

Asteroid Position

Software para el posicionamiento de asteroides en imágenes astronómicas

Versión 1.0

Guía de Usuario

2017

Contenido

Consideraciones Generales.....	4
¿Qué es <i>Asteroid Position</i> ?	4
Contenido del CD	4
Licencia y Términos de Uso	4
¿Cómo adquirir <i>Asteroid Position</i> ?.....	5
Guía de Instalación.....	6
Requerimientos Mínimos del Sistema	6
Instalación.....	6
Presentación de la Interfaz Gráfica	7
Menú Archivo.....	8
Cargar:.....	8
Salir:	11
Posicionamiento	11
Referencias:	11
Resolución:.....	13
Coordenadas:.....	13
Calcular:	21
Menú de Ayuda.....	23
Acerca De	23
Guía de Usuario.....	23
Ejemplos de Aplicación	25
Ludmilla_16_Sep_2014_04_02_10UT.FIT.....	26
Ludmilla_16_Sep_2014_05_08_29UT.FIT.....	28
Tololo_28_Oct_2014_04_49_54UT.FIT.....	30
Algoritmos.....	32
J2000 a JFecha	32
Centroide	36
Rotación.....	38
Función <i>rota()</i>	38
Función <i>errorposiciónr()</i>	41

Posiciones	41
Error Posición.....	44
JFecha a J2000	45
Referencias	48

Consideraciones Generales

¿Qué es *Asteroid Position*?

Asteroid Position es una aplicación desarrollada en *Matlab*[®] que permite estimar las coordenadas *J2000* de ascensión recta (*AR*) y declinación (*DEC*), que determinan la posición de un asteroide o cometa presente en una fotografía astronómica capturada en formato **.fit*, **.fits* o **.fts*. Además, esta herramienta también arroja el error presente en la medición de la posición del objeto, obteniéndose de esta manera datos mucho más confiables, con los cuales es posible adelantar la reducción astrométrica de las observaciones.

Este documento es una guía de usuario que le permitirá instalar la aplicación y comprender su funcionamiento.

Contenido del CD

El CD de instalación de *Asteroid Position* contiene los siguientes archivos:

- *MCR_R2016a_win64_installer.exe*: Instalador del *Run Time* de *Matlab 2016a*, el cual contiene el conjunto independiente de bibliotecas compartidas necesarias para la ejecución de *Asteroid Position*.
- *AsteroidPosition.exe*: Ejecutable del programa.
- *Ayuda.pdf*: Este archivo de ayuda.
- *readme.txt*: Archivo de texto con instrucciones para la instalación y ejecución del programa.
- *splash.png*: Imagen de inicio de la aplicación.
- *default_icon.ico*: Ícono de la aplicación.
- *Imágenes de Prueba*: Carpeta con imágenes de prueba para el entrenamiento en el uso de la aplicación.

Licencia y Términos de Uso

Asteroid Position es una aplicación desarrollada por el Grupo de Investigación en Astroingeniería Alfa Orión del Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira, de uso libre (*free software*). Se solicita a los usuarios que, en caso de generarse publicaciones a partir del tratamiento de imágenes astronómicas haciendo uso de este software, se realicen las citaciones respectivas.

¿Cómo adquirir *Asteroid Position*?

Asteroid Position está disponible para su descarga en la siguiente dirección Web:

<http://observatorioastronomico.utp.edu.co/astrometria/asteroid-position.html>

Guía de Instalación

Requerimientos Mínimos del Sistema

Para el funcionamiento apropiado de la aplicación *Asteroid Position*, se recomienda que el sistema cumpla, como mínimo, con los siguientes requerimientos:

- Sistema operativo Microsoft Windows® 7 de 64bits.
- Procesador de 1.4GHz.
- Memoria RAM de 1GB.

Instalación

Para la instalación de *Asteroid Position* por favor siga los siguientes pasos:

1. Copie todo el contenido del *CD* de instalación en su disco duro.
2. Ejecute el archivo *MCR_R2016a_win64_installer.exe*, el cual contiene el conjunto independiente de bibliotecas compartidas necesarias para la ejecución de *Asteroid Position*. Debe proporcionar permisos de administrador para esta labor. Siga las instrucciones que se indican en la ventana desplegada al ejecutar el instalador hasta finalizar el proceso.
3. Ejecute el archivo *AsteroidPosition.exe* y disfrute de la aplicación.

Presentación de la Interfaz Gráfica

La aplicación *Asteroid Position* fue implementada en la utilidad *GUIDE*, del entorno de desarrollo integrado *Matlab*[®]. Con esta herramienta se logra una interfaz cómoda y amigable con el usuario, que permite establecer la posición en términos de ascensión recta (AR) y declinación (DEC), precesionada al equinoccio del año 2000, de un asteroide o cometa presente en una fotografía astronómica en la cual están registradas estrellas de referencia. Además, la aplicación arroja el error estimado en el cálculo de las coordenadas que definen la posición del objeto, información imprescindible a la hora de realizar la reducción astrométrica de las observaciones.

La Figura 1 presenta la distribución de las diferentes opciones de botones y menús de la aplicación *Asteroid Position*, las cuales serán explicadas a continuación. Por su parte, la Figura 2 presenta una vista de la ventana principal de *Asteroid Position*, la cual se despliega una vez es ejecutada la aplicación.

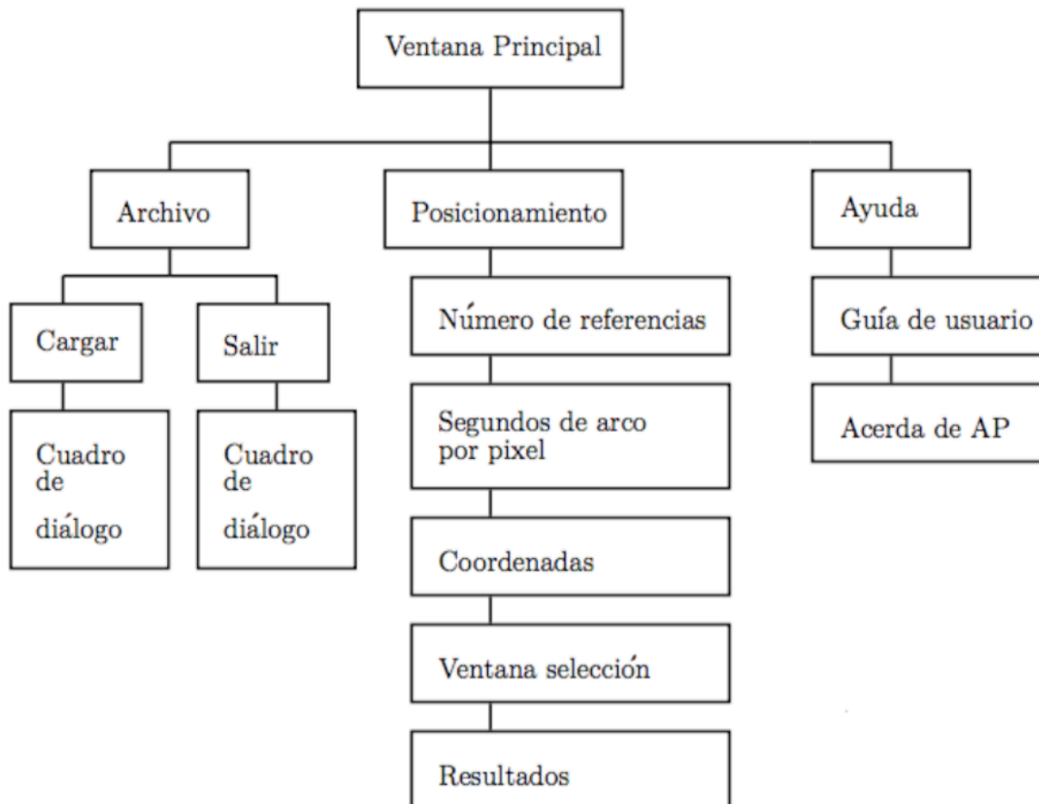


Figura 1. Estructura de *Asteroid Position*.

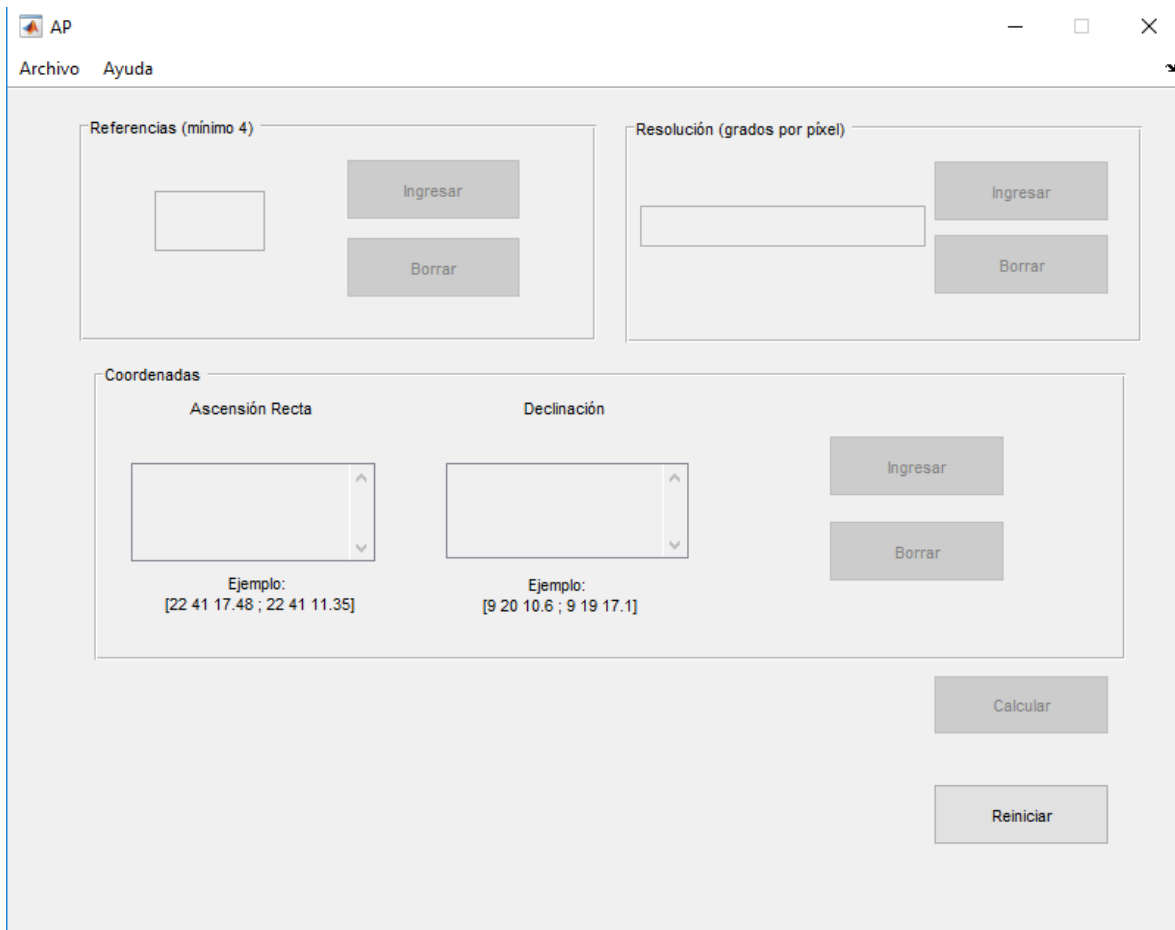


Figura 2. Ventana principal de *Asteroid Position*.

Menú Archivo

En la barra de herramientas que se observa en la ventana principal, se encuentra el menú “Archivo”. Al desplegar este menú, se pueden apreciar dos opciones a seleccionar: “Cargar” y “Salir”.

Cargar:

Al seleccionar esta opción, la aplicación desplegará una nueva ventana a través de la cual es posible adelantar la carga de la imagen a procesar. La Figura 3 presenta esta ventana para el caso de la carga de la imagen de prueba “*Ludmilla_16_Sep_2014_04_02_10UT.fit*”. Esta fotografía corresponde a la imagen del asteroide (675) *Ludmilla*, capturada el 16 de septiembre de 2014 a las 04:02:10UT, desde el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira (esta imagen está disponible en la carpeta “Imágenes de Prueba”).

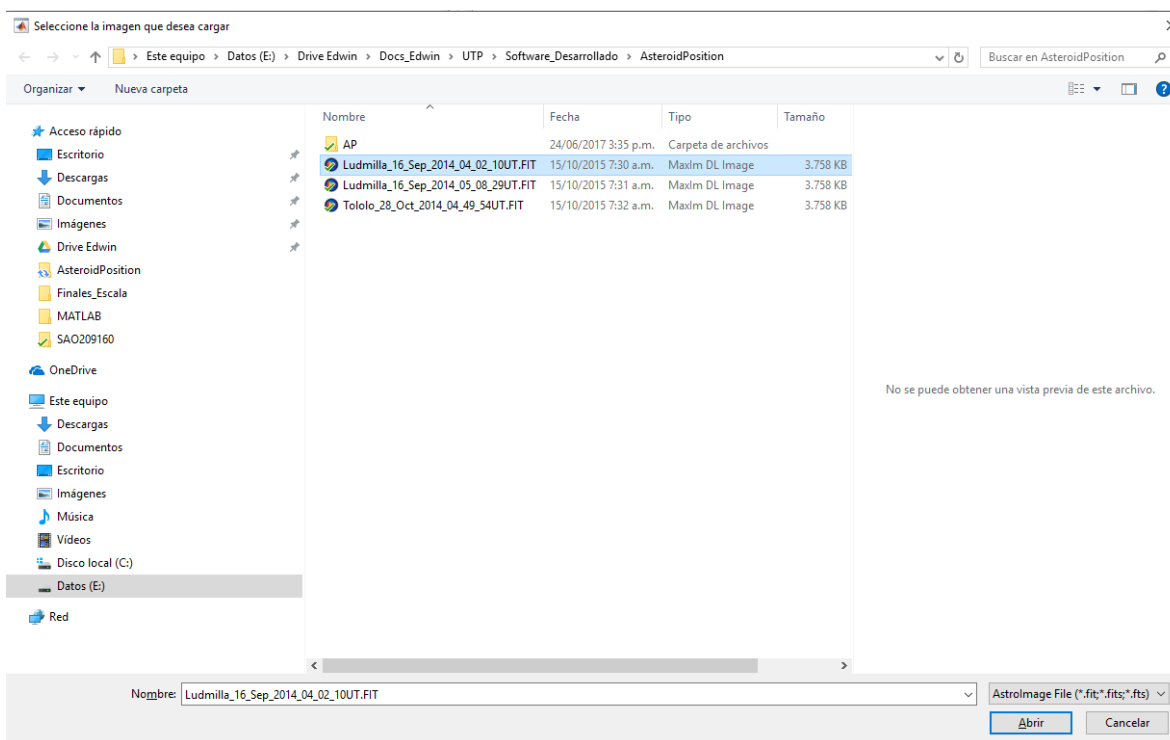


Figura 3. Cuadro de diálogo “Cargar” desplegado para abrir la imagen de prueba “Ludmilla_16_Sep_2014_04_02_10UT.fit”.

Los formatos de archivo soportados son **.fit*, **.fits* o **.fts*, en resolución de 16 bits (65536 cuentas) y una dimensión, que son los arrojados por la gran mayoría de las cámaras astronómicas modernas. La aplicación no permite cargar fotografías con más de una capa ni cubos de datos (sets de datos poco frecuentes en imágenes astrométricas de asteroides y cometas).

Al seleccionar una imagen y presionar el botón “Abrir”, la aplicación regresará a la ventana principal, se desplegará la imagen seleccionada con un mensaje en el que se le sugiere al usuario verificar que la imagen sea la correcta, y se habilitará el panel de referencias ubicado en la sección superior izquierda de la ventana principal. La Figura 4 presenta la visualización de la imagen de prueba “Ludmilla_16_Sep_2014_04_02_10UT.fit”.

La imagen seleccionada se visualizará con un ajuste de contraste estrecho automático, utilizado ampliamente para la visualización de imágenes astronómicas de asteroides y cometas¹. Si una vez cargada y visualizada una imagen, el usuario decide cerrarla, el programa seguirá operando con esta imagen cargada, sin importar que se haya cerrado la ventana de visualización. Si el usuario desea cerrar la imagen cargada y cargar otra (porque, por ejemplo, abrió la imagen incorrecta), es necesario accionar el botón “Reiniciar” ubicado en la sección inferior derecha de la ventana principal.

