

# **Especialización en Sistemas de Radar e Instrumentación**

Facultad de Matemática, Astronomía y Física - Instituto Universitario Aeronáutico



## **CALIBRACIÓN DE RADARES EN BANDA C USANDO FUENTES NATURALES O ARTIFICIALES**

Román Rodrigo Vena Valdarenas

Director: Mgter. Gustavo Lazarte

Córdoba, marzo de 2014



**Palabras claves:** Calibración, Radar Meteorológico, Fuentes Naturales



## **Resumen**

En este trabajo se presenta el desarrollo de un algoritmo computacional de apuntamiento, diseñado para obtener de manera simple las coordenadas del Sol y la Luna. La utilización de este código de apuntamiento permitirá realizar calibraciones de radares meteorológicos utilizando fuentes naturales como el Sol y la Luna.

---

# Índice

<b>Resumen</b>	<b>v</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Desarrollo</b>	<b>2</b>
2.1 Trigonometría Esférica y Elementos de Astronomía de Posición . . . . .	2
2.1.1 Esfera Celeste . . . . .	2
2.1.2 Coordenadas Astronómicas Celestes . . . . .	4
2.1.3 Relaciones Fundamentales de Trigonometría Esférica . . . . .	8
2.1.4 Transformación de Coordenadas . . . . .	9
2.1.5 Corrección por Refracción Atmosférica y Paralaje . . . . .	9
2.2 Algoritmo Computacional . . . . .	11
2.2.1 Desarrollo . . . . .	12
<b>3 Resultados</b>	<b>14</b>
<b>4 Conclusiones</b>	<b>18</b>
<b>5 Referencias</b>	<b>19</b>
<b>6 Apéndices</b>	<b>20</b>
Apéndice A . . . . .	21
Apéndice B . . . . .	22
Apéndice C . . . . .	23
Algoritmo de Apuntamiento: SOL . . . . .	23
Algoritmo de Apuntamiento: LUNA . . . . .	28
Apéndice D . . . . .	33

---

# 1 Introducción

La evolución tecnológica de los radares meteorológicos hizo posible que no sólo se pueda estimar la intensidad, sino también la velocidad Doppler de los hidrometeoros. Los radares de última generación son polarimétricos, lo que permite una mejor caracterización de los fenómenos meteorológicos. Junto a esta evolución, se ve la necesidad de actualizar y perfeccionar los métodos de calibración y ajuste para una mejor interpretación de los estimadores meteorológicos.

Debido a que no existen blancos meteorológicos “patrones”, el radar debe ser calibrado indirectamente. Uno de los métodos posibles de calibración es utilizando emisores naturales, como por ejemplo el Sol (Andrews, 1969; Pratt y Ferraro, 1989; Manz y Colaboradores, 2000; Holleman y Beekhuis, 2004; Puhakka, 2005 y Holleman y Colaboradores, 2009). El Sol provee radiación no polarizada, lo que permitiría calibrar y ajustar la cadena de recepción del radar tanto para polarización horizontal como vertical.

Otro método posible es utilizando la Luna como blanco del radar, la cual tiene una sección eficaz reconocida e invariante, ya que ésta siempre muestra la misma cara a la tierra Getak y Colaboradores, 2011.

Pequeños errores de calibración pueden producir severas deficiencias en la precisión de los productos de radar, como por ejemplo la estimación de la precipitación y la clasificación de hidrometeoros Ryzhkov y Colaboradores, 2005. En el caso del apuntamiento angular, especialmente en elevación, un error de 1° grado a una distancia de 200 km del radar puede derivar en un error en elevación de hasta 35000 metros. Es por este motivo que se plantea como objetivo desarrollar un mecanismo de obtención de coordenadas del Sol y la Luna que sea confiable, para analizar la posibilidad de aplicar métodos de calibración utilizando estas fuentes naturales.

El desarrollo de este código computacional se muestra en la siguiente sección, donde además se describen los fundamentos teóricos para llevarlo a cabo. Finalmente se muestran los resultados obtenidos.

---

---

## 2 Desarrollo

En esta sección se muestra el desarrollo de un algoritmo computacional de apuntamiento, diseñado para obtener las coordenadas del Sol y la Luna, para ser utilizadas por un radar meteorológico. En primer lugar, se realiza una reseña sobre elementos de trigonometría esférica y astronomía de posición, que se utilizaron para desarrollar el código de apuntamiento. Se describen los diferentes sistemas de coordenadas esféricas y la relación entre las mismas, los mecanismos para pasar de un sistema de coordenadas a otro y finalmente, las correcciones que deben aplicarse a las coordenadas. La necesidad de contar con estos conocimientos se debe a que la posición del Sol y la Luna se encuentra tabulada en un sistema de coordenadas universal, y diferente al utilizado por los radares meteorológicos, cuyo sistema de coordenadas es local.

Finalmente, se muestra un esquema de funcionamiento del algoritmo computacional.

### 2.1 Trigonometría Esférica y Elementos de Astronomía de Posición

Esta subsección muestra los elementos teóricos utilizados para generar el algoritmo de apuntamiento. Se describen a continuación los siguientes conceptos: Esfera Celeste, Fórmulas Fundamentales de Trigonometría Esférica, Coordenadas Astronómicas Celestes, Transformación de Coordenadas, Corrección por Refracción y Paralaje.

Todos estos conceptos fueron extraídos del libro “Astronomía de Posición” (Vives, 1971).

#### 2.1.1 Esfera Celeste

Consideremos un origen de coordenadas arbitrario  $O$ , que será el lugar de observación. La dirección a la que se encuentra un astro  $A$  se determina mediante los ángulos  $\phi$  y  $\theta$  (ver Figura 1). La distancia  $r$  es desconocida y se considera su posición proyectada  $A'$  sobre una esfera con centro en  $O$  y de radio  $1$ . Esta esfera se denomina “*Esfera Celeste*”.

El ángulo entre dos direcciones arbitrarias (*distancia angular*) se puede medir directamente en unidades de arco sobre círculos máximos, siendo un círculo máximo la circunferencia resultante de la intersección de la esfera con cualquier plano que pase por el centro.

Para determinar la posición de un punto en la esfera celeste es necesario definir círculos de referencia. Se define un *círculo máximo fundamental*, definido por un plano fundamental que pase por el centro de la esfera. La perpendicular al plano fundamental por el centro corta a la esfera en dos puntos  $P_1$  y  $P_2$  denominados polos (ver Figura 2). Todos los círculos que pasan por los polos son perpendiculares al fundamental y se denominan *círculos secundarios*. La posición de un punto cualquiera  $A$  de la esfera queda determinada por dos coordenadas esféricas: 1) La distancia de  $A$  al plano fundamental, medida a lo largo de un círculo secundario (distancia  $BA$ ) y 2) la distancia entre el punto de intersección  $B$  del círculo secundario con el círculo fundamental y un punto arbitrario  $C$  en el círculo fundamental que se toma como origen. Además, se adopta un sentido positivo para cada una de las coordenadas esféricas. Cada *Plano*

---



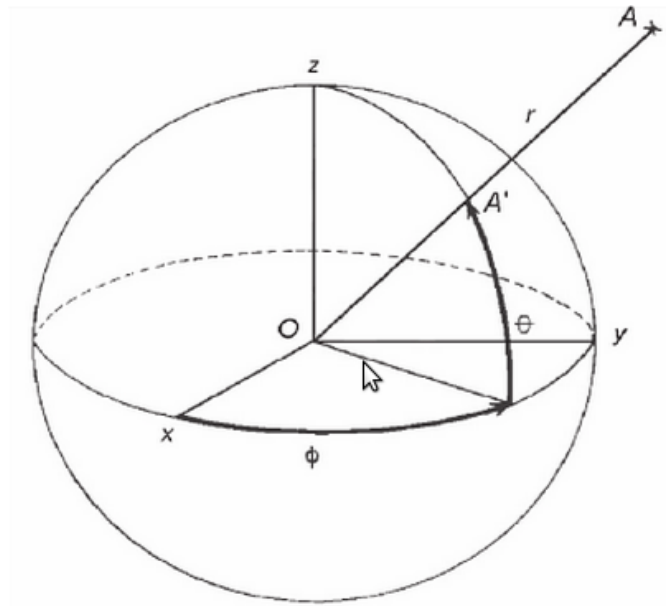


Figura 1: Esfera Celeste (extraído de Vives (1971)).

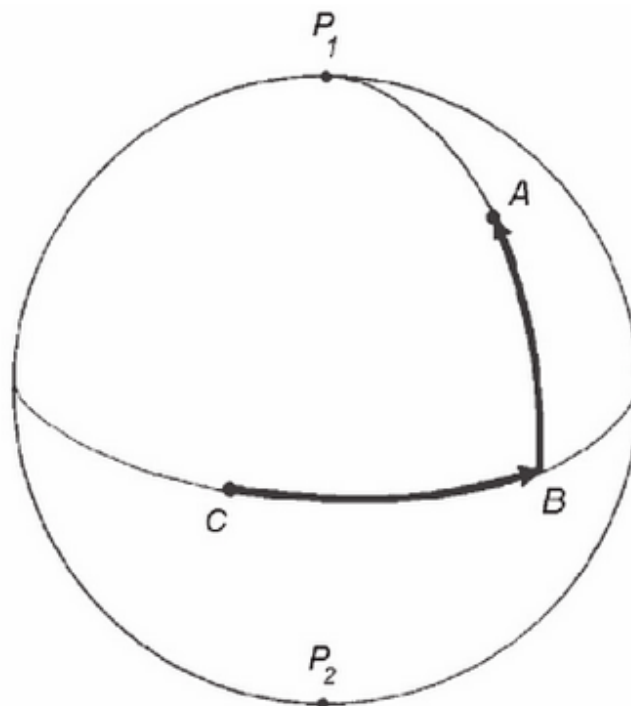


Figura 2: Esquema de *Planos Fundamentales* y Sistema de Coordenadas (extraído de Vives (1971)).

*Fundamental* de la esfera celeste, con el eje polar correspondiente y perpendicular al mismo, define un sistema de coordenadas.

