



**PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS INTERNOS DEL
OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL
DE SAN PEDRO MÁRTIR**



**Caracterización de la cámara CCD Spectral Instruments 1
del OAN-SPM.**

PTI-OAN:0038

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 caracterización de la cámara CCD Spectral Instruments 1 del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir (OAN-SPM). La obtención de las imágenes para la caracterización se llevó a cabo durante la noche del 18 de noviembre de 2024, con la rueda de filtros MEXMAN instalada en el Telescopio de 84 cm.

La cámara CCD-Sp1 mantiene los valores de la ganancia, ruido de lectura intrínseco, nivel cero, carga espuria, corriente oscura y tiempos de lectura similares a los reportados en su última caracterización del 2016. Sin embargo, desde el verano del 2023 esta cámara presenta defectos del tamaño de algunos pixeles, los cuales son visibles en las imágenes de campos planos.

Keywords: Telescopio 84 cm, rueda de filtros MEXMAN, caracterización, CCD, Spectral Instruments 1.

1. CARACTERÍSTICAS ELECTRÓNICAS DEL CCD-SP1

La cámara CCD Spectral Instruments 1 (de aquí en adelante CCD-Sp1) modelo 1100 Series (No. Serie S/N 1100-188) es una de las seis 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-Sp1 cuenta con sistema de enfriamiento por ciclo cerrado que lo mantiene a una temperatura nominal de operación de -110°C . Este CCD es un E2V-4240 de 2048×2048 pixeles de $13.5\mu\text{m}$ que, de acuerdo al fabricante [1], puede trabajar en tres modos de operación (200, 400 y 752 kHz), cada uno con distintas velocidades de lectura, ganancia y ruido de lectura. Actualmente el CCD-Sp1 opera en el modo de velocidad de 200 kHz.

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-Sp1 [1].

Tabla 1. Eficiencia cuántica del CCD-Sp1.

LONGITUD DE ONDA	EFICIENCIA CUÁNTICA
350 nm	68%
400 nm	90%
500 nm	87%
650 nm	80%
900 nm	35%

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-Sp1, los cuales fueron obtenidos 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-Sp1 tiene una carga espuria de $0.10 e^-$ y un ruido de lectura intrínseco¹ de $3.39 e^-$. En la Tabla 2 se presentan las mediciones de la ganancia y tiempos de lectura de la imagen correspondientes a los *binnings* 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 pixeles físicos en los *binnings* 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 *binnings* 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-Sp1 (@ 200 kHz).

BINNING	GANANCIA	CORRIENTE OSCURA	RUIDO DE LECTURA	BIAS	TIEMPO DE LECTURA
1×1	1.40 e-/ADU	0.6 e-/px / hr	3.55 e-	493 ADU	28 s
2×2	1.33 e-/ADU	1.3 e-/px / hr	3.40 e-	534 ADU	11 s
3×3	1.33 e-/ADU	3.2 e-/ px / hr	3.47 e-	558 ADU	8 s
4×4	1.32 e-/ADU	9.6 e-/px / hr	3.54 e-	577 ADU	7 s

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.

