

# Study of the Photon Transfer Curve in the CCD detectors of the Vera C. Rubin Observatory

Lina Marcela Giraldo-Murillo<sup>a\*</sup>

Advisors: Andrés A. Plazas Malagón<sup>b</sup> & Craig Lage<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Física, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

<sup>b</sup> SLAC National Accelerator Laboratory, 2575 Sand Hill Rd, Menlo Park, CA, 94025, USA

Kavli Institute for Particle Astrophysics & Cosmology, P.O. Box 2450, Stanford University, Stanford, California 94305, USA

Department of Astrophysical Sciences, Peyton Hall, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

<sup>c</sup>Department of Physics, University of California, Davis, USA

\* lina.giraldom@udea.edu.co

1 de octubre de 2022

## Resumen

Abstract

**Keywords**— PTC

## 1. Introduction

### 1.1. Observatorio Vera Rubin

El observatorio Vera C. Rubin operará el telescopio 10-year Legacy Survey of Space and Time (LSST) que usará la cámara más grande existente, la LSST Camera (LSSTCam).

#### 1.1.1. LSST Scientific goals

El LSST tiene 4 principales objetivos científicos (Ivezic y cols., 2019; LSST Science Collaboration y cols., 2009):

- Taking an Inventory of the Solar System: Los cuerpos menores del sistema solar como los TNOs, asteroides y cometas son clave para entender la formación y evolución planetaria, ya que en sus elementos orbitales y sus tamaños preservan esta historia. Por otro lado, la interacción de los objetos del Cinturón Principal de Asteroides, que se encuentra entre Marte y Júpiter, podría lanzar algunos de estos objetos hacia la órbita terrestre, por lo que su estudio ayudará a hacer una conexión entre los NEOs que provengan del Cinturón Principal.
- Mapping the Milky Way: Concierne al estudio de la formación y evolución de nuestra galaxia mediante la observación de la estructura, la dinámica y la composición química de sus estrellas. Además, en este objetivo de ciencia se caracterizarán las estrellas en el vecindario solar (300 pc)

- Exploring the Transient Optical Sky: Esta es la ciencia del dominio del tiempo (time domain science) la cual observa fenómenos transientes y variables como supernovas, estrellas variables, AGN. El objetivo es detectar objetos transientes y lejanos. Esto requiere varias propiedades: cubrir una gran parte del cielo que aumente la probabilidad de detectar estos eventos, imágenes de buena calidad que permitan observar las diferencias entre imágenes, buen tiempo de muestreo que permita detectar los diferentes tipos de estrellas variables, información precisa del color para clasificación, observaciones persistentes a largo plazo para darle seguimiento al evento, reducción, clasificación y publicación rápida a la comunidad que permita el estudio de estos objetos en otros campos, como en la espectroscopía.
- Probing Dark Energy and Dark Matter: La energía oscura afecta la expansión del universo como la aglomeración de masa, por lo que para estudiarlo las observaciones deben ser dependientes del redshift. Para este propósito se estudiara el weak gravitational lensing, las estructuras a gran escala como los cúmulos de galaxias y BAO (Baryonic Acoustic Oscillation), sistemas de Supernovas, entre otros. Por su parte, para el estudio de la materia oscura existen varios mecanismos para explorarla como weak and strong lensing de las distribuciones de la masa de las galaxias.

## 1.2. ¿Qué tipo de CCD tiene la LSSTCam?

La LSSTCam está compuesto por *thick fully depleted CCDs*. Este tipo de CCD se caracterizan por presentar una buena respuesta en las regiones del infrarrojo cercano (Lage, Bradshaw, y Tyson, 2017), lo que permite observar objetos lejanos que se encuentran enrojecidos por la expansión del universo. Sin embargo, al ser gruesas presentan algunos efectos debido al largo camino que deben recorrer los electrones generados hasta el pozo de almacenamiento de carga ([Ref CCDs Craig-Andrés](#)).

La LSSTCam es un mosaico de 205 CCD que están organizados por 21 módulos de ciencia, donde cada uno contiene 9 CCD, y 4 módulos especializados en las esquinas para el guiado del telescopio y el alineamiento mediante óptica activa (Snyder y cols., 2020). Este mosaico contiene CCD de dos fabricantes diferentes Imaging Technology Laboratories (ITL) y Teledyne e2v (E2V), y cada una de ellas está dividida en 16 segmentos. En la figura 1 se muestran en amarillo los detectores del fabricante E2V, en azul verdoso los de ITL, que son los CCD de ciencia, y en morado los CCD de guiado.

Dado que uno de los objetivos del LSST es medir el efecto del weak lensing en campos amplios, donde la finalidad es medir cómo este modifica la forma de las galaxias, es importante corregir los efectos que puedan afectar las mediciones. Uno de ellos es el brighter-fatter (BF) effect , cuya consecuencia es la deformación la PSF siendo más importante en objetos brillantes y disminuyendo de forma progresiva en objetos más débiles (Lage y cols., 2017).

De acuerdo con Walter (2015) para el objetivo de ciencia del LSST en weak lensing es realmente importante cuantificar el efecto BF dado que se requieren mediciones muy precisas de la PSF de las galaxias. Por otro lado, menciona que otro efecto que padecen los sensores es el efecto de borde, donde los electrones cerca del borde del sensor sienten una fuerza que los empuja hacia adentro de este, lo cual afecta principalmente la astrometría.

## 1.3. ¿Qué es la PTC?

La Curva de Transferencia de Fotones (PTC, por sus siglas en inglés) permite la caracterización de los parámetros fundamentales de la CCD, principalmente la determinación de la relación entre los electrones registrados por cada pixel y su conversión a cuentas análogo-digital (ADUs, por sus siglas en inglés), es

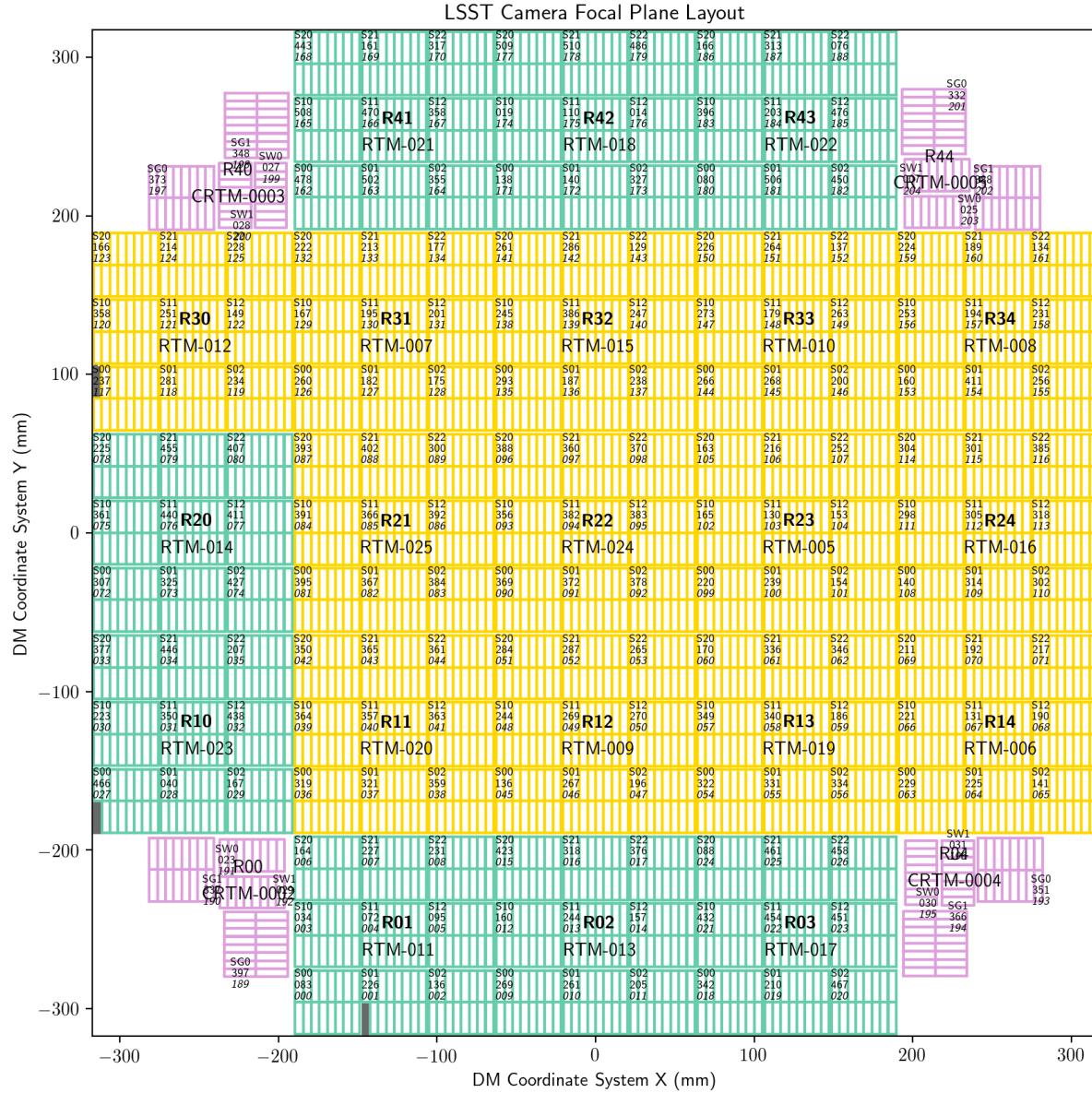


Figura 1: Plano focal de la cámara del LSST. En azul se muestra la ubicación de las CCD del fabricante ITL y en amarillo para E2V. Cada una de las CCD (un cuadrado pequeño) está compuesto por 16 segmentos, cada uno con su amplificador, y hay 189 CCD que son las encargadas de tomar los datos de ciencia. Las CCD en las esquinas son de enfoque y sincronización con la rotación de la Tierra (ver LSST-SLACLab)

declarar la ganancia; además medir la no linealidad de la cámara y su Full Well Capacity. El primero de los parámetros es importante porque de él dependen otros importantes como el ruido de lectura, la eficiencia

cuántica, el dark current, entre otros (Downing, Baade, Sinclair, Deiries, y Christen, 2006).

Se presenta en la figura 2<sup>1</sup> la PTC de un amplificador de uno de los sensores de la LSSTCam, en particular el detector 22, donde se evidencia que a flujos bajos la varianza es baja e incrementa con el flujo pero no linealmente, esto lo hace hasta el punto de saturación o Full Well Capacity, que para este detector es de  $\sim 83000$  ADU. Después de este punto la varianza comienza a decrecer, indicando que empieza a homogeneizarse el flujo almacenado en cada pixel de este amplificador. El comportamiento no lineal de esta curva es exhibido por *thick fully depleted CCDs*, de acuerdo con Downing y cols. (2006) el almacenamiento de carga en un pixel es la principal razón, dado que la relación esperada entre la varianza y la media de cuentas en un pixel se modifica en imágenes flat (Walter, 2015). El área efectiva del pixel se modifica con la cantidad de carga, reduciéndola entre mayor sea la carga acumulada en este. En consecuencia, fuentes muy brillantes son las que se ven principalmente afectadas por este efecto denominado brighter-fatter.

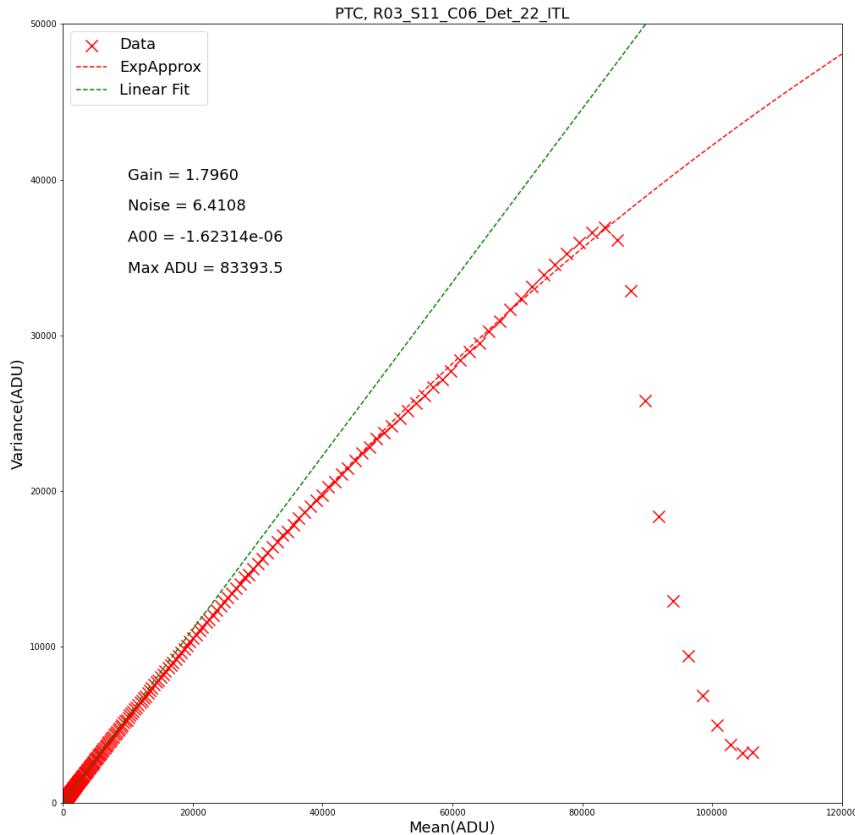


Figura 2: PTC para el detector 22 que se encuentra en el raft 03, sensor 11 y amplificador C06, su fabricante es ITL. En cruces rojas se muestran los datos, la línea roja utiliza el ajuste EXPAPPROXIMATION y la línea verde es un ajuste lineal. Esta curva se construyó con los resultados del software que se está desarrollando para el LSST.