## 2.1.2 Coordenadas Astronómicas Celestes

En este apartado se definen los tres principales sistemas de coordenadas astronómicas celestes: Coordenadas Horizontales, Coordenadas Ecuatoriales Horarias y Coordenadas Ecuatoriales Absolutas.

### 2.1.2.1 Coordenadas Horizontales

Como se mostró anteriormente, se define un sistema de coordenadas a partir de la determinación de un plano fundamental y un eje fundamental, y la posterior definición de las coordenadas esféricas correspondientes. Para definir el sistema de coordenadas horizontales se tienen en cuenta las siguientes características:

- Plano Fundamental  
Se utiliza como plano fundamental en este sistema de coordenadas al *horizonte astronómico local*, es decir, un plano paralelo al horizonte local que pasa por el centro de la esfera celeste. Este plano determina sobre la superficie de la esfera celeste el *Horizonte Astronómico Celeste*
- Eje Fundamental  
Es la vertical astronómica del lugar, o recta paralela a la vertical del lugar (definida por la dirección del hilo de una plomada) y que pasa por el centro de la esfera celeste. Este eje interseca a la esfera en dos puntos: el Cenit Astronómico *Z* y el Nadir Astronómico *N*.
- Las coordenadas horizontales son:  
 $A$  = acimut  
 $h$  = altura

El acimut  $A$  de un astro  $E$  es, por definición, el arco del horizonte celeste comprendido entre el punto cardinal sur  $S$ , y el punto  $E'$ , donde el círculo secundario que pasa por el astro  $E$  corta al horizonte (ver Figura 3). El acimut se mide a partir del punto cardinal sur  $S$  en sentido S-O-N-E de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

La altura  $h$  del astro  $E$  es, por definición, el arco  $EE'$  del círculo vertical del astro comprendido entre  $E$  y el horizonte. Se mide a partir del horizonte de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , en sentido positivo hacia el cenit y negativo hacia el nadir.

### 2.1.2.2 Coordenadas Ecuatoriales Horarias

Las características de este sistema de coordenadas son:

- Plano Fundamental  
El plano fundamental es el plano del *ecuador celeste*, es decir, un plano paralelo al ecuador terrestre que pasa por el centro de la esfera celeste.
- Eje Fundamental  
El ecuador celeste define como eje fundamental, al *eje polar*, que interseca a la

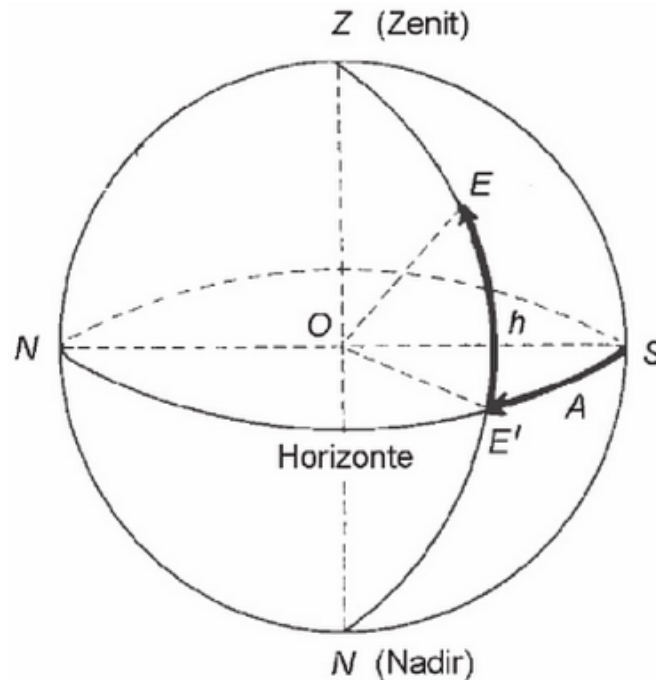


Figura 3:Coordenadas Horizontales (extraído de Vives (1971)).

esfera celeste en dos puntos: el Polo Norte Celeste ( $N$ ) y el Polo Sur Celeste ( $S$ ). Los círculos secundarios que pasan por los polos celestes se llaman *meridianos celestes*.

- Las coordenadas ecuatoriales horarias

$H = \text{Ángulo Horario}$

$\delta = \text{declinación}$

El Ángulo Horario  $H$  de un astro  $E$  es, por definición, el arco  $ME'$  del ecuador celeste comprendido entre el meridiano del lugar (meridiano que pasa por los polos y cuyo plano contiene a la dirección Norte-Sur) y el meridiano que pasa por el astro (ver Figura 4). Se mide sobre el ecuador celeste a partir del punto de intersección  $M$  entre el meridiano del lugar y el ecuador celeste, de  $0^h$  a  $24^h$  en sentido  $O - N - E - S$ .

La declinación  $\delta$  de un astro  $E$  es, por definición, el arco  $EE'$  del meridiano que pasa por el astro  $E$ , comprendido entre  $E$  y el ecuador celeste. Se mide a partir del ecuador celeste de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , positivamente hacia el polo norte y negativamente hacia el polo sur.

### 2.1.2.3 Coordenadas Ecuatoriales Absolutas

Los dos sistemas de coordenadas vistos anteriormente, son sistemas que dependen de la posición del observador, es decir, son sistemas *locales*. El sistema de coordenadas ecuatoriales absolutas, es independiente de la posición del observador y tiene las siguientes características:

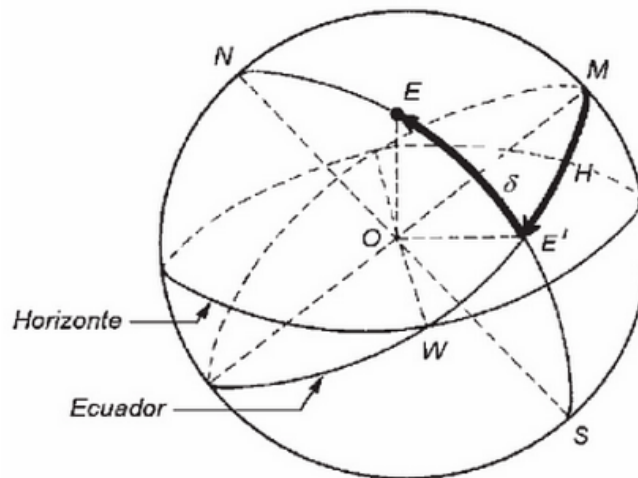


Figura 4:Coordenadas Ecuatoriales Horarias (extraído de Vives (1971)).

- Plano Fundamental  
Al igual que en el sistema de coordenadas horarias, el plano fundamental es el plano del *ecuador celeste*.
- Eje Fundamental  
El *eje polar*, que interseca a la esfera celeste en los Polos Norte y Sur Celeste. De la misma manera que para las coordenadas horarias, se definen los *meridianos celestes*.
- Las coordenadas ecuatoriales horarias  
 $\alpha$  = ascensión recta  
 $\delta$  = declinación

La ascensión recta  $\alpha$  de un astro E es, por definición, el arco de ecuador celeste  $\gamma E'$  comprendido entre los meridianos que pasan por el punto vernal  $\gamma$  (ver Apéndice A) y por el astro E. Se mide en sentido directo (sentido de rotación de la tierra) de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  o bien de  $0^h$  a  $24^h$  desde  $\gamma$ . La declinación, se define de la misma manera que para las coordenadas horarias.

#### 2.1.2.4 Relación entre Ascensión Recta, Ángulo Horario y Tiempo Sidéreo

Se define el *tiempo sidéreo local*,  $TSL$ , en un lugar, como el ángulo horario del punto vernal,  $\gamma$ , en ese lugar. Se tiene entonces (Figura 6) que el arco entre el Meridiano y el Punto Aries es el tiempo sidéreo local  $TSL$ , el arco entre el Punto Aries y el astro es la ascensión recta  $\alpha$  y el arco entre el meridiano y el astro es el ángulo horario  $H$  del astro. A partir de esta relación se obtiene:

$$TSL = H + \alpha \quad (1)$$

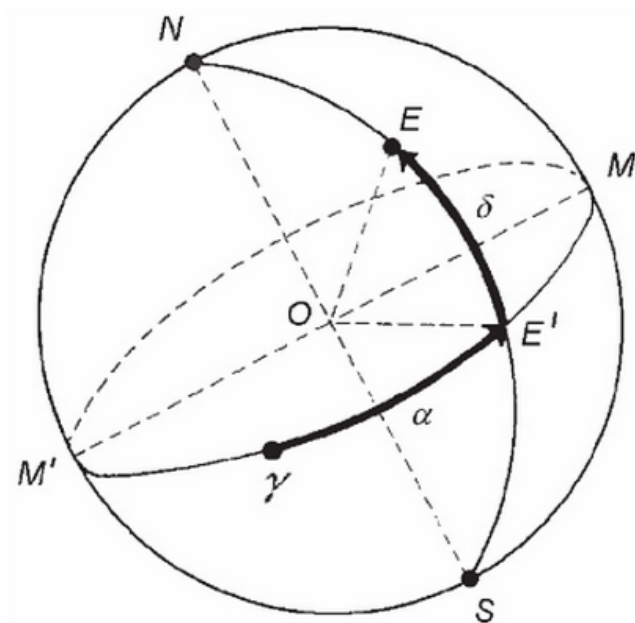


Figura 5:Coordenadas Ecuatoriales Absolutas (extraído de Vives (1971)).

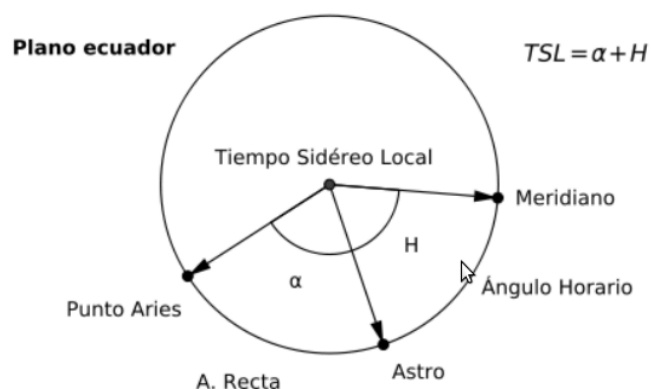


Figura 6: Relación entre  $\alpha$ ,  $H$  y  $TSL$ .