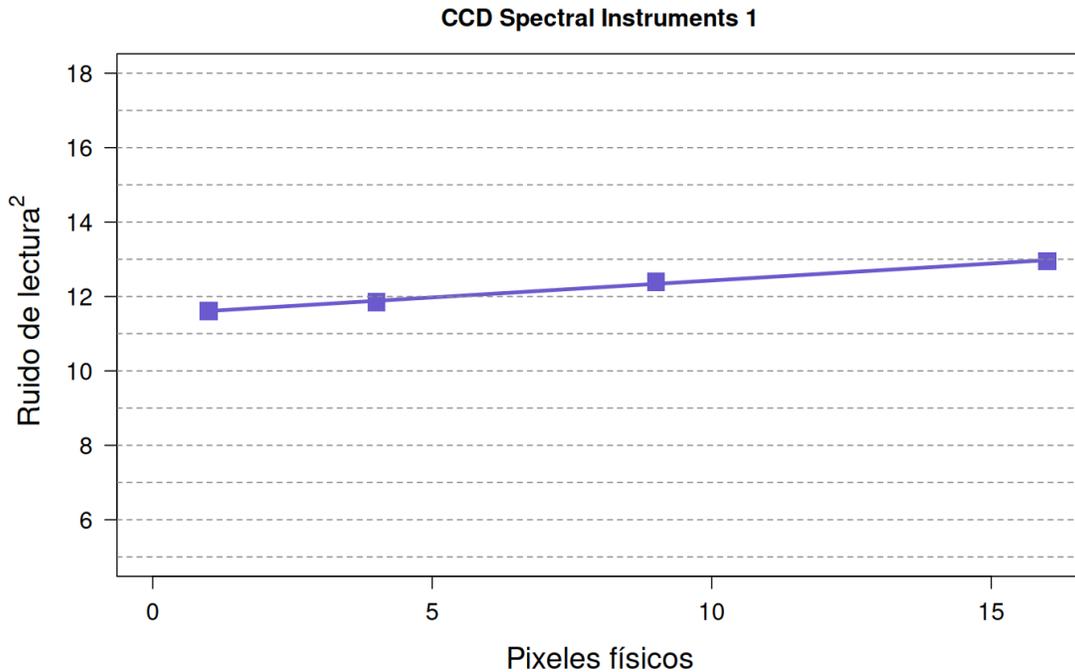


Figura 1. Ajuste para determinar la carga espuria generada durante la operación de la cámara CCD-Sp1, basado en las ganancias y ruidos de lectura de la Tabla 2.

1.2 Linealidad.

Al hacer un ajuste lineal a las mediciones entre cero y un nivel de 63,800, se encuentra una no-linealidad menor al 0.3%, por lo tanto, el CCD-Sp1 puede considerarse como un CCD lineal. El límite de saturación de este CCD es de 64,814 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 se va incrementando hasta obtener varias imágenes saturadas.

² Para iluminar la lona del domo se hizo uso de una lámpara de tungsteno.
PTI-OAN:0038

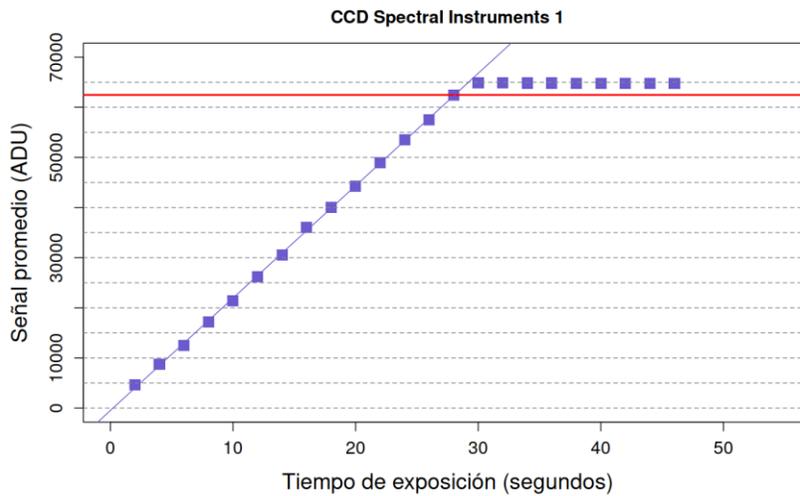


Figura 2. Gráfico de linealidad del CCD-Sp1. La línea roja indica el nivel hasta el cual se realizó el ajuste de los datos 63,800 ADU, por debajo del límite de saturación a 64,814 ADU.

1.3 Frecuencia de bits.

En la Figura 3 se presenta la frecuencia de bits³ para el CCD-Sp1. Para tal fin, se han 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 1.1% del valor de 0.5 para los bits del 0 al 3 y dentro del 20% del valor de 0.5 para los bits 0 al 10.

