

SECTION

Astrometría y fotometría

Ramón Naves¹ and Montse Campàs²

¹Obs. Montcabrer – MPC 213 (Cabrils – Barcelona), Spain. E-mail: ramonnavesnogues@gmail.com.

²Obs. Montcabrer – MPC 213 (Cabrils – Barcelona), Spain. E-mail: mcampast@gmail.com.

Keywords: astrometría, fotometría, Astrometrica

Presentación

En esta sección trataremos sobre temas relacionados con astrometría y fotometría, haciendo énfasis en diversos programas de uso frecuente por parte del astrónomo amateur. El foco se pone sobre la operativa del uso de los programas, y sobre el motivo de las diferentes etapas en el proceso que conduce a la obtención de una magnitud fotométrica o una posición astrométrica. Comenzamos en este número con el programa ASTROMETRICA que, aunque veterano, sigue siendo muy utilizado en la comunidad.

Presentation

In this section, we will cover topics related to astrometry and photometry, with an emphasis on various programs frequently used by amateur astronomers. The focus is on the operation of these programs and the reasoning behind the different stages in the process that leads to obtaining a photometric magnitude or an astrometric position. In this issue, we begin with the program ASTROMETRICA, which, despite being an older program, is still widely used in the community.

ASTROMETRICA

1. Un poco de historia

La astrometría es una de las disciplinas científicas más antiguas, tanto como la propia astronomía. Su finalidad estriba en conocer la posición en el cielo, de un astro, para un momento determinado. A ser posible con la mejor precisión que nuestra tecnología ofrezca. Con el paso de los siglos esta disciplina ha ido ganando precisión a medida que la técnica y la instrumentación se han ido refinando. En la prehistoria se hicieron servir alineamientos de piedra (Fig. 1), palos e incluso se construyeron templos con ventanas y o aberturas, para poder efectuar las primeras mediciones de las posiciones del Sol y de la Luna e incluso de los planetas. Aunque la precisión de las medidas de posición estaban muy lejos de los estándares actuales, sirvieron perfectamente, para confeccionar los primeros calendarios, imprescindibles para el desarrollo de la agricultura prediciendo el paso de las estaciones. Ya en época histórica gracias al astrolabio, la precisión de las medidas aumento de forma considerable. Como la precisión aumentaba con el tamaño de los círculos graduados, se llegaron a construir instrumentos con círculos graduados de varios metros de diámetro, como el que usó uno de los mejores observadores astrométricos de su época. Tycho Brahe obtuvo las medidas más precisas de su época Concretamente sus medidas astrométricas del planeta Marte con un error en torno al minuto de arco (recordemos que aun no se había inventado el telescopio.) fueron las que posibilitaron que Johanes Kepler pudiera determinar que sus medidas cuadraban mucho mejor si suponía que la órbita de Marte era una elipse en vez de una



Figura 1. Stonehenge, Condado de Wiltshire, Inglaterra – Wikipedia Diego Delso CC BY-SA 4.0..

circunferencia en torno al Sol como se había creído hasta entonces . Todo ello gracias a las excelentes medidas de Tycho Brahe, Kepler pudo enunciar las tres leyes de Kepler.

El siguiente salto de calidad vino con la llegada del telescopio, ello provocó un aumento espectacular de la precisión de las medidas astrométricas. La fotografía con película química y posteriormente con cámaras digitales CCD y CMOS sirvieron para popularizar dicha disciplina en el mundillo de los astrónomos aficionados. Precisiones por debajo del segundo de arco estaban ahora a nuestro alcance.

2. Astrometría Actual

Básicamente, la astrometría que podemos realizar actualmente con nuestros telescopios dotados de cámaras CCD o CMOS se basa en disponer de un buen catálogo estelar, el cual ha sido ya previamente astrometrizado por parte del mundo profesional. Si bien hace más de 25 años los catálogos astrométricos y fotométricos existentes se basaban en el escaneo de placas fotográficas realizadas sobre película química, actualmente disponemos de catálogos astrométricos y fotométricos de mucha mejor calidad. De hecho gracias a la misión Gaia, disponemos de varias versiones del catálogo Gaia que al estar realizado con un telescopio y cámara CCD situado en el espacio, tiene la más alta calidad astrométrica conseguida hasta la fecha.

Para trabajos exclusivamente astrométricos, mi recomendación es usar Gaia DR2 o DR3, es por mucho el mejor catálogo astrométrico. Para trabajos astrométricos y fotométricos, aunque podemos usar Gaia y de hecho para fotometría de cometas sin filtro fotométrico es muy usado, cuando la fotometría con filtros fotométricos sea un requisito a tener en cuenta es mejor usar catálogos astrométricos que, si bien no tienen la calidad astrométrica de Gaia, si tienen una calidad fotométrica mucho mayor por haberse usado varios filtros fotométricos para su creación. Atlas o Apass son ambas una excelente opción actualmente. Catálogos como Usno muy usado en el pasado son ya obsoletos y poco recomendables.

Y bien, valiéndonos de este Catálogo, nuestro trabajo para astrometrizar cualquier astro (típicamente cometas y asteroides), consistirá en un programa que logre comparar y reconocer nuestras estrellas de una imagen obtenida por nuestros medios, con las estrellas del catálogo astrométrico. Recordemos que un chip CCD o CMOS es el equivalente (de hecho mucho más preciso) de una especie de papel milimetrado. Dicho programa astrométrico se encargará de correlacionar las estrellas de nuestra imagen con las estrellas del catálogo, asignándoles a cada una de ellas las coordenadas celestes, ascensión

recta y declinación correspondientes. Correlacionando unas cuantas de ellas podrá asociar a cada pixel (incluso a cada subpixel) unas coordenadas celestes concretas con una altísima precisión. Típicamente son posibles precisiones de una décima de pixel, por lo que si trabajáramos a una resolución de un segundo de arco por pixel, podríamos disfrutar de precisiones del orden de 0.1 segundos de arco, sobre todo en objetos bien muestreados.

