primero, rojo, después y sucesivamente, naranja, amarillo, blanco, y finalmente blanco-azulado². De aquí se deriva el concepto de *temperatura de color (TC)*, basado en el comportamiento de un cuerpo negro y que se aplica a todas las fuentes incandescentes (naturales o artificiales). La temperatura de color se expresa en grados Kelvin (K). En la naturaleza, los límites habituales entre el rojizo (por ejemplo, una puesta de Sol) y el azulado (cielo azul intenso) van desde los 3.000 K a los 10.000 K.

Ejemplos de fuentes naturales: las estrellas. La energía de estos cuerpos celestes se genera en su centro o núcleo mediante reacciones nucleares de fusión. La temperatura en esta zona alcanza millones de grados, irradiando energía en diferentes longitudes de onda. En el Sol, una estrella de tipo medio, la temperatura de la superficie se encuentra a unos $6.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ y emite en un color predominantemente amarillento, lo que determina que sea la luz normal «blanca» para nosotros (Figura 3).

³ Tal cuerpo es conocido en Física como cuerpo negro, un objeto que absorbe o irradia perfectamente la energía y cuyo «pico» de máxima intensidad de emisión se va desplazando a longitudes de onda menores a medida que aumenta la temperatura (ley de Planck).



Figura 3. La iluminación de luz solar constituye para nosotros la denominada «luz blanca». Foto J.C. Casado www.starryearth.com

Las estrellas con temperaturas superficiales menores son más rojizas, y las que poseen mayor temperatura, más azuladas.

Ejemplo de fuentes artificiales: Las bombillas domésticas. Producen una iluminación más rojiza que la luz solar, lo que indica que su temperatura de color es menor.

Por luminiscencia. Cuando los electrones de una sustancia alcanzan niveles de energía extra proporcionados por una fuente externa, radian este exceso de energía en forma de luz visible antes de volver a su estado original.

Existen dos tipos de luminiscencias:

Fluorescencia. La emisión de luz cesa tan pronto como se acaba la aportación de la fuente externa. Hay diferentes tipos de fluorescencia dependiendo del origen de la fuente y la naturaleza del cuerpo con el que interactúa.

Ejemplos de fluorescencia natural: rayos de las tormentas, auroras polares, nebulosas de

emisión y planetarias, colas de gas de cometas (Figura 4).



Figura 4. La cola de gases (o iónicas) de los cometas presentan coloraciones azuladas como la de esta imagen, que muestra el cometa Hale-Bopp (c/1995 O1) a su paso por la nebulosa Norteamérica (a la derecha). La cola de polvo del cometa se muestra ancha y difusa con una tonalidad amarillenta. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

Ejemplos de fluorescencia artificial: iluminación de tubos fluorescentes, lámparas de vapor de mercurio y sodio del alumbrado público, luces de neón, monitores y televisores de tubo de rayos catódicos (CRT).

Fosforescencia. La emisión de luz continúa un tiempo después de que haya cesado la aportación de energía de la fuente externa. También aquí existen diferentes tipos según las sustancias.

Ejemplos de fosforescencia naturales: algunos animales como las luciérnagas (bioluminiscencia), ciertas reacciones químicas



micas.

Ejemplos de fosforescencia artificial: pinturas fosforescentes.

Las fuentes de luz -tanto naturales o artificiales- pueden ser únicas. Pero el caso más frecuente es que haya diferentes fuentes de emisión al mismo tiempo (Figura 5).



Figura 5. Una escena con una mezcla de diferentes fuentes de luz naturales y artificiales como ésta, proporciona vivas coloraciones. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

1.2. Interacción de la luz

Cuando la luz incide sobre la materia se pueden producir diferentes cambios:

Absorción. La materia no deja pasar la luz y se dice que es «opaca». La luz absorbida suele convertirse en calor. En algunos materiales se producen transformaciones químicas (por ejemplo, en ciertas sustancias como los haluros de plata) y en otros se genera electricidad (por ejemplo, en sensores fotoeléctricos).

Reflexión. La materia reenvía la luz que llega a la superficie. No existe un reflector perfecto al 100%, por lo que en una reflexión siempre sucede además una absorción y/o transmisión.

La reflexión puede ser de tres tipos:

1) **Especular.** Se produce cuando la luz incide en sustancias con superficies «lisas⁴», como el agua en calma, vidrio, etc. Los rayos de luz que llegan a la superficie son reflejados en el mismo ángulo respecto a la perpendicular de la superficie o normal (Figura 6).

2) **Difusa.** Cuando la superficie de incidencia es irregular se produce una reflexión en todas direcciones, causando un aspecto «mate». Por ejemplo, en una hoja de papel o la Luna.

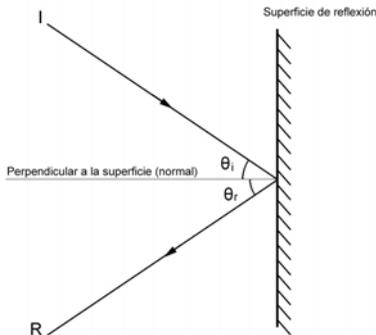


Figura 6. En una reflexión especular se cumple la propiedad de que el ángulo incidencia de la luz (θ_i) es igual al ángulo de reflexión (θ_r), respecto a la normal o perpendicular a la superficie de reflexión.

⁴ Cuando se habla de superficies «lisas» se hace referencia a aquellas cuyas irregularidades son menores que la longitud de onda de la luz visible.

3) **Selectiva.** Hay superficies que además tienen la propiedad de reflejar ciertas longitudes de onda y absorber las restantes. En un objeto de color amarillo, por ejemplo, se absorben todos los colores excepto el amarillo, que es reflejado.

Refracción. Cuando la luz pasa oblicuamente de un medio a otro con diferente densidad (por ejemplo, del aire al vidrio) se origina un cambio de dirección. Es el principio de la formación de imágenes en la óptica de lentes.

En la refracción, el rayo incidente y el refractado están en el mismo plano y en lados opuestos de la normal a la superficie. Entonces, se cumple la ley de refracción (ley de Snell) (Figura 7):

$$n_1 \cdot \text{sen} \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen} \theta_2$$

donde n_1 es el índice de refracción del medio, que se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el medio (v) y la

velocidad de la luz en el vacío (c): $n_i = \frac{v}{c}$

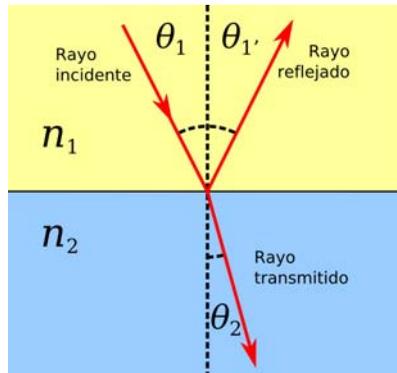


Figura 7. Esquema explicativo de la refracción.

Como la luz blanca está formada por todos los colores del espectro visible, cada color o longitud de onda es refractada diferente, pues cada color tiene distintos índices de refracción, produciéndose un abanico con todos los colores.

Transmisión. Es el paso de la luz a través de sustancias no opacas. Pueden producirse tres tipos de transmisiones:

- 1) **Directa.** Si la transmisión se realiza directamente a través de un material sin dispersarse (como el vidrio, por ejemplo).
- 2) **Difusa.** La luz se desvía en muchas direcciones, como ocurre con los materiales translúcidos, como el vidrio deslustrado.
- 3) **Selectiva.** Además ciertos materiales pueden absorber ciertas longitudes de onda. Un filtro de color rojo solo deja pasar las longitudes de ondas correspondientes a esta zona del espectro visible, absorbiendo el resto de los colores.

Dispersión. Es un caso de refracción en el que se produce la separación de la luz en sus diferentes longitudes de onda, como el arco iris . Todos los medios materiales son más o menos dispersivos, como el agua, el vidrio o el aire (Figura 8).

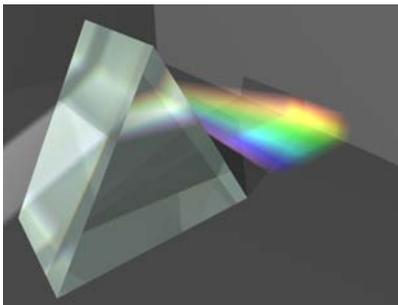


Figura 8. Dispersión de la luz solar mediante un prisma de vidrio óptico. Dibujo Wikipedia.

Difracción. Es un fenómeno debido a la naturaleza ondulatoria de la luz. Se produce cuando la luz abandona su trayectoria rectilínea, desviándose y curvándose aparentemente en los bordes de un obstáculo o de un orificio cuyo tamaño es menor o comparable a la longitud de onda de la luz. Cuanto menor es el obstáculo más notable es el fenómeno de la difracción. La difracción de la luz es difícil de observar debido a que la longitud de onda es pequeña en comparación con el tamaño de los objetos corrientes. La difracción en una abertura circular repercute en la resolución de los instrumentos ópticos (Figura 9).

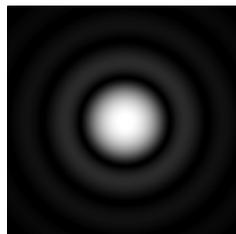


Figura 9. Representación de la difracción de una fuente de luz puntual a través de un sistema óptico de abertura circular. Imagen Wikipedia.

Polarización. También se debe al carácter ondulatorio de la luz. La luz puede considerarse como un conjunto de ondas que se desplazan en planos de todas las direcciones perpendiculares a la dirección de movimiento. Bajo ciertas circunstancias las ondas de luz se ven obligadas a vibrar en un solo plano (Figura 10). Esta luz se llama *polarizada* y el plano restante es el de polarización. Los tipos de polarización más comunes son el lineal y el circular, que indican la proyección del plano de desplazamiento de la onda.

El ojo humano no puede distinguir normalmente si una luz es o no polarizada, pero se pueden producir ciertos efectos visuales y fotográ-

ficos. Para ello se emplean filtros polarizadores (lineales y circulares), que están compuestos por dos cristales polarizadores, de manera que rotando uno de ellos se ajusta el efecto deseado.

En la Naturaleza frecuentemente se producen varios de todos estos fenómenos simultáneamente.

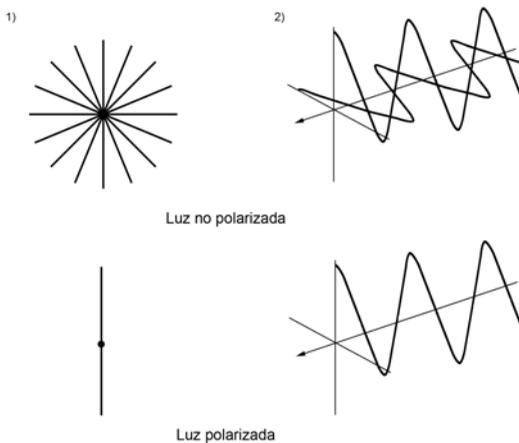


Figura 10. Esquema de polarización lineal de la luz. La columna 1 muestra el aspecto de los planos de vibración de onda con el rayo de luz dirigido directamente al observador. La columna 2 es una representación en perspectiva, con el rayo de luz no polarizada limitado a dos planos de vibración para una mejor visibilidad. Esquema J.C. Casado.

1.3. Sombras

Cuando la luz ilumina un cuerpo opaco, el objeto produce una sombra con su misma forma, en virtud de su trayectoria rectilínea en medios de baja densidad. Esto lo podemos ver en escenas tan cotidianas como contemplar nuestra propia sombra. La sombra, por lo tanto, es una zona del espacio en la que no se recibe luz del foco emisor.

Como se deduce de lo dicho anteriormente, las sombras se dirigen hacia el lado opuesto donde se encuentra situada la fuente luminosa. En el caso del Sol, esta dirección se denomina *punto antisolar* (Figura 11) y constituye una referencia importante para muchos fenómenos ópticos atmosféricos que se forman alrededor de él.

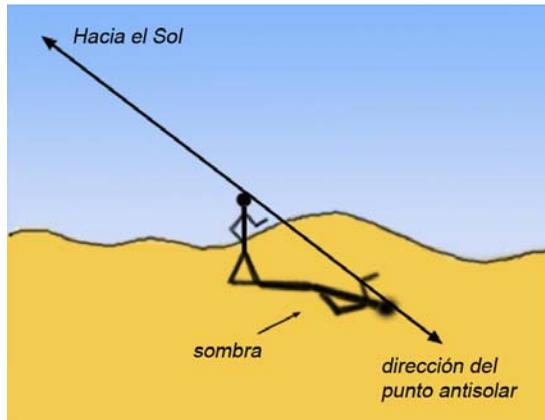


Figura 11. El punto antisolar se encuentra en dirección opuesta al Sol y su línea de proyección pasa por la cabeza del observador.

