



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE
IMÁGENES DEL SOL EN $H\alpha$ PARA
ESTUDIOS DE CLIMA ESPACIAL Y
DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A

ARANZA FERNÁNDEZ ÁLVAREZ DEL CASTILLO

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Mario Rodríguez Martínez

MORELIA, MICHOACÁN

Octubre, 2018



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 09** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **12 de septiembre del 2018**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno(a) **Aranza Fernández Álvarez del Castillo** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **414003978**, con el trabajo titulado: "Análisis y Procesamiento de Imágenes del Sol en H α para Estudios de Clima Espacial y Divulgación Científica" bajo la dirección como **tutor** del Dr. Mario Rodríguez Martínez.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dra. Julia Tagüeña Parga
Vocal: Dr. Ernesto Aguilar Rodríguez
Secretario: Dr. Mario Rodríguez Martínez
Suplente 1: Dra. Julieta Arisbe López Vázquez
Suplente 2: Dr. Juan Américo González Esparza

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a 17 de octubre del 2018.


DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ
SECRETARIO GENERAL

“No hablar sobre ciencia me parece perverso... Cuando uno se enamora se lo quiere gritar al mundo”

— Carl Sagan

Agradecimientos

- A la ENES Morelia, a la Licenciatura en Geociencias y a todos mis profesores; De todos aprendí algo y de todos me llevo algo bueno.
- A los miembros del jurado, por su paciencia, sus recomendaciones y consejos durante este proceso dirigido por Mario Rodríguez:
 - Julia Tagüeña, Julieta López, Ernesto Aguilar y Américo González.
- A Alex Rebollar por todo su apoyo desde el primer día.
- A César Cantú por todas sus enseñanzas sobre técnicas de astrofotografía.
- Al equipo técnico de la ENES Morelia en cuanto a cómputo, infraestructura y telecomunicaciones, durante el desarrollo de esta tesis en el LACIGE. Al M. C. Ulises Olivares Pinto, al Ing. Pablo Alfonso García Cruz y al Ing. Froylán Hernández Rendón.
- A la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA, <https://www.ruoa.unam.mx/>) y al Dr. Carlos Antonio Anaya Merchant por su apoyo con los datos atmosféricos utilizados en este trabajo pertenecientes al observatorio atmosférico de Morelia (MORE).
- Se agradece al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM RA107116: “Estudio de Perturbaciones Ionosféricas a latitudes intermedias” a cargo del Dr. Mario Rodríguez Martínez, por la beca de licenciatura recibida para el desarrollo de este trabajo (agosto-diciembre de 2017). Así mismo se agradece al Laboratorio de Ciencias Geoespaciales (LACIGE) (<http://www.lacige.unam.mx/>) de la ENES unidad Morelia de la UNAM, por el apoyo recibido para el uso de equipo de cómputo y del equipo empleado en el observatorio para el desarrollo de las imágenes presentadas en esta tesis.
- Se agradece al Fondo Sectorial SEP-CONACYT/Investigación Básica por la beca otorgada a través del proyecto 220981: “Estudio de perturbaciones que viajan en el viento solar utilizando técnicas de observación en distintas longitudes de onda” a cargo del Dr. Ernesto Aguilar Rodríguez.

Agradecimientos Personales

- Más que a nadie a mis padres, José Francisco y Mary Carmen, que nunca han dejado de apoyarme, aconsejarme, levantarme, regañarme, quererme y enseñarme todo sobre la vida pero sobre todo, por enseñarme a que siempre se puede más. **Failure is not an option.**
- A mi hermana, Cynthia, por toda su ternura, su inspiración, por todas las cosas de las que sabe y me enseña, y, también, por siempre ponerme en mi lugar.
- A mi hermano, Diego, por todos los chistes, las carcajadas, el sarcasmo y las bromas locales pero también, por las pláticas serias.
- A mis abuelos, Jaime y Carmela, y a mi tía Rosa María, quienes, sin cuestionarlo, toda la vida han creído en mí.
- A Nayeli, por su infinito cariño y la luz de su amistad. Por complacerme en todas mis locuras y por ser como otra hermana.
- A Lía, por los consejos, las risas, los bailes de despedida (y los de no-despedida, también), las llamadas eternas, las horneadas, las verdades honestas, por siempre aguantarme y por su gran amistad.
- A Mario Rodríguez, por aceptar dirigir esta tesis y ayudarme a seguir las ideas que tuve durante este proceso. Por mostrarme la astrofotografía y permitirme pasar el rato en el observatorio obteniendo fotos de las que estoy orgullosa. Por impulsarme a enfrentar cosas nuevas y por su infinita paciencia.
- A Julia Tagüeña, por encaminarme a la ciencia con mi primer telescopio y mostrarme la belleza de la divulgación. Por inspirarme y mostrarme que las mujeres lo podemos todo.
- A María del Sol Hernández, por mostrarme el encanto de las geociencias y de nuestro planeta pero también, por escucharme y aconsejarme cuando lo necesité. Fue un honor haber descubierto un poquito de México contigo.
- A Julieta López, que desde que nos conocimos no ha dejado de ayudarme, de motivarme, y de responder las miles de preguntas que siempre tengo. Quien genuinamente cree que puedo ser una buena divulgadora y que lo que quiero hacer vale la pena. Agradezco mucho haberte conocido y haberte tenido como maestra.
- A Ernesto Aguilar, por toda su ayuda durante la carrera, por inspirarme a dar siempre lo mejor y por todo el apoyo que no ha dejado de darme para seguir creciendo. En verdad ¡gracias por todo!

- A Concha y a Moni, quienes por puro cariño hacia mí leyeron y comentaron esta tesis aunque no tenían que hacerlo y que son como mis tías adoptivas.
- A mis queridas Dani Naranjo, Tabata, Kinari, Rosy, Palo y Majo, que me abrieron su corazón desde el primer momento. Gracias por todas las aventuras juntas, los chistes, las anécdotas, los consejos, las confidencias, por siempre alegrarse por mí y por quererme tanto como yo a ustedes.
- A mis amigos: Liliana, Daniel M., Huran, Jorge, Eliasib, Mati, Manu, Jimmy y Alexis V., que nunca dejaron de echarme porras, de motivarme para seguir, de contarme cosas interesantes o simplemente de interesarse en cómo estaba. ¡Los quiero muchísimo!
- Y por supuesto a las de toda la vida: Dani, Mine y Vania. Soy tremendamente afortunada por tenerlas en mi vida. Las amo.
- A la UNAM, donde cumplí un sueño. Para siempre soy de sangre azul y piel dorada.
- Y finalmente, a Dios, por levantarme, guiarme y nunca abandonarme en mis peores momentos.

Dedicatoria

Además de dedicar este trabajo a mis padres y hermanos quiero dedicárselo a mi abu Rosy, quien no vio esta etapa terminada pero que siempre tuvo grandes sueños para mí, me dio todo su amor incondicionalmente y que estoy segura que desde donde está me sigue cuidando.

Y a mis dos Rocíos:

A mamá Chio, cuya ausencia me duele en el alma pero sé que su luz está siempre conmigo.

A mi tía Rocío, que siempre estuvo orgullosa de mí y a quien nunca dejaré de querer.

Índice general

Agradecimientos	I
Agradecimientos Personales	II
Dedicatoria	IV
Resumen	XVI
Abstract	XVII
1. Introducción	1
1.1. El Sol	2
1.1.1. Estructura Interna	2
1.1.2. La Rotación Solar	4
1.2. Atmósfera	6
1.3. Actividad Solar	9
1.3.1. Manchas Solares	9
1.3.2. Fulguraciones	12
1.3.3. Protuberancias y Filamentos	13
1.3.4. Eyecciones de Masa Coronal (EMC)	15
1.4. Interacción Sol-Tierra	19
1.4.1. Clima Espacial	19
1.5. Motivación y Estructura de la tesis	24
2. Astrofotografía: Fotografía Solar	27
2.1. El Espectro Electromagnético	28
2.2. Líneas Espectrales	32
2.2.1. Línea del $H\alpha$	34
2.3. ¿Cómo observamos?	36
2.3.1. El telescopio	37
2.3.2. Condiciones de observación	46
2.3.3. La cámara	52
2.3.4. Filtros para observar al Sol	56
3. Análisis y Procesamiento de Imágenes del Sol	63
3.1. Metodología	63
3.1.1. Telescopio Coronado SolarMax II 90mm	64

3.1.2.	Telescopio Meade ETX-90EC Astro Telescope	64
3.1.3.	Montura Orion Sirius EQ-G	65
3.1.4.	Obtención de vídeo del Sol	65
3.1.5.	Procesamiento de la imagen	76
3.1.6.	Imágenes FITS	83
4.	Divulgación Científica	93
4.1.	¿Qué es la divulgación de la ciencia?	93
4.2.	¿Por qué divulgar la ciencia?	95
4.3.	Modelos de Divulgación Científica	97
4.3.1.	Modelo de apreciación pública de la ciencia y la tecnología (PAST)	98
4.3.2.	Modelo de compromiso público con la ciencia y la tecnología (PEST)	99
4.3.3.	Modelo de comprensión crítica de la ciencia en público (CUSP)	99
4.4.	Astrofotografía como un método para divulgar las Geociencias	101
4.5.	Motivación Personal	104
5.	Casos de Estudio y Resultados	109
5.1.	Agosto de 2017	110
5.1.1.	21/agosto/2017	110
5.2.	Septiembre de 2017	114
5.2.1.	08/septiembre/2017	114
5.2.2.	18/septiembre/2017	118
5.2.3.	27/septiembre/2017	120
5.3.	Octubre de 2017	123
5.3.1.	02/octubre/2017	123
5.3.2.	20 octubre 2017	126
5.4.	Cálculo de la rotación solar	130
5.5.	Utilidad de las Imágenes	132
5.5.1.	Acervo Fotográfico del Laboratorio de Ciencias Geoespaciales	136
6.	Conclusiones y Trabajo a Futuro	139
A.		143
B.		147
	Bibliografía	151

Índice de figuras

1.1.	Esquema mostrando la rotación diferencial del Sol: se puede observar que la línea rota más rápido en el ecuador que en los polos. Obtenido de <i>Karttunen et al. (2016)</i>	4
1.2.	Esquema de la tacoclina en la base de la zona convectiva. Obtenido de <i>Lang (2007)</i> . . .	5
1.3.	Granulación observada en la fotosfera solar. Obtenido de <i>Solar Science NASA MARS-HALL SPACE FLIGHT CENTER</i>	6
1.4.	Representación artística de las capas de la atmósfera solar con sus respectivas temperaturas en °C. Obtenido de <i>Astrofísica y Física, (2013)</i>	7
1.5.	Espículas en la cromosfera solar. a) Fotografía del observatorio solar de Big Bear, California. Obtenido de <i>Karttunen et al. (2016)</i> . b) Fotografía obtenida con el Telescopio Solar Sueco (SST, por sus siglas en inglés). Obtenido de <i>Lang (2007)</i>	7
1.6.	Fotografía de la corona solar observada en Rayos X, tomada por Solar Dynamics Observatory de la NASA. Obtenido de <i>NASA Images</i>	8
1.7.	El campo magnético solar y su evolución a través del tiempo. Obtenido de <i>Lang (2007)</i>	9
1.8.	Manchas solares en la fotosfera. Obtenido de <i>NASA Solar Dynamics Observatory (SDO) Gallery</i>	10
1.9.	Gráfica del número de manchas solares desde 1700. Se puede apreciar como fluctúa el número de manchas solares a través de los años. Implícitamente se puede apreciar la variación del ciclo solar. Obtenido de <i>Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO)</i>	10
1.10.	Acercamiento al número de manchas solares desde el 2006 y hasta el 2018. Se puede observar como el número de manchas comienza a aumentar desde el 2010 hasta alcanzar su máximo para después comenzar a descender y llegar a un mínimo al acercarse el 2018. Obtenido de <i>Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO)</i>	11
1.11.	Diagrama de la mariposa. Se puede observar que al principio del ciclo las manchas comienzan cerca de los polos y se van moviendo al ecuador. Obtenido de <i>NASA Marshall Space Flight Center</i>	12
1.12.	Fulguración X7 en el extremo UV (131 Angstrom) del día 9 de agosto 2011. Esta fue la mayor fulguración de sólo tres fulguraciones clase X para el ciclo 24. Obtenido de <i>NASA Solar Dynamics Observatory (SDO) Gallery</i>	13
1.13.	Una prominencia solar con la Tierra en comparación. Obtenido de <i>Lang (2007)</i>	14