<sup>1</sup>En GitHub se encuentran públicos los repositorios desarrollados para el LSST <https://github.com/lsst>, en especial, la construcción de la PTC usa el repositorio <https://github.com/lsst/cp-pipe>

### 1.3.1. Brighter father effect

Como se mencionó anteriormente, la carga almacenada en un pixel modifica el área efectiva del pixel, disminuyendo la probabilidad de que este pixel siga almacenando carga. En consecuencia, los electrones que debía almacenar este pixel se ven deflectados horizontalmente, causando imágenes más elípticas. Así, un proceso que inicialmente era descrito por una estadística de Poisson, y la carga almacenada en cada pixel era independiente del otro, se rompe modificando la relación entre la varianza y la media de cuentas por pixel (Walter, 2015).

## 1.4. Contenido de este artículo

Cuando esté hablando del contenido del documento (qué hay en cada sección) indicar que: este trabajo de investigación ha sido realizado durante la pasantía de RECA (Red de Estudiantes Colombiana de Astronomía) y hablar un poco de la misión de RECA [¿o esto va en acknowledgments?](#).

## 2. Data

Los datos utilizados en este trabajo fueron obtenidos mediante el banco de pruebas Bench for Optical Testing (BOT), que fue construido y diseñado en SLAC National Accelerator Laboratory, el cual permite realizar pruebas de laboratorio con la LSSTCam con variaciones menores a 5 % en imágenes flat de modo que puedan efectuarse medidas de la linealidad, full well y la ganancia de las PTC (Newbry y cols., 2018). En la figura 3 se muestra la estructura del BOT, donde en la parte superior circular va el criostato y el plano focal queda apuntando hacia abajo del banco de pruebas.

Se hizo uso de los *run 13144* y *run 13186*, siendo este último el que contiene la información de la matriz de crosstalk. De acuerdo con Snyder y cols. (2020) las mediciones del crosstalk electrónico es llevado a cabo mediante un proyector llamado *proyector crosstalk*, el cual ilumina un solo sensor con un patrón de grandes puntos brillantes con un haz de luz colimado, que posee un radio de 80 pixeles. Sin embargo, para hacer las pruebas de laboratorio simulando tamaños de fuentes reales se utiliza el proyector óptico llamado *the spot grid projector*, que genera puntos en grids específicos y cuenta con filtros que simulan tanto líneas dejadas por satélites, como el nivel de señal del fondo del cielo.

## 3. Methodology

Las imágenes utilizadas contienen una reducción estándar por *overscan*, *bias*, *dark* y por *defects*, que consisten en mapas que indican regiones tanto con defectos brillantes como de oscuridad, por ejemplo, pixeles muertos. La anterior reducción corresponde al estado de partida para el estudio de la PTC. Posteriormente, se hacen otras correcciones como linealidad y *crosstalk* para analizar sus efectos en los parámetros principales de la cámara.

Las supercalibraciones para todo el plano focal fueron generadas por el profesor Craig Lage, las cuales se encuentran en una cadena en su colección personal *u/cslage/calib/13144/calib.20220103*. Mientras que, las imágenes mostradas en las figuras 4 y 5 son superbias y superdarks (panel izquierdo E2V y derecho ITL), respectivamente, que fueron generadas como parte del proceso de aprendizaje para la producción de las imágenes de calibración utilizando el software desarrollado para el LSST, que llamaremos el *stack*.

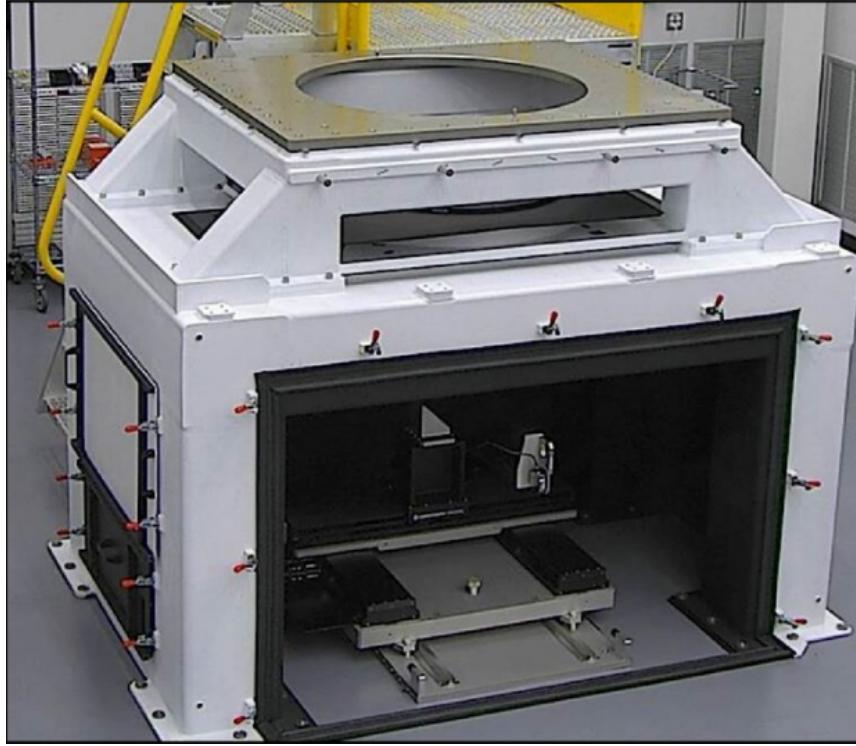


Figura 3: Banco de pruebas BOT diseñado por SLAC. Figure is taken from Newbry y cols. (2018).

El código con el que se generan las imágenes de calibración vía el *stack* se encuentra en [https://github.com/lsst/cp\\_pipe](https://github.com/lsst/cp_pipe), y genera los datos para la construcción de la PTC, calcula la ganancia para cada segmento de CCD como su FWC. Además, calcula la ganancia por otro método diferente, que fue analizado en este trabajo en la sección 3.2 para determinar las diferencias entre este y la PTC, que consiste en utilizar dos pares de flats para su estimación.

### 3.1. PTC

Se generó para todo el plano focal de la LSSTCam las PTC utilizando el software desarrollado por el LSST, que se encuentra disponible públicamente en GitHub<sup>2</sup>, específicamente las PTC son construidas con el repositorio cp\_pipe, el cual estima la ganancia, el ruido de lectura,  $a_00$  (parámetro relacionado con el B-F effect) y el turnoff (relacionado con el Full Well Capacity) a partir de un ajuste a la forma del a PTC. Este código implementa las ecuaciones 16 y 20 del artículo de Astier y cols. (2019), donde la 16 corresponde a la aproximación exponencial (EXPAPPROXIMATION), mientras que la 20 es el modelo más completo (FULLCOVARIANCE). En este trabajo se empleó EXPAPPROXIMATION, cuya ecuación es la siguiente

---

<sup>2</sup>Todos los repositorios asociados al LSST se encuentran en <https://github.com/lsst/>

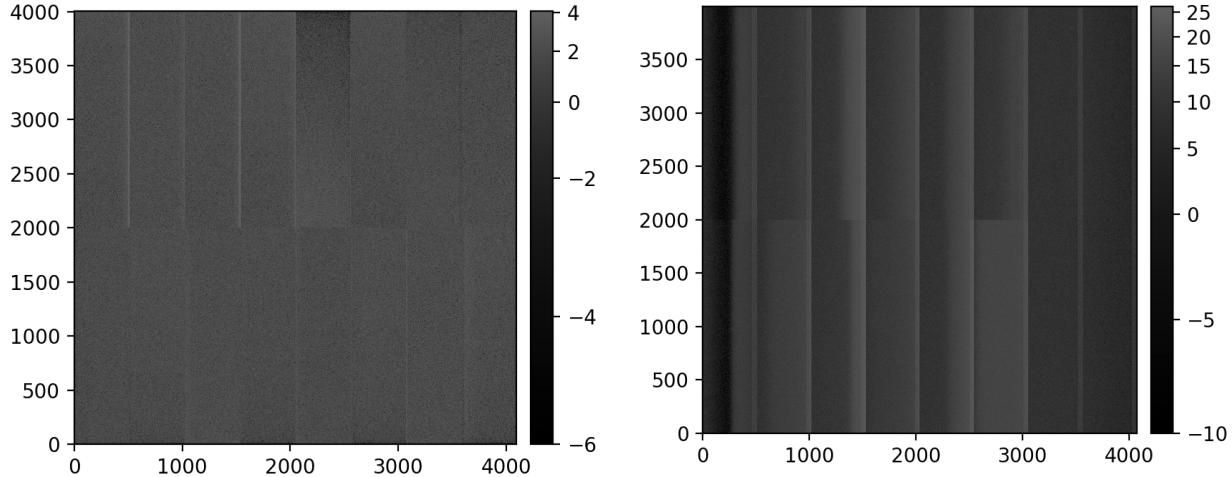


Figura 4: Masterbias para los detectores 55 (E2V), a la izquierda, y 74 (ITL), a la derecha.

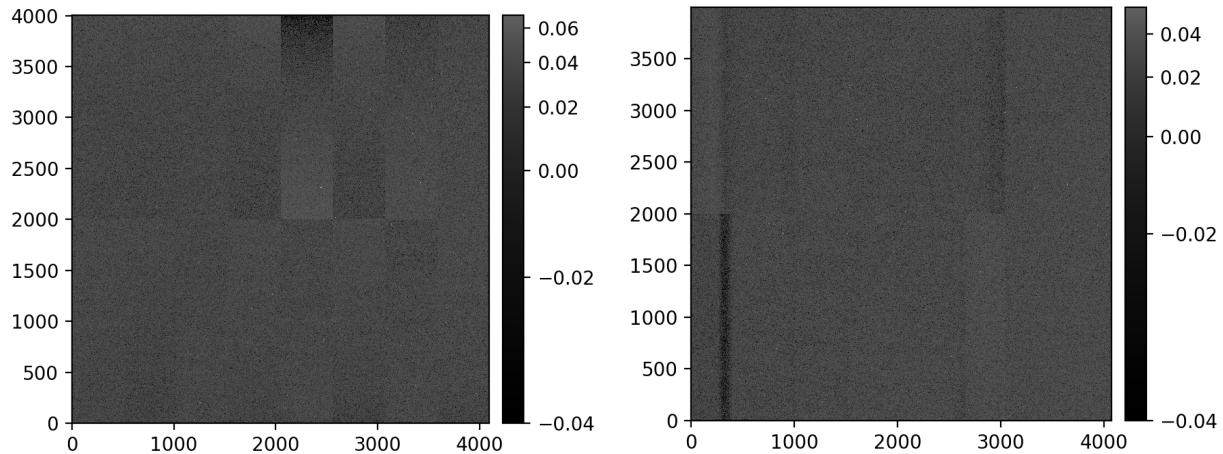


Figura 5: Masterdarks para los detectores 55 (E2V), a la izquierda, y 74 (ITL), a la derecha.

$$C_{00} = \frac{1}{2g^2 a_{00}} [\exp(2a_{00}\mu g) - 1] + \frac{n_{00}}{g^2} \quad (1)$$

donde  $C_{00}$  es la varianza,  $g$  es la ganancia,  $a_{00}$  es siempre negativo y está relacionado con el B-F effect,  $\mu$  es la media y  $n_{00}$  ( $el^2$ ) es el ruido. De acuerdo con Astier y cols. (2019), que  $a_{00}$  sea negativo conduce a que la varianza de un flat field no crezca tan rápido como lo hace la media. En el caso donde no existe B-F effect, es decir, cada pixel es independiente del otro y son descritos mediante una estadística de Poisson, la media, la ganancia y la varianza están relacionadas directamente mediante

$$V = \frac{\mu}{g} \quad (2)$$

donde  $V$  es la varianza de un flat field,  $\mu$  la media y  $g$  la ganancia.

### 3.2. Gain from flat pairs

Como método independiente para calcular la ganancia de un sensor está el uso de pares de flat field con iguales tiempos de exposición. Dado que cada CCD está compuesta por 16 segmentos, cada uno con su propio amplificador, se obtiene un valor de ganancia para cada segmento. Para este fin, el LSST tiene la función Gain from flat pairs, la cual fue analizada en detalle en este trabajo.

El objetivo es cuantificar la diferencia entre la ganancia calculada a partir del ajuste a la PTC y este método. Para esto, inicialmente se calcula con cada par de flat el flujo promedio en ADU, el ruido de lectura y la ganancia. Esta última es estimada mediante la ecuación de Lupton (2014)

$$\frac{1}{g} = \left\langle \frac{(I_1 - I_2)^2}{I_1 + I_2} \right\rangle \quad (3)$$

Donde  $g$  es la ganancia,  $I_1$  es la primera imagen flat e  $I_2$  es la segunda imagen flat, ambas al mismo tiempo de exposición, siendo entonces el inverso de la ganancia el valor esperado sobre todos los pixeles. Considerando las correcciones por ruido de lectura la ecuación toma la siguiente forma cuadrática:

$$\frac{1}{g} = \left\langle \frac{(I_1 - I_2)^2}{I_1 + I_2} \right\rangle - \frac{1}{\mu} (N^2 - \frac{1}{2}g^2) \quad (4)$$

donde  $\mu = 0.5(\mu_1 + \mu_2)$  con  $\mu_1$  y  $\mu_2$  el valor promedio para cada una de las imágenes flat y  $N$  es el ruido de lectura. Esta ecuación anterior tiene tres variantes: NONE, SIMPLE y FULL; siendo NONE igual a la ecuación 3. Los dos casos restantes son los siguientes:

$$g = \begin{cases} \frac{1}{K - \frac{1}{\mu}(N^2 - \frac{1}{2}g^2)} & \text{SIMPLE} \\ \frac{\mu + \sqrt{\mu^2 - 2\mu K + 2N^2}}{2K\mu - 2K^2} & \text{FULL} \end{cases} \quad (5)$$

donde  $K$  es igual a la ecuación 3. En el caso SIMPLE  $g = 1/K$ , mientras que en el caso FULL se resuelve la ecuación cuadrática y se toma el resultado con significado físico.