Sombras de fuentes extensas. El Sol, la principal fuente luminosa natural, constitu-

ye un ejemplo de foco luminoso extenso, al presentar un tamaño apreciable visto desde la Tierra. Los rayos de luz procedentes del Sol no son totalmente paralelos entre sí, de manera que al incidir en un cuerpo opaco se produce una divergencia en la proyección de su sombra.

Este efecto es visible observando cómo los bordes de la sombra no son nítidos, resultando más apreciable a medida que la sombra se aleja del objeto. Entonces se puede advertir entre el contorno oscuridad-luz, una franja de transición en semisombra o *penumbra*, que es alcanzada solamente por una parte del Sol, tanto más cuando más al exterior se halle. La sombra más interior y oscura se denomina *umbra*, sombra umbral o sombra propiamente (Figura 12). Las sombras solares están suavizadas por efecto de la luz proveniente del cielo y de la reflejada por el entorno.

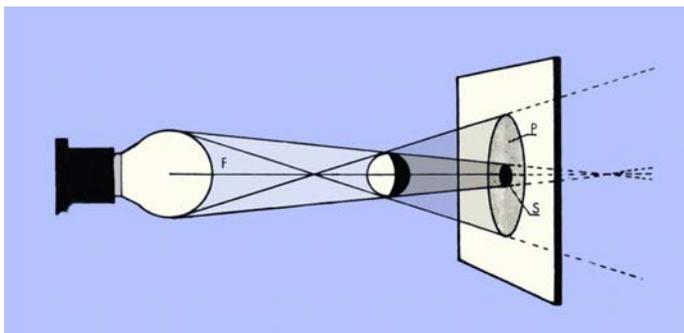


Figura 12. Esquema de una fuente de luz extensa. La fuente de luz *F* proyecta una sombra del objeto iluminada compuesta por la umbra o sombra umbral (*S*), central y oscura, junto con la penumbra (*P*), que rodea a la anterior.

Como el diámetro aparente del Sol es de unos $0,5^\circ$ o $1/120$ radianes⁵, la distancia máxima que alcanza la umbra es de aproximadamente 120 veces el tamaño del objeto, según se de-

⁵El radián (rad) se define como el ángulo que limita un arco de circunferencia cuya longitud es igual al radio de la circunferencia, es decir: $1 \text{ rad} = \frac{180^\circ}{\pi}$

muestra geoméricamente (Figura 13):

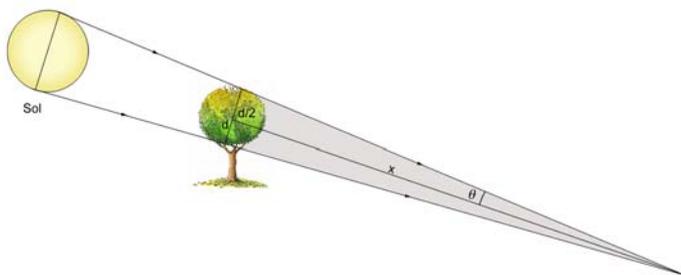


Figura 13. Debido a que el sol es una fuente de luz extensa se produce una convergencia en la sombra de un objeto (la copa «d» de un árbol en la figura). x es la longitud de la sombra proyectada por el objeto d y θ el radio aparente del disco solar. Como el diámetro aparente solar es de aproximadamente $0,5^\circ$,

$$\text{entonces: } \theta \approx \frac{0,5^\circ}{2} \approx \frac{1}{2} \text{ rad}$$

Para ángulos pequeños, como es el caso, el ángulo y la tangente tienen aproximadamente el mismo valor:

$$\theta \approx \text{tg}\theta = \frac{d}{x} \quad , \quad \text{por lo tanto:}$$

$$x \approx \frac{d}{\theta} \approx \frac{d}{\frac{1}{120} \cdot \frac{1}{2}} = 120d$$

, siendo θ el ángulo que subtende un radio solar aparente, d el tamaño del objeto que proyecta la sombra y x la longitud de la sombra proyectada por el objeto d .

Por lo tanto para producir una sombra a una distancia determinada, el objeto debe tener una dimensión angular mayor que la del Sol vista desde el punto donde incide la sombra. Para que esto se cumpla es necesario que el objeto no sea de pequeño tamaño y que no se encuentre demasiado alejado.

Además del Sol, la Luna también es un foco luminoso extenso, pero mucho menos intenso (unas 400.000 veces en luna llena). Este hecho provoca la formación de unas sombras mucho más contrastadas por ser la penumbra muy débil y producirse la sombra lunar en ausencia casi total de luz difusa del cielo y reflejada del ambiente.

Sombras de fuentes puntuales. Si la fuente de luz o foco es pequeño o puntual (y esto depende de lo alejados que estén el foco del objeto), se producirá solo sombra bien definida, que serán las regiones oscuras a las que no alcanza la luz (Figura 14). Un ejemplo de este tipo de foco son las estrellas.

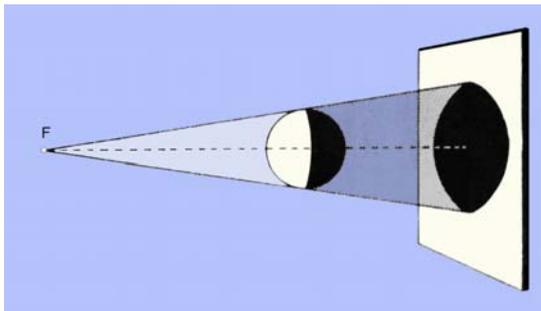


Figura 14. Esquema de una fuente de luz puntual (F) con su sombra correspondiente.

En entornos de gran oscuridad y sin la presencia de la Luna, con la visión adaptada a la

oscuridad, puede observarse la sombra de objetos celestes brillantes de aspecto puntual como el planeta Venus o Júpiter proyectándose contra una superficie blanca, para aumentar su contraste.

El Sol puede comportarse como una fuente de luz prácticamente puntual en ciertas condiciones, como cuando está a punto de desaparecer por completo tras una nube densa de contorno muy definido, o bien en los instantes previos o posteriores a la fase de totalidad de un eclipse solar, en los que el disco solar se halla reducido a un minúsculo fragmento (Figura 15).

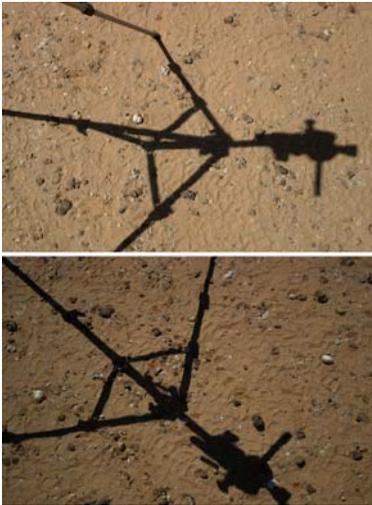


Figura 15. Aspecto de la sombra producida por un trípode durante un eclipse solar. En la imagen superior, durante la fase parcial, cuando aún se mostraba una gran fracción del disco solar y el Sol actuaba como una fuente de luz extensa. Se pueden ver los bordes difusos de la sombra debidos a la penumbra. Abajo, instantes antes del comienzo de la fase total. La desaparición de la penumbra muestra unos bordes nítidos en todo el contorno de la sombra. Fotos J.C. Casado www.starryearth.com

Sombras de colores. Las sombras en el exterior poseen una coloración azulada producida por el color del cielo, es decir, por la luz indirecta proveniente de la atmósfera. Esto se puede apreciar muy bien cuando las sombras



se proyectan sobre nieve. Las sombras lejanas también resultan azuladas en razón de la luz atmosférica difundida entre ellas y el observador.

Se pueden formar sombras coloreadas si un objeto se encuentra iluminado por más de una fuente al mismo tiempo. En este caso las sombras proyectadas por cada una de ellas serán del color de la otra fuente de luz, y sólo la intersección de ambas sombras será gris.

Por ejemplo, justo tras la puesta de Sol un objeto puede presentar dos sombras, al estar iluminada por luz atmosférica y por otra procedente de una farola (luz amarilla de lámpara de sodio). De esta manera la sombra proyectada por la farola se mostrará intensamente azulada. Un efecto semejante puede generarse con la luz lunar o incluso con la de los faros de coches.

En realidad este efecto resulta más acusado de lo que realmente es debido a la fisiología del ojo humano. La iluminación artificial provee una coloración amarillenta a la zona donde se encuentra la sombra. Ésta recibe luz azulada difundida por la atmósfera, que estimula más las células del ojo sensibles al azul que las sensibles al amarillo.

En el caso de que existan más fuentes de luz, cada sombra será del color resultante de la adición de las fuentes que aún iluminan esa zona, permaneciendo en gris las zonas donde interseccionen las sombras de todas las fuentes luminosas (véase applet interactivo en las direcciones del apartado 5.2. Direcciones de Internet).

Sombras de nubes. Las nubes pueden proyectar sombras bien visibles en la atmósfera. A menudo adoptan la forma de haces divergentes que tienen su origen aparente en una nube, de cuyo borde emergen. Este aspecto es debido a la perspectiva, puesto que los rayos solares que producen las sombras son casi paralelos, de manera que la parte más amplia es la más cercana al observador (Figura 16).



Figura 16. El aspecto de rayos o haces en las nubes está producido por sombras de nubes que se proyectan paralelamente aunque por efecto de perspectiva muestran una aparente divergencia. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

En ocasiones tienen lugar efectos muy llamativos de este fenómeno con el Sol bajo o cercano al horizonte, conocidos por rayos crepusculares (ver apartado 3.1.2 Fenómenos de refracción, Rayos crepusculares y anticrepusculares). Durante el día se pueden producir diversos fenómenos debido a la sombras de nubes y la luz solar, que reciben nombres populares como los «dedos del Sol». El que el Sol sea una fuente de luz extensa también se puede comprobar por la iluminación

y las sombras en las nubes. Si el Sol fuera una fuente puntual luminosa iluminaría las nubes por el lado orientado hacia él, dejando en sombra el borde opuesto. Pero el Sol ilumina todo el entorno, incluida la atmósfera desde una misma dirección, de manera que incluso puede darse una situación en la que el lado más cercano aparentemente al Sol de una nube resulte más oscuro que el opuesto, debido a que el Sol realmente ilumina la nube por encima y no lateralmente.

Los aviones a reacción proporcionan la formación de largas estelas de vapor de agua cuando la atmósfera está fría o húmeda que se comportan como un tipo de nubes en el que se pueden visualizar sombras cuando hay una fina capa de nubes bajo ella. Como la sombra se encuentra más cerca del suelo que la estela, se verá más alejada del Sol que ella por un efecto de perspectiva (Figura 17). También debido a la perspectiva, si el avión sigue una trayectoria aparente en la misma línea visual del observador, la sombra de la estela se hallará entre ésta y el observador.



Figura 17 (página anterior). Estela de avión y sombra. Al estar más cerca del suelo la sombra que la estela, se ve más alejada del Sol. En la imagen también se puede apreciar la formación de un halo de 22° y más débilmente, un pilar solar. Foto Fredrik Holm, Islandia.

Sombras de la vegetación. Aunque no se trata propiamente de un fenómeno atmosférico, la luz solar genera un interesante fenómeno óptico natural muy cotidiano por otra parte, pero que pasa inadvertido normalmente. La vegetación, como las hojas de los árboles, produce una proyección en el suelo de numerosos círculos luminosos. Los espacios entre las hojas actúan como el estenopé u orificio de una cámara oscura, produciendo múltiples imágenes del Sol que se muestran en el suelo. Las imágenes no son definidas, ya que el tamaño del estenopé es relativamente grande (cuanto menor sea, la imagen se mostrará más nítida) y se aparecen elípticas, ya que los rayos solares inciden en dirección oblicua. Si el Sol se encontrara en el cenit, las imágenes se verían circulares.

Estas imágenes destacan durante un eclipse solar de fase profunda. Si el eclipse es parcial se mostrarán como lúnulas que reproducirán la fase u ocultación del fenómeno (Figura 18). En un eclipse anular toman el sorprendente aspecto de aros luminosos.



Figura 18. Curioso aspecto de la proyección del follaje de árboles sobre el suelo, mostrando numerosas imágenes de lúnulas luminosas, que son proyecciones del disco solar fuertemente eclipsado. Eclipse solar 3 de Octubre de 2005. Foto Isabel Graboleda.

Corona de santo. En ocasiones, cuando el Sol se halla poca altura sobre el horizonte y el observador proyecta una larga sombra sobre una superficie de hierba, puede observarse una débil luminosidad o aureola en torno a la zona de la sombra de la cabeza. Este brillo es conocido por *corona de santo* o *luz sagrada*, expresión que proviene de la palabra alemana *Heiligenschein* (Figura 19).



Figura 19 (página anterior). Corona de santo producida sobre un césped húmedo por la niebla. Foto MBZ.