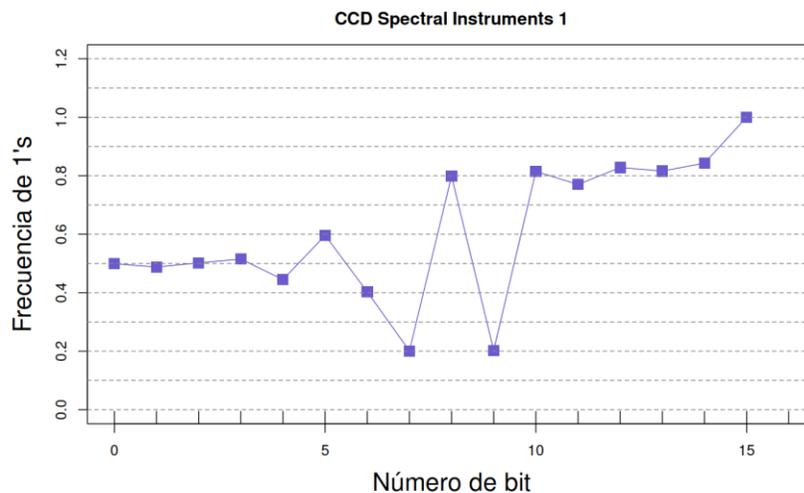


Figura 3. Gráfico de la frecuencia de bits del CCD-Sp1.

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

1.4 Corriente oscura.

Con el fin de determinar la corriente oscura en las imágenes del CCD-Sp1, se obtuvieron siete 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 creó 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 ellas 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. Dichas secciones se indican en la Tabla 4. En la Tabla A1 se presenta la comparación de la corriente oscura medida en este trabajo y aquella reportada en la última caracterización de esta cámara CCD, en el año 2016.

2. PATRÓN DEL OBTURADOR

En la Figura 4 se presenta el patrón del obturador usado con el CCD-Sp1. 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. Así mismo, se determinó el tiempo de retraso del obturador (apertura y cierre) 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-Sp1 tiene un tiempo de retraso de 128 milisegundos. Este tiempo de retraso es un tanto largo para un obturador en buen funcionamiento. Se tiene conocimiento que una semana después de obtener las imágenes para esta caracterización, este obturador finalmente empezó a cerrar más despacio y tuvo que ser lubricado con grafito, el 26 de noviembre del mismo año.

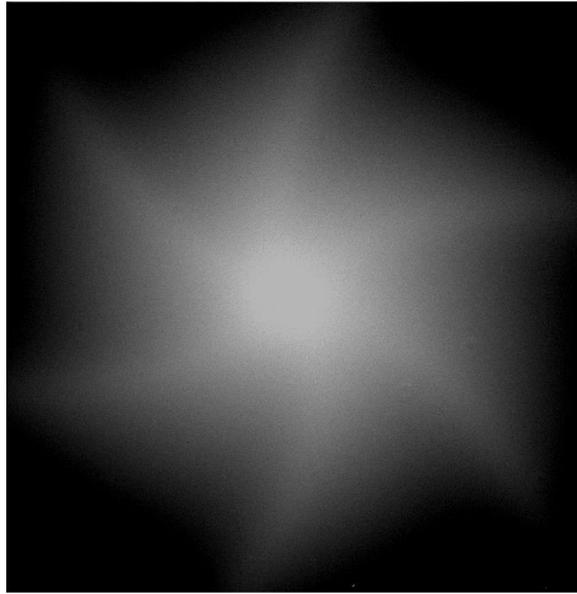


Figura 4. Imagen del patrón del obturador (6 pétalos) del CCD-Sp1.

3. IMAGEN CERO Y CAMPOS PLANOS

En la Figura 5 se presenta la imagen del nivel cero promedio. Esta imagen fue obtenida de una secuencia de 60 imágenes de *bias*, en el *binning* 1×1 . Las imágenes cero promedio para los *binning* 2×2 , 3×3 y 4×4 lucen normales y similares a la mostrada en la Figura 5. En esta figura puede notarse que la imagen cero del CCD-Sp1 no presenta gradientes.

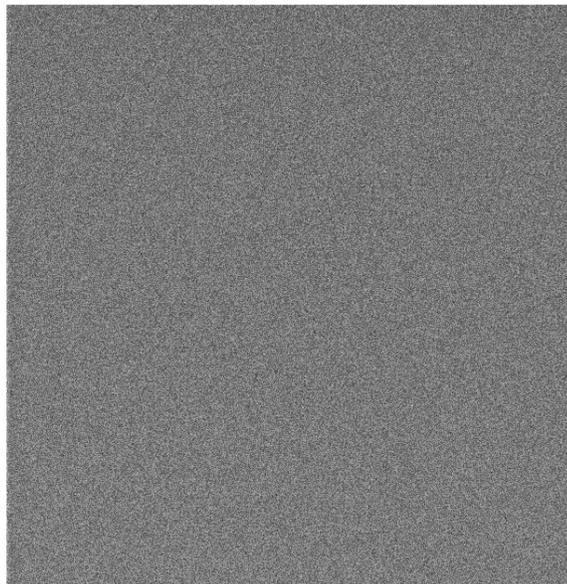


Figura 5. Imagen del nivel cero promedio en *binning* 1×1 del CCD-Sp1.

