



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA  
Instituto de Astronomía, Ciudad Universitaria.

**SIMULACIONES Y RENDIMIENTO DEL SISTEMA ÓPTICO  
OAXACA**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)**

PRESENTA:

**ROSA LETICIA BECERRA GODÍNEZ**

TUTORES PRINCIPALES

**DR. ALAN MORGAN WATSON FORSTER,**  
Instituto de Astronomía, Ciudad Universitaria.

**DR. SALVADOR CUEVAS CARDONA,**  
Instituto de Astronomía, Ciudad Universitaria.

MÉXICO, D. F. ENERO 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Resumen

El presente trabajo de tesis es para recibir el grado de Maestra en Ciencias (Astrofísica) por parte del Posgrado de Ciencias (Astrofísica) de la UNAM.

El trabajo presentado tiene como objetivo simular y verificar experimentalmente el sistema de óptica adaptativa OAXACA con los datos obtenidos a lo largo de cuatro temporadas de observación (de cuatro noches cada una) en el periodo febrero-abril 2014 en el telescopio de 1 m del Observatorio Astronómico Nacional (OAN) en Tonantzintla, Puebla.

OAXACA es un sistema de óptica adaptativa que se planteó como un proyecto científico. Sin embargo, en su configuración actual, se utiliza solamente para hacer pruebas en el telescopio.

Con la experiencia y los resultados presentados en este trabajo, se podrá mejorar el sistema OAXACA en términos del grado de corrección. Además, esto ha servido para proponer un telescopio de óptica adaptativa para el observatorio en San Pedro Mártir, Baja California: COATLI.

## Objetivos

El proyecto OAXACA estaba ya muy avanzado cuando me uní a él, razón por la cual no participé ni en el diseño ni en las primeras pruebas. Los datos presentados en este trabajo fueron obtenidos durante las temporadas a las que asistí (cuatro temporadas, de cuatro noches de cada una, entre febrero y abril de 2014).

El trabajo que yo realicé fue el de la caracterización cuantitativa del instrumento.

Un de los objetivos de la tesis fue realizar los modelos teóricos que caracterizaran la **eficiencia del sistema óptico** en cada uno de los caminos ópticos que la componen (la trayectoria de la luz hasta cada uno de los tres detectores: *buscador*, *instrumento científico* y *sensor de frente de onda*, Capítulo 6).

Para esto, fue necesario medir y determinar previamente la **ganancia y el ruido de lectura** del detector CMOS utilizado (Capítulo 4). Teniendo este modelo de la eficiencia como función de la longitud de onda, se realizó una estimación para una estrella ( $\alpha$ -Boo, Arcturo) para así poder contrastar el flujo predicho por el modelo con el flujo real de esta estrella.

El otro objetivo de la tesis fue conocer el grado de corrección que realizaba OAXACA mediante tres métodos: el primero consistió en hacer **simulaciones** con un programa de óptica adaptativa como YAO (Capítulo 8) en el cual se modeló un sistema óptico lo más parecido a OAXACA; el segundo fue mediante la teoría desarrollada por Noll [23] para un sistema óptico que corrige las mismas aberraciones que OAXACA; en tercer lugar, se realizó la medición del grado de corrección en las **PSF** obtenidas mediante el instrumento científico con la estrella ( $\alpha$ -Boo, Arcturo) (Capítulo 9). Los resultados que se obtienen son muy parecidos y son de gran utilidad para futuras pruebas que se realicen.



## Contexto astrofísico

OAXACA, como proyecto, ha permitido entender de manera práctica la tecnología y las técnicas de la óptica adaptativa con una inversión muy modesta en términos de recursos humanos y financieros.

En su estado actual, OAXACA no tiene una sensibilidad adecuada para programas científicos al contar con un detector CMOS con ruido de lectura en su WFS, óptica comercial (la cual cuenta con un rendimiento entre 700 y 900 nm) y al uso de tres divisores de haz fijos. En el telescopio de 1 metro del OAN/Tonantzintla, típicamente se usan estrellas de guía de magnitud 1.

Con base en el conocimiento adquirido en el proyecto OAXACA y utilizando mucha de la tecnología en él probada, se presentó el proyecto COATLI.

OAXACA, sin modificación, tendría en el telescopio de 2.1 metros del OAN/SPM, una mejor sensibilidad, alcanzando a corregir adecuadamente estrellas de hasta magnitud 4. Para alcanzar una sensibilidad que permita observaciones científicas (magnitud 10), será necesario sustituir el detector CMOS por un EMCCD, emplear óptica con rendimiento adecuado tanto en el azul como en el rojo y emplear dicroicos en lugar de divisores de haz en los mecanismos. Aunque todo esto es factible, se optó por lanzar el proyecto COATLI, que parece tener más relevancia científica. OAXACA seguirá funcionando como banco de pruebas.

COATLI será un telescopio robótico de 50 cm con un instrumento capaz de lograr imágenes al límite de difracción (alrededor de 0.3" de FWHM en las bandas *riz*) y se instalará en el OAN/SPM.

# Índice general

Índice de figuras	6
Índice de tablas	8
<b>1 Introducción</b>	<b>11</b>
1.1 Distorsiones de frente de onda . . . . .	11
1.2 Óptica adaptativa . . . . .	13
1.3 Aberraciones . . . . .	15
1.4 Seeing . . . . .	15
1.5 Limitaciones de un sistema de Óptica Adaptativa . . . . .	17
<b>2 OAXACA</b>	<b>19</b>
2.1 Descripción . . . . .	19
2.1.1 Sensor de Frente de Onda . . . . .	19
2.1.2 Espejo <i>Tip Tilt</i> (Articulado) . . . . .	22
2.1.3 Espejo deformable . . . . .	23
2.1.4 Detectores . . . . .	24
2.2 Especificaciones . . . . .	27
<b>3 Metodología</b>	<b>31</b>
<b>4 Ganancia y ruido de lectura</b>	<b>33</b>
4.1 Resultados . . . . .	34
<b>5 Escala de pixeles de OAXACA</b>	<b>39</b>
<b>6 Eficiencia de OAXACA</b>	<b>43</b>
6.1 Eficiencia estimada . . . . .	43
6.1.1 Buscador (D1) . . . . .	44
6.1.2 Instrumento científico (D2) . . . . .	46
6.1.3 Sensor de frente de onda (WFS) (D3) . . . . .	48
6.2 Flujo estimado . . . . .	50

6.3	Flujo real . . . . .	51
6.4	Resultados . . . . .	51
<b>7</b>	<b>Longitud de onda promedio</b>	<b>53</b>
7.1	Longitud promedio $\bar{\lambda}$ . . . . .	53
<b>8</b>	<b>Simulaciones</b>	<b>55</b>
8.1	Coefficiente de Strehl . . . . .	55
8.2	Modelo analítico . . . . .	55
8.3	Modelo de YAO . . . . .	56
8.4	Comentarios . . . . .	60
<b>9</b>	<b>Función de dispersión puntual (PSF)</b>	<b>63</b>
9.1	Función de dispersión puntual (PSF) . . . . .	63
9.2	PSF real . . . . .	63
9.3	PSF Ideal . . . . .	65
9.4	Resultados . . . . .	67
<b>10</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>69</b>
<b>A</b>	<b>Esquemas de OAXACA</b>	<b>71</b>
<b>B</b>	<b>Eficiencias de los componentes</b>	<b>77</b>
<b>C</b>	<b>Parámetros de YAO</b>	<b>83</b>
	<b>Referencias</b>	<b>87</b>

# Índice de figuras

1.1	Diagrama de un sistema de óptica adaptativa. . . . .	14
1.2	Tilt en una dirección. . . . .	15
1.3	Tilt en otra dirección. . . . .	15
1.4	Desenfoque. . . . .	16
1.5	Astigmatismo en una dirección. . . . .	16
1.6	Astigmatismo en otra dirección. . . . .	16

2.1	Sistema óptico OAXACA con sus componentes. . . . .	20
2.2	Sistema óptico OAXACA colocado en el telescopio de 1 m en el OAN, Tonantzintla, Puebla, observando la estrella Arcturo. (Foto: A. M. Watson) . . . . .	21
2.3	Principio de un WFS Shack-Hartmann. Arriba se muestra el patrón formado por la incidencia de una onda plana mientras que abajo la de una imagen distorsionada. . .	22
2.4	Esquema del DM . . . . .	23
2.5	Comparación entre el tamaño de los espejos deformables, DM de Guieloa (Izquierda), DM de OAXACA (Derecha). . . . .	24
2.6	Camino de la luz desde el telescopio hasta llegar al Buscador (D1) . . . . .	25
2.7	Camino de la luz desde el telescopio hasta llegar al Instrumento científico (D2) . . .	25
2.8	Camino de la luz desde el telescopio hasta llegar al Sensor de frente de onda <i>WFS</i> (D3)	26
2.9	Camino óptico de la fibra de referencia. . . . .	26
2.10	Camino óptico de la fibra de calibración. . . . .	27
2.11	PSF obtenida con el instrumento científico sin corrección. . . . .	28
2.12	PSF obtenida con el instrumento científico con corrección <i>tip tilt</i> . . . . .	29
3.1	Interfaz del sistema de control OAXACA . . . . .	32
3.2	Interfaz del sistema de control OAXACA (Parámetros) . . . . .	32
3.3	Interfaz del sistema de control OAXACA (Resultados) a. Frecuencia, b. Tiempo de integración y de exposición, c. Iteraciones, d. Valor máximo, promedio y mínimo, e. Valor de FWHM y ESHM (éste parámetro se refiere al área contenida de la curva dada por aquellos pixeles cuya medición es mayor o igual a la mitad del máximo) . . . . .	32
4.1	Ganancia vs Frecuencia de corrección. . . . .	36
4.2	<i>Ruido de lectura</i> vs Frecuencia de corrección. . . . .	37
5.1	Imagen del Trapecio de Orión tomada mediante OAXACA (escala de grises negativa)	40
6.1	Eficiencia del camino óptico que recorre la luz desde que entra al sistema óptico hasta el buscador ( <b>D1</b> ) estimada como producto de las eficiencias de las componentes enlistadas en la Tabla 6.1. . . . .	45
6.2	Eficiencia del camino óptico que recorre la luz desde que entra al sistema óptico hasta el instrumento científico ( <b>D2</b> ) estimada como producto de las eficiencias de las componentes enlistadas en la Tabla 6.2. . . . .	47
6.3	Eficiencia del camino óptico que recorre la luz desde que entra al sistema óptico hasta el WFS ( <b>D3</b> ) estimada como producto de las eficiencias de las componentes enlistadas en la Tabla 6.3. . . . .	49
6.4	Imagen del instrumento OAXACA (sin corrección por OA), estrella $\alpha$ -Boo, con un diámetro del telescopio $D= 26$ cm. . . . .	51
6.5	Imagen del WFS OAXACA, estrella $\alpha$ -Boo, con un diámetro del telescopio $D= 26$ cm.	51

7.1	Longitud de onda promedio $\bar{\lambda}$ vs temperatura efectiva T . . . . .	54
8.1	Interfaz YAO: a. PSF, b. WFS, c. Coeficiente Strehl a la longitud de onda seleccionada (en este caso 750 nm) vs iteraciones, d. Residuo de frente de onda, e. Espejo deformable. . . . .	57
8.2	Gráfica comparativa entre el coeficiente Strehl predicho por Noll ( $S_{NOLL}$ ) y el obtenido mediante las simulaciones en YAO ( $S_{YAO}$ ). . . . .	58
8.3	Gráfica comparativa entre el coeficiente Strehl predicho por Noll y el obtenido mediante las simulaciones en YAO al variar la velocidad del viento. . . . .	59
9.1	PSF de la estrella $\alpha$ -Boo (sin corrección) . . . . .	64
9.2	PSF de la estrella $\alpha$ -Boo (sin corrección), perfil radial. . . . .	64
9.3	PSF de la estrella $\alpha$ -Boo (con corrección) . . . . .	64
9.4	PSF de la estrella $\alpha$ -Boo (con corrección), perfil radial. . . . .	64
9.5	PSF de calibración. . . . .	65
9.6	PSF de calibración, perfil radial. . . . .	65
9.7	PSF simulada a 790 nm. . . . .	66
9.8	PSF simulada a 790 nm, perfil radial. . . . .	66
9.9	PSF simulada a 800 nm. . . . .	67
9.10	PSF simulada a 800 nm, perfil radial. . . . .	67
A.1	Componentes desde el telescopio hasta el TM . . . . .	72
A.2	Componentes desde el TM hasta el espejo deformable (DM) . . . . .	74
A.3	Componentes desde el espejo deformable (DM) hasta el Sensor de Frente de Onda (WFS) . . . . .	75

# Índice de tablas

1.1	Varianza de fase despues de corregir hasta los cinco primeros órdenes de Zernike . . . . .	18
4.1	Ganancia y <i>ruido de lectura</i> de OAXACA . . . . .	35
5.1	Posiciones de las cuatro estrellas del Trapecio de Orión. . . . .	40
5.2	Distancias en pixeles y arcseg entre las estrellas del Trapecio de Orión . . . . .	41
6.1	Componentes desde el telescopio hasta el buscador (D1). . . . .	44

6.2	Componentes desde el telescopio hasta el instrumento científico (D2).	46
6.3	Componentes desde el telescopio hasta el WFS (D3).	48
6.4	Número de cuentas estimadas y medidas para $\alpha$ -Boo.	52
8.1	Coeficiente de Strehl teórico ( $S_{NOLL}$ ) y simulado mediante YAO ( $S_{YAO}$ ) para $\lambda=750$ nm y $D=26$ cm al variar la velocidad del viento.	61
8.2	Frecuencias de Greenwood $\nu_0$ (en Hz) de corrección necesarias con $r_0$ y a una longitud de onda $\lambda = 750$ nm.	62
A.1	Componentes desde el telescopio hasta el espejo tilt (articulado) TM y el detector D3, Fig. A.1	73
A.2	Componentes desde TM hasta el espejo deformable (DM), Fig. A.2	73
A.3	Componentes desde el espejo deformable (DM) hasta el Sensor de Frente de Onda (WFS), Fig. A.3	76
B.1	Eficiencia de los distintos componentes de OAXACA: a. Detector (Eficiencia cuántica), b. Ventana del detector.	78
B.2	Eficiencia de los distintos componentes de OAXACA (continuación): c. Lente NIR-II (Esta gráfica es para una superficie; cada lente tiene dos superficies), d. Lente VIS-NIR (Esta gráfica es para una superficie; cada lente tiene dos superficies.), e. Espejo deformable.	79
B.3	Eficiencia de los distintos componentes de OAXACA (continuación): f. Au, g. Au protegido, h. Al.	80
B.4	Eficiencia de los distintos componentes de OAXACA (continuación), i. Al protegido, j. Eficiencia del Filtro 700 nm long-pass nm, k. Eficiencia del Filtro 900 nm short-pass, l. Filtro 700 nm short-pass, m. Atmósfera.	81



# Capítulo 1

## Introducción

Una observación astronómica convencional consiste en la detección de luz. Al ser emitida por una fuente puntual (estrella), su frente de onda es plano antes de atravesar la atmósfera. Debido a la turbulencia y a los gradientes de temperatura, que producen variaciones aleatorias en el índice de refracción del aire, el frente de onda se distorsiona.

En este capítulo se estudian los efectos de la atmósfera sobre el frente de onda y la manera de resolver el problema mediante la técnica de *Óptica Adaptativa*.

### 1.1. Distorsiones de frente de onda

Una onda puede representarse de acuerdo con:

$$\Psi = A \exp(i\varphi). \quad (1.1)$$

Donde  $A$  y  $\varphi$  son números reales que representan respectivamente la amplitud y la fase. A la superficie con el mismo valor de fase se le denomina *superficie de frente de onda*. Antes de entrar a la atmósfera, el frente de onda de una fuente puntual es plano, sin embargo, la turbulencia en la atmósfera terrestre produce inhomogeneidades en el índice de refracción  $n$  del aire causados por la mezcla turbulenta de capas, lo cual produce distorsión en los frentes de onda. La deformación de la superficie de frente de onda está dada por:

$$\delta = \int n(z) dz. \quad (1.2)$$

Donde  $n(z)$  es la fluctuación del índice de refracción a lo largo del haz. La fluctuación de la fase del frente de onda  $\varphi$  se relaciona con la deformación de la superficie de frente de onda de acuerdo con:



$$\varphi = k \int n(z) dz, \quad (1.3)$$

donde  $k$  es el número de onda. La variación entre la fase  $\varphi(x)$  en un punto  $x$  del telescopio y la fase  $\varphi(x + \epsilon)$  en un punto alejado a una distancia  $\epsilon$  de  $x$  es  $\varphi(x) - \varphi(x + \epsilon)$ . La varianza de la diferencia (espacial)  $D$  es:

$$D(\epsilon) = \langle |\varphi(x) - \varphi(x + \epsilon)|^2 \rangle, \quad (1.4)$$

mientras que en función del índice de refracción con ley de turbulencia de Kolmogorov-Obukhov:

$$D(\rho) = \langle |n(r) - n(r + \rho)|^2 \rangle = C_N^2 \rho^{2/3}, \quad (1.5)$$

con  $r$  y  $\rho$  vectores de posición y separación, respectivamente.

El coeficiente  $C_N^2$  se conoce como la constante de estructura de índice. De acuerdo a Roddier [27]:

$$D(\rho) = 6.88(\epsilon/r_0)^{5/3}, \quad (1.6)$$

donde:

$$r_0 = \left[ 0.423k^2(\cos\gamma)^{-1} \int C_N^2(h) dh \right]^{-3/5}, \quad (1.7)$$

$\gamma$  es el ángulo cenital de la fuente,  $h$  es la altura medida desde la tierra y  $r_0$  es conocido como el parámetro de Fried  $r_0$ . Este parámetro es la variable utilizada para caracterizar al *seeing* como función de la longitud de onda  $\lambda$ . Por convención, su valor es reportado en  $\lambda = 500$  nm. Las unidades en la que es medido es típicamente en centímetros. La interpretación física de  $r_0$  es el diámetro de un área circular sobre la cual el valor *rms* de la aberración del frente de onda debido al paso de la atmósfera es igual a un radián.

El parámetro de Fried cambia como función de la longitud de onda  $\lambda$  de acuerdo con:

$$r_0(\lambda) = r_0(\lambda_0) \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{6/5}, \quad (1.8)$$

donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda en la cual se mide  $r_0$  y  $\lambda$  la longitud de onda a la que se quiere calcular.

Haciendo la aproximación en la que las capas de turbulencia se desplacen (en promedio) la distancia  $\epsilon$  a una velocidad media  $\bar{v}$  y con un tiempo de retraso  $\tau$ , la ecuación 1.6 puede escribirse como:

$$D(\tau) = 6.88(\tau\bar{v}/r_0)^{5/3}. \quad (1.9)$$

Esto es ahora una varianza temporal en la cual se supone la existencia de capas *estáticas* en un periodo de tiempo y que  $\rho = \tau v$ .

El tiempo de retraso  $\tau$  del sistema de control produce un error cuadrático medio del frente de onda. Para que dicho error sea menor que un radián, este retraso debe ser menor que

$$\tau_0 = 0.314 \frac{r_0}{\bar{v}}. \quad (1.10)$$

En la ecuación (1.10), la variable  $\tau_0$  es conocida como el *tiempo de retraso de Greenwood*, la frecuencia asociada ( $1/\tau_0$ ) es llamada *la frecuencia de Greenwood*  $\nu_0$  y son, respectivamente, el tiempo y la frecuencia en la que cambian típicamente las fases de turbulencia.

## 1.2. Óptica adaptativa

En la sección anterior se describe la manera en la que la turbulencia afecta a un frente de onda. En esta sección se explica una de las técnicas utilizadas para corregir estas distorsiones.

Hay varias técnicas que se utilizan para obtener imágenes a alta resolución espacial, entre ellas la interferometría, interferometría de motas, *lucky imaging* y óptica adaptativa.

La *Óptica Adaptativa* (**OA**) es una técnica que permite compensar las aberraciones causadas por la turbulencia en la atmósfera mejorando la capacidad para resolver objetos y detectar objetos débiles. Tiene la ventaja de producir imágenes estables que se pueden analizar con instrumentos y técnicas convencionales.

De manera general, un sistema de OA consiste en un espejo deformable (**DM**) el cual permite corregir las distorsiones instantáneas del frente de onda que son medidas mediante un sensor de frente de onda (**WFS**), el cual registra las señales necesarias para manipular el elemento corrector al mapear los errores del frente de onda (Fig. 1.1).

La mayoría de los sistemas de OA operan como un circuito retroalimentado. Los correctores de

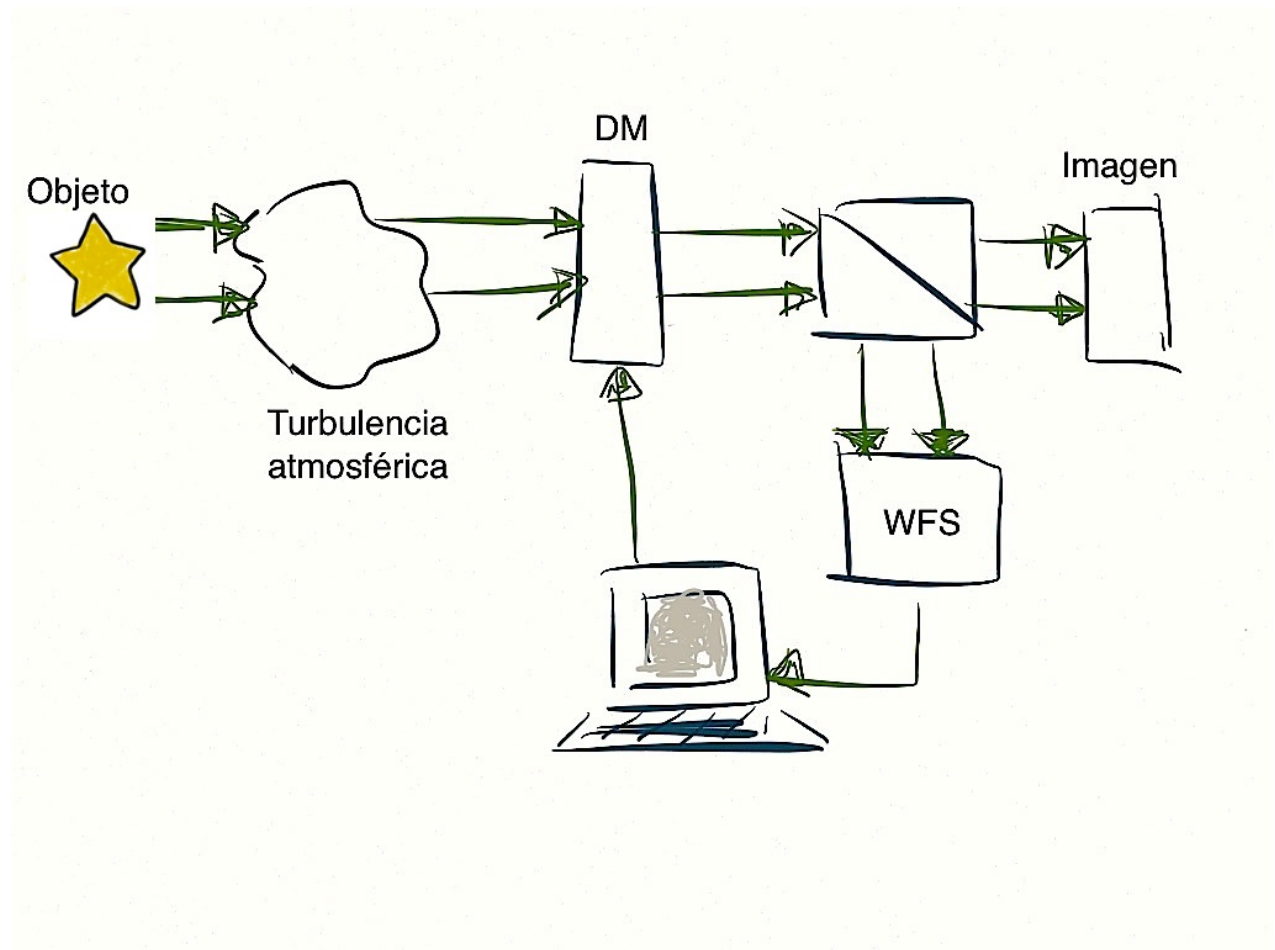


Figura 1.1: Diagrama de un sistema de óptica adaptativa.