Una vez se tienen las ganancias calculadas (para su obtención se usó la ecuación 5 con corrección tipo FULL) a partir de pares de flats para flujos entre 0 y  $\sim 100000$  ADU, se calculó el error relativo porcentual con la ganancia obtenida con el ajuste a la PTC, así:

$$\text{Error\_relativo [\%]} = \frac{|gain_{PTC} - gain_{flats}|}{gain_{PTC}} \times 100 \% \quad (6)$$

Posteriormente, se realizó un ajuste lineal a bajo flujo, el cual consideramos entre 5000 y 10000 ADU. El ajuste a bajo flujo tiene la siguiente forma

$$\text{Error\_relativo}_{LF} [\%] = mF + offset \quad (7)$$

donde  $m$  es la pendiente del ajuste,  $F$  es el flujo y  $offset$  es el intercepto con el eje  $y$ . Estos parámetros nos sirven para cuantificar la variación del error en este rango de flujo y el error base entre la ganancia de la

PTC y la calculada con los flats. Efectuamos histogramas de estos parámetros para ver su comportamiento por fabricante y extraer un comportamiento general. Este comportamiento general es calculado dejando por fuera los outliers, es decir, los segmentos de CCD que tengan un comportamiento anómalo, para efectuar esto hicimos uso de Astropy Collaboration y cols. (2018) y sus funciones *sigma\_clip* y *sigma\_clipped\_stats* con las cuales hicimos un corte en los datos de modo que se mantuvieron aquellos que estuvieran dentro de  $3\sigma$  de la mediana e iteramos 3 veces.

### 3.2.1. Simulation

La metodología descrita en la sección 3.2 y el uso de la versión *w\_2022\_27* del software del LSST, que llamaremos código inicial, nos condujo a los resultados que se observan en las figuras 6 y 7. La figura 6 muestra (arriba para el sensor 55 de E2V y abajo para el sensor 74 de ITL) el error relativo porcentual entre las ganancias en todo el rango de flujos, por debajo del PTC turnoff, a la izquierda con un gráfico embebido que muestra el comportamiento entre 5000 y 10000 ADU con su respectivo ajuste lineal; a la derecha se presenta el error de cada uno de los segmentos del CCD para el mismo rango de flujos. Para estos dos sensores vemos de la gráfica embebida que el error relativo tiene un offset por encima del 5%. Se hizo un histograma con los valores del offset en todo el plano focal para ver si este comportamiento era generalizado y es lo que se observa en la figura 7, donde evidentemente se confirma que, en promedio, es un comportamiento que exhiben todos los sensores. Un error base de  $\sim 5\%$  consideramos que es bastante alto, por lo cual decidimos mediante simulaciones indagar en este problema.

Se tienen diferentes variables que podrían hacer que surja el problema descrito anteriormente: una sobre-estimación del ruido de lectura, que la máscara empleada en las imágenes esté afectando u otro factor, como es la suposición de que la distribución seguida por la operación entre las imágenes flat dada por

$$\frac{(I_1 - I_2)^2}{I_1 + I_2} \quad (8)$$

no sea normal, como se está suponiendo en el código inicial, y que, en consecuencia, se estén modificando los estadísticos de la distribución.

- **Caso1 - Sobre-estimación del ruido:** Se construyeron dos conjuntos de datos que sigan una distribución de Poisson para el flujo, con un valor esperado que se encuentre entre los 5000 y 10000 ADU. En nuestro caso elegimos 5000 ADU. La distribución es entonces

$$f(k; \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \implies f(k; 5000) = \frac{5000^k e^{-5000}}{k!} \quad (9)$$

donde el valor esperado es  $\lambda$  y  $k$  es el número de eventos. A los datos que siguen esta distribución se le agrega un ruido Gaussiano cuya media es cero y la dispersión está dada por el valor que supondremos del ruido de lectura, esto es:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \implies p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2N^2}\right) \quad (10)$$

donde la media es  $\mu$ ,  $\sigma$  la desviación estándar y  $N$  es el ruido de lectura, que suponemos. Finalmente, empleamos la metodología descrita en 3.2 para todos los tipos de corrección en la ganancia: NONE,

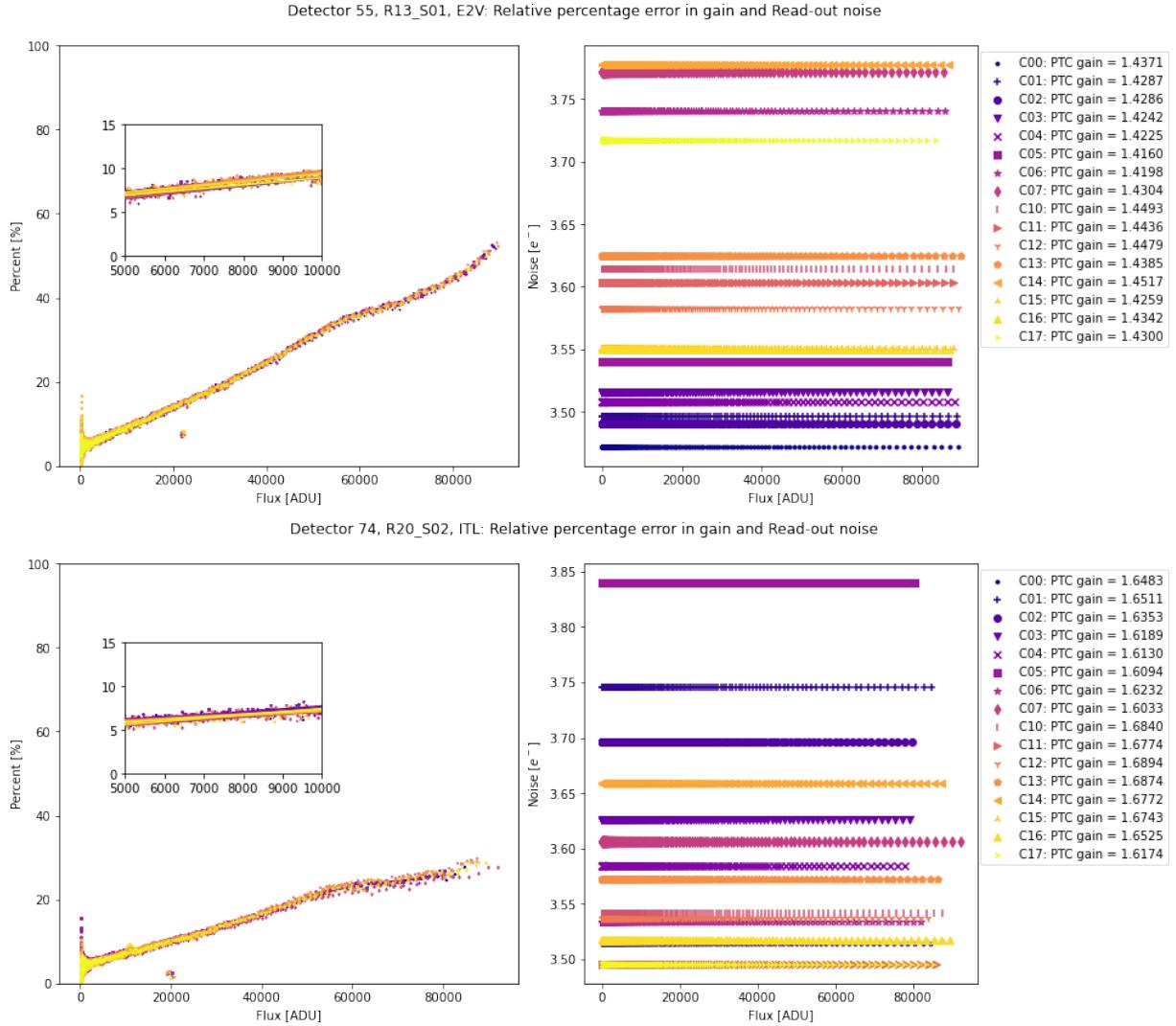


Figura 6: Error relativo porcentual entre la ganancia estimada por la PTC y la ganancia calculada a partir de dos imágenes flat (izquierdo), y el ruido de lectura de cada amplificador (derecha), utilizando el código inicial. En el panel superior se muestra para el detector 55 (R13\_S01) cuyo fabricante es E2V y en el inferior para el detector 74 (R20\_S02) del fabricante ITL. Cada color y símbolo representa el error relativo porcentual para uno de los 16 segmentos que componen cada CCD. La imagen embebida en los paneles izquierdos muestra el error porcentual entre 5000 y 10000 ADU (régimen de bajo flujo), en el cual se hace un ajuste lineal. Los datos empleados para construir estos diagramas consideran solo aquellos que se encuentran debajo del PTC turnoff.

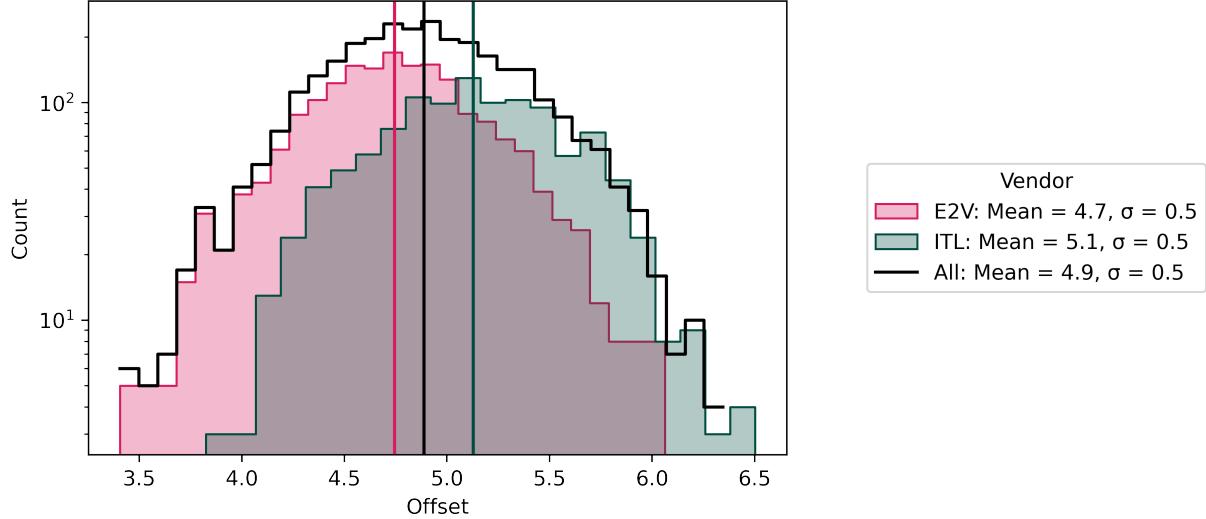


Figura 7: Histogramas con el valor del offset obtenido del ajuste lineal para flujos entre 5000 y 10000 ADU para el error relativo porcentual entre las ganancias. En magenta se muestra la distribución para E2V, con una media  $4.7 \pm 0.5\%$ , y en azul para ITL, con una media de  $5.1 \pm 0.5\%$ . La distribución en negro representa el histograma de todos los datos sin discriminar por fabricante, con media  $4.9 \pm 0.5\%$ . Las líneas verticales representan el valor de la media para cada una de las distribuciones.

SIMPLE y FULL, y se calcula el error relativo respecto a una ganancia base (elegimos un valor de 2.0) para verificar si se puede recrear lo observado en la figura 6, es decir, un error base por encima del 5 %.