La corona de santo se muestra sobre un césped bien cortado y erguido, resultando mejor visible cuando el observador se mueve, aunque su visibilidad variará de una zona a otra. Este fenómeno resulta asimismo visible desde una cierta distancia, como desde aviones o globos aerostáticos que sobrevuelan bosques.

La corona de santo se produce por un efecto de *ocultación de sombra*. Es decir, la hierba que se encuentra en el punto antisolar o cerca de él tapa su propia sombra (al encontrarse en la línea de proyección solar) resultando en conjunto visible las superficies iluminadas, con pocas sombras (Figura 20). A medida que nos desplazamos del punto antisolar se producen más sombras y el efecto de la corona de santo desaparece. Este resultado también se produce al dirigir la mirada fuera del punto antisolar, ya que el reflejo de las zonas alrededor del punto antisolar se perderá. Así si hay dos observadores contiguos, únicamente cada de uno ellos observará su propia corona de santo.

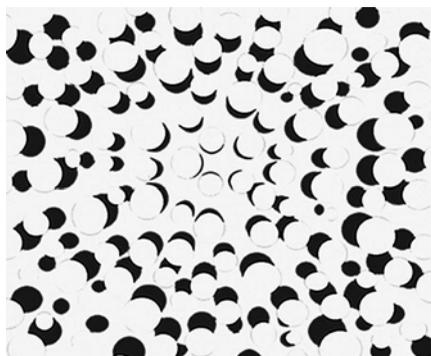


Figura 20. Efecto de ocultación de sombra. Cada círculo blanco proyecta una sombra (los círculos negros). Las sombras se hacen más visibles a medida que se alejan del punto antisolar, situado en el centro de la figura.



La forma y el brillo de la corona de santo depende de la forma y reflectividad de los objetos sobre los que se dirige el punto antisolar. Sobre hierba húmeda, que posee la forma de pequeñas hojas alargadas, se originan zonas alargadas muy iluminadas, sobre todo sobre la sombra de la cabeza. La hierba húmeda o con rocío está compuesta por pequeñas gotas de agua esféricas depositadas en su superficie que actúan como minúsculas lentes concentrando la luz sobre la hoja, que es reflejada casi en la misma dirección de incidencia. En el caso de sombras de santos vistas desde el aire, por ejemplo, sobre bosques, la corona de santo se muestra más circular debido a que cada uno de los árboles vistos desde una posición elevada y alejada, aparece bastante circular.

Se ha observado un fenómeno equivalente cuando la sombra es proyectada sobre una superficie polvorienta. En este caso se le denomina «*heilighenschein seco*» o «*corona de santo seca*». Por ejemplo, los astronautas que han caminado por la superficie lunar han observado coronas de santo en sus sombras.

La corona de santo puede fotografiarse si bien debe tenerse en cuenta que la cámara debe situarse junto a los ojos del observador, para que se alinee con la dirección antisolar del mismo.

El efecto de ocultación de sombra, causante de la corona de santo, se produce asimismo durante la variación del brillo lunar a lo largo de su periodo de giro alrededor de la Tierra, durante el cual nuestro satélite mostrará todas las fases, desde un fina lúnula a Luna llena. Debido a que la superficie lunar

posee accidentes orográficos (como montañas y valles) y no es una superficie lisa, se proyectan sombras. Estas sombras son más largas cuando la fase es cercana a nueva, de manera que el brillo lunar es menor de lo que cabría esperar que si fuera una superficie sin accidentes. A medida que el ciclo lunar se aproxima a la fase de llena, las sombras lunares disminuyen hasta desaparecer por completo durante el plenilunio⁶.

En Luna llena el brillo alcanza el máximo, casi tanto como si fuera una superficie regular. A este fenómeno se le conoce por *abrillantamiento de oposición*, y ocurre también con el planeta Marte, que posee una superficie visible irregular.

Bandas de Mach. Cuando se producen situaciones en la Naturaleza como la de la Figura 21, en el que se ve un paisaje con una transición escalonada de tonos más claros a más oscuros (o viceversa), se produce el fenómeno de las bandas de Mach. Cada zona de un mismo tono parece más clara por el borde que está junto al área más oscura y se percibe más oscura por el borde que se encuentra junto a la zona más clara del área contigua, produciéndose un efecto de ondulaciones.

⁶ En teoría durante el plenilunio o fase llena, no deberían existir sombras sobre la Luna, pero realmente siempre se pueden ver algunas sombras (o una ligera fase) en torno a la región del polo norte o el polo sur lunar. Para que no hayan sombras, la Luna debe encontrarse en una situación de eclipse, es decir, se deben alinear perfectamente el Sol, la Tierra y la Luna.



Figura 21. Un paisaje con diferentes planos como el de la imagen, puede mostrar las bandas de Mach. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

Este fenómeno conocido por *bandas o franjas de Mach*, fue estudiado e interpretado en la década de 1860 por el físico austriaco Ernst Mach. Para comprenderlo podemos ver la Figura 22. La curva negra sólida representa la cantidad de luz que se refleja desde la figura el parte superior. La curva roja representa el brillo de esta figura como es normalmente vista.

Lo que se percibe es una barra oscura a la izquierda del punto donde la figura empieza a volverse más clara. Esta barra es ligeramente más oscura que el área a la izquierda de ella. En el punto donde el brillo deja de incrementarse, se ve una barra brillante.

Las bandas o franjas de Mach no constituyen realmente un fenómeno físico, sino un efecto de la percepción en la visión. Cuando una célula del ojo recibe luz, las células que la rodean disminuyen su sensibilidad a la luz.

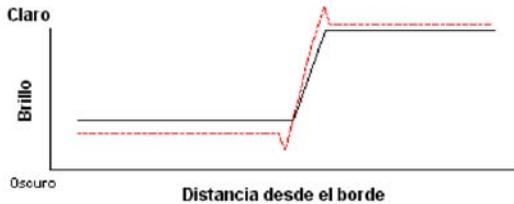
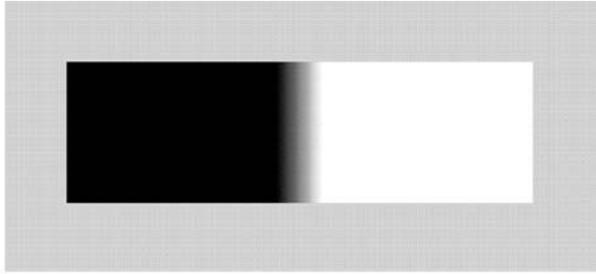


Fig. 22. Explicación de las bandas de Mach. La banda superior muestra una zona central de transición gradual del negro al blanco. La curva negra sólida del gráfico inferior representa la cantidad de luz reflejada de la figura superior. La curva roja representa el brillo de esta figura tal como es percibido.

Este fenómeno fisiológico se llama *inhibición lateral* y se trata de una adaptación evolutiva para una mejor detección de las formas.

El efecto también se puede fotografiar, pues se produce el mismo fenómeno fisiológico al observar la imagen que en la visión directa.

2 - La atmósfera

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa que rodea a la Tierra. Está compuesta principalmente por nitrógeno (78,1%) y oxígeno (20,94%), con pequeñas cantidades de argón (0,93%) y



dióxido de carbono (0,033%), y proporciones aún menores de vapor de agua, neón, helio, criptón, hidrógeno y ozono. También hay partículas sólidas y líquidas en suspensión (aerosoles), tanto de origen inorgánico como orgánico y de procedencia natural o debida a la actividad humana.

Los componentes de la atmósfera se encuentran concentrados cerca de la superficie, comprimidos por la atracción de la gravedad. Conforme aumenta la altura la densidad de la atmósfera disminuye con gran rapidez. En los 5,5 kilómetros más cercanos a la superficie se encuentra la mitad de la masa total y antes de los 15 kilómetros de altura está el 95% de toda la materia atmosférica.

El aire mantiene la proporción de los distintos componentes de gases atmosféricos casi invariable hasta los 80 km. de altura.

2.1. Estructura

La atmósfera se puede dividir en diferentes capas (Figura 23):

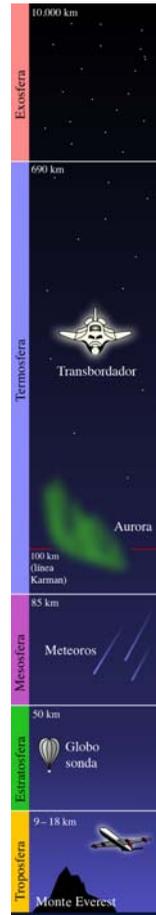
- La troposfera, que abarca hasta un límite superior llamado tropopausa que se encuentra a los 9 Km en los polos y los 18 km en el ecuador. En ella se producen importantes movimientos verticales y horizontales de las masas de aire (vientos) y hay relativa abundancia de agua, por su cercanía a la hidrosfera⁷. Por todo esto es la zona de formación de las nubes y de los fenómenos climáticos: lluvias, vientos, cambios de tem

⁷El sistema material formado por el agua que se encuentra bajo, en y sobre la superficie de la Tierra.

peratura, etc. En la troposfera la temperatura va disminuyendo con la altitud, hasta llegar a -70°C en su límite superior.

Figura 23. Representación esquemática de la composición vertical de la atmósfera terrestre. Gráfico Wikipedia.

- La estratosfera comienza a partir de la tropopausa y llega hasta un límite superior llamado estratopausa que se sitúa a los 50 kilómetros de altitud. En esta capa la temperatura cambia su tendencia y va aumentando hasta llegar a ser de alrededor de 0°C en la estratopausa. Casi no hay movimiento en dirección vertical del aire, pero los vientos horizontales llegan a alcanzar frecuentemente los 200 km/h, lo que facilita el que cualquier sustancia que llega a la estratosfera se difunda por todo el globo con rapidez. En esta parte de la atmósfera, entre los 30 y los 50 kilómetros, se encuentra el ozono.



- La Mesosfera, se extiende de los 50 a los 80 km. de altura y contiene solo el 0,1 % de la masa total del aire. En la mesosfera la temperatura disminuye con la altura hasta llegar a unos -80°C . En esta capa tienen lugar fenómenos de ionización y reacciones químicas, y es aquí donde se observan los meteoros que se desintegran en la termosfera. En lími-



te superior constituye la mesopausa.

- La termosfera o ionosfera constituye la parte permanentemente ionizada de la atmósfera debido a la radiación solar. Puede alcanzar temperaturas de 1.500°C (por eso se le denomina asimismo termosfera), aunque la densidad del medio es muy baja. Se extiende desde la mesopausa hasta más allá de los 500 km. de altura, formando la zona inferior de la magnetosfera⁸. La ionosfera permite que la atmósfera superior refleje las ondas de radio emitidas desde la superficie terrestre posibilitando las telecomunicaciones. En las zonas polares se forman las auroras por efecto del viento solar.

- La exosfera es la capa superior de la atmósfera, a partir de los 650 km., y en contacto con el espacio exterior. En esta capa la temperatura no varía y el aire pierde sus cualidades fisicoquímicas. Su límite superior se localiza a altitudes que superan los 1.000 km, haciendo de zona de tránsito entre la atmósfera terrestre y el espacio interplanetario.

2.2. El color del cielo

Si nuestro planeta no tuviera atmósfera, el cielo se mostraría siempre negro, aún incluso con la presencia del Sol. Los colores que aparecen en el cielo son el resultado de la interacción de la luz solar con la atmósfera.

⁸ Región en torno a la Tierra en la que el campo magnético terrestre desvía la mayor parte del viento solar, formando un escudo protector contra las partículas de alta energía procedentes tanto del Sol como del espacio.

Las diferentes moléculas que forman la atmósfera, así como la humedad, acompañada de partículas de polvo y de ceniza son las responsables de producir en el cielo las múltiples manifestaciones de color. Durante el día el Sol ilumina la atmósfera produciendo el característico cielo azulado. Este efecto de difusión o esparcimiento de la luz solar en el aire es conocido como luz atmosférica.

Sin embargo la distribución del color del cielo no es uniforme en toda su extensión, sino que varía en intensidad y tonalidad de una zona a otra del cielo (por ejemplo del cenit al horizonte, o en el área cercana al Sol). También se producen cambios apreciables a lo largo de las horas del día, así como en días diferentes (Figura 24).



Figura 24. Iluminación y aspecto de la misma zona del cielo (hacia el oeste), por la mañana (izquierda) y poco después de la puesta de Sol.

Foto J.C. Casado www.starryearth.com

La difusión de la luz solar atmosférica depende de la relación entre la longitud de onda y el tamaño de las partículas presentes en la atmósfera.

Si las partículas son mayores que la longitud de onda de la luz, la difusión es independiente de ésta. El comportamiento de las partículas grandes de la atmósfera en este caso es como si fueran pequeños espejos, sin preferencia por ninguna longitud de onda de la luz solar incidente. Se trata de la dispersión Mie (1908), en la que se produce más difusión hacia delante que en ninguna otra dirección.