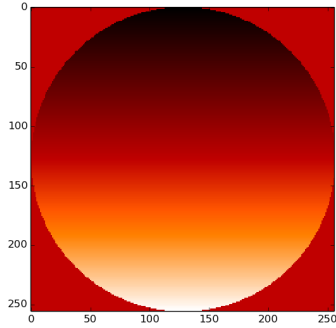


Figura 1.2: Tilt en una dirección.

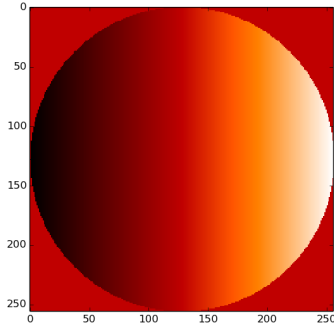


Figura 1.3: Tilt en otra dirección.

frente de onda compensan las distorsiones de los frentes de onda entrantes. Una parte de la luz es desviada hacia el WFS para estimar los residuos de aberraciones que aún no han sido compensados. El sistema de control usa las señales del sensor del frente de onda para actualizar las señales de control aplicadas al corrector de frente de onda. Este ciclo se repite indefinidamente.

Los sistemas de OA, típicamente, miden los errores en el frente de onda usando una fuente puntual (una estrella, por ejemplo) en el campo.

### 1.3. Aberraciones

Las aberraciones ópticas correspondientes a los primeros órdenes son el *desplazamiento* (tilt), el *desenfoque* y el *astigmatismo*. A continuación una breve descripción de cada una de ellas:

- **Tilt:** Movimiento de la imagen sobre el detector (Fig. 1.2 y Fig. 1.3)
- **Desenfoque:** El punto de enfoque del sistema no corresponde a la posición del detector (Fig. 1.4).
- **Astigmatismo:** El punto de mejor enfoque es diferente en dos direcciones ortogonales (Fig. 1.5 y Fig. 1.6).

### 1.4. Seeing

El *seeing* es el efecto distorsionador de la atmósfera sobre las imágenes observadas debido a la turbulencia atmosférica. Mide la mejor resolución angular posible para las condiciones del cielo. El *seeing*

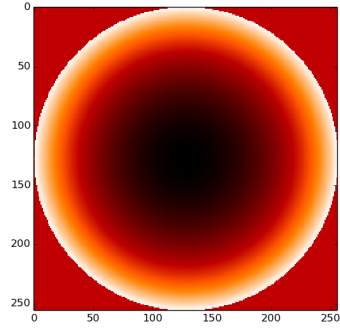


Figura 1.4: Desenfoque.

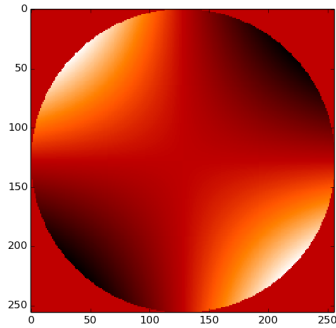


Figura 1.5: Astigmatismo en una dirección.

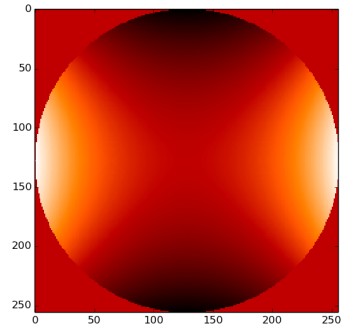


Figura 1.6: Astigmatismo en otra dirección.

se caracteriza mediante el FWHM \* en una imagen de tiempo de exposición largo.

En ausencia de un sistema de óptica adaptativa, la resolución de imagen de los telescopios con aperturas más grandes que  $r_0$  (como es el caso del telescopio de 1m de Tonantzintla) se verá limitada por la turbulencia atmosférica, impidiendo que los instrumentos puedan acercarse al *límite de difracción*.

Por otro lado, con telescopios con aperturas más pequeñas que  $r_0$  se obtendrán imágenes al límite permitido por la difracción del telescopio pero mayor que el *seeing*.

El *seeing*  $\theta$  como función de la longitud de onda  $\lambda$  y el parámetro de Fried  $r_0$  se relacionan como:

$$\theta = \lambda/r_0. \quad (1.11)$$

De las ecuaciones (1.11) y (1.8), el *seeing* depende de  $r_0$  como:

$$\theta(\lambda) = \theta_0(\lambda_0) \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-1/5}. \quad (1.12)$$

## 1.5. Limitaciones de un sistema de Óptica Adaptativa

Las fuentes de donde provienen los errores más importantes en un sistema de óptica adaptativa son:

- Tiempo de retraso (*Time delay error*)  $\sigma_{delay}$ : relacionado con la manera en la que el sistema de control trabaja, se debe al tiempo entre que se registran los errores residuales del frente de onda después de que una corrección haya sido aplicada por el espejo deformable y el tiempo en el que cambia la atmósfera, ya que no es estática y es distinta en cada instante, lo cual implica un retraso en la corrección.
- Error de ajuste  $\sigma_{fit}$ : Es debido a que ningún sistema de corrección es completamente perfecto al contar con un número finito de modos y estar limitado por las especificaciones del espejo deformable (al no tener un número infinito de actuadores).

Noll [23] obtiene los valores de la varianza de fase residual después de corregir cierto número  $j$  de modos (Tabla 1.1).

---

\*EL FWHM (Full Width at Half Maximum) es una medida de la extensión de una función, dada por la diferencia entre los dos valores extremos de la variable independiente en los que la variable dependiente es igual a la mitad de su valor máximo.

Modo $j$	Notación	Varianza residual
1	$\sigma_1^2$	$1.029(D/r_0)^{5/3}$
2	$\sigma_2^2$	$0.582(D/r_0)^{5/3}$
3	$\sigma_3^2$	$0.134(D/r_0)^{5/3}$
4	$\sigma_4^2$	$0.111(D/r_0)^{5/3}$
5	$\sigma_5^2$	$0.088(D/r_0)^{5/3}$

Tabla 1.1: Varianza de fase despues de corregir hasta los cinco primeros órdenes de Zernike

- Ruido  $\sigma_{noise}$ : Las mediciones del sensor del frente de onda se ven afectados por el ruido del sensor el cual introduce errores en la estimación del frente de onda.

## Capítulo 2

# OAXACA

### 2.1. Descripción

El sistema óptico de **OAXACA** (Fig. 2.1) fue diseñado para corregir las distorsiones producidas por la turbulencia atmosférica para el telescopio de 2.1m del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, Ensenada, Baja California, mediante la Óptica Adaptativa. Por el momento solo opera en el telescopio de 1 m ubicado en el Observatorio Astronómico Nacional de Tonantzintla, Puebla (Fig. 2.2)

El propósito de este sistema es corregir los efectos de la turbulencia atmosférica en casos reales y no solo en pruebas de laboratorio. En su configuración actual, y debido a la poca eficiencia del sistema óptico, no puede ser utilizado en observaciones científicas pero sí con fines de aprendizaje para entender y detectar problemas que permitan plantear otros instrumentos.

De manera general consta de un espejo articulado, un espejo deformable (DM), un espejo articulado (*tip tilt*), un WFS tipo Shack-Hartmann y un sistema de control diseñado especialmente para OAXACA. La lista completa de sus componentes se encuentra en el Apéndice A. El intervalo de frecuencias de corrección del sistema de control de OAXACA es de 3 a 500 Hz.

#### 2.1.1. Sensor de Frente de Onda

El Sensor de Frente de Onda tipo Shack-Hartmann que utiliza OAXACA consiste en un arreglo de lentes colocados en el plano conjugado de la pupila de tal manera que cada uno de estos lentes forma una imagen del área correspondiente de la pupila. Si existen distorsiones, la imagen se encontrará en un lugar diferente al esperado (Fig. 2.3).



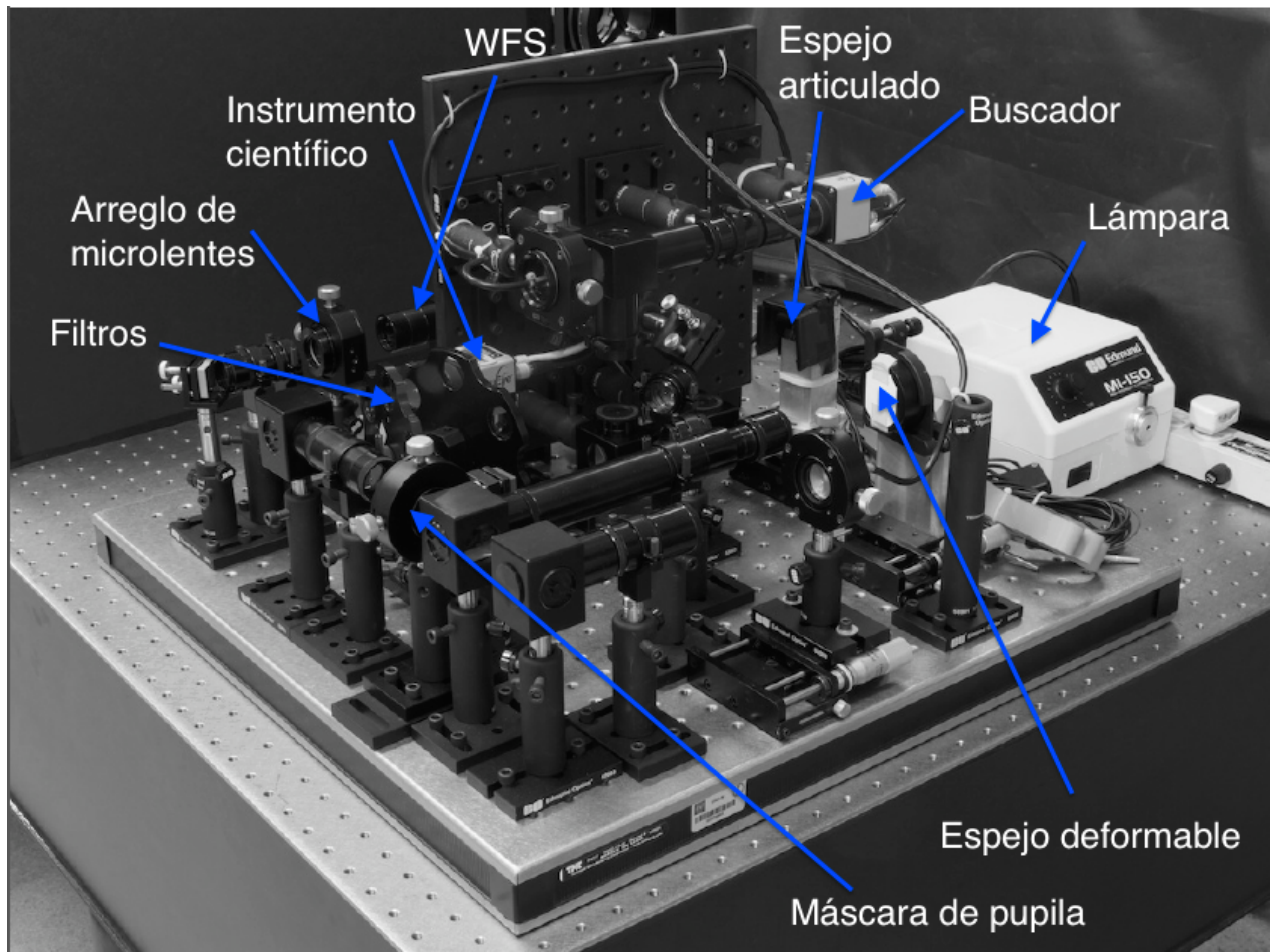


Figura 2.1: Sistema óptico OAXACA con sus componentes.



Figura 2.2: Sistema óptico OAXACA colocado en el telescopio de 1 m en el OAN, Tonantzintla, Puebla, observando la estrella Arcturo. (Foto: A. M. Watson)

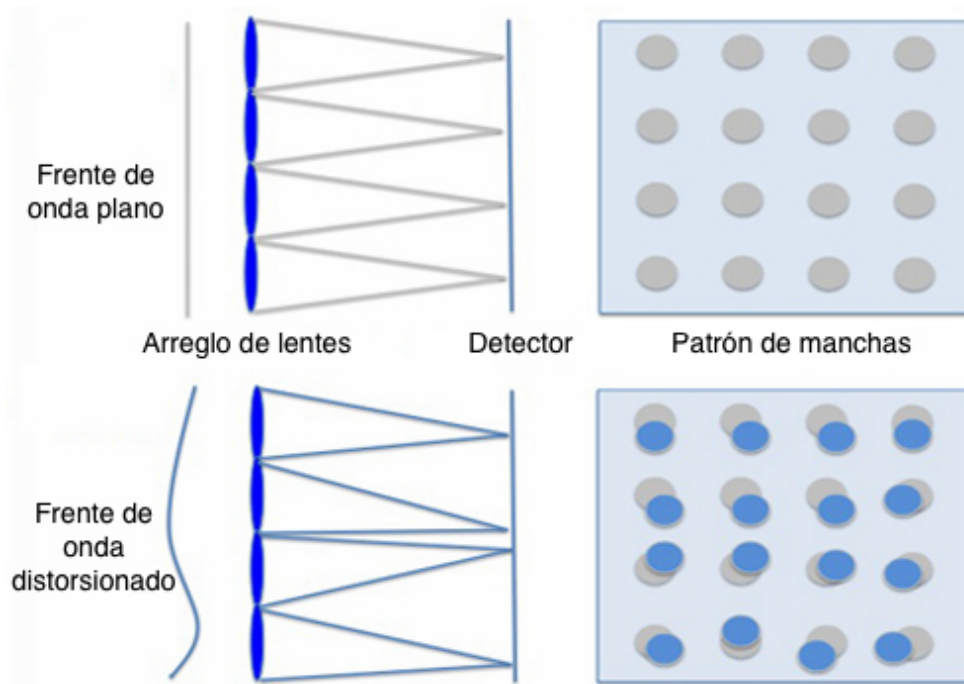


Figura 2.3: Principio de un WFS Shack-Hartmann. Arriba se muestra el patrón formado por la incidencia de una onda plana mientras que abajo la de una imagen distorsionada.

La diferencia entre las posiciones esperadas y las reales proporciona el ángulo en el que incide el frente de onda en esa área en particular (en cada microlente); esto permite reconstruir el frente de onda de manera modal. Esta reconstrucción se lleva a cabo ajustando el frente de onda a una suma de polinomios ortogonales tal y como los polinomios de Zernike  $Z_j$  (Noll [23]):

$$\Psi(r) = \sum_j a_j Z_j(r). \quad (2.1)$$

Al utilizar esta representación, se tiene la ventaja de que los términos de bajo orden de la ecuación 2.1 corresponden a las aberraciones ópticas de *tilt*, desenfoque y astigmatismo.

### 2.1.2. Espejo *Tip Tilt* (Articulado)

Es un espejo cuya inclinación en dos ejes permite la corrección de la inclinación media del frente de onda, la cual se traduce en un desplazamiento en dos ejes sobre el detector. Ésta es la corrección más simple del frente de onda.

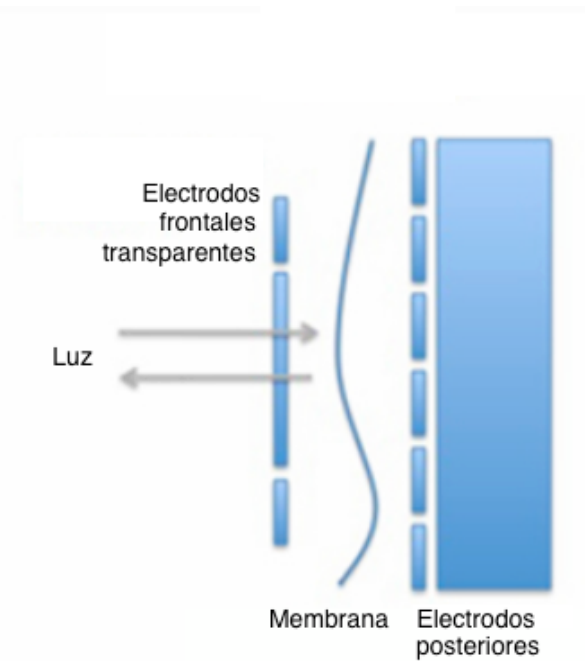


Figura 2.4: Esquema del DM

### 2.1.3. Espejo deformable

El espejo deformable de OAXACA está compuesto por una membrana reflectiva delgada y conductora en medio de dos estructuras de electrodos, una de ellas transparente. De esta manera y a diferencia de otro tipo de espejos deformables, el DM de OAXACA es capaz de *jalar* y *empujar* la membrana desde su posición de reposo (Fig. 2.4).

Cabe mencionar que este DM posee un diámetro de área activa de 11 mm, a diferencia del diámetro de otro DM de 36 mm usado en proyectos anteriores del Instituto de Astronomía como *Beleguá* o *Guieloa* (Fig. 2.5). Esto permite que la óptica sea aproximadamente 3 veces más compacta, lo que fue determinante para el diseño de OAXACA, ya que permitió disminuir los costos del proyecto.

Por la configuración en la que están los actuadores de ambos DM, el espejo deformable de Guieloa [1,6,12]\* puede llegar a corregir modos correspondientes al término de Zernike  $r^4 \cos 6\theta$  mientras que el espejo deformable de OAXACA tiene sus actuadores repartidos en [1,6,10,15], es decir, llega a corregir modos correspondientes al término de Zernike  $r^6 \cos 7\theta$ , es decir, llegan a corregir hasta 15 y 28 modos respectivamente.

\*Notación que indica el número de actuadores en cada uno de los círculos en los que está dividido el espejo deformable.

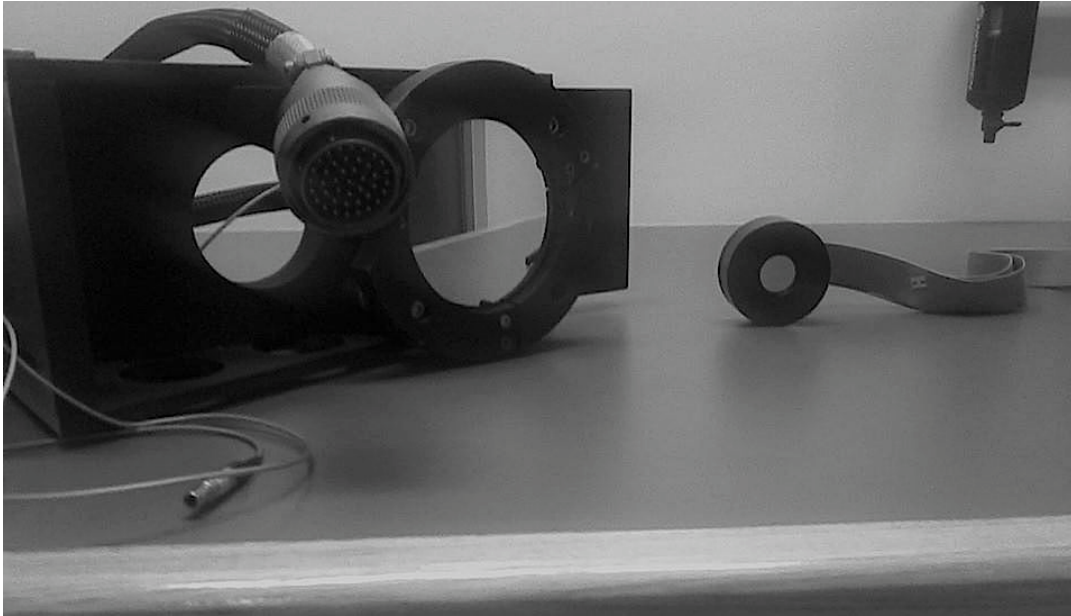


Figura 2.5: Comparación entre el tamaño de los espejos deformables, DM de Guieloa (Izquierda), DM de OAXACA (Derecha).

#### 2.1.4. Detectores

OAXACA posee tres detectores: el *Buscador*, el *Instrumento Científico* y el *Sensor de Frente de Onda*. Sus caminos ópticos son mostrados en las Figuras 2.6, 2.7 y 2.8.

- **Buscador:** Observa la imagen formada por el telescopio sin corrección. Permite encontrar y centrar el objeto a observar.
- **Instrumento científico:** Observa la imagen corregida por el sistema de óptica adaptativa.
- **Sensor de frente de onda:** Mide el frente de onda corregido por el sistema de óptica adaptativa. El sistema de control lo compara con el frente de onda ideal y envía la corrección al espejo articulado y al espejo deformable de acuerdo con las aberraciones que se quieran corregir.

OAXACA se calibra mediante una lámpara, la cual tiene dos fibras (referencia y calibración) que iluminan (cada una) a un *pinhole* dependiendo de la medición que se quiera realizar. La primera fibra (*referencia*) alimenta el WFS al límite de difracción, mientras que la segunda (*calibración*) alimenta el WFS después de recorrer todo el instrumento. Sus caminos ópticos se muestran en las Figuras 2.9 y 2.10 respectivamente.