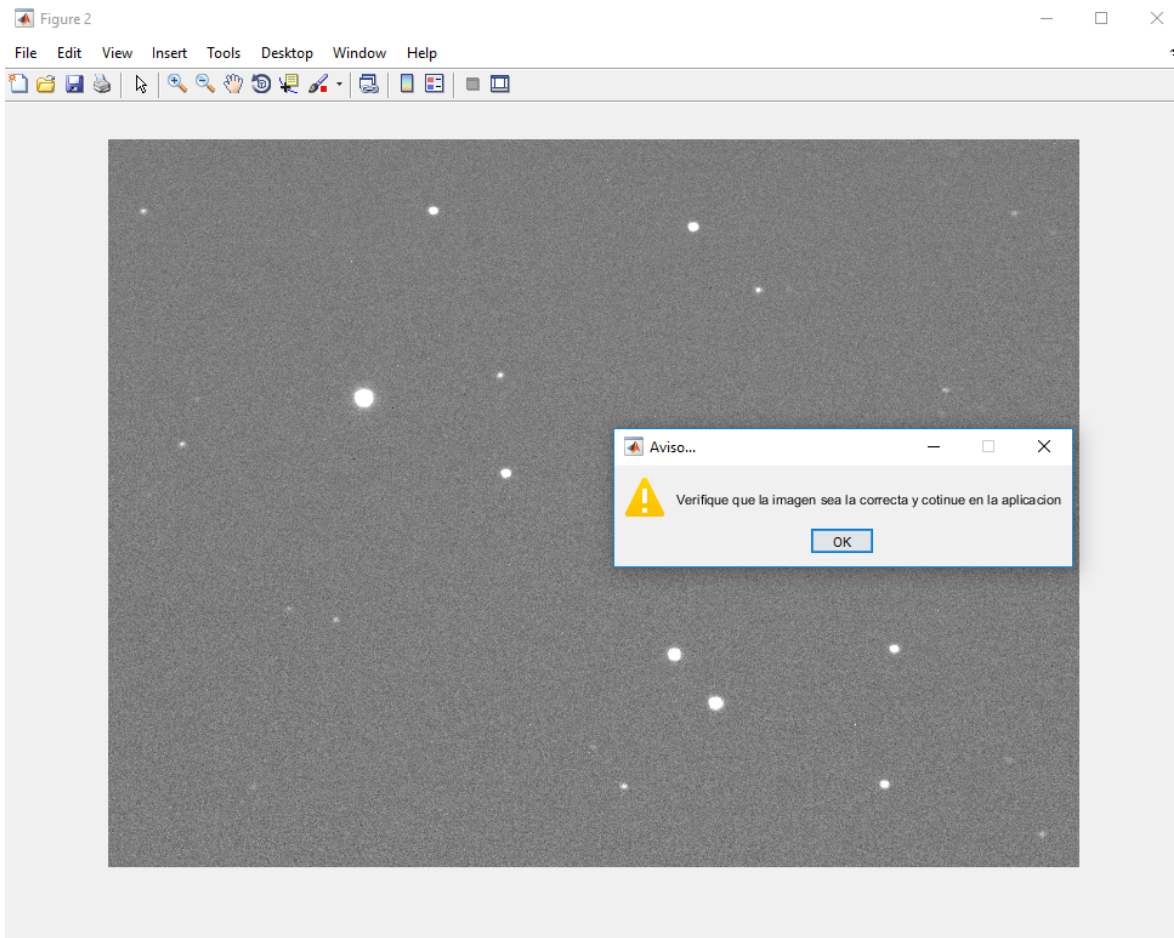


Figura 4. Visualización de la imagen cargada “Ludmilla_16_Sep_2014_04_02_10UT.fit”.

¹ Esto sucede ya que en imágenes de cometas y asteroides estos cuerpos suelen presentar intensidades bajas en cuentas, ya que los tiempos de exposición se minimizan con el fin de evitar que se registre el trazo dado por el desplazamiento del objeto en la bóveda celeste.

Salir:

En el menú archivo también se encuentra la opción “*Salir*”. La Figura 5 presenta una vista de la ventana que se despliega al seleccionar esta opción. Seleccione “*Si*” para abandonar la aplicación y “*No*” para mantenerse en ella.

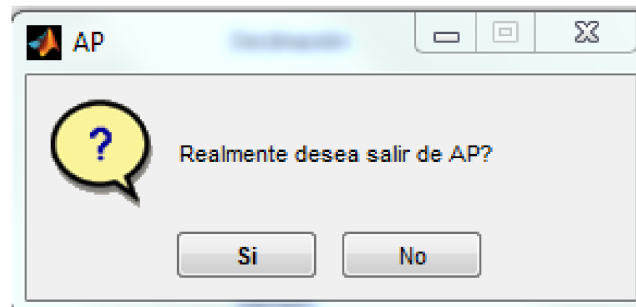


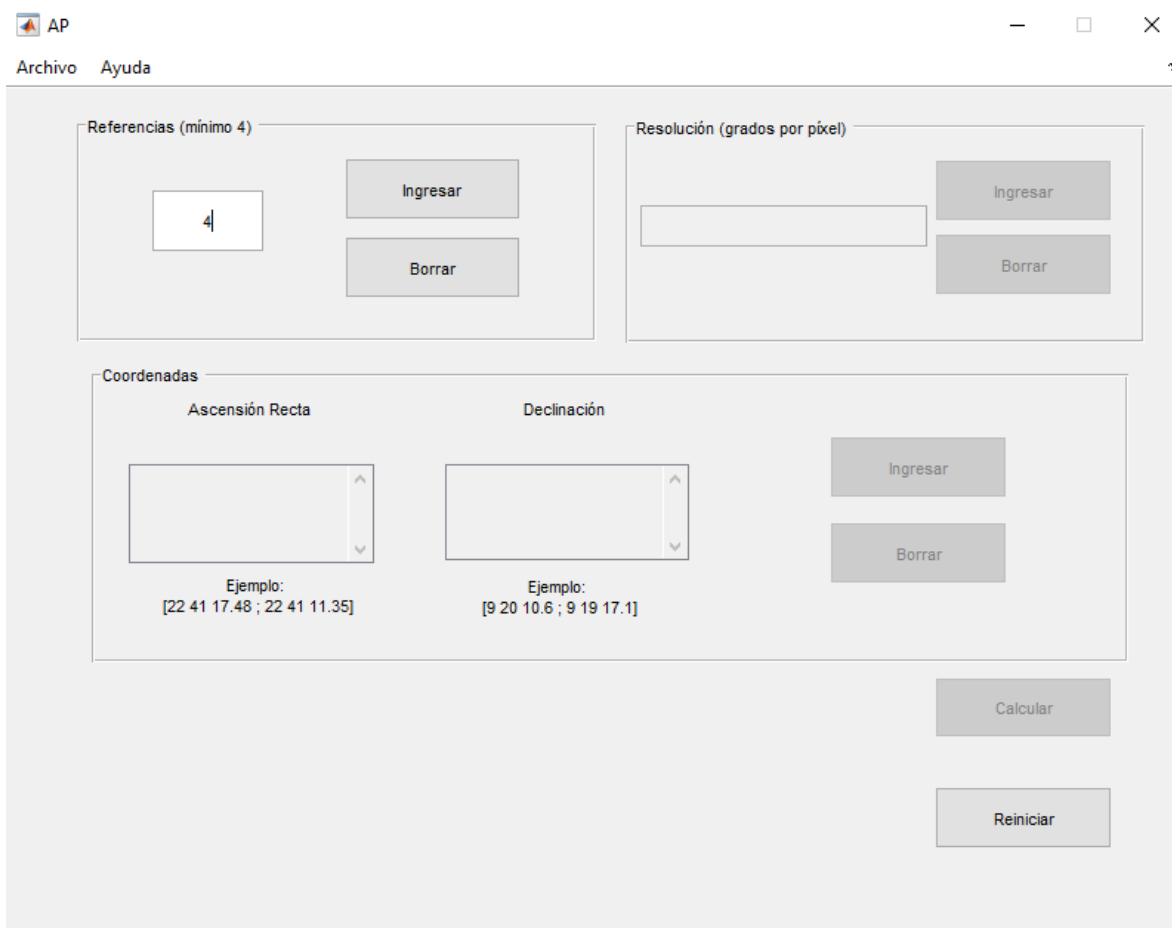
Figura 5. Mensaje emergente desplegado al seleccionar la opción “*Salir*”.

Posicionamiento

Después de cargar la imagen que contiene el asteroide objeto de estudio, es posible continuar con el proceso de posicionamiento ingresando los datos necesarios y seleccionando en la fotografía, tanto el asteroide como las estrellas de referencia.

Referencias:

Una vez cargada la fotografía, en la sección superior izquierda se habilita el cuadro para ingresar la cantidad de estrellas de referencia presentes en la imagen, las cuales se utilizarán para posicionar el asteroide objeto de estudio. La Figura 6 presenta la ventana principal con el cuadro para referencias habilitado. Naturalmente, el algoritmo de posicionamiento será mucho más eficiente entre más estrellas de referencia sean seleccionadas. Para que el método de posicionamiento converja, el mínimo de referencias necesario es de 4. Si se ingresa un número menor de referencias, la aplicación no permitirá continuar y mostrará una ventana de advertencia indicando esta situación (ver Figura 7).



The screenshot shows a software window titled 'AP' with a menu bar containing 'Archivo' and 'Ayuda'. The main interface is divided into several sections:

- Referencias (mínimo 4):** A text input field containing the number '4', with 'Ingresar' and 'Borrar' buttons to its right.
- Resolución (grados por píxel):** An empty text input field, with 'Ingresar' and 'Borrar' buttons to its right.
- Coordenadas:** Two text input fields labeled 'Ascensión Recta' and 'Declinación'. Below each field is an example: 'Ejemplo: [22 41 17.48 ; 22 41 11.35]' for Ascensión Recta and 'Ejemplo: [9 20 10.6 ; 9 19 17.1]' for Declinación. To the right of these fields are 'Ingresar' and 'Borrar' buttons.
- Buttons:** At the bottom right, there are 'Calcular' and 'Reiniciar' buttons.

Figura 6. Ingreso del número de estrellas de referencia. Para este caso se introdujeron 4.

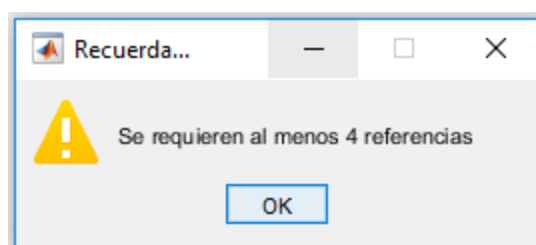


Figura 7. Mensaje de advertencia en el que se indica al usuario la necesidad de trabajar con al menos 4 estrellas de referencia.

La aplicación no permitirá continuar hasta que no se diligencie el campo descrito anteriormente, y se accione el botón “Ingresar”. Es posible modificar el número de referencias ingresadas ejecutando la opción “Borrar”.

Resolución:

Si el número de referencias ingresado es igual o mayor a cuatro, la aplicación habilitará el cuadro de “Resolución”, ubicado en la sección superior derecha (ver Figura 8). Este valor indica la resolución de la fotografía en grados por píxel, la cual está dada por las características del montaje instrumental telescopio – cámara. La resolución en arcosegundos por píxel se calcula mediante la ecuación (1), y su valor en grados por píxel se obtiene a partir de la ecuación (2):

$$\text{Resolución} \left(\frac{\text{arcsec}}{\text{pix}} \right) = 206.2648 * \frac{\text{Tamaño del píxel de la cámara } (\mu\text{m})}{\text{Longitud focal del telescopio } (\text{mm})} \quad (1)$$

$$\text{Resolución} \left(\frac{\text{grados}}{\text{pix}} \right) = \frac{\text{Resolución} \left(\frac{\text{arcsec}}{\text{pix}} \right)}{3600} \quad (2)$$

Donde el tamaño del píxel de la cámara en μm y la longitud focal del telescopio² en mm , pueden ser consultados en las hojas de datos de estos equipos, o incluso en muchos casos, en la placa adherida por el fabricante al chasis del instrumento.

Es posible modificar el valor ingresado de resolución accionando el botón “Borrar”, presente en la sección superior derecha de la ventana principal.

Como se observa en la Figura 8, para este caso se ingresó como resolución el valor de $0.000104327942 \text{ }^\circ/\text{pix}$, ya que las fotografías presentes en la carpeta “Imágenes de Prueba”, fueron capturadas utilizando un telescopio *Meade LX200GPS 16"* (longitud focal³ de 4064mm) y una cámara *SBIG ST2000XM* (tamaño de píxel⁴ de $7.4 \mu\text{m}$).

Coordenadas:

Una vez ingresada la resolución del montaje instrumental, se habilita el campo para el registro de las coordenadas de los objetos de referencia. Este campo se encuentra en la sección inferior izquierda de la ventana principal de la interfaz gráfica. La Figura 9 permite observar el asteroide objeto de estudio y las estrellas de referencia presentes en la fotografía del asteroide *Ludmilla*, capturada el 16 de septiembre de 2014 a las 04:02:10UT. Por su parte, la Tabla 1 resume las características de estos objetos.

² Tenga en cuenta que en caso de que para la captura de la fotografía se haga uso de un reductor focal, este valor se verá afectado por un factor de escala.

³ http://www.meade.com/media/downloads/12/LX200GPS_manual.pdf

⁴ <https://diffractionlimited.com/wp-content/uploads/2016/03/USBmanRev14.pdf>

AP

Archivo Ayuda

Referencias (mínimo 4)

4

Ingresar

Borrar

Resolución (grados por píxel)

0.000104327942

Ingresar

Borrar

Coordenadas

Ascensión Recta

Declinación

Ingresar

Borrar

Ejemplo: [22 41 17.48 ; 22 41 11.35]

Ejemplo: [9 20 10.6 ; 9 19 17.1]

Calcular

Reiniciar

Figura 8. Ingreso de la resolución del montaje instrumental en décimas de grado por píxel.

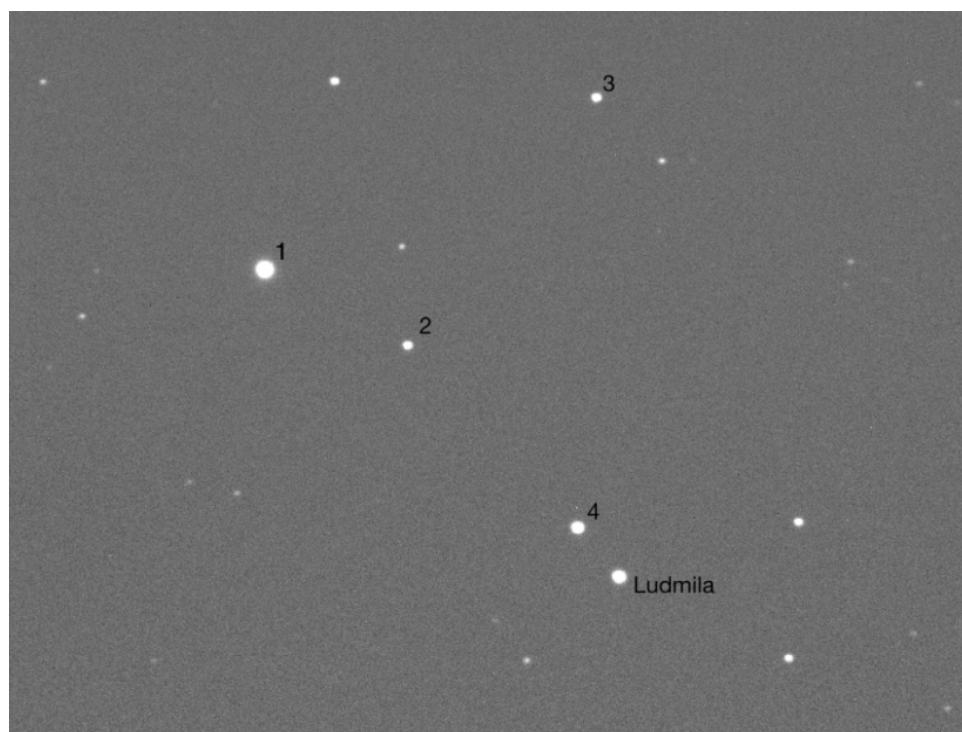


Figura 9. Objetos presentes en la fotografía cargada.

Objeto	Tipo	Posición (J2000) AR DEC
1	Estrella	22 41 17.48 09 20 10.6
2		22 41 11.35 09 19 17.1
3		22 41 02.63 09 21 54.4
4		22 41 04.17 09 17 14.2
Ludmilla	Asteroide	Por Determinar

Tabla 1. Características de los objetos presentes en la fotografía mostrada en la Figura 9.

Para la determinación de las coordenadas de las estrellas de referencia se recomienda utilizar el catálogo *2MASS (Two Micron All-Sky Survey)*, el cual contiene las posiciones de una gran cantidad de cuerpos celestes por fuera del *Sistema Solar*. Para el manejo de datos de este catálogo, se recomienda usar la aplicación *Aladin Sky Atlas*⁵. Este es un software de uso libre, desarrollado en *Java* por *Strasbourg Observatory* (Francia), ampliamente utilizado para la visualización de catálogos astronómicos y cartografiados de la bóveda celeste.

A continuación se explica el procedimiento a seguir para identificar las coordenadas de las estrellas de referencia en el catálogo *2MASS* sobre *Aladin*. En primer lugar, ejecute el archivo *Aladin.exe*, con lo cual se desplegará la ventana presentada en la Figura 10.