- **Caso 2 - Máscaras de pixeles:** Como paso siguiente, se le añaden máscaras de pixeles al caso 1. Para esto, se extrae de cada una de las imágenes flat la respectiva máscara, donde cada flat tiene un promedio de cuentas  $\sim 5000$  ADU. Esta máscara filtra los pixeles sospechosos, malos, muertos y saturados. Se genera entonces, una distribución de Poisson con las dimensiones de uno de los segmentos de CCD para el cual se extrajo las máscaras, esto es  $size_x = 2002$  y  $size_y = 512$ , con su respectivo ruido Gaussiano. La máscara respectiva se aplica a cada arreglo utilizando la función de *Numpy* (Harris y cols., 2020) *ma.masked\_where*.
- **Caso3 - Control de estadísticos:** Al caso 2 le agregamos control de estadísticos, es decir, asumimos que la distribución de 8 es Gaussiana y hacemos un recorte en la distribución tal y como se hizo en la sección 3.2, solo que en este caso mantenemos todos los datos que se encuentren a  $5.5\sigma$  de la media y se realizan 3 iteraciones. En el caso de que la distribución de 8 sí sea Gaussiana debe cumplirse que la media de la distribución truncada y de la distribución original es la misma si se hacen cortes simétricos. Al truncar no simétricamente la media de esta distribución es:

$$\mu = \bar{\mu} - \bar{\sigma} \frac{\phi(0, 1; \beta) - \phi(0, 1; \alpha)}{\Phi(0, 1; \beta) - \Phi(0, 1; \alpha)} ; \alpha = \frac{a - \bar{\mu}}{\bar{\sigma}}, \beta = \frac{b - \bar{\mu}}{\bar{\sigma}} \quad (11)$$

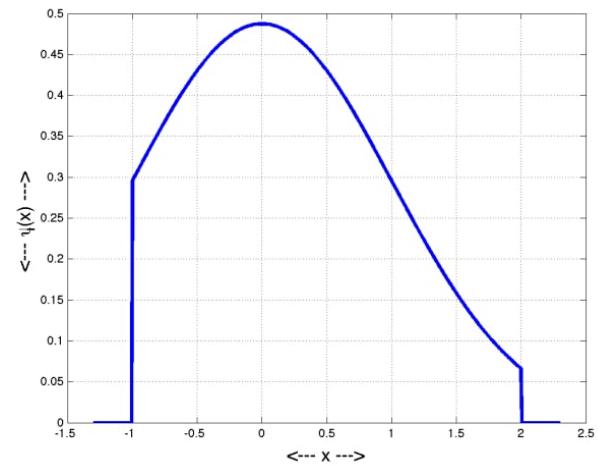


Figura 8: Distribución Gaussiana truncada con media cero y desviación estándar cero,  $\psi(0, 1, a = -1, b = +2; x)$ . Figure is taken from Burkhardt (2014).

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son variables estandarizadas,  $a$  y  $b$  son los valores de corte para cada uno de los lados de la distribución,  $\bar{\mu}$  y  $\bar{\sigma}$  son los estadísticos de la distribución original,  $\phi$  es la PDF normal y  $\Phi$  es la CDF normal. Este caso se ilustra en la figura 8 para  $a = -1$  y  $b = +2$ . Sin embargo, si  $-a = b$ , es decir, se trunca de forma simétrica la distribución, el numerador del segundo término en la anterior ecuación se hace cero y se reduce a

$$\mu = \bar{\mu} \quad (12)$$

lo que implica que la media de la distribución truncada es igual a la media de la distribución original. Por lo tanto, se utiliza este resultado para calcular el valor esperado de la ecuación 3 y encontrar así las soluciones de la ganancia para las correcciones NONE, SIMPLE y FULL.

Como paso adicional, verificamos la forma de la distribución de 8, en el caso de no ser Gaussiana no se hace ningún truncamiento a la distribución y el valor esperado de la ecuación 3 se calcula con una media aritmética.

### 3.3. Linearity Correction

Para ver qué efecto tiene la corrección por linealidad en la forma de la PTC y en sus parámetros, utilizamos un linealizador tipo Spline con 12 nodos para los detectores 32 (ITL) y 139 (E2V). Este linealizador fue generado por **Jerónimo** y discutido en su trabajo ampliamente, en su análisis encontró que un Spline con 12 nodos, igualmente espaciados, corrige en gran medida el efecto de la no linealidad y disminuye la dispersión en los residuales. Todas las configuraciones fueron iguales, excepto, por supuesto, la de corrección por linealidad (ver cuadro 1).

Posteriormente, se construyen gráficas de  $\frac{Variance}{Mean}$  vs  $Mean$ , de modo que se normaliza la varianza. Así, se analiza si el bache entre 50000 y 60000 ADU se corrige. Además, se calcula un error relativo porcentual

Cuadro 1: Configuración empleada para generar las PTC. En este caso específico “doLinearize: true”, por lo que se efectúa la corrección por linealidad.

Configuración			
doWrite: true	doLinearize: true	doFlat: false	doInterpolate: false
doOverscan: true	doCrosstalk: false	doFringe: false	doSaturation: false
doAssembleCcd: true	doBrighterFatter: false	doApplyGains: false	doSaturationInterpolation: false
doBias: true	doDark: true	doDefect: true	growSaturationFootprintSize: 0
doVariance: true	doStrayLight: false	doNanMasking: true	ptcFitType: EXPAPPROXIMATION

entre los parámetros obtenidos del ajuste de la PTC con y sin corrección por linealidad para cuantificar el efecto en estos.

Finalmente, se efectúa la metodología descrita en la sección 3.2 para visualizar el efecto que tiene esta corrección sobre el error relativo porcentual entre las ganancias. Hay que notar que en este caso los pares de flat también tienen la corrección por linealidad.

### 3.4. Crosstalk

La lectura del plano focal completo de la LSSTCam puede alcanzar un tiempo de lectura de 2s, por lo que la combinación de gran velocidad, componentes en silicio de alta resistividad, poco espaciamiento entre cada canal hacen más susceptible a la LSSTCam, que cualquier otra cámara en mosaico, de presentar crosstalk electrónico (O’Connor, 2015).

El crosstalk electrónico se presenta en CCD que contienen varios canales que se leen de forma simultánea y se acoplan, por lo que un canal que esté detectando una fuente brillante aparecerá en segmentos adyacentes como una imagen fantasma debido a este acople (Snyder y cols., 2020). Este efecto se presenta en la figura 9, donde se observan señales “fantasma” en los segmentos laterales del detector. Mientras que en la figura 10 se muestra un mapa de calor, a la izquierda para el detector 32 de ITL y en la derecha para el detector 139 de ITL, donde los coeficientes del crosstalk más altos se encuentran en colores azules, y se observa que el patrón de crosstalk es diferente por fabricante. Estos mismos coeficientes son ingresados dentro de un archivo de configuraciones en el software del LSST para que vuelva a generar la PTC con esta corrección.

En este caso se efectúa también la metodología descrita en la sección 3.3.

## 4. Results

Tener en cuenta los amplificadores malos

### 4.1. PTC

En los paneles de la figura 12 se muestran los mapas de calor en el plano focal para los parámetros estimados mediante el ajuste a la PTC: ganancia y ruido de lectura en el panel superior izquierdo y derecho respectivamente;  $a_{00}$  y turnoff en el panel inferior izquierdo y derecho, respectivamente. Estas gráficas fueron realizadas inicialmente por SLAC National Acceleration Laboratory <sup>3</sup> para este mismo run

<sup>3</sup>El código utilizado por *SLAC* está disponible en *SLAC code*

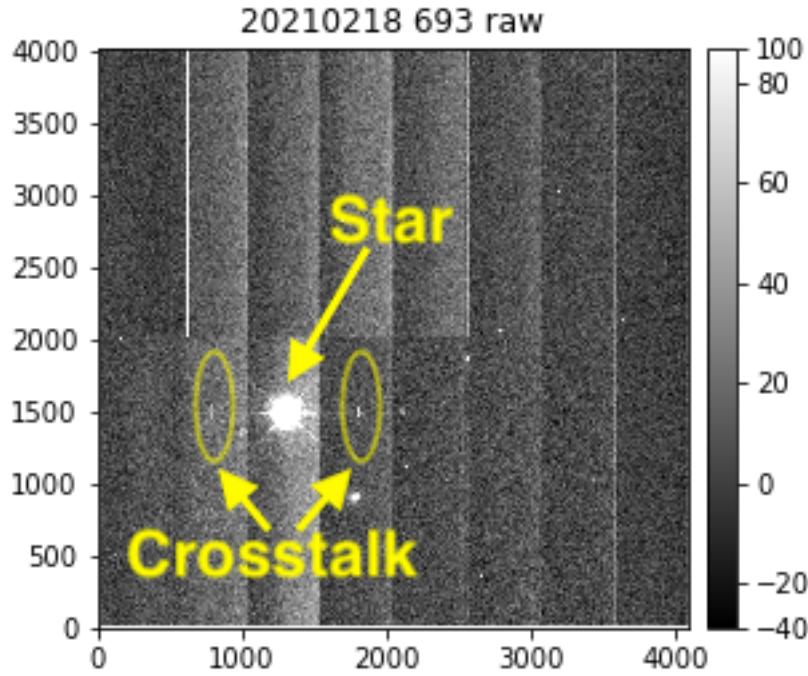


Figura 9: Image of a bright star taken with the 1.2m auxiliary telescope at the Vera Rubin Observatory. Segments adjacent to the bright start image show crosstalk.

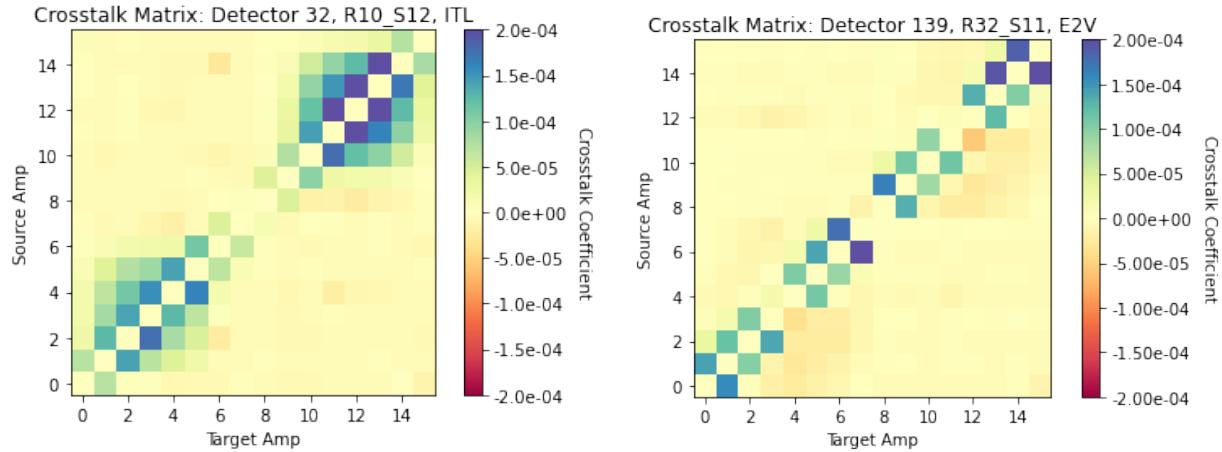


Figura 10: Crosstalk matrix

(SLAC heat maps BOT 13144). En comparación con lo obtenido por SLAC, los resultados, en general, son congruentes. Se encuentra una bimodalidad en la ganancia y en el valor de  $a_{00}$  (que da cuenta del B-F

effect), los valores más rojizos dominan en los sensores de E2V, mientras que los valores más amarillos dominan en ITL; esto quiere decir que, los detectores del fabricante E2V tienen en general una ganancia más baja, pero un coeficiente del B-F effect más negativo respecto a ITL. Mientras que, para el ruido de lectura y el turnoff no se exhibe un efecto relevante debido al fabricante.

Sin embargo, aunque en general los resultados entre este trabajo y SLAC son congruentes, [encontramos diferencias en algunas]  
Creemos que las diferencias son producto del ajuste que se empleó en el ajuste a la PTC en ambos trabajos, mientras que en este utilizamos un ajuste EXPAPROXIMATION, que sigue la ecuación 1, posiblemente SLAC haya efectuado su ajuste con FULLCOVARIANCE, que está descrito por la ecuación 20 de Astier y cols. (2019). Por otro lado, aunque para el PTC turn-off en general se observa un comportamiento similar para los sensores entre este trabajo y SLAC, la forma de determinación empleó métodos diferentes. Por parte de SLAC el FWC encontrado fue de  $\sim 90000 e^-$  [referencia?], mientras que en este trabajo encontramos un valor un valor promedio de turnoff con un valor de 83240 ADU, que en electrones sería un valor aproximado del FWC de  $130000 \pm 10000 e^-$ .

El comportamiento descrito anteriormente por los mapas de calor son reforzados por los histogramas de la figura 13, los cuales revelan la clara bimodalidad para la ganancia y  $a_{00}$  y un comportamiento más generalizado para el ruido de lectura y el turnoff. La ganancia tiene un valor promedio para los sensores de E2V de  $1.49 \pm 0.05$  y de  $1.69 \pm 0.05 e^-/ADU$  para ITL. El coeficiente del B-F effect tiene un valor medio de  $(-3.0 \pm 0.1) \times 10^{-6}$  y  $(-1.7 \pm 0.2) \times 10^{-6}$  para E2V e ITL, respectivamente.