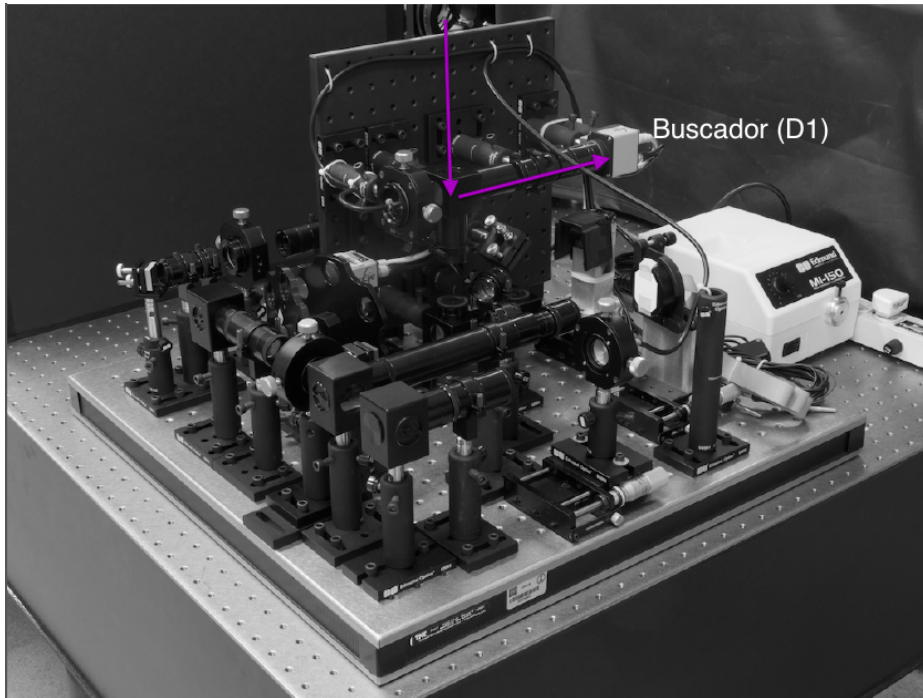


Figura 2.6: Camino de la luz desde el telescopio hasta llegar al Buscador (D1)

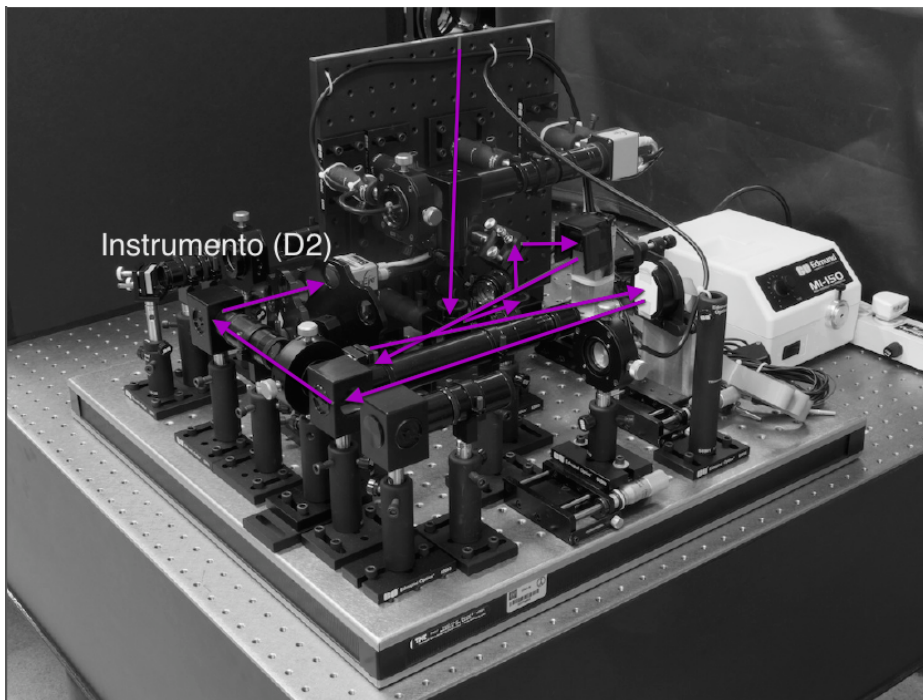


Figura 2.7: Camino de la luz desde el telescopio hasta llegar al Instrumento científico (D2)

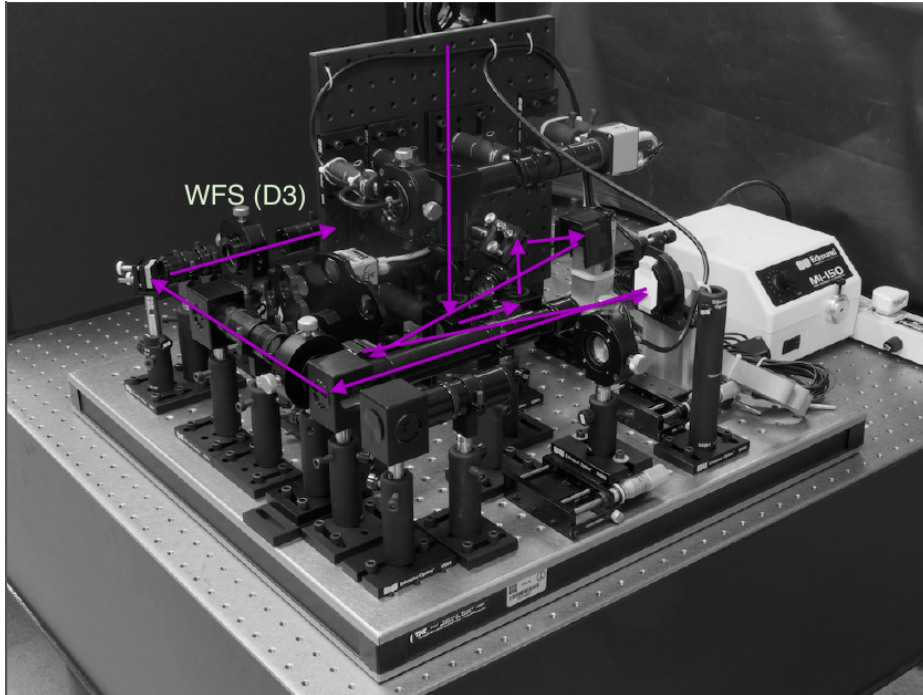


Figura 2.8: Camino de la luz desde el telescopio hasta llegar al Sensor de frente de onda *WFS* (D3)

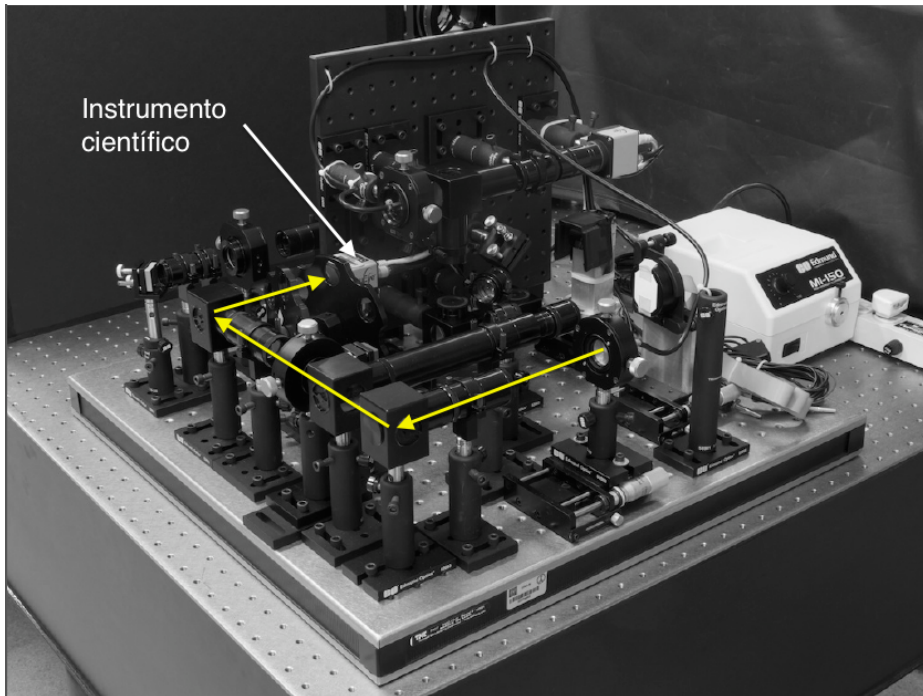


Figura 2.9: Camino óptico de la fibra de referencia.

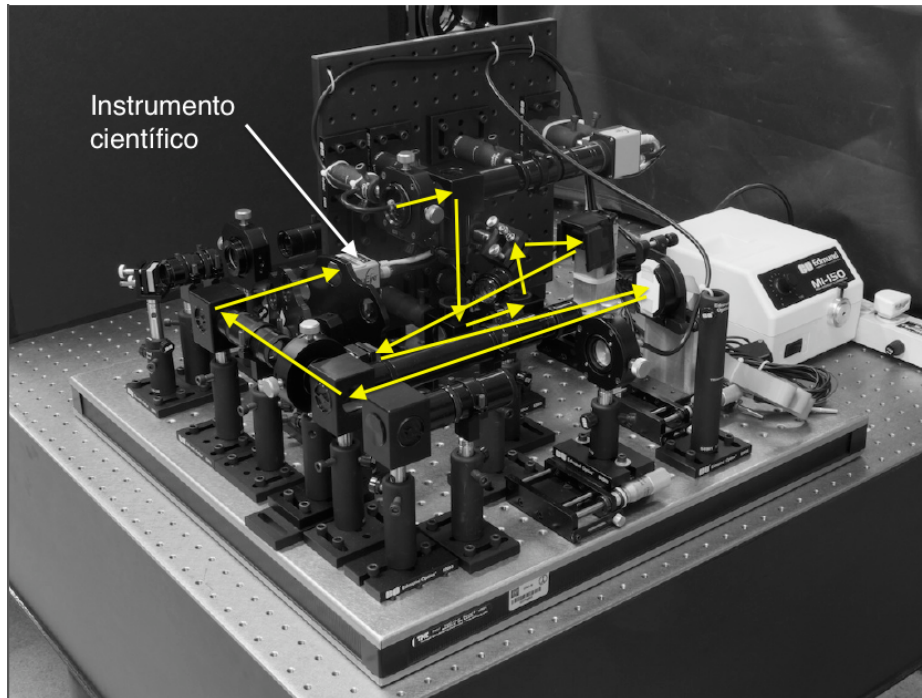


Figura 2.10: Camino óptico de la fibra de calibración.

## 2.2. Especificaciones

- OAXACA, a diferencia de otros sistemas de óptica adaptativa fue construida con componentes comerciales y no hubo que fabricar componentes diseñadas exclusivamente para este proyecto. Además, los detectores que se utilizan son de laboratorio.
- Para un diámetro del telescopio mayor que  $r_0$ , es la turbulencia atmosférica la que limita la resolución (límite por difracción) mientras que para un telescopio con diámetro menor que  $r_0$ , es la óptica del telescopio la que limita (límite por *seeing*). Para estar en el primer caso, se optó por colocar una máscara cuadrada en la óptica del instrumento para disminuir el diámetro final efectivo de  $\phi=1$  m a un área de  $26\text{ cm}\times 26\text{ cm}$ . Ésta es el área del telescopio utilizada en este trabajo.
- OAXACA opera en el intervalo de 700-900 nm y será la longitud de onda a la que se refiera este trabajo.
- La magnitud  $m$  límite que puede observar es muy pequeña ( $m < 1$ ), debido a la sensibilidad y resolución espacial del instrumento. Por este motivo, solo se utilizaron pocas estrellas para las mediciones. Sin embargo, para los metas del sistema, es suficiente.

Hasta el momento, OAXACA ha conseguido corregir aberraciones de tipo *tilt*. Las PSF obtenidas mediante el instrumento científico sin corrección y con corrección se observan en las Fig. 2.11 y 2.12,



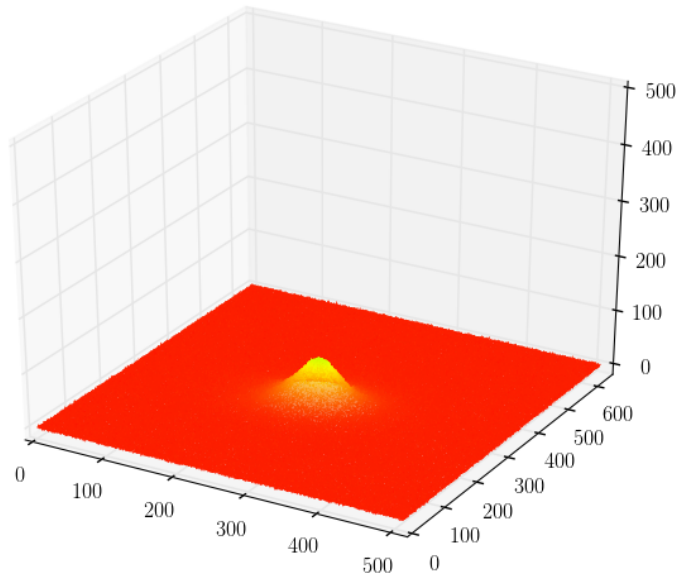


Figura 2.11: PSF obtenida con el instrumento científico sin corrección.

respectivamente.

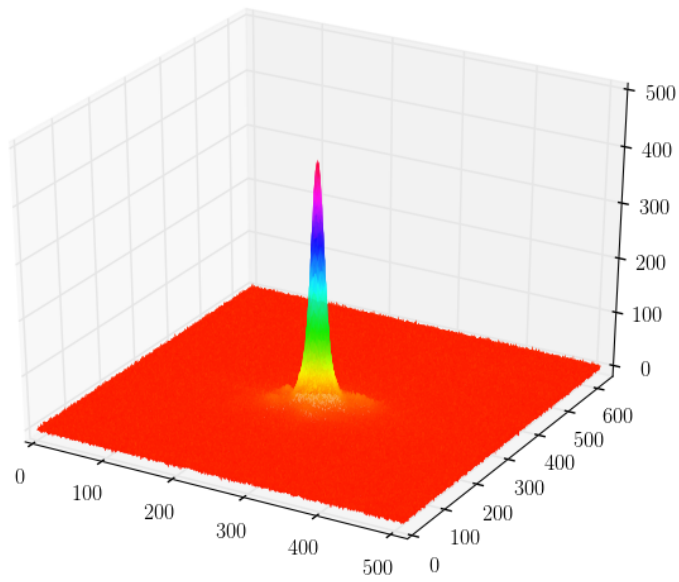


Figura 2.12: PSF obtenida con el instrumento científico con corrección *tip tilt*.



## Capítulo 3

# Metodología

Los datos presentados en esta tesis fueron obtenidos mediante el sistema de control de OAXACA el cual cuenta con la interfaz mostrada en la Fig. 3.1. En esta figura, se puede ver la imagen observada por cada uno de los detectores: D1 (Buscador), D2 (Instrumento científico) y D3 (Sensor de frente de onda *WFS*).

Los parámetros a fijarse en la computadora son los mostrados en la Fig. 3.2. El botón *Configure detector* permitía elegir la frecuencia a la que se toman las mediciones en un rango entre 3 y 500 Hz. El botón *Expose* permite fijar el número de imágenes que se van a capturar. *Expose for Darks* permite fijar el número de imágenes que se toman para encontrar los darks a utilizar. Una vez que se tomen los darks, el promedio de estos es restado en cada imagen tomada posteriormente.

De acuerdo con la medición que se realice, se ajustan estos parámetros. Los resultados obtenidos aparecen en cada instante (Fig. 3.3).

Los datos que se obtienen mediante el sistema de control se guardan en el servidor en formato *FITS* para después ser analizados en *IRAF* o con la paquetería *PYFITS* de Python.

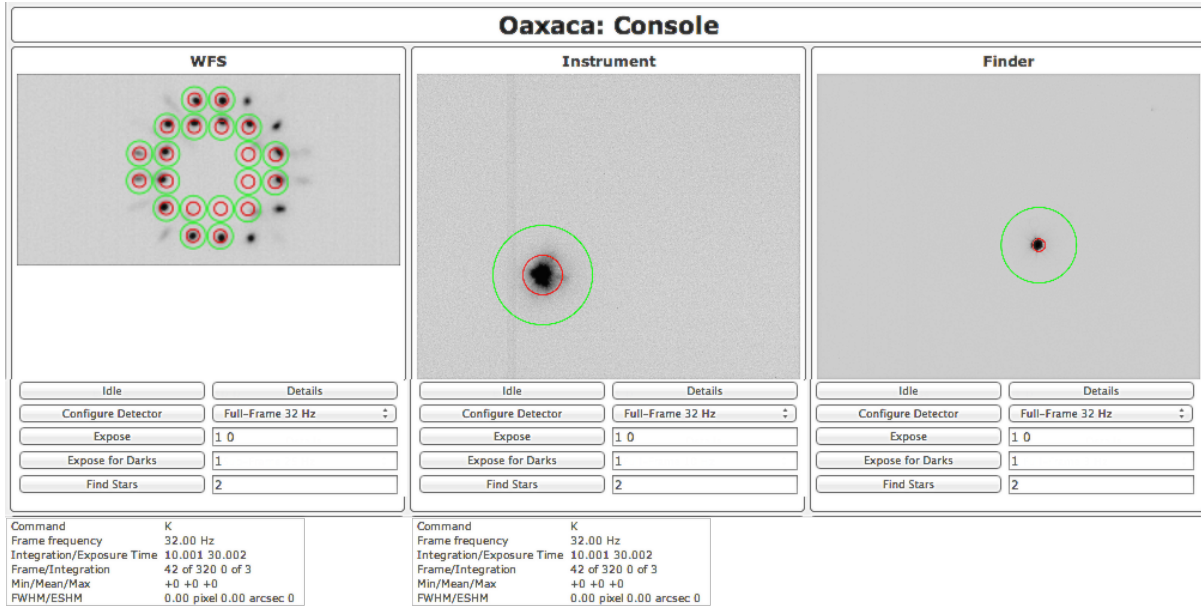


Figura 3.1: Interfaz del sistema de control OAXACA

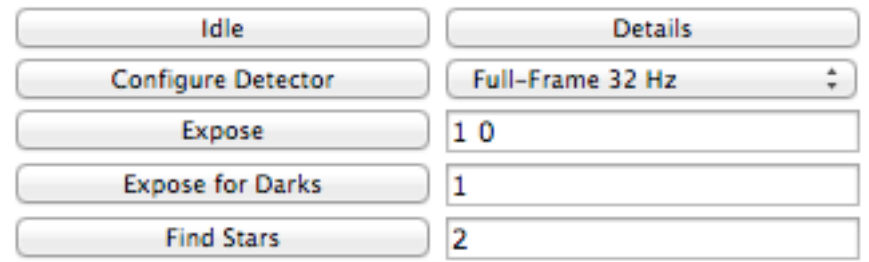


Figura 3.2: Interfaz del sistema de control OAXACA (Parámetros)

Command	K
Frame frequency	a. 32.00 Hz
Integration/Exposure Time	b. 10.001 30.002
Frame/Integration	c. 42 of 320 0 of 3
Min/Mean/Max	d. +0 +0 +0
FWHM/ESHM	e. 0.00 pixel 0.00 arcsec

Figura 3.3: Interfaz del sistema de control OAXACA (Resultados) a. Frecuencia, b. Tiempo de integración y de exposición, c. Iteraciones, d. Valor máximo, promedio y mínimo, e. Valor de FWHM y ESHM (éste parámetro se refiere al área contenida de la curva dada por aquellos pixeles cuya medición es mayor o igual a la mitad del máximo)

## Capítulo 4

# Ganancia y ruido de lectura

En este capítulo se explican las fuentes de ruido de OAXACA, en particular el ruido de lectura (*read noise*) y el factor de ganancia  $g$  para después determinar sus valores.

En cualquier detector, ya sea un CCD o como es el caso de OAXACA, en un detector CMOS, la *señal* ( $S$ ) está definida como la cantidad de información que se puede medir en una imagen, mientras que el *ruido* es la incertidumbre de dicha señal.

El *ruido total* ( $\sigma_T$ ) es la contribución de varias fuentes, entre ellas el *ruido de lectura* (Read Noise  $\sigma_R$ ), el ruido de fotones ( $\sigma_P$ ) y el ruido de corriente oscura (*Darks*  $\sigma_D$ ). El ruido total ( $\sigma_T$ ) está conformado por la raíz de la suma de cada una de esas contribuciones al cuadrado, tal y como se muestra en la ecuación (4.1):

$$\sigma_T^2 = \sigma_R^2 + \sigma_D^2 + \sigma_P^2. \quad (4.1)$$

En la ecuación (4.1), el ruido correspondiente al ruido fotónico  $\sigma_P$  obedece a una distribución de Poisson, por lo que  $\sigma_P^2 = S$ . Así (4.1) queda como:

$$\sigma_T^2 = \sigma_R^2 + \sigma_D^2 + S. \quad (4.2)$$

La ecuación (4.2) está en unidades de electrones ( $e$ ) y lo que se obtiene en las mediciones del instrumento son resultados en unidades digitales (*digital number* o DN), lo cual lleva a introducir un factor de conversión como es el caso de la *ganancia*  $g$ , de tal manera que se pueda ir de electrones a DN de acuerdo con lo que se necesite. De esta manera, se puede reescribir la ecuación (4.2) en términos de número de cuentas (subíndices  $c$ ):

$$g^2 * \sigma_{Tc}^2 = g^2 * \sigma_{Rc}^2 + g^2 * \sigma_{Dc}^2 + g * S_c. \quad (4.3)$$

Despejando la ganancia de (4.3) se obtiene:

$$g = \frac{S_c}{\sigma_{Tc}^2 - \sigma_{Rc}^2 - \sigma_{Dc}^2}. \quad (4.4)$$

Por el tipo de detector utilizado, la ganancia debe permanecer constante aun variando la frecuencia de corrección  $\nu$  mientras que el ruido de lectura puede fluctuar.

El factor correspondiente al ruido de corriente oscura (*Darks*  $\sigma_D$ ) en la ecuación (4.4) puede anularse debido a que depende sobretodo de la temperatura la cual no varía abruptamente durante el tiempo de exposición de las PSFs obtenidas (dicho tiempo es del orden de segundos), produciendo que el término de la corriente oscura sea constante y su ruido correspondiente, pueda ser despreciado. Así, la ecuación (4.4) se reduce a:

$$g = \frac{S_c}{\sigma_{Tc}^2 - \sigma_{Rc}^2}. \quad (4.5)$$

En la medición de la ganancia de OAXACA y del ruido de lectura detectado por el sensor de frente de onda (WFS), se varía la frecuencia  $\nu$ . Haciendo integraciones de 30 segundos por imagen con el telescopio abierto y permitiendo que entrara luz del día, se obtuvieron los datos de la Tabla 4.1.