**Tiempo Sidéreo:** Una magnitud de interés en el cálculo de posiciones astronómicas es el Tiempo Sidéreo Medio de Greenwich a 0 horas de tiempo universal (GMST) y puede calcularse de la siguiente manera (Astronomical Almanac for the Year 2013):

$$\begin{aligned}
 GMST &= 86000^s(0,7790572732 + 0,0027378119Du + MOD(Du,1)) \\
 &+ 0^s,00096707 + 307^s,47710227 \cdot T + 0^s,092772113 \cdot T^2 \\
 &- 0^s,0000000293 \cdot T^3 - 0^s,0000019974 - 2^s,453x10^{-9} \cdot T^5 \quad (2)
 \end{aligned}$$

donde  $Du$  es el intervalo de días julianos<sup>1</sup> medidos desde el 1/1/2000, y  $T$  es el intervalo de Siglos Medios de 36525 días julianos a partir del 1/1/2000.

<sup>1</sup>El número de días y fracción transcurridos desde el mediodía del 1º de enero del año 4713 a. C.

Para calcular el tiempo sidéreo de Greenwich a una dada hora  $t$  (TU) hay que transformar el intervalo de tiempo medio  $t$  en tiempo sidéreo:

$$TS(t^h, Gr) = TS(0^h, Gr) + t \cdot 1,00273790935 \quad (3)$$

El tiempo sidéreo local ( $TSL$ ) en un lugar de longitud geográfica  $\lambda$  a una dada hora  $t$  de TU es el Tiempo Sidéreo en Greenwich más la longitud geográfica del lugar (pasada a intervalo de tiempo) definida positiva al este de Greenwich:

$$TSL = TS(t^h, \lambda) = TS(t^h, Gr) + \lambda \quad (4)$$

### 2.1.3 Relaciones Fundamentales de Trigonometría Esférica

La resolución de triángulos esféricos, es de mucha importancia a la hora de resolver problemas de coordenadas astronómicas. En la Figura 7 se muestra a modo de ilustración un triángulo esférico. A continuación se muestran dos teoremas de importancia:

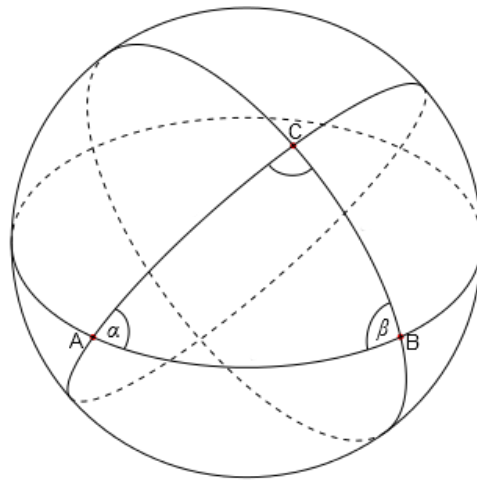


Figura 7: Triángulo Esférico

#### Relación del Seno:

A partir de la aplicación de las fórmulas trigonométricas, se obtienen la siguiente relación entre los senos de los ángulos y los lados opuestos correspondientes.

$$\frac{\sin(CB)}{\sin(\alpha)} = \frac{\sin(AC)}{\sin(\beta)} = \frac{\sin(AB)}{\sin(\gamma)} \quad (5)$$

### Relacion del Coseno:

Se obtiene de manera similar, una relación entre el coseno del lado en función de los lados restantes y el ángulo opuesto correspondiente.

$$\cos(AC) = \cos(CB)\cos(AB) + \sin(CB)\sin(AB)\cos(\alpha) \quad (6)$$

### 2.1.4 Transformación de Coordenadas

Es indispensable para conectar los diferentes sistemas de coordenadas, contar con un mecanismo de transformación de coordenadas. En este apartado se presentan las relaciones y ecuaciones que conectan los tres sistemas de coordenadas esféricas fundamentales.

#### 2.1.4.1 Ecuatoriales Absolutas → Ecuatoriales Horarias

Se utiliza la relación entre Tiempo Sidéreo Local, Ascensión Recta y Ángulo Horario, se despeja H en función de  $\alpha$  y TSL (ver Ecuación 1). La declinación permanece invariante.

$$\begin{aligned} H &= TSL - \alpha \\ \delta &= \delta \end{aligned} \quad (7)$$

#### 2.1.4.2 Ecuatoriales Horarias → Horizontales

Utilizando las relaciones trigonométricas del seno y coseno (ver ecuaciones 5 y 6) con los ángulos correspondientes, se obtiene la altura (h) y acimut (A):

$$\begin{aligned} h &= a \sin[\sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(H)] \\ A &= a \sin\left[\frac{\sin(H)\cos(\delta)}{\cos(h)}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.1.5 Corrección por Refracción Atmosférica y Paralaje

En este apartado se presentan las herramientas para corregir las coordenadas de un astro por los efectos de desviación producidos por la atmósfera terrestre, es decir, la refracción atmosférica. La segunda corrección de importancia se debe a la diferencia entre las posiciones topocéntricas (medidas desde la superficie de la tierra) y geocéntricas (medidas desde el centro de la tierra), la paralaje. Esta diferencia es despreciable para astros lejanos, pero es importante para objetos cercanos como el Sol y la Luna.

#### 2.1.5.1 Refracción Atmosférica

La radiación de cualquier astro es refractada debido a la variación del índice de refracción de la atmósfera con la altura. El efecto se traduce en un cambio de elevación aparente del astro (Figura 8).

La corrección por refracción se puede separar en dos términos,  $R_0$  y  $f(E)$ . El primer coeficiente es función de los parámetros atmosféricos de la superficie, mientras que el segundo término depende esencialmente de la altura de observación. El coeficiente de

refracción  $R_0$ , para frecuencias menores a 100 GHz y temperatura ambiente entre  $-30$  y  $+30$  grados centígrados,  $R_0$  se expresa mediante:

$$R_0 = \frac{16.01}{T_s} \left( P_s - 0.072P_w + \frac{4831P_w}{T_s} \right) \quad (9)$$

donde  $R_0$  se mide en segundos de arco (Crane y Colaboradores, 1976),  $T_s$  es la temperatura en la superficie expresada en Kelvin,  $P_s$  la presión total en la superficie expresada en mbar y  $P_w$  la presión parcial del vapor de agua expresada en mbar, que depende de la Humedad Relativa ( $HR$ ) y  $T_s [K]$  y se expresa de la siguiente forma:

$$P_w = 6.105 \frac{HR}{100} \left( \frac{T_s}{273} \right)^{-5.31} \exp \left[ 25.22 \left( \frac{T_s - 273}{T_s} \right) \right] \quad (10)$$

La corrección en altura,  $f(E)$ , requiere mayor complejidad mientras menor es la altura mínima a la que se observa. La dependencia más elaborada se debe a Yan (1996) y se expresa así:

$$f(E) = \frac{\cos(E)}{\sin(E) + \frac{A_1}{I^2 \csc(E) + \frac{A_2}{\sin(E) + \frac{13.24969}{I^2 \csc(E) + 173.4233}}}} \quad (11)$$

I,  $A_1$  y  $A_2$  dependen de los parámetros atmosféricos (ver Apéndice B).

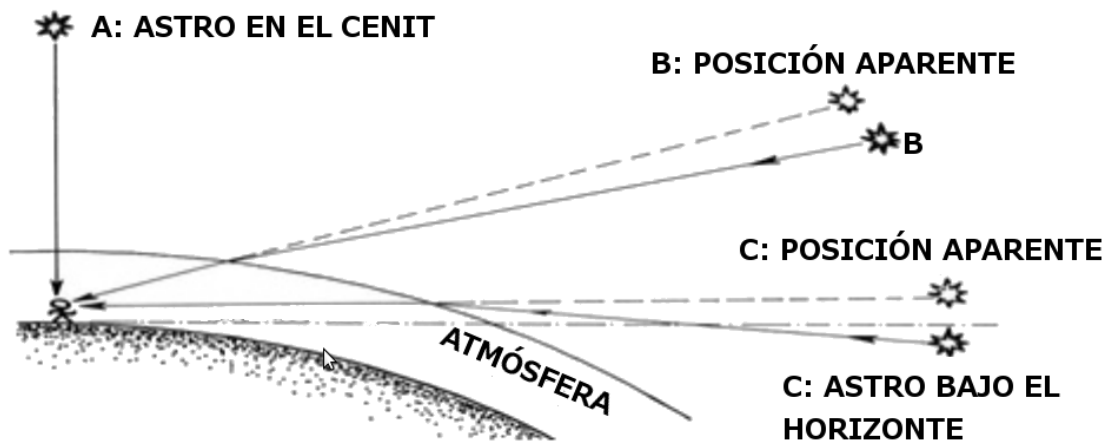


Figura 8: Esquema del efecto producido por la refracción atmosférica.

### 2.1.5.2 Paralaje

La paralaje es un efecto geométrico que se traduce en una desviación angular de la posición aparente de un objeto, dependiendo del punto de vista elegido para su observación. Para obtener las coordenadas topocéntricas de la Luna, se debe realizar una corrección por paralaje. En la figura 9 se muestra un esquema donde puede observarse este efecto. Consideramos la Tierra esférica de radio medio  $R$ ,  $O$  es el centro de



la Tierra,  $O'$  la posición del observador y  $M$  y  $M_h$ , la posición del astro cuando se encuentra en una posición cualquiera y cuando se encuentra sobre el horizonte de  $O'$  respectivamente.

El plano de la figura 9 contiene el cenit del lugar de observación. Sea  $r$  la distancia de  $M$  al centro de la Tierra,  $z$  la distancia cenital geocéntrica de  $M$  y  $z'$  la distancia cenital topocéntrica.

La paralaje  $p$  toma la siguiente expresión:

$$\sin(p) = \frac{R}{r} \quad (12)$$

Para la Luna, el valor aproximado del ángulo de paralaje es 57 minutos de arco. En cuanto al sol la paralaje es despreciable, de aproximadamente 8.7 segundos de arco.