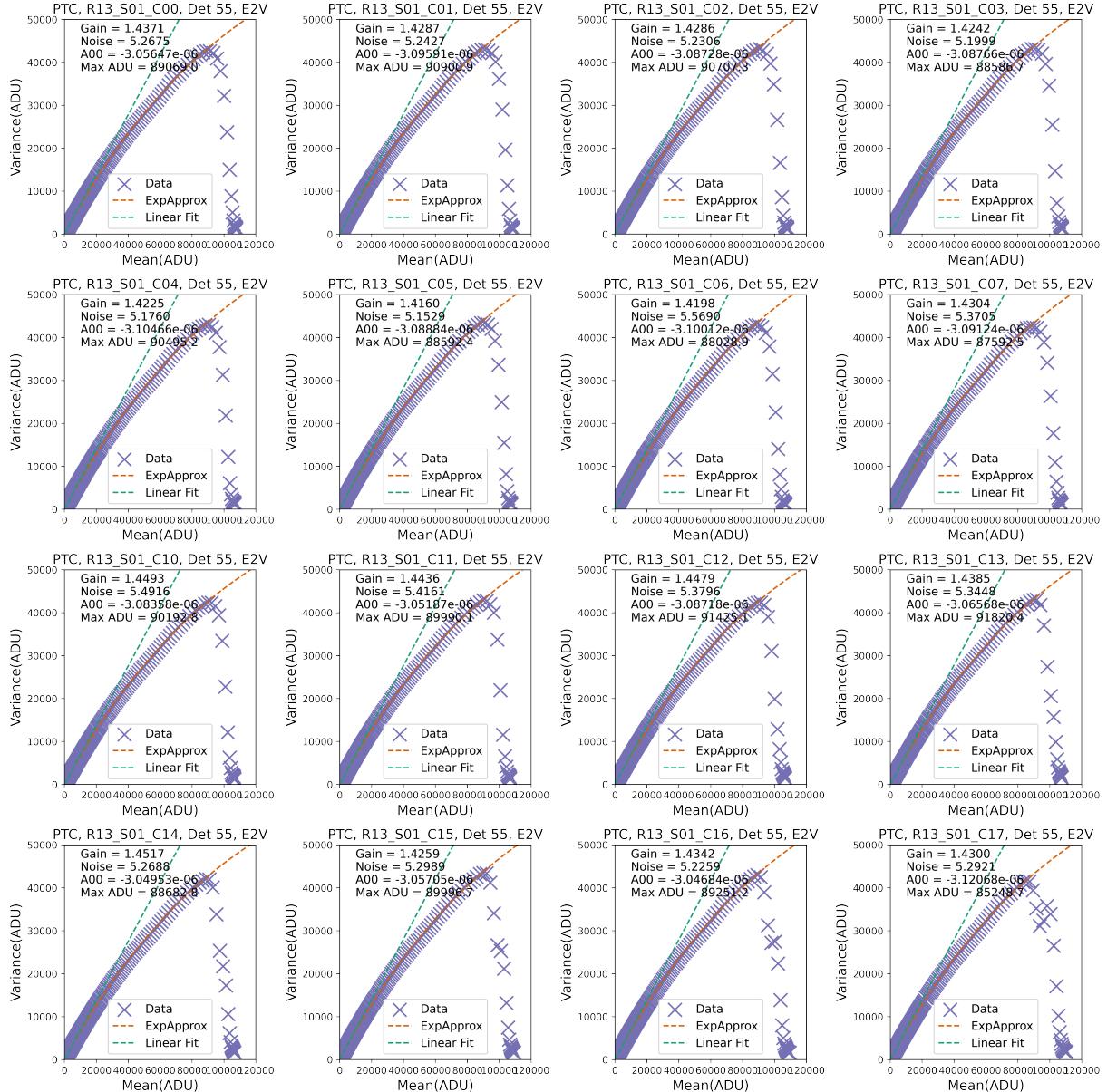


Figura 11: PTC para todos los segmentos del sensor 55 (E2V). Los datos se representan con las X, la línea roja es el ajuste a la PTC por aproximación exponencial (eq. 1), la línea verde es un ajuste lineal. Los parámetros obtenidos del ajuste a la PTC son la ganancia, el parámetro  $a_{00}$ , el PTC turnoff (Max ADU) y el ruido de lectura.

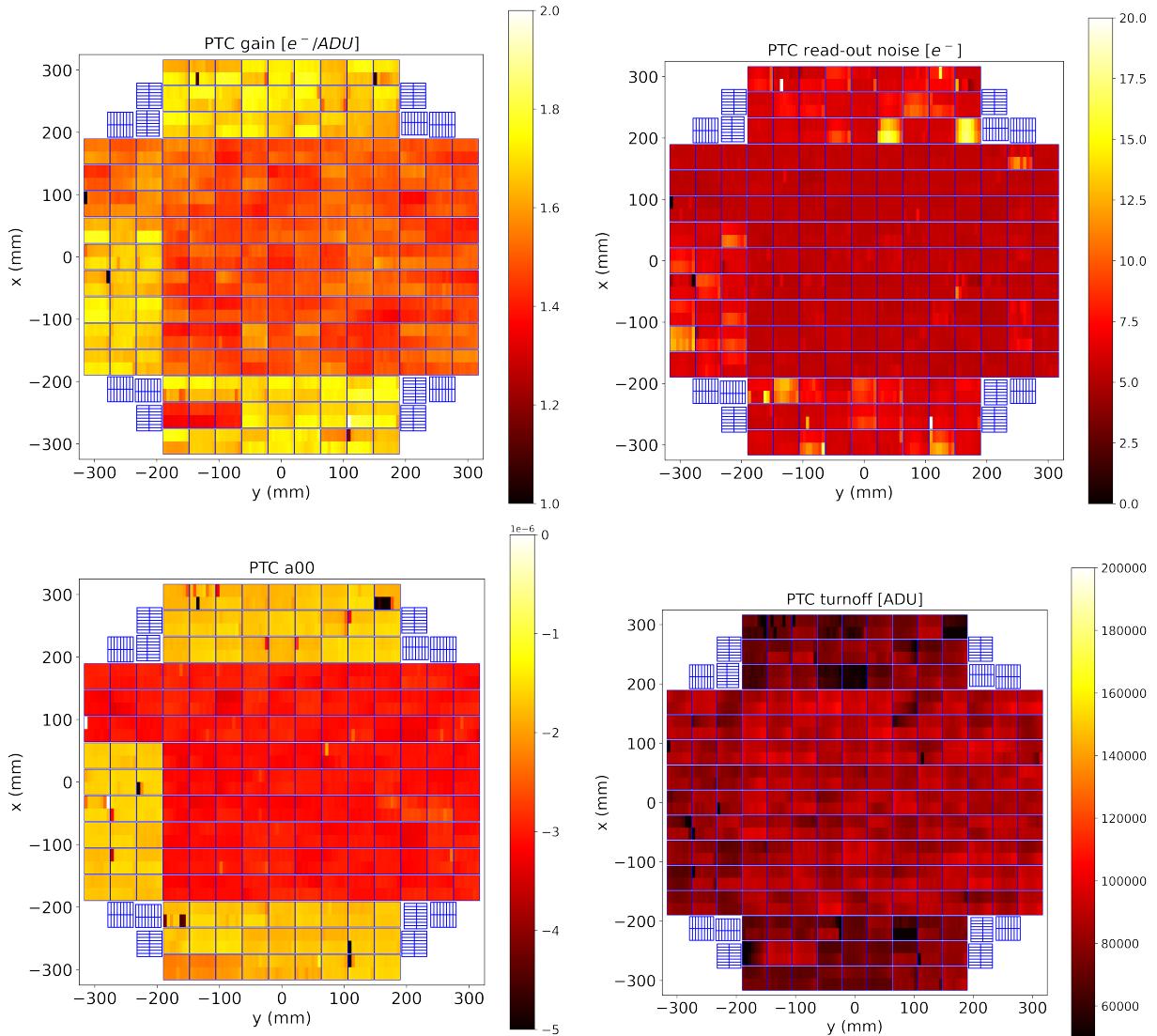


Figura 12: Mapas de calor para el plano focal completo de los parámetros obtenidos mediante el ajuste a la PTC en cada uno de los segmentos que componen los sensores. En el panel superior se muestra a la izquierda los valores de la ganancia, a la derecha el ruido de lectura. En el panel inferior se muestra a la izquierda los valores de  $a_{00}$ , que son del orden de  $-1 \times 10^{-6}$ , y a la derecha el turnoff. Estos mapas son una reproducción de las ya construidas por SLAC para esta misma run 13144 (SLAC heat maps).

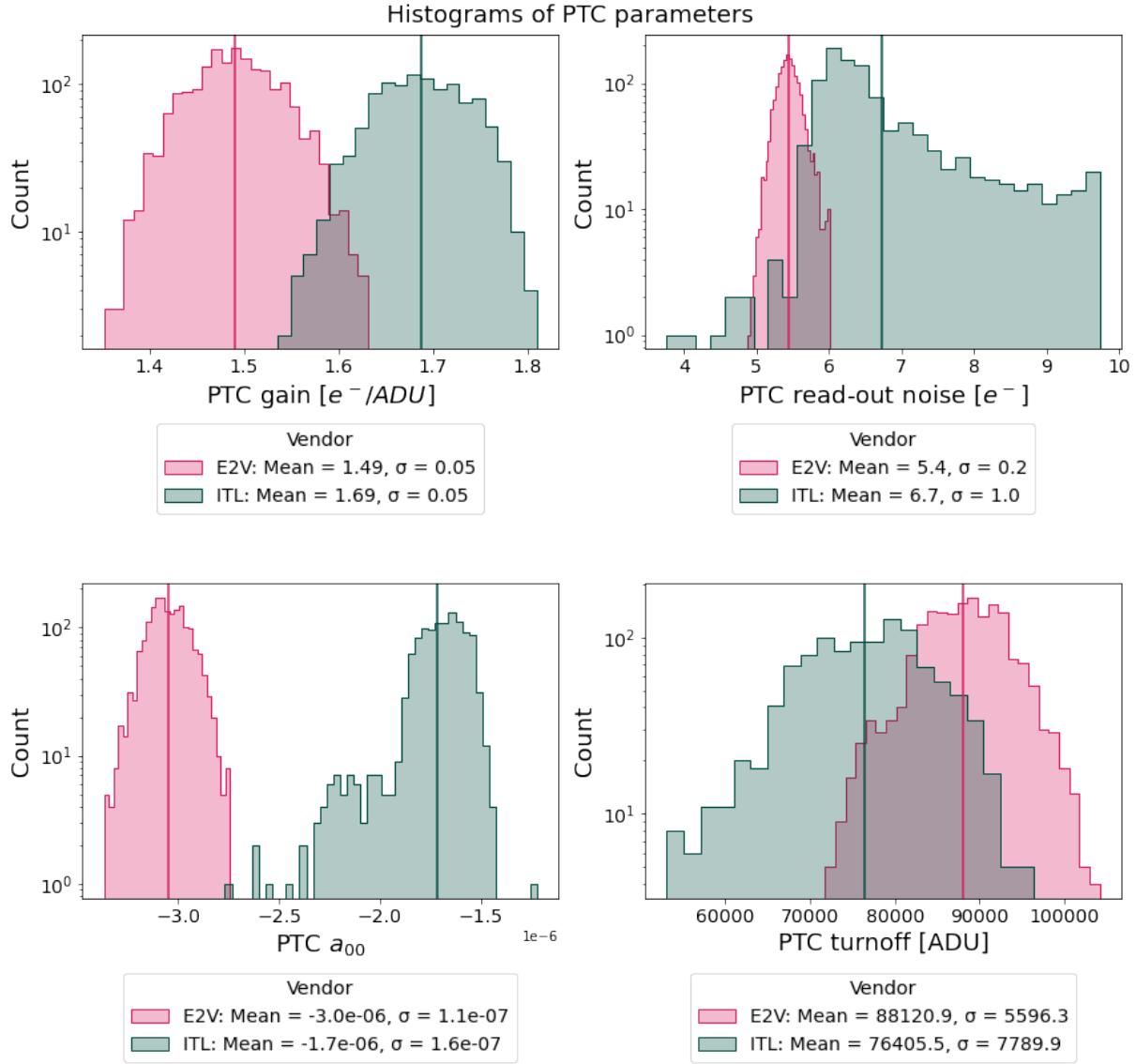


Figura 13: Histogramas para los parámetros obtenidos del ajuste a la PTC: la ganancia (arriba izquierda), ruido de lectura (arriba derecha),  $a_{00}$  (abajo izquierda) y turnoff (abajo derecha), cada una de las distribuciones se muestra por fabricante, en magenta para E2V y en azul para ITL. Las líneas verticales representan la media de cada distribución.

Cuadro 2

Detector ID	Detector Num	Vendor	Amplifier	Gain	Read Noise	$A_{00}$	Turnoff	Issue
R02_S20	15	ITL	C17	1.67191	5.81973	-2.20396e-06	30567.4	low PTC-turnoff
R03_S11	22	ITL	C00	15.2117	44.0087	-0.708105	223.072	dead?
R10_S11	31	ITL	C10	1.63413	4.13177	-3.65785e-06	32842.4	low PTC-turnoff
R20_S00	72	ITL	C17	0	0	nan	0	dead
R20_S01	73	ITL	C00	1.6083	6.45279	-3.12539e-06	35507.4	low PTC-turnoff
R20_S12	77	ITL	C00	1.59232	4.70427	-8.02249e-06	26827.1	low PTC-turnoff
R30_S00	117	E2V	C10	0	0	nan	0	dead
R41_S20	168	ITL	C16	1.61074	6.07818	-1.98753e-06	37863.2	low PTC-turnoff
R41_S20	168	ITL	C17	1.59228	9.57256	-2.54637e-06	26120	low PTC-turnoff
R41_S21	169	ITL	C02	1.08095	62.8775	-4.52943e-05	16237.9	PTC-turnoff mismatch
R41_S21	169	ITL	C11	1.61255	5.23312	-2.61051e-06	32467.3	PTC-turnoff mismatch
R41_S21	169	ITL	C15	1.59804	5.21757	-2.31531e-06	39151.3	PTC-turnoff mismatch
R41_S22	170	ITL	C10	1.60171	4.76741	-3.2105e-06	32369.9	low PTC-turnoff
R42_S00	171	ITL	C17	1.6516	6.4254	-3.09362e-06	30253.3	low PTC-turnoff
R43_S10	183	ITL	C17	1.59721	8.53352	-2.46596e-06	30195.2	low PTC-turnoff
R43_S22	188	ITL	C01	1.6348	5.28826	-4.64678e-06	21477.5	low PTC-turnoff
R43_S22	188	ITL	C02	1.55382	6.94625	-7.40255e-06	30764.3	low PTC-turnoff
R43_S22	188	ITL	C03	1.56826	7.24918	-4.92713e-06	38222.4	low PTC-turnoff
R43_S22	188	ITL	C04	1.58147	3.76291	-4.88158e-06	38143.6	low PTC-turnoff

## 4.2. Gain from flat pairs

La versión inicialmente analizada



```
@@ -758,7 +758,7 @@ def getGainFromFlatPair(self, im1Area, im2Area, imStatsCtrl, mu1, mu2,
    758      758
    759      759          ratioIm /= sumIm
    760      760
 761      - const = afwMath.makeStatistics(ratioIm, afwMath.MEANCLIP, imStatsCtrl).getValue()
 761      + const = afwMath.makeStatistics(ratioIm, afwMath.MEAN, imStatsCtrl).getValue()
    762      762          gain = 1. / const
    763      763
    764      if correctionType == 'SIMPLE':
```

Figura 14: Diferencia entre el código inicial y el código actual para el cálculo de la ganancia a partir de un par de flat fields.