1.14. Dos prominencias observadas en el limbo sur solar. Esta imagen fue tomada el 21 de marzo de 2003 por el instrumento EIT abordo de la sonda SOHO. Obtenido de <i>Lang (2008)</i>	15
1.15. Estructura de una prominencia. Izquierda: el bucle magnético que sostiene el gas debido a la tensión magnética. Derecha: el bucle magnético soportando cierto peso (gris claro), la arcada magnética que contiene a la prominencia (gris oscuro) y la línea de campo delineando el eje del bucle (blanco). Obtenido de <i>Meyer Vernet (2004)</i>	16
1.16. Observación de una EMC por el observatorio espacial SOHO. Obtenido de <i>SOHO Images NASA</i>	16
1.17. Estructura de una EMC. Obtenido de <i>Howard (2011)</i>	17
1.18. Fotografías tomadas para la misma EMC vista a través de LASCO el día 19 de abril de 2012. En la parte superior: EMC capturada por LASCO C2. Parte inferior: EMC capturada por LASCO C3. Obtenido de <i>SOHO NASCOM Gallery</i>	18
1.19. Efectos del Clima Espacial en el entorno terrestre. Obra original de <i>Lanzerotti (1997)</i> : <i>Lanzerotti (2007)</i>	21
2.1. Una onda electromagnética consistente de campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Obtenido de <i>Lang (2007)</i>	28
2.2. El espectro electromagnético con sus distintas longitudes de onda. Obtenido de <i>Khan Academy</i>	29
2.3. Los máximos de emisión de distintos cuerpos negros dependiendo de su temperatura y el espectro de emisión de una estrella tipo Sol, se puede observar el espectro de una estrella (línea rosa) y un cuerpo negro son muy parecidos. También se observa como, según la temperatura, el pico de emisión cae en un longitud de onda distinta. Obtenido de (<i>Richmond, 2010</i>).	30
2.4. Visualización de las líneas de emisión y absorción en un espectro continuo. Obtenido de <i>Khan Academy</i>	33
2.5. Espectro solar con sus líneas de absorción. Obtenido de <i>NOAO</i>	34
2.6. Fotografía de la cromosfera en H α . Se pueden observar manchas oscuras, filamentos largos y delgados así como regiones brillantes. Tomada por el Observatorio Astrofísico de Baikal, Academia de Ciencias de Rusia. Obtenido de <i>Lang (2007)</i>	36
2.7. Diagrama ilustrativo de la ley de Snell. Obtenido de <i>Geogebra.org</i>	38
2.8. Diagrama de una lente convergente (a) y un lente divergente (b). Obtenido de <i>Carroll y Ostlie (2007)</i>	38
2.9. La escala de placa, determinada por la distancia focal. Obtenido de <i>Carroll y Ostlie (2007)</i>	39
2.10. Aberración Cromática. Los rayos de luz de distintos colores son refractados a distintos puntos focales (izq). La aberración puede ser corregida con un lente acromático. Obtenido de <i>Karttunen et al. (2016)</i>	43
2.11. Distintos tipos de enfoque en los telescopios reflectores. Obtenido de <i>Karttunen et al. (2016)</i>	44

2.12. El principio de un telescopio Cassegrain. Un espejo primario cóncavo M_1 refleja la luz paralela al eje mayor hacia el foco primario S_1 . Un espejo secundario convexo M_2 refleja los rayos de luz de regreso a través de un pequeño hoyo en el espejo primario hacia el foco secundario S_2 que se encuentra fuera del telescopio. Obtenido de (*Karttunen et al., 2016*). 44

2.13. Montura ecuatorial (izquierda) y montura azimutal (derecha) de un telescopio. Obtenido de *Karttunen et al. (2016)*. 46

2.14. El Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano perteneciente al INAOE y ubicado en Sierra Negra, Puebla. Obtenido de *CONACyT*. 47

2.15. Ilustración de la dinámica atmosférica que genera distorsiones en el frente de onda. Obtenido de *Telescope Optics (2015)*. 48

2.16. El disco de Airy con el 84 % de la luz en el disco central. Obtenido de *Hubbell (2013)*. 49

2.17. La función SPF y el FWHM. Obtenido de *Hubbell (2013)*. 50

2.18. La escala de Pickering para caracterizar la turbulencia atmosférica. Es posible comparar como cambia el disco de Airy en relación con el seeing. Obtenido de *Telescope Optics (2015)*. 52

2.19. Funcionamiento del lector de una cámara CCD. a) Durante la exposición los electrones son contenidos en pozos de potencial que corresponden a píxeles de la cámara. El número en cada píxel muestra el número de electrones. b) Luego de la exposición cada línea horizontal se mueve un píxel hacia la derecha; la fila en el extremo derecho se mueve hacia el lector. c) Los contenidos del lector se mueven un píxel hacia abajo y la carga de hasta abajo se mueve al convertido A/D, el cual envía el número de electrones a la computadora. d) Después de mover el lector hacia abajo varias veces, una fila vertical ha sido leída. e) La imagen es desplazada una vez más hacia la derecha por un píxel. Este proceso se repite hasta que toda la imagen es leída. Obtenido de *Karttunen et al. (2016)*. 53

2.20. Comparación entre una matriz de Bayer a color (a) y una monocromática (b). Obtenido de *O'Donnell (2016)*. 55

2.21. Gráfica de la sensibilidad del sensor ICX445ALA. Se puede observar que para la región del $H\alpha$ el sensor tiene una alta sensibilidad lo que lo hace favorable para obtener imágenes en esta longitud de onda. Obtenido de *Manual para sensor diagonal 6.0mm ICX445ALA, SONY*. 56

2.22. Funcionamiento de un interferómetro de Fabry-Perot. Obtenido de *School of Physics and Astronomy, Cardiff University (2016)*. 57

2.23. El etalon de Fabry-Perot acoplado a un objetivo: a-rayo monocromático; b- etalón FP; c-objetivo de la cámara; d-detector. Obtenido de *Pismish (1982)*. 58

2.24. Curva de un filtro pasa bandas centrado en la longitud de onda del $H\alpha$. Obtenido de (*Jenkins, 2009*). 60

3.1. Diagrama de los componentes del telescopio Coronado SolarMax II. Obtenido de *Manual Meade Instruments para telescopio Coronado SolarMax II*. 64

3.2. Diagrama de los componentes del telescopio Meade ETX-90EC. Obtenido de <i>Manual Meade Instruments para telescopio ETX</i>	65
3.3. La montura utilizada con el telescopio. a)Esquema de la montura y sus partes. b)Detalles de los ejes. Obtenido de <i>Manual Orion para montura Sirius EQ-G</i>	66
3.4. Mapa de la localización global de los observatorios de la red GONG. Obtenido de <i>The GONG Network of Sites</i>	67
3.5. Imagen del Sol obtenida por el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo (Chile) para el 06 de abril de 2018. Obtenido de <i>GONG H-Alpha Network Monitor</i>	68
3.6. Interfaz gráfica del software iCap.	69
3.7. Silueta del Sol visto por el telescopio antes de enfocar.	69
3.8. Silueta de Sol una vez que ya se enfocó el macro del telescopio.	69
3.9. Selección de las pestañas de ajustes para la captura de vídeo: a) Selección de la pestaña “properties”. b) La pestaña de propiedades ya abierta. c) Selección de la pestaña “Toggle Recording Info Dialog”. d) La pestaña de captura y guardado de vídeo ya abierta.	70
3.10. Pestaña con las opciones para nombrar y guardar los vídeos capturados.	71
3.11. El disco solar una vez que se ajustó la exposición de la imagen y se termino de realizar el enfoque macro.	71
3.12. Imagen de la cámara SkyRis 445M y el reductor focal.	72
3.13. El reductor focal (con factor de reducción de 0.5x) utilizado para fotografías del disco completo.	72
3.14. Interfaz gráfica del software RegiStax v6.	73
3.15. Proceso de selección del vídeo que se quiere procesar.	74
3.16. Así se debe ver la interfaz del software una vez que ya se escogió el vídeo para procesarlo.	75
3.17. a) Se puede observar cómo en la imagen del Sol solo queda un punto rojo. Este punto, de acuerdo con el software, es el más fuerte para la alineación. b) Selección de los puntos de alineación del vídeo.	75
3.18. Proceso de alineación de todos los cuadros del vídeo según los puntos escogidos antes. Se puede ver como la barra inferior va cambiando según avanza la alineación.	76
3.19. La imagen resultante de alineado y apilado de los cuadros del vídeo, antes de aplicar el proceso de wavelets.	77
3.20. Se puede observar como en el borde de la imagen hay un pequeño reborde blanco que quedó del apilado del vídeo.	78
3.21. Proceso para remover el borde blanco de la imagen.	78
3.22. Pequeñas manchas de polvo en la imagen derivadas del polvo en la cámara y el telescopio.	79
3.23. Suite de herramienta Nik Collection.	81
3.24. Set de controles de la herramienta Viveza 2.	81
3.25. Ventana de trabajo para el ajuste de tonalidad de la imagen proporcionado por la herramienta Viveza 2.	82
3.26. Comparación entre la imagen inicial (a) y la imagen al final (b) del ajuste de tonalidad realizado con la herramienta Viveza 2 en Photoshop.	83

3.27. Agregado del logotipo del LACIGE a la imagen. a) Cuando se inserta el logotipo este es muy grande y cubre toda la imagen. b) Una vez reducido el tamaño del logotipo se puede posicionar en cualquier parte de la imagen según se desee.	83
3.28. Exportación de la imagen como .png para ser utilizada después.	84
3.29. Para dar color a la imagen: a) Selección de la pestaña equilibrio de color. b) La pestaña para el ajuste de tonalidades en la imagen.	84
3.30. Las diferentes ajustes a realizar para agregar color a la imagen. a) Medios tonos. b) Sombras. c) Iluminaciones.	85
3.32. Proceso para selección del archivo que se va a abrir.	86
3.33. Visualización del encabezado o header de la imagen. a) Selección para abrirlo. b) El header con información sobre la imagen.	87
3.34. Selección de las regiones a dibujar sobre la imagen: a) Selección de la región “circle”. b) Un círculo dibujado (verde) sobre el disco solar. Se puede cambiar el tamaño y posición de la figura. c) Selección de la región “ruler” (regla). d) La regla dibujada (verde) a lo largo del diámetro solar.	88
3.35. Las dos regiones (círculo y regla) colocadas al mismo tiempo sobre la imagen.	89
3.36. Información provista por el programa sobre las regiones dibujadas sobre la imagen. a) Información del círculo. b) Información de la regla.	89
3.37. Medición de la distancia entre las dos manchas solares de la imagen.	90
3.38. Medición de la distancia entre las dos manchas solares de la imagen tomada sin el reductor focal.	91
3.39. Proceso a seguir para generar las imágenes.	92
5.1. Fotografías obtenidas el 21 de agosto de 2017 a las: a) 12:10 tiempo local, b) 13:09 tiempo local y c) 14:08 tiempo local.	110
5.2. Gráficas de las condiciones atmosféricas del 21 de agosto del 2017. Arriba: Temperatura vs. Humedad. Abajo: Velocidad de viento promedio vs. Radiación promedio. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde indica el periodo de obtención de las fotografías.	112
5.3. Datos del periodo de obtención de la imagen. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM.	112
5.4. Las fotografías integradas con las medidas realizadas y editadas de nuevo.	114
5.5. Fotografía obtenida el 08 de septiembre de 2017 a las 10:46 tiempo local.	115
5.6. Gráficas de las condiciones atmosféricas del 08 de septiembre del 2017. Arriba: Temperatura vs. Humedad. Abajo: Velocidad de viento promedio vs. Máxima velocidad de viento. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde indica el periodo de observación.	116

5.7. Datos del periodo de obtención de la imagen 5.5. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. 117

5.8. Fotografía del día 08 de septiembre indicando la distancia entre dos manchas solares observadas ese día. 117

5.9. Imágenes obtenidas el 18 de septiembre de 2017 a las: a) 11:40 tiempo local y b) 11:42 tiempo local. 118

5.10. Gráficas de las condiciones atmosféricas del 18 de septiembre del 2017. a) Temperatura vs. Humedad. b) Velocidad de viento promedio vs. Máxima velocidad de viento. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde indica el periodo de observación. 119