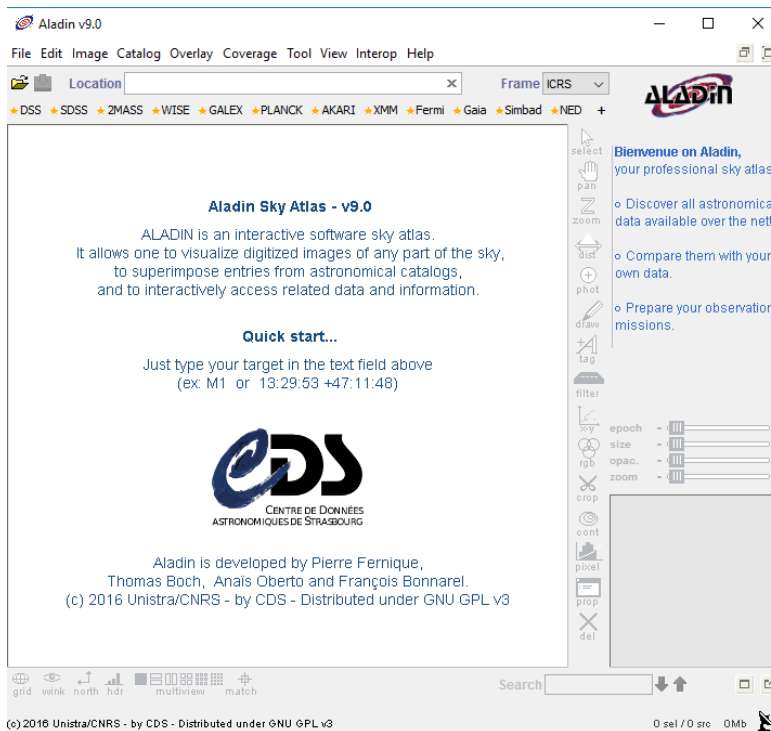


Figura 10. Ventana principal del software *Aladin v9.0*.

⁵ Disponible para su descarga en: <http://aladin.u-strasbg.fr/java/nph-aladin.pl?frame=downloading>

Acto seguido, diríjase al menú “File” y seleccione la opción “Open”. En la ventana que se abre, accione el botón “DSS...” ubicado a la izquierda, y del menú desplegado elija la opción “DSS from ESO (Garching/Deutschland – DSS.ESO)”, tal como se observa en la Figura 11.

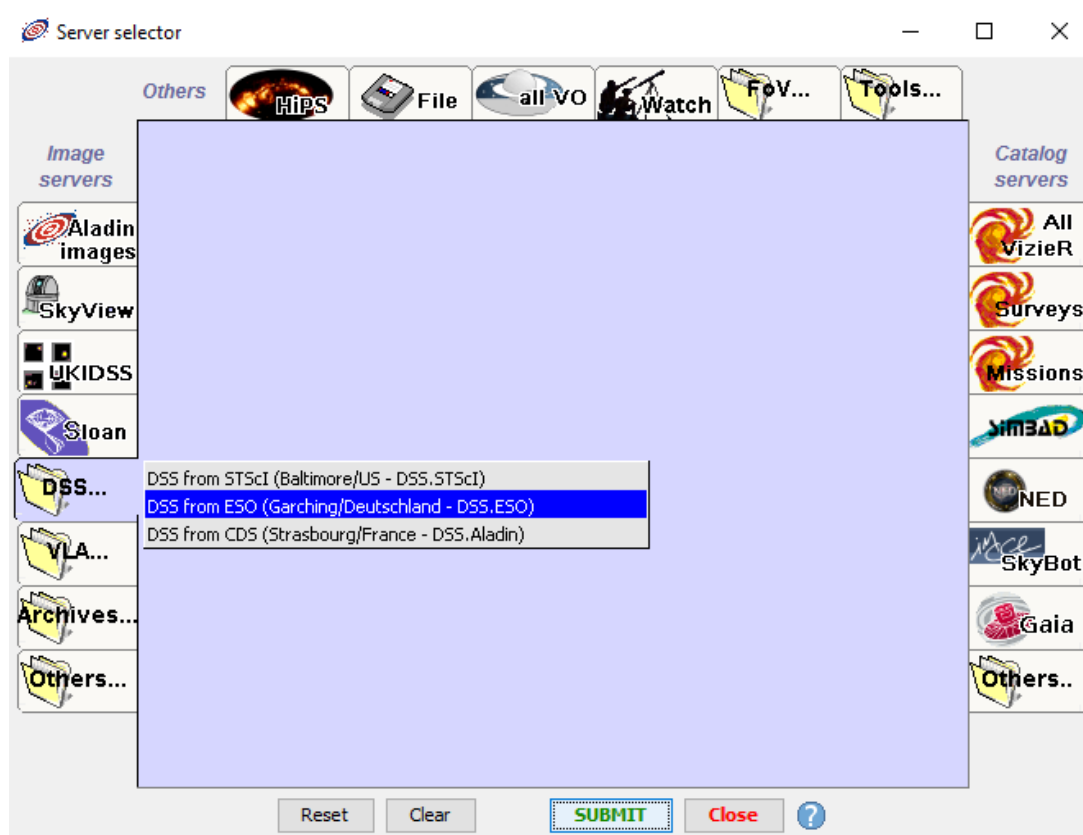


Figura 11. Selección del catálogo DSS en Aladin v9.0.

En este punto, Aladin lo llevará a la ventana que se observa en la Figura 12. En el primer campo, ingrese las coordenadas *J2000* en ascensión recta (*AR*) y declinación (*DEC*) del centro de la fotografía⁶, que para el caso de la imagen de ejemplo es (22 41 11.03 +09 19 17.2). El largo y ancho del campo visual abarcado por la fotografía es de aproximadamente 10 minutos de arco (este se encuentra al multiplicar la resolución en décimas de grado por el ancho y el alto en píxeles del sensor de la cámara). Recuerde que este dato depende de la configuración del montaje instrumental utilizado para la captura de la fotografía. Después de diligenciar el formulario, accione el botón “Submit”, de color verde, ubicado en la sección inferior. A continuación cierre esta ventana.

⁶ Este dato debe ser registrado por el observador en el momento de captura de la fotografía, ya que corresponde al lugar de la bóveda celeste al que está apuntando el telescopio al tomar la imagen. Si el telescopio está conectado al computador, y a su vez está enlazado a la cámara, este dato quedará registrado en el encabezado de la imagen FIT.

Figura 12. Ingreso de las coordenadas del centro de la imagen y del campo visual en *Aladin* v9.0.

Las acciones seguidas hasta ahora permiten cargar en *Aladin* una imagen del campo abarcado por la fotografía, tomada del catálogo *Sloan Digital Sky Survey*. Esta imagen se desplegará en la ventana principal de *Aladin*. Como se observa en la Figura 13, el campo presentado por *Aladin* (izquierda) concuerda con la fotografía cargada en *Asteroid Position* (derecha). Naturalmente, el asteroide *Ludmilla* no se observa en la imagen de *Aladin*, ya que este objeto, al pertenecer al *Sistema Solar*, cambia rápidamente su posición en la bóveda celeste con respecto a las estrellas de referencia (pues se trata de un asteroide). Esta es la razón por la cual su posicionamiento es clave en la determinación de su órbita, lo cual hace bastante pertinente la tarea realizada por *Asteroid Position*.

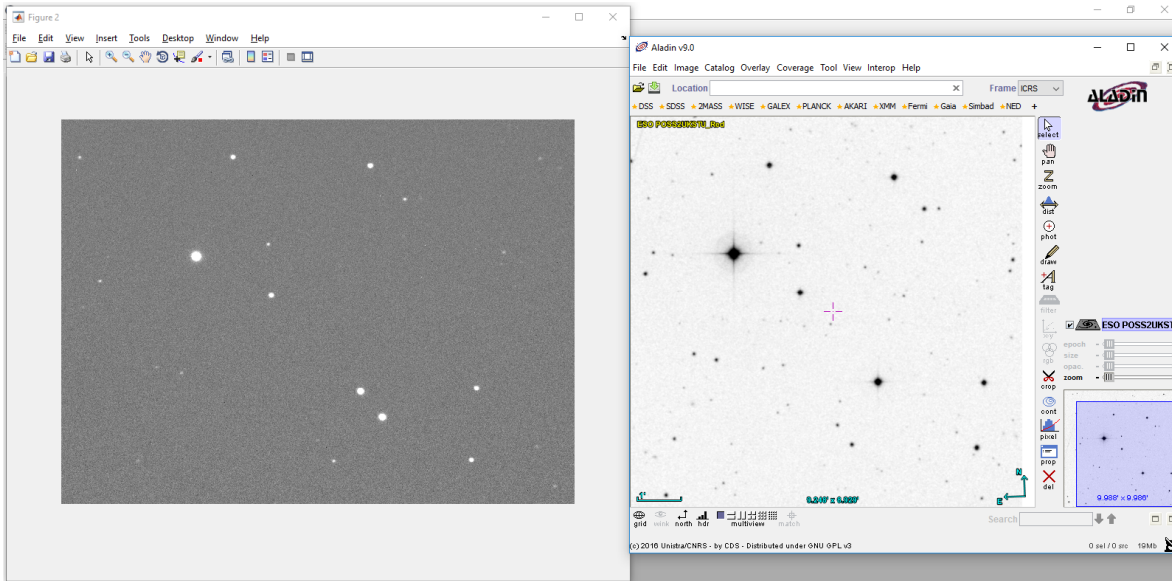


Figura 13. Fotografía de *Ludmilla* cargada en *Asteroid Position* (izquierda) y campo de la fotografía tomado de *DSSS* y visualizado en *Aladin v9.0*.

Una vez se confirma que se trata del campo correcto, el paso a seguir consiste en tomar las posiciones de las estrellas seleccionadas como objetos de referencia. Para esto es necesario desplegar nuevamente el menú “*File*” y accionar el botón “*Open*”. En la ventana desplegada por *Aladin*, seleccione la opción “*Surveys*” ubicada a la derecha, y elija la opción “*2MASS-PSC*”, la cual corresponde al catálogo de posiciones de cuerpos celestes 2MASS. Verifique que los datos presentes en el campo “*Target*” coincidan con el centro de la fotografía. En la celda “*Radius*”, ingresa un valor en minutos de arco levemente superior al campo de la cámara. Para este caso se ingresó el valor de 12 minutos de arco (ver Figura 14). Finalmente, accione el botón “*Submit*”, de color verde, situado en la sección inferior. En este punto cierre la ventana.

En la ventana principal de *Aladin* visualizará una serie de equis de color rojo superpuestas a las estrellas presentes en la imagen. Al hacer click en estas equis, la estrella elegida se verá rodeada de un pequeño recuadro de color verde, y *Aladin* desplegará en la sección inferior una tabla con las coordenadas de este objeto. Las coordenadas *J2000* de ascensión recta y declinación están en el campo de la tabla tabulado como 2MASS. En el caso de la imagen presentada en la Figura 15, se seleccionó la estrella de referencia número 2 (ver Figura 9), y las coordenadas desplegadas por *Aladin* fueron 22 41 11.35 09 19 17.1.

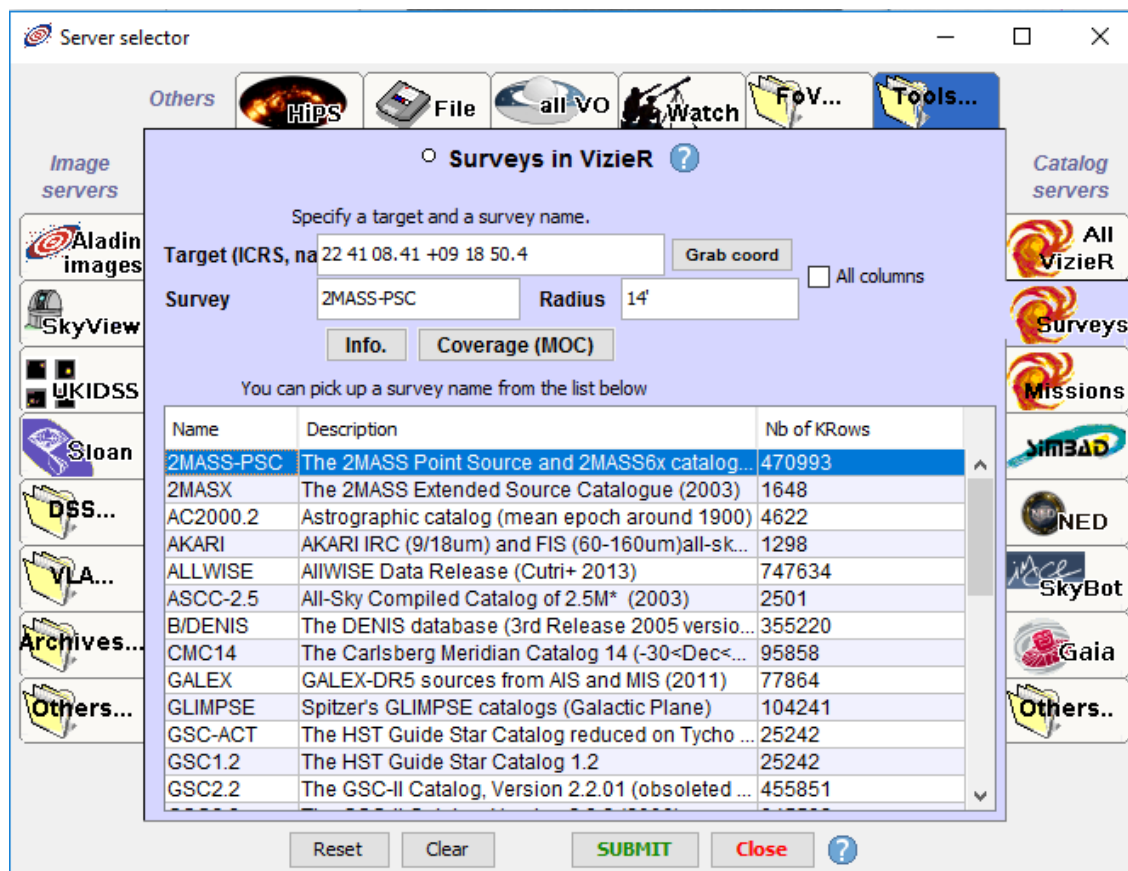


Figura 14. Selección del catálogo 2MASS en Aladin v9.0.

De esta manera es posible encontrar las coordenadas de las 4 estrellas de referencia identificadas en la Figura 9 y presentadas en la Tabla 1. Naturalmente, este no es el único método que existe para encontrar estos datos. El usuario también podría encontrar esta información en programas especializados tipo planetario, como por ejemplo *Stellarium*⁷. Sin embargo, los autores recomendamos el uso de *Aladin*, ya que desde allí es posible tomar las posiciones directamente del catálogo 2MASS, el cual posee una resolución de dos micras.

Una vez se cuenta con las coordenadas de los objetos de referencia, es necesario ingresar estos datos a *Asteroid Position*. La sección inferior del campo "Coordenadas" en la ventana principal presenta un ejemplo de cómo deben ser ingresadas estas coordenadas, las cuales en cantidad deben coincidir con el número de referencias ingresadas en la sección superior izquierda. En caso de que no se cumpla esta condición, el programa despliega el mensaje de advertencia presentado en la Figura 16.

⁷ Software libre disponible en: <http://www.stellarium.org/es/>

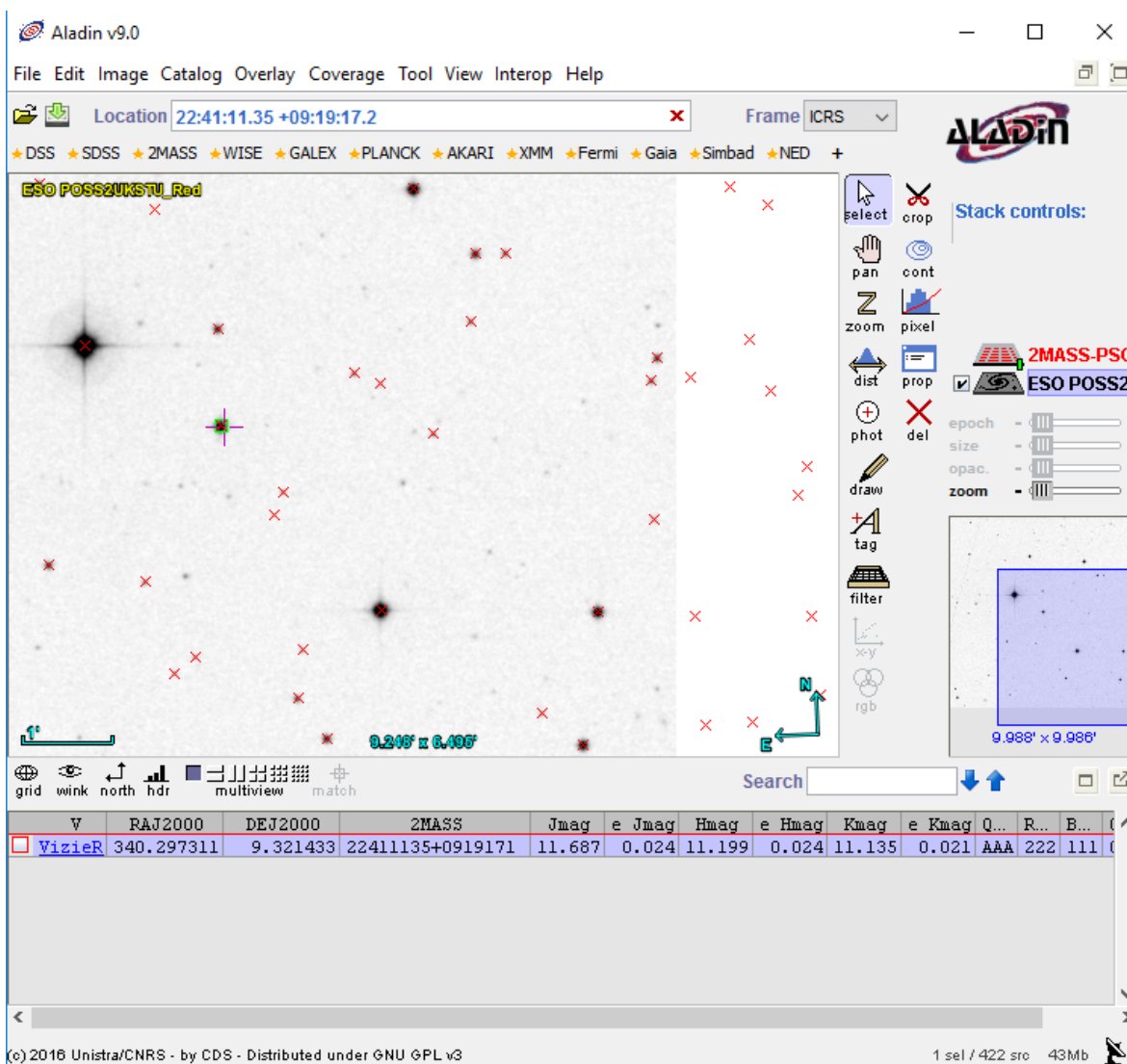


Figura 15. Visualización de coordenadas de las estrellas de referencia en Aladin v9.0.

