

# Modelos de Refracción Astronómica

Astronomía Geodésica Curso 2010-2011

Juan F. Prieto, Jesús Velasco

## 1. Modelo Simplificado

La refracción debida a la atmósfera es uno de los fenómenos más estudiados a lo largo de la historia pues afecta a muchas ciencias. Casi todas las fórmulas matemáticas desarrolladas fallan al tratar de aplicarlas pues existe un gran desconocimiento respecto a las leyes que rigen la constitución de la atmósfera. El hecho es que la radiación emitida por un cuerpo celeste, antes de entrar en el anteojito o telescopio del observador, atraviesa la atmósfera terrestre y se refracta en ella, y, puesto que la densidad de la atmósfera aumenta gradualmente al acercarse a la superficie de la Tierra, el rayo de luz que parte de una estrella  $E$  e incide en el observador situado en  $O$ , como se ve en la figura 1, por existir la refracción va a sufrir una desviación continua en cada cambio de capa, siendo la trayectoria curva  $E_2 \rightarrow A \rightarrow O$  la que le va a llegar al observador en  $O$ , y éste va a creer aparentemente que la estrella se encuentra en la tangente a la trayectoria curva, o sea, piensa que la estrella está aparentemente en  $E'$ , en una posición más cercana al cenit, y no coincide la trayectoria aparente con la  $E_1 \rightarrow O$ , que es la dirección en la que dicho observador vería el astro de no existir la atmósfera.

Existen diversas fórmulas de distintos autores para cuantificar el valor de la refracción atmosférica que han sido obtenidas de un razonamiento matemático, unido a una determinación empírica de sus parámetros, impuesta por la observación del fenómeno con diferentes condiciones. La precisión en la determinación de la refracción depende de diversos factores [2] [3]:

1. la forma en que se consideran las diferentes capas atmosféricas que rodean la Tierra: planas, esféricas, elipsoidales ...
2. el espesor de dichas capas
3. la diferencia entre la verdadera atmósfera y el modelo elegido.
4. la longitud de onda de la radiación del astro que se está analizando.
5. los errores cometidos en la determinación de índice de refracción de la atmósfera.
6. los movimientos locales o turbulencias del aire.
7. la altitud sobre el nivel del mar del punto desde el que se observa.
8. el grado de humedad.

El índice de refracción de la atmósfera terrestre unido a su geometría no plano-paralela, hace que la altura ( $h'$ ) sobre el horizonte a la que se observa un astro no coincida con su altura «verdadera», que se deduciría de sus coordenadas astronómicas o que se observaría si no existiese atmósfera. El efecto de la refracción depende fuertemente de la altura ( $h'$ ) observada y, en menor grado, de la temperatura y presión ambiente, y de la longitud de onda de la radiación que emite el astro que se observa.

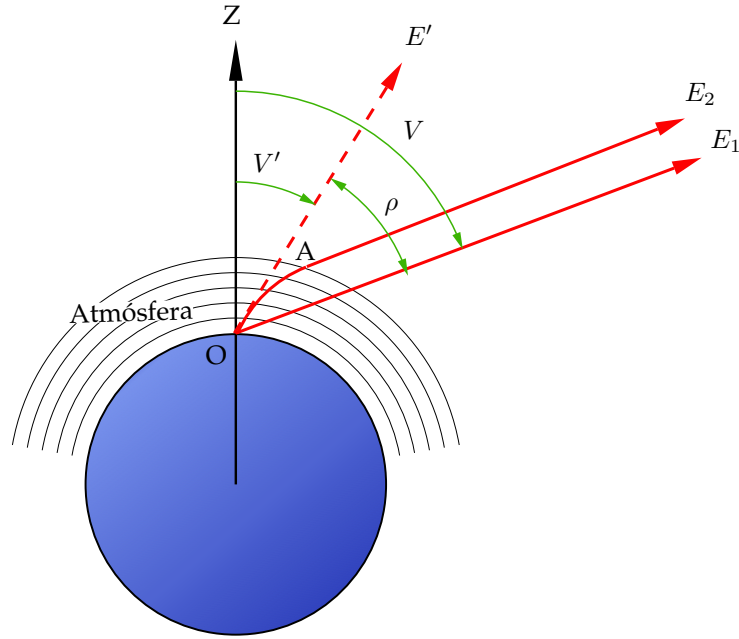


Figura 1: Efecto de la refracción astronómica. (Elaboración propia)