La variable que se controla mediante el sistema de control es la *frecuencia*  $\nu$  de acuerdo a un rango previamente establecido en el cual se puede operar. Las mediciones de *Señal* y de *Ruido* corresponden al número de cuentas que registra OAXACA para el campo utilizado (cielo abierto sin nubes) en señal y ruido. Para encontrar el ruido de lectura, se tomaron imágenes sin señal. De esta manera, la ecuación (4.2) (con  $\sigma_D=0$ ) queda como:

$$\sigma_T^2 = g^2 * \sigma_{Rc}^2. \quad (4.6)$$

## 4.1. Resultados

En la Tabla 4.1, la columna de *Ganancia* se obtiene mediante la ecuación (4.5), mientras que en la columna correspondiente al ruido de lectura  $\sigma_R$  se aplica la definición de ganancia para la conversión de unidades, es decir, la ecuación (4.6).

Frecuencia $\nu$ (Hz)	Read Noise $\sigma_{Rc}$ (DN)	Señal $S_c$ (DN)	Ruido $\sigma_{Tc}$ (DN)	Ganancia $g$ (e/DN)	Read Noise $\sigma_R$ (e)
3	14.70	3536	54.93	1.26	18.6
10	14.28	3976	60.15	1.16	16.6
25	14.08	1569	37.88	1.27	17.9
50	14.03	6702	79.17	1.10	15.5
100	13.87	3403	53.65	1.27	17.6
200	13.87	1716	39.30	1.27	17.6
300	12.55	1070	31.85	1.25	15.7
400	12.56	798	28.57	1.21	15.2
500	12.54	617	26.24	1.16	14.6

Tabla 4.1: Ganancia y *ruido de lectura* de OAXACA

Al graficar la frecuencia de corrección  $\nu$  vs la ganancia  $g$  y el ruido de lectura de la Tabla 4.1 se obtienen las Fig. 4.1 y Fig. 4.2.

Como se esperaba, la ganancia no depende fuertemente de la frecuencia de corrección. La ganancia promedio obtenida para ese conjunto de frecuencias es:

$$1.22 \text{ e/DN},$$

con una desviación estándar  $\sigma = 0.06$ .

El ruido de lectura decrece ligeramente al aumentar la frecuencia de corrección. Sin embargo, es relativamente pequeño el cambio dentro del rango de frecuencias en las que trabaja el instrumento. Por eso, se puede tomar el valor promedio como el valor característico. El valor es:

$$16.6 \text{ e}^-,$$

Con una desviación estándar  $\sigma = 1.32$ .



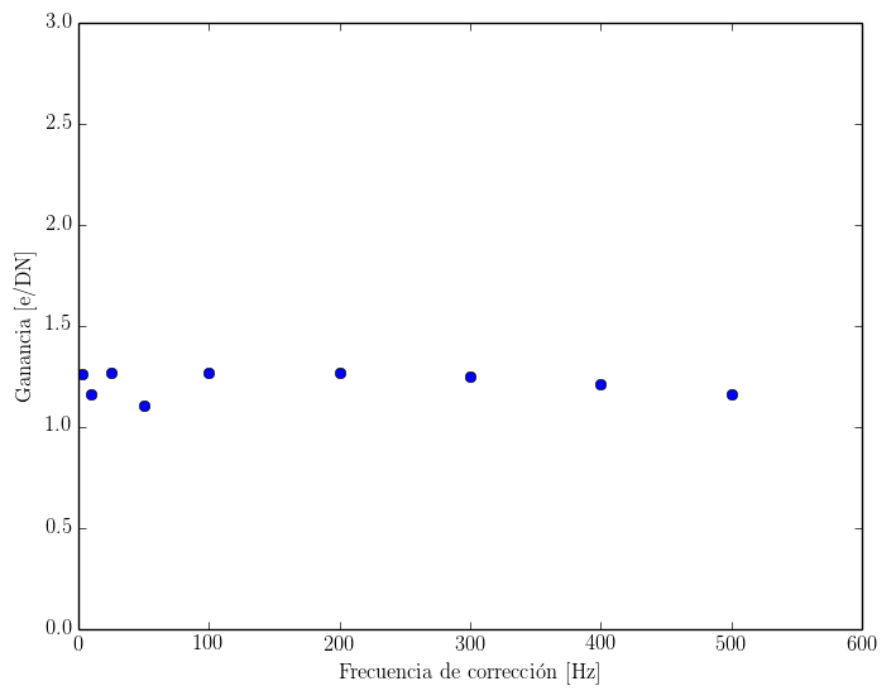


Figura 4.1: Ganancia vs Frecuencia de corrección.

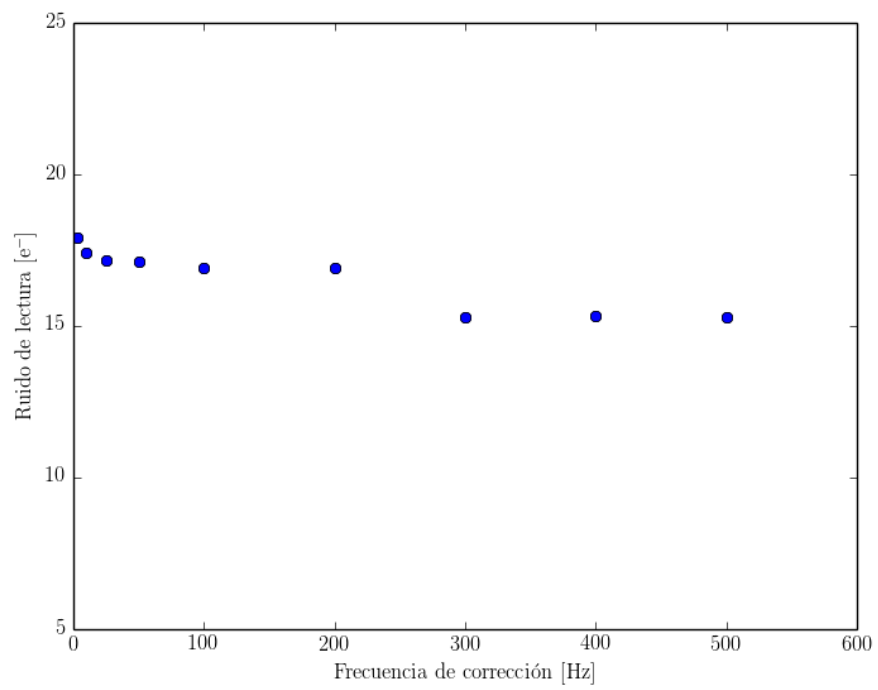


Figura 4.2: *Ruido de lectura* vs Frecuencia de corrección.



## Capítulo 5

# Escala de pixeles de OAXACA

La escala del detector científico es necesaria para poder determinar una relación entre la distancia en pixeles (que se puede medir mediante un software como IRAF [22]) y la distancia angular real en una imagen tomada por dicho detector.

Para encontrar la escala de pixel de OAXACA se obtuvo una imagen del *Trapezio de Orion* (Messier 42) en el detector científico de OAXACA, el cual tiene un tamaño de  $65 \times 60$  arcseg ("). Este sistema está compuesto por cuatro estrellas tal y como se observa en la Fig. 5.1. Estas cuatro estrellas A, B, C, D tienen una magnitud en la banda R (658 nm) mayores a 5, razón por la cual se optó por aumentar el contraste en cada imagen. Esto se consiguió comprimiendo la información de 16 pixeles sobre un eje en un solo pixel en ambas direcciones del sensor (*binning*), de tal forma que cada pixel contiene la información de 256 pixeles reales, logrando que la señal de las estrellas sea mucho mayor que el ruido. De otra forma, la señal de las estrellas sería comparable con el ruido del detector, lo que dificultaría las mediciones.

Las coordenadas de cada estrella, es decir, la ascensión recta **AR** ( $\alpha$ ) y la declinación **DEC** ( $\delta$ ) de las estrellas que conforman el Trapecio de Orión, son las de la Tabla 5.1 siguiendo la asignación de la Fig. 5.1 (tomadas de SIMBAD [35]) .

Al analizar la imagen obtenida con OAXACA mediante el comando *imexam* en IRAF [22], se obtienen las coordenadas en pixeles de cada una de las estrellas (A, B, C, D).

Dado que la distancia angular entre dos estrellas está definida por:

$$\theta = \text{acos}[\cos\delta_1\cos\delta_2\cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \sin\delta_1\sin\delta_2], \quad (5.1)$$

se puede calcular la distancia angular entre cada uno de los pares. Al conocer la distancia en pixeles

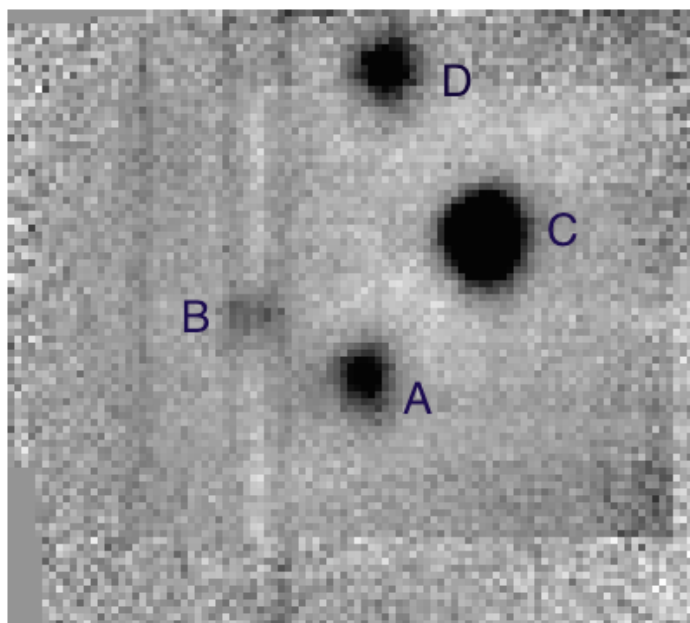


Figura 5.1: Imagen del Trapecio de Orión tomada mediante OAXACA (escala de grises negativa)

Estrella	AR [°]	DEC [°]	X [píxeles]	Y [píxeles]
A	83.8160	-5.38732	52.20	36.00
B	83.8171	-5.38524	35.78	45.54
C	83.8186	-5.38968	69.11	57.16
D	83.8216	-5.38766	55.3	81.02

Tabla 5.1: Posiciones de las cuatro estrellas del Trapecio de Orión.

y la angular, se asocia una escala (cuarta columna de la Tabla 5.2).

Tomando en cuenta que cada una de las imágenes analizadas en la Tabla 5.2 es el resultado de la suma de 16 píxeles reales en cada eje del detector, para conocer la escala real es necesario dividir el promedio de escalas de la Tabla 5.2 entre 16. El resultado es:

$$1 \text{ pixel} = 0.0291 \text{ arcseg}(\prime\prime)$$

con una desviación estándar  $\sigma = 0.0007''$  / pixel.

Par	Distancia [arcseg]	Distancia [píxeles]	Escala [arcseg (")/píxeles]
AB	8.4981	18.6012	0.4568
AC	12.5315	26.4665	0.4735
AD	20.1238	44.3285	0.4540
BC	16.8062	35.2975	0.4761
BD	18.2688	40.4952	0.4511
CD	13.0945	27.5684	0.4750

Tabla 5.2: Distancias en píxeles y arcseg entre las estrellas del Trapecio de Orión



## Capítulo 6

# Eficiencia de OAXACA

En este capítulo se caracteriza la eficiencia de OAXACA en cada uno de los caminos ópticos hacia los tres detectores: buscador (D1), instrumento científico (D2) y sensor de frente de onda (D3) . En la primera parte, el cálculo se realiza de manera teórica. En la segunda parte del capítulo se realiza una medición empírica con la estrella  $\alpha$ -Boo ( $\alpha$ Boo). En la tercera parte se comparan los resultados.

### 6.1. Eficiencia estimada

La eficiencia de un sistema óptico está definida por el cociente entre el número de fotones que entran a un sistema y el número de fotones detectados. Depende de la eficiencia de cada uno de sus componentes (cociente de fotones de salida sobre los de entrada), siendo la eficiencia total el producto de ellas.

Para encontrar la eficiencia teórica de las lentes y filtros se buscaron las especificaciones del fabricante EDMUND [9]. Para el espejo deformable, los datos se obtuvieron del manual de usuario de SATURN [1]. Los recubrimientos de oro (Au) y aluminio (Al) se obtuvieron de LAYERTEC [19]. La eficiencia del arreglo de microlentes del manual de usuario de SÜSS Micro Optics [38]. La eficiencia del detector CMOS (con su ventana) en el manual de usuario de APTINA IMAGING [3]. La eficiencia de la atmósfera se considera constante y la eficiencia del telescopio se obtiene del producto de la eficiencia de los dos espejos con recubrimiento de aluminio. El Apéndice B contiene la eficiencia de cada componente en función de su longitud de onda  $\lambda$ .



<b>Componente</b>	<b>Número</b>	<b>Tipo y/o recubrimiento</b>
Divisor de haz	1	30 %
Lentes	2	2 VIS-NIR
Filtro	1	700 nm short-pass
Detector	1	Detector y ventana (Eficiencia cuántica)
Espejos telescopio	2	Al
Atmósfera		

Tabla 6.1: Componentes desde el telescopio hasta el buscador (D1).

### 6.1.1. Buscador (D1)

En la Fig. 2.6 está representado el camino óptico desde que la luz entra al sistema óptico de OAXACA hasta el buscador (D1). Los componentes ópticos son los enlistados en la Tabla 6.1 y la eficiencia estimada (como producto de las eficiencias de las componentes) para este camino óptico como función de la longitud de onda es la mostrada en la Fig. 6.1

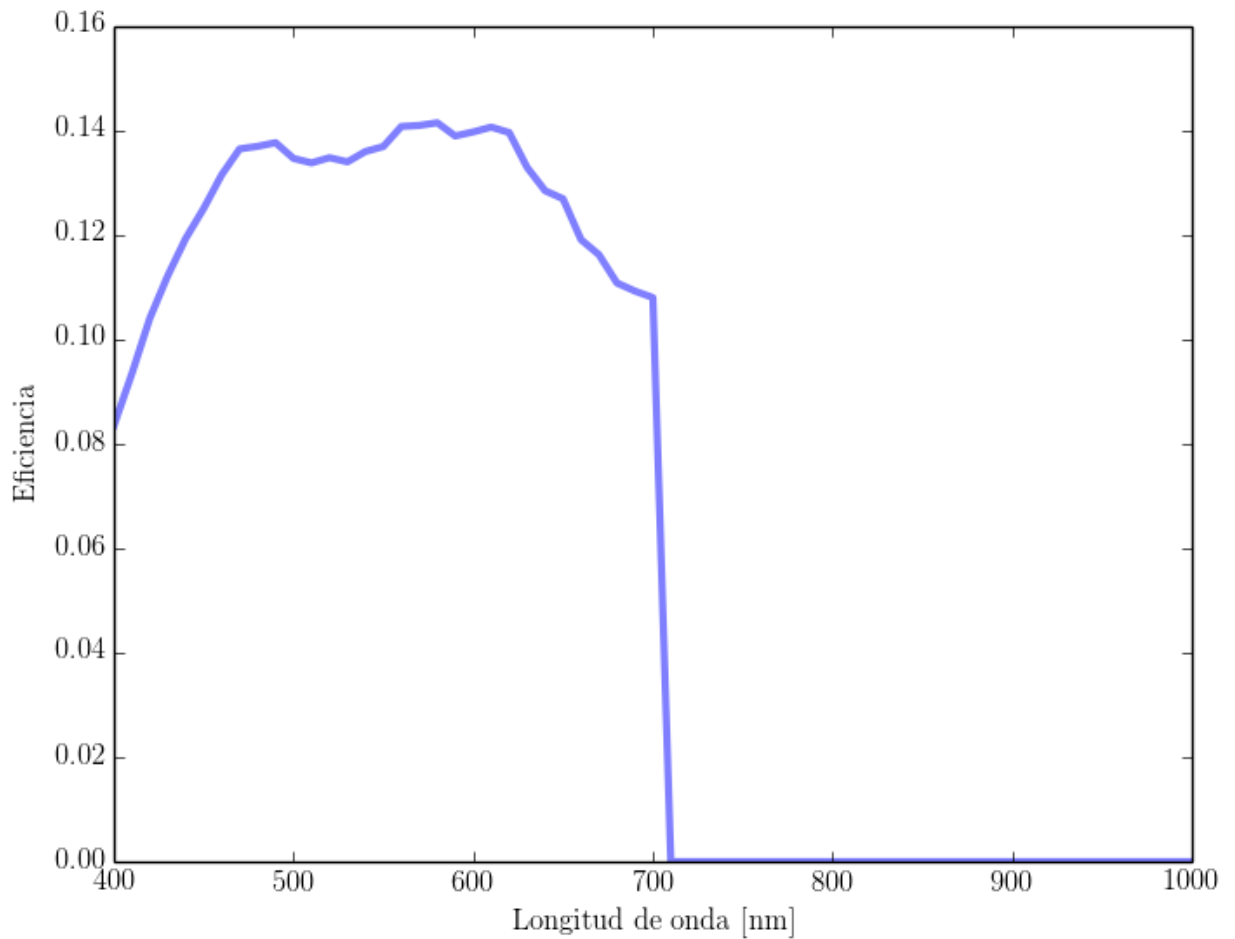


Figura 6.1: Eficiencia del camino óptico que recorre la luz desde que entra al sistema óptico hasta el buscador (**D1**) estimada como producto de las eficiencias de las componentes enlistadas en la Tabla 6.1.

Componente	Número	Tipo y/o recubrimiento
Divisor de haz	3	2 de 70 % y uno 30 %
Espejos	4	2 Au, 2 de Al protegido
TM	1	Au
Lentes	6	6 NIR-II
Espejo deformable	1	Al
Filtro	1	700 nm long-pass
Detector	1	Detector y ventana (Eficiencia cuántica)
Espejos telescopio	2	Al
Atmósfera		

Tabla 6.2: Componentes desde el telescopio hasta el instrumento científico (D2).

### 6.1.2. Instrumento científico (D2)

En la Fig. 2.7 está representado el camino óptico desde que la luz entra al sistema óptico de OAXACA hasta el instrumento científico (D2). Los componentes ópticos son los enlistados en la Tabla 6.2 y la eficiencia estimada (como producto de las eficiencias de las componentes) para este camino óptico como función de la longitud de onda es la mostrada en la Fig. 6.2.

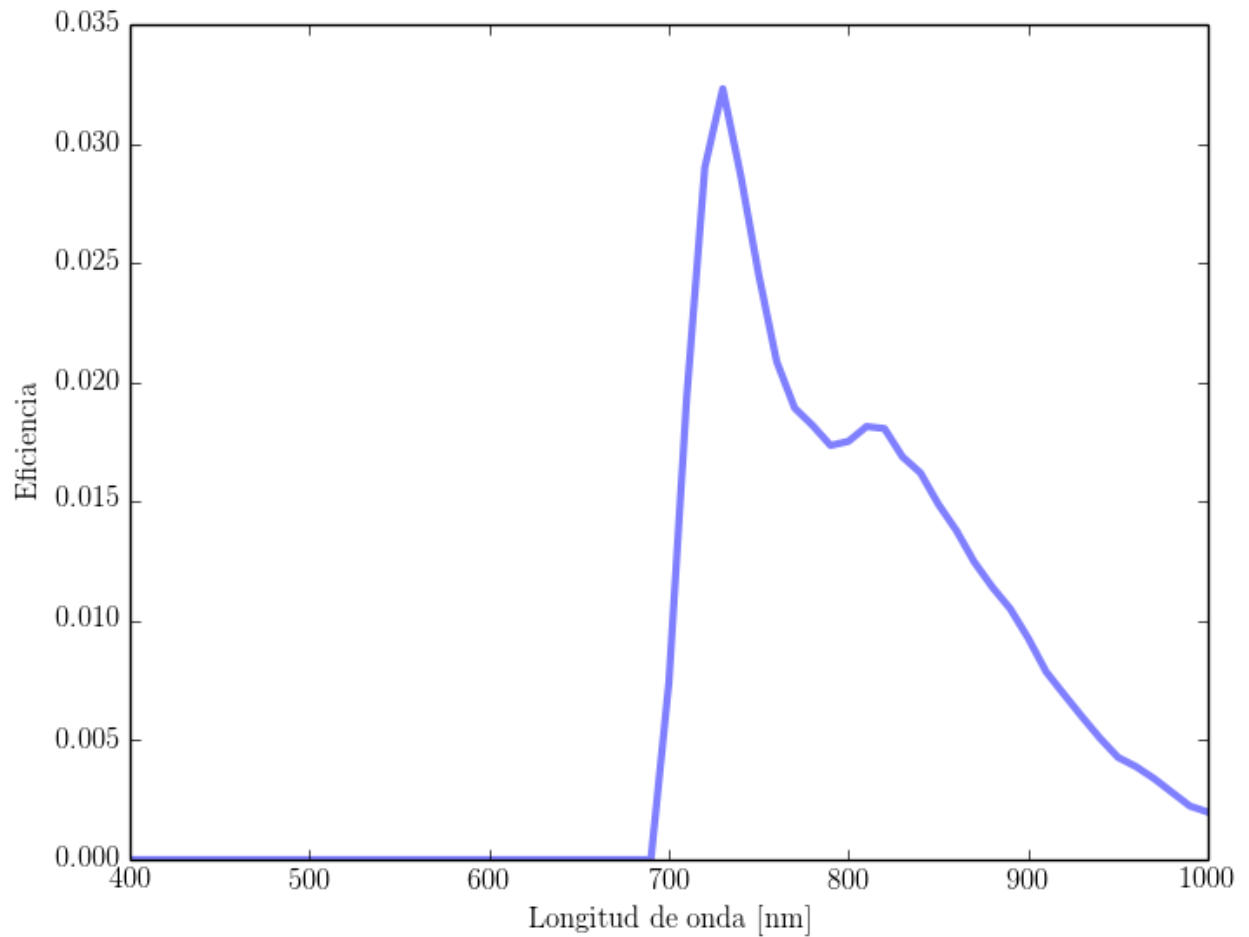


Figura 6.2: Eficiencia del camino óptico que recorre la luz desde que entra al sistema óptico hasta el instrumento científico (**D2**) estimada como producto de las eficiencias de las componentes enlistadas en la Tabla 6.2.