### 4.2.1. Simulation

se tenía también la hipótesis de que las máscaras en las imágenes flat podrían estar afectando de alguna manera, y que como se generaban para cada una podrían ser tan diferentes que al final pudieran generar un error relativo entre las ganancias del 5 %. Por lo tanto, una posible solución podría ser

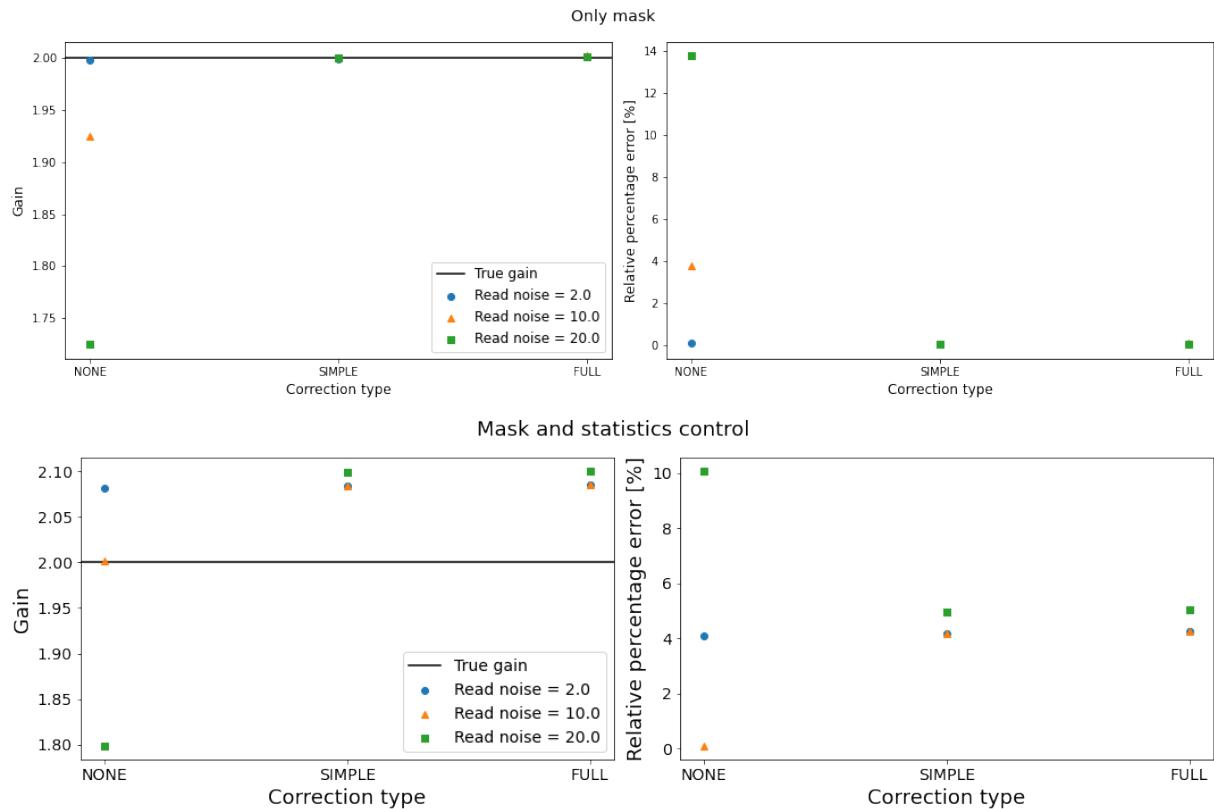


Figura 15: Resultados de la simulación para obtener la ganancia por pares de flats, en el panel superior utilizando únicamente máscaras y en el inferior añadiendo además estadísticos de control. Los paneles de la izquierda muestran el valor de la ganancia para 3 diferentes modelos y a la derecha el error relativo porcentual respecto al valor esperado de ganancia,  $2 e^-/\text{ADU}$ . En los paneles izquierdos la línea negra horizontal representa el valor de ganancia esperado y las figuras representan los diferentes valores considerados para el ruido de lectura: círculo azul de  $2 e^-/\text{/}$ , triángulo naranja de  $10 e^-/\text{/}$  y cuadrado verde de  $20e^-/\text{/}$ . Considerando estos ruidos de lectura se calculó la ganancia para tres modelos diferentes: NONE, SIMPLE y FULL.

#### 4.2.2. Real data

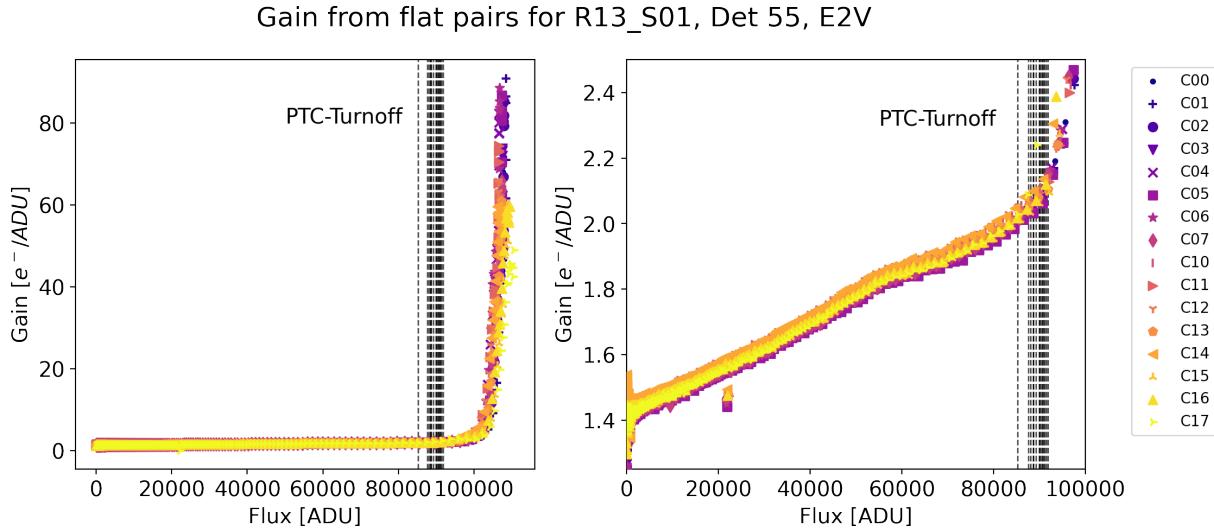


Figura 16: Valores de ganancia obtenidos por pares de flat para flujos hasta aproximadamente 120000 ADU para el detector 55 (R13\_S01). En ambos paneles las líneas verticales discontinuas representan el valor del PTC turnoff para cada uno de los 16 segmentos del detector y las figuras de colores representan los valores de ganancia y flujo para cada segmento. El panel de la derecha muestra solo la región hasta el PTC-turnoff del panel de la izquierda.

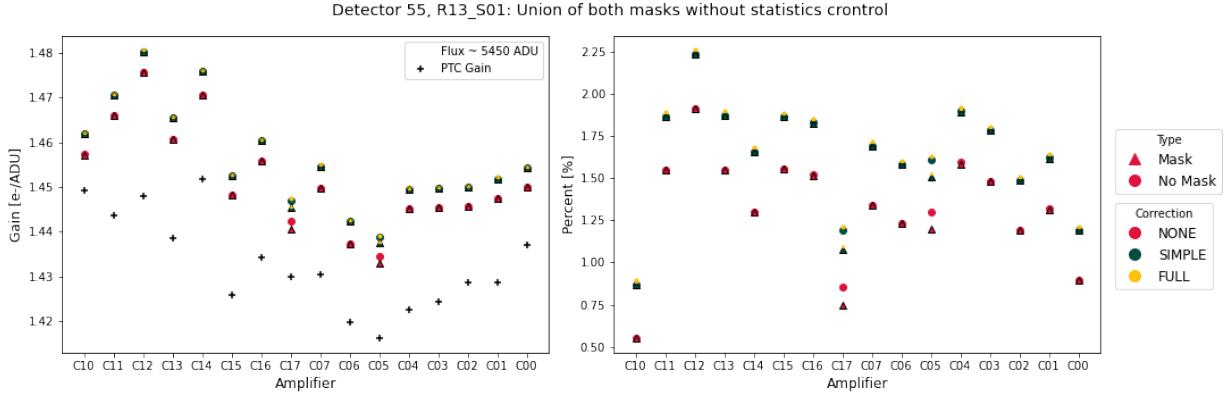


Figura 17: Valor de ganancia (panel izquierdo) y error relativo porcentual (panel derecho) para los 16 segmentos (amplifier) del detector 55 (R13.S01). En el panel izquierdo las cruces negras representan el valor de la ganancia por PTC. Para ambos paneles las figuras representan si el cálculo de la ganancia por pares de flats utilizó máscara (triángulos) o si no la utilizó (círculos), y los colores están asociados al modelo empleado para determinar la ganancia: NONE, SIMPLE y FULL. Para la máscara se utilizó la unión de las máscaras de ambas imágenes flat por segmento y no se utilizó estadísticos de control.

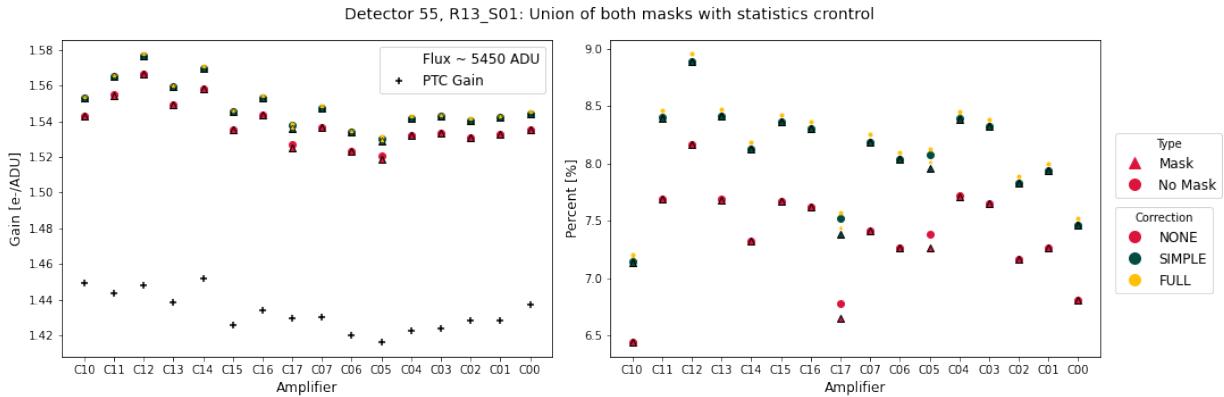


Figura 18: Ver descripción de la figura 17. En esta figura sí se empleó estadísticos de control.