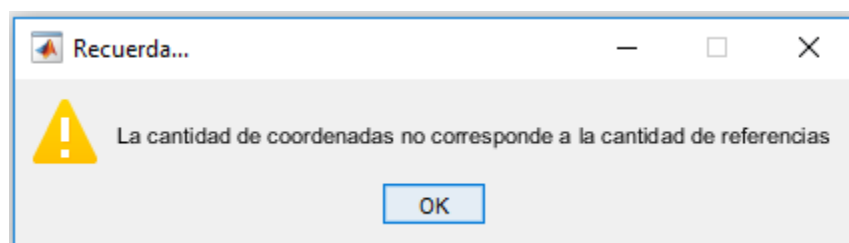


Figura 16. Mensaje de advertencia desplegado en caso de que el usuario ingrese un número de coordenadas que no coincida con los objetos de referencia previamente ingresados.

La Figura 17 presenta una captura de la interfaz principal de *Asteroid Position*, una vez se han ingresado las coordenadas indicadas en la Tabla 1, para la fotografía del asteroide *Ludmilla* tomada el 16 de septiembre de 2014 a las 04:02:10UT. Como se observa en la figura, las coordenadas se ingresan entre corchetes y separadas por espacio, punto y coma, y espacio. Una vez el usuario está seguro de que los datos son correctos, es necesario que accione el botón “Ingresar” para que los datos sean cargados. Es posible corregir los datos una vez accionado el botón “Ingresar”, al ejecutar la opción “Borrar”.

Figura 17. Ingreso de las coordenadas de los objetos de referencia a *Asteroid Position*.

Calcular:

Una vez ingresadas las coordenadas de los objetos de referencia, se habilita el botón “Calcular”. Al ejecutar esta acción, la interfaz presenta nuevamente la imagen cargada. Al desplazar el puntero del mouse sobre la fotografía, este se presenta en forma de cruz, precisamente para que el usuario seleccione los objetos. Primero debe seleccionarse el asteroide al cual se le desean calcular las coordenadas, y después se seleccionan cada una de las estrellas de referencia, en el mismo orden en que se ingresaron las coordenadas.

Para seleccionar los objetos, con *click* sostenido trace un recuadro lo suficientemente grande como para abarcar completamente el objeto de interés, pero minimizando la región del fondo del cielo presente dentro de la selección (ver Figura 18).

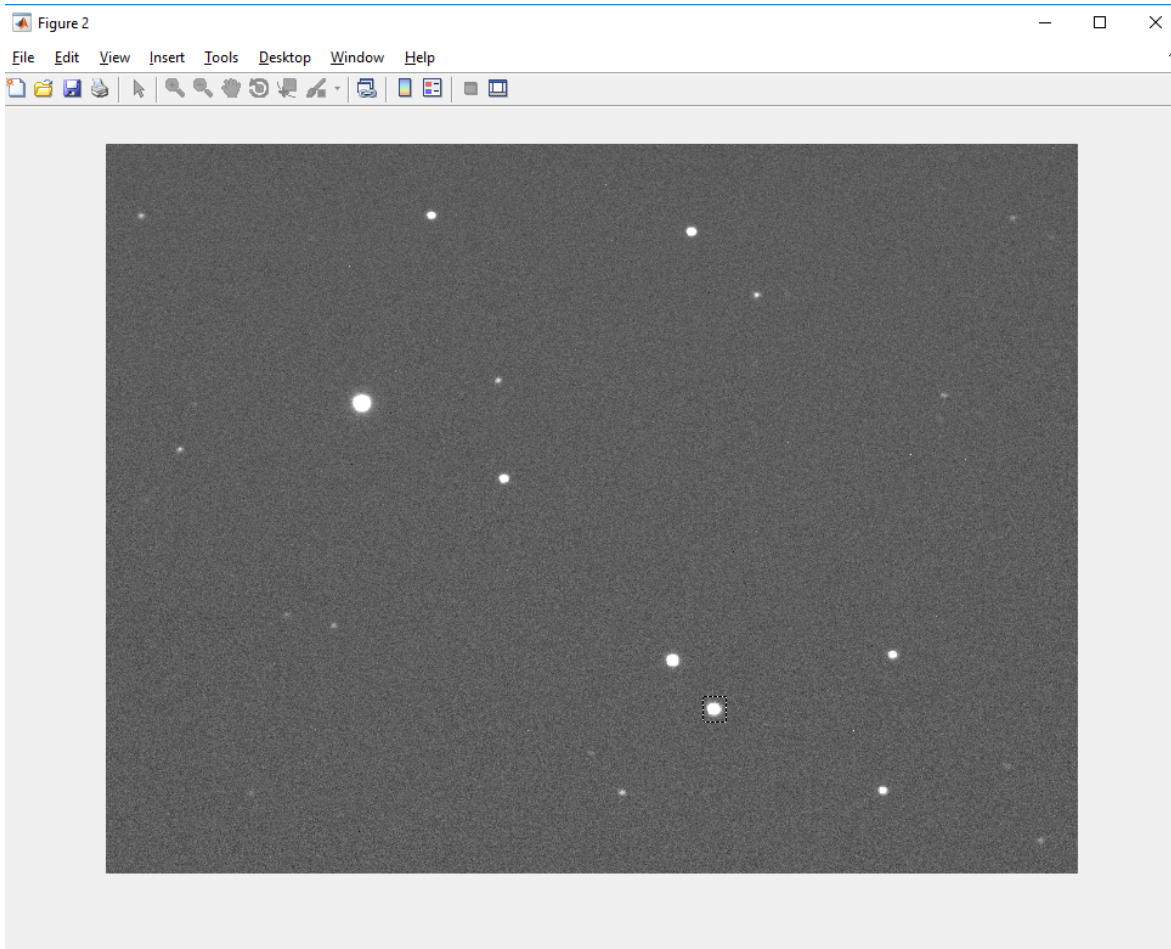
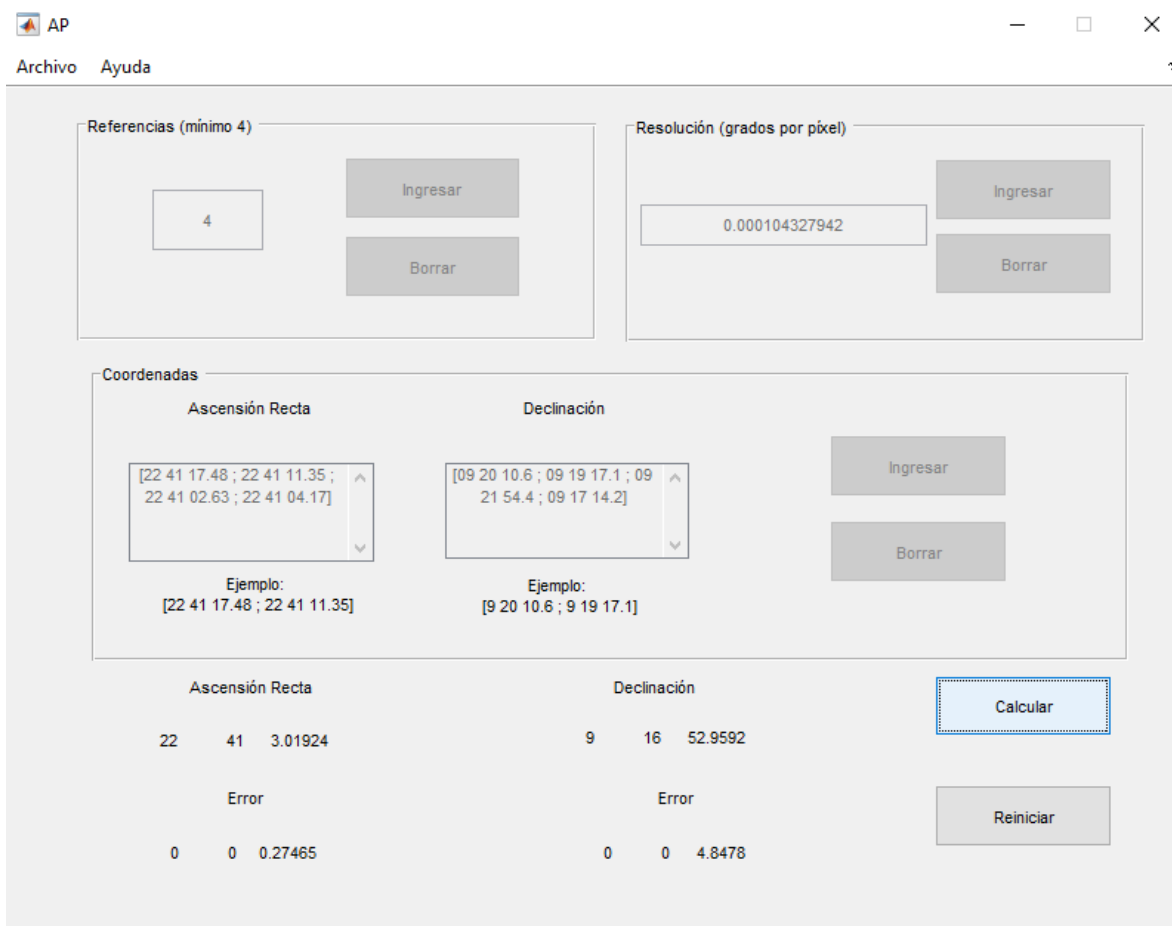


Figura 18. Selección del asteroide *Ludmilla* identificado en la Figura 9. Nótese que para la selección, se traza con *click* sostenido un recuadro que abarque completamente el objeto, pero sin incluir una región exagerada del fondo del cielo.

Al seleccionar todos los objetos (5 en total para el ejemplo expuesto), la ventana principal de la interfaz arroja en la sección inferior la posición calculada para el asteroide en términos de ascensión recta y declinación *J2000*, al igual que el error estimado para cada uno de estos parámetros (ver Figura 19).



AP

 Archivo Ayuda

Referencias (mínimo 4)

4

Ingresar

Borrar

Resolución (grados por píxel)

0.000104327942

Ingresar

Borrar

Coordenadas

Ascensión Recta

[22 41 17.48 ; 22 41 11.35 ; 22 41 02.63 ; 22 41 04.17]

Ejemplo: [22 41 17.48 ; 22 41 11.35]

Declinación

[09 20 10.6 ; 09 19 17.1 ; 09 21 54.4 ; 09 17 14.2]

Ejemplo: [9 20 10.6 ; 9 19 17.1]

Ingresar

Borrar

Ascensión Recta

22 41 3.01924

Error

0 0 0.27465

Declinación

9 16 52.9592

Error

0 0 4.8478

Calcular

Reiniciar

Figura 19. Resultados arrojados por *Asteroid Position* para el cálculo de las coordenadas de *Ludmilla*.

Menú de Ayuda

En este menú se encuentran alojados los botones “Acerca De” y “Guía de Usuario”.

Acerca De

Al ejecutar esta acción, la interfaz gráfica de *Asteroid Position* despliega una ventana en la que se presentan la versión del software, los autores, la filiación institucional de los mismos, y la fecha de finalización del desarrollo (ver Figura 20).

Guía de Usuario

Al accionar este botón el software despliega este documento de ayuda.



Figura 20. Ventana “Acerca De”.

Ejemplos de Aplicación

Con el fin de que el usuario tenga la oportunidad de familiarizarse con el uso de la aplicación *Asteroid Position*, en el CD de instalación (o en el .rar de descarga) se incluye la carpeta “*Imágenes de Prueba*”, la cual contiene tres fotografías que se describen en la Tabla 2, las cuales fueron capturadas desde el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira, mediante un montaje instrumental compuesto por un telescopio *Meade LX 200GPS 16”*, y una cámara *SBIG ST2000XM*.

Imagen	Fecha de Captura	Objeto	Tipo
Ludmilla_16_Sep_2014_04_02_10UT.FIT	16 de Septiembre de 2014 a las 04:02:10UT	(675) Ludmilla	Asteroide
Ludmilla_16_Sep_2014_05_08_29UT.FIT	16 de Septiembre de 2014 a las 05:08:29UT		
Tololo_28_Oct_2014_04_49_54UT.FIT	28 de Octubre de 2014 a las 04:49:54UT	(2326) Tololo	

Tabla 2. Descripción de las imágenes de prueba de *Asteroid Position*.

A continuación se presentan algunas estrellas que pueden servir como objetos de referencia en cada una de estas fotografías, al igual que la ubicación del asteroide en cuestión para cada caso. También se presentan las respectivas tablas con las coordenadas en ascensión recta y declinación en *J2000* para estos objetos, de tal forma que el usuario pueda adelantar el procesamiento para el posicionamiento del respectivo asteroide, siguiendo los pasos descritos en el capítulo anterior. Vale la pena mencionar que estas coordenadas fueron tomadas del catálogo *2MASS*, haciendo uso del programa *Aladin*, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Finalmente, para cada fotografía se presentan los resultados arrojados por *Asteroid Position*, de tal forma que sirvan al usuario como valores de referencia.

Para estos ejemplos, y con fines ilustrativos, se hace uso de un número reducido de objetos de referencia (4 ó 5). Sin embargo, se le recuerda al usuario que en astrometría la precisión está dada por el número de estrellas de referencia utilizadas para el cálculo de la posición del cometa o asteroide, por lo cual se sugiere que se utilicen tantas referencias como la calidad de la fotografía lo permita.

[Ludmilla_16_Sep_2014_04_02_10UT.FIT](#)

Se trata de la imagen utilizada en el capítulo anterior para la descripción del funcionamiento de la interfaz gráfica. La Figura 21 presenta la ubicación del asteroide *Ludmilla* y 4 estrellas que sirven como objetos de referencia, cuyas posiciones se describen en la Tabla 3. Finalmente, los resultados arrojados por *Asteroid Position* en cuanto a las coordenadas del asteroide objeto de estudio se presentan en la Figura 22. Estos valores fueron obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo anterior.