5.11. Datos del periodo de obtención de la imagen 5.9. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. 120

5.12. Fotografía obtenida el 27 de septiembre de 2017 a las 13:06 tiempo local. 121

5.13. Gráficas de las condiciones atmosféricas del 27 de septiembre del 2017. Arriba: Temperatura vs. Humedad. Abajo: Velocidad de viento promedio vs. Máxima velocidad de viento. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde corresponde al periodo de observación. 122

5.14. Datos del periodo de obtención de la imagen 5.12. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. 122

5.15. Fotografía del día 27 de septiembre indicando la distancia entre dos manchas solares observadas ese día, así como la longitud de dos filamentos de distintos tamaños. 123

5.16. Fotografía obtenida el 02 de octubre de 2017 a las 13:29 tiempo local. 124

5.17. Gráficas de las condiciones atmosféricas del 02 de octubre del 2017. Arriba: Temperatura vs. Humedad. Abajo: Velocidad de viento promedio vs. Radiación promedio. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde corresponde al periodo de observación. 125

5.18. Datos del periodo de obtención de la imagen. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. 126

5.19. Imagen integrada con las medidas realizadas para el 02 octubre de 2018. a) Distancia entre manchas solares. b) Medidas del radio de la umbra y penumbra de cada mancha y medida de la longitud del filamento.	127
5.20. Fotografías obtenidas el 20 de octubre de 2017 a las: a) 12:08 tiempo local. b) 12:09 tiempo local.	127
5.21. Gráficas de las condiciones atmosféricas del 20 de octubre del 2017. Arriba: Temperatura vs. Humedad. Abajo: Velocidad de viento promedio vs. Radiación promedio. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde corresponde al periodo de observación.	128
5.22. Datos del periodo de obtención de la imagen. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM.	129
5.23. Imagen integrada con las medidas realizadas para la fotografía del 02 de octubre. a) Distancia entre manchas solares. b) Medidas del radio de la umbra y la penumbra de cada mancha.	130
5.24. Visualización simultánea de las imágenes obtenidas del 02 al 08 de agosto de 2017. Se puede observar la distancia recorrida (en píxeles) de la mancha indicada por la regla dibujada en cada imagen.	131
5.25. Póster utilizado en el Congreso Nacional de Física 2017 donde se incluyen imágenes obtenidas en el Observatorio Solar de la ENES Morelia. Cortesía de Pedro Reyes Marín.	133
5.26. Diapositivas del reporte semanal del LANCE. a) Semana del 25 al 28 de septiembre del 2017. b) Semana del 28 al 31 de mayo del 2018. Crédito: LANCE.	134
5.27. Póster utilizado en la exposición fotográfica “Cesar Cantú: Espacio Profundo” realizada en el Centro Cultural UNAM en Morelia.	135
5.28. Fotografía tomada el 05 de febrero del 2018 y seleccionada por la página web SolarActivity como la foto del día (07 de febrero).	136
5.29. El número de fotografías obtenido cada mes en el observatorio.	137
5.30. Primera fotografía solar tomada en la longitud de onda de Ca II K por el observatorio solar de la ENES Morelia.	137

Índice de tablas

1.1. Propiedades del Sol. Obtenido de Lang (2007).	3
5.1. Medidas obtenidas con el software SaoImage DS9 para las imágenes del 21 de agosto 2017.	111
5.2. Distancia cubierta por la silueta de la Luna en km en las fotografías del 21 de agosto de 2017.	113
5.3. Resultados de las medidas realizadas para la imagen del 08 de septiembre de 2017. . .	118
5.4. Resultados de las medidas realizadas para la imagen del 18 de septiembre de 2017. . .	120
5.5. Resultados de las medidas realizadas para la imagen del 27 de septiembre de 2017. . .	124
5.6. Resultados de las medidas realizadas para la imagen del 02 de octubre de 2017.	126
5.7. Resultados de las medidas realizadas para la imagen del 02 de octubre de 2017.	129
5.8. Avance de la mancha solar del 02 al 08 de agosto 2017.	131

Resumen

El Sol, la estrella más cercana a nosotros, es un cuerpo celeste donde ocurren fenómenos físicos, tales como eyecciones de masa coronal (EMCs), fulguraciones, prominencias, etc. Conocer en detalle estos procesos, es de vital importancia para comprender su dinámica y efectos en el entorno planetario, particularmente el terrestre. En este sentido, nuestro planeta es vulnerable a varios de estos eventos, por lo que estudiar y monitorear cada uno de éstos, es importante en el contexto de lo que se conoce como CLIMA ESPACIAL.

El presente trabajo surge de la necesidad de registrar y monitorear la actividad solar a través de la técnica de la astro-fotografía digital durante el periodo que va de julio de 2017 a mayo de 2018. Específicamente, se obtuvieron imágenes en la longitud de onda $H\alpha$ (6562.8 Å), aunque desde mayo de 2018 se registraron las primeras fotografías en la longitud de onda de Calcio CaII K (3969 Å). Con las imágenes $H\alpha$, se puede observar la atmósfera que se encuentra por arriba de la superficie solar, es decir, la cromósfera baja donde la dinámica del plasma y el campo magnético solar forman estructuras diferentes a las observadas en la fotosfera.

Las fotografías fueron obtenidas típicamente mediante la captura de un vídeo de ~500 frames a una tasa de 30 frames cada segundo. Se empleó una cámara monocromática Celestron Skyris 445M adaptada a un telescopio MEADE SolarMax II de 90mm. En este trabajo se muestra el uso de dichas imágenes para el estudio de la dinámica de las regiones activas y el plasma de su entorno. Se destacan además las técnicas implementadas para la obtención de las mismas en el Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales (LACIGE, www.lacige.unam.mx) y se especifica bajo que condiciones atmosféricas fueron obtenidas. Es importante mencionar que dichas imágenes sirvieron como apoyo en el monitoreo del CLIMA ESPACIAL en colaboración con el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE, www.lance.unam.mx).

Además, las fotografías brindan una alternativa innovadora para la comunicación de la ciencia, particularmente para este trabajo la comunicación de las ciencias espaciales y la física solar dado que, ayudan de una manera muy visual a la comprensión de conceptos científicos que muchas veces son complicados. Una motivación adicional para el desarrollo de este trabajo, fue el mostrar que estas imágenes permiten generar un *enlace de interés* con el público no-especializado, durante eventos desarrollados en el LACIGE, mostrando así su gran valor tanto para la investigación formal como también para la comunicación de la ciencia.

Abstract

The Sun, the nearest star to us, is a celestial body where a great deal of physical phenomena, such as Coronal Mass Ejections (CMEs), flares, prominences, etc. occur on a daily basis. Knowing these processes in detail, is of vital importance to understand their dynamics and effects in the planetary environment, particularly the terrestrial one. In this sense, our planet is vulnerable to several of these events, so studying and monitoring each of these is important in the context of what is known as SPACE WEATHER.

The present work arises from the need to register and monitor solar activity through the technique of digital astro-photography during the period from July 2017 to May 2018. Specifically, the images were obtained at the $H\alpha$ wavelength (6562.8 Å), although since May 2018 the first Calcium CaII K (3969 Å) photographs were recorded. With the $H\alpha$ images, we can observe the atmosphere that is above the solar surface, that is, the low chromosphere where the plasma dynamics and the solar magnetic field, form different structures than the observed in the Fotosphere.

The photographs were obtained by capturing a typical ~500 frame video at a 30 frames per second rate. A digital Celestron SkyRis 445M camera attached to a MEADE SolarMax II 90mm telescope was used. This paper shows the use of said images for the study of the dynamics of the active regions and the plasma of their environment. It also highlights the techniques implemented to obtain them in the Laboratory of Geospatial Sciences (LACIGE, www.lacige.unam.mx), and it is specified under what atmospheric conditions were obtained. It is important to mention that these images served as support in the monitoring of the SPACE WEATHER in collaboration with the National Space Weather Laboratory (LANCE, www.lance.unam.mx).

Additionally, the photographs present an innovative alternative to science communication. Specifically to this project, to Space Science and solar physics communication, in a way that they serve as a visual aid to the understanding of concepts that, sometimes, are complicated to grasp. An additional motivation for the development of this work, was to show that these images allow to develop a "bond of interest" with the non-specialized public, during events developed at LACIGE, showing its great value for both formal research as well as for science communication.

Capítulo 1

Introducción

Desde siempre, la humanidad ha sentido admiración y veneración por el Sol, teniendo un papel central en las culturas antiguas donde fue considerado un Dios por proveer de luz, calor, las estaciones y propiciar la vida en el planeta. Las civilizaciones marcaban sus vidas alrededor de la estrella y las mediciones que con base en ella realizaban. Al mismo tiempo, para perpetuar la gloria y poder del Sol, crearon historias mitológicas sobre él que fueron integrando en la vida cotidiana y en sus rituales, algunos de los cuales persisten hoy en día ya sea en su forma original o forma de prácticas nuevas pero que mantienen significado con las antiguas.

Así como estas culturas adoraban al Sol, muchas otras también lo hacían y modelaban sus vidas y sus creencias con base en él. Hoy en día esa superstición dio paso a una fascinación intelectual y a una necesidad de comprender qué sucede con nuestra estrella.

A medida que el hombre evolucionó en el tiempo comenzó a mirar al Sol y sus movimientos en el cielo, primero de manera religiosa, después de manera práctica. Estudiar y medir el movimiento del Sol permitía conocer los periodos de cosecha, los cambios estacionales del año; así como llevar un calendario para marcar eventos astronómicos y medir el paso del tiempo.

Mientras el ser humano cambiaba, sus necesidades también se volvieron diferentes, el interés por saber del Sol también evolucionó y dejó de ser solo por necesidad práctica. Al mismo tiempo, los avances tecnológicos también iban en evolución lo que permitió el desarrollo de nuevas técnicas de observación y de estudio. Con la ciencia y la tecnología, se comenzó a observar en distintas longitudes de onda, y los instrumentos de medición se modernizaron de tal modo que la ciencia fue capaz de obtener información de lugares extraordinarios ¿quién hubiera pensado que un día se tendría un instrumento capaz de tomar imágenes solares de alta resolución cada 12 segundos como lo hace SDO¹?

Nuestro Sol es la única estrella en el universo en la que somos capaces de observar los detalles de su superficie. La estrella manifiesta una serie de fenómenos físicos y químicos que se extienden desde adentro de la estrella hasta su superficie (y más allá), y que varían desde unos cuantos hasta miles de

¹Solar Dynamics Observatory.

kilómetros en tamaño con temperaturas que cambian desde miles hasta millones de grados y que tienen cambios temporales que van desde los segundos hasta días y años. Estos eventos dinámicos tienen intervalos de velocidades de algunos kilómetros por segundo hasta miles de ellos. Con todos estos fenómenos y cambios dándose constantemente en la estrella, no debe ser una sorpresa que el Sol sea objeto de estudio y fascinación. Además ¿por qué no utilizar esta oportunidad para comprender otros cuerpos celestes en el Universo, ya que nunca tendremos otra estrella lo suficientemente cerca como para poder estudiarla así?

Comprender el Sol y sus fenómenos es comprender una parte fundamental de nuestra vida en la Tierra y la supervivencia en la misma y tiene relevancia tanto dentro como fuera del ámbito científico.

1.1. El Sol

El Sol es una parte elemental para la vida tal y como la conocemos. Sin embargo, no sólo es una fuente de calor que propicia la continua existencia de vida en nuestro planeta, también es un sistema dinámico donde ocurren distintos fenómenos cuyos efectos cubren toda la heliosfera.

1.1.1. Estructura Interna

El Sol es una estrella de clase G2V perteneciente a la secuencia principal, la cual corresponde a la fase más estable y duradera de la vida de una estrella (Tafalla, 2002). La estrella se formó hace aproximadamente 5000 millones de años y, solamente el Sol contiene $\sim 99\%$ de la masa total del Sistema Solar y controla gravitacionalmente a todos los objetos del mismo (Lang, 2007). Algunas de sus propiedades generales se pueden ver en la tabla 1.1.

La región más central de la estrella es el núcleo. Ahí la temperatura es de alrededor de $15 \times 10^6 K$, lo que lo vuelve un gas completamente ionizado. Una estrella como el Sol produce energía mediante la conversión nuclear de hidrógeno en helio en las zonas más densas y calientes de su interior. Este proceso de fusión es producido por la cadena protón-protón en el núcleo, donde 99% de la energía es generada en una cuarta parte del radio solar, durante la conversión de hidrógeno en helio hay una pequeña fracción de masa (un 0.7%) que se convierte en energía, y se produce a una tasa de $\sim 4 \times 10^{26}$ W, lo que es equivalente a convertir 4 millones de toneladas de masa en energía por segundo. Cada segundo en el interior del Sol unos 3.4×10^{38} protones se convierten en núcleos de helio (Bachiller, 2009). La masa del Sol es tan grande ($\sim 330,000$ veces la de la Tierra) que durante toda su vida en la secuencia principal menos del 0.1% de ella será convertida en energía (Karttunen et al., 2016).

