



PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS INTERNOS DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL DE SAN PEDRO MÁRTIR



Caracterización de la cámara CCD Marconi 5 del OAN-SPM.

PTI-OAN:0035

Ilse Plauchu Frayn

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Astronomía, Observatorio Astronómico Nacional, Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, Ens., B.C., C.P. 22860, Méx.

Resumen

Se presenta el reporte de la caracterización de la cámara CCD Marconi 5, la cual se llevó a cabo en el Telescopio de 1.5m del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir (OAN-SPM). La obtención de las imágenes para la caracterización se llevó a cabo la noche del 20 de julio de 2024, con la rueda de filtros RUCA-2. Los días previos a la obtención de estas imágenes, la cámara CCD pasó por un proceso de limpieza de su detector y reemplazo de la ventana del mismo.

La cámara CCD-M5 presenta un ligero gradiente en sus imágenes de bias, pero a diferencia de otros CCD Marconi (M2 y M3), éste presenta cuentas estables en una secuencia de *bias*. Por otro lado, se encuentra que la cámara CCD-M5 mantiene los valores de la ganancia, ruido de lectura intrínseco, nivel cero, carga espuria y tiempos de lectura similares a los reportados en las caracterizaciones realizadas en el 2022 y 2023.

Keywords: Telescopio 1.5 m, rueda de filtros RUCA-2, caracterización, CCD, Marconi 5.

Recibido: 02-08-2024

Aceptado: 29-08-2024

Publicado: 04-09-2024

1

1. CARACTERÍSTICAS ELECTRÓNICAS DEL CCD-M5

La cámara CCD Marconi 5 (de aquí en adelante CCD-M5) – *CCD42-40 NIMO Back Illuminated High Performance CCD Sensor* con número de inventario UNAM 02498674 - es una de las siete cámaras con dispositivo de carga acoplada (CCD, por sus siglas en inglés), actualmente disponibles para su uso en los instrumentos (ruedas de filtros, polarímetros y espectrógrafos) del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir (OAN-SPM).

El CCD-M5 cuenta con un sistema de enfriamiento por ciclo cerrado que lo mantiene a una temperatura nominal de operación de -110°C . Este CCD es un E2V-231-42 de 2048×2048 pixeles de $15\mu\text{m}$ que, de acuerdo con el fabricante [1], puede trabajar en tres modos de operación (*slow*, *medium* y *fast*), cada uno con distintas velocidades de lectura, ganancia y ruido de lectura. Actualmente, el CCD-M5 opera en el modo de velocidad *medium*.

En la Tabla 1 se presentan los valores de la eficiencia cuántica (QE, por sus siglas en inglés), indicada por el fabricante para el CCD-M5 [1].

Tabla 1. Eficiencia cuántica del CCD-M5.

LONGITUD DE ONDA	EFICIENCIA CUÁNTICA
350 nm	58.2%
400 nm	98.7%
500 nm	98.3%
650 nm	98.5%
900 nm	62.6%

Las caracterizaciones, que regularmente se realizan a las cámaras CCDs del OAN-SPM, son de importancia para procurar la calidad de la imagen, la planeación de las observaciones y reducción los datos y para determinar si el detector sigue funcionando adecuadamente con el paso del tiempo o después de alguna prueba o limpieza.

En este reporte presentamos los resultados de la caracterización del CCD-M5, los cuales fueron obtenidos una vez realizada la limpieza de su detector y soporte y siguiendo los procedimientos y recomendaciones presentados en [2], [3] y [4]. Referimos al lector más especializado a estos documentos para mayor información sobre el proceso de caracterización de una cámara CCD de uso astronómico.

1.1 Ruido de lectura.

El CCD-M5 tiene una carga espuria de $0.1 e^-$ y un ruido de lectura intrínseco¹ de $3.82 e^-$. En la Tabla 2 se presentan las mediciones de la ganancia y tiempos de lectura de la imagen correspondientes a los *binning*s 1×1 , 2×2 , 3×3 y 4×4 . En la Figura 1 se presenta el gráfico del ruido de lectura al cuadrado en función del número de píxeles físicos en los *binning*s 1×1 , 2×2 , 3×3 y 4×4 , para determinar la carga espuria y el ruido intrínseco. Los valores del ruido de lectura para los diferentes *binning*s son presentados en la Tabla 2. Dichos valores fueron medidos dentro de las secciones de la imagen indicadas en la Tabla 4.