Para astrometrizar un cometa o un asteroide, previamente es imprescindible tener claro que hemos sido capaces de capturar el objeto a medir, y que somos capaces de advertir su movimiento respecto a las estrellas de fondo. Necesitaremos una toma de la zona del cielo que contenga el astro a medir y el máximo de estrellas posibles, debemos saber qué momento exacto se hizo la toma, y posteriormente con la ayuda de un buen catálogo estelar identificaremos qué estrellas aparecen en la imagen, que podamos correlacionar con el catálogo, de esta forma podremos saber en qué coordenadas se encuentra el astro, respecto a estas estrellas de referencia (de las que conocemos sus coordenadas exactas gracias al catálogo). Para poder determinar la posición del objeto a estudiar tomaremos como referencia las distancias angulares entre el astro y las estrellas de referencia de la imagen pudiendo determinar así las coordenadas de ese objeto para el momento en que se efectuó la toma de imagen. Dispondremos pues de la astrometría de ese objeto. Repitiendo este proceso, al cabo de un período de tiempo, de horas, días y meses, iremos obteniendo las posiciones de este astro en el cielo, que nos servirán para poder calcular la órbita. A medida que obtengamos más medidas será más fácil calcular una solución orbital para este objeto que sea consistente con nuestras observaciones.

3. Para qué sirve

La astrometría aplicada a la observación de estrellas y asteroides nos permite conocer la posición exacta de éstas, en un momento determinado y de esta forma poder calcular sus efemérides, e incluso calcular los parámetros orbitales. Actualmente el Minor Planet Center (organismo dependiente de la IAU) es el encargado de recoger la astrometría que mandan los observatorios astronómicos reconocidos (observatorios con código MPC) para poder determinar o actualizar las órbitas de los diferentes objetos que orbitan en el sistema solar, ya sean estrellas, asteroides o NEOS (objetos cercanos a la tierra). La función de este organismo es tener controlados todos estos astros, a fin de conocer con suficiente precisión sus órbitas con el objetivo de evaluar su peligrosidad, o simplemente para no volver a perderlos en el futuro. La finalidad de esta explicación, es la de enseñar el método adecuado para poder realizar astrometría de un asteroide o estrella, con la suficiente precisión para solicitar un código de observatorio MPC, el cual una vez obtenido nos acreditará a poder enviar nuestras medidas al Minor Planet Center. Estas medidas deben ser enviadas en un formato especial, llamado Formato MPC (nuestras medidas no serán tomadas en cuenta si son enviadas en cualquier otro formato o si contienen errores). Debemos tener en cuenta que el MPC exige medidas con una precisión que no supere el segundo de arco de error.

Los requisitos básicos son:

- Reloj con la hora UTC con precisión de un segundo, existen modelos que se sincronizan por radio para permanecer siempre en el segundo. También es posible poner a la hora el reloj del ordenador a través de internet.
- Telescopio con seguimiento capaz de obtener imágenes CCD de algunos minutos de exposición. Es muy útil disponer de encoders, sistemas Go To, etc., para localizar objetos
- Ubicación del telescopio fija. Todas las observaciones deben estar realizadas desde la misma ubicación (requisito del MPC)
- Puesta en estación precisa
- Es muy cómodo, aunque no imprescindible, poder trabajar con telescopios comandados por ordenador.

- Cámara CCD que permita exposiciones de varios minutos (hoy en día es fácil conseguir magnitudes 17-18 con una CCD normalita y un cielo mediocre)
- Programas informáticos que nos muestren dónde están los asteroides o estrellas. Por ejemplo: The Sky, Giude, Sky Map, etc.
- Programas informáticos para manejar la CCD : Ccdsoft, Astroart, Maxim-DL
- Programas de astrometría : Astrometrica ,FOCAS, Ccdsoft, Astroart, Iris, Charon, Canopus
- Catálogos estelares. Ejemplo: GSC, USNO, UCAC, CMC15, GAIA, ATLAS, APASS . . .
- Debemos disponer de conexión a internet para enviar nuestras medidas al MPC, aunque no hace falta que sea en el mismo observatorio.

10	10	12	24	25	20	15
11	22	25	40	33	22	18
13	24	88	160	100	40	23
16	38	98	200	140	60	26
13	26	70	103	83	50	30
12	14	22	34	23	21	17
8	10	12	12	12	13	13

Figura 2. *Un ejemplo de ADUs medidos en un área de 7 × 7 píxeles, con una estrella centrada. El máximo corresponde al centro del área, pero el ajuste de los datos a una función gaussiana mejora considerablemente la precisión en la estimación de la posición..*

El MPC exige medidas con una precisión de al menos un segundo de arco, por lo que deberemos adecuar la focal de nuestro telescopio según el tamaño de los píxeles de la ccd que tengamos. Lo recomendable es trabajar en una resolución entre 2 y 3 segundos de arco por píxel, lo que nos permitirá, en la práctica, obtener precisiones del orden una decena de este valor del tamaño angular del píxel. La fórmula que relaciona la resolución con el tamaño del píxel es:

$$\text{Resolución en segundos de arco} = 206.265 \times \frac{\text{tamaño píxel en } \mu\text{m}}{\text{distancia focal en mm}}$$

Demos unos ejemplos:

- Una cámara CCD MX916 con tamaño de píxel de 11.6 micras trabajando a 1200 mm de focal da una resolución de 1.99 segundos de arco por píxel.
- Una cámara ST9 con tamaño de píxel de 20 micras trabajando a 2000 mm de focal proporciona una resolución de 2.06 segundos de arco por píxel.