Componente	Número	Tipo y/o recubrimiento
Divisor de haz	3	70% los tres
Espejos	5	2 Au, 3 de Al protegido
TM	1	Au
Lentes	8	6 NIR-II, 3 VIS-NIR
Espejo deformable	1	Al
Filtro	2	700 nm long-pass, 900 short-pass
Arreglo microlentes	1	
Detector	1	Detector y ventana (Eficiencia cuántica)
Espejos telescopio	2	Al
Atmósfera		

Tabla 6.3: Componentes desde el telescopio hasta el WFS (D3).

### 6.1.3. Sensor de frente de onda (WFS) (D3)

En la Fig. 2.6 está representado el camino óptico desde que la luz entra al sistema óptico de OAXACA hasta el WFS (D3). Los componentes ópticos son los enlistados en la Tabla 6.3 y la eficiencia estimada (como producto de las eficiencias de las componentes) para este camino óptico como función de la longitud de onda es la mostrada en la Fig. 6.3.

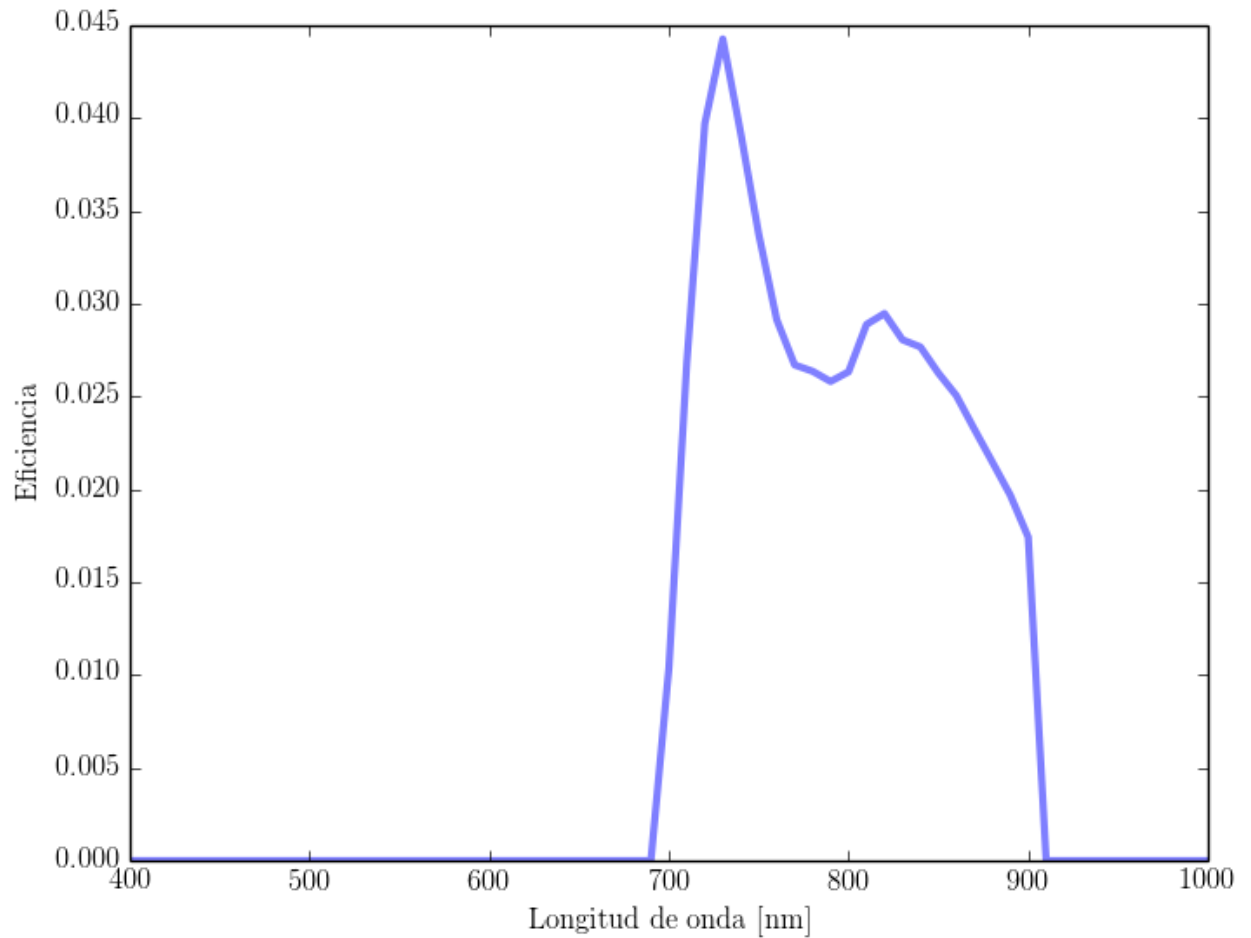


Figura 6.3: Eficiencia del camino óptico que recorre la luz desde que entra al sistema óptico hasta el WFS (**D3**) estimada como producto de las eficiencias de las componentes enlistadas en la Tabla 6.3.

## 6.2. Flujo estimado

Utilizando una estrella, en este caso  $\alpha$ Bootis, se puede conocer el número de cuentas que se espera detectar al conocer su flujo  $F$  (en fotones). La definición de magnitud  $m$  en función de su flujo es:

$$m_0 - m_* = -2.5 \log \left( \frac{F_0}{F_*} \right). \quad (6.1)$$

Donde:

- $F_0$  y  $F_*$  = Flujo de la estrella de referencia y observada respectivamente.
- $m_0$ ,  $m_*$  = Magnitud aparente de la estrella de referencia y observada respectivamente.

Despejando el flujo de la ecuación (6.1)

$$F_* = F_0 * 10^{-0.4(m_* - m_0)}. \quad (6.2)$$

El intervalo de longitudes de onda en el que opera OAXACA es de alrededor de  $\lambda = 700$  hasta  $\lambda = 1000$  nm correspondiente a la *banda R* (sin ningún filtro adicional a los mencionados\*), sin embargo el máximo se encuentra en  $\lambda = 750$ . En esta banda, la estrella de referencia es A0 Vega con  $m_0=0$ ,  $F_0 = 3080$  Jy y la magnitud de  $\alpha$ -Boo es  $m_*=-1.03$  tomados de SIMBAD [35]. Integrando en el área del telescopio  $dA$ , en intervalo de longitudes de onda  $d\lambda$  y en un intervalo de tiempo  $dt$ , multiplicando por la eficiencia del sistema  $Q(\lambda)$  y dividiendo entre la energía de cada uno de los fotones ( $hc/\lambda$ ) con  $h$  la constante de Planck, el número de fotones  $N_*$  es:

$$N_* = \int \int \int \frac{F_* Q(\lambda) d\lambda dt dA}{h\lambda}. \quad (6.3)$$

La integral se evalúa sobre el tiempo de exposición de la imagen para la variable  $t$ . El área  $A$  mide  $26 \text{ cm} \times 26 \text{ cm}$  en el caso del instrumento (D2) y  $13 \times 13 \times \pi \text{ cm}^2$  para el WFS (D3). La diferencia se debe al arreglo de microlentes, el cual solo afecta a D3. Se puede escribir entonces:

$$N_* = At \frac{F_0 * 10^{-0.4m_*}}{h} \int \frac{Q(\lambda) d\lambda}{\lambda}. \quad (6.4)$$

---

\*En diversas ocasiones se usó un filtro de 850 nm short-pass, pero de manera general trabaja en este intervalo

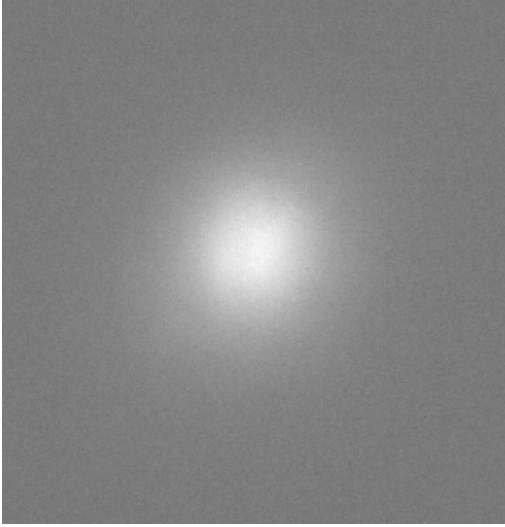


Figura 6.4: Imagen del instrumento OAXACA (sin corrección por OA), estrella  $\alpha$ -Boo, con un diámetro del telescopio  $D=26$  cm.

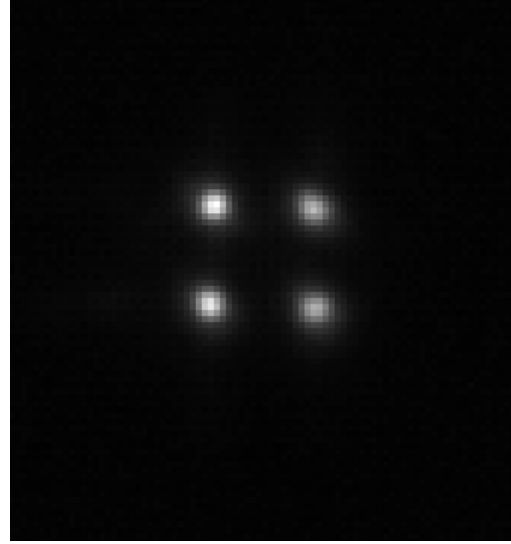


Figura 6.5: Imagen del WFS OAXACA, estrella  $\alpha$ -Boo, con un diámetro del telescopio  $D=26$  cm.

La ecuación (6.4) da como resultado el *número de fotones estimados a detectar*. Dividiendo entre el valor de la ganancia  $g$  (Capítulo 4) se obtiene el *número de cuentas estimadas* (Tabla 6.4).

### 6.3. Flujo real

La noche del 14 de marzo, se observó la estrella  $\alpha$ -Boo. Las PSF obtenidas en el sensor de frente de onda (D3) (Fig 6.5) y del instrumento (D2) (Fig 6.4) se analizaron por medio del comando *imexam* IRAF [22]. Este comando es una herramienta utilizada para encontrar valores de fotometría en imágenes *FITS* tal y como el número de cuentas de una estrella en una apertura previamente definida. Este es el *número de cuentas reales* (DN).

### 6.4. Resultados

Los resultados obtenidos para el *número de cuentas estimadas* ( $N_*$  teórico) y *número de cuentas medidas* ( $N_*$  real) se muestran en la Tabla 6.4.

La pequeña diferencia de  $\approx 25\%$  entre las eficiencias reales y las esperadas para ambos detectores se pueden atribuir a algún elemento en común entre D2 y D3 como la suposición de la eficiencia de la atmósfera, la eficiencia de los recubrimientos de algunos componentes (los cuales pueden tener valores diferentes de eficiencia a los reportados) y la eficiencia de los espejos del telescopio los cuales



---

Detector	$N_*$ estimadas (DN)	$N_*$ medidas (DN)	Diferencia
WFS (D3)	$\approx 69000$	$\approx 51500$	25.3 %
Instrumento (D2)	$\approx 530000$	$\approx 400000$	24.5 %

Tabla 6.4: Número de cuentas estimadas y medidas para  $\alpha$ -Boo.

tienen polvo o la eficiencia del espejo deformable. Sin embargo, mediante este experimento se logra caracterizar la eficiencia de OAXACA.

# Capítulo 7

## Longitud de onda promedio

### 7.1. Longitud promedio $\bar{\lambda}$

Con los resultados del capítulo anterior es posible calcular la longitud de onda promedio  $\bar{\lambda}$  de los fotones que son detectados en el instrumento (D2) como función de la temperatura T de un objeto (suponiendo un comportamiento de cuerpo negro con una radiancia  $F_\lambda(T) = B_\lambda(T)$ ) de acuerdo con:

$$\bar{\lambda} = \frac{d\lambda \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} B_\lambda(T) \lambda^2 Q_{D2}(\lambda)}{d\lambda \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} B_\lambda(T) \lambda Q_{D2}(\lambda)}, \quad (7.1)$$

con:

$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k_B T} - 1}, \quad (7.2)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $k_B$  la constante de Boltzman y  $c$  la velocidad de la luz.

El intervalo de longitud de onda en el que se utilizaba el instrumento científico para obtener datos fue desde  $\lambda_i = 700$  nm hasta  $\lambda_f = 900$  nm (debido a la presencia de un filtro de 900 nm short-pass).

La Fig. 7.1 muestra el comportamiento de la ecuación (7.1) como función de la temperatura.

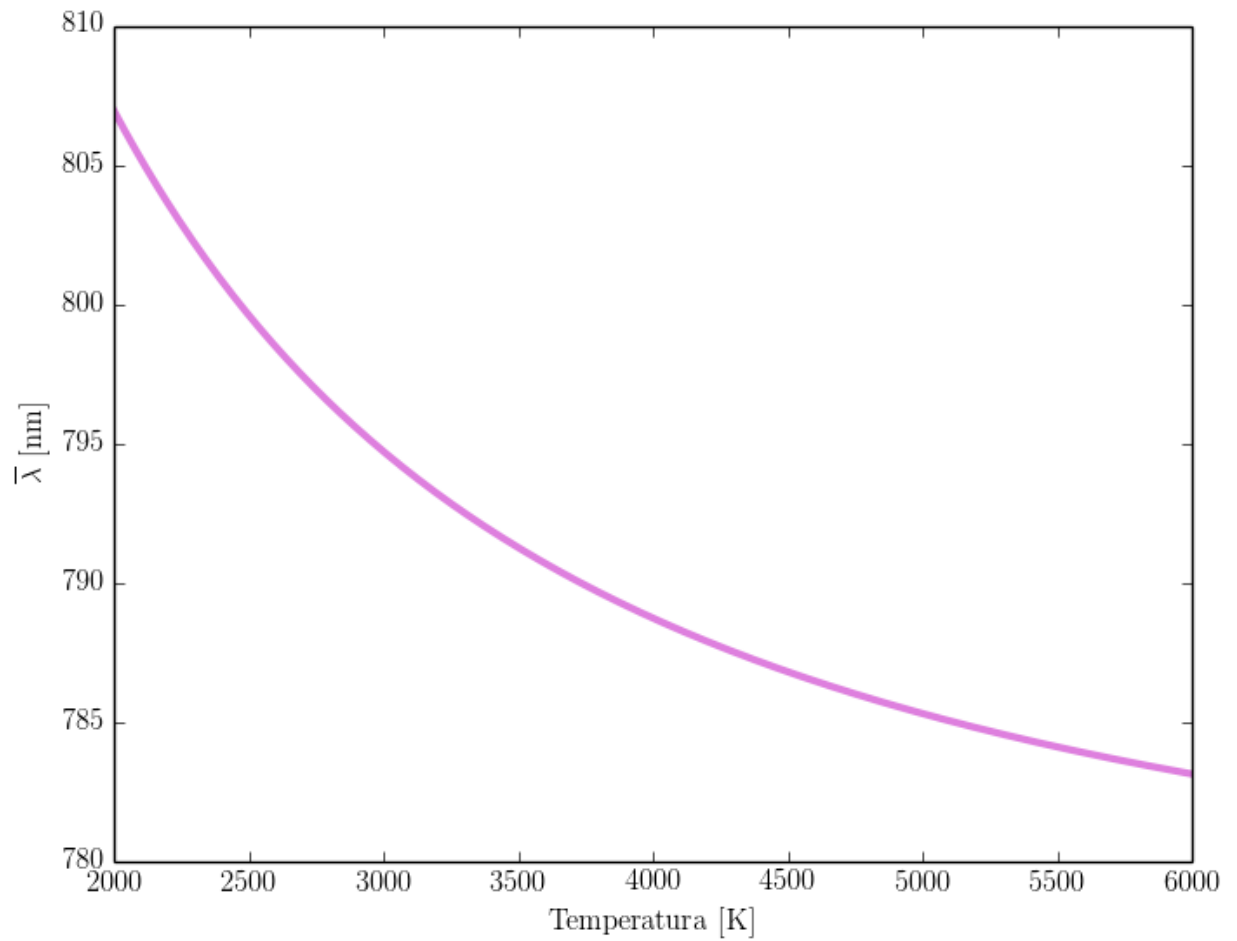


Figura 7.1: Longitud de onda promedio  $\bar{\lambda}$  vs temperatura efectiva  $T$

# Capítulo 8

## Simulaciones

### 8.1. Coeficiente de Strehl

El coeficiente de Strehl  $S$ , es un criterio para determinar la calidad de una imagen. Es el cociente entre el máximo de intensidad de una PSF real y de una PSF ideal bajo los mismos parámetros ópticos. Puede expresarse mediante una aproximación (aproximación generalizada de *Maréchal*), en términos de la estadística en la desviación de fase como:

$$S \approx e^{-\sigma^2}. \quad (8.1)$$

Donde  $\sigma^2$  es la varianza sobre la apertura de la fase ( $\phi$ ) del frente de onda.

### 8.2. Modelo analítico

El *seeing* promedio en todas las noches de observación fue de 2". Usando la ecuación (1.11), para este valor de *seeing*, a una longitud de onda de  $\lambda = 750$  nm con una apertura de telescopio  $D = 26$  cm, el parámetro de Fried es de  $r_0 = 7.74$  cm en esta longitud de onda.

Noll [23] hace un modelo el cual permite encontrar los errores residuales (Tabla 1.1) del frente de onda perturbado por la turbulencia atmosférica después de corregir  $n$  modos (aberraciones de Zernike). OAXACA ha logrado corregir errores de *tilt* lo que corresponde a un grado radial de  $n = 1$ , y una frecuencia azimutal de  $m = 2$  en la formulación de Noll [23].

Del artículo de Noll [23] se calcula el valor de la varianza de fase  $\Delta$  de un sistema óptico con correcciones de *pistón* como:

$$\Delta_1 = \sigma_1^2 \frac{D^{5/3}}{r_0} = 7.149 \text{ rad}^2. \quad (8.2)$$

por lo que el coeficiente Strehl correspondiente (utilizando la aproximación de Maréchal y que  $\sigma^2 = \Delta$ ) es  $S = e^{-\Delta_1} = 0.001$ .

Para un sistema óptico que corrige perfectamente aberraciones de tipo *tilt* (en ambas direcciones) se obtiene que la varianza de fase es:

$$\Delta_3 = \sigma_3^2 \frac{D^{5/3}}{r_0} = 0.930 \text{ rad}^2. \quad (8.3)$$

y el coeficiente Strehl correspondiente es:

$$S_{NOLL} = \mathbf{0.361}.$$

### 8.3. Modelo de YAO

YAO [46] (*Yorick Adaptive Optics*) es una herramienta de simulación programada en *Yorick* que utiliza el método de Monte-Carlo para sistemas de Óptica Adaptativa, con el cual se pueden modelar sensores de frente de onda (WFS), espejos deformables (DM), entre otros componentes de un sistema de OA. Además permite colocar máscaras de pupila de diversas formas, simula ruido fotónico y de lectura. Permite la introducción de los valores de ganancia, tiempo de retraso en correcciones, número de iteraciones, velocidad de las capas turbulentas, velocidad del viento y longitud de onda, entre otros.

Utilizando YAO, se modela un sistema lo más parecido a OAXACA (sin ser el teóricamente ideal de Noll [23]) con el mismo diámetro de apertura del telescopio, corrigiendo las mismas aberraciones (*Tip Tilt*), con la misma frecuencia de corrección (500 Hz), a una longitud de onda  $\lambda$ , con el parámetro de Fried  $r_0$ , usando la misma magnitud para la estrella de referencia usada en la realidad ( $\alpha$ Boo) y con el sensor de frente de onda Shack Hartmann. La interfaz de YAO es como la mostrada en el Fig 8.1.

La variable en las simulaciones para cada ocasión fue el parámetro de Fried  $r_0$ . YAO muestra en su interfaz la PSF tomada con un instrumento con las características antes establecidas, el patrón del frente de onda, el coeficiente Strehl  $S$  en la longitud de onda dada (750 nm), el residuo de frente de onda y la forma que adopta el espejo deformable para corregir las aberraciones (Apéndice C). Al

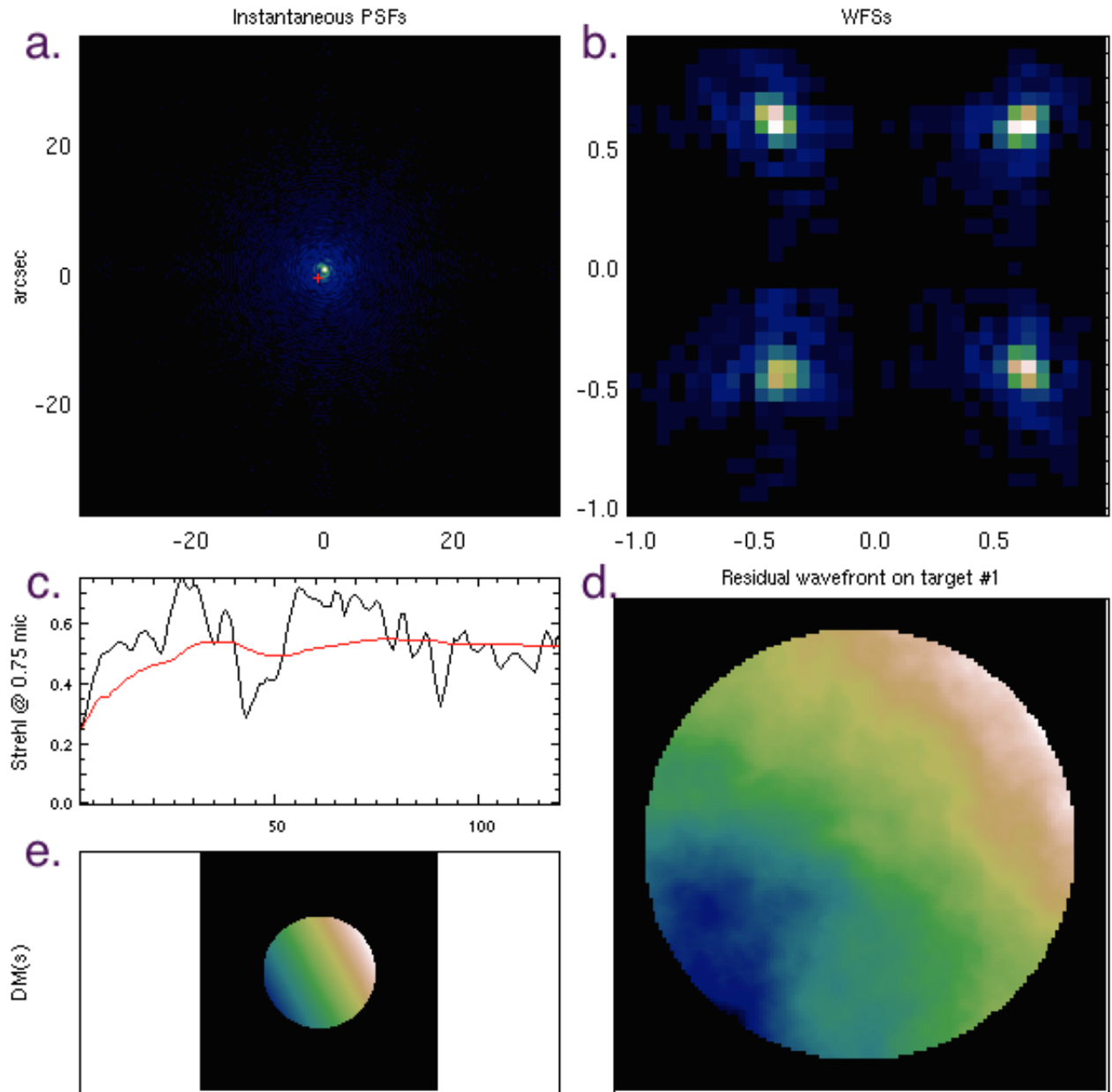


Figura 8.1: Interfaz YAO: a. PSF, b. WFS, c. Coeficiente Strehl a la longitud de onda seleccionada (en este caso 750 nm) vs iteraciones, d. Residuo de frente de onda, e. Espejo deformable.