Tabla 2. Características electrónicas del CCD-M5 (@ *medium velocity*).

BINNING	GANANCIA	CORRIENTE OSCURA	RUIDO DE LECTURA	BIAS	TIEMPO DE LECTURA
1×1	$2.41 e^-/\text{ADU}$	$3 e^-/\text{px} / \text{hr}$	$4.02 e^-$	919 ADU	25 s
2×2	$2.24 e^-/\text{ADU}$	$16 e^-/\text{px} / \text{hr}$	$3.83 e^-$	1180 ADU	12 s
3×3	$2.19 e^-/\text{ADU}$	$27 e^-/\text{px} / \text{hr}$	$3.89 e^-$	1250 ADU	9 s
4×4	$2.22 e^-/\text{ADU}$	$42 e^-/\text{px} / \text{hr}$	$3.90 e^-$	1270 ADU	6 s

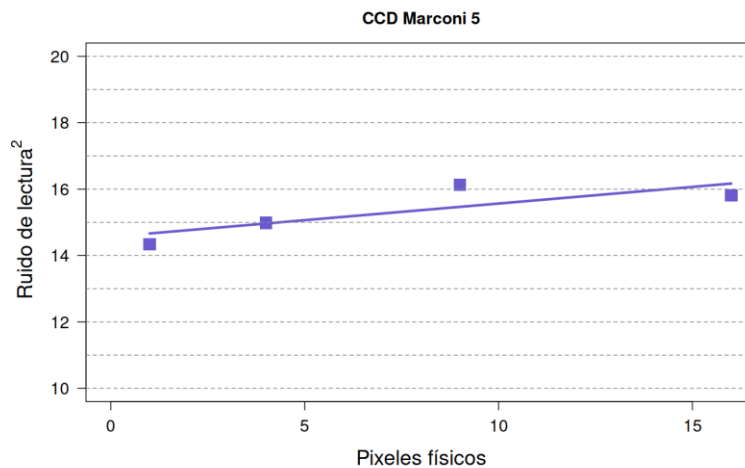


Figura 1. Ajuste para determinar la carga espuria generada durante la operación del CCD, basado en las ganancias y ruidos de lectura de la Tabla 2.

¹ El ruido de lectura es el ruido generado en el amplificador del circuito eléctrico del CCD durante la conversión de la carga a cuentas.

1.2 Linealidad.

Al hacer un ajuste lineal a las mediciones entre cero y un nivel de 65,073 ADU, se encuentra una no-linealidad menor al 0.21%, por lo tanto, el CCD-M5 puede considerarse como un CCD lineal. El límite de saturación de este CCD es de 65,535 ADU. En la Figura 2 se muestra el ajuste lineal realizado. El gráfico de linealidad se obtiene a partir de los valores medidos en dos series de imágenes de campos planos de domo², una donde el tiempo es constante y otra donde e va incrementando hasta obtener varias imágenes saturadas.

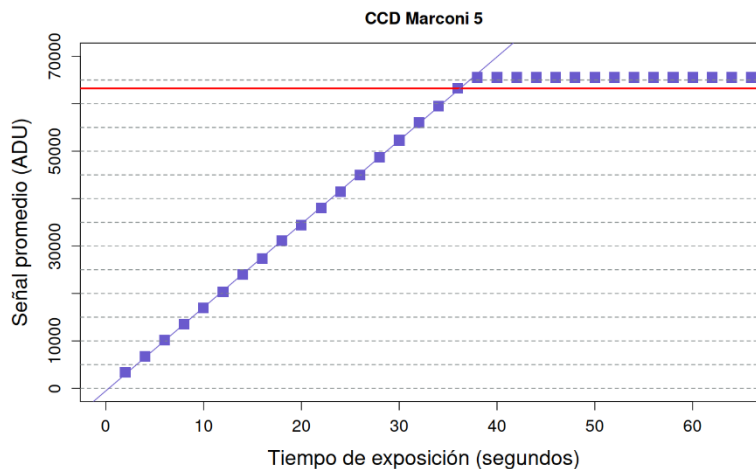


Figura 2. Gráfico de linealidad del CCD-M5. La línea roja indica el nivel hasta el cual se realizó el ajuste de los datos 65,073 ADU, por debajo del límite de saturación a 65,535 ADU.