La energía que sale del núcleo se encuentra con la zona radiativa donde los fotones transportan la energía mediante radiación. En esta zona el camino libre medio es tan pequeño que, a un fotón le toma ~ 10 mil años llegar a la base de la zona convectiva (Bhatnagar y Livingston, 2005). La capa

Propiedades del Sol	
Distancia promedio (UA)	$1.4959787 \times 10^{11} m \sim 150$ millones de km
Distancia luz del Sol a la Tierra	499 segundos
Radio, R_{\odot}	$6.955 \times 10^8 m$ (109 radios terrestres)
Volumen	$1.412 \times 10^{27} m^3$ (1.3 millones de Tierras)
Masa, M_{\odot}	$1.989 \times 10^{30} kg$ (332,946 masas terrestres)
Velocidad de Escape de la Fotosfera	$6.178 \times 10^5 m s^{-1}$
Densidad Promedio	$1,409 kg m^{-3}$
Constantes Solar, f_{\odot}	$1,366 J s^{-1} m^{-2} = 1366 W m^{-2}$
Luminosidad, L_{\odot}	$3.854 \times 10^{26} J s^{-1} = 3.854 \times 10^{26} W$
Edad	4.6 miles de millones de años (4.6×10^{15} años)
Densidad (centro)	$151,300 kg m^{-3}$
Presión (centro)	$2.334 \times 10^{11} bar$
Presión (fotosfera)	0.001 bar
Temperatura (centro)	$15.6 \times 10^6 K$
Temperatura (fotosfera)	5,780 K
Temperatura (cromosfera)	6×10^3 a $2 \times 10^4 K$
Temperatura (región de transición)	2×10^4 a $2 \times 10^6 K$
Temperatura (corona)	2×10^6 a $3 \times 10^6 K$
Periodo de rotación (ecuador)	26.8 días
Periodo de rotación (30° latitud)	28.2 días
Periodo de rotación (60° latitud)	30.8 días
Campo magnético (manchas solares)	0.1 a 0.4 T = 1×10^3 a 4×10^3 G
Campo magnético	0.001 T = 10 G

Tabla 1.1: Propiedades del Sol. Obtenido de [Lang \(2007\)](#).

radiativa del Sol se expande hasta alrededor del 70% del radio solar, a esa distancia la temperatura ha decaído tanto que el gas ya no se encuentra completamente ionizado y la opacidad del medio aumenta significativamente inhibiendo la radiación y volviéndola un medio inefectivo de transporte de energía, así, la convección se vuelve un método mucho más eficiente. Cuando esto sucede hemos llegado a la envoltura convectiva del Sol (Karttunen et al., 2016).

En la zona convectiva la energía viaja más rápido; son ahora los gases del Sol los que transportan energía hacia afuera mediante la convección, donde son las celdas convectivas las que permiten el transporte de energía. Durante este proceso el material caliente sube por el centro de la celda y no se detienen mientras sea más ligero que el material a su alrededor, estas celdas llegan a la superficie y tienen una temperatura menor que el material que viene debajo de ellas de modo que el material, ahora menos caliente, vuelve a bajar por las orillas de las celdas y el proceso se repite (Lang, 2001).

1.1.2. La Rotación Solar

Con ayuda de telescopios y mediante las observaciones de manchas solares se determinó que la rotación del Sol tiene un promedio de 27 días. Sin embargo, en 1630 Christoph Scheiner mostró que existe una rotación diferencial, es decir, el ecuador solar rota más rápido que los polos: el ecuador tiene una rotación aproximada de 25 días mientras que los polos tienen un periodo de alrededor de 30 días (Karttunen et al., 2016).

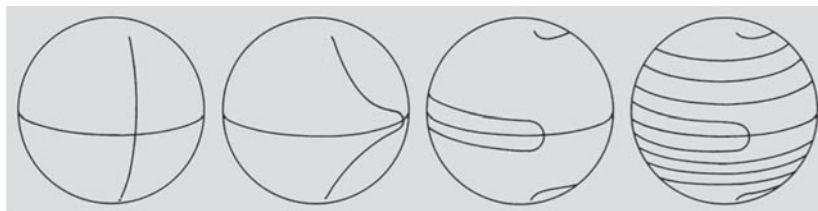


Figura 1.1: Esquema mostrando la rotación diferencial del Sol: se puede observar que la línea rota más rápido en el ecuador que en los polos. Obtenido de Karttunen et al. (2016).

Según Karttunen et al. (2016) ha sido posible medir la velocidad de rotación mediante el efecto Doppler y se escribe:

$$\Omega = A - B \sin^2 \psi \quad \text{grad/día} \quad (1.1)$$

donde ψ es la latitud con respecto al ecuador. Según Bhatnagar y Livingston (2005) Howard y Harvey dieron valores de $A = 14.5$ y $B = 2.9$ grados/día gracias a sus observaciones espectroscópicas.

La velocidad de rotación en el interior solar no puede ser observada, sin embargo, sí puede ser medida. En 1980 se desarrolló un método para estimar la rotación en el interior mediante la medición de frecuencias por oscilaciones solares en las variaciones en las líneas espectrales. Estas oscilaciones son, esencialmente, ondas de sonido producidas por movimientos de gas turbulento en la zona convectiva.

Las ondas de sonido tienen periodos de oscilación calculables (3-12 minutos) que dependen de las condiciones en el interior del Sol (Karttunen et al. (2016); Bachiller (2009)).

Usando la heliosismología² ha sido posible desarrollar modelos sobre la rotación del Sol en la zona convectiva. Parece ser que, la velocidad angular en toda la zona convectiva es prácticamente la misma que en la superficie, sin embargo, esta decrece ligeramente con el radio cerca del ecuador y aumenta en los polos. La velocidad angular del núcleo radiativo todavía es incierta, pero hay indicaciones de que gira como un cuerpo rígido con la velocidad promedio de la superficie (Karttunen et al., 2016).

En la base de la zona convectiva se encuentra una delgada capa de discontinuidad llamada *tacoclina* donde la velocidad angular cambia rápidamente con el radio. En la figura 1.2 se puede ver en el eje horizontal inferior la distancia en radios solares desde el núcleo hasta la zona convectiva, a un radio solar; el eje vertical izquierdo muestra el periodo de rotación solar en días mientras que el eje vertical derecho muestra la velocidad angular en nHz; dentro del cuadro de la gráfica se pueden observar números que van del 0 al 75 y que indican la latitud en grados donde 0° es el ecuador solar. La imagen muestra cómo, a medida que se avanza más hacia la superficie, la velocidad angular va cambiando con respecto al periodo de rotación, pero se mantiene uniforme (cambia toda la velocidad). Sin embargo, cuando se alcanza la base de la zona convectiva ($\approx 0.7R_{\odot}$) se puede observar que la velocidad cambia según la latitud y por lo tanto el periodo de rotación también es distinto dependiendo de la latitud solar, en el ecuador siendo de ~ 25 días y a latitudes de 75° de ~ 36 días.

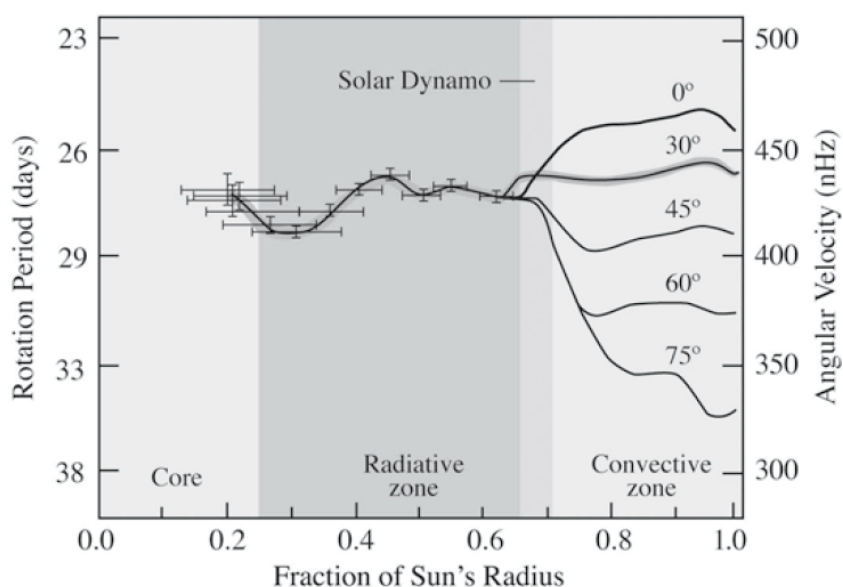


Figura 1.2: Esquema de la tacoclina en la base de la zona convectiva. Obtenido de Lang (2007).

²La heliosismología es el estudio de las oscilaciones que se producen en la superficie del Sol. Se trata de ondas de sonido generadas por la turbulencia de la superficie solar y amplificadas por medio de interferencias constructivas.

³ R_{\odot} se refiere al radio solar.

La fotosfera es la parte visible de la superficie del Sol: la parte más baja de la atmósfera solar y tan sólo tiene entre ~300 y 500 km de espesor. La temperatura en su base inferior es de 8000K y en la base superior es de 4500K. Dado que es la capa que queda directamente sobre la zona convectiva, es aquí donde se pueden apreciar los efectos de dicha convección. Como se mencionó anteriormente, cuando el material caliente sube, lo hace en forma de celdas de convección que al llegar a la base de la fotosfera se enfrían y vuelven a bajar por los lados de una nueva celda que asciende. Esta dinámica se manifiesta en forma de gránulos con límites oscuros (por su menor temperatura) en la superficie solar (ver figura 1.3).

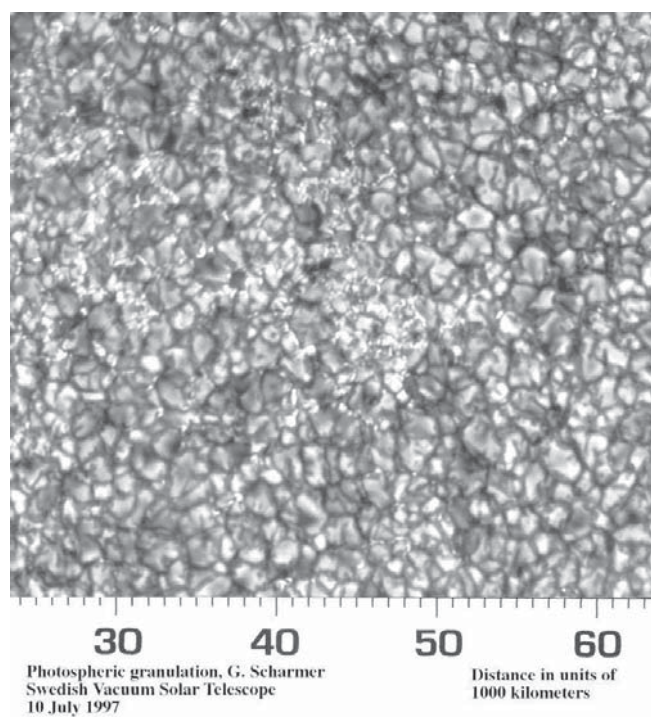


Figura 1.3: Granulación observada en la fotosfera solar. Obtenido de *Solar Science NASA MARSHALL SPACE FLIGHT CENTER*.

1.2. Atmósfera

La atmósfera solar se divide en cromosfera, región de transición y corona (ver figura 1.4). Justo sobre la fotosfera se encuentra una delgada capa de gas conocida como Cromosfera. Esta capa es de unos 500 km de espesor donde la temperatura aumenta de 4500 K a 6000 K. Normalmente, la cromosfera no es visible ya que su radiación es mucho más débil que la emitida por la fotosfera, de hecho fue observada por primera vez durante un eclipse solar total donde la Fotosfera quedó oculta por la Luna y la cromosfera pudo verse como un anillo rojizo en los dos límites de la fase total (Lang, 2007).



Figura 1.4: Representación artística de las capas de la atmósfera solar con sus respectivas temperaturas en °C. Obtenido de *Astrofísica y Física*, (2013).