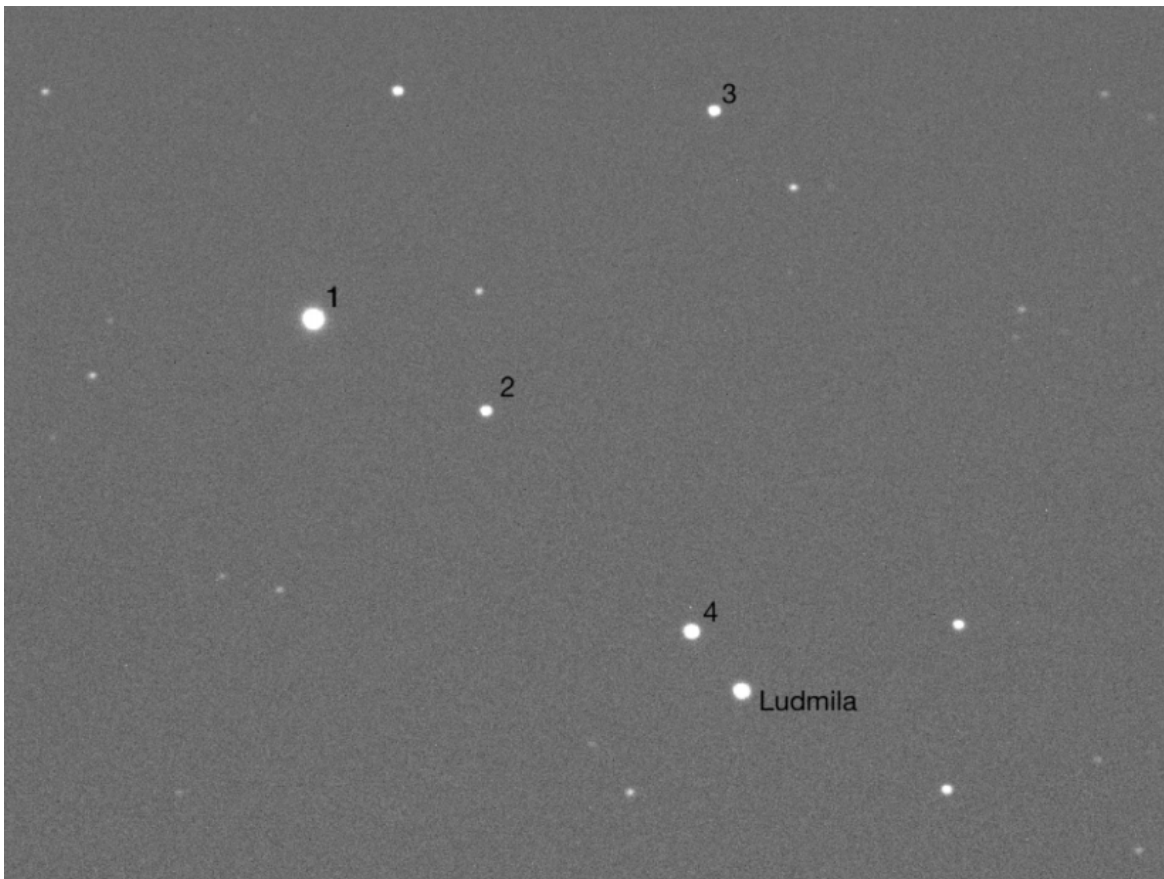
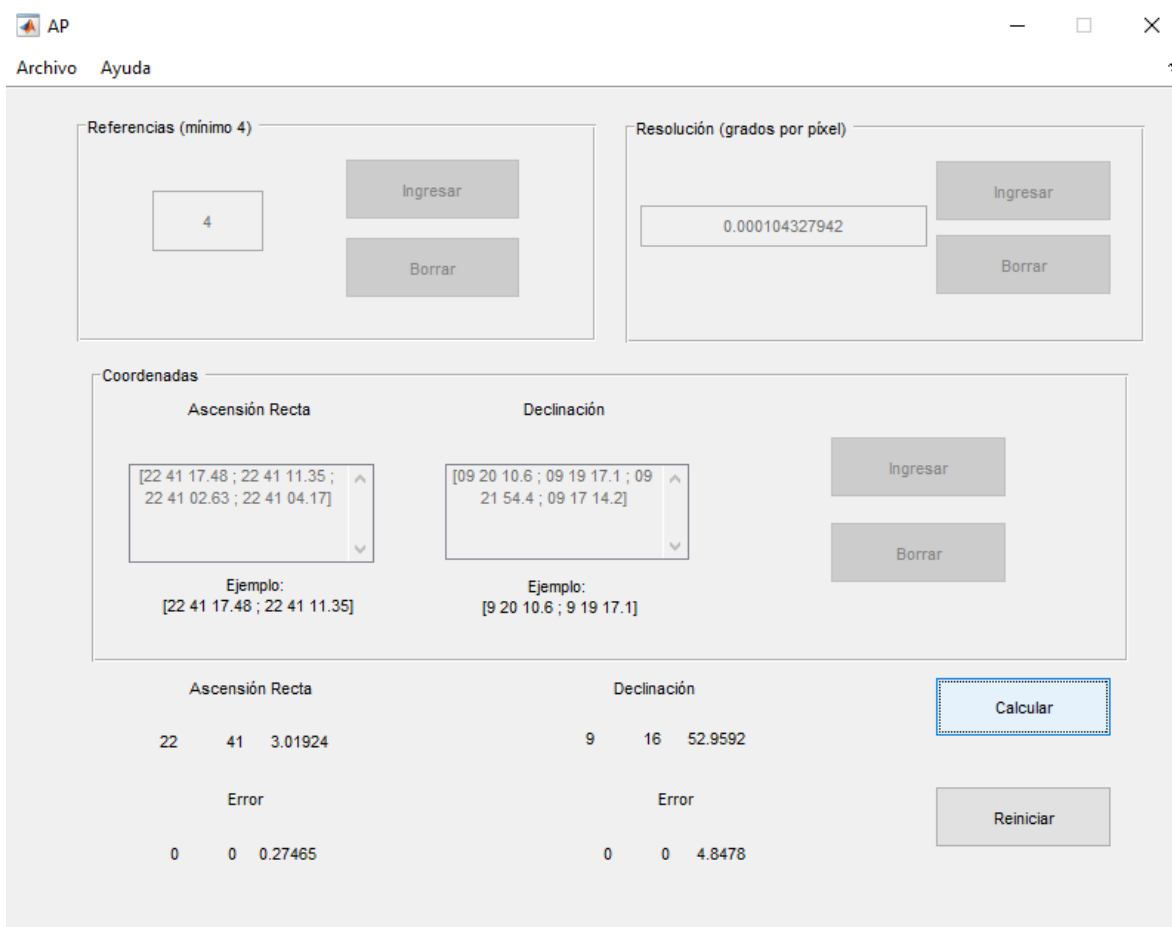


Figura 21. Asteroide *Ludmilla* y 4 estrellas de referencia en la imagen
Ludmilla_16_Sep_2014_04_02_10UT.FIT.

Objeto	Tipo	Posición (J2000) AR DEC
1	Estrella	22 41 17.48 09 20 10.6
2		22 41 11.35 09 19 17.1
3		22 41 02.63 09 21 54.4
4		22 41 04.17 09 17 14.2
Ludmilla	Asteroide	Por Determinar

Tabla 3. Coordenadas de las 4 estrellas de referencia seleccionadas en la imagen
Ludmilla_16_Sep_2014_04_02_10UT.FIT.



The screenshot shows the 'Asteroid Position' software interface. At the top, there are tabs for 'Referencias (mínimo 4)' and 'Resolución (grados por píxel)'. The 'Referencias' tab has a text input field containing '4' and buttons for 'Ingresar' and 'Borrar'. The 'Resolución' tab has a text input field containing '0.000104327942' and buttons for 'Ingresar' and 'Borrar'. Below these is the 'Coordenadas' section, which has two columns: 'Ascensión Recta' and 'Declinación'. Each column has a text input field with example coordinates, a 'Borrar' button, and a 'Calcular' button. The 'Ascensión Recta' input field contains '[22 41 17.48 ; 22 41 11.35 ; 22 41 02.63 ; 22 41 04.17]' and the 'Declinación' input field contains '[09 20 10.6 ; 09 19 17.1 ; 09 21 54.4 ; 09 17 14.2]'. Below the input fields, there are example coordinates: 'Ejemplo: [22 41 17.48 ; 22 41 11.35]' for Ascensión Recta and 'Ejemplo: [9 20 10.6 ; 9 19 17.1]' for Declinación. At the bottom, there are two rows of calculated results. The first row shows 'Ascensión Recta' as '22 41 3.01924' and 'Declinación' as '9 16 52.9592'. The second row shows 'Error' as '0 0 0.27465' and 'Error' as '0 0 4.8478'. There is a 'Reiniciar' button at the bottom right.

Figura 22. Resultados arrojados por *Asteroid Position* al calcular la posición de *Ludmilla*
 con el error respectivo, en la imagen *Ludmilla_16_Sep_2014_04_02_10UT.FIT*.

[Ludmilla_16_Sep_2014_05_08_29UT.FIT](#)

Esta imagen, también del asteroide (675) *Ludmilla*, fue tomada el 16 de septiembre de 2014 a las 05:08:29UT. La Figura 23 presenta la ubicación del asteroide *Ludmilla* y 4 estrellas que sirven como objetos de referencia, cuyas posiciones se describen en la Tabla 4. Nótese como el asteroide se ha desplazado en dirección hacia abajo y a la derecha con respecto a la ubicación que se observa en la Figura 21 (con la estrella número 4 como punto de referencia). Además, las posiciones de las estrellas de referencia (ver Tabla 4) no cambian con respecto a las presentadas en la Tabla 3, pues se trata del mismo campo por el que se encuentra atravesando el asteroide. Finalmente, los resultados arrojados por *Asteroid Position* en cuanto a las coordenadas del asteroide objeto de estudio se presentan en la Figura 24. Estos valores fueron obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo anterior.

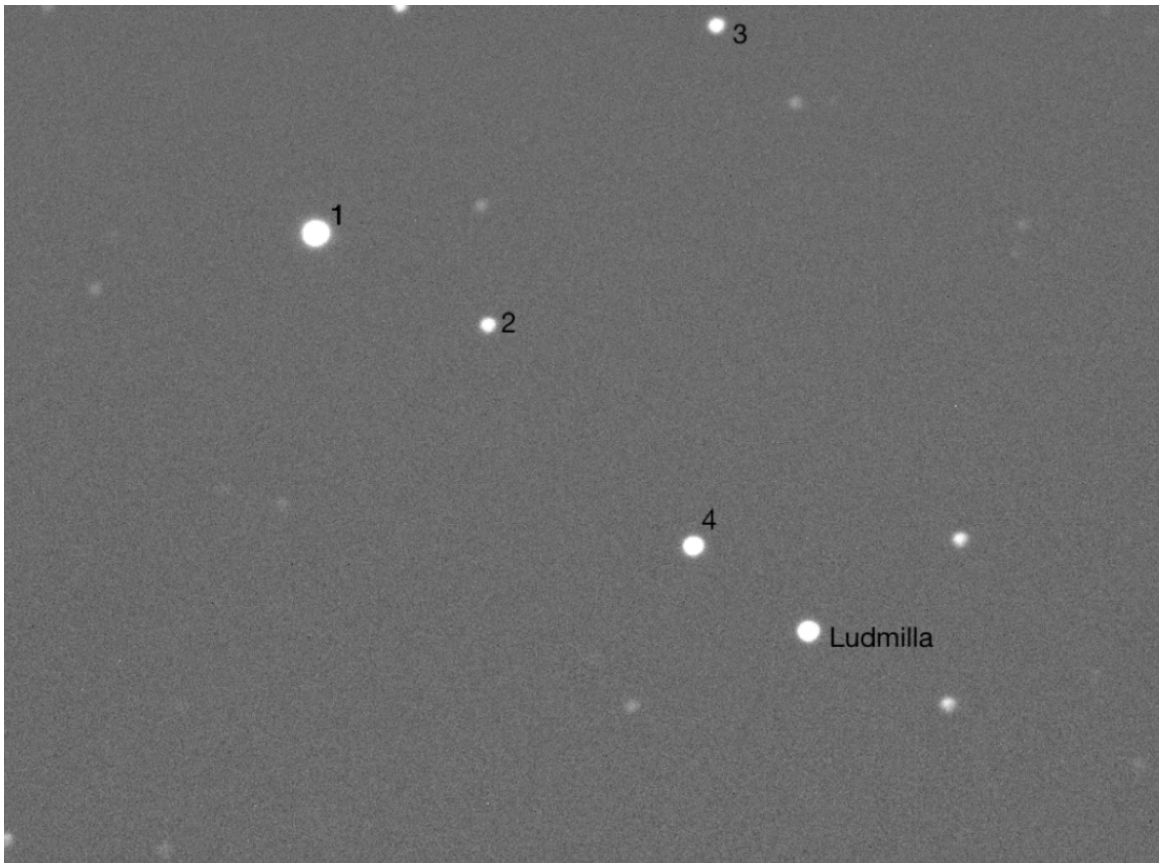


Figura 23. Asteroide *Ludmilla* y 4 estrellas de referencia en la imagen
[Ludmilla_16_Sep_2014_05_08_29UT.FIT](#).

Objeto	Tipo	Posición (J2000) AR DEC
1	Estrella	22 41 17.48 09 20 10.6
2		22 41 11.35 09 19 17.1
3		22 41 02.63 09 21 54.4
4		22 41 04.17 09 17 14.2
Ludmilla	Asteroide	Por Determinar

Tabla 4. Coordenadas de las 4 estrellas de referencia seleccionadas en la imagen
Ludmilla_16_Sep_2014_05_08_29UT.FIT.

The screenshot shows the 'Asteroid Position' software interface. It includes a menu bar with 'Archivo' and 'Ayuda'. The main area has several sections:

- Referencias (mínimo 4):** A text box contains the number '4', with 'Ingresar' and 'Borrar' buttons.
- Resolución (grados por píxel):** A text box contains '0.000104327942', with 'Ingresar' and 'Borrar' buttons.
- Coordenadas:**
 - Ascensión Recta:** A text box contains '[22 41 17.48 ; 22 41 11.35 ; 22 41 2.63 ; 22 41 4.17]'. Below it, an example shows '[22 41 17.48 ; 22 41 11.35]'.
 - Declinación:** A text box contains '[9 20 10.6 ; 9 19 17.1 ; 9 21 54.4 ; 9 17 14.2]'. Below it, an example shows '[9 20 10.6 ; 9 19 17.1]'.
 - 'Ingresar' and 'Borrar' buttons are to the right.
- Results:**
 - Ascensión Recta:** 22 41 0.872222
 - Declinación:** 9 16 40.1111
 - Error:** 0 0 0.27202 (for RA) and 0 0 5.0161 (for Dec)
- Buttons:** 'Calcular' (highlighted with a dashed border) and 'Reiniciar'.

Figura 24. Resultados arrojados por *Asteroid Position* al calcular la posición de *Ludmilla* con el error respectivo, en la imagen *Ludmilla_16_Sep_2014_05_08_29UT.FIT*.

[Tololo_28_Oct_2014_04_49_54UT.FIT](#)

Esta imagen del asteroide (2326) *Tololo*, fue tomada el 28 de octubre de 2014 a las 04:49:54UT. La Figura 25 presenta la ubicación del asteroide *Tololo* y 4 estrellas que sirven como objetos de referencia, cuyas posiciones se describen en la Tabla 5. Finalmente, los resultados arrojados por *Asteroid Position* en cuanto a las coordenadas del asteroide objeto de estudio se presentan en la Figura 26. Estos valores fueron obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo anterior.

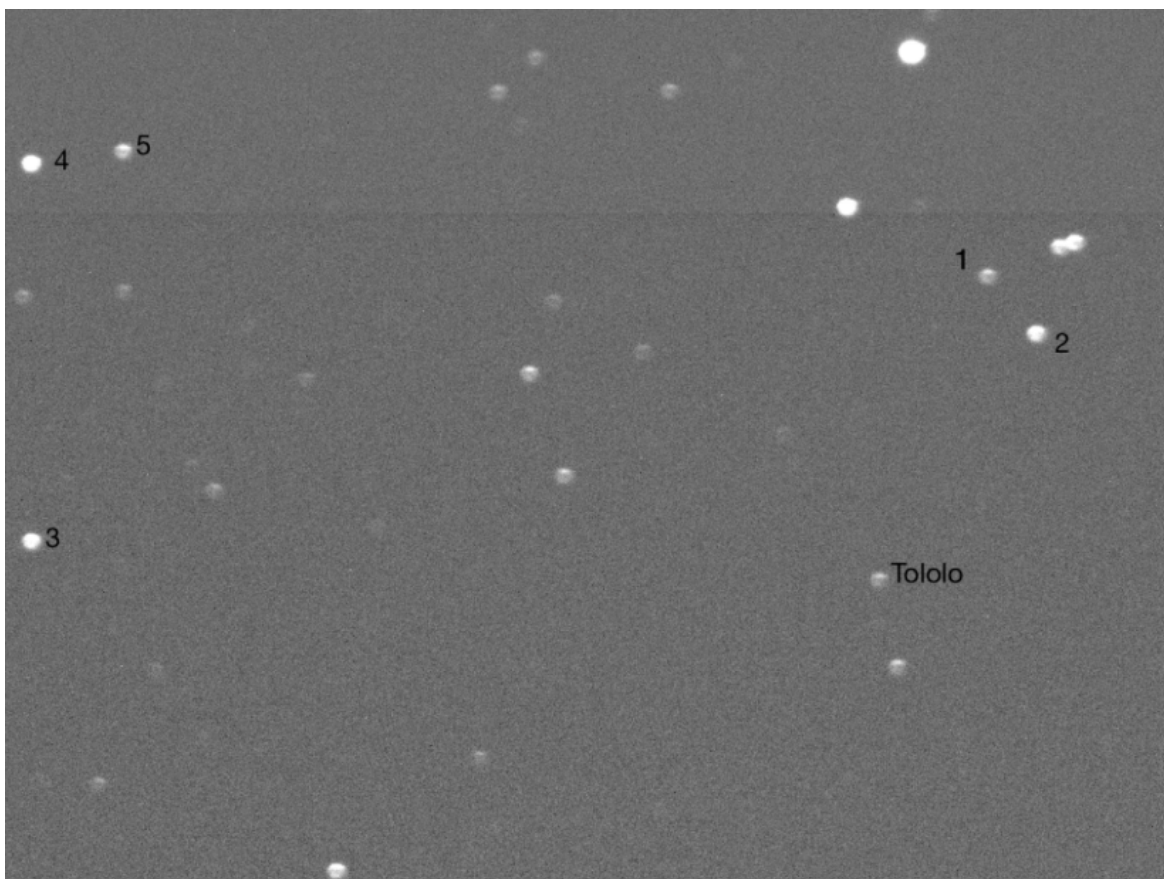


Figura 25. Asteroide *Tololo* y 5 estrellas de referencia en la imagen
Tololo_28_Oct_2014_04_49_54UT.FIT.

Objeto	Tipo	Posición (J2000) AR DEC
1	Estrella	4 57 26.37 0 -26 28.4
2		4 57 24.8 0 -26 58.4
3		4 57 58.78 0 -28 22.8
4		4 57 58.28 0 -25 12.6
5		4 57 55.2 0 -25 8.8
Tololo	Asteroide	Por Determinar

Tabla 4. Coordenadas de las 5 estrellas de referencia seleccionadas en la imagen
Tololo_28_Oct_2014_04_49_54UT.FIT.