1.3 Frecuencia de bits.

En la Figura 3 se presenta la frecuencia de bits³ para el CCD-M5. Para tal fin, se ha hecho uso de imágenes de campos planos con cuentas mayores a 40,000 ADU y hasta el nivel de saturación. Los valores encontrados están dentro del 0.35% del valor de 0.86 para los bits del 0 al 10.

² Para iluminar la lona del domo se hizo uso de una lámpara de tungsteno.

³ La frecuencia de bits es la velocidad a la cual los datos son transferidos y se mide en número de bits por segundo.

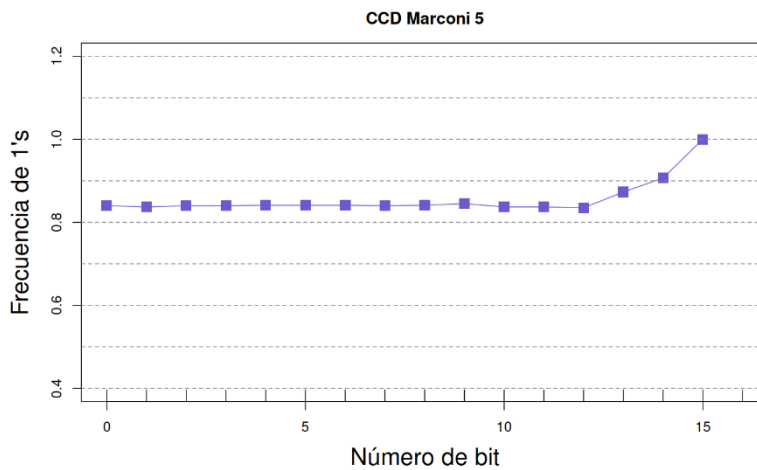


Figura 3. Gráfico de la frecuencia de bits del CCD-M5.

1.4 Corriente oscura.

Con el fin de determinar la corriente oscura en las imágenes del CCD-M5, se obtuvieron tres imágenes de corriente oscura (o *darks*) de 20 minutos de integración en el *binning* 1×1, las cuales fueron combinadas para aumentar la S/N de la corriente oscura y eliminar la mayoría de los rayos cósmicos. Así mismo, se hizo uso de una imagen del nivel cero, producto de la combinación de 60 imágenes de *bias*. Posteriormente, se generaron las imágenes en los *binnings* 2×2, 3×3 y 4×4, para medir en éstas la corriente oscura. Los valores de la corriente oscura para los diferentes *binnings* se presentan en las Tabla 2. Dichos valores fueron medidos dentro de secciones centrales de la imagen libres de rayos cósmicos (véase Tabla 4).

2. PATRÓN DEL OBTURADOR

En la Figura 4 se presenta el patrón del obturador usado con el CCD-M5. Dicho patrón fue determinado a partir de secuencias de campos planos largos (10 s) y cortos (0.1 s). El patrón obtenido es lo esperado para un obturador de 6 pétalos. En esa misma figura, se puede notar otro patrón de luz en vertical ubicado a la derecha de la parte central del patrón del obturador. Este patrón es producto de luz dispersa entrando por el primario, debido a la cercanía de la lámpara para campos planos. Por otro lado, se determinó el tiempo de retraso del obturador a partir de una secuencia de imágenes con tiempos de integración desde 0.1 s hasta 20 s, para realizar un ajuste a un polinomio de segundo grado con los valores de cuentas medidos en una caja central y determinar el tiempo que le toma al obturador abrir y cerrar. Se determinó

que el obturador utilizado con la cámara CCD-M5 tiene un tiempo de retraso de 18 milisegundos. Este tiempo de retraso (apertura y cierre) fue medido en agosto 2023, mediante un método independiente usando sensores tipo barrera y con el cual se obtuvo un tiempo de 42.4 ± 0.9 ms. Siendo conservadores y considerando este último valor de apertura y cierre del obturador, se recomienda al usuario utilizar tiempos mayores a 5 s si se quiere conseguir un error en la magnitud menor al 1% o mayores a 25 s para un error menor al 0.1%.