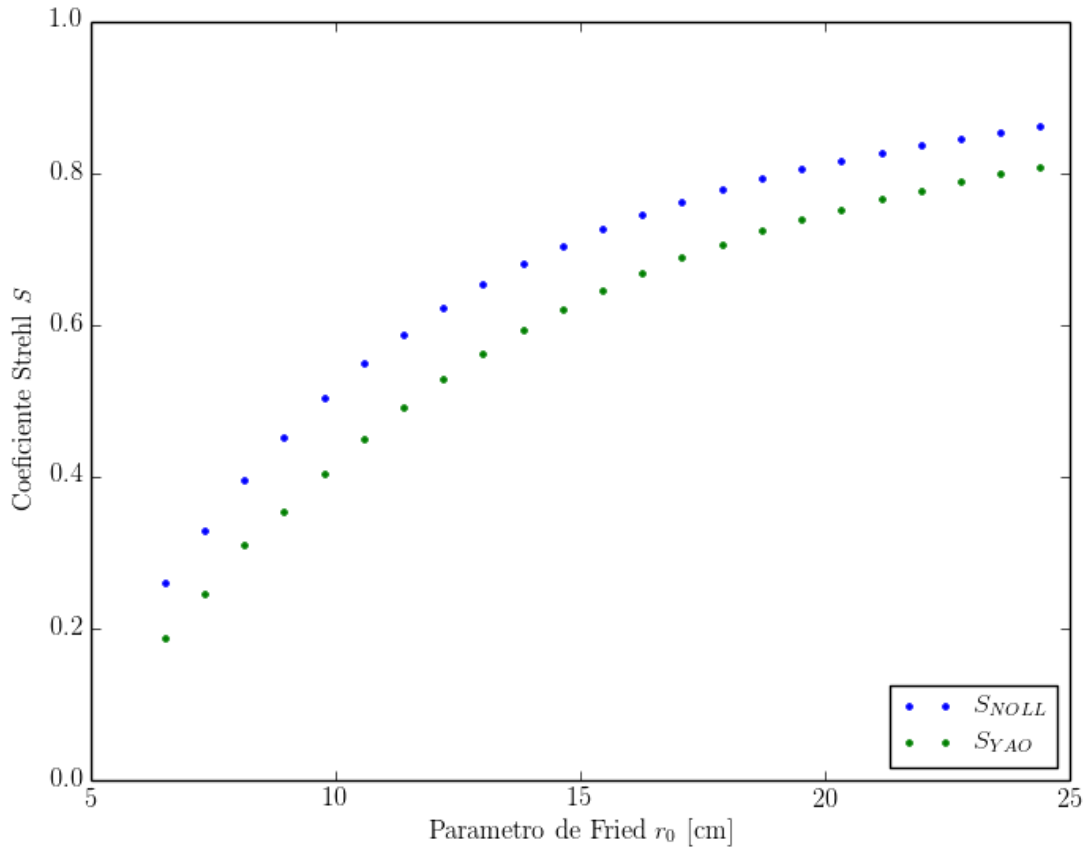


Figura 8.2: Gráfica comparativa entre el coeficiente Strehl predicho por Noll ( $S_{NOLL}$ ) y el obtenido mediante las simulaciones en YAO ( $S_{YAO}$ ).

completar las iteraciones, YAO muestra en la pantalla de la computadora el valor de  $S$  promedio. Ese es el valor de Strehl reportado.

Se varía  $r_0$  alrededor de 7.74 cm para calcular el coeficiente  $S$  correspondiente en YAO y compararlo con el teórico (Noll [23]). Estos resultados se encuentran en la Tabla 8.1 y de manera gráfica en la Fig. 8.2:

La Fig. 8.2 muestra un comportamiento cualitativamente parecido entre las simulaciones en YAO y lo predicho por Noll [23], sin embargo, las cantidades no son parecidas.

Para el caso específico de OAXACA, a una longitud de onda  $\lambda = 750$  nm, con una apertura de 26 cm  $\times$  26 cm y un parámetro de Fried  $r_0 = 7.74$  cm (en esta longitud de onda), el Strehl ideal es de

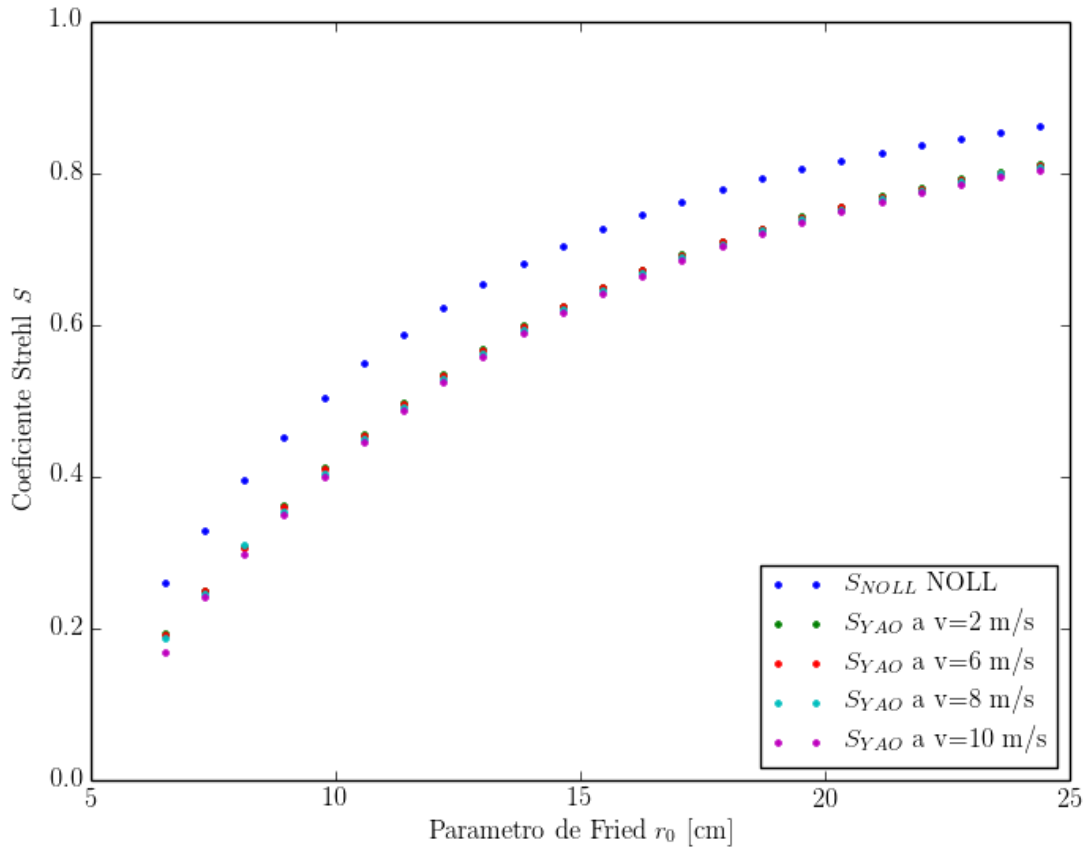


Figura 8.3: Gráfica comparativa entre el coeficiente Strehl predicho por Noll y el obtenido mediante las simulaciones en YAO al variar la velocidad del viento.

$S_{NOLL} = 0.363$ , mientras que el simulado por YAO es de:

$$S_{YAO} \approx \mathbf{0.3}.$$

La diferencia es mayor a lo esperado, por lo que se optó por investigar el efecto de la velocidad del viento en  $S$ . Se fijó la velocidad del viento  $v$  en 2, 6, 8 y 10 m/s repitiendo las simulaciones para cada uno de los  $r_0$ . Los resultados están mostrados en la Tabla 8.1.

La Fig. 8.3 muestra que al variar la velocidad del viento no se observa cambio significativo. Para entender eso, se calcula la frecuencia necesaria de corrección como función de  $r_0$  y de la velocidad del viento de acuerdo con Roddier [30] (ecuación 1.10), es decir, *la frecuencia de Greenwood*  $\nu_0$ . Los resultados se muestran en la Tabla 8.2.



De manera cualitativa se puede observar que mientras más rápido se mueva la turbulencia, el frente de onda debe ser corregido más rápido. Sin embargo, en todos los casos de las simulaciones que se realizaron, la frecuencia de corrección fue mayor que la frecuencia de Greenwood, razón por la cual, el valor de  $S$  no mejoró.

#### 8.4. Comentarios

La velocidad en la que OAXACA puede corregir (500 Hz) supera todas las frecuencias de Greenwood ( $\nu_0$ ) de la Tabla 8.2. La frecuencia de Greenwood máxima se alcanza a la mayor velocidad del viento. En estas simulaciones, la velocidad límite fue de 10 m/s. Al superar los 30 km/h (8.3 m/s) en el telescopio, es imposible seguir trabajando.

Aún sin ruido y sin errores de retraso, YAO no es capaz de reproducir mejor el valor del coeficiente Strehl calculado por Noll [23]. Se sospecha que dicha discrepancia es debida a la manera en la que YAO calcula las correcciones.

En el siguiente capítulo, se explica el análisis de las imágenes obtenidas por OAXACA para encontrar el coeficiente de Strehl del instrumento y compararlo con el resultado de estas simulaciones.

$r_0$ a 750 nm cm	$S$ Teórico Noll	$S_{YAO}$ a 2 m/s	$S_{YAO}$ a 6 m/s	$S_{YAO}$ a 8 m/s	$S_{YAO}$ a 10 m/s
6.507	0.260	0.193	0.191	0.187	0.169
7.320	0.330	0.251	0.249	0.245	0.241
8.134	0.395	0.308	0.306	0.310	0.297
8.947	0.452	0.362	0.360	0.355	0.351
9.760	0.504	0.412	0.410	0.405	0.401
10.574	0.549	0.457	0.455	0.451	0.446
11.387	0.588	0.498	0.496	0.492	0.488
12.200	0.623	0.535	0.534	0.530	0.525
13.014	0.654	0.569	0.567	0.563	0.559
13.827	0.681	0.599	0.598	0.594	0.590
14.640	0.705	0.626	0.625	0.621	0.617
15.454	0.727	0.651	0.650	0.646	0.642
16.267	0.746	0.673	0.672	0.668	0.665
17.080	0.763	0.693	0.692	0.689	0.685
17.894	0.779	0.711	0.710	0.707	0.704
18.707	0.793	0.728	0.727	0.724	0.721
19.520	0.806	0.743	0.742	0.739	0.736
20.334	0.817	0.757	0.756	0.753	0.750
21.147	0.828	0.770	0.769	0.766	0.763
21.961	0.837	0.781	0.780	0.778	0.775
22.774	0.846	0.793	0.791	0.789	0.786
23.587	0.854	0.803	0.801	0.799	0.796
24.401	0.862	0.812	0.810	0.808	0.805

Tabla 8.1: Coeficiente de Strehl teórico ( $S_{NOLL}$ ) y simulado mediante YAO ( $S_{YAO}$ ) para  $\lambda=750$  nm y  $D=26$  cm al variar la velocidad del viento.

$r_0$ [cm]	2 m/s	6 m/s	8 m/s	10 m/s
6.507	97.9	293.7	391.6	489.4
7.320	87.0	261.0	348.0	435.1
8.134	78.3	234.9	313.2	391.6
8.947	71.2	213.6	284.8	356.0
9.760	65.3	195.8	261.0	326.3
10.574	60.2	180.7	241.0	301.2
11.387	55.9	167.8	223.7	279.7
12.200	52.2	156.6	208.8	261.0
13.014	48.9	146.8	195.8	244.7
13.827	46.1	138.2	184.3	230.3
14.640	43.5	130.5	174.0	217.5
15.454	41.2	123.6	164.9	206.1
16.267	39.2	117.5	156.6	195.8
17.080	37.3	111.9	149.2	186.5
17.894	35.6	106.8	142.4	178.0
18.707	34.0	102.1	136.2	170.2
19.520	32.6	97.9	130.5	163.1
20.334	31.3	94.0	125.3	156.6
21.147	30.1	90.4	120.5	150.6
21.961	29.0	87.0	116.0	145.0
22.774	28.0	83.9	111.9	139.8
23.587	27.0	81.0	108.0	135.0
24.401	26.1	78.3	104.4	130.5

Tabla 8.2: Frecuencias de Greenwood  $\nu_0$  (en Hz) de corrección necesarias con  $r_0$  y a una longitud de onda  $\lambda = 750$  nm.

## Capítulo 9

# Función de dispersión puntual (PSF)

En este capítulo se hace una descripción de las PSF tomadas por OAXACA. En la segunda parte se describe el procedimiento para simular la PSF de una estrella y de la lámpara de calibración. En la tercera parte se calculan los coeficientes Strehl  $S$  de cada una de estas fuentes.

### 9.1. Función de dispersión puntual (PSF)

La función de dispersión puntual o  $PSF$  de un sistema óptico es la distribución de irradiancia producida en el espacio imagen por una fuente puntual. Matemáticamente puede expresarse mediante:

$$Imagen(I) = Objeto(O) * PSF. \quad (9.1)$$

Donde  $*$  representa el operador *convolución*, es decir:

$$I(x, y) = \int \int PSF(u, v) O(u, v) du dv. \quad (9.2)$$

Para un objeto puntual  $O(u, v) = \delta(u - u_0)\delta(v - v_0)$  donde  $\delta$  es la función *Delta de Dirac*. Por lo tanto, la ecuación 9.2 se reduce a:

$$I(x, y) = \int \int PSF(u_0, v_0). \quad (9.3)$$

### 9.2. PSF real

La noche del 14 de marzo de 2014 se obtuvieron los mejores resultados. Las PSF sin corrección (Fig. 9.1) tienen un *seeing*  $\approx 2.0''$  de FWHM (Fig. 9.2). Al corregir aberraciones tipo *tilt*, las PSF obtenidas son como la mostrada en la Fig. 9.3 con un FWHM de  $0.63''$  (Fig. 9.4).

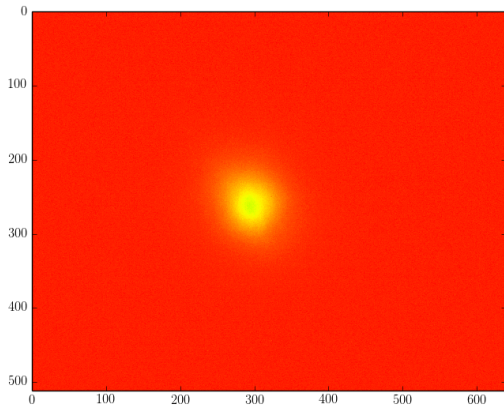


Figura 9.1: PSF de la estrella  $\alpha$ -Boo (sin corrección) .

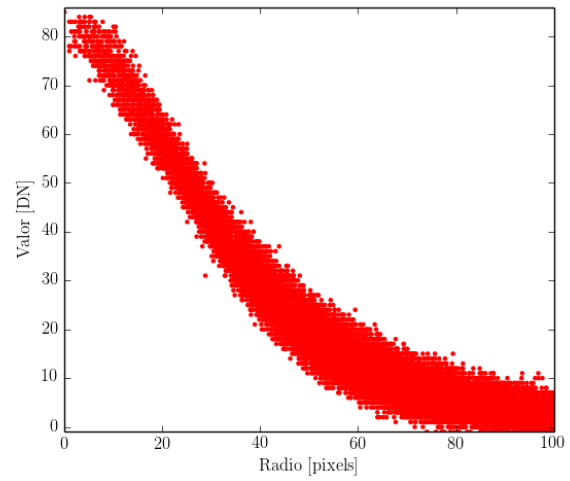


Figura 9.2: PSF de la estrella  $\alpha$ -Boo (sin corrección), perfil radial.

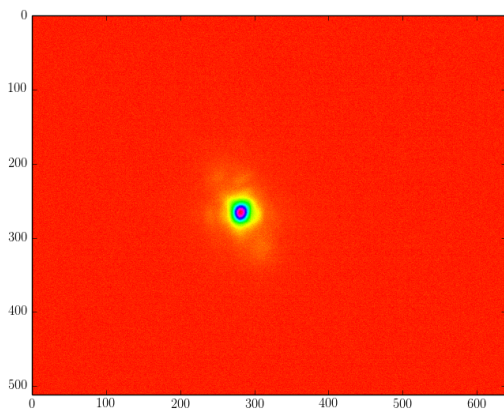


Figura 9.3: PSF de la estrella  $\alpha$ -Boo (con corrección) .

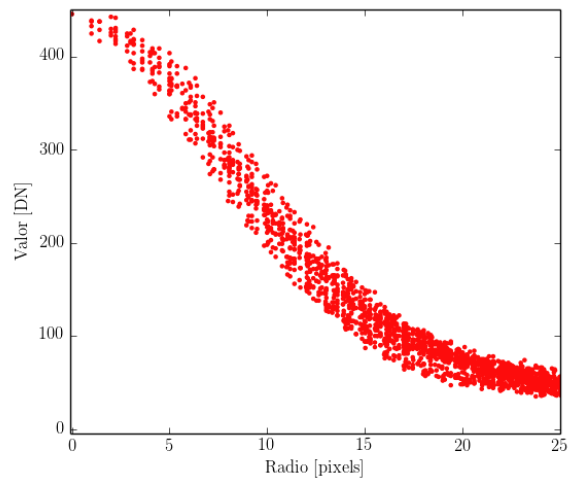


Figura 9.4: PSF de la estrella  $\alpha$ -Boo (con corrección), perfil radial.

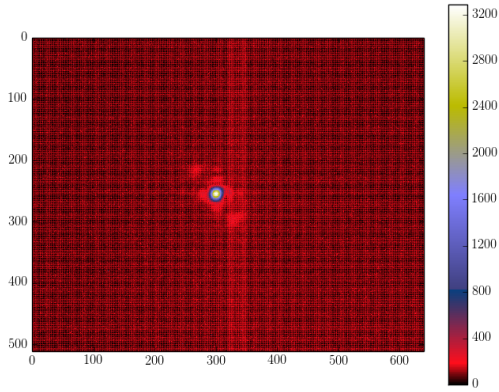


Figura 9.5: PSF de calibración.

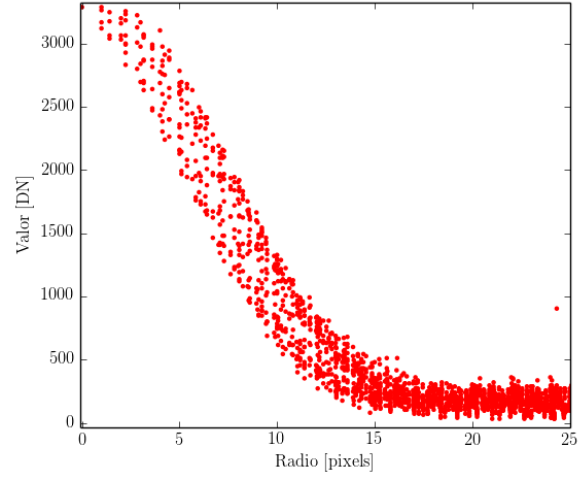


Figura 9.6: PSF de calibración, perfil radial.

OAXACA también obtiene la PSF de calibración mediante la lámpara con la fibra de calibración (Fig. 2.10). La PSF de calibración se muestra en la Fig. 9.5, con perfil radial en la Fig. 9.6, respectivamente.

En estas imágenes de PSF es posible observar el patrón de difracción; cabe señalar que dicho patrón no es circular, debido a que la máscara utilizada es cuadrada.

### 9.3. PSF Ideal

La PSF ideal del instrumento se simula utilizando los parámetros del instrumento científico OAXACA; es decir, un telescopio con una apertura cuadrada de  $D = 26 \text{ cm} \times 26 \text{ cm}$  y a una longitud de onda  $\lambda = 790 \text{ nm}$  (esta es la longitud de onda promedio  $\bar{\lambda}$  de los fotones emitidos por un cuerpo negro a la temperatura efectiva de  $\alpha$ -Boo, 4300 K, Capítulo 7, Fig. 7.1). Esta apertura tiene un patrón definido por una función *sinc* dada por:

$$PSF(x, y) = \text{sinc}^2(x/\pi a) \times \text{sinc}^2(y/\pi a) = \left[ \frac{\sin(x/(\pi a))}{x/(\pi a)} \right]^2 \times \left[ \frac{\sin(y/(\pi a))}{y/(\pi a)} \right]^2. \quad (9.4)$$

Donde  $a$  es la resolución angular del sistema,  $a = \frac{\lambda}{D}$ .

$$a = \frac{\lambda}{D} = \frac{790 \text{ nm}}{26 \text{ cm}} = 3.52 \times 10^{-6} \text{ radianes} = 0.62''. \quad (9.5)$$

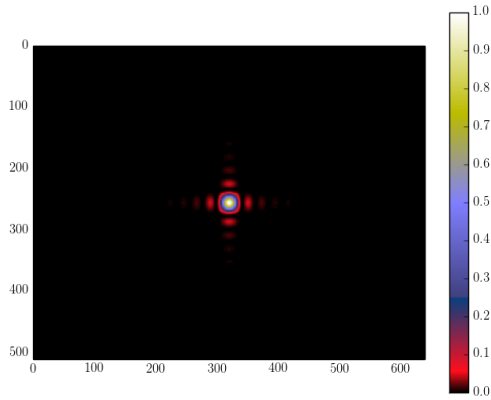


Figura 9.7: PSF simulada a 790 nm.