La precisión superior al tamaño del píxel se debe a que una estrella bien muestreada ocupa varios píxeles, con lo que podemos encontrar el centroide de esta estrella con mayor precisión que si ésta ocupara un solo píxel.

Imaginemos una porción de chip de 7 × 7 píxeles, en la que nos aparece una imagen de una estrella con un tamaño de unos 10 segundos de arco (Fig. 2). Como estamos trabajando a 2 segundos de arco por píxel, la estrella abarcará aproximadamente un diámetro de 5 píxeles llenando un área de unos 20 píxeles. Podríamos optar por coger el píxel más iluminado (200), como el centro de la estrella, pero en este

caso la precisión será tan sólo de medio píxel, o sea 1 segundo de arco aproximadamente. Pero existe un método mejor que aprovecha toda la información contenida en los 19 píxeles restantes, mediante una función gaussiana (los programas de astrometría ya lo tienen en cuenta) que permite determinar la posición del máximo de intensidad de la estrella con una precisión del orden de una décima parte de un píxel (0.2 segundos de arco en este ejemplo).

En la Fig. 3 se muestra un ejemplo de una imagen CCD superpuesta a un catálogo estelar. Una vez reconocido el campo, en el que hay 66 estrellas identificadas, el programa calcula la escala de la imagen en segundos de arco por píxel, así como la rotación del campo con respecto a los ejes celestes.

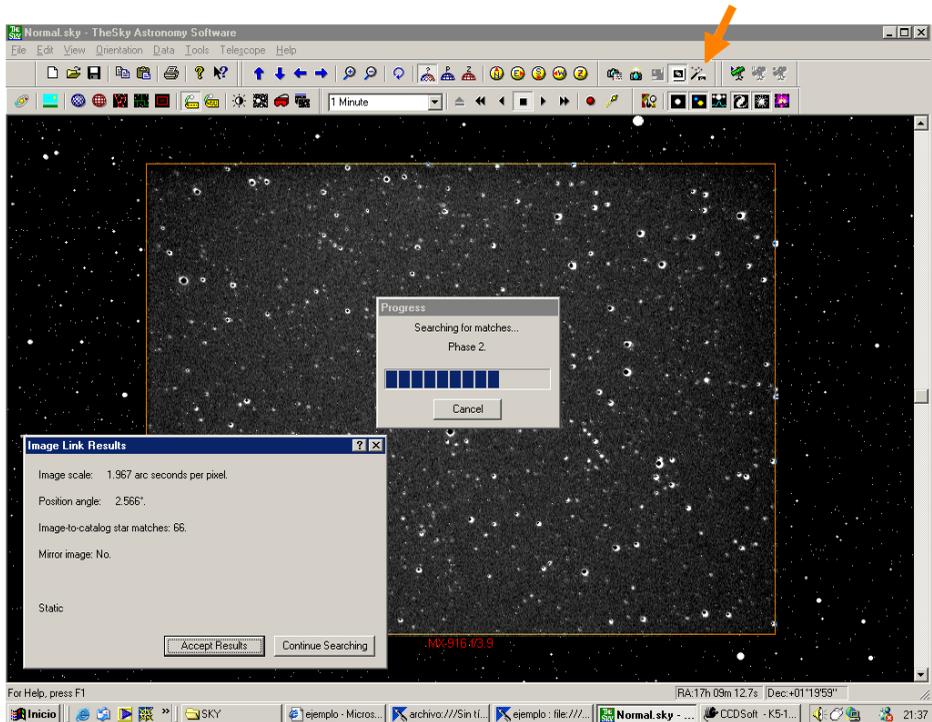


Figura 3. Ejemplo de una imagen real superpuesta a un catálogo estelar.

4. Astrometría con *ASTROMETRICA*

Veamos cómo hacer astrometría con un programa concreto. En este caso hemos escogido *ASTROMETRICA*, ya algo desfasado pero aún muy usado por su facilidad de uso.

4.1. Procedimiento clásico

Primero cargamos uno o diversas imágenes en el programa haciendo clic en el icono azul señalado por la flecha (Fig. 4). Después hacemos clic en el icono verde en forma de círculo, Fig. 5, y nos aparece un menú en el que colocaremos el nombre del cometa o asteroide, o en su defecto la posición del centro de coordenadas de la imagen, o sea, donde apunta el telescopio (algunos programas como Maxim DI guardan directamente las coordenadas en la cabecera Fits, no siendo necesario introducirlas a mano).

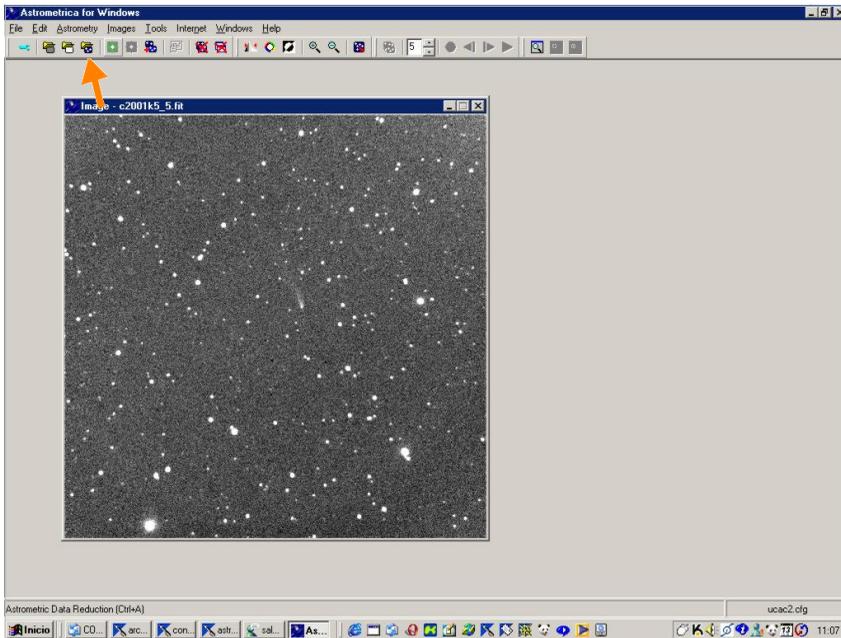


Figura 4. Carga de una o más imágenes en ASTROMETRICA.