Aunque también afecta a las medidas acimutales en mucha menor magnitud, la mayor parte del efecto se produce sobre las alturas o distancias cenitales, y decimos que la refracción «eleva los astros», en un valor que denominamos ángulo de refracción,  $\rho$ , siguiendo el criterio:

$$\begin{aligned} \text{altura verdadera} &= \text{altura observada} - \text{ángulo de refracción} \\ \text{distancia cenital verdadera} &= \text{distancia cenital observada} + \text{ángulo de refracción} \end{aligned}$$

que se puede resumir en las sencillas ecuaciones 1, fácilmente deducibles de la figura 1.

$$h = h' - \rho \tag{1}$$

$$V = V' + \rho$$

La fórmula o modelo simplificado procede de tomar la superficie de la Tierra como plana [2], lo que originará ciertas imprecisiones en el modelo matemático que obtendremos. Suponemos un número infinito de capas atmosféricas paralelas entre si cuyo índice de refracción se mantiene constante mientras nos encontremos en la misma capa. Esto niega la curvatura terrestre, pero ofrece un modelo muy sencillo y útil para estrellas próximas al Cenit, cuyo efecto se puede comprobar en la figura 2.

En esta figura se supone un rayo de radiación ( $E_2$ ) emitido por la estrella  $E$  supuesta en el infinito. Este rayo se propaga en línea recta por el vacío con un índice de refracción  $n_0 = 1$ , pues al ser el índice de refracción la relación entre la velocidad de la luz y la velocidad de propagación en el medio que se estudia, en el vacío es la unidad.

Este rayo, en el momento que entra en la atmósfera, representado en el punto  $A$  va a sufrir diferentes refracciones sucesivas según va atravesando cada capa atmosférica con mayor densidad y mayor índice de refracción  $n_i$ , hasta incidir en el topocentro  $O$  con un ángulo de incidencia tal que, aparentemente, el observador interpreta que le ha llegado desde una posición aparente de la estrella en  $E'$ .

Si la estrella estuviese en el mismo Cenit, el efecto de la refracción es nulo. El modelo que se obtiene responde a aplicar sucesivamente la ley de la refracción de la luz que enunció Snell, entorno a 1621, en cada cambio de capa atmosférica. Entonces, se puede establecer la ley de Snell en el punto  $A$ :



$$\begin{aligned}
n_n \operatorname{sen} V' &= \operatorname{sen} V \\
n_n \operatorname{sen} V' &= \operatorname{sen} (V' + \rho) \\
n_n \operatorname{sen} V' &= \operatorname{sen} V' \cos \rho + \cos V' \operatorname{sen} \rho
\end{aligned} \tag{7}$$

por ser  $\rho$  muy pequeño podemos hacer el coseno de este ángulo la unidad y sustituir el seno del mismo por su valor en radianes, y aplicado en la expresión anterior 7 quedaría:

$$n_n \operatorname{sen} V' = \operatorname{sen} V' + \cos V' \rho^{rad} \tag{8}$$

despejando el ángulo de refracción que buscamos:

$$\rho^{rad} = \frac{n_n \operatorname{sen} V' - \operatorname{sen} V'}{\cos V'} = \frac{(n_n - 1) \operatorname{sen} V'}{\cos V'} = (n_n - 1) \tan V' \tag{9}$$

que tomando como índice de refracción en la superficie terrestre  $i_n = 1,00029$  y pasando el ángulo a segundos sexagesimales resulta la ecuación 10:

$$\rho'' = 60'' \tan V' \tag{10}$$

siendo  $V'$  la distancia cenital observada y tomando como índice de refracción en la capa más próxima a la superficie terrestre el valor de 1,00029. Este modelo no se puede aplicar para distancias cenitales mayores de  $50^\circ$ , dando valores imposibles para astros próximos al horizonte cuya distancia cenital observada fuese de  $90^\circ$ .