Este tipo de difusión de la luz sucede, por ejemplo, con las nubes del cielo, que están compuestas por gotas de agua de gran tamaño en relación a la longitud de onda de la luz visible. Estas gotas reflejan la luz solar que incide sobre ellas sin alterar su color, por lo que aparecen blancas en el cielo (Figura 25).



Figura 25. Nubes de tipo cúmulo sobre una cordillera montañosa. Foto Wikipedia.

Si las partículas son del mismo orden o menores que la longitud de onda, entonces la difusión depende de la misma, siendo mayor a longitudes de onda menores. Es la llamada dispersión de Rayleigh, en la que la intensidad de la luz dispersada depende inversamente de la cuarta potencia de la longitud de onda ($\sim \lambda^4$).

Esto origina que una pequeña variación de la

longitud de onda suponga un gran cambio en la intensidad de la luz dispersada. A diferencia de la dispersión Mie, la difusión de la luz se realiza en este caso prácticamente homogénea en todas las direcciones.

En consecuencia en la atmósfera terrestre la luz azul se dispersa mucho más que la luz roja, por lo que vemos el cielo azulado en todas direcciones. La mayoría de la luz azul proveniente de la luz solar no llega directamente del sol, sino después de haber experimentado una difusión en la atmósfera. Si miramos un punto cualquiera del cielo, nuestros ojos reciben luz correspondiente a la longitud de onda del azul, que al atravesar la atmósfera se ha dispersado, hasta llegar a nosotros. El resto de colores apenas se dispersa, por lo que únicamente los recibimos directamente del sol.

Este es el motivo, no solo de que el cielo sea azul, sino de que el azul es más intenso cuanto más lejos del sol miramos, ya que a medida que nos acercamos a la posición del sol, recibimos más cantidad del resto de colores.

El hecho de que el cielo sea vea azul y no violeta (color de menor longitud de onda), se explica por la propia fisiología de la visión humana. Nuestros ojos tienen receptores para ver tres rangos de color (llamados *conos*): rojo, verde y azul. El resto de colores estimula varios tipos de conos a la vez, lo que permite obtener toda la gama cromática a partir de la combinación de esos tres colores. Así, la luz amarilla excita los conos correspondientes al rojo y al verde. Por otro lado, al producirse una gran difusión del color

violeta, disminuye mucho su intensidad. Estas dos causas hacen que veamos y se capte el cielo azul.

La variación del color azulado en días diferentes se debe a la proporción de partículas en suspensión en la atmósfera. En los días «limpios» la presencia de estas partículas es relativamente baja, por lo que el cielo se ve de un color azul intenso, al dominar sobre todo la dispersión Rayleigh. En cambio otros días el tono azulado atmosférico se vuelve mucho menos intenso, debido a una mayor presencia de partículas (dispersión Mie).

El cielo cerca del horizonte es más brillante y blanquecino por una mayor difusión de la luz de longitudes de onda mayores, al existir mayor grosor de atmósfera en dirección horizontal. Por el contrario la zona menos brillante del cielo es el cenit, ya que el espesor de la atmósfera en esa dirección es mínimo (Figura 26).



Figura 26. Fotografía del cielo, en un día de buena transparencia atmosférica, desde el horizonte hasta el cenit. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

Si se gana altura respecto al nivel de mar, por ejemplo desde una montaña, el cielo en dirección al cenit se ve sensiblemente más oscuro y azulado que el resto, al ir eliminando la parte de la atmósfera que contiene elementos dispersores de la luz blanca.

Cuando el sol está cerca del horizonte, la luz tiene que atravesar una mayor cantidad de atmósfera que cuando está alto en el cielo. La difusión aumenta, no sólo en la luz azul, sino en la del resto de colores. El rojo es el color con longitud de onda mayor, por lo que apenas experimenta difusión. Al ser el único color que nos llega directamente del sol, lo vemos rojo. El naranja y amarillo se difunden, por lo que el cielo que rodea el sol es de esos colores. El verde se esparce más, y aunque no se puede apreciar en todas las puestas de sol, en ocasiones (con una atmósfera muy limpia) se puede distinguir un tenue color verde separando las zonas amarillentas y azuladas de cielo (Figura 27). El azul y violeta se difunden mucho más, y lejos del sol, podemos ver aún algo de estos colores.



Figura 27. Aspecto del cielo hacia el horizonte oeste poco después del ocaso solar, Fotografía obtenida desde el Pirineo navarro a casi 2.000 metros de altitud. Foto J.C. Casado, www.starryearth.com

2.3. Visibilidad atmosférica

Los objetos distantes de un paisaje aparecen más tenues que los más cercanos, aunque su visibilidad puede variar mucho de un día a otro. Este efecto es debido a una dispersión de la luz producida por las moléculas y partículas atmosféricas. El aire que se encuentra entre el observador y el objeto dispersa algo de luz solar en dirección al observador, al mismo tiempo que la luz proveniente del objeto se dispersa de manera directamente proporcional a la distancia a éste, reduciendo su contraste y visibilidad. Si en la atmósfera existe una alta proporción de partículas o el objeto está lejano, puede llegar a desaparecer. Este fenómeno, bien cotidiano, se conoce como *perspectiva de distancia* o *perspectiva aérea* y determina un límite en el alcance visual de un objeto situado en la lejanía (Figura 28).



Figura 28. El paisaje lejano, como las montañas que se observan en el fondo de esta imagen aparecen difusas y faltas de color por efecto de la perspectiva aérea. Foto Juan Pedro Gómez.

Cuando la atmósfera está limpia los objetos distantes se muestran nítidos y contrastados, produciendo un aspecto artificial en el paisaje y haciendo difícil la estimación de distancias. En contra de lo que cabría esperar, frecuentemente la visibilidad es mejor en días nublados que despejados, debido a que la capa nubosa impide que el Sol ilumine directamente el aire situado bajo ésta, reduciendo la dispersión de luz atmosférica.

Como la difusión de la luz atmosférica depende de la longitud de onda (dispersión Rayleigh), la visibilidad de objetos distantes es máxima en la luz roja (menor dispersión) y mínima en el azul. Se ha calculado que en condiciones perfectas (aire sin partículas) se podrían distinguir objetos situados a más de 300 km. de distancia (para la longitud de onda del color verde, que corresponde a la máxima sensibilidad de la visión en condiciones de luz diurna).

En situaciones de niebla la visibilidad se reduce mucho, ya que la niebla está formada por gotitas de agua. Cuanto mayor sea el tamaño de las gotas de agua que forman la niebla, ésta será más espesa, al dispersar más luz.

2.4. Polarización

Atmosférica

Una gran parte de la luz atmosférica está polarizada. Según se puede comprobar mediante un filtro polarizador, la mayor parte de la luz polarizada proviene de una zona del cielo que se encuentra perpendicular a la posición del sol. Si éste se encuentra cerca del hori-

zonte, la zona de polarización se concentra en una franja de unos 30° de anchura que se distribuye de horizonte a horizonte pasando por el cenit (Figura 29). Por el contrario, si el Sol se encuentra alto en el cielo la zona de polarización se sitúa cercana al horizonte a lo largo de éste.

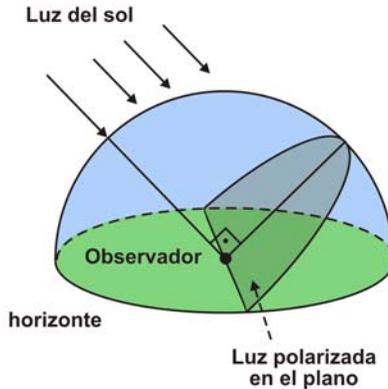


Figura 29 . En el cielo se alcanza la máxima polarización en una zona situada perpendicularmente a la posición del Sol.

La luz de las nubes no está polarizada, de manera que mantienen su brillo con un filtro polarizador, lo que se aprecia claramente cuando se encuentran en la zona de máxima polarización del cielo, contrastándose notablemente con el cielo (Figura 30).

Con un filtro polarizador también se reduce la luz atmosférica entre el observador y el objeto. Este efecto se acentúa más en los días en que la atmósfera está limpia de partículas, lo cual permite percibir mejor los objetos lejanos, al aumentar la perspectiva

de distancia. Además los colores del paisaje y de los objetos se mostrarán más saturados, al eliminarse en gran parte el velo azulado debido a la dispersión atmosférica.

*Figura 30.
Comprobación de la polarización de la luz del cielo. Arriba sin filtro polarizador, el cielo muestra un aspecto habitual. Abajo, mediante un filtro polarizador se puede observar una banda oscura en el cielo, debido a la luz polarizada absorbida por el filtro. Foto J.C. Casado
www.starryearth.com*



Por reflexión

Como se ha señalado más arriba en toda reflexión se produce una cierta absorción por parte de la superficie reflectante. Las sustancias lisas y no metálicas absorben la luz que se encuentra polarizada en la dirección perpendicular a su superficie, de manera que la luz reflejada en el plano paralelo a la superficie se encuentra muy polarizada.

La polarización por reflexión tiene una fuerte dependencia con el ángulo de incidencia de la luz. La máxima polarización se produce, para una sustancia determinada, cuando el rayo reflejado es perpendicular a la dirección del rayo refractado en la sustancia. Este ángulo

es conocido como *ángulo de Brewster* o *ángulo de polarización*, aunque alrededor de este valor también hay una polarización importante.

Los fenómenos óptico-atmosféricos en los que interviene la reflexión presentan polarizaciones intensas, como el arco iris y los halos. Estos últimos ofrecen una gran diversidad y la polarización depende de cada fenómeno en concreto.

El ojo humano es débilmente sensible a la polarización, sin la necesidad de filtros, mediante un fenómeno llamado *haz de Haidinger*. La luz polarizada crea una figura muy tenue, en forma de doble huso de color amarillento, de unos 2° o 3° de longitud y situado en el centro del campo visual. La orientación de la figura está relacionada con el plano de polarización de la luz, de manera que su eje mayor es perpendicular al plano de polarización (Figura 31). Algunas personas son más sensibles al haz de Haidinger, de manera que lo pueden ver mirando a un cielo despejado.

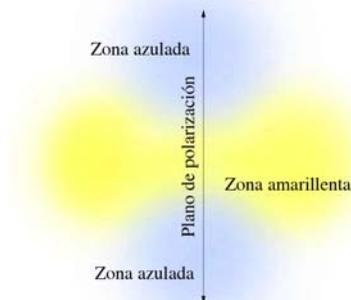


Figura 31. Simulación del haz de Haidinger para luz polarizada verticalmente. El tamaño y la intensidad del haz se han incrementado para una mejor claridad. Imagen Wikipedia.

3 - Fenómenos ópticos de la atmósfera

Dada la enorme variedad de estos fenómenos los hemos agrupado según su origen al interaccionar la luz con la atmósfera, aunque en muchos de ellos intervienen varias efectos ópticos al mismo tiempo. Por ejemplo, en un arco iris se producen reflexiones, refracciones y dispersiones (además de otros fenómenos de óptica ondulatoria).

3.1. Fenómenos atmosféricos de óptica geométrica

3.1.1. Fenómenos de reflexión

Arco iris. Los arco iris constituyen uno de los fenómenos ópticos atmosféricos más populares y hermosos. Aunque no ocurren tan a menudo como parece, existen lugares donde las condiciones atmosféricas o locales hacen frecuente su aparición.

El arco iris se muestra en la zona del cielo contraria a la que se encuentra el Sol. De hecho el arco iris es parte de un círculo cuyo centro es el punto antisolar o lugar diametralmente opuesto al Sol (Figura 32).

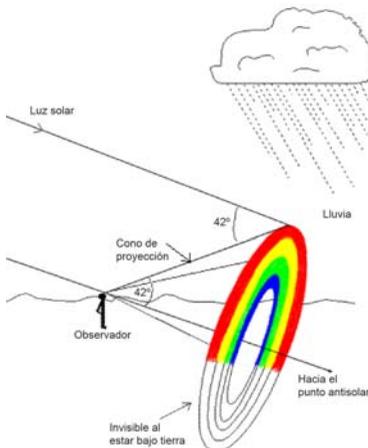


Figura 32. Esquema explicativo de la formación del arco iris.



Para que se produzca este fenómeno es necesario que el Sol brille y se sitúe cerca del horizonte. Asimismo debe llover en la zona opuesta del cielo (a veces puede ser suficiente con las gotitas de agua de la niebla) y el observador estar situado entre el Sol y la lluvia.

Los arco iris también se forman frecuentemente en zonas de cataratas. Cuanto más bajo se encuentre el Sol, se verá una mayor fracción del arco hasta realizar un semicírculo. Pero si estuviéramos en el aire (en un avión o en un globo) veríamos el círculo completo.