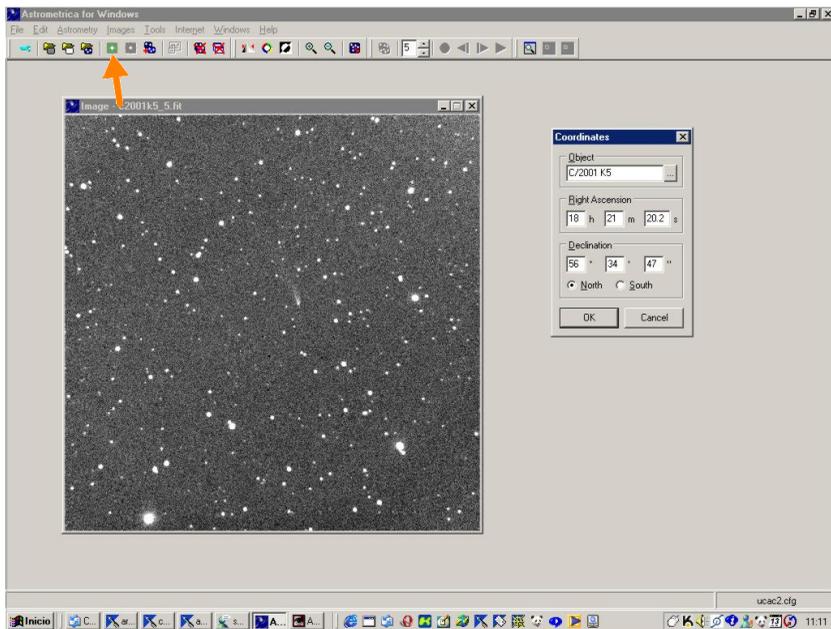


Figura 5. Acceso al menú para establecer el objeto o las coordenadas del centro de la imagen.

A continuación clicaremos OK.

Nos aparecerá entonces un cuadro, con las estrellas utilizadas para la astrometría y la fotometría, Fig. 6. Las estrellas marcadas con círculos verdes son aquellas que el programa ha podido identificar con el catálogo elegido en el archivo de configuración, y en las que su posición coincide con un error inferior al indicado. Debemos fijarnos en que los valores de error dRA y dDe estén por debajo del segundo de arco, de lo contrario tendremos que desestimar la toma.

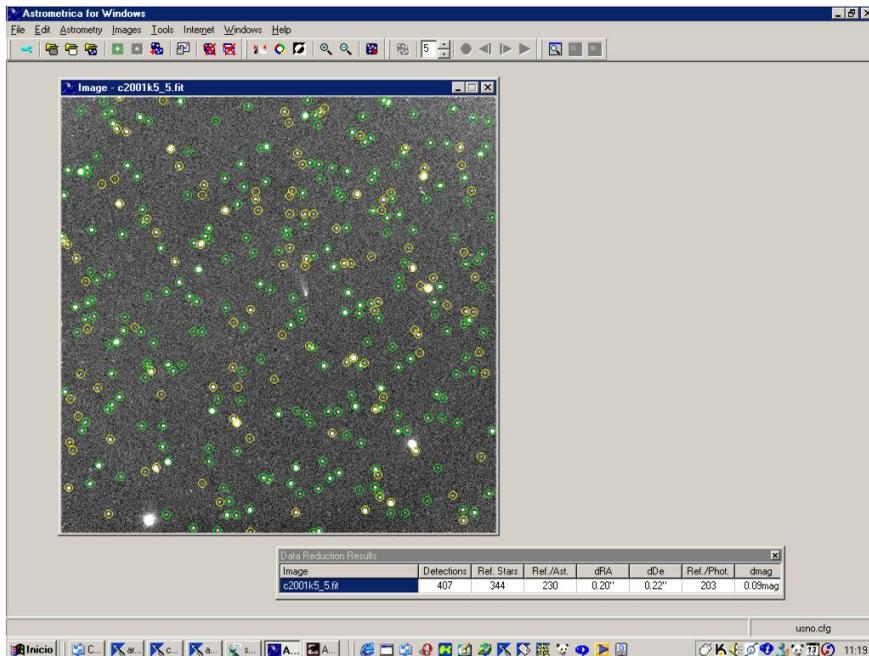


Figura 6. Ventana con el cuadro que contiene las estrellas identificadas en el catálogo elegido (en verde).

Tan sólo nos queda hacer clic sobre el cometa, o si no sabemos exactamente dónde se encuentra, podemos hacer clic en el menú **Tools -Known Object Overlay**, y nos aparecerá un cuadradito donde debería estar el cometa, Fig. 7. Para que esta opción funcione correctamente debemos tener actualizado el archivo **MPCorb** y **Comet.dat** del MPC (actualizables desde el menú **Internet Download MPCorb**). Esta opción es sólo una ayuda, nada más, porque debemos tener claro que no siempre nos aparecerá el cometa en el centro del cuadradito, o en el peor de los casos, lo que el cuadradito marcará no será un cometa, sino una estrella o simplemente ruido. Una vez más, apreciar el movimiento del objeto en varias imágenes, es la única garantía de que estamos obrando correctamente.