Las regiones brillantes, usualmente, son del tamaño de un súper-granulo y están rodeados por *espículas*. Estas son estructuras verticales de hasta 10,000 km de altura sobre la cromosfera. Vistas contra la superficie del Sol parecen estructuras oscuras pero vistas en el límite solar con la oscuridad del espacio de fondo parecen pasto en llamas (ver figura 1.5).

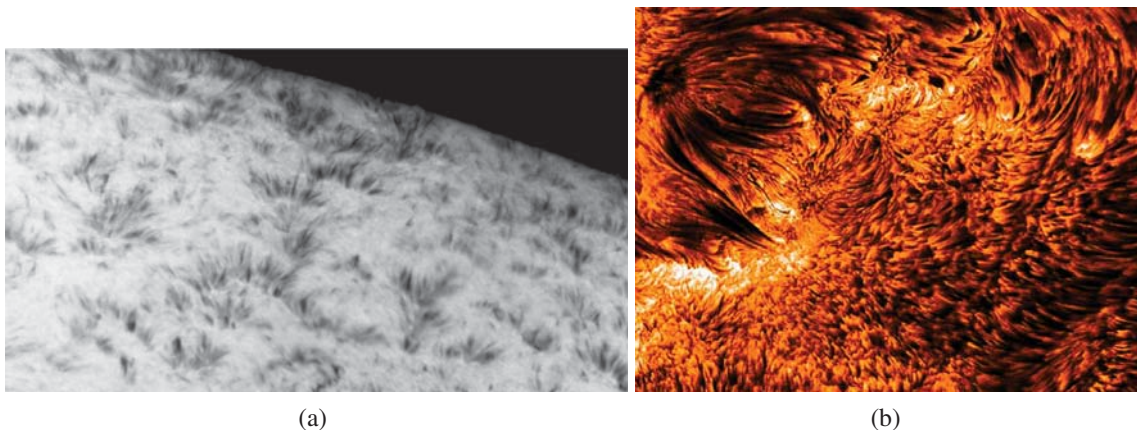


Figura 1.5: Espículas en la cromosfera solar. a) Fotografía del observatorio solar de Big Bear, California. Obtenido de *Karttunen et al.* (2016). b) Fotografía obtenida con el Telescopio Solar Sueco (SST, por sus siglas en inglés). Obtenido de *Lang* (2007).

En la cromósfera hay una zona, que se expande por algunos kilómetros, conocida como zona de transición donde la temperatura aumenta drásticamente hasta alcanzar los $10^6 K$.

Después de la zona de transición viene la parte más alta de la atmósfera solar: la corona. Esta región, normalmente, no es visible ya que, al igual que con la cromosfera, la radiación de la fotosfera es mucho más brillante. Sin embargo, se hace visible durante los eclipses solares cuando la luna tapa

completamente al Sol y la atmósfera puede observarse, efectivamente, como una corona de luz saliendo del Sol.

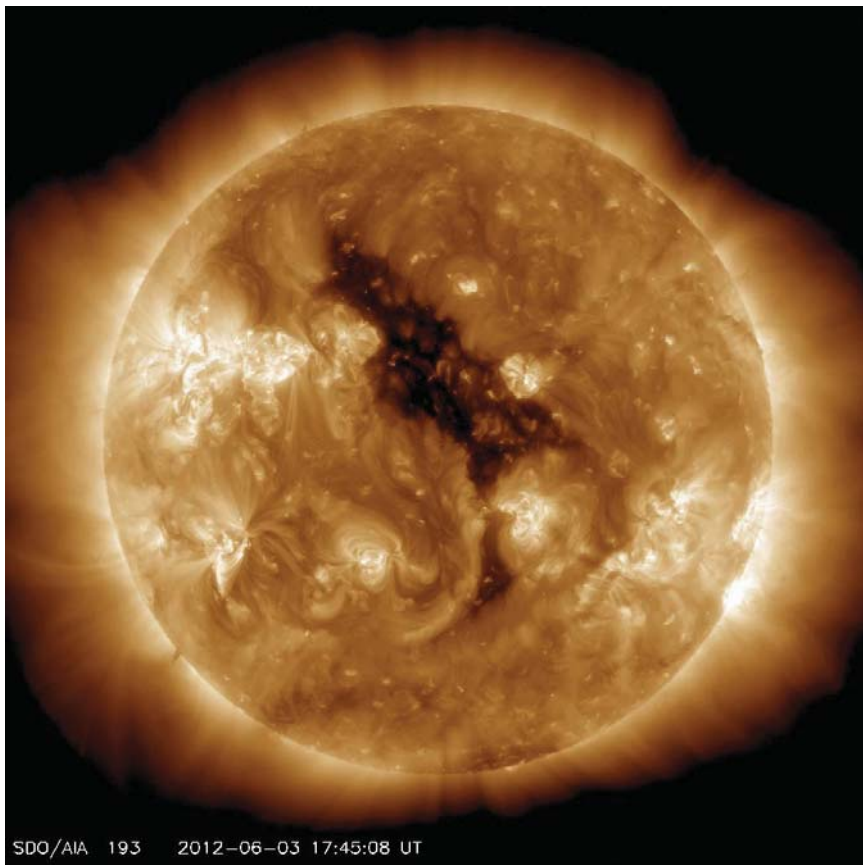


Figura 1.6: Fotografía de la corona solar observada en Rayos X, tomada por Solar Dynamics Observatory de la NASA. Obtenido de *NASA Images*.

La parte más interna de la corona, la *corona K*, tiene un espectro continuo de luz emitida por los fotones dispersados por la fotosfera. Más hacia afuera se encuentra la *corona F*, la luz de esta región es luz solar dispersada por partículas de polvo.

A finales del siglo XIX se descubrieron líneas de emisión muy intensas nunca antes vistas en la corona y se pensó que era debido a un nuevo elemento que sólo se encontraba en el Sol. Pero en 1940 se descubrió que estas líneas se debían a átomos altamente ionizados (hierro ionizado trece veces o más) lo cual indicó que, contrario a lo que se pensaba, la temperatura aumenta significativamente en la corona en vez de disminuir como sería lógico, de hecho, la corona solar tiene temperaturas de \sim un millón de grados (Karttunen et al. (2016); Lang (2007)).

A pesar de su alta temperatura, el gas de la corona es tan difuso que la energía almacenada es muy poca y constantemente está siendo expulsado hacia afuera, gradualmente convirtiéndose en un *viento solar* el cual acarrea partículas hacia el espacio interplanetario (Karttunen et al., 2016). El gas que se pierde es remplazado por nuevo material de la cromosfera. Cerca de la Tierra, a 1 Unidad Astronómica

(UA)⁴, la densidad del viento solar es de $\sim 5\text{-}10$ partículas/cm³ y su velocidad promedio es del alrededor de 500 km/s.

1.3. Actividad Solar

El Interior solar está cargado eléctricamente por electrones y protones. El gas caliente que circula genera corrientes eléctricas que, a su vez, generan campos magnéticos. El campo magnético solar está *congelado* en el gas cuyas partículas se llevan el magnetismo con ellas. A medida que se mueve con el gas, el campo magnético se deforma, dobla, alarga y tuerce (Lang, 2007) (ver figura 1.7).

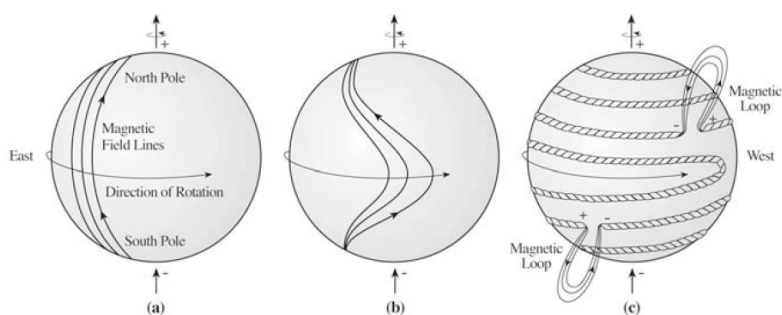


Figura 1.7: El campo magnético solar y su evolución a través del tiempo. Obtenido de Lang (2007).

Al inicio del ciclo de 11 años de actividad magnética, el campo magnético se puede asumir como un dipolo. Este campo *corre* por debajo de la fotosfera desde el polo sur al polo norte solar, a medida que el tiempo avanza el material altamente conductivo que se encuentra dentro del Sol arrastra el campo magnético y lo *enrolla*. Como el ecuador solar rota a una tasa mayor que los polos, el campo magnético interno se alarga y se *envuelve* alrededor del centro solar, deformándose en un campo parcialmente toroidal. El campo, entonces, se concentra y tuerce como una cuerda. A medida que la tensión aumenta el magnetismo, hasta ahora sumergido, se eleva y penetra el disco visible (fotosfera) creando bucles magnéticos y manchas solares. La mayor parte de la actividad solar está relacionada con el campo magnético (Forcada, 2013) (Antia, Bhatnagar y Ulmschneider, 2003).

1.3.1. Manchas Solares

Las manchas solares o *sunspots* (ver figura 1.8) son, probablemente, la representación más común de actividad solar que podemos observar. En efecto, son manchas oscuras (ver figura 1.8) que aparecen en la fotosfera y que al seguir su movimiento pueden utilizarse para determinar la rotación solar. La parte más oscura de la mancha es conocida como *umbra* y la menos oscura, hacia los extremos, como *penumbra*.

⁴Una unidad astronómica es la distancia que separa al Sol de la Tierra y equivale a $\sim 150 \times 10^6$ km.

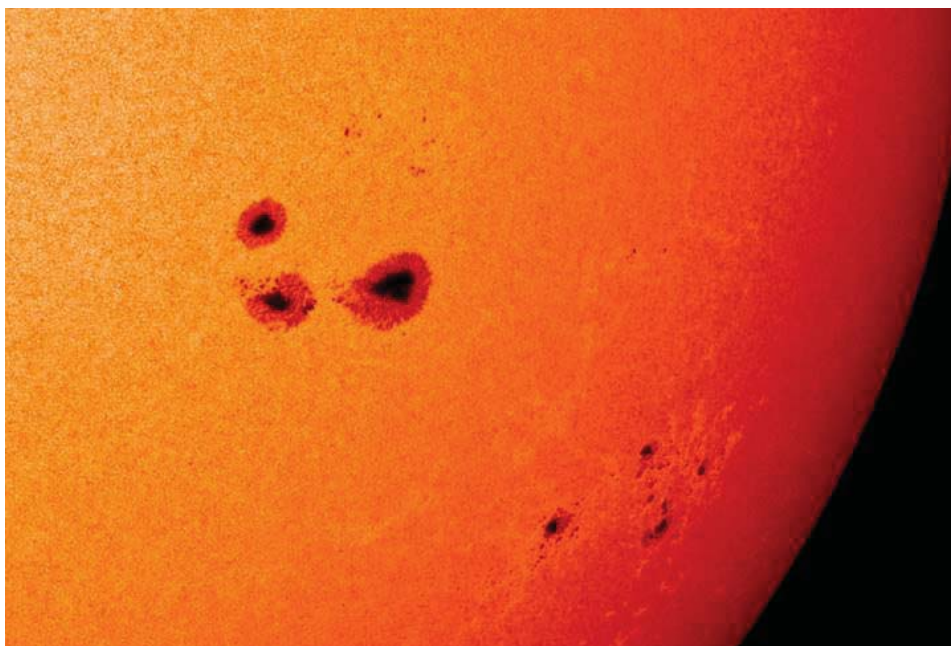
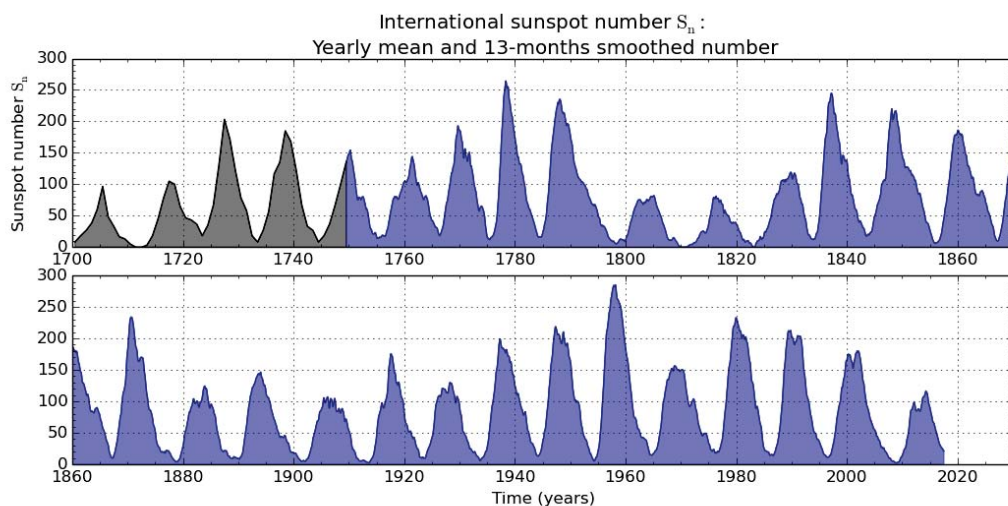


Figura 1.8: Manchas solares en la fotosfera. Obtenido de *NASA Solar Dynamics Observatory (SDO) Gallery*.