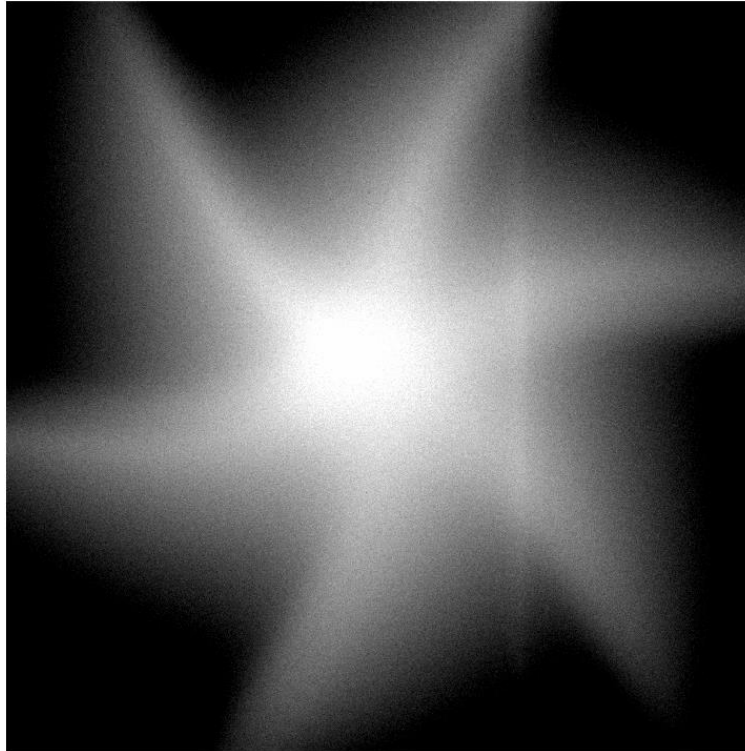


Figura 4. Imagen del patrón del obturador (6 pétalos) del CCD-M5.

3. IMAGEN CERO

En la Figura 5 se presenta la imagen cero promedio. Esta imagen fue obtenida de la secuencia de 60 imágenes de *bias*, en el *binning* 1×1 . La imagen cero promedio en *binning* 1×1 presenta un gradiente a lo largo de las filas del CCD de amplitud ~ 1 -2 cuentas. Dicho gradiente se presenta también en los *binning* 2×2 , 3×3 y 4×4 , aunque con diferentes amplitudes.

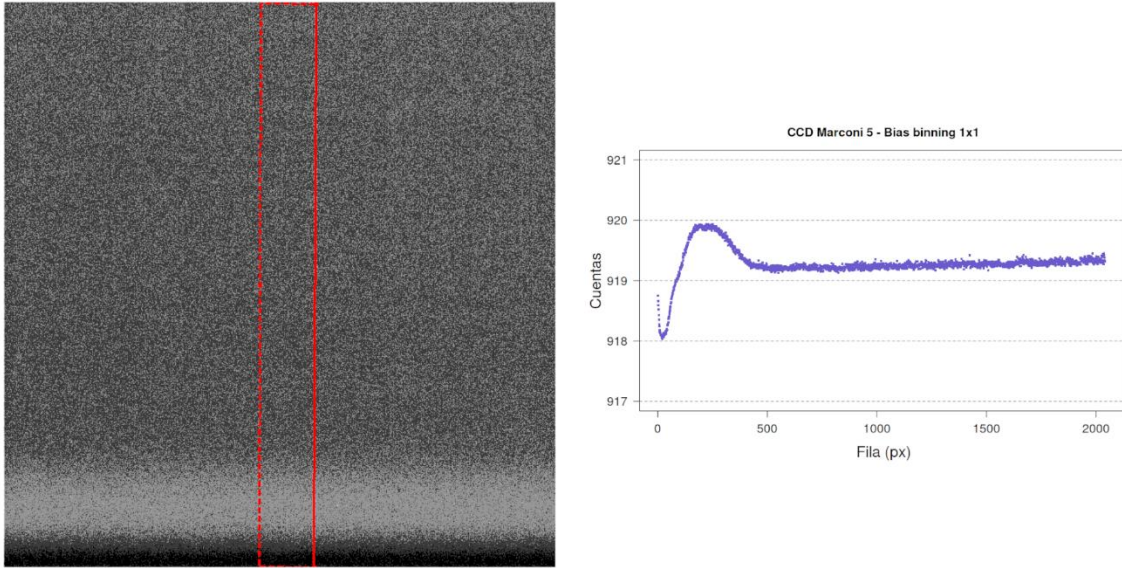


Figura 5. a) Imagen cero promedio en *binning* 1×1 del CCD-M5. Se puede observar que las imágenes de *bias* con este CCD presentan un ligero gradiente de amplitud ~ 1-2 cuentas a lo largo del eje vertical (filas) y **b)** gráfico de las cuentas promedio en la imagen cero en función de las filas del CCD (caja de 200x2048 pixeles).