En la Tabla 3 se presentan los valores promedio y desviación estándar (una medida del ruido de lectura) para 10 imágenes de *bias* tomadas consecutivamente en el *binning* 1×1, medidos en una sección de 200×200px centrada en la imagen. A partir de los datos presentados en la Tabla 3 se puede observar que las imágenes de *bias* obtenidas con la cámara CCD-Sp1 presentan cuentas constantes en una secuencia.

Tabla 3. Estabilidad de las imágenes cero (*bias*) del CCD-Sp1.

IMAGEN	VALOR PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
1	493.4 ADU	2.521 ADU /px
2	493.4 ADU	3.483 ADU /px
3	493.4 ADU	2.520 ADU /px
4	493.4 ADU	2.522 ADU /px
5	493.4 ADU	2.519 ADU /px
6	493.5 ADU	2.526 ADU /px
7	493.5 ADU	2.521 ADU /px
8	493.5 ADU	2.529 ADU /px
9	493.5 ADU	2.523 ADU /px
10	493.5 ADU	2.529 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 200×200px 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.

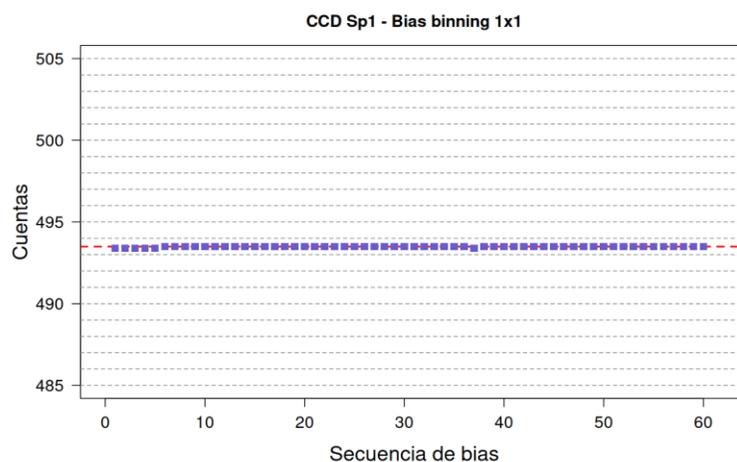


Figura 6. Valor promedio de las cuentas como función del número de imagen, para una secuencia de 60 imágenes de *bias*. La línea roja en el gráfico indica el valor promedio de 493.4 cuentas y desviación estándar 3.62 cuentas.

Tabla 4. Secciones para determinar la estadística en las imágenes del CCD-Sp1.

BINNING	BIAS	GANANCIA Y RUIDO DE LECTURA	CORRIENTE OSCURA
1×1	[850:1250,880:1280]	[850:1050,773:973]	[978:1178,996:1196]
2×2	[430:630,440:640]	420:520,380:480]	[521:571,509:559]
3×3	[280:413,290:423]	[280:350,250:320]	[348:381,339:372]
4×4	[215:315,220:320]	[220:270,190:240]	[261:286,254:279]

En la Figura 7 se presentan las imágenes de campos planos de cielo o *sky flats* en los filtros de Johnson-Cousins U, B, V, R e I de la rueda de filtros MEXMAN, con el fin de ilustrar su apariencia usando el CCD-Sp1. En esta figura se pueden observar zonas oscuras tipo “dona” en las imágenes de campo plano en todos los filtros. Estas zonas oscuras son producidas por las partículas de polvo en la ventana del criostato. En el campo plano obtenido con el filtro V, además se pueden observar donas de polvo más grandes, una en la parte superior izquierda y otra en la parte inferior. Estos defectos no representan un problema siempre y cuando se corrijan las imágenes de ciencia con las imágenes de campos planos en su respectivo filtro.