The screenshot shows the 'Asteroid Position' software interface. It includes a menu bar with 'Archivo' and 'Ayuda'. The main window is divided into several sections:

- Referencias (mínimo 4):** A text box contains the number '5', with 'Ingresar' and 'Borrar' buttons.
- Resolución (grados por píxel):** A text box contains '0.000104327942', with 'Ingresar' and 'Borrar' buttons.
- Coordenadas:**
 - Ascensión Recta:** A text box contains '[4 57 26.37 ; 4 57 24.8 ; 4 57 58.78 ; 4 57 58.28 ; 4 57 55.2]'. Below it, an example shows '[22 41 17.48 ; 22 41 11.35]'.
 - Declinación:** A text box contains '[0 -26 28.4 ; 0 -26 58.4 ; 0 -28 22.8 ; 0 -25 12.6 ; 0 -25 8.8]'. Below it, an example shows '[9 20 10.6 ; 9 19 17.1]'.
 - 'Ingresar' and 'Borrar' buttons are to the right of the coordinate boxes.
- Results Section:**
 - Ascensión Recta:** Displays '4 57 30.2679'.
 - Declinación:** Displays '0 -29 0.833184'.
 - Error:** Displays '0 0 0.12788' for Right Ascension and '0 0 1.4382' for Declination.
 - 'Calcular' and 'Reiniciar' buttons are on the right.

Figura 26. Resultados arrojados por *Asteroid Position* al calcular la posición de *Tololo* con el error respectivo, en la imagen *Tololo_28_Oct_2014_04_49_54UT.FIT*.

Algoritmos

En la Figura 27 se presenta el diagrama de bloques general de los diferentes algoritmos involucrados en el desarrollo de *Asteroid Position*. En primer lugar, el programa recibe como datos de entrada (ingresados por el usuario) la fotografía astronómica, las coordenadas de las estrellas de referencia en términos de ascensión recta y declinación precesionadas al equinoccio del año 2000 (la más usual), y la resolución en grados por píxel que caracteriza el montaje instrumental utilizado para la captura de la fotografía. A continuación, se convierten las coordenadas ingresadas por el usuario de *J2000* a *Jfecha* para de esta manera ajustar las posiciones a la representación del cielo en el momento de la observación. Acto seguido, el usuario selecciona el asteroide presente en la imagen y las estrellas de referencia en el orden en que digitó las coordenadas para hallar las coordenadas de los centroides de cada objeto. Luego, se calcula el ángulo al que se debe rotar la imagen con el fin de alinearla con la dirección de los ejes de coordenadas ecuatoriales, para posteriormente rotar las coordenadas de los centroides calculados y así hallar la posición del asteroide en términos de ascensión recta y declinación respecto de cada una de las referencias ingresadas. Con este conjunto de valores de ascensión recta y declinación correspondientes al asteroide, se determina la distribución de probabilidad que siguen estos datos para posteriormente calcular la posición real con su respectiva incertidumbre. Por último, esta posición que se encuentra en *Jfecha* se convierte a *J2000* para su visualización⁸.

La Figura 28 presenta el diagrama de flujo que detalla la realización de los bloques presentados en la Figura 27. Allí se identifican las funciones *J20002Jfecha()*, *centroide()*, *rotación()*, *Posiciones()*, *ErrorPosicion()* y *Jfecha2J2000()*. La operación de cada una de estas funciones será descrita a continuación.

J2000 a JFecha

Posterior a la lectura de los datos ingresados por el usuario, esta función convierte las coordenadas de las estrellas de referencia del equinoccio del año 2000 al de la fecha de captura de la fotografía (*JFecha*). Para esto se utilizan el conjunto de ecuaciones (3) a (10) [1].

⁸ Esta operación se realiza ya que la mayoría de bases de datos de efemérides de cuerpos menores del Sistema Solar presentan las coordenadas precesionadas al equinoccio *J2000*.

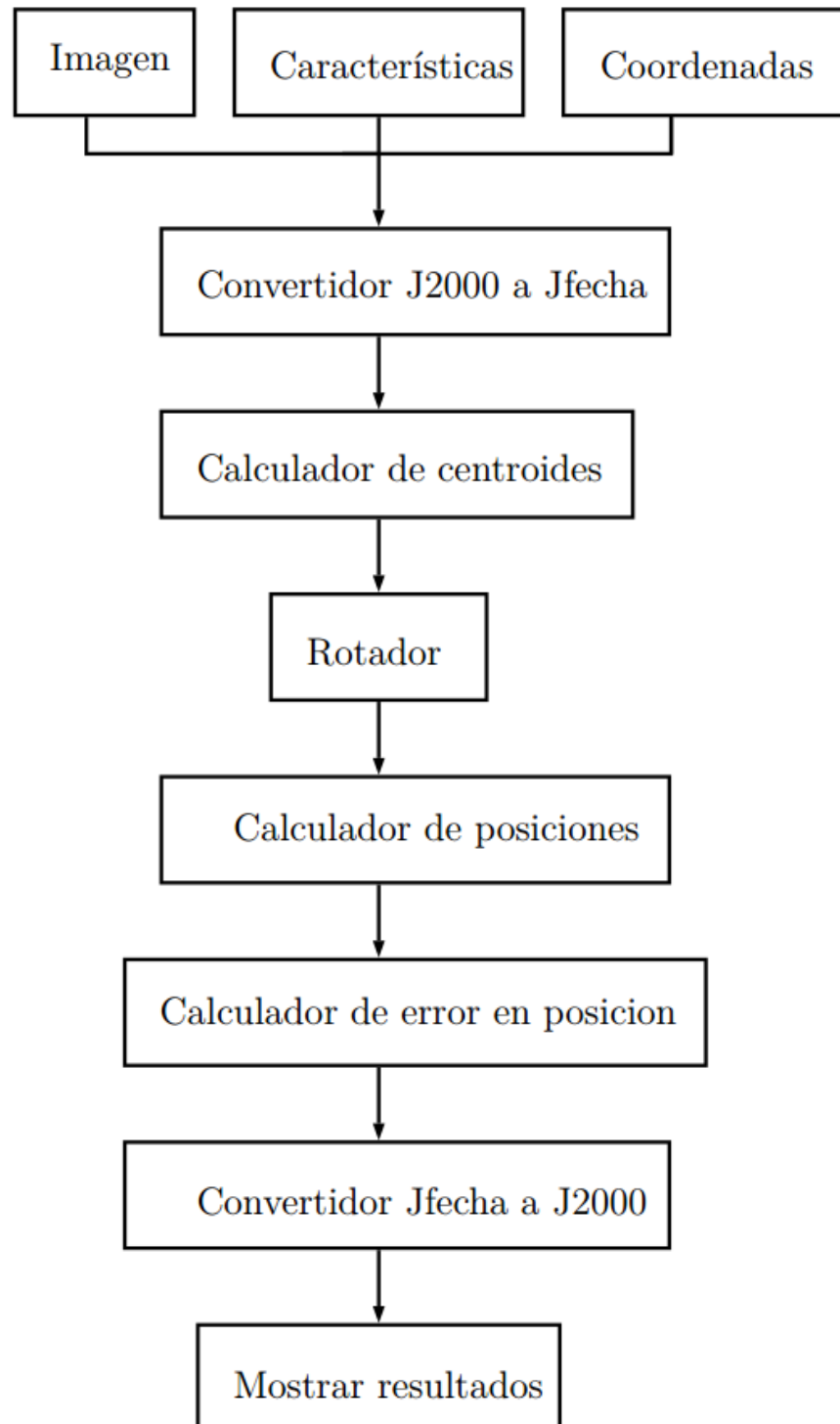


Figura 27. Diagrama de bloques general de los algoritmos involucrados en el desarrollo de *Asteroid Position*.

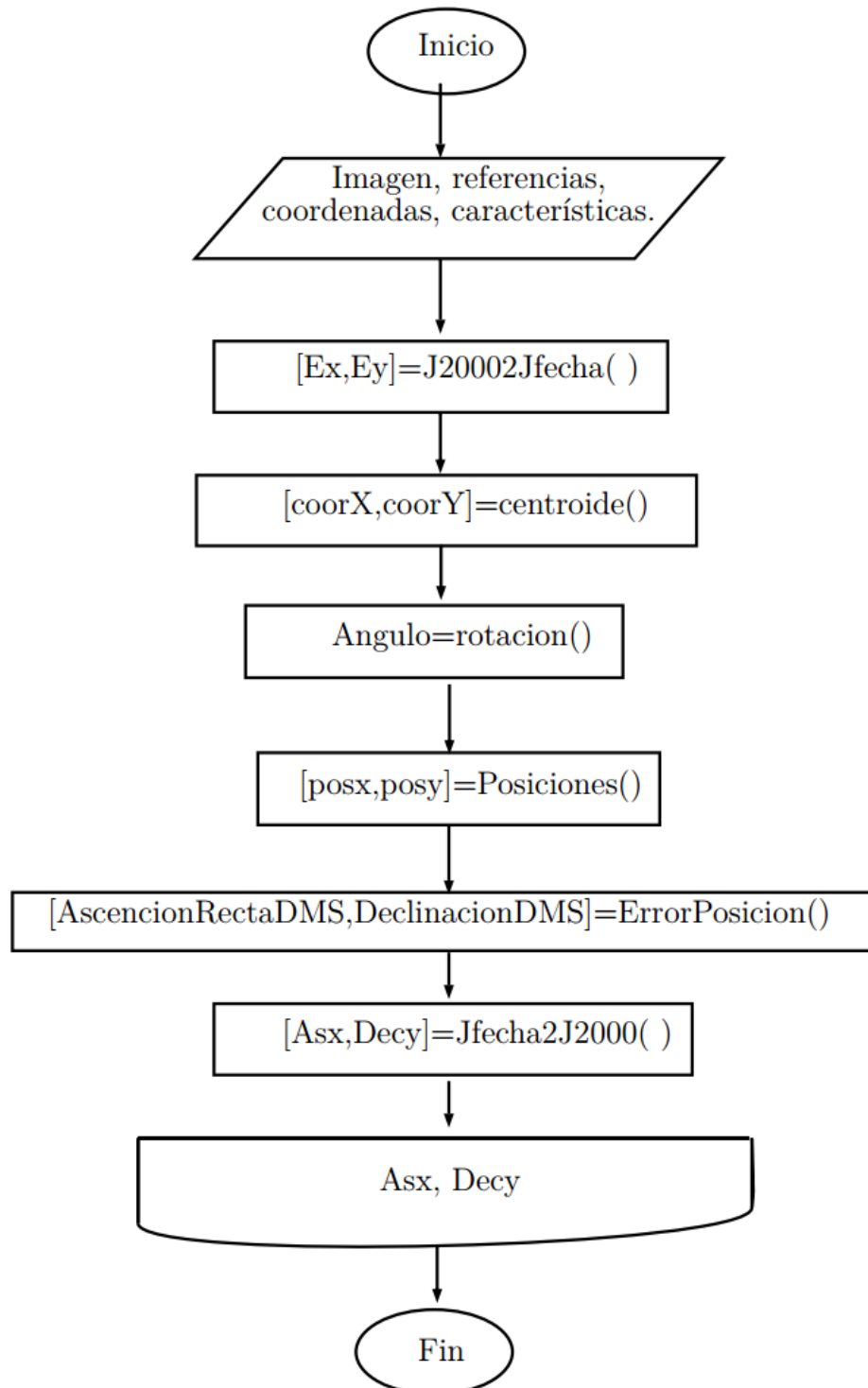


Figura 28. Diagrama de flujo general de *Asteroid Position*.

$$\alpha = \alpha_0 + M + N \sin \alpha_m \tan \delta_m \quad (3)$$

$$\delta = \delta_0 + N \cos \alpha_m \quad (4)$$

Con:

$$\alpha_m = \alpha_0 + \frac{1}{2}(M + N \sin \alpha_0 \tan \delta_0) \quad (5)$$

$$\delta_m = \delta_0 + \frac{1}{2}N \cos \alpha_m \quad (6)$$

$$M = 1.2812323t + 0.0003879t^2 + 0.0000101t^3 \quad (7)$$

$$N = 0.5567530t - 0.0001185t^2 - 0.0000116t^3 \quad (8)$$

$$t = (T - 2000)/100 \quad (9)$$

$$T = [JD(\varepsilon_f) - JD(\varepsilon_0)]/36525 \quad (10)$$

Donde α y δ son las coordenadas deseadas de ascensión recta y declinación en *JFecha* respectivamente, α_0 y δ_0 son las coordenadas de ascensión recta y declinación en *J2000* respectivamente, M y N son las constantes astrométricas de precesión, $JD(\varepsilon_f)$ es la fecha juliana de la época corregida (*JFecha*) y $JD(\varepsilon_0)$ es la fecha juliana correspondiente al año 2000 (2451545).

La función *J2000Jfecha()* recibe la imagen, las coordenadas y las referencias. Al contar con las coordenadas en grados, minutos y segundos, estas se convierten a grados decimales. Teniendo en cuenta que la ascensión recta se encuentra en horas, minutos y segundos, después de esta conversión es necesario multiplicar por 360 grados y dividir entre 24 horas. La función *fitsheader* toma del encabezado del archivo *fit* la información acerca de la fecha y hora de captura de la fotografía objeto de estudio, mientras que la función *juliandate* calcula la fecha juliana del momento de la observación ($JD(\varepsilon_f)$). Finalmente se aplican las ecuaciones mencionadas anteriormente para así obtener las coordenadas tanto en ascensión recta como en declinación, precesionadas a la fecha de captura de la fotografía. Esta operación se ilustra en el diagrama de flujo presentado en la Figura 29.

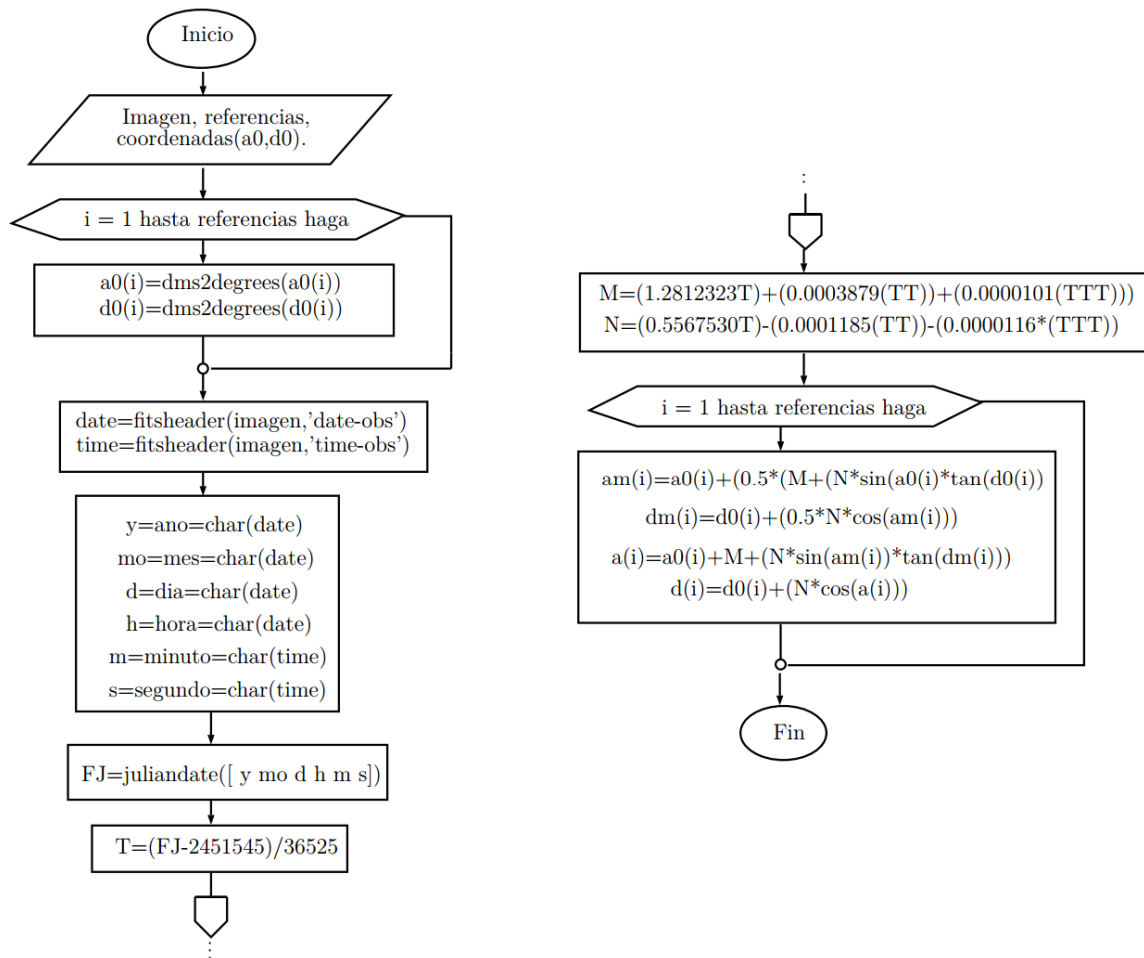


Figura 29. Diagrama de Flujo de la función *J2000Jfecha()*.

Centroide

Una vez se han calculado las coordenadas en *JFecha*, el usuario procede a seleccionar en primera instancia el asteroide objeto de estudio, seguido de las estrellas que servirán de referencia para hallar la posición del cuerpo menor seleccionado. La función *centroide()* calcula los centroides de los objetos elegidos a partir de la imagen cargada y de la cantidad de referencias a utilizar. Para la selección de los objetos, el programa, mediante la función *getrect* de *Matlab* que entrega las coordenadas de la selección, crea una ventana equivalente a la selección de la imagen. Sobre esta ventana se calcula el centroide utilizando las ecuaciones (11) y (12) [2], [3] y [4].

$$X_C = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} X_i I_{i,j}}{\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} I_{i,j}} \quad (11)$$

$$Y_C = \frac{\sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} Y_i I_{i,j}}{\sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} I_{i,j}} \quad (12)$$

Donde X_C es la coordenada en el eje X del centroide del objeto, N es el número de columnas presentes en el tamaño de la ventana que contempla el objeto, X_i es el número de la columna a procesar, e $I_{i,j}$ es el valor de la intensidad del pixel en cada punto. Así mismo, Y_C es la coordenada en el eje Y del centroide del objeto, M es el número de filas presentes en el tamaño de la ventana que contempla el objeto, Y_i es el número de la columna a procesar, e $I_{i,j}$ es el valor de la intensidad del pixel en cada punto. La Figura 30 presenta el diagrama de flujo del algoritmo implementado para el cálculo del centroide.