En la Tabla 4 se presentan los valores promedio y la desviación estándar para 10 imágenes cero tomadas consecutivamente en el *binning* 1×1, medidos en una sección de 300×300px centrada en la imagen correspondiente.

Tabla 3. Estabilidad de las imágenes cero (*bias*) del CCD-M5.

IMAGEN	VALOR PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
1	919.0 ADU	1.66 ADU /px
2	919.1 ADU	9.02 ADU /px
3	919.1 ADU	1.66 ADU /px
4	919.3 ADU	9.55 ADU /px
5	919.2 ADU	1.66 ADU /px
6	919.2 ADU	1.66 ADU /px
7	919.1 ADU	1.67 ADU /px
8	919.1 ADU	1.66 ADU /px
9	918.9 ADU	1.66 ADU /px
10	919.1 ADU	1.66 ADU /px

En la Figura 6 se presentan los valores promedio de cuentas para una secuencia de 60 imágenes de *bias* en *binning* 1×1, con el fin de verificar cuán estables son las cuentas de los mismos. Dichos valores fueron medidos dentro de una caja de 300×300px centrada en cada imagen de la secuencia. De la Figura 6 es fácil notar que las cuentas en las imágenes de *bias* son bastante estables para imágenes de este tipo, contrario a lo que se observa en otras cámaras CCD como el M2 y M3, donde las primeras imágenes de una secuencia presentan cuentas ligeramente mayores al resto.

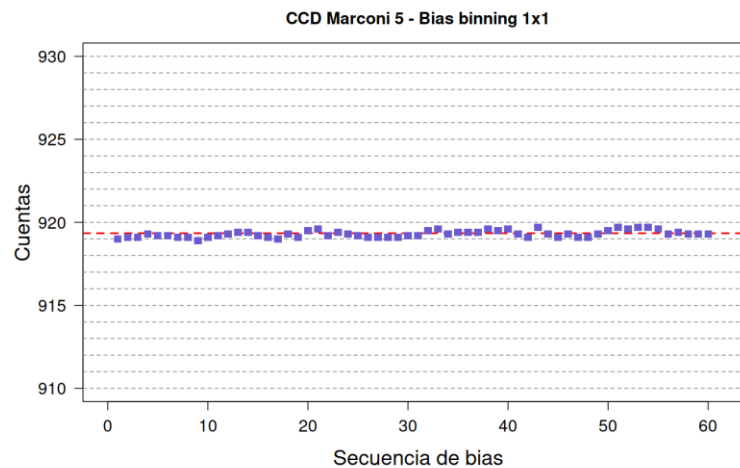


Figura 6. Valor promedio de las cuentas como función del número de imagen, para una secuencia de 60 imágenes de *bias*. La línea roja en el gráfico indica el valor promedio de 919.1 cuentas y desviación estándar 3.19 cuentas.

Tabla 4. Secciones para determinar la estadística en las imágenes del CCD-M5.

BINNING	BIAS	GANANCIA Y RUIDO DE LECTURA	CORRIENTE OSCURA
1×1	[850:1250,880:1280]	[949:1049,1021:1121]	[1190:1390,850:1050]
2×2	[430:630,440:640]	[500:550,514:564]	[587:687,439:539]
3×3	[280:413,290:423]	[325:358,345:378]	[390:460,290:360]
4×4	[215:315,220:320]	[232:257,261:286]	[300:350,220:270]

4. CAMPOS PLANOS

Con el fin de ilustrar su apariencia visual con el CCD-M5, en la Figura 7 se muestran las imágenes de campos planos de cielo en los filtros de Johnson-Cousins U, B, V, R e I de la rueda de filtros RUCA-2. En esta figura se puede apreciar lo

siguiente zonas oscuras tipo “dona”, las cuales son producidas por las partículas de polvo en la ventana del CCD. Al comparar la Figura 7 con la Figura 7 reportada en el reporte de caracterización de esta misma cámara en 2023 [5], se puede observar una notable mejoría en la imagen. Después de la limpieza del detector y reemplazo de su ventana, defectos como las estructuras circulares, el filamento y los residuos de pintura del soporte han sido efectivamente removidos.