Una explicación completa del arco iris requiere la teoría ondulatoria de la luz, aunque mediante la óptica geométrica se puede describir su mecanismo, tal como hizo Newton en 1675.

A pesar de parecer estar situado a una determinada distancia, el arco iris no es más que una proyección de la luz solar sobre las gotas de lluvia que la reflejan y dispersan en sus colores constitutivos. El observador se sitúa en el vértice del cono de proyección, de manera que cada uno ve su arco iris personal, aunque el tamaño angular de los arcos sea el mismo. De este modo, por ejemplo, un observador relativamente cercano a la lluvia que forma el arco iris puede contemplar el arco completo y otro situado más lejos, verá únicamente un fragmento, debido a que desde su situación las gotas de lluvia que producen el arco iris se encuentran a menos de 42° de altura sobre el horizonte (Figura 33).



Figura 33. Parte de arco iris visible producido por una lluvia lejana al observador. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

Cuando la luz procedente del Sol entra en una gota de agua, se refracta al pasar de un medio a otro (de aire a agua), experimentando una dispersión. En la parte posterior de la gota se produce una reflexión, aunque gran parte de la luz la atraviesa, al ser el agua un medio transparente. Al volver a pasar al aire sufre una nueva refracción (Figura 34). La

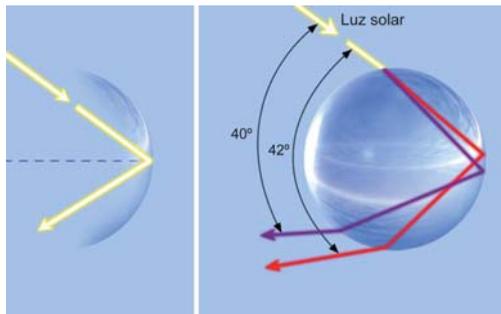


Figura 34. Esquema de la reflexión de la luz en una gota de lluvia para producir el arco iris. A la derecha se muestra la reflexión para los dos colores extremos del espectro visible. Dibujo Thomson Education.

luz que emerge de la gota de agua (suponiéndola esférica) presenta un ángulo característico con respecto al ángulo de incidencia de la luz solar que depende de la longitud de onda, siendo de unos 42° para el rojo y de 40° para el violeta. Este ángulo de desviación hace que el arco iris se muestre como una franja de colores, ya que en caso contrario aparecería como un brillo difuso alrededor del punto antisolar.

Por lo tanto si el Sol se halla en el horizonte el arco iris se verá como un enorme semicírculo de 84° de diámetro (Figura 35). A medida que el Sol se encuentra más alto sobre el horizonte, la parte visible de arco iris va disminuyendo. Cuando el Sol alcanza los 42° de altura el arco iris desaparece por completo, puesto que los rayos de luz provenientes del arco iris pasan sobre el observador.



Figura 35. Fotografía de un arco iris cerca de la puesta de Sol. El arco iris se muestra como un semicírculo y aparece enrojecido, así como el paisaje. También resulta visible el arco secundario. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

La anchura de un arco iris es mayor que lo que predice la teoría (alcanza casi 3°), debido a que el Sol no es una fuente de luz puntual y porque los rayos de luz que forman el arco

iris no son completamente paralelos.

En muchas ocasiones, además del arco iris principal (*arco primario*), más interior y luminoso, que muestra la secuencia de colores desde el violeta hasta el rojo hacia fuera, se puede ver otro arco iris situado paralelamente y más externo. Éste es más tenue y ancho, con los colores invertidos respecto al principal, y recibe el nombre de *arco secundario*, situándose a 51° del punto antisolar.

Para originarse un arco iris secundario son necesarias dos reflexiones y dos refracciones en las gotas de agua (Figura 36). En cada reflexión experimenta una notable pérdida de luz, lo que explica por qué el arco secundario es mucho más tenue que el primario.

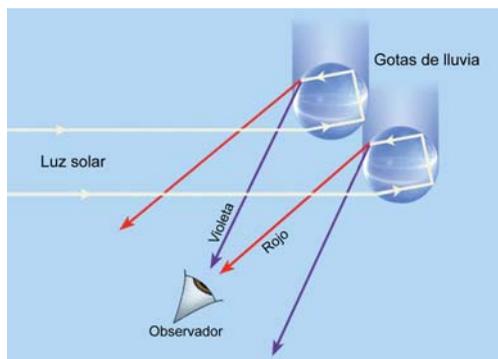


Figura 36. Esquema de la reflexión de la luz en gotas de lluvia para la formación del arco secundario. Dibujo Thomson Education.

La parte del cielo encerrada por el arco primario se ve más brillante que el resto, en tanto que el espacio situado entre ambos arcos aparece más oscuro que el resto del cielo (*banda de Alexander*), debido a que la luz

emergente de las gotas de agua se produce bajo un ángulo determinado (Figura 37). En ocasiones excepcionales puede llegarse a apreciarse otro arco iris externo, el terciario, muy tenue. De hecho en condiciones de laboratorio se han llegado a reproducir hasta quince arco iris superpuestos.



Figura 37. La banda de Alexander se muestra relativamente oscura en esta fotografía donde se observa el arco iris primario y el secundario. Fotografía J.C. Casado, www.starryearth.com

Las gotas que forman el arco iris presentan una variedad de tamaños (desde 0,2 a 5 mm), que hace que las mayores se deformen, mostrándose más achatadas por su parte inferior. Esta deformación produce que el rayo de arco iris saliente de la gotas grandes tenga una desviación mayor que en las gotas pequeñas (esféricas), lo que hace que la sección superior del arco iris sea habitualmente menos brillante, debido a una menor aportación de rayos de luz provenientes de las gotas de todos los tamaños.

La intensidad de los colores del arco iris, su visibilidad y el número de bandas visibles de cada color cambian de un arco iris a otro

en función del tamaño de las gotas de agua que producen el fenómeno, así como el color y el brillo del fondo contra el que aparece.

En ocasiones se observa la presencia de varios arcos estrechos de colores alternados, rosa y verde claros, junto al arco primario por su zona interior, llamados *arcos supernumerarios* (Figura 38). La anchura de los arcos supernumerarios depende del tamaño de las gotas que forman el arco iris, siendo más anchos si las gotas son más pequeñas. Su explicación requiere la óptica ondulatoria, mediante interferencias de ondas entre los rayos que siguen caminos de longitud ligeramente diferente en el interior de las gotas de agua. Así, los rayos desfasados en media longitud de onda interfieren destructivamente y producen las franjas oscuras entre los arcos supernumerarios.

Figura 38. Arcos supernumerarios en el interior del arco iris primario, visibles como estrechas bandas de colores violeta y verde repetidos. Se ha incrementado el contraste de la imagen para una mejor visualización. Foto Andrew Dum, Wikipedia.



La luz del arco iris se encuentra intensamente polarizada, al tratarse de luz reflejada. De hecho el ángulo de reflexión en el interior de una gota que forma el arco iris se encuentra muy cerca del ángulo de Brewster para el agua (véase apartado 2.4.). Al tratarse de una polarización por reflexión, el plano de polarización es paralelo a la super-

ficie reflectora, lo que hace que en el arco iris siga la curva del mismo, es decir, sea tangencial. Con un filtro polarizador se puede comprobar la polarización girándolo hasta hacer desaparecer la zona superior mientras son visibles los extremos y viceversa.

El **arco iris por reflexión** constituye un tipo especial y muy infrecuente de arco iris. Para que se origine es necesaria una gran superficie de agua entre el Sol y el observador (un lago o el mar), ya que se produce por la reflexión de la luz solar en el agua. Cuando en estas condiciones se forma un arco iris se genera un segundo arco iris en torno al primario, más débil que éste y que intersecciona en su base (Figura 39). A menudo solo se ve la zona cercana a la intersección como una columna irisada.



Figura 39 . Arco iris por reflexión obtenida en la bahía Skagit (Washington, EE.UU.). La imagen se ha contrastado para una mejor visión del fenómeno. Foto Ferry L. Anderson, Wikipedia.

El **arco iris reflejado** aparece cuando hay una gran extensión de agua entre el observador y la lluvia que produce el arco iris. Se puede observar como un reflejo del arco iris

normal en la superficie de agua, aunque realmente no se trata de una reflexión del arco iris que se ve en el cielo. Se debe a la luz que proviene de gotas de agua más alejadas que aquellas que generan el arco iris principal. Se puede comprobar que no es un reflejo del arco iris principal porque sus extremos no coinciden.

Los **arco iris horizontales** se producen en el suelo mediante pequeñas gotas de agua que se encuentran en su superficie o a poca distancia de ella (situación de niebla despejándose con formación de rocío). En este caso la forma del arco iris varía con la altura del Sol sobre el horizonte. Si el Sol se halla en el cenit, el arco iris será circular. Si el Sol está próximo al horizonte se forma una hipérbola, con la parte superior cercana a los pies del observador y los extremos proyectándose en la distancia.

Cuando hay nubes situadas entre la posición del Sol y el arco iris, éstas pueden proyectar sombras que oculten secciones del mismo. El arco iris se mostrará cortado en segmentos de distinto tamaño, dispuestos en un arco semicircular. En este caso se habla de *ruedas de arco iris* o *rain dogs*, como lo llaman los marinos anglófonos.

El **arco iris rojo** se produce con el Sol situado muy cerca del horizonte, debido a una absorción de todos los colores excepto del rojo. Son arco iris muy espectaculares pues muestran prácticamente toda la extensión semicircular. A veces resulta extraordinariamente brillante y puede mostrarse visible hasta diez minutos tras la puesta de Sol.

Un fenómeno sorprendente es el **arco iris blanco**, que aparece en condiciones de niebla. El arco iris se muestra desprovisto de sus arcos de color y se presenta como una ancha banda blanca. Debido a que las gotas de agua que forman la niebla son pequeñas, las franjas roja y azul se superponen, desapareciendo el color característico del arco iris, aunque en ocasiones al no ser completa esta superposición se observan franjas rojizas.

Los arco iris se pueden formar también con la luz de la Luna, produciendo **arco iris lunares**, aunque resultan mucho más tenues que los normales. Las mejores condiciones se dan en el plenilunio (luna llena) y resultan difícilmente identificables por la pérdida de sensibilidad del ojo al color en bajas condiciones de iluminación, aunque la fotografía mostrará todas sus tonalidades (Figura 40). Un buen lugar para observarlos es una zona de cataratas.



Figura 40. Un brillante arco iris lunar. A la izquierda se muestra la constelación de Orión, en tanto que destaca la presencia del planeta Venus casi en el centro bajo el arco primario. Foto Ron Ratkowski.

Círculo parhético. Consiste en una banda

incolora muy débil, paralela al horizonte y a la misma altura que el Sol, que aparece en contadas ocasiones. Puede alargarse por el cielo formando un círculo que se denomina círculo parhéliico o círculo horizontal (Figura 41).



Figura 41. Un nítido círculo parhéliico (visible como una banda horizontal) sobre la base del polo sur Amudsen-Scott. También son visibles un halo de 22° , con un parhelio y un pilar solar. Se ha ocultado el Sol para evitar un deslumbramiento en la imagen. Foto John Bortniak (NOAA), Wikipedia.

Es un fenómeno ligado a los halos, aunque se produce por la reflexión de la luz en las caras de cristales de hielo, ya sean de forma prismática o plana. Debido a que solo existe reflexión, no se origina una dispersión de los colores y el fenómeno es acromático.

Como los cristales planos también forman los parhelios (véase apartado 3.1.2 Fenómenos de refracción, Parhelios), suelen aparecer al mismo tiempo y formando parte de ellos.

Columnas o pilares. Son visibles como una columna luminosa durante la puesta o salida del Sol, o bien directamente sobre éste, si se encuentra sobre el horizonte (Figura 42). Se debe a la reflexión de la luz en la base de cristales de hielo de forma aplanada, que caen horizontalmente, de manera que cada cristal actúa como un espejo minúsculo reflejando la luz solar hacia abajo.

Figura 42. Un pilar solar fotografiado poco antes de la puesta de Sol. Foto J.C. Casado www.starryearth.com



Un fenómeno de origen análogo se puede producir en noches frías con iluminación artificial, en la que los focos reflejan la luz de cristales que se encuentran cerca del suelo.

Hipohelios. Este fenómeno se observa como una columna de luz bajo el Sol, por lo que se le denomina también pilar inferior o subsol (Figura 43). Se produce por la reflexión de la luz solar en el lado superior de cristales de hielo aplanados. Los mejores lugares para su visión lo constituyen ubicaciones elevadas como cimas de montañas o desde aviones.



Figura 43. Un hipohelio o subsol observado desde un avión.