Al observar las manchas solares se puede notar que parecen estar hundidas con respecto al resto de la fotosfera y tienen un aspecto más oscuro que el del resto de la superficie solar debido a que se encuentran a una temperatura más baja, aproximadamente 1000 K menos que el resto de la superficie circundante (Forcada, 2013).

El diámetro promedio de una mancha solar es de $\sim 10,000$ km y su tiempo de vida puede ser desde algunos días hasta meses, dependiendo de su tamaño. Las manchas más grandes tienen un tiempo de vida mayor (Karttunen et al., 2016).



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2018 February 1

Figura 1.9: Gráfica del número de manchas solares desde 1700. Se puede apreciar como fluctúa el número de manchas solares a través de los años. Implícitamente se puede apreciar la variación del ciclo solar. Obtenido de *Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO)*.

Las manchas solares están relacionadas con un ciclo de 11 años conocido como *ciclo solar* donde la actividad de la estrella aumenta hacia un máximo y después disminuye hasta que llega a un mínimo para volver a comenzar (ver figuras 1.9 y 1.10). Este periodo fue primero observado por Samuel Heinrich Schwabe en 1843 y actualmente se tienen registrados 24 ciclos solares (Forcada, 2013). Las variaciones en el número de manchas ayudan a determinar estos periodos y han sido monitoreadas desde hace casi 250 años.

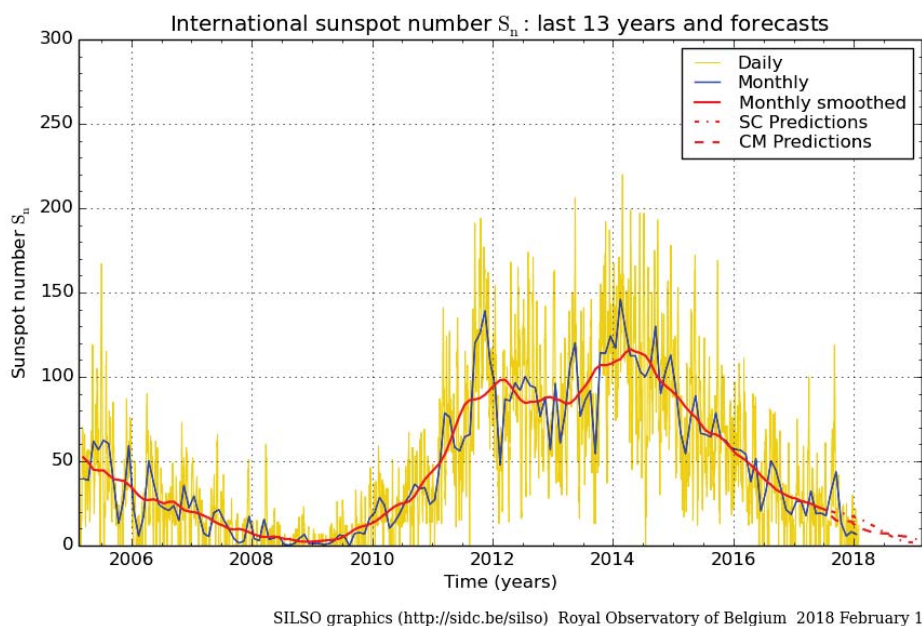


Figura 1.10: Acercamiento al número de manchas solares desde el 2006 y hasta el 2018. Se puede observar como el número de manchas comienza a aumentar desde el 2010 hasta alcanzar su máximo para después comenzar a disminuir y llegar a un mínimo al acercarse el 2018. Obtenido de *Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO)*.

Las manchas solares son un efecto directo del campo magnético del Sol; de hecho, estas manchas son regiones de campo mucho más intenso que los alrededores, por lo que su temperatura es menor. El campo magnético en las manchas se mide basándose en el efecto Zeeman⁵ y puede ser tan grande como 0.45 teslas. Usualmente, las manchas se dan en pares donde cada una tiene una polaridad diferente.

Las variaciones en la cantidad de manchas y el ciclo de 11 años con el que se relacionan son una manifestación de qué tan activo o inactivo está el Sol y son un reflejo de la variación del campo magnético.

Al principio del ciclo las manchas comienzan a aparecer a latitudes de alrededor de $\pm 40^\circ$ y a medida que el ciclo avanza los grupos de manchas se van moviendo hacia el ecuador. Si se grafica el camino que siguen las manchas durante varios ciclos solares (ver figura 1.11), se hará evidente que el patrón es prácticamente el mismo para cada ciclo. Esta gráfica se conoce como *diagrama de la mariposa* por la

⁵El efecto Zeeman consiste en el desdoblamiento de niveles atómicos de energía, y en consecuencia, de las correspondientes líneas espectrales, cuando los átomos se colocan en un campo magnético. Véase (Borda y Davidovich, 2009).

forma tan peculiar que tiene (Bhatnagar y Livingston, 2005) (Antia, Bhatnagar y Ulmschneider, 2003). El ciclo de manchas solares sigue siendo estudiado ya que todavía no hay modelos basados en principios físicos que puedan predecir el número de manchas, y por consiguiente el grado de actividad solar, para cada ciclo.

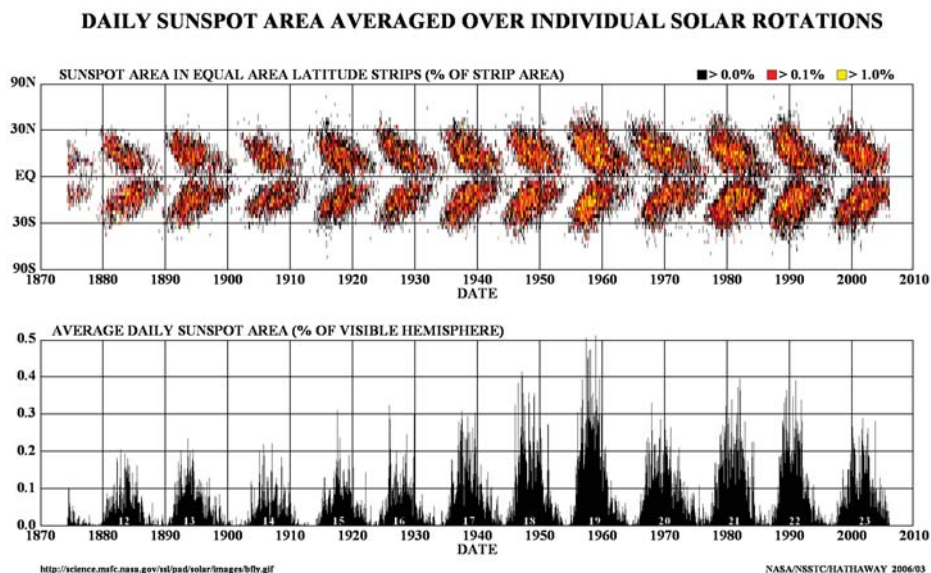


Figura 1.11: Diagrama de la mariposa. Se puede observar que al principio del ciclo las manchas comienzan cerca de los polos y se van moviendo al ecuador. Obtenido de NASA *Marshall Space Flight Center*.

1.3.2. Fulguraciones

Uno de los eventos energéticos radiativos más notables son las fulguraciones, también conocidas como *flares* (ver figura 1.12). Una fulguración es, esencialmente, una liberación súbita de energía que aparece como un aumento en radiación electromagnética sobre un amplio rango del espectro y se manifiesta con movimientos de masa, partículas, ondas y ondas de choque. La mayoría de las fulguraciones se dan en regiones activas circundantes a las manchas solares (Antia, Bhatnagar y Ulmschneider, 2003).

Al estar relacionadas con las regiones activas, la frecuencia de las fulguración también está asociada al ciclo de 11 años, aunque con algunas variaciones. Sin embargo, una fulguración puede darse incluso cuando la región activa ha decaído o ha perdido todas sus manchas. Una fulguración grande, por ejemplo, puede liberar hasta 10^{32} ergs de energía en cuestión de minutos a horas y $\sim 35\%$ de esta energía puede manifestarse en todas las longitudes de onda del espectro visible (Antia, Bhatnagar y Ulmschneider, 2003).

Las fulguraciones se clasifican de acuerdo con su brillo en Rayos-X en un intervalo de 1 a 8 Angstroms. Existen tres categorías: las fulguraciones de clase X son grandes, son eventos de gran magnitud que pueden desatar tormentas de radiación de larga duración; las de clase M son de tamaño mediano, pueden generalmente causar ligeros apagones en el radio afectado por las regiones polares de

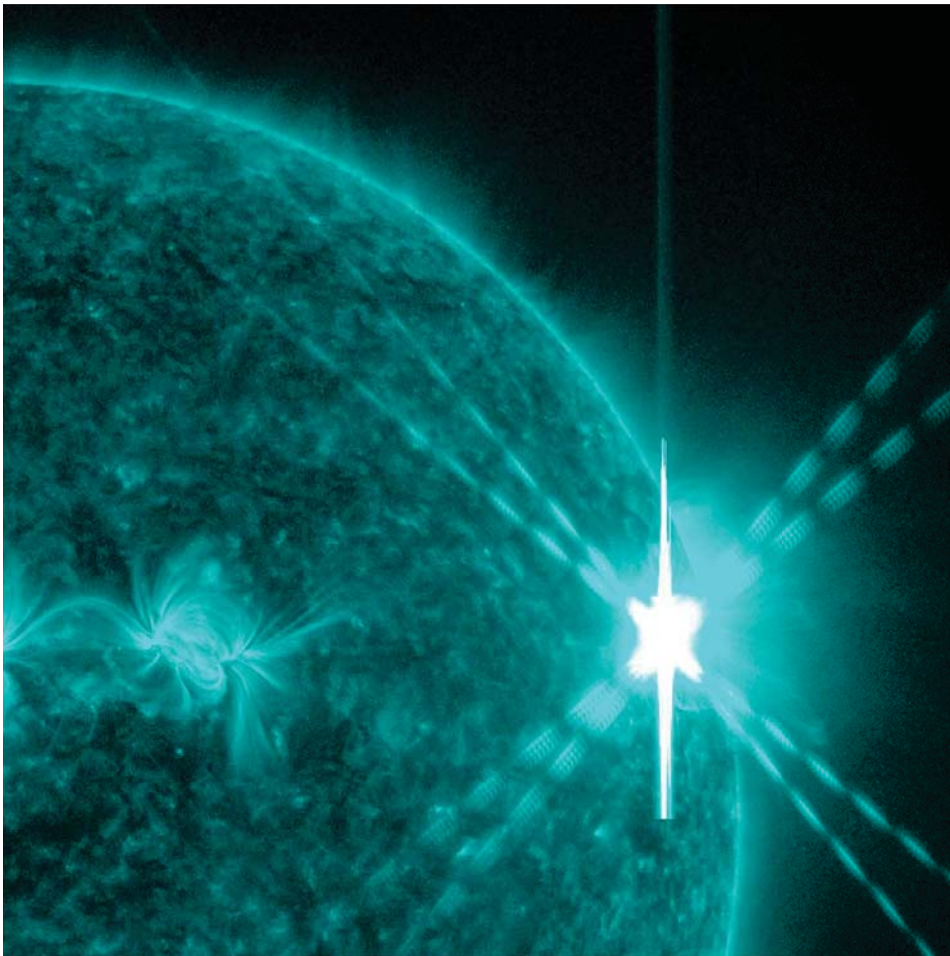


Figura 1.12: Fulguración X7 en el extremo UV (131 Angstrom) del día 9 de agosto 2011. Esta fue la mayor fulguración de sólo tres fulguraciones clase X para el ciclo 24. Obtenido de *NASA Solar Dynamics Observatory (SDO) Gallery*.

la tierra. A veces hay tormentas de radiación menores tras de una llamarada de clase M; comparados con los eventos de tipo X y M, las fulguraciones de clase C son pequeñas y de consecuencias poco notorias en la Tierra (NOAA, 2018). No es sólo la cantidad de energía liberada en las fulguraciones, sino también la espontaneidad de los eventos lo que hacen de estos fenómenos algo espectacular y de sumo interés en la comunidad científica (Howard, 2011).