Una vez clicado el cometa o asteroide, nos aparecerá una imagen detallada del mismo para cerciorarnos de que el programa ha seleccionado bien el centroide, Fig. 8. Después clicamos en el botón indicado por 1º, y nos aparecerá una lista de posibles objetos en esta zona. Clicando en 2º seleccionamos el objeto deseado. Clicamos entonces en Ok, flecha 3º, y después aceptamos en 4º. Finalmente, obtenemos el reporte con la observación, Fig. 9, que podremos enviar al MPC (para verlo, haremos clic en **File-View MPC Report File**).

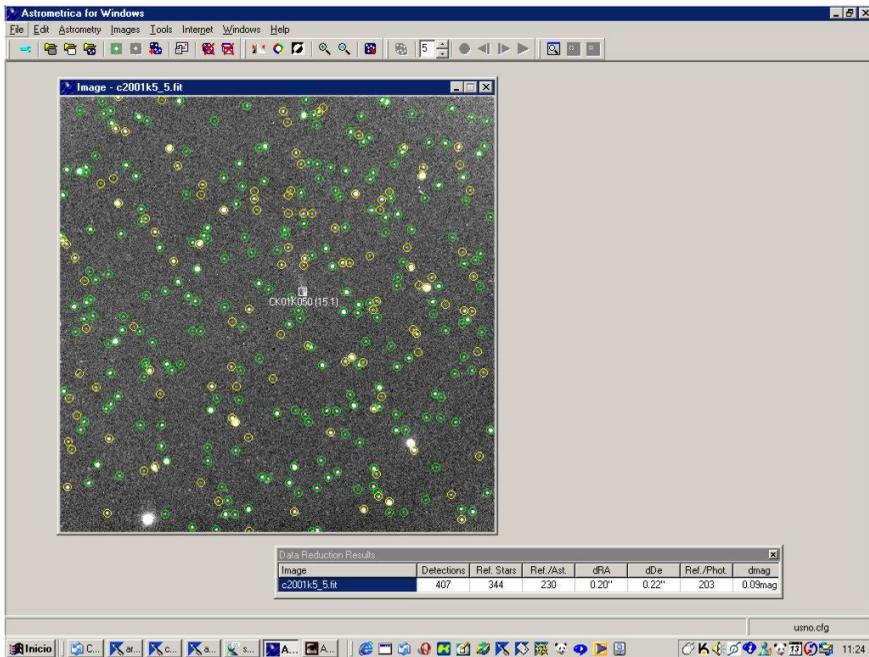


Figura 7. Posición para el cometa calculada por Astrometrica.

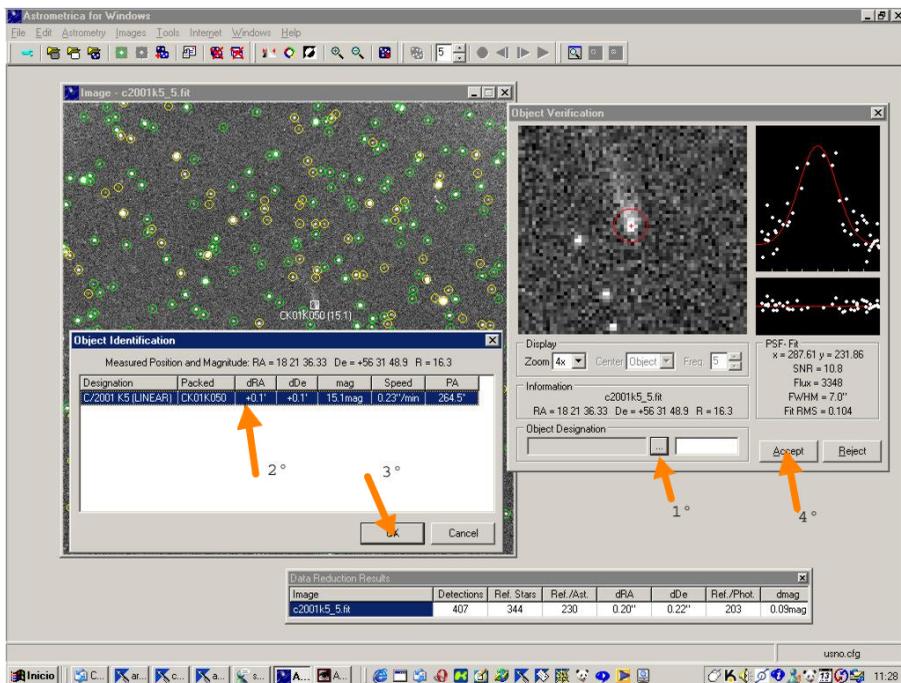


Figura 8. Imagen detallada del cometa, y zonas de la ventana (indicadas con números) en las que podemos clicar para obtener diferentes informaciones.