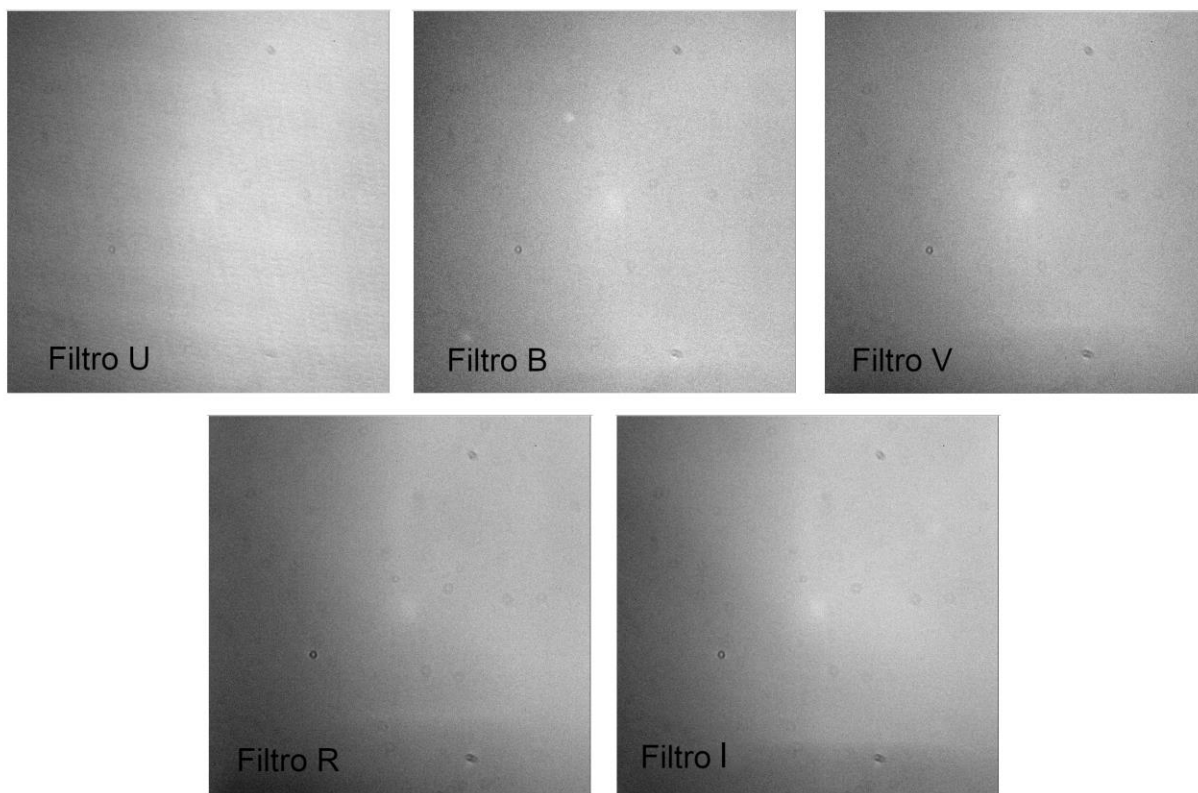


Figura 7. Imágenes de campos planos en los filtros de Johnson-Cousins UBVRI de la rueda de filtros RUCA-2. Las “donas” que se pueden apreciar en todas las imágenes son motas de polvo en la ventana del criostato.

5. PÍXELES OSCUROS

Con el fin de identificar píxeles oscuros, aquellos con una menor respuesta a la luz que los píxeles a su alrededor, se obtuvieron 15 imágenes de campos planos de domo en *binning* 1×1 y se combinaron para obtener una imagen promedio. Al

inspeccionar visualmente la imagen resultante, se encontraron pocos pixeles oscuros. En la Tabla 5 se indican las coordenadas de dichos pixeles, los cuales presentan una diferencia en cuentas con respecto a su entorno de entre 100 y 1200 cuentas, mientras que en la Figura 8 se muestran las zonas donde caen estos pixeles en la imagen. Por otro lado, no se detectaron líneas brillantes (líneas con mayor respuesta a la luz que su alrededor) con este CCD.

Tabla 5. Coordenadas de los pixeles oscuros del CCD-M5.