## 2. Fórmula de Laplace

Laplace dedujo en su momento [1] un modelo, también sencillo, que permitía su uso a distancias cenitales mayores, que también ha sido corregido posteriormente por diversos autores [3]. Este modelo está estudiado para unas condiciones de presión y temperatura de tipo estándar de  $10^\circ C$  ( $288, 15^\circ K$ ) y 1013,25 hPa y corresponde a la expresión 11.

$$\rho'' = 57,08'' \tan V' - 0,067'' \tan^3 V' \tag{11}$$

Aunque se puede utilizar hasta distancias cenitales mayores de  $70^\circ$ , sigue dando valores imposibles para astros próximos al horizonte.

## 3. Fórmula de Bennet

El Anuario del Observatorio Astronómico [5] ofrece el modelo desarrollado por Bennet [4]. El modelo viene en función de la altura observada aparente ( $h'$ ) del astro y tiene la expresión 12.

$$\rho'' = \frac{60''}{\tan \left( h' + \frac{7,31}{h'+4,4} \right)} \frac{0,283P}{273 + t} \tag{12}$$

donde  $h'$  es la altura observada en grados sexagesimales,  $P$  es la presión atmosférica medida en superficie en  $hPa$  o  $mbar$  y  $t$  es la temperatura en  $^\circ C$  también medida en superficie. El modelo tiene dos partes diferenciadas. La parte izquierda ofrece un valor del ángulo de refracción para las condiciones de presión y temperatura estándar mencionadas en la sección 2 y una longitud de onda de la radiación de  $\lambda_0 = 0,575 \mu m$ , que está más o menos centrada en el espectro visible. La segunda parte, a la derecha de la ecuación, ofrece la corrección al anterior valor estándar para unas condiciones particulares de presión y temperatura distintas. Esto permite mejorar la precisión en el cálculo del ángulo de refracción al intervalo de  $0,01''$  a  $0,1''$  [3], aunque sigue dependiendo fuertemente de las desviaciones sistemáticas

$h'$ Altura Observada ( $^{\circ}$ )	$\rho$ Ángulo Refracción ( $'$ ) ( $''$ )
80	10
60	34
40	01 10
20	02 40
10	05 20
5	09 47
1	24 04
0,5	28 27
0	34 07

Cuadro 1: Ángulo de refracción para diversas alturas

de la atmósfera, turbulencias locales, inclinación de las capas . . .

A modo de ejemplo se ha confeccionado el cuadro 1 con el cálculo del ángulo de refracción con el modelo de Bennet para diversas alturas observadas de astros. Se puede comprobar en él como el ángulo de refracción aumenta considerablemente a bajas alturas, llegando a valores máximos de  $34'$  para astros justo en el horizonte (en este lugar denominada *refracción horizontal*), mientras que para astros que tienen una altura de solamente  $30'$  sobre el horizonte, el valor de refracción que le correspondería a esa altura es de  $28'$ , es decir, un diferencial de  $6'$  de refracción en tan solo  $30'$  de altura.

#### 4. Consecuencias de la refracción

El ángulo de la refracción en el horizonte es muy grande, variable y bastante incierto, así, las tablas y modelos de refracción solo pueden dar valores aproximados, y las observaciones precisas en esta zona son prácticamente imposibles. De todo lo anteriormente expuesto, se puede deducir que la refracción atmosférica altera las coordenadas de una estrella de una forma que no es entéramente predecible, y la incertidumbre aumenta rápidamente con la distancia cenital. Cuando se requieran realizar observaciones de precisión ha de intentarse el observar a estrellas próximas al cenit.

La refracción, como se ha comentado, incide en su práctica totalidad sobre las alturas o distancias cenitales, y apenas lo hace en los acimutes. Si el astro se halla en cualquiera de sus dos culminaciones, la refracción modifica únicamente su declinación  $\delta$ , además, en la misma magnitud en que cambia la distancia cenital, ya que en estos casos coinciden los planos del meridiano y el vertical del astro. En los demás casos, cuando estos dos planos se cortan formando un cierto ángulo, la refracción cambia tanto la declinación  $\delta$ , como el ángulo horario  $H$  y la ascensión recta  $\alpha$  del astro.