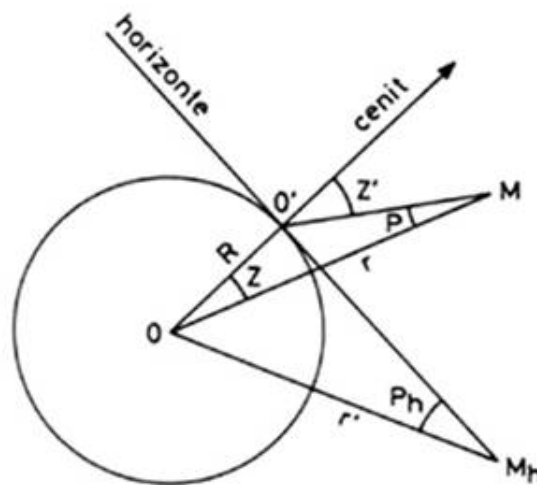


Figura 9:Esquema del efecto producido por la paralaje.

Se mostraron en esta subsección los elementos utilizados para generar el algoritmo de apuntamiento que se presenta en la siguiente subsección. Estos elementos constituyen el marco teórico para el desarrollo de un código de apuntamiento cuyo resultado será de utilidad en la calibración de radares meteorológicos.

## 2.2 Algoritmo Computacional

En esta subsección se muestra el desarrollo del algoritmo de apuntamiento para el que se aplican los conceptos vistos en el apartado anterior. Los elementos de astronomía de posición son la parte principal del cuerpo del código. El algoritmo permite calcular con precisión las posiciones aparentes del Sol y la Luna, a partir de sus coordenadas ecuatoriales absolutas, y de esta forma obtener los ángulos de apuntamiento de la antena.

---

Se describen brevemente a continuación los pasos seguidos para llevar a cabo el código.

### 2.2.1 Desarrollo

Para escribir el algoritmo computacional se utilizó el lenguaje de programación  $R^2$ , que es un proyecto de software libre distribuido bajo la licencia GNU GPL (General Public License) y está disponible para los sistemas operativos Windows, Macintosh, Unix y GNU/Linux.

En el Apéndice C se muestra el código completo. A continuación se describen sus principales características.

Como parámetros de entrada, el código utiliza:

- Las coordenadas geográficas del lugar de observación  
Longitud Geográfica ( $\lambda$ )  
Latitud Geográfica ( $\phi$ )
- La fecha y hora de observación  
Fecha (Día, Mes y Año) en el siguiente formato *dd/mm/aaaa*  
Hora en el siguiente formato *HH : MM : SS.ss*
- Parámetros Atmosféricos (Para el cálculo de la refracción)  
Temperatura en la superficie ( $T_s[K]$ )  
Presión Total en la superficie ( $P_s[mbar]$ )  
Humedad Relativa ( $HR[\%]$ )

La longitud y latitud geográfica son parámetros fijos y pueden cambiarse de acuerdo al lugar de observación determinado.

La fecha y hora pueden ser introducidos de dos maneras diferentes: 1) Manualmente, para la obtención de los ángulos de apuntamiento de la antena para una fecha y hora determinada, 2) Automáticamente, tomando directamente de los datos del sistema, para obtener los ángulos de apuntamiento instantáneos.

Los parámetros atmosféricos pueden fijarse o ser introducidos manualmente. Para lo cual debe tenerse en cuenta la precisión deseada, que como se muestra mas adelante (Apéndice D), los errores al utilizar una atmósfera estándar, no son significantes.

El algoritmo utiliza también una tabla con las coordenadas ecuatoriales absolutas del Sol y la Luna, a partir de las cuales se obtienen las coordenadas horizontales utilizadas por la antena. Además, se cuenta con una tabla con las distancias medias del Sol y la Luna para llevar a cabo el cálculo de la corrección por paralaje.

El código lee las coordenadas absolutas de la tabla y realiza los cambios de coordenadas explicados en la subsección anterior para obtener los ángulos de apuntamiento. El funcionamiento del algoritmo se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Lectura de ubicación geográfica: latitud y longitud.

---

<sup>2</sup>[www.r-project.org/](http://www.r-project.org/)

---

2. Lectura de fecha y hora de observación.
3. Cálculo del tiempo sidéreo medio en Greenwich (*GMST*).
4. Cálculo del tiempo sidéreo local (*TSL*).
5. Cambio de coordenadas absolutas a horarias: Utilizando la relación  $H = TSL - \alpha$
6. Cambio de coordenadas horarias a horizontales: Utilizando las relaciones descritas en la ecuación 8
7. Corrección de las coordenadas horizontales debido a la refracción atmosférica (expresiones 9) y (11).
8. Corrección de las coordenadas horizontales debido a la paralaje (relación 12).
9. Obtención de las coordenadas de apuntamiento corregidas.

En esta subsección se mostró sintetizado el funcionamiento del algoritmo desarrollado. A partir de las coordenadas absolutas obtenidas de una base de datos, se obtienen los ángulos de apuntamiento de la antena. En el Apéndice C se encuentran los códigos completos escritos en el lenguaje *R*.

---

### 3 Resultados

Se analizó la precisión del algoritmo estudiando la variación de las coordenadas calculadas, respecto de una base de datos *online*<sup>3</sup>. Los parámetros utilizados son los siguientes:

- Coordenadas Geográficas de la ciudad de Córdoba  
 Longitud:  $\lambda = -64^{\circ}05'$   
 Latitud:  $\phi = -31^{\circ}21'$
- Fecha y hora  
 Para la posición del Sol y la Luna, se tomaron datos desde las 18 : 00 h del día 27 de febrero de 2013, hasta las 18 : 00 h del 28 de febrero de 2013.
- Parámetros Atmosféricos  
 Temperatura en la superficie  $T_s = 293 K$   
 Presión Total en la superficie  $P_s = 980 mbar$   
 Humedad Relativa  $HR = 30\%$

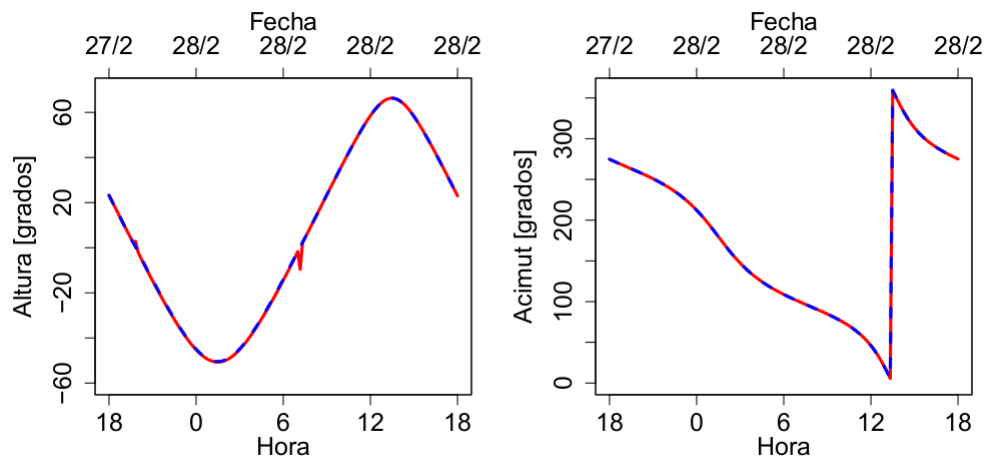


Figura 10: Variación de acimut y altura del Sol. *rojo*: datos correspondientes al algoritmo desarrollado. *azul a trazos*: datos correspondientes a una base de datos *online*.

Los parámetros atmosféricos utilizados corresponden a valores medios de los mismos. En el Apéndice D se muestra la variación de la corrección por refracción para diferentes valores de los parámetros atmosféricos.

Una vez establecidos los parámetros se pone en funcionamiento el algoritmo, tomando y almacenando los datos en intervalos de 1 minuto. En la figura 10, se muestran los resultados obtenidos para el caso del Sol, donde se grafica la variación de acimut y altura correspondientes a los datos obtenidos con el algoritmo y los datos obtenidos