1.3.3. Protuberancias y Filamentos

“En otro tipo de actividad solar, las protuberancias relativamente frías y largas expulsan su contenidos hacia el espacio desafiando la enorme gravedad del Sol”, Lang (2007) (ver figura 1.13).

La estructuras antes mencionadas, son conocidas como protuberancias cuando se observan en el limbo solar en contraste con el fondo oscuro. Sin embargo, se llaman filamentos cuando se proyectan sobre el disco brillante (Bhatnagar y Livingston, 2005) (Lang, 2007). De lo anterior se puede entender que, esencialmente, las protuberancias y los filamentos son el mismo tipo de estructura simplemente

vistos desde una perspectiva diferente.

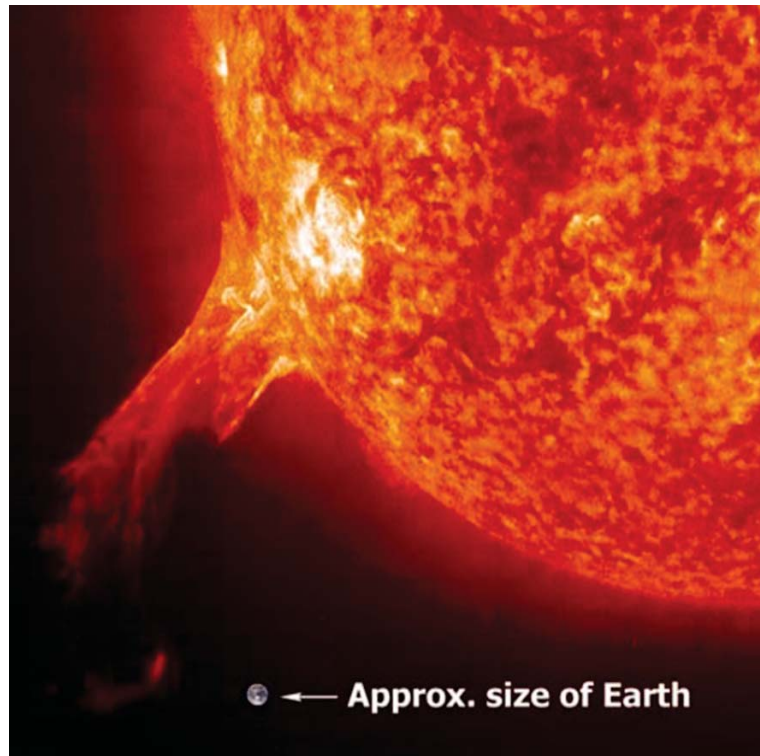


Figura 1.13: Una prominencia solar con la Tierra en comparación. Obtenido de [Lang \(2007\)](#).

Arcos magnéticos sostienen, levantan y aíslan estas largas estructuras llenas de material solar a una temperatura de $\sim 10,000\text{K}$ (lo que es miles de veces más frío que la corona de un millón de grados). Este tipo de estructuras pueden alargarse grandes distancias sobre el Sol y sus formas largas y sinuosas crean una región de neutralidad que separa campos de polaridad magnética diferente. Las protuberancias, y filamentos, pueden mantenerse suspendidas sobre la fotosfera por días e incluso semanas hasta que llega un momento en el que ya no pueden soportar la tensión y, sin advertencia alguna, el magnetismo que soporta la protuberancia se rompe pero, en vez de caer por acción de la gravedad, este material “auto-contenido” estalla, levantándose como si estuviera impulsado por un chorro coronal y el gas frío es expulsado hacia afuera como impulsado por un resorte, “rompiendo” la corona y sacando grandes cantidades de material hacia el espacio. ([Lang, 2008](#)).

Las protuberancias o filamentos muchas veces se vuelven a formar con la misma forma y en el mismo lugar después de explotar como si el magnetismo que sostiene la estructura solo necesitara liberar la tensión acumulada: filamentos largos y delgados se levantan y desaparecen siendo remplazados por arcos brillantes en Rayos X que se sitúan donde estaba el filamento original, de modo que la estructura magnética principal se re-agrupa en la posición inicial debajo de la protuberancia en erupción ([Karttunen et al., 2016](#)) ([Bhatnagar y Livingston, 2005](#)).

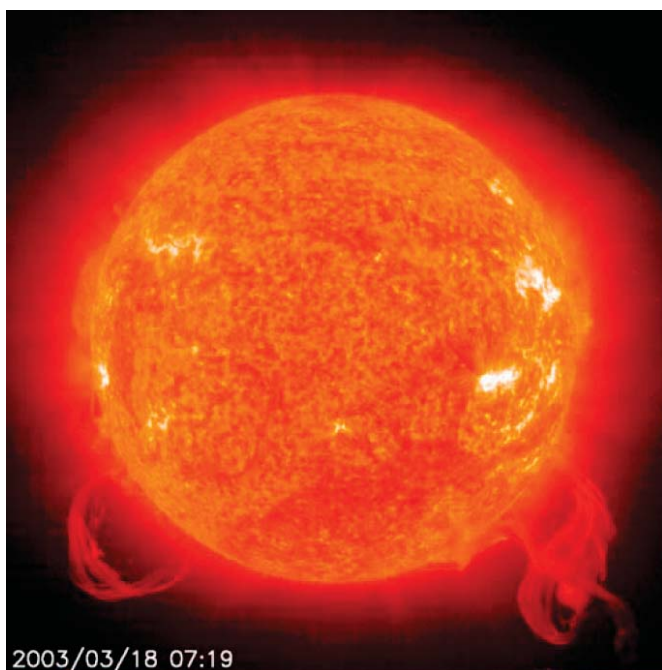


Figura 1.14: Dos prominencias observadas en el limbo sur solar. Esta imagen fue tomada el 21 de marzo de 2003 por el instrumento EIT abordo de la sonda SOHO. Obtenido de [Lang \(2008\)](#).

Aparentemente, los arcos magnéticos cerrados soportan el filamento como si se tratara de una hamaca. Esta arcada de bucles magnéticos está anclada al Sol pero, se abre en la parte de arriba por el filamento que se levanta. La estructura magnética después se re-conecta y el sistema vuelve a quedar cerrado. Una característica de los filamentos o prominencias es que el bucle magnético que lo sostiene esta “hundido” del centro donde se acumula el gas frío ([Vial y Engvold, 2015](#)) ([Bhatnagar y Livingston, 2005](#)). Al mismo tiempo, una arco de campo magnético se arquea sobre el bucle magnético principal de la prominencia (el cual la mantiene levantada) y en vez de dirigirse de forma paralela con la línea neutral magnética (creada por la propia prominencia) mas bien lo hace a través de ella de forma que, esta arcada magnética queda anclada en regiones de polaridad magnética distinta. Estos arcos magnéticos que se superponen al bucle principal ayudan a contener a la protuberancia, evitando que se expanda hacia el espacio (ver figura 1.15).

Las protuberancias y filamentos muchas veces están correlacionados con otro evento solar: las eyecciones de masa coronal. En 1979, Richard Munro y sus colegas encontraron que más del 70% de las eyecciones de masa coronal están asociadas con prominencias eruptivas mientras que, en 2006 Zhou mostró que los filamentos eyectados acompañan al 94% de las eyecciones tipo halo dirigidas a la Tierra ([Lang, 2008](#)).

1.3.4. Eyecciones de Masa Coronal (EMC)

Una eyección de masa coronal (EMC) consiste de plasma liberado estrepitosamente desde la corona solar hacia el espacio interplanetario (ver figura 1.16). Se producen por las torceduras en el campo magnético solar. A medida que la eyección avanza crea una onda de choque que acelera al viento solar ambiente y modifica la intensidad de su campo magnético ([Christian R. E., 2012](#)).

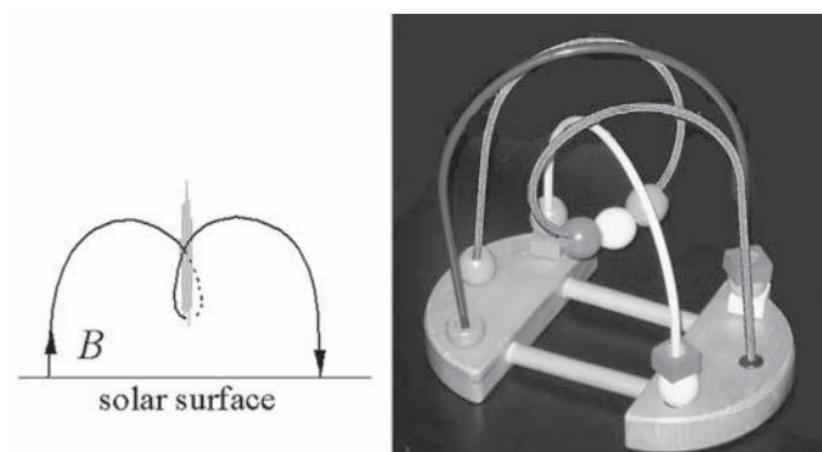


Figura 1.15: Estructura de una prominencia. Izquierda: el bucle magnético que sostiene el gas debido a la tensión magnética. Derecha: el bucle magnético soportando cierto peso (gris claro), la arcada magnética que contiene a la prominencia (gris oscuro) y la línea de campo delineando el eje del bucle (blanco). Obtenido de *Meyer Vernet (2004)*.

Una EMC se define como una gran erupción de plasma y campo magnético del Sol. La masa del plasma expulsado puede ser mayor a 10^{13} kg y alcanzar una velocidad de varios miles de kilómetros por segundo. Una EMC típica, tiene una masa entre $10^{11} - 10^{12}$ kg y una velocidad de entre 400 y 1,000 km/s (*Howard, 2011*).

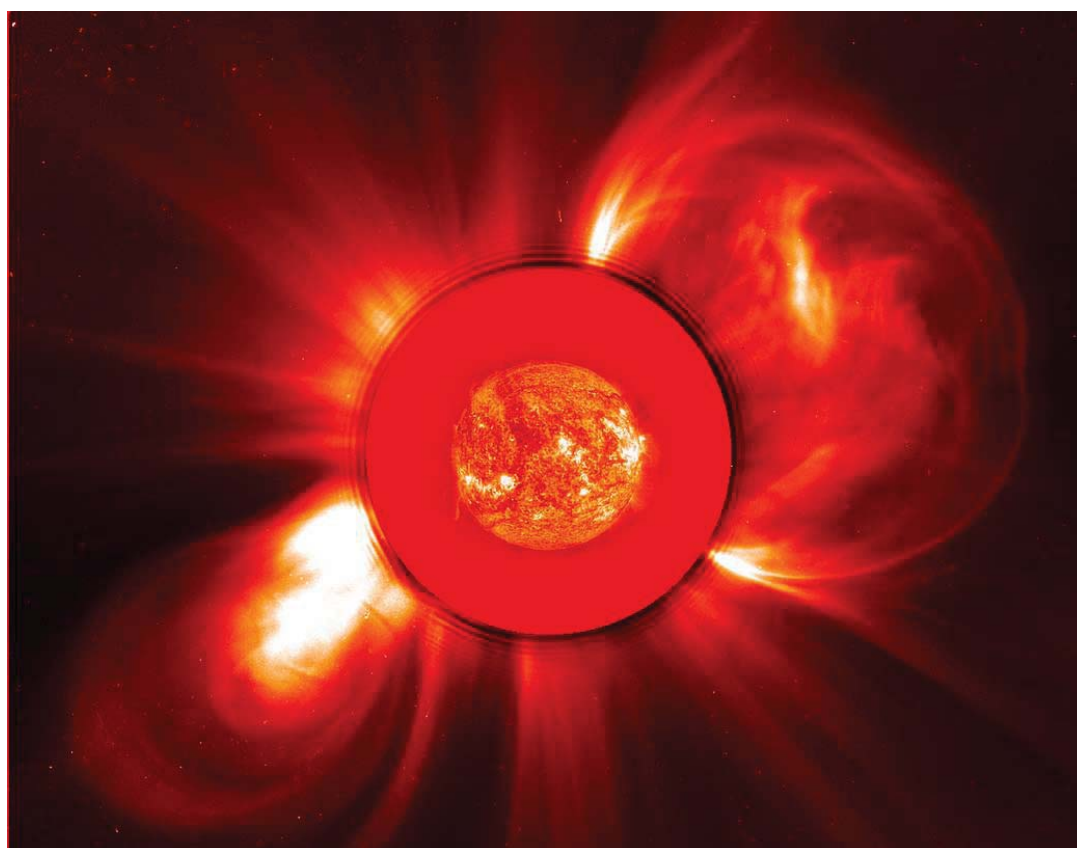


Figura 1.16: Observación de una EMC por el observatorio espacial SOHO. Obtenido de *SOHO Images NASA*.