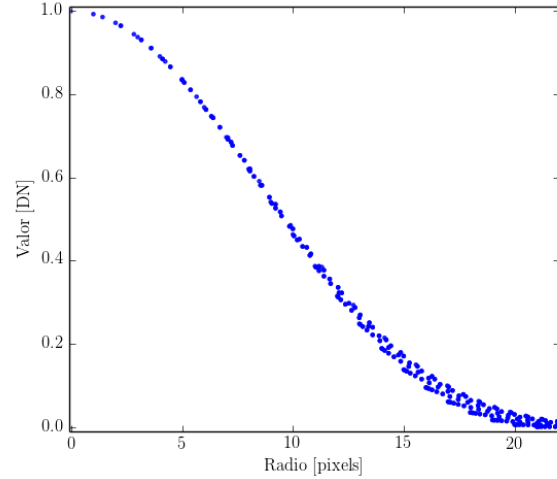


Figura 9.8: PSF simulada a 790 nm, perfil radial.

Usando la escala del Capítulo 5, la resolución angular de esta máscara cuadrada es de 21.5 píxeles. Con esta información se simula la PSF que se muestra en la Fig. 9.7, con el perfil radial de la Fig. 9.8, la cual es una imagen FITS del mismo tamaño (en píxeles) y con valor en cada par de puntos  $(x, y)$  de acuerdo con:

$$PSF(x, y) = \left[ \frac{\sin(x/(\pi \cdot 21.5))}{x/(\pi \cdot 21.5)} \right]^2 \times \left[ \frac{\sin(y/(\pi \cdot 21.5))}{y/(\pi \cdot 21.5)} \right]^2. \quad (9.6)$$

Para el caso de la lámpara de calibración, la PSF ideal es distinta debido a que su temperatura es de 3200 K (de acuerdo con el fabricante EDMUND [10]); por lo tanto, su longitud de onda promedio de emisión es de  $\bar{\lambda}=800$  nm (Capítulo 7, Fig. 7.1).

Así, la PSF ideal de la lámpara de calibración se simula con una función *sinc* con valor en cada par de puntos dada por:

$$PSF(x, y) = \left[ \frac{\sin(x/(\pi \cdot 21.8))}{x/(\pi \cdot 21.8)} \right]^2 \times \left[ \frac{\sin(y/(\pi \cdot 21.8))}{y/(\pi \cdot 21.8)} \right]^2. \quad (9.7)$$

Donde el valor 21.8 es la resolución angular del sistema (en píxeles) calculada con la ecuación (9.5) (Fig. 9.9 y 9.10).

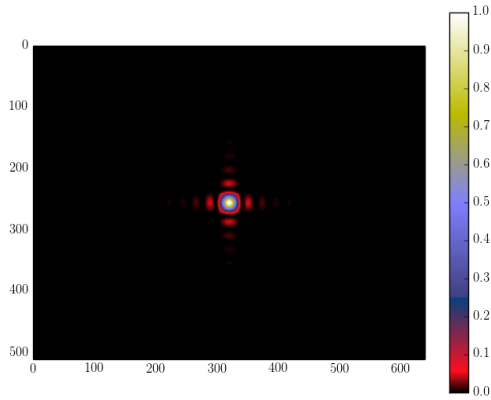


Figura 9.9: PSF simulada a 800 nm.

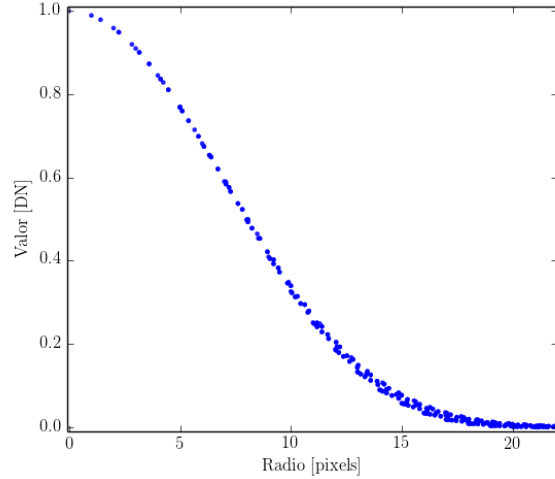


Figura 9.10: PSF simulada a 800 nm, perfil radial.

## 9.4. Resultados

El calculo del coecifiente Strehl  $S$  se realiza mediante el cociente entre los máximos en la intensidad ( $M$ ) y las cuentas totales ( $T$ ) de las PSF reales ( $PSF_{real}$ ) y las PSF simuladas  $PSF_{simulada}$  de acuerdo con:

$$S = \frac{M_{PSF_{real}}/T_{PSF_{real}}}{M_{PSF_{simulada}}/T_{PSF_{simulada}}}. \quad (9.8)$$

Los valores de  $M$  y  $T$  se obtienen utilizando el comando *imexam* de IRAF para una misma apertura en todos los casos.

El resultado de los coeficientes de Strehl  $S$  del instrumento sin correccion ( $S_{\alpha-Boosc}$ ) a 790 nm y con corrección ( $S_{\alpha-Boocc}$ ) a 790 nm son

$$\begin{aligned} S_{\alpha-Boosc} &= \mathbf{0.075.} \\ S_{\alpha-Boocc} &= \mathbf{0.394.} \end{aligned}$$

El coeficiente Strehl de la lámpara de calibración a 800 nm es  $S_{cal}=0.914$ ; sin embargo, para tener consistencia en la longitud de onda a la que se reportan los valores, este coeficiente se calcula también a  $\lambda = 790$  nm. Esto se logra haciendo la suposición de que la variación en la fase  $\sigma$  producida por una



diferencia de camino óptico  $\Delta$  (con  $\sigma = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}$ ), entre la lámpara de calibración y la del instrumento científico no depende de la longitud de onda, de manera que:

$$(790nm) \times (\sigma_{790nm}) = (800nm) \times (\sigma_{800nm}). \quad (9.9)$$

Usando el hecho de que  $S = e^{-\sigma^2}$  (de acuerdo con la aproximación generalizada de Maréchal), para  $\lambda = 800$  nm se despeja  $\sigma$  del valor de Strehl obtenido anteriormente para la lámpara de calibración  $S_{cal}=0.914$ , dando como resultado  $\sigma_{800}=0.299$ . Sustituyendo este valor en la ecuación (9.9) se obtiene que  $\sigma_{790}=0.304$ , lo cual da un coeficiente Strehl a 790 nm de:

$$S_{cal}=\mathbf{0.912}.$$

Por otro lado, en términos de los coeficientes Strehl, se debe de cumplir:

$$S_{\alpha-Boooc} = S_{NOLL} \times S_{cal}, \quad (9.10)$$

ya que el valor  $S_{cal}$  es el coeficiente Strehl de la mejor calidad de imagen que se puede obtener con el instrumento y  $S_{NOLL}$  da el coeficiente Strehl de la máxima corrección posible para un instrumento de acuerdo con las aberraciones que se corrijan con él.

El coeficiente de Strehl  $S_{NOLL}$  es el valor calculado para un sistema con una longitud de onda  $\lambda = 790$  nm, con una apertura de  $26 \text{ cm} \times 26 \text{ cm}$  y un parámetro de Fried  $r_0 = 8.14$  cm (en esta longitud de onda), de correcciones tipo *tip tilt* de acuerdo con el artículo de Noll [23]:

$$S_{NOLL} = \mathbf{0.419}.$$

Así, el lado derecho de la ecuación (9.10) es, a 790 nm:

$$S_{NOLL} \times S_{cal} = \mathbf{0.382}.$$

Este resultado es muy similar a  $S_{\alpha-Boooc}=0.394$  obtenido previamente. La diferencia entre estos valores se encuentra dentro de la incertidumbre de la medición de coeficientes Strehl.

# Capítulo 10

## Conclusiones

Los datos aquí presentados fueron tomados dentro de las temporadas de observaciones en el OAN-Tonantzintla para el telescopio de 1 m, entre los meses de febrero y abril de 2014.

La caracterización del sistema es relevante para el análisis de las mediciones que se obtengan a partir de él. Los resultados principales que se obtuvieron en este trabajo son:

- Se caracteriza la eficiencia de cada uno de los caminos ópticos, desde que la luz entra al sistema hasta cada uno de los detectores: el buscador (D1), el instrumento científico (D2) y el sensor de frente de onda (D3). La diferencia entre el número de cuentas calculadas teóricamente y las detectadas con D2 y D3 es de 25 % lo cual puede deberse a las suposiciones realizadas para caracterizar la atmósfera, los espejos del telescopio y el espejo deformable.
- En el detector, la ganancia y el ruido de lectura (*read noise*) no dependen significativamente de la frecuencia  $\nu$  a la que opera OAXACA. Los valores calculados son de  $1.22 e/DN$  y  $16.6$  electrones ( $e^-$ ), respectivamente.
- La escala de pixel medida es de  $1 \text{ pixel}=0.0291''$ .
- Las simulaciones realizadas con el software YAO que modelan el sistema óptico de OAXACA, permiten calcular el coeficiente Strehl  $S$  en términos del parámetro de Fried  $r_0$  y compararlo con lo esperado teóricamente si se tuviera una corrección perfecta [23]. Los mejores resultados se obtienen al aumentar la frecuencia de corrección (superando la frecuencia de Greenwood  $\nu_0$ ). Sin embargo, no se logra reproducir el valor de Strehl  $S$  (Noll [23]) de un sistema de óptica adaptativa. Esto se le atribuye al método con el que YAO hace las simulaciones.

■ Los coeficientes Strehl obtenidos son:

- El coeficiente Strehl medido  $S_{\alpha-Boo} = 0.394$
- Para las simulaciones realizadas en YAO,  $S_{YAO} = 0.3$ .
- El coeficiente Strehl teórico para un sistema de OA de correcciones tipo *tip tilt* de acuerdo con el artículo de Noll [23] es  $S_{NOLL} = 0.419$ .

OAXACA funciona adecuadamente y hasta el momento corrige aberraciones tipo *tilt*. Se espera que en los meses próximos alcance correcciones de desenfoque y astigmatismo lo cual permitirá mejorar el coeficiente Strehl que se obtenga.

Con OAXACA se obtuvieron los mejores resultados en calidad de imagen en Tonantzintla. De un *seeing* de  $\approx 2''$  se logran obtener imágenes de  $0.6''$  medidos en FWHM. Esto no se había logrado con ningún otro instrumento óptico.

Los resultados obtenidos por el sistema han permitido la propuesta de otro instrumento como *COATLI* [43]. *COATLI* será un telescopio robótico de 50 cm con un instrumento capaz de lograr imágenes al límite de difracción (alrededor de 0.3 segundos de arco FWHM, en las bandas *riz*). Se instalará en el OAN en San Pedro Mártir, Baja California.

## Apéndice A

# Esquemas de OAXACA

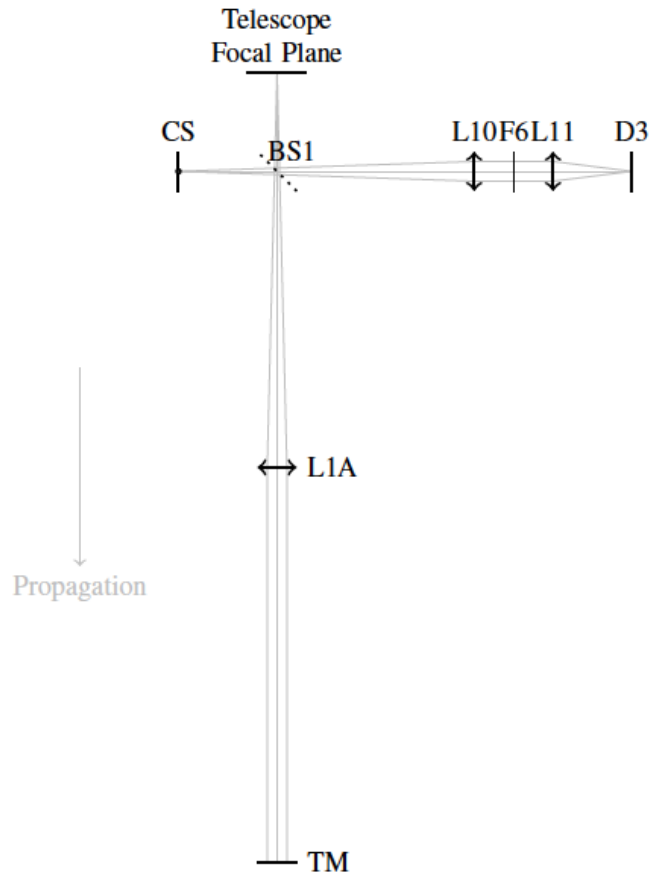


Figura A.1: Componentes desde el telescopio hasta el TM

Componente	Parte	Distancia Focal	Tamaño	Recubrimiento
BS1	Edmund 68-551	EFL = 200 mm	25×35 mm	T = 70 % and R = 30 %
FM1	Edmund 47-030		25×35 mm	BK7/Au
L1A	Edmund 47-271		$\phi = 25$ mm	NIR-II
FM2	Edmund 47-030		25×35 mm	BK7/Au
FM3	Edmund 33-498		25×35 mm	Al protegido
TM				Uncoated Au
CS	Edmund 56-273		$\phi = 25$ mm	$\phi = 2 \mu\text{m}$ apertura
L10	Edmund 49-362-INK	EFL = 150 mm	$\phi = 25$ mm	VIS-NIR
F6	Edmund 47-291	EFL = 40 mm	$\phi = 25$ mm	700 nm short-pass
L11	Edmund 49-354-INK		$\phi = 25$ mm	VIS-NIR
D3	IDS UI-5540M-SE			

Tabla A.1: Componentes desde el telescopio hasta el espejo tilt (articulado) TM y el detector D3, Fig. A.1

Componente	Parte	Distancia Focal	Tamaño	Recubrimiento
L2	Edmund 47-380	EFL = 150 mm	$\phi = 25$ mm	NIR-II
FM4	Edmund 33-502	EFL = 150 mm	= 22 mm	Al Protegido
L3	Edmund 47-380		$\phi = 25$ mm	NIR-II
DM	Adaptica SATURN			

Tabla A.2: Componentes desde TM hasta el espejo deformable (DM), Fig. A.2

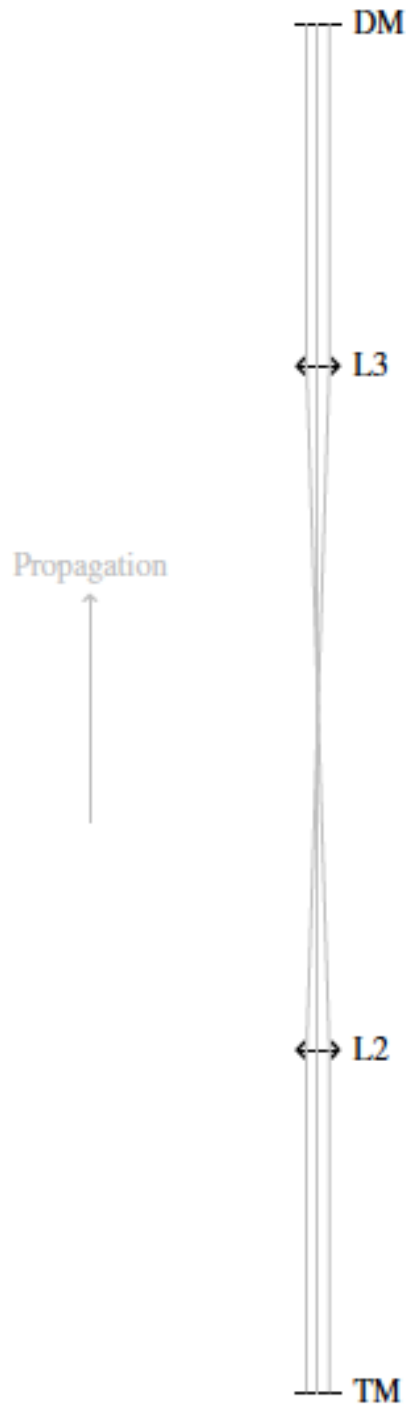


Figura A.2: Componentes desde el TM hasta el espejo deformable (DM)

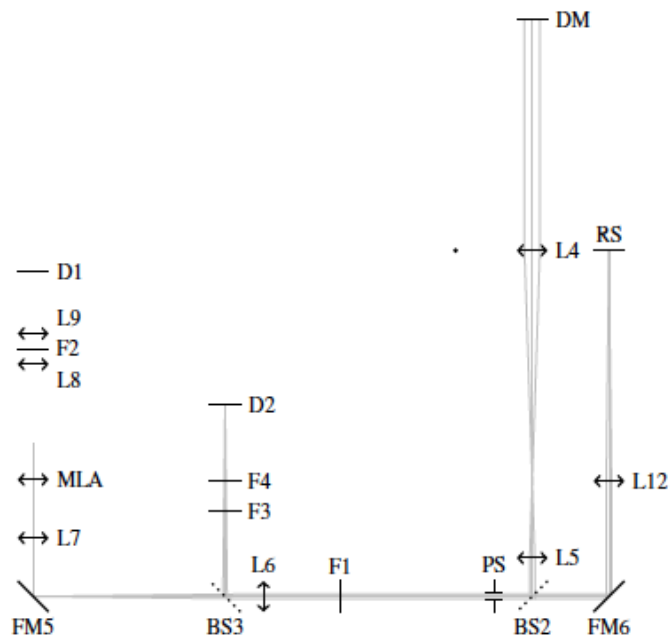


Figura A.3: Componentes desde el espejo deformable (DM) hasta el Sensor de Frente de Onda (WFS)



Componente	Parte	Distancia Focal	Tamaño	Recubrimiento
L4	Edmund 47-380	EFL = 150 mm	$\phi = 25$ mm	NIR-II
L5	Edmund 45-803	EFL = 50 mm	$\phi = 25$ mm	NIR-II
BS2	Edmund 68-539		25×35 mm	T = 30 % y R = 70 %
PS				
F1	Edmund 62-987		$\phi = 25$ mm	700 nm long-pass
L6	Edmund 47-380	EFL = 150 mm	$\phi = 25$ mm	NIR-II
BS3	Edmund 68-551		25×35 mm	T = 70 % R = 30 %
FM5	Edmund 33-504		$\square = 22$ mm	Aluminio protegido
L7	Edmund 49-788-INK	EFL = 38.1 mm	$\phi = 12.7$ mm	VIS-NIR
MLA	SMO 12-0528-100-000	ROC = 2.380 mm	$\phi = 150$ $\mu$ m, $\square = 10$ mm	Sílica sin pretección
L8	Edmund 49-330-INK	EFL = 75 mm	$\phi = 12.5$ mm	VIS-NIR
F2	Edmund 64-327		$\phi = 12.5$ mm	900 nm short-pass
L9	Edmund 49-326-INK	EFL = 40 mm	$\phi = 12.5$ mm	VIS-NIR
D1	IDS UI-5540M-SE			GL window
F3				
F4				
D2	IDS UI-5540M-SE			GL window
RS	Edmund 38-537	$\phi = 25$ mm	$\phi = 5$ $\mu$ m apertura	
FM6	Edmund 47-030	25×35 mm	BK7/Au	
L12	Edmund 47-380	EFL = 150 mm	$\phi = 25$ mm	NIR-II

Tabla A.3: Componentes desde el espejo deformable (DM) hasta el Sensor de Frente de Onda (WFS), Fig. A.3

## Apéndice B

# Eficiencias de los componentes

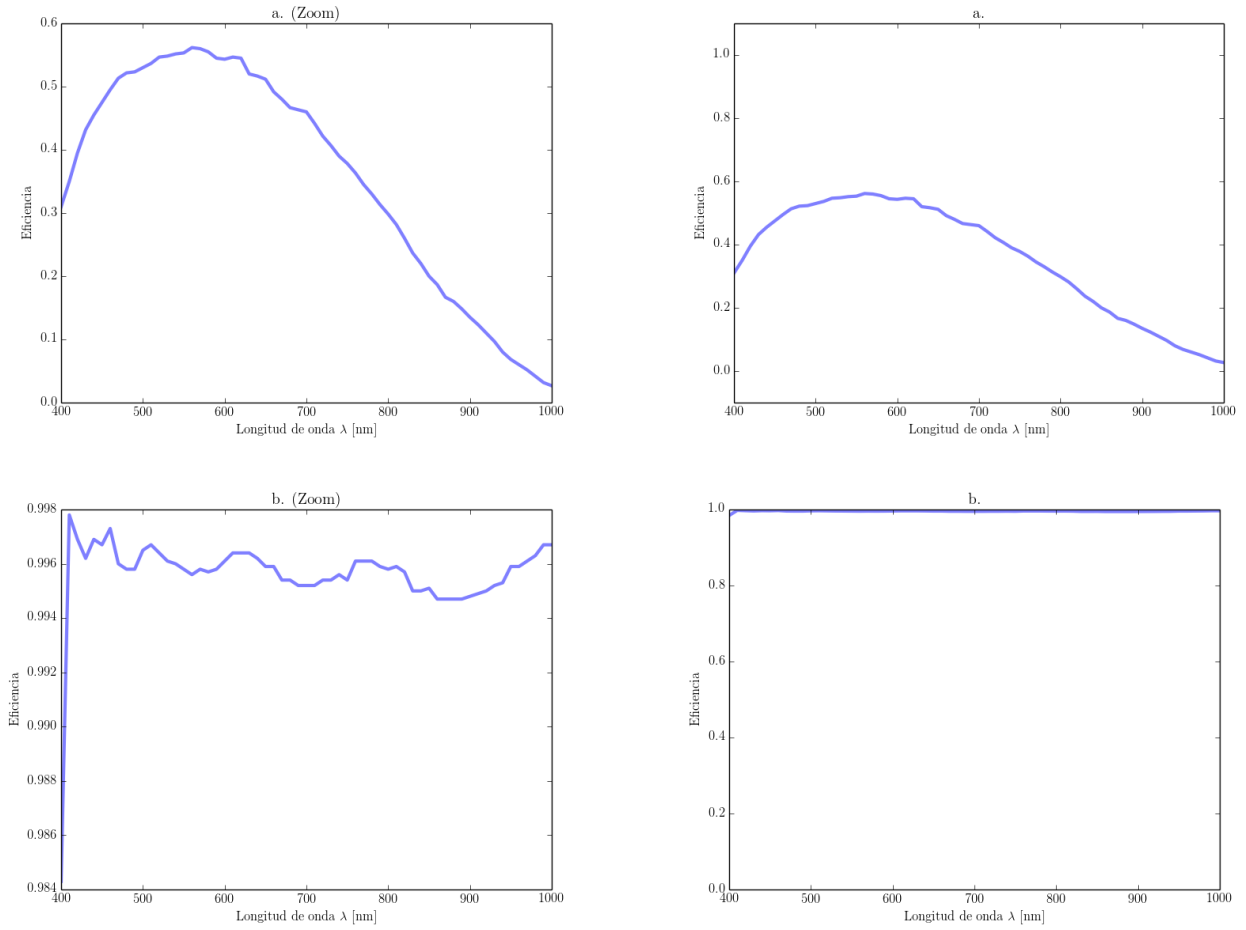


Figura B.1: Eficiencia de los distintos componentes de OAXACA: a. Detector (Eficiencia cuántica), b. Ventana del detector.