<sup>3</sup><http://efemeridesastronomicas.dyndns.org>

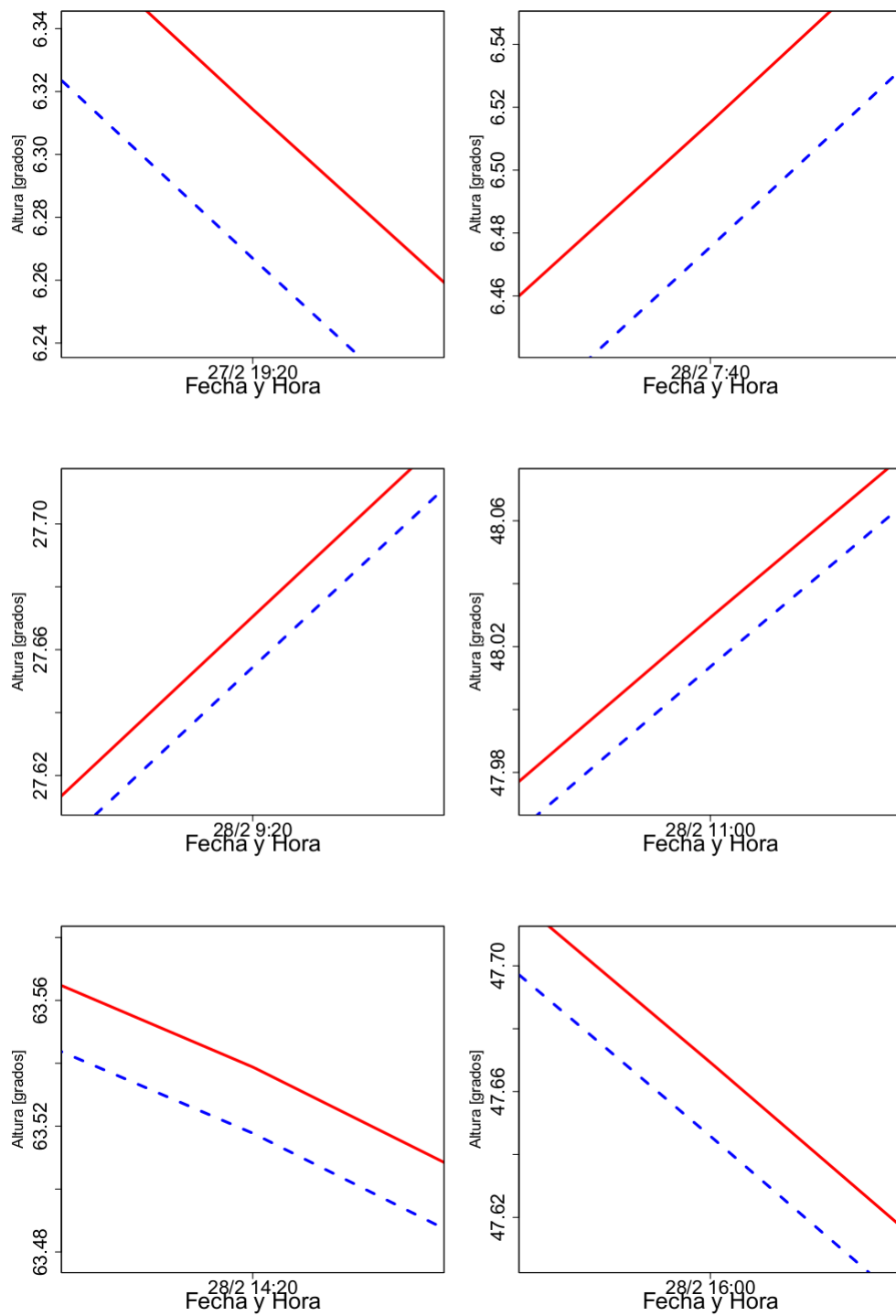


Figura 11: Variación altura del Sol para 6 momentos diferentes. *rojo*: datos correspondientes al algoritmo desarrollado. *azul a trazos*: datos correspondientes a una base de datos *online*.

de una base de datos *online*. En la figura 11, se muestran los mismos resultados en una escala menor, para seis tiempos diferentes, donde las diferencias entre el resultado

proporcionado por el algoritmo y la base de datos se muestra en la tabla 1. Los resultados obtenidos para el caso de la Luna, se muestran en la figura 12. Se observan variaciones importantes en la altura para valores pequeños de la misma: esto se debe a un error en el cálculo del coeficiente de refracción, donde el algoritmo produce variaciones importantes en el cálculo de funciones trigonométricas para valores cercanos a 0. En la figura 13 se muestran seis ampliaciones de la curva para diferentes tiempos, cuyos resultados se expresan en la tabla 2.

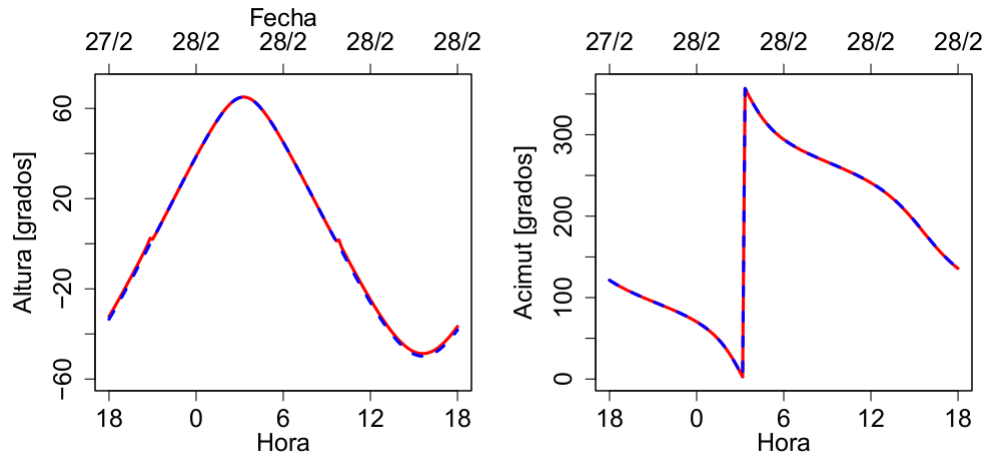


Figura 12: Variación de acimut y altura de la Luna. *rojo*: datos correspondientes al algoritmo desarrollado. *azul a trazos*: datos correspondientes a una base de datos *online*.

Las diferencias entre el resultado proporcionado por el algoritmo y la base de datos *online*, para el Sol y la Luna, no superan los  $0.05^\circ$ . Es decir, si tomamos como fuente confiable la base de datos *online*, los errores en los ángulos de apuntamiento son altos para el trabajo en astronomía, donde los detectores son del orden de los errores obtenidos, pero dichos errores son relativamente pequeños y despreciables frente a la resolución angular de los radares meteorológicos estándares, de aproximadamente  $1^\circ$ .

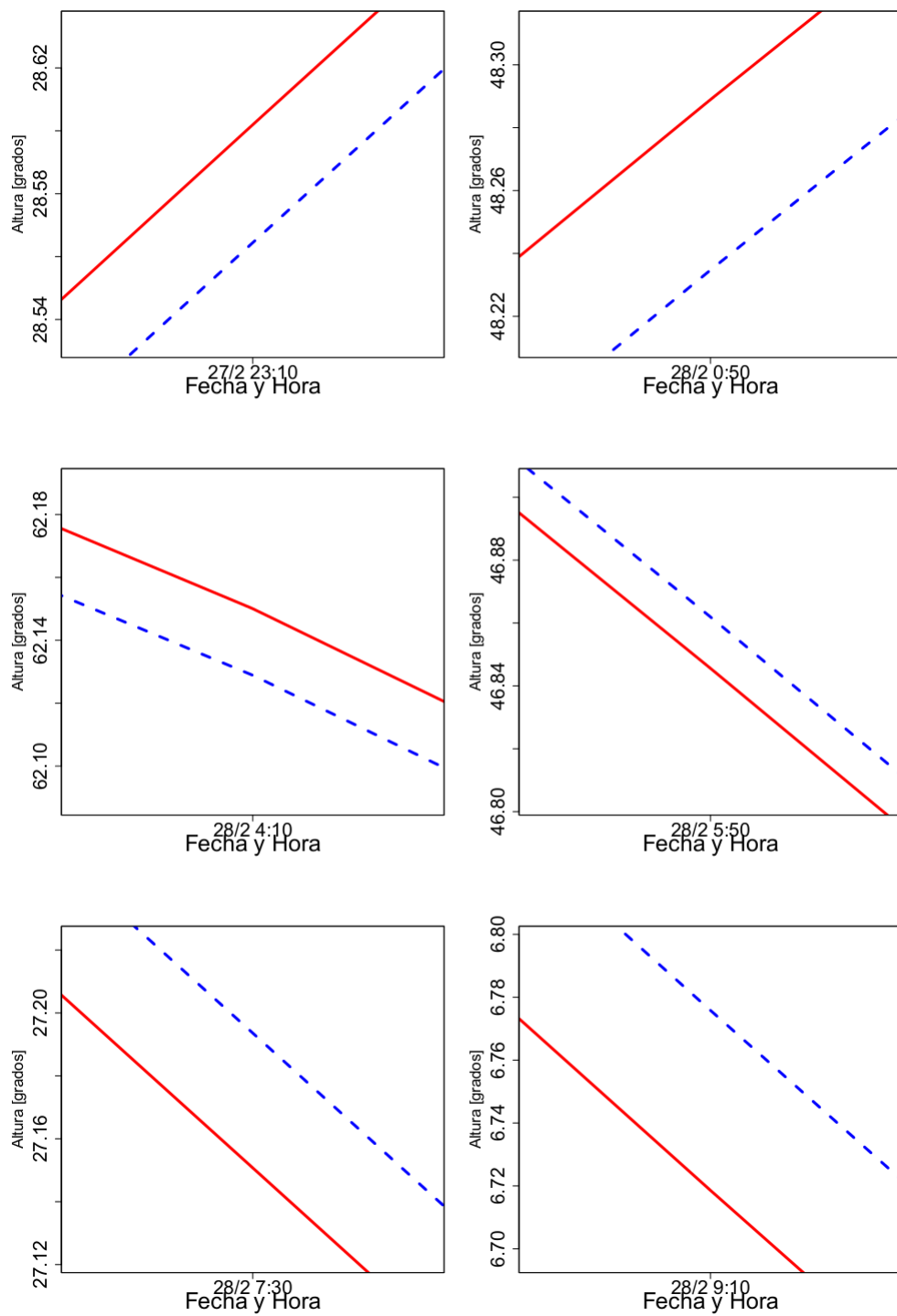


Figura 13: Variación de altura de la Luna para 6 momentos diferentes. *rojo*: datos correspondientes al algoritmo desarrollado. *azul a trazos*: datos correspondientes a una base de datos *online*.

Tabla 1: Comparación de Alturas del Sol entre el algoritmo desarrollado y la base de datos online

Fecha y Hora (DD/MM/AAAA HH:MM)	Altura (Algoritmo) [grados]	Altura (Base de Datos) [grados]	Diferencia [grados]
27/02/2013 18:00	23.255	23.233	0.022
27/02/2013 19:20	6.314	6.267	0.047
28/02/2013 07:40	6.515	6.476	0.040
28/02/2013 09:20	27.671	27.654	0.016
28/02/2013 11:00	48.029	48.014	0.016
28/02/2013 14:20	63.539	63.518	0.021
28/02/2013 16:00	47.669	47.646	0.023

Tabla 2: Comparación de Alturas de la Luna entre el algoritmo desarrollado y la base de datos online

Fecha y Hora (DD/MM/AAAA HH:MM)	Altura (Algoritmo) [grados]	Altura (Base de Datos) [grados]	Diferencia [grados]
27/02/2013 21:30	7.879	7.856	0.023
27/02/2013 23:10	28.602	28.564	0.037
28/02/2013 00:50	48.289	48.235	0.054
28/02/2013 04:10	62.150	62.129	0.021
28/02/2013 05:50	46.846	46.862	-0.016
28/02/2013 07:30	27.151	27.194	-0.043
28/02/2013 09:10	6.719	6.776	-0.057

## 4 Conclusiones

A partir de la aplicación de elementos de astronomía de posición, se logró desarrollar un código computacional que permite obtener las coordenadas del Sol y la Luna. Las coordenadas obtenidas están corregidas por fenómenos atmosféricos y de proyección como la refracción y paralaje respectivamente. Esto lleva a una determinación más realista de las posiciones de los objetos astronómicos estudiados.