Los efectos añadidos de la refracción se pueden resumir en [2]:

1. Las alturas observadas resultan ser mayores que las verdaderas que se obtendrían observando en ausencia de atmósfera. La refracción eleva aparentemente los astros.
2. Se adelanta, aparentemente, la hora de salida de los astros (ortos) y se retrasan sus ocasos. Como consecuencia de esto, los astros se ven sobre el horizonte más tiempo del que realmente están.
3. Cuando vemos el Sol o la Luna tangentes al horizonte y sobre él (figura 3), realmente están por

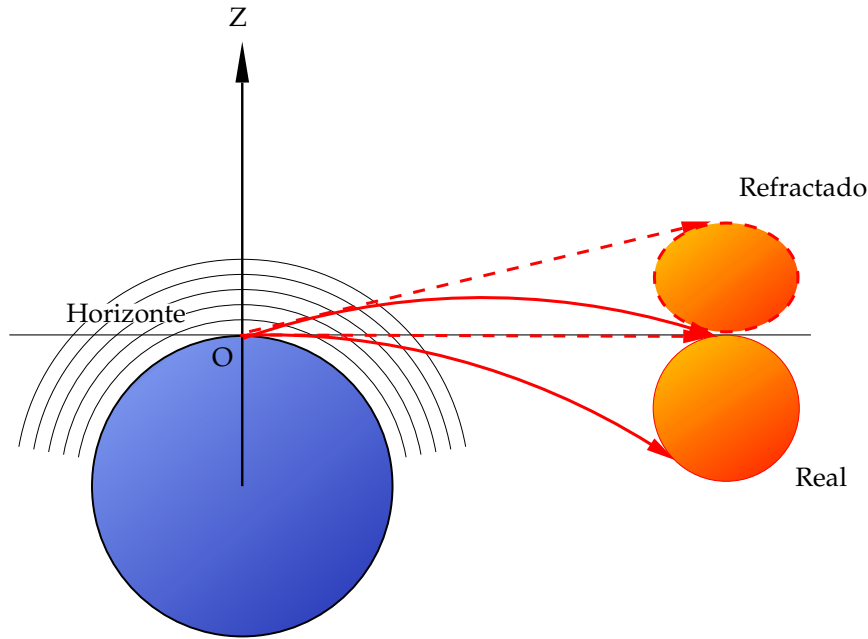


Figura 3: Refracción del Sol sobre el horizonte (elab. prop.)

debajo y precisamente tangentes a dicho plano, pues el valor de la refracción en el horizonte, es igual sensiblemente a su diámetro ( $32'$ ).

4. Los discos del Sol y la Luna los vemos achatados al salir y ocultarse en el horizonte por el diferente ángulo de refracción en el borde superior e inferior de los dos astros (figura 3). Según lo estudiado en la sección 3, el diámetro vertical habría disminuido en  $6'$  del diámetro horizontal habitual de  $32'$  y, puesto que la refracción no afecta a los diámetros horizontales, los discos aparentes del Sol y de la Luna toman una forma ovalada.

## Referencias

- [1] P. S. Laplace: *Traité de mécanique céleste* 4, libro 10, capítulo 3. Chez J. B. M. Duprat. Paris. 1805.
- [2] F. Martín Asín: *Astronomía*. 2 ed. Madrid. 1985.
- [3] W. Torge: *Geodesy*. 3 ed. Walter de Gruyter. Berlin. 2001
- [4] G. G. Bennett: The calculation of astronomical refraction in marine navigation. *Journal of the Institute of Navigation*, vol 35, 255-259. 1982
- [5] Observatorio Astronómico Nacional: *Anuario Astronómico 2011*. Instituto Geográfico Nacional. Madrid. 2010
- [6] Stellarium: <http://www.stellarium.org/es/>