IMAGEN	COORDENADA (X,Y)
1	(75,1026)
2	(1010,1819)
3	(1011,2011)
4	(1752,1897)
5	(1949,1447)

6. FRANJAS DE INTERFERENCIA

Durante la obtención de las imágenes de esta caracterización no fue posible obtener imágenes del cielo en el filtro I y verificar si el CCD-M5 presenta un patrón de franjas de interferencia o *fringing*. Sin embargo, como ocurre con otros CCD Marconi, se sabe que el CCD-M5 presenta franjas de interferencia en el rojo (e.g. Figura 6 en [6]).

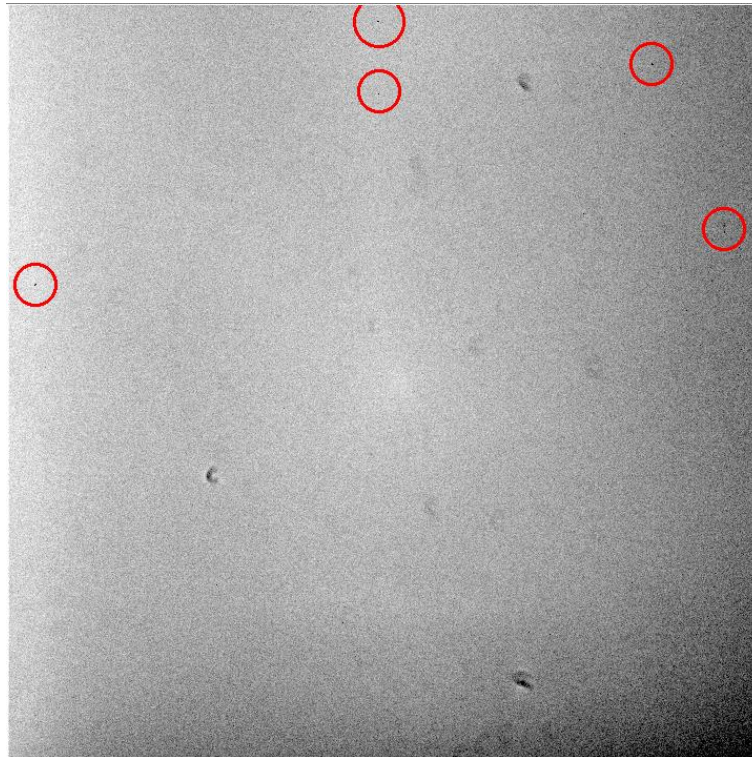


Figura 8. Imagen promedio de 15 campos planos de domo donde se detectaron 5 zonas del CCD-M5 con pixeles oscuros.

7. CONCLUSIONES

Se realizó la caracterización de la cámara con el CCD-M5 y se determinaron características tales como el nivel cero o *bias*, la ganancia, la corriente oscura, el ruido de lectura intrínseco, la carga espuria, el tiempo de lectura, para cada uno de los *binnings* en su modo de velocidad de operación “*médium*”. Se encuentra que, después de la limpieza realizada a su detector y el reemplazo de la ventana del mismo, el CCD-M5 presenta valores similares a los reportados en las caracterizaciones realizadas en el año 2022 [5] y 2023 [6]. Adicionalmente, se presentaron las imágenes cero (o *bias*), del patrón del obturador, de las zonas oscuras y los campos planos (o *flats*) en los diferentes filtros. A partir de los resultados de esta caracterización podemos concluir que el CCD-M5 sigue operando adecuadamente, incluso en esta ocasión las imágenes de campos planos presentan una mejor calidad. El presente documento puede ser utilizado, tanto para la planeación de las observaciones, como para la reducción y calibración de los datos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a J. Herrera por la minuciosa limpieza realizada al detector y reemplazo de la ventana del mismo y al equipo técnico por la instalación y preparación de la cámara CCD-M5 para su caracterización.

REFERENCIAS

- [1] Especificaciones de fábrica de la cámara CCD Marconi 5 ([ver aquí](#)).
- [2] Richer, M. & Watson A. (2009). *Pruebas para la caracterización de los CCDs* ([ver aquí](#)).
- [3] Richer, M. Ramírez, V. Pereyra, M. (2014). *Caracterización del CCD Spectral Instruments* ([ver aquí](#)).
- [4] T.M.C. Abbott (1995). *In situ* CCD testing.
- [5] Plauchu Frayn, I. (2022). *Caracterización del CCD Marconi 5* ([ver aquí](#)).
- [6] Plauchu Frayn, I & Díaz Santos, F. (2023). *Caracterización del CCD Marconi 5* ([ver aquí](#)).