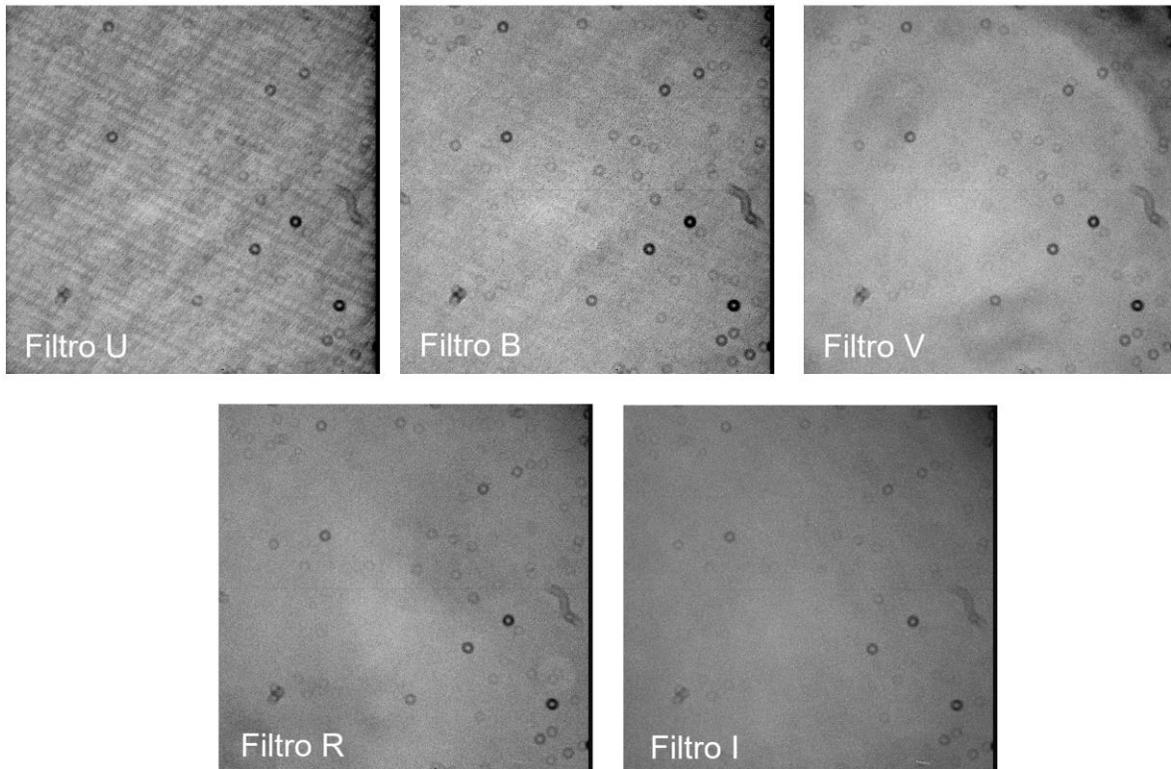


Figura 7. Imágenes de campos planos en los filtros de Johnson-Cousins UBVRI de la rueda de filtros MEXMAN. Las “donas” que se pueden apreciar en todas las imágenes son motas de polvo en la ventana del criostato.

Por otro lado, a partir del verano del 2023 esta cámara comenzó a presentar defectos del tamaño de pocos pixeles distribuidos a lo largo de toda la imagen. Estos defectos se observan únicamente en los campos planos. Estos pixeles, los mismos en posición independientemente del filtro, presentan una menor respuesta a la luz usando los filtros UBV y una mayor respuesta mayor a la luz al usar los filtros R e I.

En la Figura 8 se muestra una región central (zoom 2x) para el filtro B (izquierda) y el filtro I (derecha). La variación en cuentas de estos pixeles y su entorno oscila entre las 50 y 600 cuentas, siendo el efecto más pronunciado en los filtros UBV. Esta variación en cuentas se determinó dentro de una región rectangular horizontal de 400x10px lo largo de la imagen del CCD. Aún no se ha determinado cómo estos defectos pueden afectar el proceso de reducción y la calidad de los datos, ya que

durante la obtención de imágenes para esta caracterización no se observó una fuente celeste.