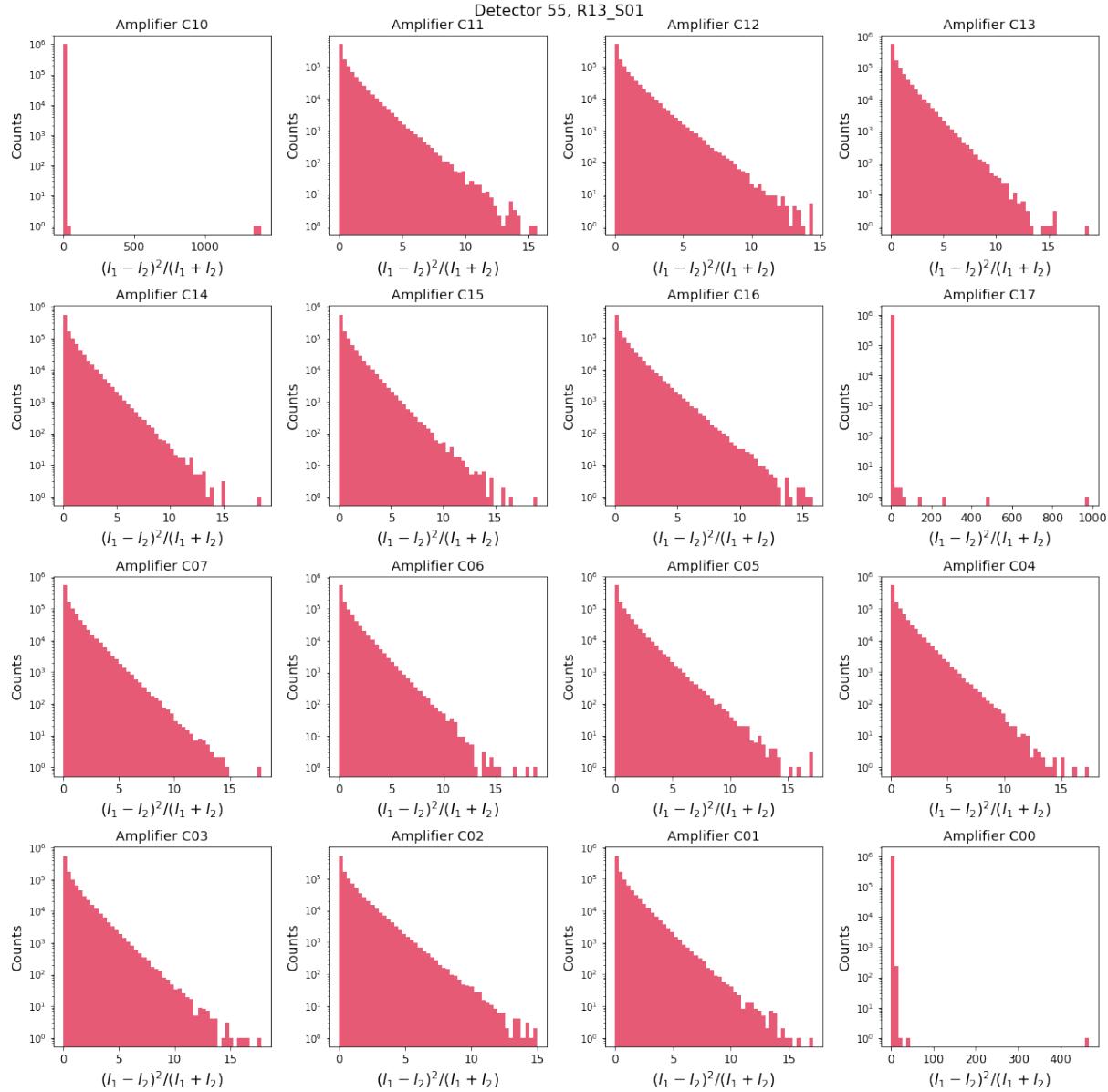


Figura 19: Histograma de la distribución para  $\frac{(I_1 - I_2)^2}{I_1 + I_2}$  para cada segmento del detector 55 (R13\_S01).

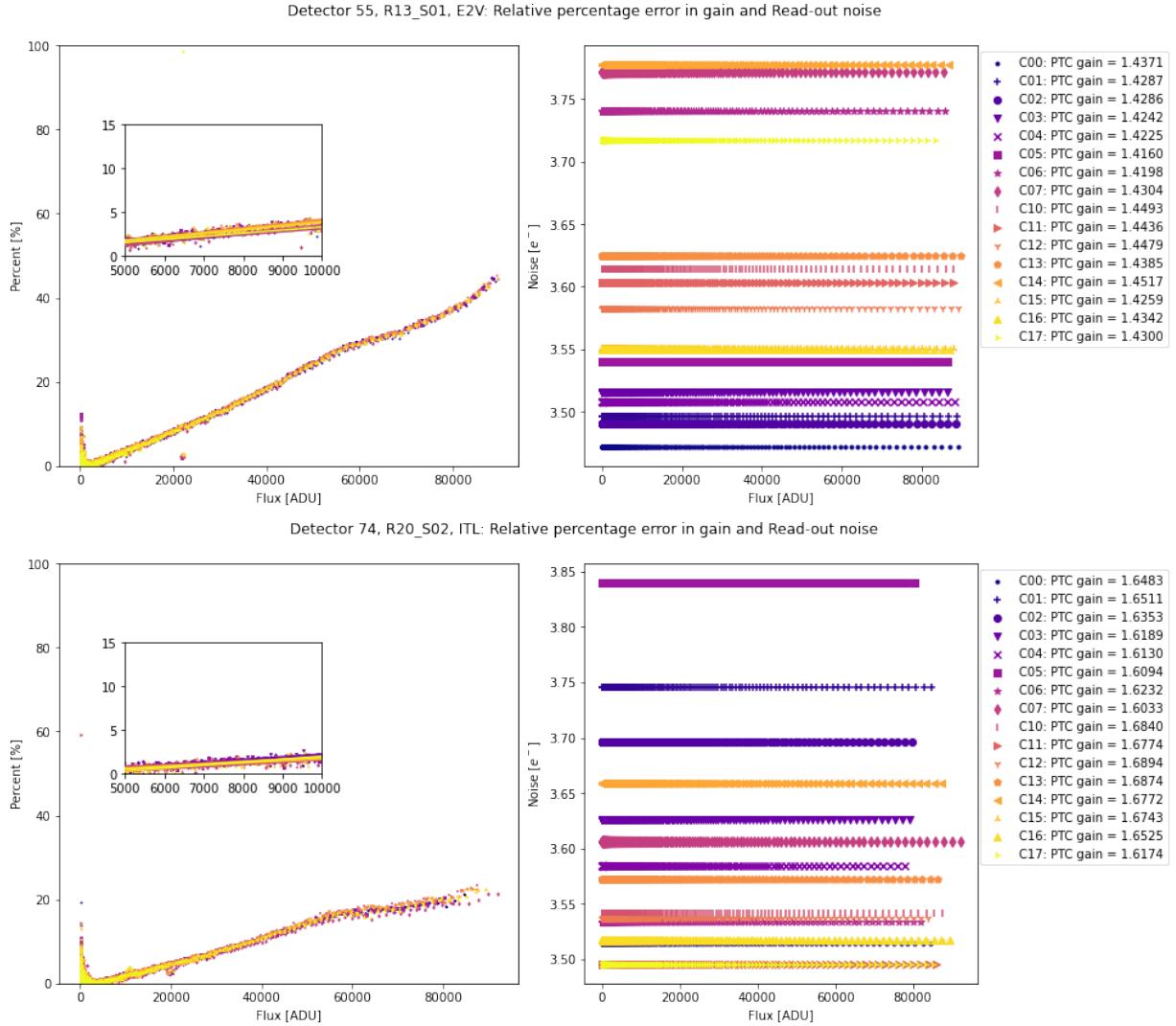


Figura 20: Refer to the description of the figure 6. This plot uses the updated code that does not use clipped mean.

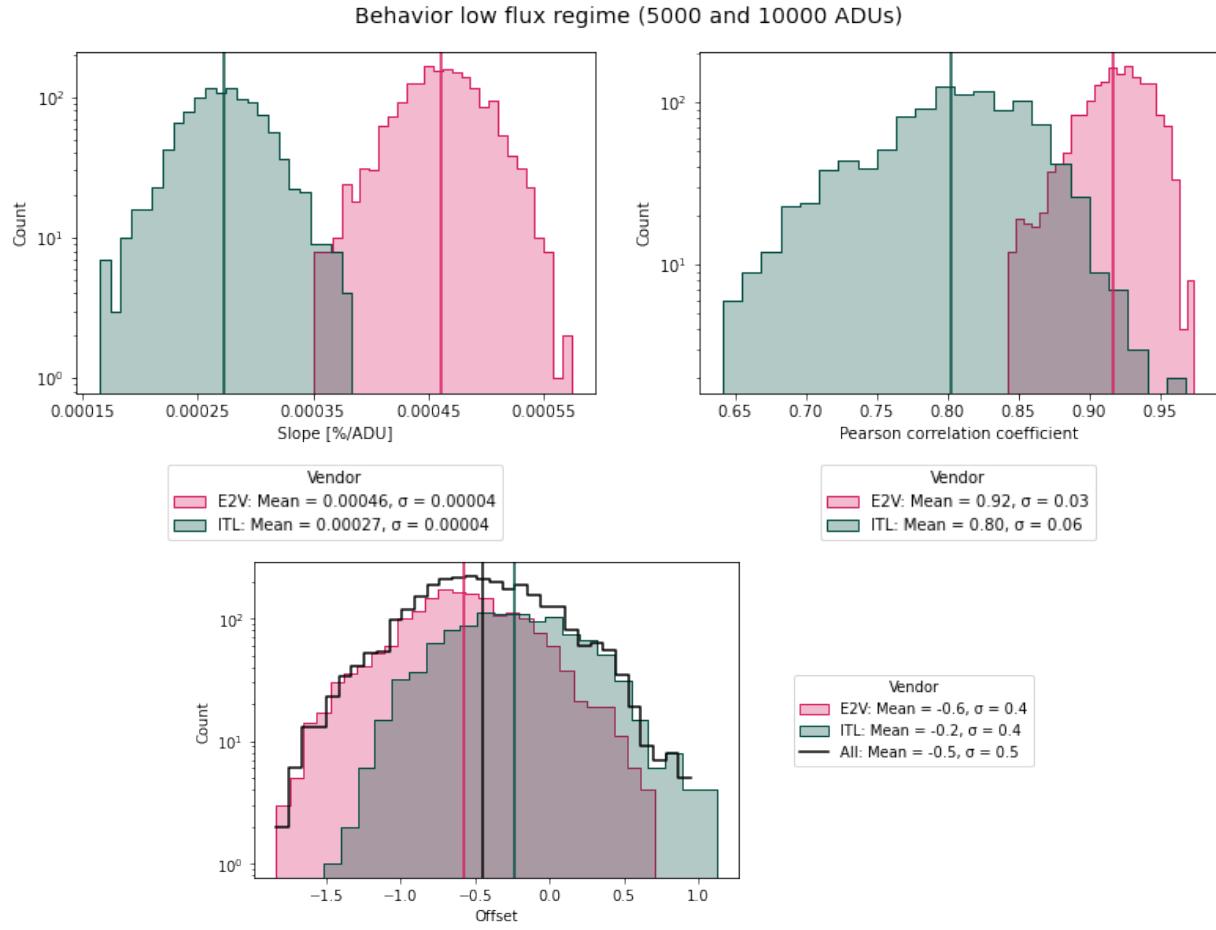


Figura 21: Histogramas para la pendiente (arriba izquierda), el coeficiente de correlación de Pearson (arriba a la derecha) y para el intercepto con el eje y (offset, panel inferior) que corresponde al ajuste lineal efectuado en la región de flujo entre 5000 y 10000 ADU para la ganancia. Para su construcción se utilizó el nuevo código y los colores representan el fabricante, E2V en rojo e ITL en azul. Las líneas verticales representan la media para cada caso.



## 4.3. Crosstalk and Linearizer

### 4.3.1. Crosstalk

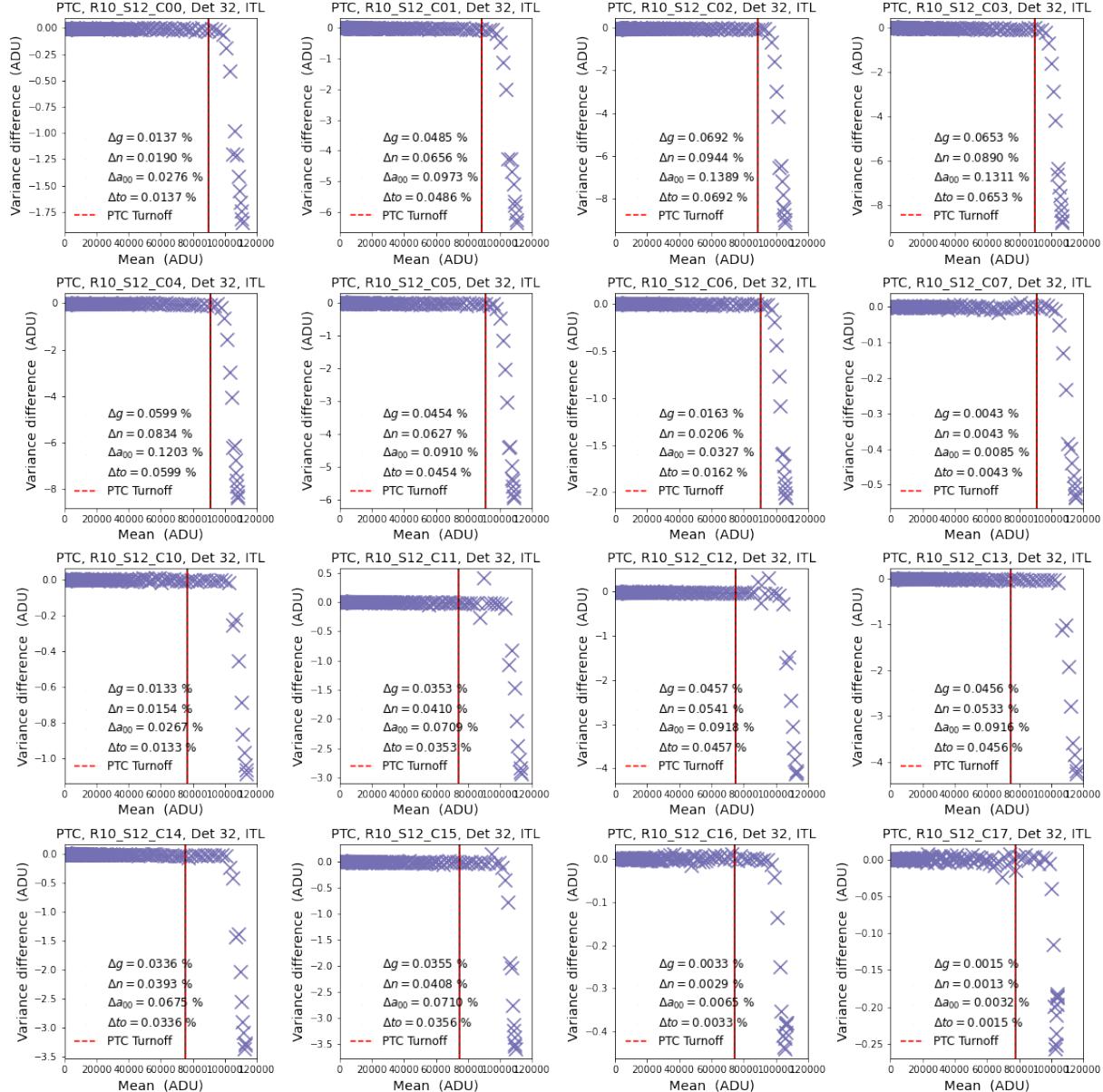


Figura 22: Gráfica de la diferencia de varianza vs la media para el detector 32 (R10\_S12) para el fabricante ITL, donde la diferencia de varianza es entre el valor de varianza sin y con corrección por crosstalk. Se muestra esto para cada uno de los segmentos del CCD, mostrando por la línea vertical los valores de PTC-turnoff y en las respectivas leyendas las diferencias entre los parámetros:  $\Delta g$  para la ganancia,  $\Delta n$  para el ruido de lectura,  $\Delta a_{00}$  para el coeficiente del brigther-fatter effect y  $\Delta t_0$  para el PTC-turnoff.