Si bien el error en el valor final de las coordenadas es de alrededor de  $0.05^\circ$ , no genera inconvenientes a la hora de realizar observaciones de radar, debido a que sólo representa un pequeño porcentaje de la resolución angular de un radar meteorológico ( $\sim 1^\circ$ ) y está dentro de los valores esperados.

La aplicación de este algoritmo de apuntamiento, permitirá no solo calibrar los ángulos de apuntamiento de los radares meteorológicos, si no también realizar calibraciones en flujo mediante el uso de monitoreos del sol en frecuencia de microondas.



---

## 5 Referencias

Andrews, G. F., 1969, "Solar Radiation - A Useful Tool For Radar Antenna Orientation", Institute of Maine Sciences, University of Miami, Miami FL. 56 p. Atlas, D., 2002: Radar calibration, Some simple approaches. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83, 1313-1316.

Astronomical Almanac for the Year 2013, United States Naval Observatory/Nautical Almanac Office, 2013.

Crane, R.K. (1976) - "Refraction effects in the neutral atmosphere", Methods of Experimental Physics, vol 12, part B, pag 186.

Getak, F., P. Gözl and R. Hannesen, 2011, "Weather radar calibration and testing using the Moon as a reference target", 35<sup>th</sup> Conference on Radar Meteorology. P159.

Holleman, I., A. Huuskonen, R. Gill, P. Tabary, 2010, "Operational Monitoring of Radar Differential Reflectivity Using the Sun". J. Atmos. Oceanic Technol., 27, 881-887.

Ryzhkov, A. V., S. E. Giangrande, V. M. Melnikov, and T. J. Schuur, 2005, "Calibration issues of dual-polarization radar measurements", J. Atmos. Oceanic Technol., 22, 1778-1795.

Holleman, I. and H. Beekhuis, 2004, Weather Radar Monitoring using the Sun. Royal Netherlands Meteorological Institute, Technical Report, KNMI TR-272.

Pratt, J. F. and D. G. Ferraro, 1989, "Automated Solar Gain Calibration", Preprints, 24<sup>th</sup> Conference on Radar Meteorology, AMS, Tallahassee, FL p619-622.

Manz, A., A. H. Smith, P. J. Hardaker, 2000, "Comparison of different methods of end to end calibration of the U.K. weather radar network", Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, Volume 25, 10-12, pp 1157-1162.

Puhakka, P. V. S., 2005, "Solar Calibration with Dual Polarization Weather Radar", The 32<sup>nd</sup> Conference on Radar Meteorology - 11<sup>th</sup> Conference on Mesoscale Processes, Albuquerque, USA.

Vives, T. J., 1971, "Astronomía de Posición, Espacio y Tiempo", Editorial Alhambra S.A. - Madrid.

Yan, H., 1996, "A new expression for astronomical refraction", Astronomical Journal vol 112, p 1312.

---

## **6 Apéndices**

## Apéndice A: Punto Vernal (o Primer Punto de Aries)

En astronomía se denomina Primer Punto de Aries o Punto Vernal al punto de la eclíptica a partir del cual el Sol pasa del hemisferio sur terrestre al hemisferio norte, lo que ocurre en el equinoccio de primavera sobre el 21 de marzo (iniciándose la primavera en el hemisferio norte y el otoño en el hemisferio sur). Los planos del ecuador celeste y la eclíptica (el plano formado por la órbita de la Tierra alrededor del Sol o el movimiento aparente del Sol a lo largo de un año) se cortan en una recta, que tiene en un extremo el punto Aries y en el extremo diametralmente opuesto el punto Libra (ver figura A.1). El punto Aries es el origen de la ascensión recta, y en dicho punto tanto la ascensión recta como la declinación son nulas.

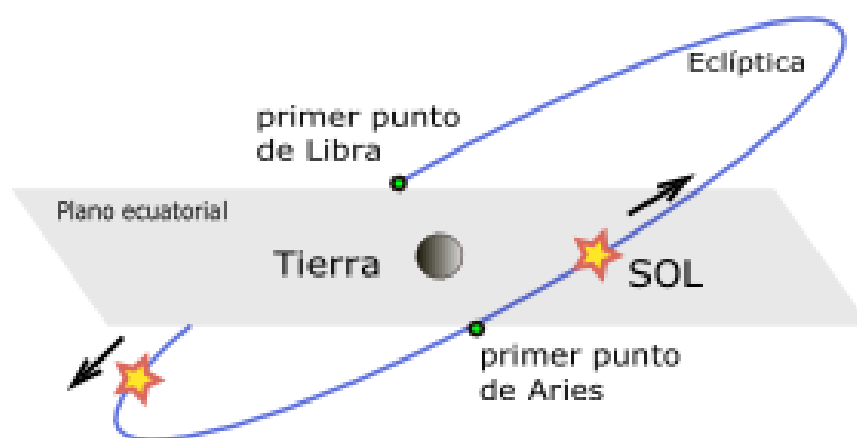


Figura A.1: Representación de los planos del ecuador y eclíptica, y la correspondiente ubicación del Punto Vernal.

## Apéndice B: Corrección por refracción

En el apartado 2.1.5, se describe la corrección por refracción atmosférica, donde se divide en dos términos:  $R_0$  y  $f(E)$ . A continuación se muestra la dependencia de los términos  $I$ ,  $A_1$  y  $A_2$  con los parámetros atmosféricos.

Tenemos:

$$f(E) = \frac{\cos(E)}{\sin(E) + \frac{A_1}{I^2 \csc(E) + \frac{A_2}{\sin(E) + \frac{13.24969}{I^2 \csc(E) + 173.4233}}}} \quad (\text{B.1})$$

$I$  depende de la altura efectiva de la atmósfera, que depende a su vez de la temperatura atmosférica  $T_s$ . Se expresa así:

$$I = 340 \frac{\tan(E)}{\sqrt{T_s}} \quad (\text{B.2})$$

Los parámetros  $A_1$  y  $A_2$  se escriben de la siguiente manera:

$$A_1 = 0.5753868 + 0.5291 \times 10^{-4}(P_s - 1013.25) - 0.2819 \times 10^{-4}P_w - 0.9381 \times 10^{-6}P_w^2 - 0.5958 \times 10^{-3}(T_s - 15) + 0.2657 \times 10^{-5}(T_s - 15)^2 \quad (\text{B.3})$$

$$A_2 = 1.301211 + 0.2003 \times 10^{-4}(P_s - 1013.25) - 0.7285 \times 10^{-4}P_w + 0.2579 \times 10^{-5}P_w^2 - 0.2595 \times 10^{-2}(T_s - 15) + 0.8509 \times 10^{-5}(T_s - 15)^2 \quad (\text{B.4})$$

## Apéndice C: Algoritmo Computacional de Apuntamiento

### Algoritmo de Apuntamiento: SOL

```

# _____
# | PROGRAMA PARA CALCULAR ACIMUT Y ALTURA DEL SOL |
# _____
# _____
# Datos del Lugar de observación
# Para un lugar fijo (Córdoba):
lambda=-64.33
phi=-31.36
# _____
# Tomamos FECHA Y HORA DEL SISTEMA
# _____
hoy <- Sys.time()

TANNO = as.integer(format(hoy, format="%Y"))
TMES = as.integer(format(hoy, format="%m"))
TDIA = as.integer(format(hoy, format="%d"))

THORA = as.integer(format(hoy, format="%H"))
TMINUTO = as.integer(format(hoy, format="%M"))
TSEG = as.integer(format(hoy, format="%S"))

# Redefino la hora para utilizar el TU
# Aumento 3 hs (Uso Horario Argentina)
  THORA = THORA+3
# _____
# Cálculo del número de día en el año
# _____
M=TMES
Y=TANNO
D=TDIA

BIS=1
  if (Y%%4 == 0)
BIS = 0
  if (Y%%100 == 0)
BIS = 1
  if (Y%%400 == 0)
BIS = 0

  if (BIS == 0) K=1 else K = 2

```

---

```

DOY = ((275*M)/%9) - K*((M+9)/%12) + D - 30
#-----

#-----
# Cálculo de Tiempo Sidéreo en Greenwich a 0hs de T.U.
#-----

GMST=6.6547660+0.0657098245*DOY+1.00273791*0

#-----

#-----
# Cálculo del Tiempo Sidéreo en Greenwich a una hora dada de TU
#-----

TLH=THORA
TLM=TMINUTO
TLS=TSEG

TL=TLH+TLM/60+TLS/3600 #TU dado

TSG=GMST+1.00273790935*TL

TSL=TSG+lambd/15

#-----
# Coordenadas Ecuatoriales Absolutas
#-----
# Lee el archivo donde se encuentran las coordenadas
C <- read.table("coordenadas-sol.dat")

# Asigna los valores de RA y DEC para
# el día "TDIA" del mes "TMES"

RA1 <- C$V3[DOY]

DEC1 <- C$V4[DOY]

RA2 <- C$V3[DOY+1]

DEC2 <- C$V4[DOY+1]

RA <- ((RA2-RA1)/24.)*(TL)+RA1
DEC <- ((DEC2-DEC1)/24.)*(TL)+DEC1

#-----

```

---

---

```
#-----
#Coordenadas Ecuatoriales Horarias
#Cálculo del Ángulo Horario TS = H + alpha
#-----
AH=(TSL-RA)%%24
AH1=AH
DEC=DEC
DEC1=DEC

AH=(AH*15.)*pi/180.
DEC=DEC*pi/180.
phi=phi*pi/180.
#-----

#-----
#Paso a Coordenadas Horizontales
#-----
alt=asin(sin(phi)*sin(DEC)+cos(phi)*cos(DEC)*cos(AH))
az=acos((sin(DEC)-sin(phi)*sin(alt))/(cos(phi)*cos(alt)))

E <- alt

if (AH1 > 12 ) {
  az=az*180./pi
} else if ( AH1 < 12 ) {
  az=360.-az*180./pi
}

alt=alt*180./pi

#-----
# Corrección por PARALAJE
#-----
#PARALAJE FIJA
p_sol <- 8.7/3600

#-----

#-----
# Corrección por refracción
```