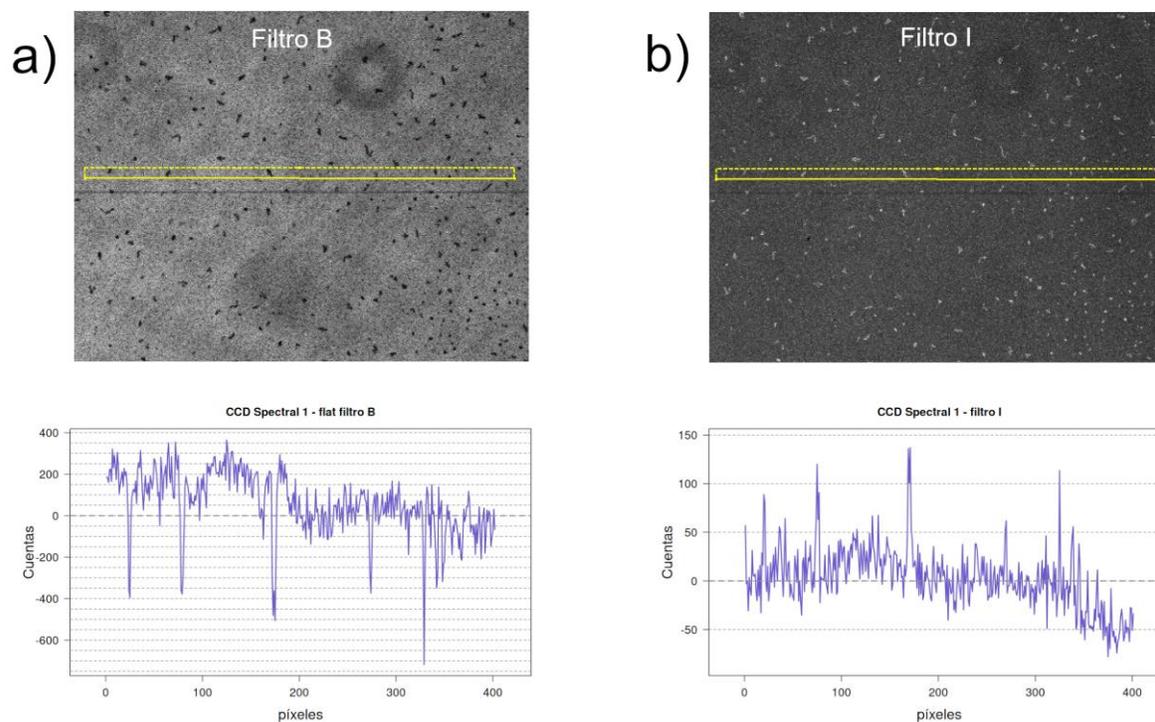


Figura 8. Región central de la imagen de campo plano (zoom 2x): a) en el filtro B y b) en el filtro I. Dentro de la sección amarilla de 400x10px se determinó la variación de las cuentas en estos defectos con respecto a su entorno.

4. PIXELES OSCUROS

Con el fin de identificar pixeles oscuros, aquellos con una menor respuesta a la luz que los pixeles a su alrededor, se obtuvieron 10 imágenes de campos planos de domo en *binning* 1x1 y se combinaron para obtener una imagen promedio. Al inspeccionar la imagen resultante, se encontraron varias zonas con pixeles oscuros. En la Tabla 5 se indican las coordenadas de dichos pixeles y la diferencia en cuentas con respecto a su entorno, mientras que en la Figura 9 se muestran las zonas donde caen estos pixeles en la imagen. Por otro lado, también se detectó una línea oscura (línea con menor respuesta a la luz que su alrededor), la cual se ubica en la fila Y= 1021.

Tabla 5. Coordenadas de los pixeles oscuros del CCD-Sp1.