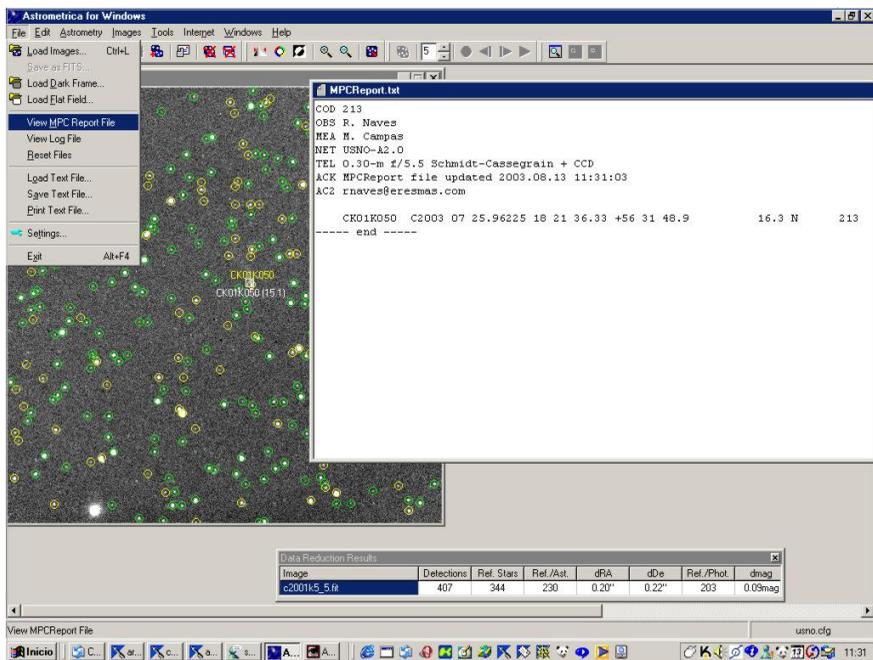


Figura 9. Reporte de la observación, listo para ser enviado al MPC.

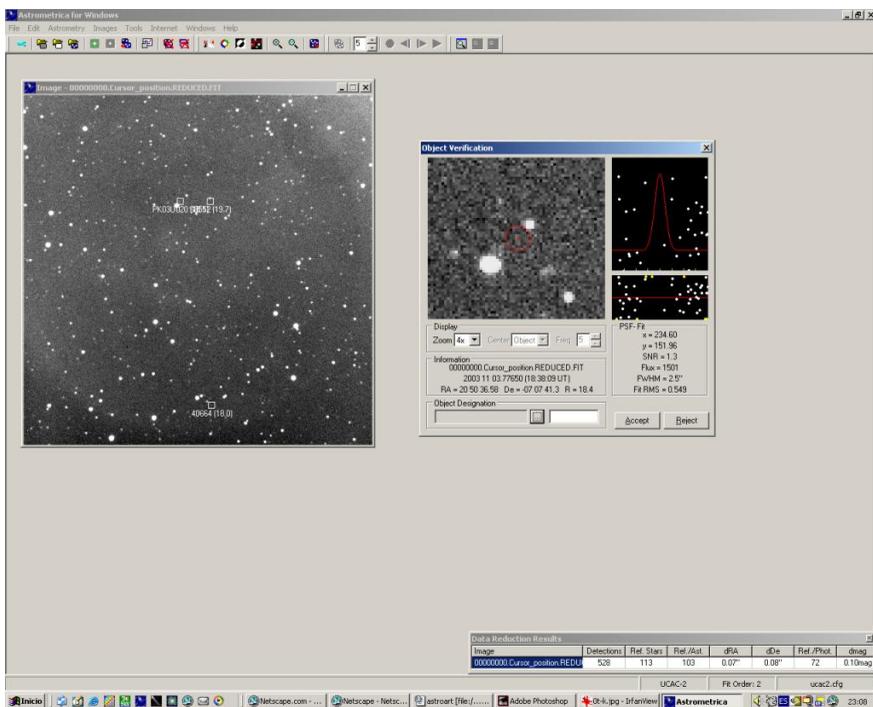


Figura 10. Imagen de 3 minutos de exposición de la región ocupada por el cometa C/2003 U2. Debido a su baja magnitud, el cometa no es visible.

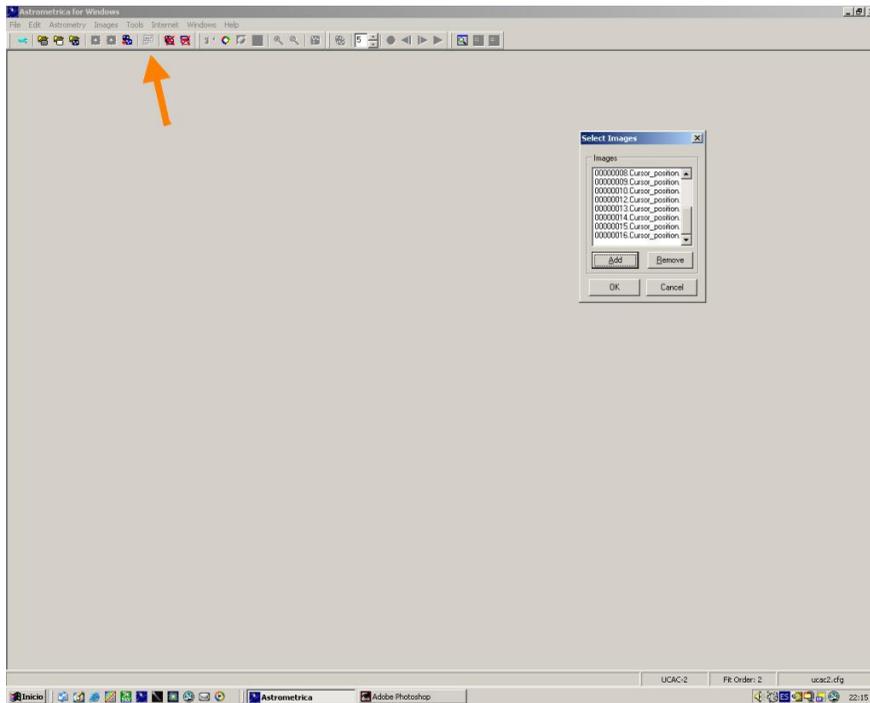


Figura 11. Procedimiento para seleccionar las imagen que queremos sumar.

4.2. Track-stack

Existe otro procedimiento, llamado *Track-stack*, que permite sumar varias imágenes, pero con la peculiaridad de que éstas se suman sobre la posición del cometa. Esto permite poder realizar astrometría de objetos que por su debilidad no aparecen en una sola toma de exposición prolongada, pero sí aparecen en una suma de varias exposiciones. Este procedimiento es también muy útil para poder capturar objetos que, debido a su rapidez de desplazamiento, no permiten un tiempo de exposición prolongado. Esta opción nos permitirá capturar objetos que por su extrema debilidad no aparecen en una única toma.