---

---

```

#
HR <- 50
Ts <- 273+22

Ps <- 720/0.75006

# Un milibar equivale a 0,75006 mm de mercurio

Pw <- 6.105*(HR/100)*(Ts/273)^(-5.31)*exp(25.22*(Ts-273)/Ts)

I <- 340*tan(E)/sqrt(Ts)

A1 <- 0.5753868+0.5291E-4*(Ps-1013.25)-0.2819E-4*Pw-0.9381E-6*Pw^2
      -0.5958E-3*(Ts-15)+0.2657E-5*(Ts-15)^2
A2 <- 1.301211+0.2003E-4*(Ps-1013.25)-0.7285-4*Pw+0.2579E-5*Pw^2
      -0.2595E-2*(Ts-15)+0.8509E-5*(Ts-15)^2

R_0 <- (16.01/Ts)*(Ps-0.072*Pw+(4871*Pw/Ts))

f_E <- cos(E)/(sin(E)+A1/(I^2*(1/sin(E))+A2/(sin(E)+
      13.24969/(I^2*(1/sin(E))+173.4233))))

f_E <- f_E*180./pi

#
# Escribe en pantalla los valores obtenidos
#
cat("-----\n")
cat(" POSICIÓN DE LA LUNA (ACIMUT Y ELEVACIÓN)      \n")
cat("-----\n")
cat(" Latitud Geográfica:\          ", phi*180/pi, "\n")
cat(" Longitud Geográfica:\         ", lambda, "\n")
cat(" Fecha:\                        ", TDIA, "/", TMES, "/", TANNO, "\n")
cat(" Hora:\                          ", THORA-3, ":", TMINUTO, ":", TSEG, "\n")
cat("-----\n")
cat(" Hora (TU):\                    ", THORA, ":", TMINUTO, ":", TSEG, "\n")
cat(" Número de día en el año:\       ", DOY, "\n")
cat(" T.S. Greenwich (0hs TU):\       ", GMST%%24, "\n")
cat(" T.S. Greenwich:\                ", TSG%%24, "\n")
cat(" T.S. Local (Córdoba):\          ", TSL%%24, "\n")
cat(" Ascención Recta:\              ", formatC(RA, format="f")

```

---



---

```

    , digits = 6), "\n")
cat (" Declinación : \          ", formatC (DEC1, format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat (" Ángulo Horario : \      ", formatC (AH1, format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat ("-----\n")
cat (" TEMPERATURA SUPERFICIAL : \ ", formatC (Ts, format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat (" PRESION SUPERFICIAL : \     ", formatC (Ps, format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat (" PRESION DE VAPOR DE H2O : \ ", formatC (Pw, format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat (" REFRACCION (ATM) [\ " ] : \   ", formatC (R_0, format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat (" REFRACCION (ALT) [\ " ] : \   ", formatC (f_E, format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat ("-----\n")
cat (" ACIMUT : \                   ", formatC (az, format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat (" ELEVACIÓN : \                 ", formatC (alt, format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat ("-----\n")
cat ("-----Coordenadas corregidas por Refracción-----\n")
cat ("-----\n")
cat (" ACIMUT : \                   ", formatC (az, format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat (" ELEVACIÓN : \                 "
    , formatC (alt + R_0 / 3600 + f_E / 3600, format = " f ", digits = 6), "\n")
cat (" -Coordenadas corregidas por Refracción y Aberración -\n")
cat ("-----\n")
cat (" ACIMUT : \                   ", formatC (az, format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat (" ELEVACIÓN : \                 "
    , formatC (sign (alt) * (abs (alt) + R_0 / 3600 + f_E / 3600 - p1), format = " f "
    , digits = 6), "\n")
cat ("-----\n")
#-----

```

```

#-----
# Escribe en un archivo los valores obtenidos
# DD - MM - AAAA - HH - MM - SS - ACIMUT - ALTURA
#-----

```

---

---

## Algoritmo de Apuntamiento: LUNA

```

# -----
# | PROGRAMA PARA CALCULAR AZIMUT Y ALTURA DE LA LUNA
# -----

#-----
#Datos del Lugar de observación
#Para un lugar fijo (Córdoba):

lambda=-64.33
phi=-31.36
#-----
#-----
#Tomamos FECHA Y HORA DEL SISTEMA
#-----
hoy <- Sys.time()

TANNO = as.integer(format(hoy, format="%Y"))
TMES = as.integer(format(hoy, format="%m"))
TDIA = as.integer(format(hoy, format="%d"))

THORA = as.integer(format(hoy, format="%H"))
TMINUTO = as.integer(format(hoy, format="%M"))
TSEG = as.integer(format(hoy, format="%S"))

# Redefino la hora para utilizar el TU
# Aumento 3 hs (Uso Horario Argentina)
THORA = THORA+3
#-----
#Cálculo del número de día en el año
#-----
M=TMES
Y=TANNO
D=TDIA

BIS=1
  if (Y%%4 == 0)
BIS = 0
  if (Y%%100 == 0)
BIS = 1
  if (Y%%400 == 0)
BIS = 0

  if (BIS == 0) K=1 else K = 2

```

---

---

```
DOY = ((275*M)/%9) - K*((M+9)/%12) + D - 30
#-----
#Cálculo de Tiempo Sidéreo en Greenwich a 0hs de T.U.
#-----

GMST=6.6547660+0.0657098245*DOY+1.00273791*0

#-----
#Cálculo del Tiempo Sidéreo en Greenwich a una hora dada de TU
#-----

TLH=THORA
TLM=TMINUTO
TLS=TSEG

TL=TLH+TLM/60+TLS/3600 #TU dado

TSG=GMST+1.00273790935*TL

TSL=TSG+lambd/15
#-----

#-----
#Coordenadas Ecuatoriales Absolutas
#-----
# Lee el archivo donde se encuentran las coordenadas
C <- read.table("coordenadas-luna.dat")

# Asigna los valores de RA y DEC para
# el día "TDIA" del mes "TMES"

RA1 <- C$V3[DOY]

DEC1 <- C$V4[DOY]

RA2 <- C$V3[DOY+1]

DEC2 <- C$V4[DOY+1]

RA <- ((RA2-RA1)/24.)*(TL)+RA1
DEC <- ((DEC2-DEC1)/24.)*(TL)+DEC1

#-----

#-----
```

---

---

```

#Coordenadas Ecuatoriales Horarias
#Cálculo del Ángulo Horario TS = H + alpha
#-----
AH=(TSL-RA)%%24
AH1=AH
DEC=DEC
DEC1=DEC

AH=(AH*15.)*pi/180.
DEC=DEC*pi/180.
phi=phi*pi/180.
#-----

#-----
#Paso a Coordenadas Horizontales
#-----
alt=asin(sin(phi)*sin(DEC)+cos(phi)*cos(DEC)*cos(AH))
az=acos((sin(DEC)-sin(phi)*sin(alt))/(cos(phi)*cos(alt)))

E <- alt

if (AH1 > 12 ) {
  az=az*180./pi
} else if ( AH1 < 12 ) {
  az=360.-az*180./pi
}

alt=alt*180./pi

#-----
# Corrección por PARALAJE
#-----

#INTERPOLACION DE LA DISTANCIA LUNAR

Dist_luna1 <- C$V5[DOY]

Dist_luna2 <- C$V5[DOY+1]

Dist_luna <- ((Dist_luna2-Dist_luna1)/24.)*(TL)+Dist_luna1

#ANGULO DE PARALAJE
p1 <- asin(cos(E)*sin((Par_H/3600)*pi/180))
p1 <- p1*180/pi

```

---

---

```

#
#
# Corrección por refracción
#
HR <- 30
Ts <- 273+20

Ps <- 740/0.75006

# Un milibar equivale a 0,75006 mm de mercurio

Pw <- 6.105*(HR/100)*(Ts/273)^(-5.31)*exp(25.22*(Ts-273)/Ts)

I <- 340*tan(E)/sqrt(Ts)
A1 <- 0.5753868+0.5291E-4*(Ps-1013.25)-0.2819E-4*Pw-0.9381E-6*Pw^2
      -0.5958E-3*(Ts-15)+0.2657E-5*(Ts-15)^2
A2 <- 1.301211+0.2003E-4*(Ps-1013.25)-0.7285-4*Pw+0.2579E-5*Pw^2
      -0.2595E-2*(Ts-15)+0.8509E-5*(Ts-15)^2

R_0 <- (16.01/Ts)*(Ps-0.072*Pw+(4871*Pw/Ts))

f_E <- cos(E)/(sin(E)+A1/(I^2*(1/sin(E))+A2/(sin(E)+
      13.24969/(I^2*(1/sin(E))+173.4233)))

f_E <- f_E*180./pi

#
# Escribe en pantalla los valores obtenidos
#
cat("-----\n")
cat(" POSICIÓN DE LA LUNA (ACIMUT Y ELEVACIÓN)      \n")
cat("-----\n")
cat(" Latitud Geográfica:\          ", phi*180/pi, "\n")
cat(" Longitud Geográfica:\         ", lambda, "\n")
cat(" Fecha:\                        ", TDIA, "/", TMES, "/", TANNO, "\n")
cat(" Hora:\                          ", THORA-3, ":", TMINUTO, ":", TSEG, "\n")
cat("-----\n")
cat(" Hora (TU):\                    ", THORA, ":", TMINUTO, ":", TSEG, "\n")
cat(" Número de día en el año:\      ", DOY, "\n")
cat(" T.S. Greenwich (0hs TU):\     ", GMST%%24, "\n")
cat(" T.S. Greenwich:\              ", TSG%%24, "\n")