IMAGEN	COORDENADA (X,Y)	Δ CUENTAS
1	(6,145)	~2,000 ADU
2	(668,297)	~400 ADU
3	(796,1495)	~150 ADU
4	(1200,23)	~3,500 ADU
5	(1272,1758)	~300 ADU
6	(1739,1121)	~400 ADU
7	(1866,12)	~2,000 ADU

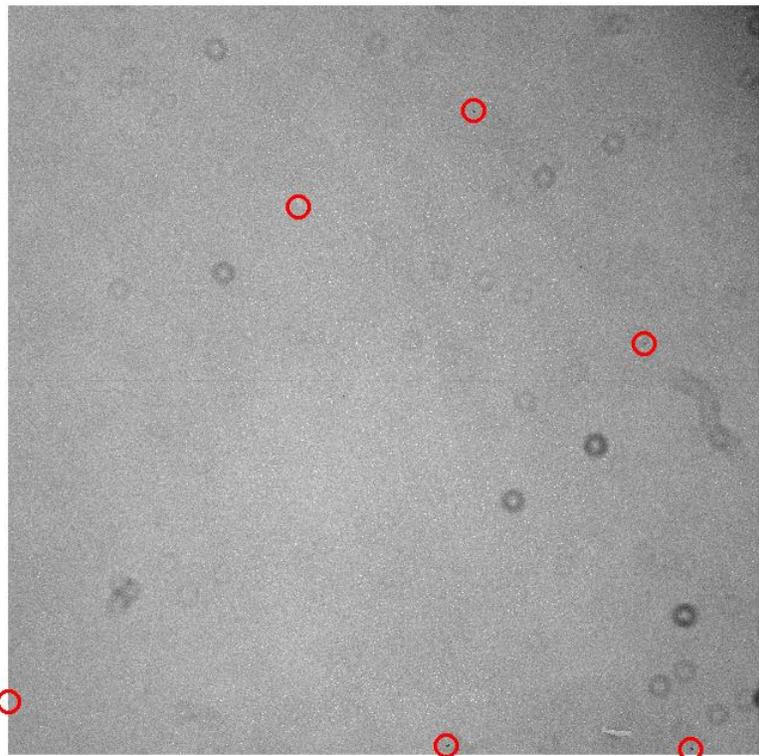


Figura 9. Imagen promedio de 10 campos planos de domo donde se detectaron 7 zonas con pixeles oscuros y una línea oscura horizontal en el del CCD-Sp1 (no visible en esta figura).

5. FRANJAS DE INTERFERENCIA

Se obtuvieron imágenes en cuatro imágenes en el filtro I (*binning* 1×1) de 10 minutos de exposición, para verificar si se presenta un patrón de franjas de interferencia o *fringing* con este CCD. Se encontró que este patrón se observa en el filtro I. La imagen del patrón de franjas de interferencia observado en este filtro y su amplitud se muestran en la Figura 10. La amplitud de este patrón se midió dentro de una región rectangular de ancho 100 píxeles (orientada vertical y horizontalmente) a lo largo de la imagen del CCD, donde se encontraron variaciones de hasta ~50 cuentas.