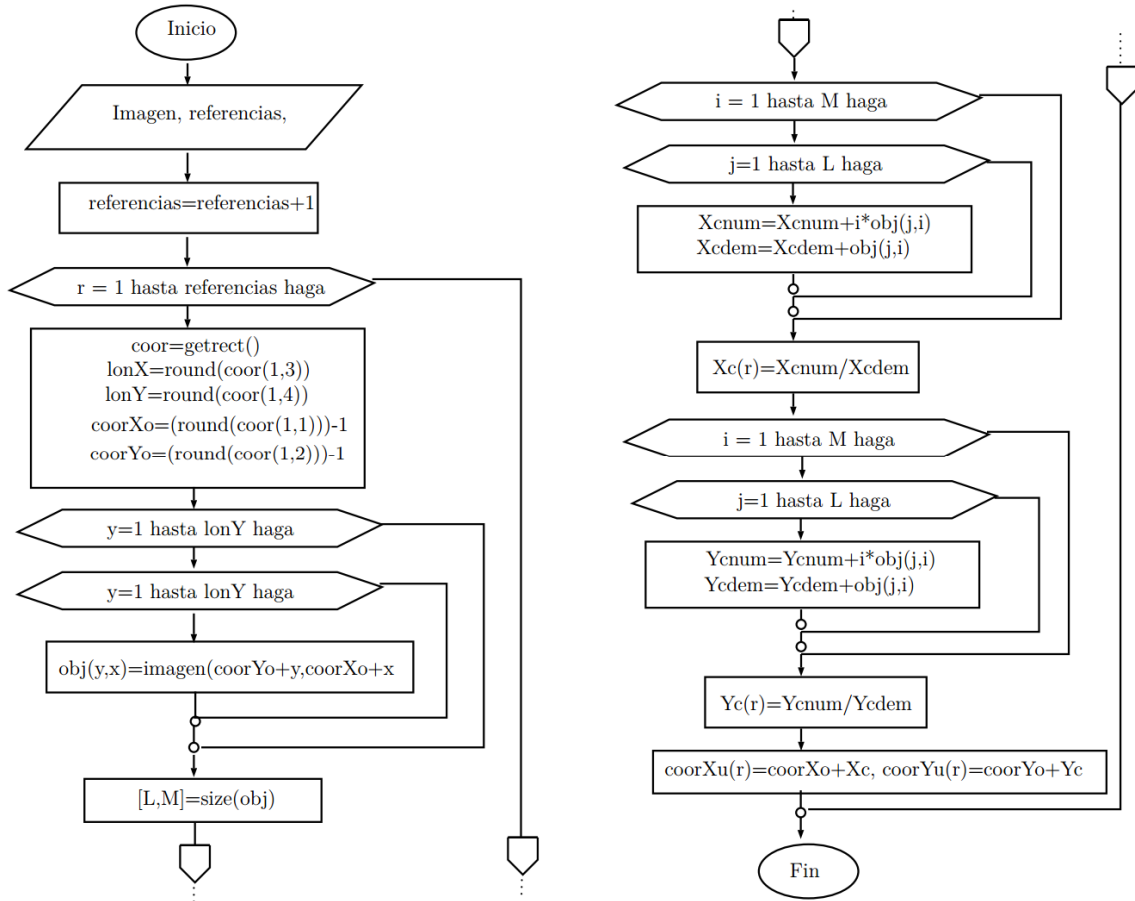


Figura 30. Diagrama de flujo de la función *centroide()*.

Rotación

El siguiente paso consiste en rotar la imagen cargada. Esto es necesario ya que en el momento en que se captura la fotografía astronómica, al ubicar la cámara en el telescopio, ésta no queda perfectamente alineada, por lo que la imagen capturada va a estar girada unos pocos grados con respecto a los ejes de referencia del sistema de coordenadas ecuatorial. Si no se corrige esta situación, la medición en la posición del asteroide no serviría para propósitos científicos y de investigación.

A la función *rotación()*, encargada de rotar la imagen, y cuyo diagrama de flujo se presenta en la Figura 31, le ingresan la fotografía en cuestión, las coordenadas de los centroides hallados siguiendo el procedimiento descrito en el apartado anterior, las referencias seleccionadas, el número de referencias, las coordenadas en ascensión recta y declinación correspondientes a las referencias ingresadas, y la resolución en grados por píxel digitada por el usuario. Con esta información, lo primero que se realiza es la eliminación del centroide del asteroide del conjunto de centroides que se tienen, pues como este objeto no se encuentra en los catálogos estelares, sus coordenadas no pueden ser utilizadas como referencia para calcular el ángulo de rotación. Acto seguido, estos datos se ingresan a una función denominada *rota()*, la cual se describe a continuación.

Función *rota()*

La función *rota()* recibe la imagen, las referencias menos uno, las coordenadas de los centroides sin el asteroide, los valores de ascensión recta y declinación de las estrellas seleccionadas previamente, y el valor en segundos de arco por píxel característico del montaje instrumental con el que se capturó la fotografía. Esta función arroja como resultados los valores de ascensión recta y declinación de la primera estrella seleccionada respecto de las demás estrellas, calculados al rotar la fotografía entre 0° y 45° y entre 315° y 360° , variando de 0.1° cada vez. Para esto, en primera instancia se traslada el origen de coordenadas de la esquina superior izquierda al centro de la imagen, con el fin de realizar una rotación con respecto al centro geométrico de la fotografía. A continuación, las coordenadas de todos los píxeles se rotan a partir de la aplicación de las ecuaciones (13) y (14) [5].

$$X = X_0 \cos \theta - Y_0 \sin \theta \quad (13)$$

$$Y = Y_0 \cos \theta + X_0 \sin \theta \quad (14)$$

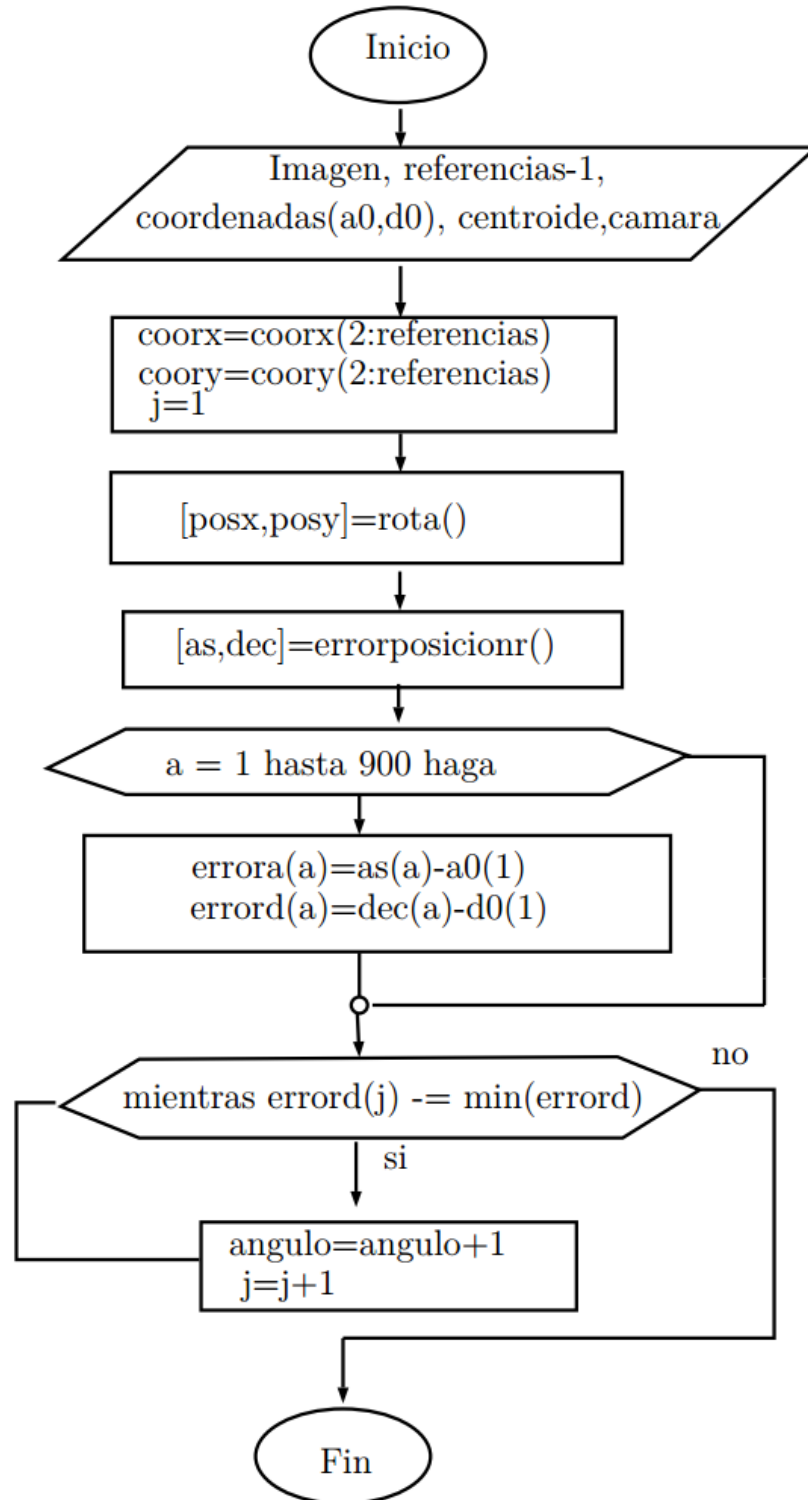


Figura 31. Diagrama de flujo que describe el algoritmo implementado en la función *rotación()*.

Donde X y Y son las coordenadas rotadas de cada pixel, X_0 y Y_0 son las coordenadas originales, y ϑ es el ángulo que se desea rotar (entre 0° y 45° y entre 315° y 360° , variando de a 0.1° cada vez). Finalmente, la función $rota()$ halla las coordenadas de ascensión recta y declinación de la primera estrella de referencia, con respecto a las demás, para cada ángulo de rotación; para lo cual se aplican las ecuaciones (15) y (16) [5].

$$Asc = Asc_{ref} + \left(res(X_{ref} - X_0) \right) \quad (15)$$

$$Dec = Dec_{ref} + \left(res(Y_{ref} - Y_0) \right) \quad (16)$$

Donde Asc y Dec son la ascensión recta y la declinación de la primera estrella seleccionada, respectivamente, Asc_{ref} y Dec_{ref} corresponden a la ascensión recta y declinación de cada una de las demás estrellas que ingresó el usuario al inicio, X_{ref} y Y_{ref} son los valores del centroide para las estrellas seleccionadas menos la primera, X_0 y Y_0 corresponden a los valores del centroide para la primera estrella seleccionada, y res es la resolución en grados por píxel. Con esto se obtiene para cada ángulo, tantas coordenadas para la primera estrella como referencias menos uno hayan sido ingresadas por el usuario. La Figura 32 presenta el diagrama de flujo del algoritmo implementado por la función $rota()$.

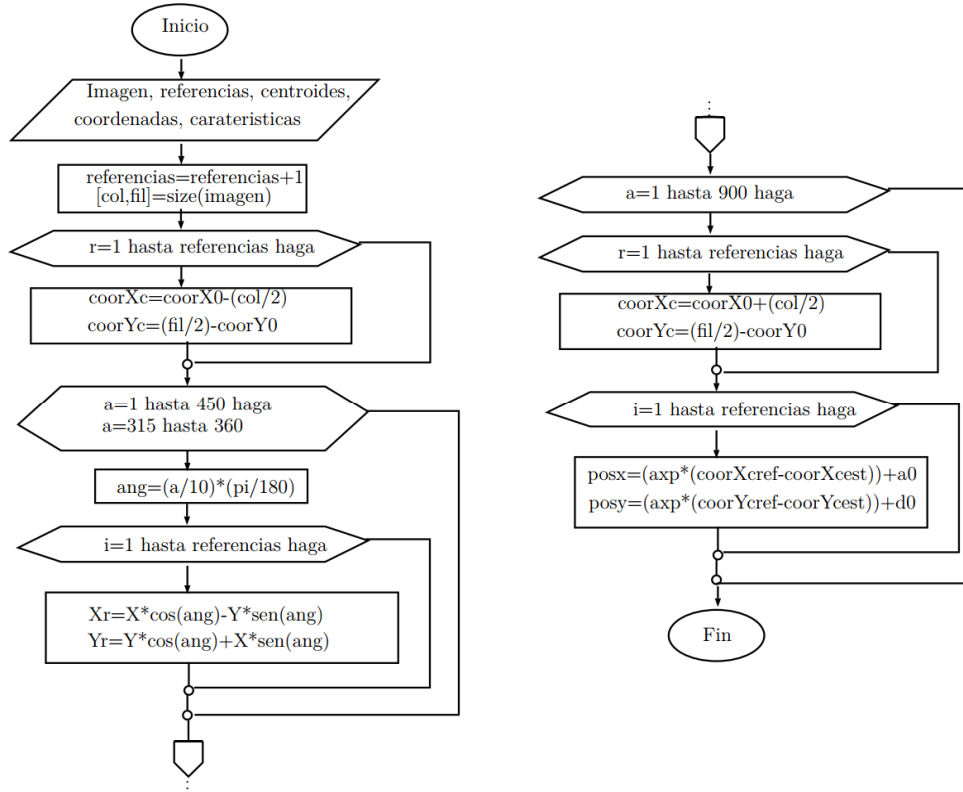


Figura 32. Diagrama de flujo que ilustra el algoritmo implementado por la función $rota()$.

Función *errorposiciónr()*

A continuación, los valores que arroja la función *rota()*, ingresan a otra función conocida como *errorposiciónr()*, la cual se encarga de calcular el error que existe entre las coordenadas calculadas para cada ángulo de rotación y los valores reales ingresados por el usuario para cada estrella de referencia. Esta operación se realiza para cada ángulo rotado, hasta encontrar el error más pequeño. En la posición identificada por este error se encuentran los valores de ascensión recta y declinación correspondientes al ángulo que se debe rotar la imagen. Tanto este ángulo como los menores errores de ascensión recta y declinación, son entregados como datos de salida por la función en cuestión. Para realizar esta operación, *errorposiciónr()* toma los valores de ascensión recta y declinación en cada ángulo y calcula su promedio, para con esto hallar la desviación típica a partir de la aplicación de la ecuación (17).

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\bar{X} - x_i)^2}{N(N-1)}} \quad (17)$$

Donde σ es la desviación típica, \bar{X} es el promedio de las diferentes coordenadas calculadas para cada ángulo y N es el número total de datos.

Luego, la precisión en la medición corresponde a la mitad del valor en segundos de arco por pixel característico del montaje instrumental utilizado para la captura de la imagen. Se tiene como el delta de la ascensión recta y de la declinación, al mayor valor entre la desviación típica y la precisión. Con esto, el valor real en cada ángulo es el promedio previamente calculado con el delta hallado. Estos valores son los arrojados por la función *errorposiciónr()* para calcular el ángulo en la función *Rotacion()*, al igual que los errores que se obtienen de este cálculo del ángulo cuando se compara el valor real encontrado con el ingresado al inicio de la ejecución del programa *Asteroid Position*. La Figura 33 presenta el diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por la función *errorposiciónr()*.

Posiciones

Una vez se ha superado la fase de cálculo del ángulo de rotación, y se obtienen los errores debidos al mismo, se procede a calcular las posiciones del asteroide respecto de todas las estrellas de referencia en el ángulo estimado. La función *Posiciones()* recibe la imagen capturada, el número de referencias, los centroides de los objetos seleccionados, las coordenadas ingresadas y el valor en segundos de arco por pixel propio de la cámara que se utilizó para la captura de la fotografía astronómica.

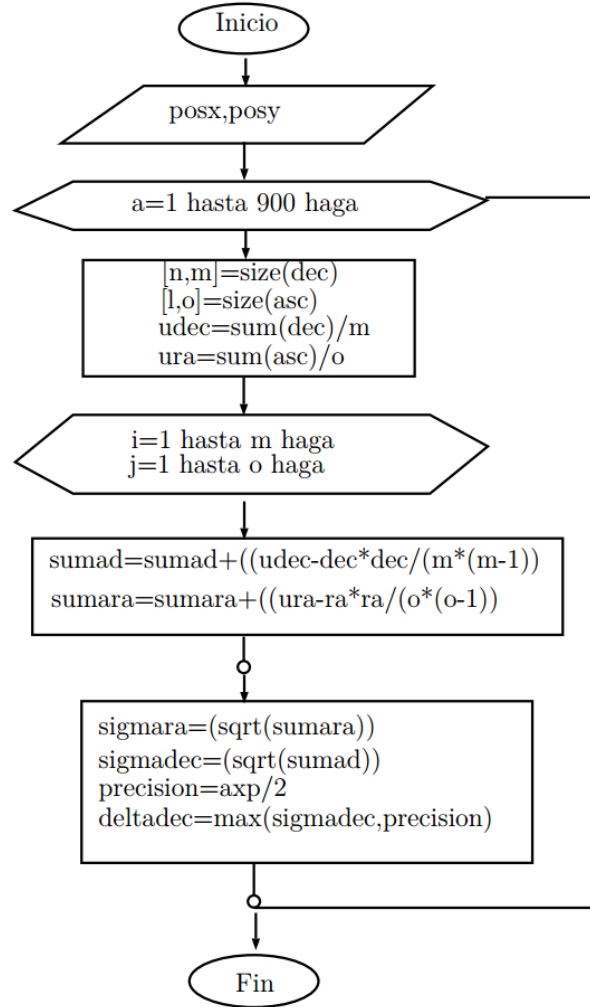


Figura 33. Diagrama de flujo del algoritmo implementado por la función *errorposiciónr()*.