3.1.2. Fenómenos de refracción

Halos. Los halos son anillos y arcos luminosos que aparecen alrededor del Sol y de la Luna. También se muestran manchas y arcos de colores en torno al Sol (*parhelios*) o alrededor de la Luna (*parselenios*). Se originan con más frecuencia que los arco iris, aunque a menudo pasan desapercibidos al no ser tan llamativos ni brillantes como estos. En las regiones polares suele ser habitual la formación de halos y sus variedades, llegando a trazarse asombrosos dibujos que pueden llegar a cubrir todo el cielo visible.

Los halos se producen cuando en el cielo hay nubes de tipo cirro o cirroestratos, asociadas normalmente a un frente frío. Son nubes altas (más de 6.000 m de altitud) con aspecto de velo, formadas por minúsculos cristales de hielo en vez de por gotas de agua.

Existen muchos tipos de halos, que pueden

tomar la forma de círculos, arcos y manchas de luz. Estas apariencias dependen de la forma del cristal de hielo y del recorrido seguido por la luz a través del mismo, que experimenta diversas refracciones y reflexiones.

La forma básica del cristal de hielo es hexagonal, pudiendo adoptar figuras que van desde prismas (columnas estrechas) hasta delgadas láminas. Esto hace que la familia de halos sea muy amplia, además debido al hecho de que estas figuras geométricas no son regulares a menudo.

Entre los halos más comunes y sus variedades están (Figura 44):

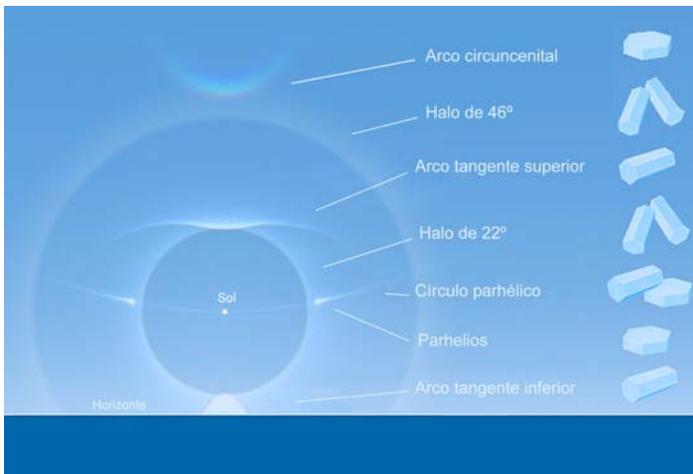


Figura 44. Representación de los principales halos y el tipo de cristal de hielo que los produce. Gráfico Les Cowley, adaptado por J.C. Casado.

El halo de 22°. Este halo es el más habitual, también conocido por «halo menor». Se forma alrededor del Sol o de la Luna como un círculo difuso, de un radio angular de 22° y

una anchura de $1,5^\circ$, aunque frecuentemente no se ve el anillo completo, debido a que la nube que lo origina no cubre una superficie de cielo suficientemente amplia. A veces el borde interior es de tonalidad rojiza cuando se forma en torno al Sol.

El halo se puede ver durante horas, dependiendo de la velocidad con que se mueve el frente asociado a las nubes. El tipo de cristal de hielo determina la visibilidad y definición del halo. Así, los cristales más regulares geoméricamente producirán halos más luminosos y perfectos.

El halo lunar de 22° es más débil que el del Sol y más difícil de ver, aunque en las épocas de plenilunio se pueden detectar con bastante facilidad (Figura 45).



Figura 45. Halo lunar de 22° . La estrella brillante superior es el planeta Júpiter.
Foto J.C. Casado www.starryearth.com

Este halo se produce por la refracción de la luz incidente (solar o lunar) al cruzar la sección transversal hexagonal de cristales de



hielo muy pequeños en forma de columnas. La luz se refracta saliendo por la cara alterna. Para que se forma el halo debe producirse una distribución uniforme de los cristales orientados al azar en la nube. Únicamente los cristales más pequeños caen dando vueltas, ofreciendo una orientación al azar.

Por las leyes de la refracción, la luz que produce el halo es la que experimenta una desviación respecto de la dirección de la luz incidente, siendo este ángulo de 22° .

El halo de 46° . También llamado «halo mayor», es mucho menos frecuente que el halo de 22° y casi nunca aparece completo. Al igual que el halo menor se forma por la refracción en cristales prismáticos de base hexagonal, pero se necesitan que todas sus caras sean lisas. En este caso se produce una refracción entre una de las caras laterales y una base del cristal de hielo, con un ángulo de desviación mínima de 46° .

Halos anómalos. En contadas ocasiones se observan halos con diámetros angulares distintos a los 22° y 46° , formados por cristales de hielo con extremos en forma de pirámide. Suelen mostrarse como anillos concéntricos en torno al Sol con diámetros angulares comprendidos entre los 8° y los 35° .

El arco tangente superior. Se origina con el Sol cerca del horizonte, con el aspecto de dos prolongaciones que sobresalen de la parte superior del halo de 22° . Se produce por cristales de hielo en forma de columna alargada que caen por el aire con el eje mayor situado horizontalmente. A medida que el Sol se encuentra a mayor altura sobre el horizonte,

los arcos se prolongan más, hasta que cuando el Sol se sitúa a más de 40° forma un halo achatado en torno al de 22° denominado halo circunscrito.

Parhelios. Son dos concentraciones irisadas de luz ligeramente alargadas situadas a cada lado del Sol, situadas sobre la línea que traza el diámetro del halo menor, en su parte exterior (Figura 46). A veces aparecen sin que se vea halo alguno o cuando es visible un pequeño fragmento.



Figura 46. Parhelios observados desde el Pirineo navarro. El situado a la derecha del Sol se mostró especialmente brillante, con un gran cromatismo. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

Estas manchas de luz coloreadas se originan por la refracción en cristales de hielo aplastados de forma hexagonal en caras alternas, que caen con su base orientada horizontalmente. La luz que atraviesa el cristal de hielo se refracta asimétricamente, lo que impide formar parhelios con el Sol a más de 60° de altura y hace que el parhelio tome una forma alargada.



Tanto en español como en inglés se les denomina *falsos soles* (*mock suns*, siendo también conocidos en inglés por *sundogs* o *perros del sol*). En muchas ocasiones tan solo resulta visible una de las marcas luminosas.

Su intensidad puede ser notable, sobre todo con el Sol cerca del horizonte, produciendo una viva gama cromática. Cuando la fuente de luz es la Luna se llaman *parselenia* o falsas lunas.

Arcos circuncenitales y circunhorizontales. Los arcos circuncenitales y circunhorizontales pueden llegar a mostrar colores tan intensos como los del arco iris, por lo que se les confunde con éste. Están formados por el mismo tipo de cristal que produce los *parhelios*.

El más frecuente es el primero, que se forma cuando el Sol se encuentra a menos de 32° del horizonte y las nubes altas a más de 46° del Sol. Para diferenciarlo de un arco iris se debe observar que al contrario que éste, se encuentran del mismo lugar del Sol (el arco iris se forma en la posición antisolar), la zona cóncava está orientada al revés del arco iris (hacia el cenit) y asimismo la disposición de los colores de la banda irisada es al contrario que en un arco iris.

Los arcos circunhorizontales aparecen como una franja de color paralela al horizonte, casi sin curvatura, con el Sol situado a más de 58° de éste. Se forman por cristales de hielo en los que la luz se refracta entre una cara vertical y otra horizontal.

Son fenómenos de corta duración, pero si se

forman parhelios a menudo aparecen al pasar la nube que los origina sobre el observador.

Espejismos.

La refracción, como ya se ha visto, produce un cambio en la dirección de los rayos de luz provenientes de un objeto al pasar de un medio a otro de diferente densidad, alterando aparentemente su posición y forma.

Las capas más bajas de la atmósfera terrestre son las más densas, por lo que la luz que las atraviesa experimenta una cierta refracción. Esto afecta tanto a objetos celestes (situados fuera de la atmósfera) en los cuales la refracción es máxima, al tener que atravesar su luz todo el espesor atmosférico, como a cuerpos terrestres lejanos. La refracción atmosférica permite ver objetos que se encuentren por debajo del horizonte⁹. Este fenómeno se denomina *emergencia* (Figura 47).

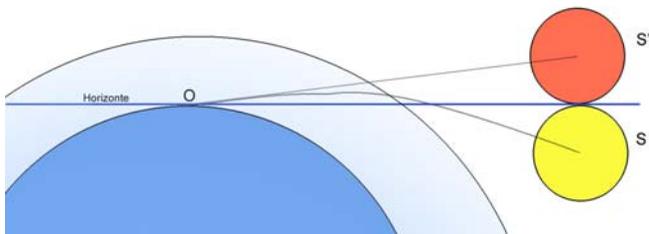


Figura 47. La refracción atmosférica hace que objetos celestes como el Sol (S') resulten visibles para el observador O , cuando en realidad éste ya se ha puesto por el horizonte (S). Esquema Juan Carlos Casado.

⁹ Al hablar de «horizonte» nos referimos al horizonte verdadero, debido a la curvatura de la Tierra, y no al falso horizonte producido por objetos naturales o artificiales como montañas o edificios. Si nos situamos en una zona costera donde se ponga el Sol, el horizonte del mar coincidirá con el verdadero.



Las alteraciones o gradientes de temperatura del aire cercano a la superficie (tierra o mar) producen los espejismos. En un espejismo siempre aparece además de la imagen original, por lo menos una copia invertida de esta imagen.

Los espejismos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

Espejismos inferiores, cuando la superficie está más caliente que el aire situado por encima.

Espejismos superiores, cuando la superficie está más fría que el aire cercano situado por encima.

Espejismos inferiores. Son los más habituales, presentando el aspecto de un reflejo en un charco de agua, que se desvanece al aproximarse. Los objetos que aparecen en el espejismos están muy alejados del observador, llegando a observarse dos imágenes, la normal y otra invertida bajo ésta, de aspecto aplastado, que parece un reflejo en el agua. Este charco aparente es el espejismo del cielo detrás del objeto (Figura 48). La línea imaginaria paralela al horizonte que separa la imagen real y el espejismo se denomina *línea de evanescencia*. Todo lo que aparezca bajo la línea de evanescencia está invertido. Para una mejor visibilidad de los detalles del espejismo, dado su pequeño tamaño aparente, es recomendable utilizar algún instrumental óptico, como unos prismáticos.



Figura 48. Espejismo inferior observado desde el altiplano boliviano, al sur de Oruro. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

El espejismo inferior se produce por la refracción de la luz que pasa a través del aire situado entre el objeto y el observador. El gradiente de temperatura entre el aire en contacto con la superficie caliente y el situado más arriba produce un cambio en la densidad del aire, de manera que los rayos de luz que pasan cercanos al suelo se refractan desde una dirección por debajo del horizonte (Figura 49). Como esta refracción es muy pequeña el objeto que produce el espejismo tiene que estar muy lejano, o el observador mirar a ras de suelo, donde la refracción es más acusada.

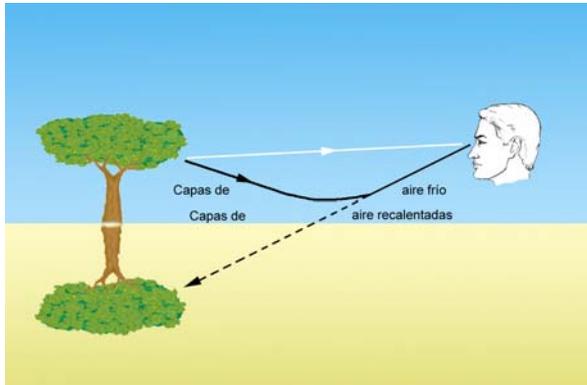


Figura 49. Esquema de un espejismo inferior. El observador ve el espejismo (en la dirección de la línea discontinua) y la imagen directa del objeto (línea blanca). Dibujo Juan Carlos Casado.

Espejismos superiores. Menos frecuente que los espejismos inferiores, son los espejismos superiores en los que además de la imagen normal aparece al menos otra sobre ésta e invertida, que parece flotar en el aire.

Para que se produzca un espejismo superior debe darse una inversión térmica, situación en la que la capa de aire cercana situada por encima de la superficie aumenta su temperatura con la altitud. Las inversiones térmicas son frecuentes en regiones polares y de latitudes altas, cuando se sitúa una zona de altas presiones entre dos frentes fríos. En latitudes medias, las inversiones térmicas se generan sobre todo en lagos y bahías al atardecer del final de primavera y comienzo de verano.

En estas condiciones se observarán fenómenos de emergencia, al producirse una refracción

en dirección hacia el suelo de los rayos de luz procedente de objetos lejanos (Figura 50).