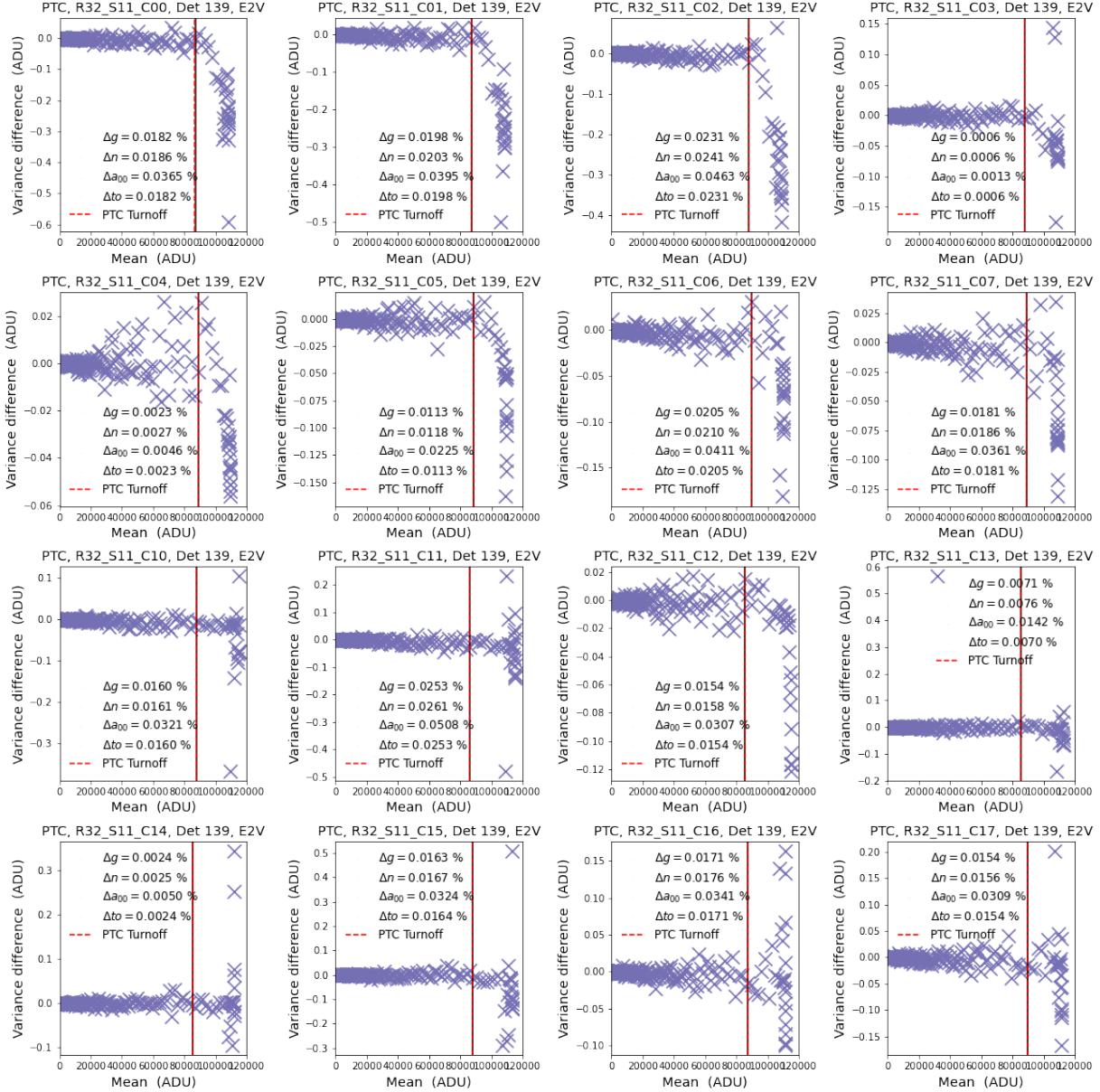


Figura 23: Ver descripción de la figura 22. Esta gráfica es para el detector 139 (R32\_S11) para el fabricante E2V.

#### 4.3.2. Linearizer

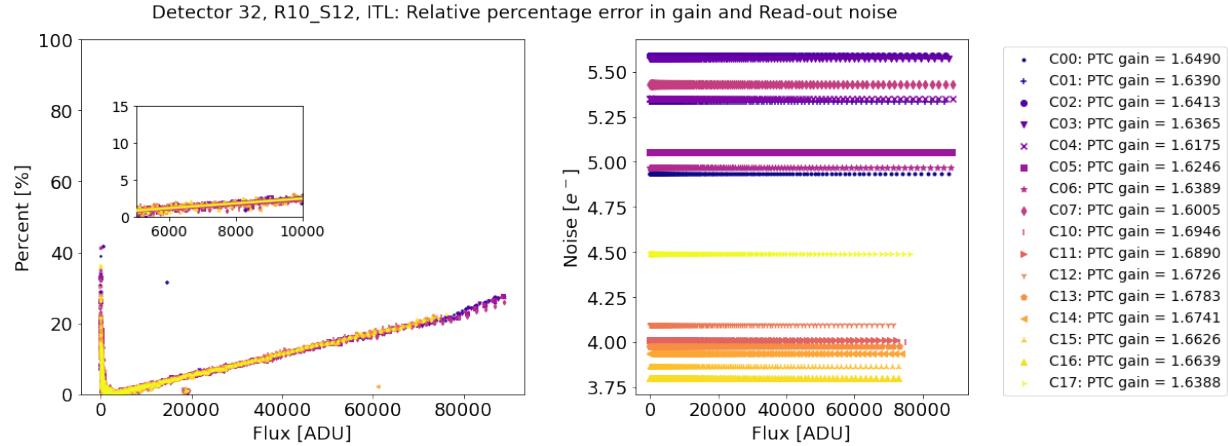


Figura 24: Ver descripción de la figura 6, sin embargo esta gráfica se realizó con datos corregidos por no linealidad y empleando el código actualizado para el detector 32 (R10\_S12) para el fabricante ITL.

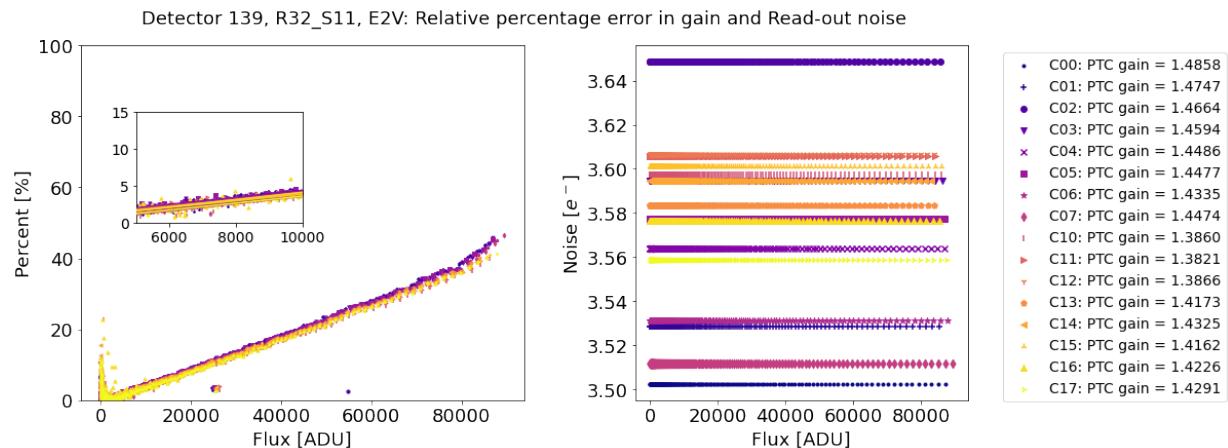


Figura 25: Ver descripción de la figura 6, sin embargo esta gráfica se realizó con datos corregidos por no linealidad y empleando el código actualizado para el detector 139 (R32\_S11) para el fabricante E2V.

## 5. Conclusions

Obtuvimos una lista con los sensores que presentan una PTC con comportamientos extraños, por ejemplo Downing dip, y bajo turnoff para que sean revisados posteriormente.

Los resultados obtenidos en este trabajo son, en general, congruentes con lo obtenido por SLAC. Se observó una bimodalidad por fabricante para la ganancia y para el coeficiente del B-F effect. Algunas

diferencias observadas en los segmentos pueden ser debidas al tipo de modelo empleado en el ajuste de la PTC, mientras que en este trabajo usamos EXPAPPROXIMATION, SLAC pudo haber utilizado FULLCOVARIANCE.

La principal diferencia se observó en el valor del Full Well Capacity: en este trabajo encontramos un valor de  $130000 \pm 10000$  e<sup>-</sup>, mientras que SLAC un valor de  $\sim 90000$  e<sup>-</sup>. La forma de calcular el turnoff varió desde que SLAC hizo sus cálculos.

El análisis entre la ganancia obtenida a partir de un par de flats y la ganancia obtenida de la PTC arrojó inicialmente un error relativo porcentual para bajos flujos (5K y 10K ADU) superior al 5 %. Este resultado condujo a la investigación exhaustiva de este origen indicando que la distribución que sigue la ecuación de Lupton para imágenes flat no es de tipo Gaussiana, por lo que el truncamiento de la distribución estaba generando una desplazamiento del valor medio, y en consecuencia, valores más grandes de ganancia respecto a la ganancia por PTC. Se reportó e implementó en el código principal.

La corrección por linealidad en efecto corrige el bache observado alrededor de los 50K-60K ADU. Mientras que realizar una corrección por crosstalk no afecta la forma de curva de transferencia de fotones ni modifica en gran medida los parámetros.

## Referencias

- Astier, P., Antilogus, P., Juramy, C., Le Breton, R., Le Guillou, L., y Sepulveda, E. (2019). The shape of the photon transfer curve of ccd sensors. *Astronomy & Astrophysics*, 629, A36.
- Astropy Collaboration, Price-Whelan, A. M., Sipőcz, B., Günther, H., Lim, P., Crawford, S., ... others (2018). The astropy project: building an open-science project and status of the v2. 0 core package. *The Astronomical Journal*, 156(3), 123.
- Burkardt, J. (2014). The truncated normal distribution. *Department of Scientific Computing Website, Florida State University*, 1, 35.
- Downing, M., Baade, D., Sinclair, P., Deiries, S., y Christen, F. (2006). Ccd riddle: a) signal vs time: linear; b) signal vs variance: non-linear. En *High energy, optical, and infrared detectors for astronomy ii* (Vol. 6276, pp. 76–86).
- Harris, C. R., Millman, K. J., Van Der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... others (2020). Array programming with numpy. *Nature*, 585(7825), 357–362.
- Ivezić, Ž., Kahn, S. M., Tyson, J. A., Abel, B., Acosta, E., Allsman, R., ... others (2019). Lsst: from science drivers to reference design and anticipated data products. *The Astrophysical Journal*, 873(2), 111.
- Lage, C., Bradshaw, A., y Tyson, J. A. (2017). Measurements and simulations of the brighter-fatter effect in ccd sensors. *Journal of Instrumentation*, 12(03), C03091.
- LSST Science Collaboration, Abell, P. A., Allison, J., Anderson, S. F., Andrew, J. R., Angel, J. R. P., ... et al. (2009, diciembre). LSST Science Book, Version 2.0. *ArXiv e-prints*.
- Lupton, R. H. (2014). Consequences of thick ccds on image processing. *Journal of Instrumentation*, 9(04), C04023.
- Newbry, S., Lange, T., Roodman, A., Reil, K., Bond, T., Rasmussen, A., ... Lee, V. (2018). Lsst camera bench for optical testing: design, assembly, and preliminary testing. En *Ground-based and airborne instrumentation for astronomy vii* (Vol. 10702, pp. 1553–1571).
- O'Connor, P. (2015). Crosstalk in multi-output ccds for lsst. *Journal of Instrumentation*, 10(05), C05010.

- Snyder, A., Barrau, A., Bradshaw, A., Bowdish, B., Chiang, J., Combet, C., ... others (2020). Laboratory measurements of instrumental signatures of the lsst camera focal plane. En *X-ray, optical, and infrared detectors for astronomy ix* (Vol. 11454, pp. 649–669).
- Walter, C. (2015). The brighter-fatter and other sensor effects in ccd simulations for precision astronomy. *Journal of Instrumentation*, 10(05), C05015.