```

---

---

```

cat("T.S. Local (Córdoba):\          ",TSL%%24,"\n")
cat(" Ascensión Recta:\              ",formatC(RA,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat(" Declinación:\                  ",formatC(DEC1,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat(" Ángulo Horario:\              ",formatC(AH1,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat("-----\n")
cat("TEMPERATURA SUPERFICIAL:\        ",formatC(Ts,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat("PRESION SUPERFICIAL:\            ",formatC(Ps,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat("PRESION DE VAPOR DE H2O:\        ",formatC(Pw,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat("REFRACCION (ATM)[\"] :\          ",formatC(R_0,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat("REFRACCION (ALT)[\"] :\          ",formatC(f_E,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat("-----\n")
cat("ACIMUT:\                          ",formatC(az,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat("ELEVACIÓN:\                        ",formatC(alt,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat("-----\n")
cat("-----Coordenadas corregidas por Refracción-----\n")
cat("-----\n")
cat("ACIMUT:\                          ",formatC(az,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat("ELEVACIÓN:\                        "
      ,formatC(alt+R_0/3600+f_E/3600,format="f",digits=6),"\n")
cat("-----Coordenadas corregidas por Refracción y Aberración-----\n")
cat("-----\n")
cat("ACIMUT:\                          ",formatC(az,format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat("ELEVACIÓN:\                        "
      ,formatC(sign(alt)*(abs(alt)+R_0/3600+f_E/3600-p1),format="f"
      ,digits=6),"\n")
cat("-----\n")
#-----

```

---

---

## Apéndice D: Influencia de los parámetros atmosféricos en la corrección por refracción

Para analizar la variación del valor de la Corrección por Refracción ( $CR$ ) en función de la variación de los parámetros atmosféricos ( $T_s$ ,  $P_s$ , y  $HR$ ), se realizaron mediciones para diferentes condiciones atmosféricas. Se tuvieron en cuenta seis casos:

1.  $HR$  vs  $CR$ , para  $T_s$  constante y tres valores diferentes de  $P_s$ .
2.  $HR$  vs  $CR$ , para  $P_s$  constante y tres valores diferentes de  $T_s$ .
3.  $T_s$  vs  $CR$ , para  $HR$  constante y tres valores diferentes de  $P_s$ .
4.  $T_s$  vs  $CR$ , para  $P_s$  constante y tres valores diferentes de  $HR$ .
5.  $P_s$  vs  $CR$ , para  $HR$  constante y tres valores diferentes de  $T_s$ .
6.  $P_s$  vs  $CR$ , para  $T_s$  constante y tres valores diferentes de  $HR$ .

Estos seis casos se muestran en la figura D.1. Las variaciones en general son pequeñas, con valores menores a  $0.05^\circ$  entre máximos y mínimos del valor de  $CR$ , siendo en general mayor la variación cuando varía el rango de temperatura. Es decir que un cambio brusco en las condiciones atmosféricas, afecta al valor de  $CR$  en aproximadamente un 15% en el peor de los casos.

También se analizó la variación de  $CR$  respecto de la elevación, teniendo en cuenta los siguientes tres casos:

1.  $P_s$  y  $T_s$  constantes para tres valores diferentes de  $HR$ .
2.  $HR$  y  $P_s$  constantes, para tres valores diferentes de  $T_s$ .
3.  $HR$  y  $T_s$  constantes, para tres valores diferentes de  $P_s$ .

Los resultados se muestran en la figura D.2, donde se observan valores de la variación de  $CR$  pequeños, en concordancia con el análisis anterior.

Teniendo en cuenta estos resultados, se pueden utilizar parámetros atmosféricos estándares. Las variaciones en el valor del ángulo de elevación calculado, no superan los  $0.05^\circ$ , que representa el 5% de la resolución de los radares meteorológicos estándares.

---

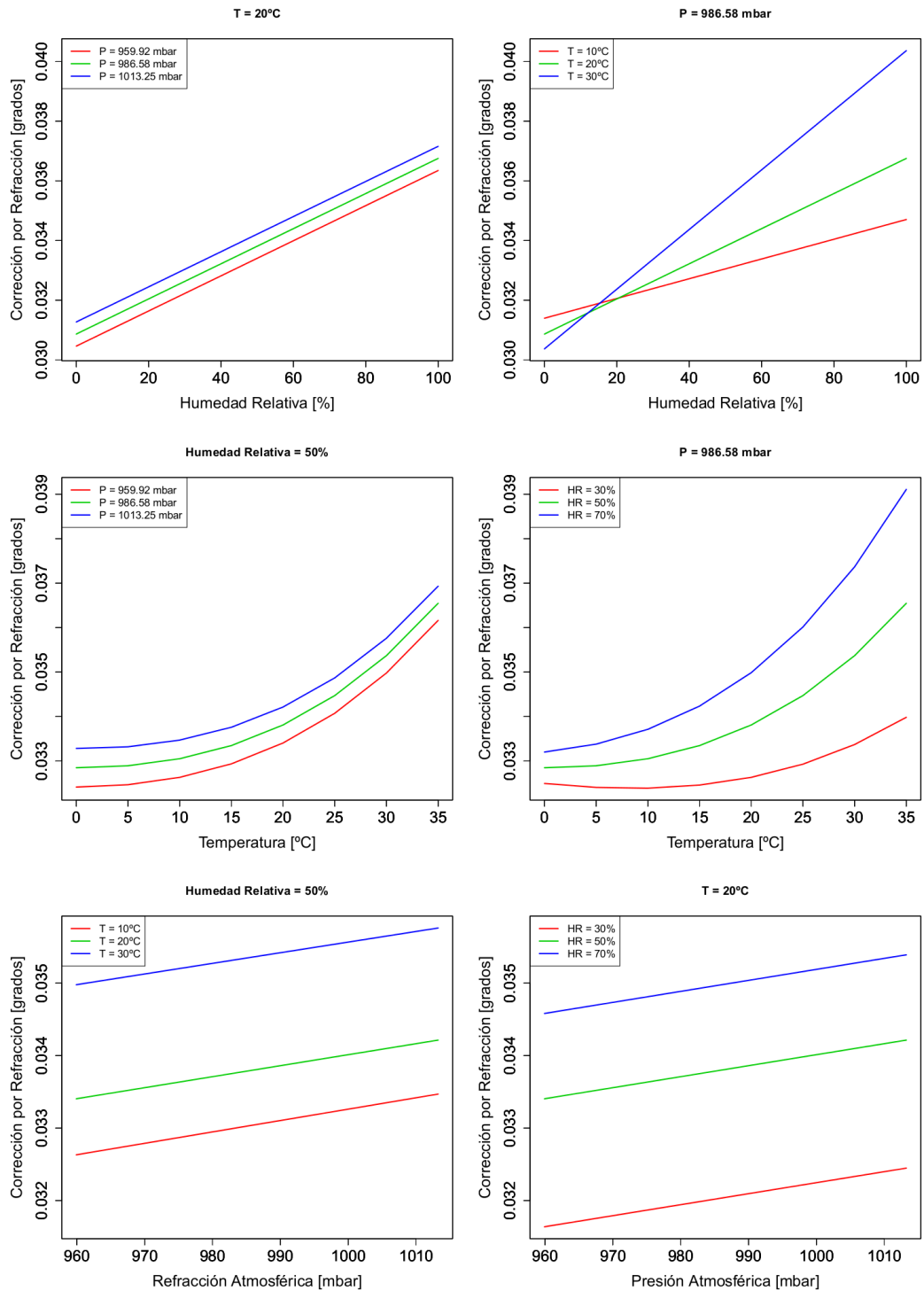


Figura D.1: Variación del valor de la corrección por refracción, en función de la variación de las condiciones atmosféricas.



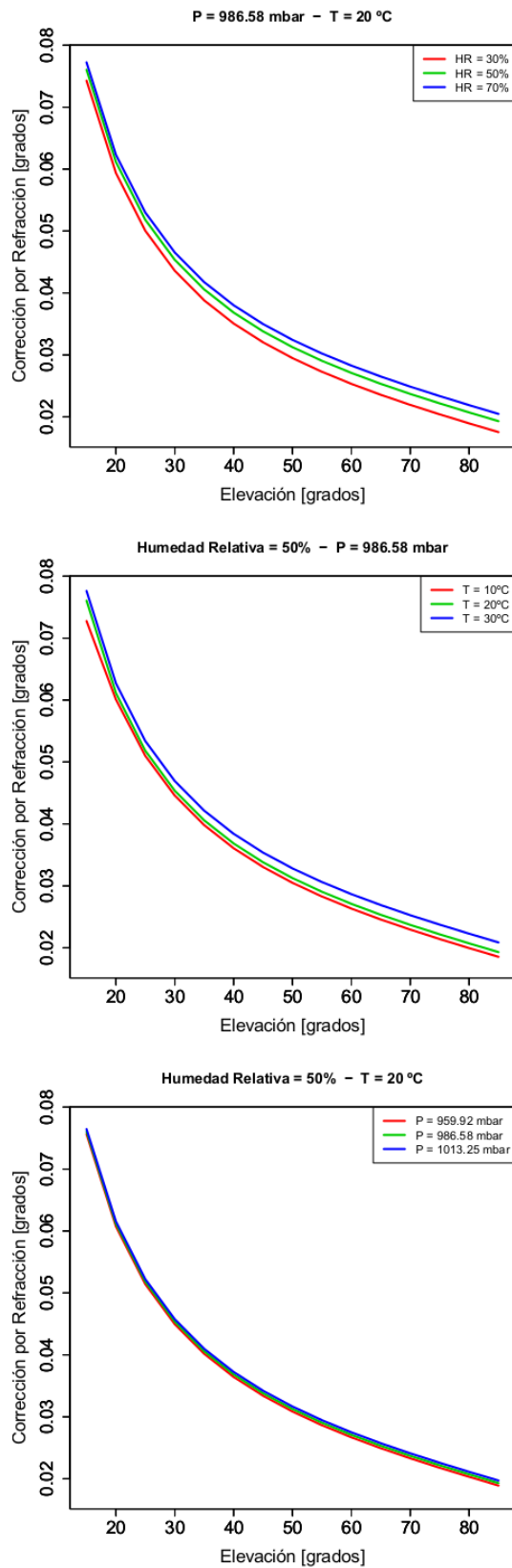


Figura D.2: Variación del valor de la corrección por refracción, en función de la elevación, para diferentes condiciones atmosféricas.