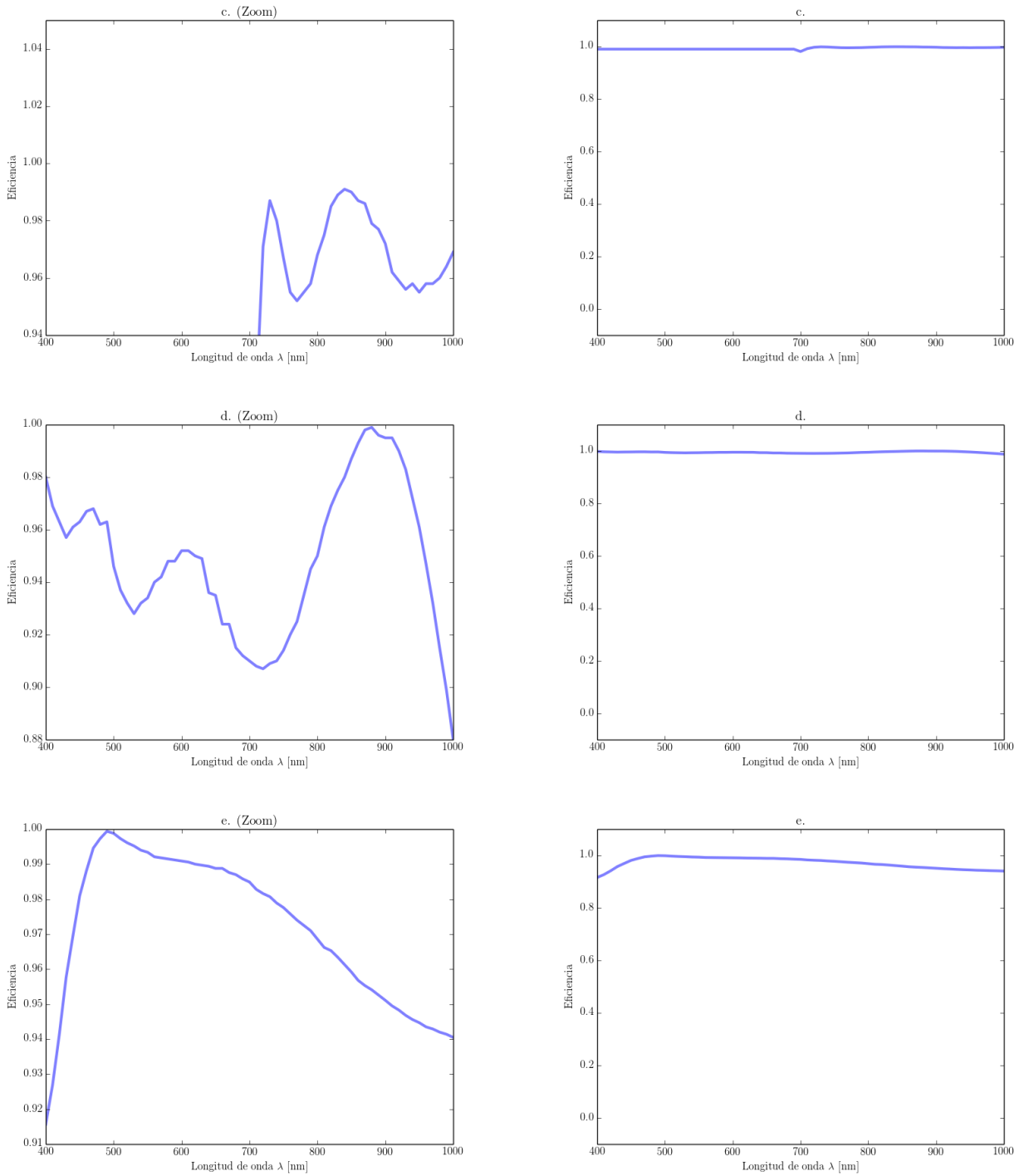


Figura B.2: Eficiencia de los distintos componentes de OAXACA (continuación): c. Lente NIR-II (Esta gráfica es para una superficie; cada lente tiene dos superficies), d. Lente VIS-NIR (Esta gráfica es para una superficie; cada lente tiene dos superficies.), e. Espejo deformable.

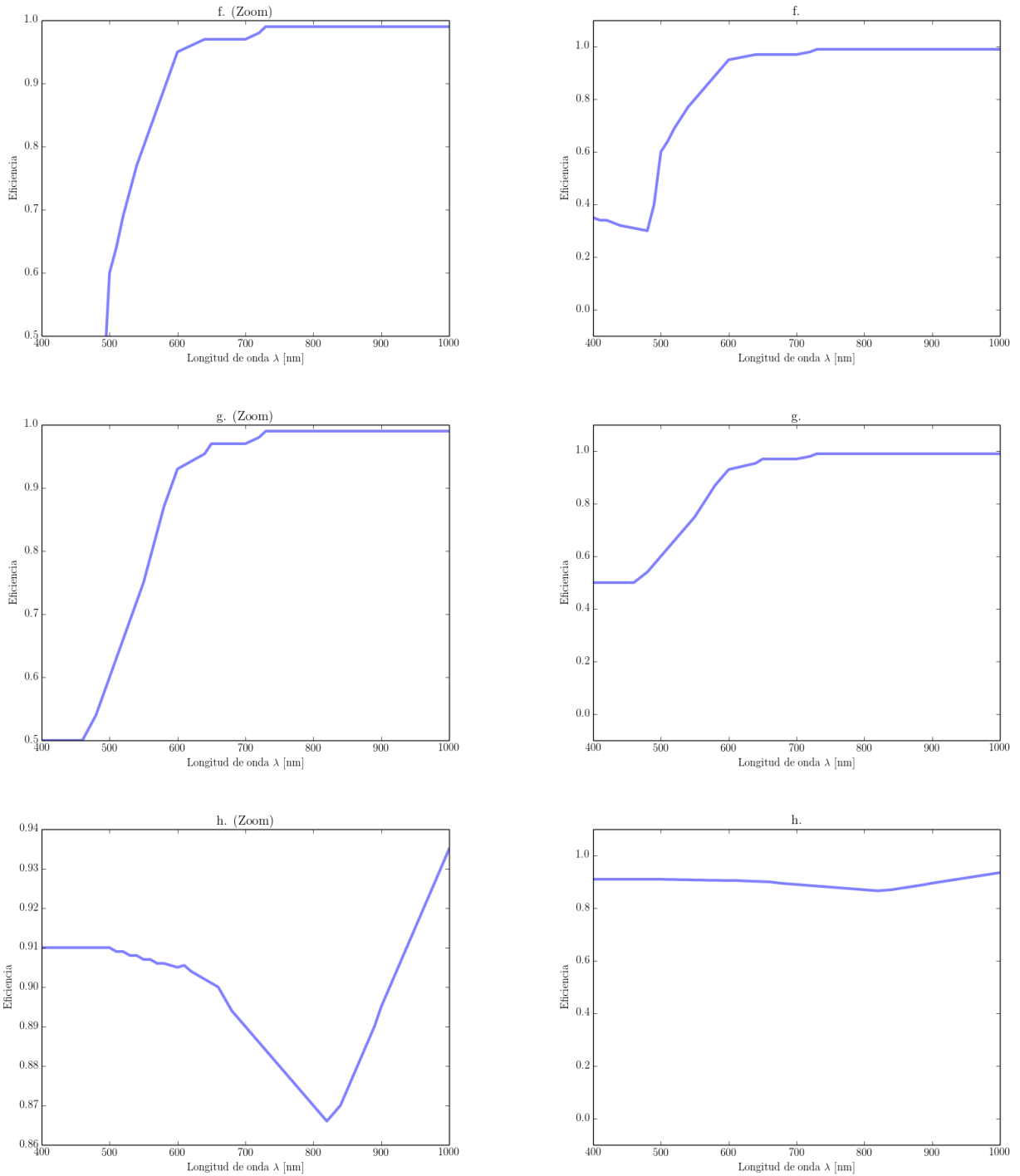


Figura B.3: Eficiencia de los distintos componentes de OAXACA (continuación): f. Au, g. Au protegido, h. Al.

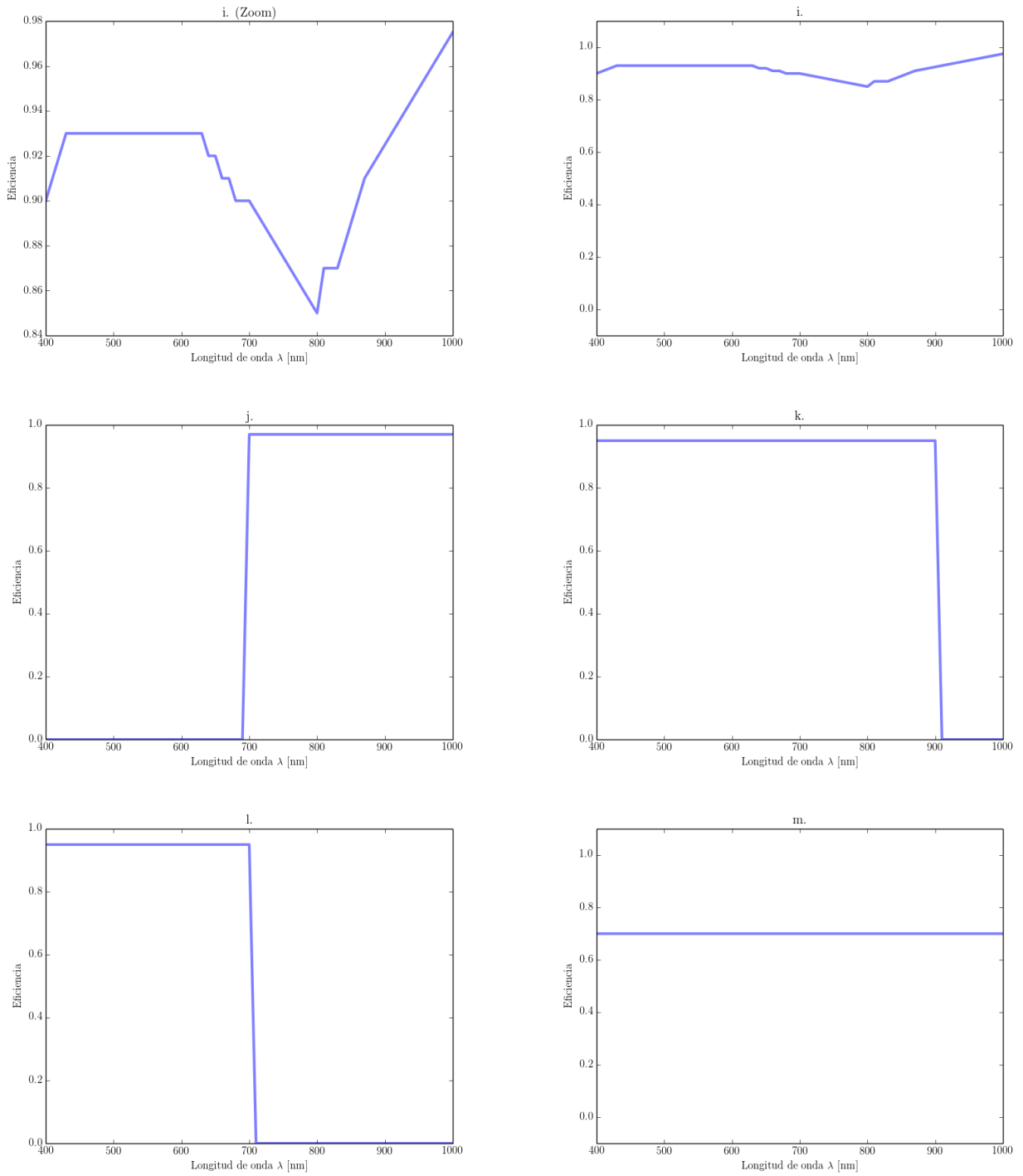


Figura B.4: Eficiencia de los distintos componentes de OAXACA (continuación), i. Al protegido, j. Eficiencia del Filtro 700 nm long-pass nm, k. Eficiencia del Filtro 900 nm short-pass, l. Filtro 700 nm short-pass, m. Atmósfera.



## Apéndice C

# Parámetros de YAO

```
// YAO parameter file
//-----
sim.name          = "OAXACA simulacion"; //Nombre archivo.
sim.pupildiam     = 120; //Diametro de pupila.
sim.debug        = 0;
sim.verbose      = 0;

//-----
atm.dr0at05mic   = 25/8.0; // Parametro de Fried en 500 nm.
atm.screen       = &(amp;Y_USER+"data/screen"+"1","2","3","4")+".fits");
                  //Disposicion de la pantalla.
atm.layerfrac    = &([0.4,0.2,0.3,0.1]); //Fraccion de atmosfera.
atm.layerspeed   = &([5,5,5,5]); //Velocidad de las capas.
atm.layeralt     = &([0.,400,6000,9000]); //Altura de las capas atmosfericas.
atm.winddir      = &([.1,.1,0,0]); //Direccion del viento.

//-----
nwfs             = 1; // Numero de WFS
wfs = array(wfss,nwfs);

n = 1;
wfs(n).type      = "hartmann"; //Tipo de curvatura.
wfs(n).lambda    = 0.75; //Longitud de fuente de frente de onda.
wfs(n).gspos     = [0.,0.]; //Posicion frente de onda de estrella guia.
wfs(n).gsalt     = 0. //WFS Altitud de la estrella guia.
wfs(n).gsmag     = -0.042.; //Magnitud estrella guia del WFS con Arcturo.
```



```

wfs(n).shmethod      = 2; //2 Difraccion.
wfs(n).shnxsub       = 2; //Numero de subaperturas en cada eje (2x2).
wfs(n).pixsize       = 0.41; //Tamaño del plano Focal.
wfs(n).npixels       = 17; //Numero de pixeles de la subapertura.
wfs(n).noise         = 0; //Ruido.
wfs(n).ron           = 17; //Read noise.
wfs(n).shthreshold   = 0.; //
wfs(n).nintegcycles = 1; //Numero de iteraciones sobre las cuales integras.

//-----
ndm                   = 1; //Numero de espejos deformables.
dm = array(dms,ndm);

n =1;
dm(n).type           = "zernike"; //Tipo de espejo deformable.
dm(n).nzer = 3;      //Numero de Zernike.

//-----
mat.condition        = &([15.]);
mat.file             = "";

//-----
tel.diam             = 0.25; //Diametro espejo primario.
tel.cobs             = 0; //Fraccion de oscurecimiento.

//-----
target.lambda        = &([0.75]); //Longitud de onda en micras.
target.xposition     = &([0.]); //Posicion inicial.
target.yposition     = &([0]);
target.dispzoom      = &([1.]); //Zoom.

//-----
gs.zeropoint        = 1e11; //Punto cero fotometrico.

//-----
loop.gain            = 0.91; //Ganancia.
loop.framedelay      = 1; //Retraso de bucle.
loop.niter           = 2000; //Numero de iteraciones.

```

```
loop.ittime      = 1./500; // Tiempo de iteracion.
loop.startskip   = 1; //Numero de figuras que salta antes de empezar la simulacion.
loop.skipevery   = 10000; //No tomar datos cada cierto numero de iteraciones.
loop.stats_every = 1; // Intervalo en el que toma datos.
loop.skipby      = 1000; //Mejora cobertura estadistica.
loop.modalgainfile = "simulModeGains.fits";
```



# Referencias

- [1] ADAPTICA. Saturn user manual. <http://www.adaptica.com>.
- [2] P. L. Aisher, J. Crass, and C. Mackay. Wavefront phase retrieval with non-linear curvature sensors. 429:2019–2031, March 2013.
- [3] APTINA. Aptina mt9m001c12stm user’s manual. <https://www.aptina.com/>.
- [4] M. S. Bessell. UBVRI photometry. II - The Cousins VRI system, its temperature and absolute flux calibration, and relevance for two-dimensional photometry. 91:589–607, oct 1979.
- [5] J. C. Christou. Image quality, tip-tilt correction, and shift-and-add infrared imaging. 103:1040–1048, September 1991.
- [6] D. Dayton, B. Person, B. Spielbusch, and J. Gonglewski. Atmospheric structure function measurements with a Shack-Hartmann wave-front sensor. *Optics Letters*, 17:1737–1739, December 1992.
- [7] N. Devaney. *Adaptive Optics White Book, Gran Telescopio Canarias*. Taylor & Francis, 2010.
- [8] A. Díaz Sánchez. High-resolution optical imaging of the core of the globular cluster M15 with FastCam. 423:2260–2269, July 2012.
- [9] EDMUND. Edmund optics. <http://www.edmundoptics.com>.
- [10] EDMUND. Especificaciones lámpara calibración. <http://www.edmundoptics.com/illumination/fiber-optic-illumination/fiber-optic-illuminators/150w-cke-replacement-bulb-for-fiber-optic-illuminators/2114/>.
- [11] R. Flores, P. D. Sotelo, F. Garfias, S. Cuevas, and L. J. Sanchez. Adaptive optics tip-tilt system with fuzzy control. In P. L. Wizinowich, editor, *Adaptive Optical Systems Technology*, volume 4007 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 671–681, July 2000.
- [12] D. L. Fried. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures. *J. Opt. Soc. Am.*, 56(10):1372–1379, Oct 1966.

- 
- [13] D. L. Fried. Anisoplanatism in adaptive optics. *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, 72:52, January 1982.
- [14] J. E. Graves, M. J. Northcott, F. J. Roddier, C. A. Roddier, and L. M. Close. First light for Hokuapaá: 36-element curvature AO system at UH. In D. Bonaccini and R. K. Tyson, editors, *Adaptive Optical System Technologies*, volume 3353 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 34–43, September 1998.
- [15] D. P. Greenwood. Bandwidth specification for adaptive optics systems. *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, 67:390–393, March 1977.
- [16] J. W. Hardy. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*. July 1998.
- [17] S.B. Howell. *Handbook of CCD Astronomy*. Cambridge Observing Handbooks for Research Astronomers. Cambridge University Press, 2006.
- [18] R. G. Lane and M. Tallon. Wave-front reconstruction using a Shack-Hartmann sensor. 31:6902–6908, November 1992.
- [19] LAYERTEC. Layertec. <http://www.layertec.de/en/capabilities/coatings/metallic>.
- [20] C. Mackay. High-efficiency lucky imaging. 432:702–710, June 2013.
- [21] C. MacKay. High-resolution imaging in the visible on large ground-based telescopes. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 9147 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 1, July 2014.
- [22] IRAF National Optical Astronomy Observatories. <http://iraf.noao.edu>.
- [23] R. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *J. Opt. Soc. Am.*, 66(3):207–211, Mar 1976.
- [24] S. S. Olivier and D. T. Gavel. Tip-tilt compensation for astronomical imaging. *Journal of the Optical Society of America A*, 11:368–378, January 1994.
- [25] PYTHON. Pyfits documentation. <https://pythonhosted.org/pyfits/>.
- [26] F. Roddier. Atmospheric limitations to high angular resolution imaging. In M. H. Ulrich and K. Kjaer, editors, *Scientific Importance of High Angular Resolution at Infrared and Optical Wavelengths*, pages 5–22, 1981.
- [27] F. Roddier. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy. *Progress in optics. Volume 19. Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1981, p. 281-376.*, 19:281–376, 1981.
- [28] F. Roddier. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics. 27:1223–1225, April 1988.

- 
- [29] F. Roddier. Wavefront curvature sensing and compensation methods in adaptive optics, 1991.
- [30] F. Roddier. *Adaptive Optics in Astronomy*. Cambridge University Press, 1999.
- [31] F. Roddier, J. M. Gilli, and J. Vernin. On the isoplanatic patch size in stellar speckle interferometry. *Journal of Optics*, 13:63–70, 1982.
- [32] F. Roddier, J. E. Graves, D. McKenna, and M. Northcott. The University of Hawaii adaptive optics system. I - General approach. In M. A. Ealey, editor, *Active and Adaptive Optical Systems*, volume 1542 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 248–253, December 1991.
- [33] K. C. Roth, O. Guyon, M. Chun, J. B. Jensen, I. Jorgensen, F. Rigaut, and D. M. Walther. Hokupaa Performance and Point Spread Function Characterization. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #198*, volume 33 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 785, May 2001.
- [34] L. Seifert, H. J. Tiziani, and W. Osten. Wavefront reconstruction with the adaptive Shack Hartmann sensor. *Optics Communications*, 245:255–269, January 2005.
- [35] SIMBAD. <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>.
- [36] J. Skottfelt, D. M. Bramich, M. Hundertmark, U. G. Jorgensen, N. Michaelsen, P. Kjaergaard, J. Southworth, A. N. Sorensen, M. F. Andersen, M. I. Andersen, J. Christensen-Dalsgaard, S. Frandsen, F. Grundahl, K. B. W. Harpsoe, H. Kjeldsen, and P. L. Pallé. The Two-Colour EMCCD Instrument for the Danish 1.54m Telescope and SONG. *ArXiv e-prints*, November 2014.
- [37] T. D. Staley. Lucky imaging: beyond binary stars. *ArXiv e-prints*, April 2014.
- [38] SUSSMicroOptics. Microlens arrays-catalog 2011 user’s manual. <https://www.suss.microoptics.com/>.
- [39] E.C. Sutton. *Observational Astronomy: Techniques and Instrumentation*. Cambridge University Press, 2011.
- [40] R. Tyson. *Principles of Adaptive Optics, Third Edition*. Series in Optics and Optoelectronics. Taylor & Francis, 2010.
- [41] J. A. Vázquez-Mata, H. M. Hernández-Toledo, L. A. Martínez-Vázquez, and A. Pani-Cielo. Light pollution around Tonantzintla Observatory. In D. Valls-Gabaud and A. Boksenberg, editors, *IAU Symposium*, volume 260 of *IAU Symposium*, page 38, June 2011.
- [42] J. Y. Wang and J. K. Markey. Modal compensation of atmospheric turbulence phase distortion. *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, 68:78–87, January 1978.

- [43] A. Watson. *Reporte CAPI 2015a COATLI*. 2014.
- [44] A. Watson. *Reporte CAPI 2015a OAXACA*. 2014.
- [45] C. C. Wilcox, J. R. Andrews, S. R. Restaino, S. W. Teare, D. M. Payne, and S. Krishna. Analysis of a combined tip-tilt and deformable mirror. *Optics Letters*, 31:679–681, March 2006.
- [46] Yao :: Home. <http://frigaut.github.io/yao/index.html>.