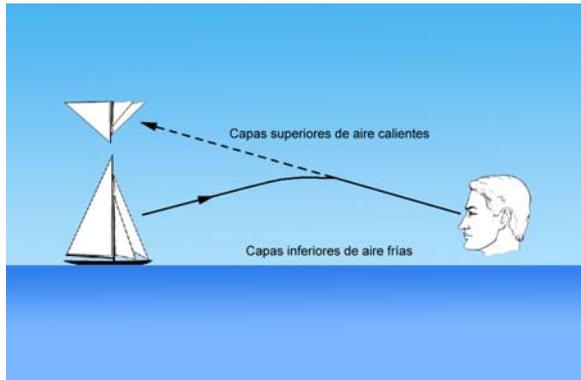


Figura 50. Esquema de un espejismo superior. Con una situación de inversión térmica a unos metros sobre la superficie, se puede ver la imagen invertida y aplastada de la zona superior del objeto (dirección de línea discontinua). El objeto aparece visible por efecto de la refracción, alargado verticalmente. Dibujo Juan Carlos Casado.

Debido a que los gradientes de temperatura no son uniformes habitualmente, la refracción es variable para distintos rayos de luz, produciendo imágenes múltiples del objeto y deformaciones que alargan o comprimen su forma verticalmente.

En ciertas ocasiones se produce un llamativo fenómeno conocido por *fata morgana*¹⁰, consistente en una especie de torres o parapetos que surgen por el horizonte, transformándose y distorsionándose, por lo que popularmente

¹⁰ Nombre en italiano que significa «hada Morgana», en referencia a la hermanastra del rey Arturo, que según la leyenda era un hada de aspecto cambiante.

son conocidos como «castillos en el aire» (Figura 51). El fata morgana es un espejismo superior en el que la imagen se encuentra alargada verticalmente mientras va cambiando de forma debido la refracción variable de los rayos de luz provenientes del objeto por capas aire situadas a mediana altura.



Figura 51. Un fata morgana observado en la costa noruega. Foto Gerd A.T. Mueller, Wikipedia.

Ortos, ocasos y rayo verde. Como se ha visto en el apartado anterior, cuando el Sol y la Luna se sitúan cerca del horizonte¹¹, tanto a su salida (orto) como puesta (ocaso), se acentúan los fenómenos de refracción atmosférica debido al mayor espesor de atmósfera en dirección horizontal.

En el Sol a baja altura la refracción se manifiesta por un achatamiento ostensible de su disco debido a que la luz de su borde superior se refracta algo menos que el de la zona inferior (Figura 52). La posición del Sol poniente también se ve notablemente alterada, pues para este instante se produce un desplazamiento vertical de medio grado, que

¹¹Por razones obvias las observaciones más frecuentes son las puestas de Sol, por lo que salvo mención contraria nos referiremos a este evento. En los ortos la refracción actúa análogamente a como lo hace en los ocasos.

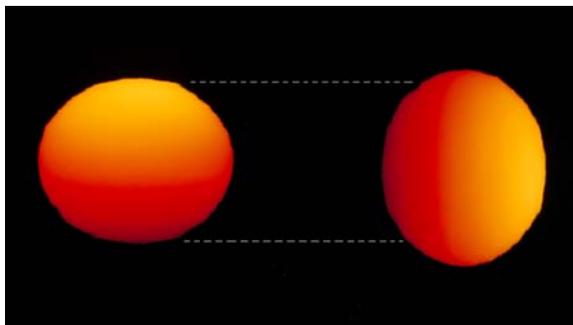


Figura 52. Achatamiento del Sol poniente. A la derecha se ha girado la imagen 90° para comprobar la contracción aparente de su diámetro vertical. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

es precisamente la dimensión aparente del Sol. Es decir, que cuando el borde inferior del Sol toca el horizonte, realmente ya se ha puesto (fenómeno de emergencia).

El disco solar se puede distorsionar si en la línea visual existe una gran superficie caliente o una capa de inversión térmica. Las formas de estas distorsiones varían con las alteraciones de la temperatura del aire.

La distorsión más habitual en la puesta solar sucede cuando existe una gran extensión de agua (como un lago o el mar) más caliente que el aire situado justo por encima de ésta, produciendo un tipo de fenómenos llamados espejismos, tal como hemos visto en el apartado anterior. Cuando el Sol se halla muy cerca del horizonte surge desde éste un estrecho fragmento, que no es sino la imagen solar invertida, que se une al disco solar, confirmando a la figura que se origina la forma de la letra omega mayúscula («Ω») (Figura 53).



Figura 53. Espejismo inferior del Sol, produciendo la figura en forma de Ω . La parte inferior del disco solar aparece como un espejismo justo por encima del horizonte. Fotografiado desde la bahía de San Sebastián por J.C. Casado www.starryearth.com

Si la inversión térmica sucede a poca distancia sobre tierra firme se producen curiosas formas en el disco solar, apareciendo frecuentemente fragmentado en diversos sectores de tamaño irregular (Figura 54).



Figura 54. Secuencia temporal de la fragmentación aparente del disco solar en su puesta, en la costa de Namibia. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

Como el índice de refracción depende inversamente de la longitud de onda de la luz, el color rojo se refracta menos que el azul, produciendo una pequeña dispersión en la luz de los cuerpos astronómicos que se hayan cerca del horizonte. En el disco solar junto al horizonte esta dispersión se puede observar en el borde superior, ya que en el resto del disco los colores se solapan. Debido a la difusión selectiva atmosférica (véase Apartado 2.2. El color del cielo), el sol toma una coloración amarillenta o anaranjada intensa, que puede variar en función de la cantidad de partículas atmosféricas en suspensión. La difusión también provoca una pérdida de la luminosidad del Sol (o cualquier otro objeto celeste), llamada extinción atmosférica.

La parte inferior del disco solar es rojiza por la dispersión, por lo que cabría esperar que el sector superior se viera azulado. Sin embargo, como se ha visto más arriba, actúa la difusión atmosférica, eliminando este color, aunque puede ser observado en condiciones excepcionales con una atmósfera muy limpia.

Es más frecuente la visibilidad del color verde en el borde superior solar, aunque es un fenómeno que solo dura unos segundos y requiere una atmósfera muy transparente con horizonte verdadero. Este es el fenómeno conocido como *rayo verde* (en inglés, *green flash*), necesitándose instrumental óptico para su observación, ya que el tamaño del fragmento verde visible queda por debajo de la resolución óptica de la visión, aunque en ocasiones las inversiones térmicas pueden agrandar la imagen hasta hacerla perceptible

a simple vista.

El rayo verde puede mostrarse de tres maneras diferentes. En primer lugar, el denominado *borde verde*, cuando en el disco solar, próximo al horizonte, la parte superior se torna verdosa, mientras la inferior aparece rojiza (Figura 55).

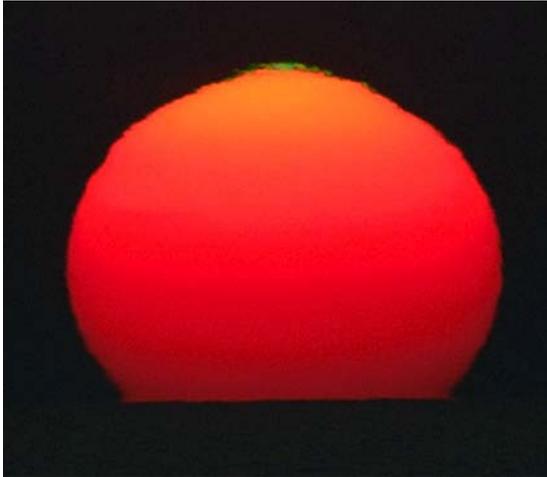


Figura 55. El rayo verde fotografiado a la puesta del Sol en la bahía de San Sebastián, con un telescopio. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

Otra variante es la conocida por *segmento verde*, cuando en el sol poniente, la última porción visible se torna verde en sus extremos y el color verdoso va desplazándose hacia el centro del segmento. Este evento puede llegar a verse a simple vista durante 1 ó 2 segundos¹².

¹² Desde las zonas polares, con el movimiento del Sol casi paralelo al horizonte, el rayo verde se puede prolongar inusualmente. Así, en la expedición de Byrd al Polo Sur, el rayo verde fue observado continuamente durante 35 minutos.

Por último está el rayo verde propiamente dicho. El fenómeno es muy poco frecuente y llega a resultar asimismo visible a simple vista. Aparece como una gota aplastada de color verde esmeralda sobre la superficie del mar o del horizonte, con el Sol ya puesto, que puede tomar una apariencia vertical, como de llama. En ocasiones muy raras se muestra de color azul o violeta, entonces se le denomina *rayo azul*.

Excepcionalmente puede observarse (y fotografiarse) el rayo verde en la Luna y en planetas brillantes como Venus o Júpiter.

Crepúsculo. El crepúsculo es el momento del día en el que el Sol se encuentra bajo el horizonte, pero aún no es noche completa, de manera que en la atmósfera aún queda luz solar difusa.

Existen tres tipos de crepúsculos, que se definen por la distancia angular del Sol respecto al horizonte. En el *crepúsculo civil*, el Sol se encuentra entre los 0° y -6° de altura, estableciendo el tiempo para el encendido o apagado del alumbrado público. El *crepúsculo náutico*, con el Sol entre -6° y -12° , supone el tiempo durante el que se comienza a ver las estrellas más brillantes del cielo, que se utilizan de referencia en navegación. Y por último el *crepúsculo astronómico*, cuando el Sol se halla entre los -12° y los -18° , marca el intervalo en el que se hacen visibles las estrellas más débiles y el cielo se torna negro.

Durante el crepúsculo la luz solar pasa rasante a la superficie terrestre de manera que

debido a la difusión selectiva se eliminan los colores de longitud de onda más corta. Esto hace que la luz se vaya enrojeciendo y sea visible como en el cielo como una banda anaranjada a lo largo del horizonte. Sobre esta zona se observan bandas consecutivas de color amarillento, blanquecino y finalmente azulado, que corresponden a zonas de mayor altura de la atmósfera en las que la difusión es menor¹³ (Figura 56). Durante el periodo crepuscular el cielo cercano al horizonte permanece de color rojizo o anaranjado porque aunque no es iluminado directamente por el Sol, su luz rojiza es difundida.



Figura 56. Crepúsculo. Foto J.C. Casado
www.starryearth.com

Hacia el horizonte opuesto es divisible una banda oscura que es debida a la luz solar esparcida por la atmósfera, que apenas alcanza el lado opuesto del cielo. A veces se le

¹³El color azulado del cielo crepuscular alrededor del cenit es debido a la difusión de la luz solar directa en capas altas de la atmósfera y a la absorción de las longitudes de onda más larga de la luz visible por parte de la capa de ozono.

llama sombra de la Tierra incorrectamente, ya que no se trata de ella, siendo su denominación *segmento oscuro*. Sobre él se encuentra otra banda de color rosado, conocida por *cinturón de Venus*, que corresponde a luz solar dispersada que ha perdido la mayor parte de las longitudes de onda cortas (Figura 57).



Figura 57. Banda oscura y cinturón de Venus fotografiados desde el Gran Cañón (Arizona, EE.UU.). Foto J.C. Casado www.starryearth.com

La luz púrpura. En ocasiones se puede observar una débil luminosidad violácea sobre los colores crepusculares, que aparece minutos tras el ocaso solar, alcanzando su máximo brillo una media hora después de la puesta de Sol.

La luz púrpura se produce por una capa de aerosoles, de densidad variable, situada entre los 15-20 km. de altitud, que difunde la luz solar enrojecida, produciendo una banda de color rosado entre el observador y la luz azul difundida a gran altitud. Esta luminosidad se percibe de un tono púrpura debido a la incapacidad de separar estos colores (rosa y



azul). La luz púrpura suele resultar más visible después de erupciones volcánicas importantes, por la cantidad de partículas sólidas que se arrojan a la atmósfera.

Rayos crepusculares y anticrepusculares.

Los rayos crepusculares son más frecuentes de lo que parece, aunque por su bajo contraste pasan desapercibidos normalmente.

Los rayos crepusculares aparecen en la zona crepuscular del cielo como un haz de rayos convergentes en el horizonte. Se deben a luz solar difundida que hay entre las sombras proyectadas en el cielo por grandes nubes o montañas varios kilómetros más allá del horizonte. La perspectiva hace que presenten un aspecto de abanico desplegado.

Para que se produzcan rayos crepusculares el objeto proyectado tiene que ser lo suficientemente grande para que su sombra alcance el cielo sobre el horizonte del observador. El objeto que genera los rayos crepusculares debe situarse sobre la zona de separación entre el día y la noche (*terminador*), interceptando la luz rasante a la superficie de la Tierra. Estas condiciones imponen que el objeto deba situarse a cientos de kilómetros tras el horizonte y que sea grande, puesto que su tamaño angular desde la posición del observador debe ser mayor que el del Sol.

Generalmente los rayos crepusculares resultan visibles con el Sol a 3° o 4° bajo el horizonte, y dejan de serlo a la finalización del crepúsculo civil. Esto significa que el terminador se halla a distancias entre los 300 km. y los 700 km. Debido a que el alcance de una sombra umbral es de unas 120 veces el

tamaño del objeto que la genera (véase apartado 1.3 Sombras), se necesita un cuerpo de como mínimo 6 kilómetros para producir una sombra visible.