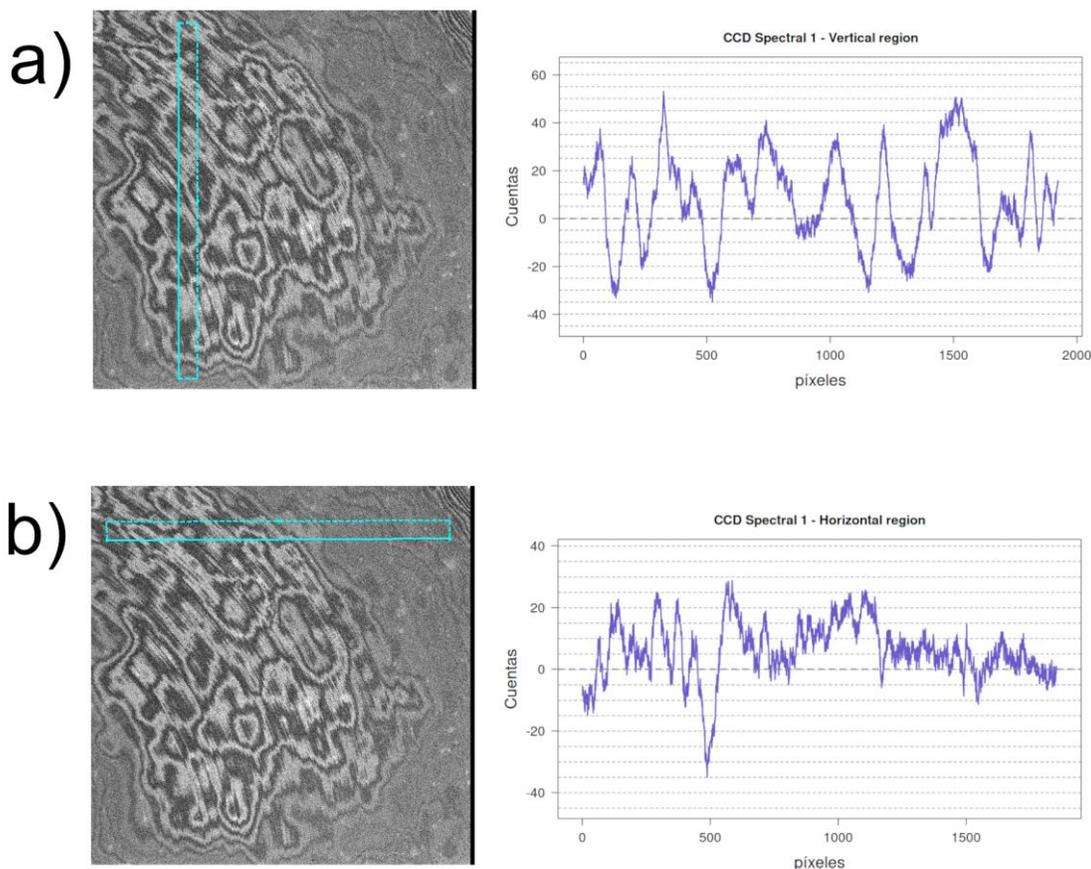


Figura 10. Imagen del patrón de franjas de interferencia y gráfico de su amplitud en el filtro I con el uso del CCD-Sp1. La medición de la amplitud de las franjas se hizo dentro de una sección rectangular a lo largo de la imagen: a) vertical y b) horizontal con ancho 100 píxeles.

6. CONCLUSIONES

Se realizó la caracterización de la cámara con el CCD-Sp1 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 *binning* en su modo de operación a 200kHz. Se encuentra que el CCD-Sp1 presenta valores similares a los reportados en su última caracterización realizada a esta cámara en el 2016 [3]. Por otro lado, se presentaron las imágenes cero (o *bias*), del patrón del obturador, de zonas oscuras, los campos planos (o *flats*) en los diferentes filtros y las franjas de interferencia encontradas en el filtro I. Así mismo, se presentaron imágenes de los defectos observados en las imágenes de campos planos, los cuales se desconoce aún el efecto que tienen dentro del proceso de reducción de las imágenes. Se recomienda al usuario tomar especial cuidado al aplicar este tipo de imágenes a los datos de ciencia. No obstante, y considerando los demás resultados de la caracterización presentados aquí podemos concluir que el CCD-Sp1 sigue operando normalmente. El presente documento puede ser utilizado, tanto para la planeación de las observaciones, como para la reducción y calibración de los datos.

REFERENCIAS

- [1] Especificaciones de fábrica de la cámara CCD Spectral Instruments ([ver aquí](#)).
- [2] Richer, M. & Watson A. (2009). *Pruebas para la caracterización de los CCDs* ([ver aquí](#)).
- [3] Ilse Plauchu-Frayn (2016). *Caracterización del CCD Spectral Instruments I* ([ver aquí](#)).
- [4] T.M.C. Abbott (1995). *In situ* CCD testing.

APÉNDICE A

En la Tabla A1, se presentan los valores de la corriente oscura medidos en 2016 y en este trabajo (2024), así como el cambio porcentual.

Tabla A1. Comparación de la corriente oscura.

BINNING	CORRIENTE OSCURA (2016)	CORRIENTE OSCURA (2024)	CAMBIO
1×1	0.7 e-/px / hr	0.6 e-/px / hr	-10%
2×2	1.7 e-/px / hr	1.3 e-/px / hr	-23%
3×3	5.0 e-/ px / hr	3.2 e-/ px / hr	-37%
4×4	5.6 e-/px / hr	9.6 e-/px / hr	+71%