Para el cálculo de las coordenadas del asteroide en ascensión recta y declinación con respecto a las estrellas ingresadas como objetos de referencia, la función *Posiciones()* aplica las ecuaciones (18) y (19):

$$Asc = Asc_{ref} + \left(res(X_{ref} - X_0) \right) \quad (18)$$

$$Dec = Dec_{ref} + \left(res(Y_{ref} - Y_0) \right) \quad (19)$$

Donde *Asc* y *Dec* son la ascensión recta y la declinación de la primera estrella seleccionada, respectivamente, *Asc_{ref}* y *Dec_{ref}* corresponden a la ascensión recta y declinación de cada una de las demás estrellas que ingresó el usuario al inicio, *X_{ref}* y *Y_{ref}* son los valores del centroide para las estrellas seleccionadas menos la primera, *X₀* y *Y₀* corresponden a los valores del centroide para la primera estrella seleccionada, y *res* es la resolución.

La Figura 34 presenta el diagrama de flujo del algoritmo *Posiciones()*.

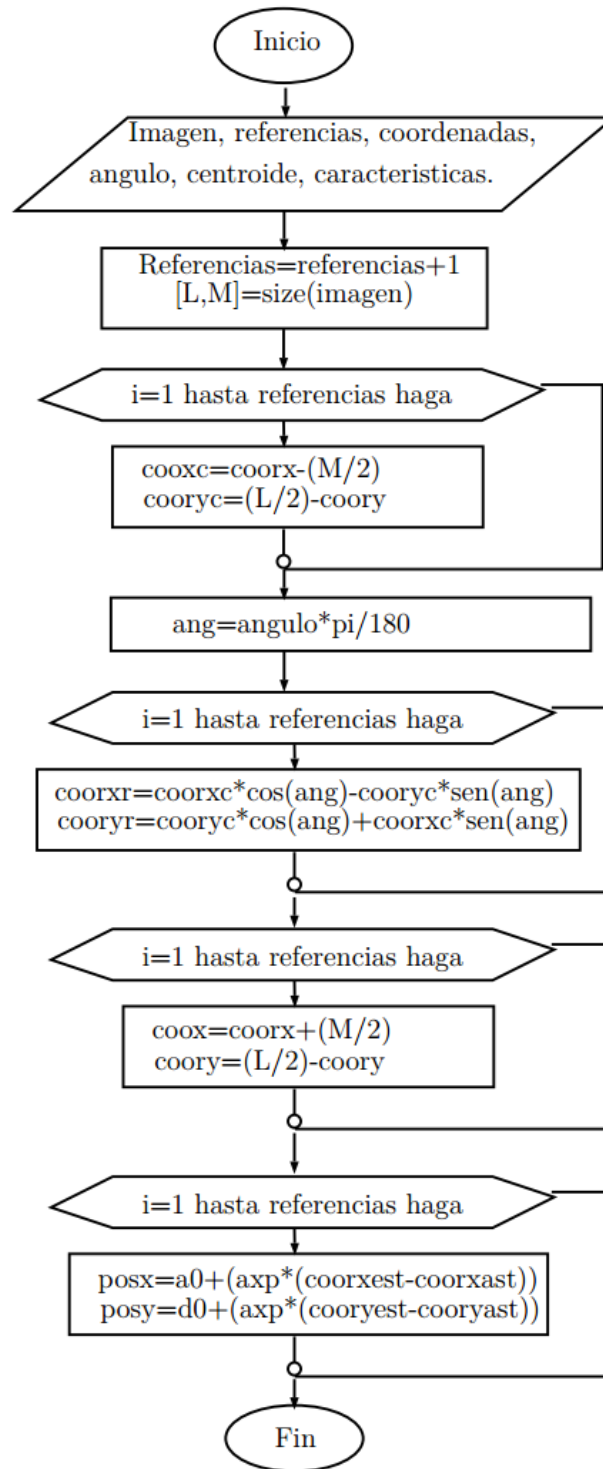


Figura 34. Diagrama de flujo del algoritmo *Posiciones()*.

Error Posición

El siguiente paso en el diagrama de bloques presentado en la Figura 27 consiste en el cálculo del error en la posición estimada para el asteroide gracias a la función descrita en el apartado anterior. La función *ErrorPosicion()* realiza esta tarea. A este algoritmo le ingresan los valores de ascensión recta y declinación calculados por la función *Posiciones()*. Inicialmente, a estos valores de ascensión recta y declinación se les aplican dos test con el objetivo de determinar si siguen algún tipo de distribución de probabilidad y cual sería esta. La función *adtest()* realiza el test de *Anderson-Darlin* [6], el cual permite establecer si los datos en cuestión siguen algún tipo de distribución de probabilidad, y la función *swtest()* aplica el test de *Shapiro-Wilk* [7], diseñado con el fin de determinar qué tipo de distribución de probabilidad siguen los datos.

Una vez se verifica la distribución de probabilidad que siguen los datos de ascensión recta y declinación, se procede a encontrar los valores finales que corresponderán a la posición del asteroide. Al tratarse de una medida obtenida como resultado de varias mediciones, pues es calculada respecto a varias referencias, se obtiene el promedio de estos valores. Este método es ideal para datos que siguen una distribución de probabilidad *Gaussiana* como se espera en este caso. En esta función se calcula la desviación típica y la precisión, de las que se desprende el error de una medida que se obtiene de diferentes mediciones; y a partir de allí la siguiente función realiza el cálculo de la incertidumbre en la medición.

La medición indirecta de la posición del asteroide (con respecto a las estrellas de referencia), se realiza a partir de las ecuaciones (20) y (21).

$$Asc = Asc_{ref} + \left(res(X_{ref} - X_0) \right) \quad (20)$$

$$Dec = Dec_{ref} + \left(res(Y_{ref} - Y_0) \right) \quad (21)$$

Donde *Asc* y *Dec* son la ascensión recta y la declinación de la primera estrella seleccionada, respectivamente, *Asc_{ref}* y *Dec_{ref}* corresponden a la ascensión recta y declinación de cada una de las demás estrellas que ingresó el usuario al inicio, *X_{ref}* y *Y_{ref}* son los valores del centroide para las estrellas seleccionadas menos la primera, *X₀* y *Y₀* corresponden a los valores del centroide para la primera estrella seleccionada, y *res* es la resolución.

Así, el error asociado al cálculo de *Asc* y *Dec*, realizado a partir de la implementación de las ecuaciones (20) y (21), está dado por las ecuaciones (22) y (23).

$$\Delta Asc = dAsc = \left| \frac{\partial Asc}{\partial X_{ref}} \right| + \left| \frac{\partial Asc}{\partial X_0} \right| \quad (22)$$

$$\Delta Dec = dDec = \left| \frac{\partial Dec}{\partial Y_{ref}} \right| + \left| \frac{\partial Dec}{\partial Y_0} \right| \quad (23)$$

La Figura 35 presenta el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para la estimación del error en la posición del asteroide en cuestión.

JFecha a J2000

Dado que la mayoría de las bases de datos astrométricas de cuerpos menores del Sistema Solar arrojan efemérides precesionadas al equinoccio del año 2000, es necesario transformar las coordenadas calculadas para el asteroide objeto de estudio, de *JFecha* a *J2000*. Para realizar esta tarea, la función *Jfecha2J2000()* utiliza las ecuaciones (24) a (31) [1].

$$\alpha_0 = \alpha - M - N \sin \alpha_m \tan \delta_m \quad (24)$$

$$\delta_0 = \delta - N \cos \alpha_m \quad (25)$$

Con

$$\alpha_m = \alpha - \frac{1}{2}(M + N \sin \alpha \tan \delta) \quad (26)$$

$$\delta_m = \delta - \frac{1}{2}N \cos \alpha_m \quad (27)$$

$$M = 1.2812323t + 0.0003879t^2 + 0.0000101t^3 \quad (28)$$

$$N = 0.5567530t - 0.0001185t^2 - 0.0000116t^3 \quad (29)$$

$$t = (T - 2000)/100 \quad (30)$$

$$T = [JD(\varepsilon_f) - JD(\varepsilon_0)]/36525 \quad (31)$$

Donde α_0 y δ_0 son las coordenadas de ascensión recta y declinación deseadas en *J2000*, α y δ son las coordenadas de ascensión recta y declinación en *JFecha* respectivamente, M y N son las constantes astrométricas de precesión, $JD(\varepsilon_f)$ es la fecha juliana de la época corregida (*JFecha*) y $JD(\varepsilon_0)$ es la fecha juliana correspondiente al año 2000 (2451545).

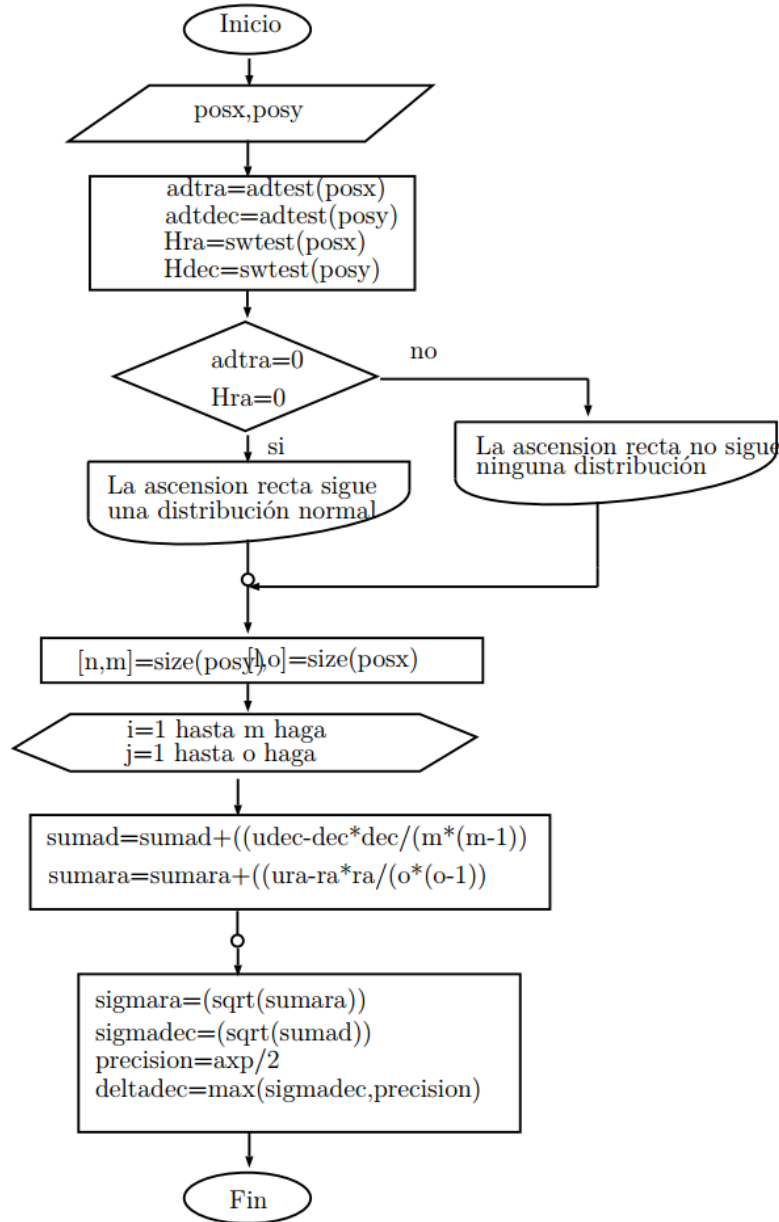


Figura 35. Diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por la función *ErrorPosicion()*.

Finalmente, la Figura 36 presenta el diagrama de flujo correspondiente al algoritmo ejecutado por la función *Jfecha2J2000()*.

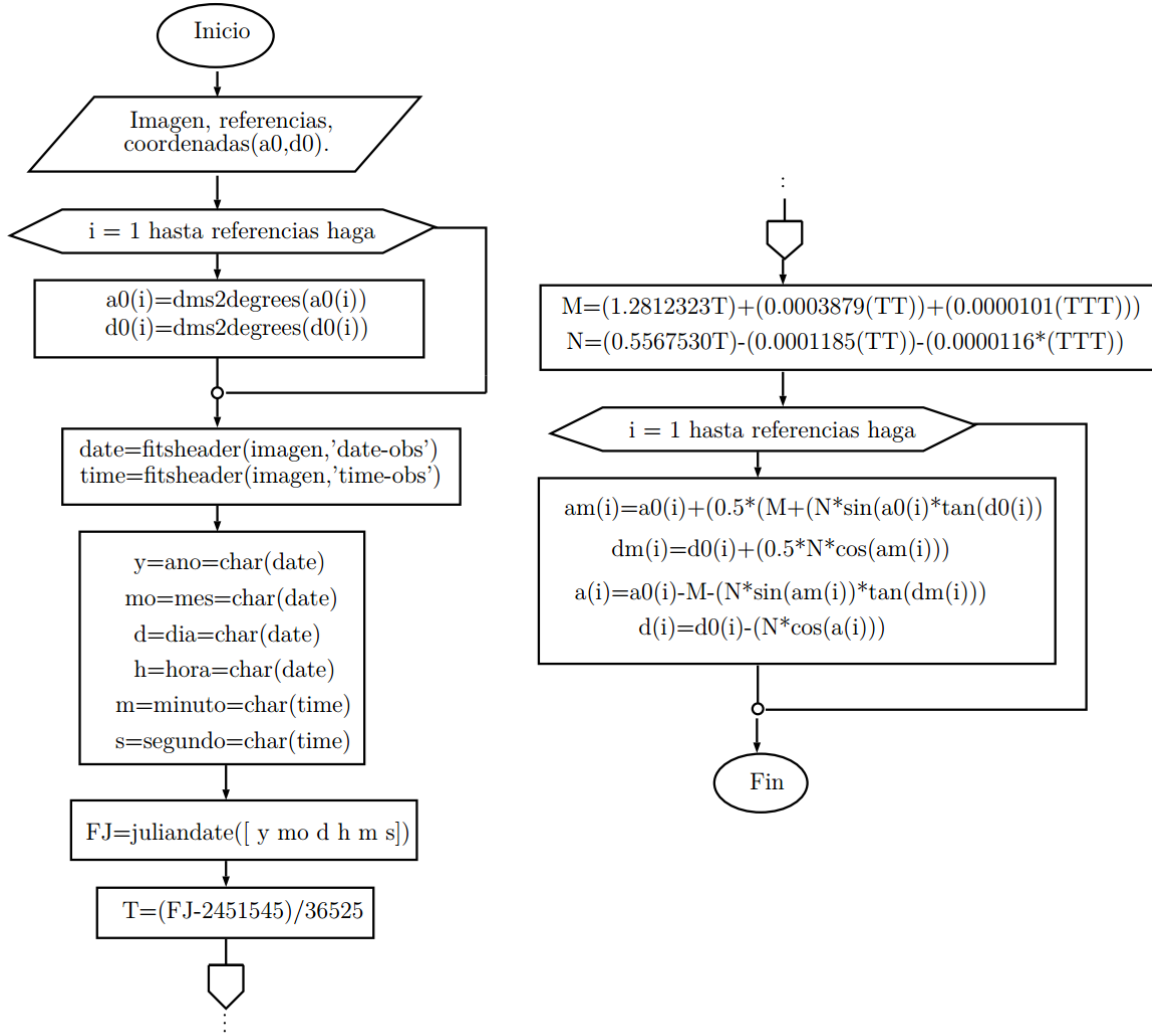


Figura 36. Diagrama de flujo de la función *Jfecha2J2000()*.

Referencias

- [1] K. Lang, *Astrophysical Formulae: Space, time, matter and cosmology*. Springer, 2013.
- [2] Y. Liao, E. Liu, J. Zhong, and H. Zhang, "Processing centroids of smearing star image of star sensor," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, 2014.
- [3] A. M. Nightingale and S. Gordeyev, "Shack-Hartmann wavefront sensor image analysis: a comparison of centroiding methods and image-processing techniques," *Opt. Eng.*, vol. 52, no. 7, p. 71413, 2013.
- [4] S. B. Howell, *Handbook of CCD astronomy*, vol. 5. Cambridge University Press, 2006.
- [5] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*. Pearson Education, 2011.
- [6] T. W. Anderson and D. A. Darling, "A test of goodness of fit," *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 49, no. 268, pp. 765–769, 1954.
- [7] S. S. Shapiro and M. B. Wilk, "An analysis of variance test for normality (complete samples)," *Biometrika*, vol. 52, no. 3/4, pp. 591–611, 1965.