En ocasiones se pueden ver rayos crepusculares convergentes en la zona del horizonte opuesto, llamados *rayos anticrepusculares* (Figura 58).



Figura 58. Rayos anticrepusculares sobre el Cañón Horseshoe (Utah EE.UU.). Foto Peggy Peterson.

Se originan por un efecto de perspectiva de los rayos crepusculares, o bien por nubes situadas cerca del horizonte. Excepcionalmente resultan visibles los rayos crepusculares de horizonte a horizonte.

El caso opuesto a la observación de los rayos crepusculares sería situarse en la cima de una gran montaña en el instante en que el Sol se encuentra en el horizonte. Entonces se puede ver la sombra de la montaña proyectándose hacia el punto antisolar como un triángulo alargado cuyo vértice coincide con este punto antisolar. Esta forma triangular es la misma

para cualquier montaña, independientemente de su forma y es debida a la convergencia por efecto de la perspectiva (Figura 59).



Figura 59. Proyección de la sombra del Teide a la puesta de Sol. Sobre el vértice de la sombra aparece la luna llena (en dirección antisolar), que casualmente se hallaba eclipsada (eclipse lunar del 9 de enero de 2001). Fotografía Luis M. Chinarro www.shelios.com.

3.2. Fenómenos atmosféricos de óptica ondulatoria

3.2.1. Fenómenos de difracción

Coronas. Constituyen unos fenómenos ópticos atmosféricos bastante habituales. Las coronas consisten en una serie de anillos concéntricos coloreados que resultan mejor visibles cuando la Luna se encuentra llena o casi llena y en el cielo hay una fina capa de nubes tipo altocúmulos (Figura 60). Es más difícil observarlas en torno al Sol por su luminosidad, que deslumbra los colores.



Figura 60. Corona lunar con triple anillo de difracción observada desde Valdezcaray (La Rioja). Foto J.C. Casado www.starryearth.com

A menudo se confunden con halos o incluso con arco iris, pero son mucho más pequeños que los halos y muestran intensos colores.

Las coronas se forman mediante nubes compuestas de gotas de pequeño tamaño que poseen unas dimensiones semejantes, como los altocúmulos, cirrocúmulos o incluso niebla. Además de en gotas de agua, las coronas pueden producirse por cristales de hielo o granos de polen.

Las coronas suelen aparecer en ocasiones sobre nubes lenticulares, un tipo de nube muy llamativa, con forma de lentes que se forman sobre montañas en las que el aire húmedo asciende.

Si las partículas son de diverso tamaño, la corona presentará un aspecto irregular y borroso, produciendo *nubes irisadas o iridiscentes* (Figura 61).



Figura 61. Nubes irisadas en Arolla (Suiza). Foto de Ute Esser.

En una corona el borde interior de cada anillo es azulado y el exterior de color rojo. Normalmente solo se percibe el borde rojo exterior del anillo más interior. La zona interior es llamada *aureola*, siendo de color blancoazulado. El número de anillos que llegan a distinguirse depende de las condiciones atmosféricas y de la intensidad de la fuente de luz. En el caso de la Luna llena se suelen ver dos, pero si se trata del Sol se pueden percibir hasta seis o siete. Los diámetros aparente las corona pueden oscilar entre 4 y 40 veces el del Sol o la Luna.

La formación de las coronas se debe a la difracción de la luz por las partículas constituyentes de la nube. Como se ha mencionado en el apartado 1.2. «Interacción de la luz», el fenómeno de la difracción es más acusado a medida que la partícula es más pequeña, causando una mayor separación de colores en la corona. La difracción aumenta también con la longitud de onda, haciendo que la luz roja se difracte más que la azul, lo que produce un anillo rojo mayor que el azul.



Una corona perfecta se formará con partículas pequeñas y semejantes entres sí en tamaño. Si este no es el caso solo se verá la aureola.

Glorias. Son anillos concéntricos multicolores situados alrededor del punto antisolar (Figura 62). En español se les denomina *círculo de Ulloa* o *corona de Ulloa*, en honor al militar y científico sevillano Antonio de Ulloa, que las estudió en 1735 en una expedición a Sudamérica.

Las glorias se forman con gotas de agua pequeñas en las que la luz se refleja en la misma dirección de procedencia. Aún no se conoce con detalle el mecanismo físico que las produce, aunque intervienen, además de la reflexión, fenómenos de refracción y difracción.

Si estamos situados en un lugar elevado la gloria aparece en torno a la proyección de nuestra propia sombra sobre nubes o neblina y



Figura 62. Una gloria fotografiada desde un avión, cerca de Los Angeles (EE.UU.). Foto J.C. Casado www.starryearth.com

si nos encontramos en el aire, por ejemplo en un avión, se muestra en torno a la sombra de la aeronave. También se ven glorias producidas por fuentes de luz artificial al proyectarse sobre la niebla.

El *espectro de Brocken* constituye una de las manifestaciones más llamativas de los fenómenos ópticos atmosféricos. Se trata de una variedad de gloria, que toma su nombre de Brocken, una montaña de Alemania. Como toda gloria se muestra como unos anillos coloreados en torno al punto antisolar donde se encuentra la sombra. El fenómeno en sí lo constituye la sombra central (la del propio observador) que toma una forma cónica-alargada y aspecto fantasmagórico (de ahí su nombre de «espectro») (Figura 63).



Figura 63. Espectro de Brocken observado desde la cima del monte Orhi, en el pirineo navarro. Foto J.C. Casado www.starryearth.com

Si las condiciones ambientales lo permiten y puede proyectarse sobre un valle, adquiere proporciones gigantescas. Es posible la visión del espectro de Brocken sin gloria y viceversa.

3.3. Otros fenómenos

Existen otros fenómenos físicos y ópticos de la atmósfera, poco frecuentes (desde determinadas latitudes geográficas) o bien escasamente conocidos.

Entre ellos citaremos las *nubes noctilucentes*. Las nubes noctilucentes (en inglés, Noctilucent Clouds, NLC) o *nubes polares mesosféricas* (Polar Mesospheric Clouds, PMC) se encuentran situadas a gran altura en la atmósfera de la Tierra, en la mesosfera, cerca del espacio exterior. La escasa cantidad de vapor de agua presente a esta altitud se condensa en forma de hielo en el polvo meteórico y las partículas cargadas, produciendo una coloración azul plateada en las nubes. Debido a su gran altura pueden verse iluminadas a altas horas de la noche, ya que los rayos solares aún iluminan esa zona de la atmósfera. Normalmente resultan visibles desde lugares cercanos a los polos terrestres, como los países nórdicos o Canadá, alrededor del solsticio de verano (o sobre el solsticio de invierno en el hemisferio sur).



4 - Práctica.

Determinación experimental del ángulo suplementario del arco iris.

Introducción.

El matemático y filósofo francés René Descartes realizó por primera vez en el año 1637 una medición precisa del ángulo de formación del arco iris con respecto a la dirección de incidencia de la luz solar (ángulo del arco iris).

Con un sencillo instrumental construido por el propio alumno se medirá el ángulo suplementario al del arco iris, es decir, la distancia angular entre el arco iris y el punto antisolar.

Objetivos (generales y específicos):

- Realizar mediciones de fenómenos físicos en condiciones fuera de laboratorio.
- Comprender, aplicando los contenidos teóricos, los principios físicos de tales fenómenos.
- Reducir los datos para efectuar una estimación del valor de la magnitud a medir acotando el error de medición.
- Relacionar conceptos y fenómenos físicos con otras áreas científicas y humanísticas como Ciencias de la Tierra, Ciencias del Medio Ambiente, Historia y Arte.

Objetivos actitudinales:

- Trabajar cooperativamente en equipo, valorando las aportaciones individuales y manifestando actitudes democráticas.
- Reflexionar sobre el propio aprendizaje, considerando las ideas, actitudes y procedimientos.
- Valorar los métodos y logros de la Ciencia, reconociendo el valor de las hipótesis y teorías en la construcción del conocimiento.
- Apreciar las múltiples formas en las que la Ciencia nos afecta a todos.

Materiales. Cartulina dura o chapa de ocume en forma rectangular, de unos 10 x 20 cm, un soporte vertical como un palo o estaca, un clavo largo.

Metodología. Clavar el clavo en la placa perpendicularmente a su superficie, fijándolo al palo, que actuará de soporte vertical, anclado a tierra. Utilizando el lado superior de la placa como punto de mira, se apuntará exactamente al borde superior del arco iris, tal como muestra la figura adjunta. Se medirá el ángulo formado entre la sombra proyectada por el clavo (OC), que indicará la dirección de la luz del Sol, y el borde de la placa, que apunta a la zona superior del arco iris (Figura 64).

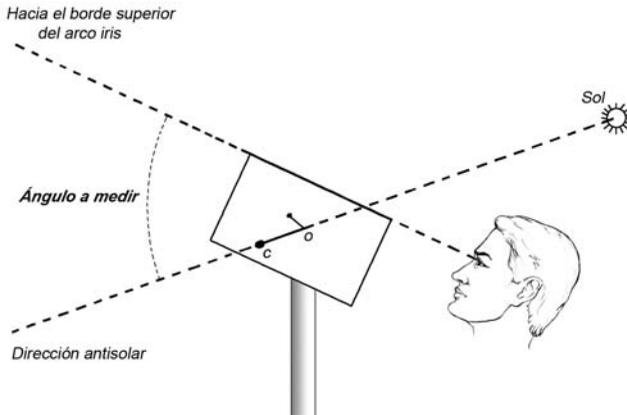


Figura 64. Esquema explicativo para la realización de la práctica propuesta. Dibujo Juan Carlos Casado.

Observaciones. Aprovechando la realización de la práctica pueden observarse aspectos físicos del arco iris¹⁴, como:

- Observar si el arco iris es completo o parcial, teniendo en cuenta la altura del Sol y la estimación de distancia a la lluvia que forma el fenómeno.
- Comprobar que el punto antisolar se encuentra en el centro del arco iris.
- Verificar la secuencia de colores en el arco primario y en el secundario (si resulta visible), así como la anchura relativa para color .
- Observar si los colores y su intensidad son constantes para toda la extensión del arco iris y si cambian durante la aparición del fenómeno.

¹⁴ Anotar el lugar, la fecha, hora de aparición y desaparición del arco iris, así como cualquier otra reseña de interés.

- Comprobar el bajo brillo relativo de la banda de Alexander y el área brillante encerrada por el arco primario.
- Observar la definición del arco iris, debido al tamaño preponderante de las gotas de agua, así como el tipo de lluvia, más ligera o intensa, y el tipo de fondo sobre el que se proyecta el arco iris.
- Comprobar la existencia de arcos supernumerarios, su número y secuencia de colores.
- Comprobar la polarización tangencial del arco iris con un filtro polarizador lineal.

Reducción de observaciones. Las mediciones realizadas por cada alumno se pueden incluir en una hoja de cálculo (tipo Excel), para realizar posteriormente la media aritmética y hallar la desviación estándar, con lo que se tendrá una estimación del error de la medición.

5 - Bibliografía y direcciones de Internet



5.1. Bibliografía

- MINNAERT, Marcel G. J. «*Light and Color in the Outdoors*», edit. Springer-Verlag, 1993. Un excelente libro (en inglés) sobre el tema escrito por un astrónomo, que contempla multitud de estos fenómenos y sus explicaciones (con matemáticas) . Está basado en la anterior edición inglesa, que es considerada un clásico de la física atmosférica «*The Nature Of Light And Colour In The Open Air*»A, edit. Dover, 1954.

- NAYLOR, John. «*Caído del Cielo*», edit. Akal, 2005. Obra clara y descriptivo que aborda fenómenos de la óptica y astronomía atmosférica.

- VIÑAS, José Miguel. «*200 Estampas de la Temperie*», edit. Sirius 2007. Magníficamente ilustrado con sorprendentes imágenes, ofrece una visión panorámica de los fenómenos atmosféricos, tanto meteorológicos como ópticos.

5.2. Direcciones de Internet

- <http://www.atoptics.co.uk> Portal web del físico Les Cowley. Se trata de una de las mejores páginas web sobre el tema (en inglés). Desde la misma se puede descargar el software gratuito IRIS para la simulación de coronas y glorias, y HaloSim 3, que permite simular todo tipo de halos mediante modelos matemáticos.

- http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/color/Sombras_color.htm Applet interactivo para la formación de sombras de colores.

- <http://www.jgiesen.de/refract/index.html> Applet para la refracción atmosférica del Sol o de la Luna.

- <http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/color/arcoIris/ArcoIris.htm> Página sobre el arco iris con teoría y actividades en aplicaciones interactivas para ESO y bachillerato.