En la imagen mostrada en la Fig. 10, de 3 minutos de exposición, deberíamos poder ver el cometa C/2003 U2, aunque debido a su debilidad, no somos capaces de distinguirlo del fondo de cielo en una única toma. Tampoco podemos realizar una toma de mayor duración, porque el cometa, en este caso, nos aparecería movido a causa de su movimiento propio respecto al de las estrellas, y no podríamos realizar una astrometría fiable ya que aparecería como un trazo. Para solucionar este problema, es posible sumar varias imágenes de breve exposición con el método Track Stack, con la salvedad de que el programa tendrá en cuenta el movimiento propio del cometa y desplazara las imágenes de forma que se sumen sobre la posición del mismo.

Para cargar las diversas imágenes, pulsaremos sobre el icono azul stack images, Fig. 11. En el menú correspondiente seleccionaremos todas las imágenes que deseamos sumar. Ahora colocaremos el nombre del cometa, para que el programa pueda desplazar las imágenes de forma oportuna (debemos tener los parámetros orbitales actualizados), Fig. 12. Si es un objeto nuevo, pero conocemos su movimiento (Speed) y ángulo (P.A.) podremos poner estos valores manualmente (muy útil para poder confirmar Neos del NEOCP). Después de cargarse las imágenes nos aparece una imagen resultante, Fig. 13. Ahora pulsaremos sobre el cometa y procederemos como si de una imagen normal se tratara, Fig. 14. En la línea de formato MPC resultante, el tiempo medio de exposición es justo el tiempo medio total

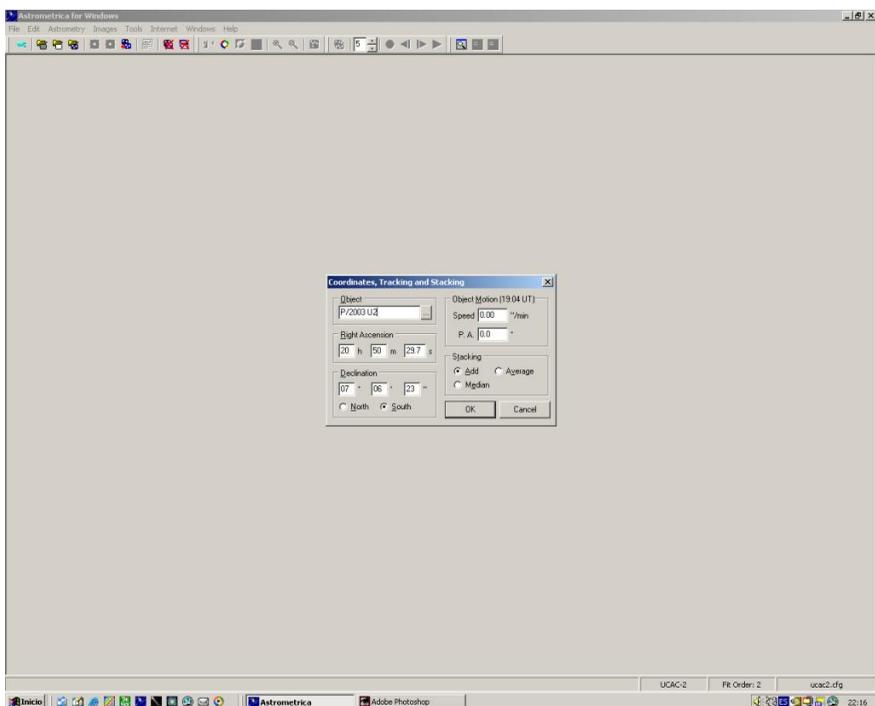


Figura 12. Carga del nombre del objeto, o de sus coordenadas celestes.



Figura 13. Imagen resultante del proceso de suma de imágenes individuales.



Figura 14. Imagen sumada y ventanas con detalle del objeto, con una configuración similar a la de una imagen individual.

desde que se realizó la primera exposición, hasta que concluyó la última, siendo este procedimiento totalmente correcto.

4.3. Configuración de ASTROMETRICA

La configuración del programa (Program Settings) se realiza rellenando una serie de seis menús, Fig. 15.

En el menú Observing site colocamos nuestros datos personales y situación del observatorio:

- **MPC Code:** Código MPC de nuestro observatorio (en el caso de no disponer de código debemos poner XXX para pedir un código de observatorio al MPC)
- **Longitude:** Longitud del observatorio
- **Latitude:** Latitud del observatorio
Tanto la latitud como la longitud deben ponerse en decimales de grado; no deben usarse grados minutos y segundos
- **Height:** Altura sobre el nivel del mar en metros
- **Contact:** nombre y dirección
- **E-mail:** correo electrónico
- **Observer:** nombre del observador
- **Measurer:** nombre de la persona que realiza las mediciones
- **Telescope:** se pone el diámetro en metros del telescopio, ni marca, ni modelos, solo el tipo y la relación focal

En el siguiente menú, CCD, se especifican los datos técnicos del telescopio y de la cámara:

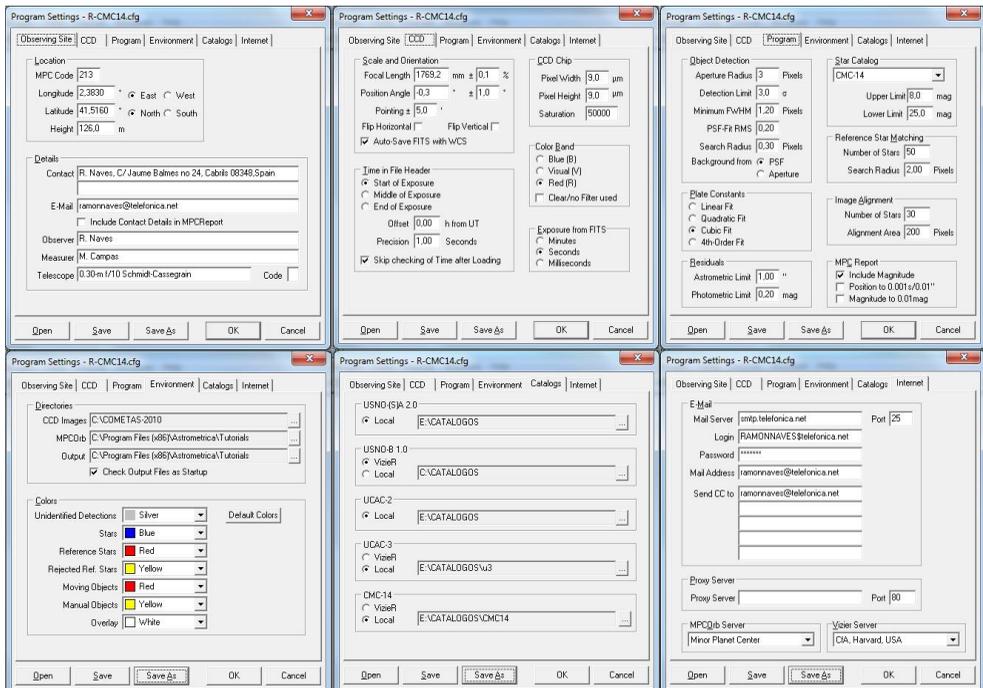


Figura 15. Menús de configuración de Astrometrica.

- **Focal Length:** longitud focal *real*. En la ventana \pm recomiendo poner 0.1%, pues así los cálculos son más rápidos (debemos conocer nuestra focal con total precisión, Astrometrica permite calcularla)
- **Position Angle:** Es el ángulo de posición de la cámara, en \pm suelo poner 1%. Casi nunca saco la cámara de mi telescopio, y si es imprescindible hacerlo se debe colocar siempre lo mas igual posible o tendréis que cambiar este valor constantemente después de cada montaje
- **Pointing \pm :** 5.0 (por defecto)
- **Flip Horizontal y**
- **Flip vertical:** nos permiten visualizar las imágenes giradas tanto vertical como horizontalmente (ojo pues afecta al reconocimiento del campo)
- **Auto Save Fits with WCS:** suelo tener este cuadradito marcado; de esta manera se guardan en la cabecera fits el centro de coordenadas que ha sido calculado por Astrometrica después del reconocimiento del campo
- **CCD Chip Pixel Width y Pixel Height:** aquí ponemos la anchura y altura de los píxeles de nuestra cámara
- **Saturation:** aquí ponemos el nivel donde nuestra cámara pierde la linealidad y satura (más adelante podremos ver cómo hacer una prueba de linealidad de nuestra cámara)
- **Color Band:** sirve para elegir el color de la banda fotométrica.

En el cuadro **Time in file header**, tenemos las siguientes ventanas:

- **Start of exposure:** esta es la opción más normal (aquí hay que comprobar que nuestra cámara dé el tiempo del inicio de las tomas)
- **Offset:** yo lo tengo en 00 pues uso el tiempo UTC en mi ordenador. La mayoría de programas para manejar la cámara ya lo descuentan, así que normalmente no hace falta descontar nada aquí.
- **Precision:** 1.00 segundos es lo normal

- **Skip checking of time after loading:** si esta marcado os evitará tener que verificar las ventanas donde se muestra el tiempo de las tomas
- **Exposure from fits:** lo normal es tenerlo en Seconds

En el menú Program se introducen diversos datos técnicos del programa, así como los catálogos a utilizar.

- **Aperture radius:** su valor depende, pero entre 2-5 dependiendo del *seeing*. Recomiendo probar con 4
- **Detection limit:** 4 es lo más recomendable
- **Minimum FWHM:** 1.2; de esta manera no se confunde con tantos artefactos
- **PSF-Fit RMS:** 0.2 (por defecto)
- **Search Radius:** 0.75 (por defecto)

En el cuadro Star Catalog escogemos GAIA DR2 (para fotometría con focas). La **Upper Limit** es la magnitud límite superior (yo pongo 8), mientras que **Lower limit** es la magnitud límite inferior (yo uso 18, pues el catálogo llega hasta ese límite).

En el cuadro Plate Constants recomiendo usar **Quadratic Fit**, o si no **Cubic Fit** (esto hace referencia a las funciones usadas en el ajuste matemático del campo (en telescopios con más distorsiones ópticas **Cubic Fit** puede funcionar mejor, pese a ser más lento). En **Residuals** ponemos 1.00 en **Astrometric Limit** y 1.00 en **Photometric Limit**. Los valores del resto de ventanas conviene dejarlos como viene por defecto en *Astrometrica*.

El menú **Environment** nos permite establecer las direcciones donde guardamos los datos, los catálogos orbitales, etc. Tenemos las siguientes ventanas:

- **CCD images:** poner la ruta donde tengamos guardadas las imágenes
- **MPCOB:** normalmente dejarlo por defecto tal como está
- **Output:** conviene poner el directorio de *Astrometrica*, `c:\archivos de programa\astrometrica`. el resto como viene por defecto.

En el resto conviene dejar los valores por defectos.

En el menú **Catalogs** estableceremos la ruta para los catálogos estelares. Indicaremos si están en nuestro disco duro o si hay que cargarlas de manera **online**. Finalmente, el menú **Internet** nos permite introducir los datos de nuestra configuración de correo electrónico, y la dirección desde donde se bajan los catálogos **online**.