Las EMC pueden salir de cualquier región del Sol pero están más asociadas a regiones de baja latitud, son fenómenos que se asocian a las manchas solares y, por lo tanto, al ciclo solar. Su frecuencia depende en gran medida de estos dos factores (Christian R. E., 2012) (Webb y Howard, 2012). Pueden ocurrir una vez al día durante el mínimo solar y aproximadamente cinco veces al día durante el máximo Howard (2011).

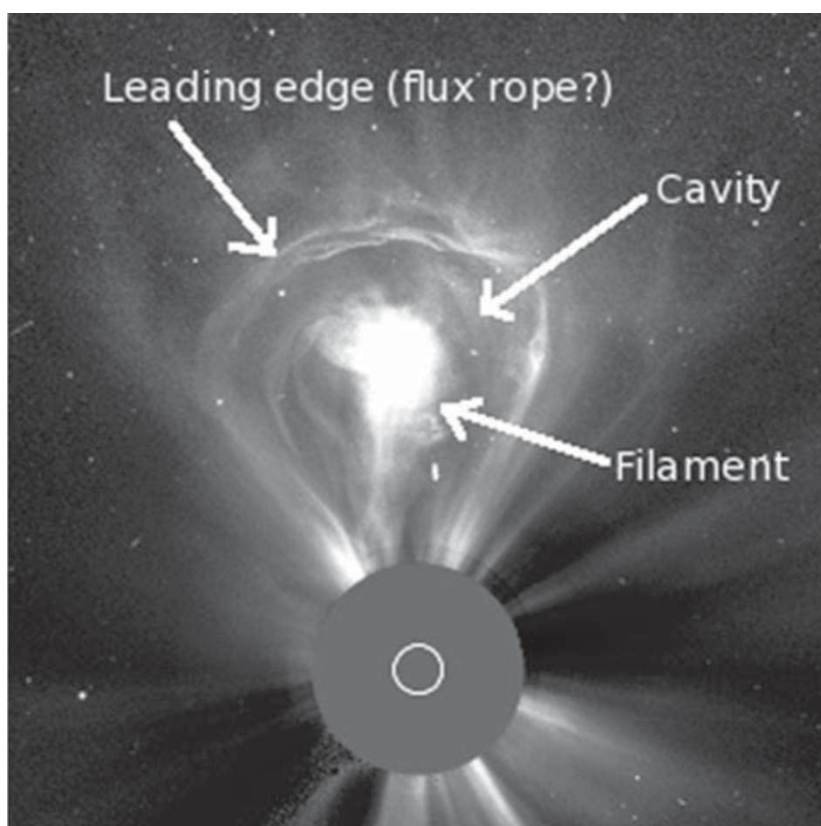


Figura 1.17: Estructura de una EMC. Obtenido de Howard (2011).

La composición del material que compone a una EMC todavía no se comprende completamente. La respuesta, tal vez, tenga que ver con el mecanismo responsable de la liberación de la eyección. Si se asume que el proceso de liberación cerca del Sol está dominado magnéticamente entonces, es lógico pensar que el material dominante en la región de donde sale la EMC sea el mismo que compone la masa de la misma. Por ejemplo si la eyección se libera en la corona, se espera que el material que la compone sea coronal o si el proceso se da en la atmósfera baja, entonces, el material dominante debería ser igual al de la fotosfera, sin embargo, una EMC probablemente es una combinación de material proveniente de varias regiones del Sol y puede tener muchos tipos de componentes (Howard, 2011).

1.3.4.1. ¿Cómo se detectan?

Para observar la corona es necesario *ocultar* la luz del disco solar utilizando un *coronógrafo*, el cual es un instrumento que sirve para observar la corona solar, bloqueando la intensa luz de la fotosfera solar

para que la de la corona (que es mucho más tenue) se haga visible.

Hasta ahora, el coronógrafo más eficiente ha sido *LASCO* (Large Angle Spectroscopic Coronagraph) que se encuentra a bordo de *SOHO*, misión que consta de varios coronógrafos. *LASCO* puede obtener imágenes de la corona solar a una distancia aproximada de un séptimo de UA o aproximadamente 21 millones de kilómetros y ha detectado alrededor de 10^4 EMCs desde su lanzamiento en 1995 (Howard, 2011).

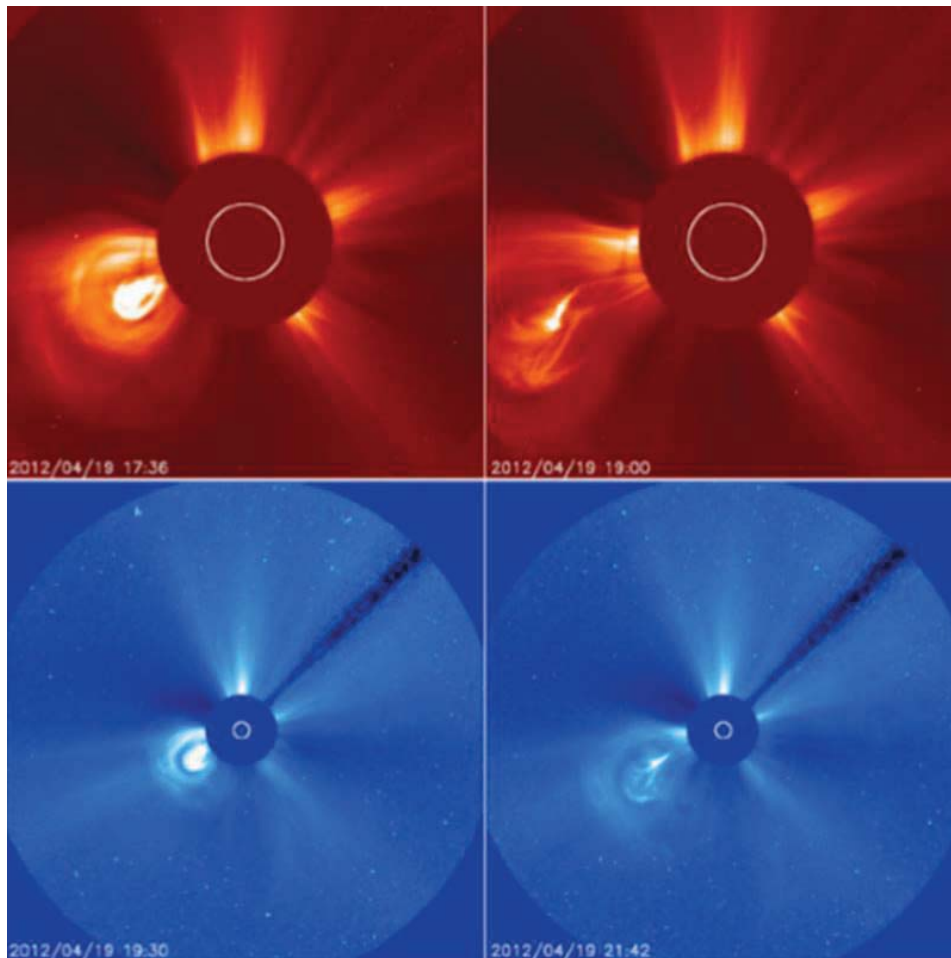


Figura 1.18: Fotografías tomadas para la misma EMC vista a través de *LASCO* el día 19 de abril de 2012. En la parte superior: EMC capturada por *LASCO* C2. Parte inferior: EMC capturada por *LASCO* C3. Obtenido de *SOHO NASCOM Gallery*.

En la imagen 1.18 se puede observar una EMC observada por *LASCO* C2 y *LASCO* C3; es fácil darse cuenta que *LASCO* C3 tiene un campo de visión mucho más amplio que C2, de hecho, abarca hasta 32 veces el diámetro del Sol.

Estas eyecciones son detectadas mediante la observación de la dispersión de la luz blanca por los electrones dentro del plasma de la EMC. Las imágenes de coronógrafo están en dos dimensiones así que en realidad las imágenes de las eyecciones son proyecciones en el plano del cielo, (*sky plane*). Por

lo anterior, la dirección de propagación tiene un papel importante en la aparición de una EMC y para estudiarlas muchas veces se recurre a analizar la zona en la superficie solar de donde fue liberada la EMC (Howard, 2011).

Las eyecciones de masa coronal son el fenómeno solar que más perturba al campo magnético terrestre ya que generan tormentas geomagnéticas. Es por esto que su estudio y análisis resulta de vital importancia para la disciplina del clima espacial.

1.4. Interacción Sol-Tierra

1.4.1. Clima Espacial

La Tierra, y su entorno, están sujetos a variaciones y perturbaciones que se dan por distintos factores estudiados en el contexto de lo que se conoce como el Clima Espacial (CE). Estudiar el Clima Espacial es fundamental en el mundo actual, debido a la gran dependencia tecnológica que la sociedad en general tiene en diversos rubros, tales como las telecomunicaciones, posicionamiento a través de GPSs, navegación aérea, entre otros.

El clima espacial se refiere a condiciones temporalmente variables en el Sol, viento solar, magnetósfera, ionósfera y atmósfera, que pueden dañar las transmisiones espaciales o sistemas tecnológicos terrestres y pueden amenazar la salud humana y la vida. Estos eventos solares que incluyen fulguraciones, la erupción repentina de fotones energéticos, y partículas de la superficie solar, eyecciones de masa coronal donde el sol arroja billones de toneladas de masa de su atmósfera como plasma magnetizado, y el viento solar (Buonsanto, 1999).

Actualmente se tienen varias definiciones sobre lo que es el clima espacial, tales como las siguientes:

1. American Meteorological Society (AMS): “Space weather refers to the variable conditions on the Sun and in the space environment that can influence the performance and reliability of spaceborne and ground-based technological systems, as well as endanger life or health.” (Jones et al., 2010)

2. Asia Oceania Space Weather Alliance (AOSWA): “Space weather is the electromagnetic condition in the near-space around the Earth and it affects telecommunications, broadcast, satellite positioning and many of other social infrastructures.” (AOSWA, 2010)

3. European Space Agency (ESA): “Space weather refers to the environmental conditions in Earth’s magnetosphere, ionosphere and thermosphere due to the Sun and the solar wind that can influence the functioning and reliability of space-borne and ground-based systems and services or endanger property or human health. Space weather deals with phenomena involving ambient plasma, magnetic fields, radiation, particle flows in space and how these phenomena may influence man made systems. In addition to the Sun, non-solar sources such as galactic cosmic rays can be considered as space weather since they

alter space environment conditions near the Earth.” (ESA, 2017)

4. U. S .Office of Science and Technology Policy of The White House: “Space weather refers to the dynamic conditions of the space environment that arise from interactions with emissions from the sun, including solar flares, solar energetic particles, and coronal mass ejections” (Wackler, 2015).

5. U.S. National Space Weather Program: “The term ‘space weather’ refers to the variable conditions on the Sun, throughout space, and in the Earth’s magnetic field and upper atmosphere that can influence the performance of space born- and ground-based technological systems and endanger human life or health. Adverse conditions in the space environment can disrupt satellite operations, communications, navigation, and electric power distribution grids, leading to a variety of socioeconomic losses and impacts on our security. As our society becomes more technologically advanced, our vulnerability to space weather significantly increases.” (Williamson et al., 2010)

6. Servicio de Clima Espacial México (SCiESMEX): “El Clima Espacial o Meteorología del Espacio se define como la medición y el análisis en tiempo real del conjunto de propiedades físicas del Sol, el medio interplanetario, la magnetosfera, la atmósfera y la superficie terrestre que se encuentran influenciadas directa o indirectamente por la actividad solar y las cuales tienen un impacto en la infraestructura, tecnología, sociedad y salud. Estos fenómenos representan serios riesgos para el desarrollo humano puesto que se ha demostrado que afectan de forma global, la tecnología e infraestructura espacial y terrestre ”(De la luz, 2016).

Todas estas definiciones hablan sobre el entorno Sol-Tierra, los procesos variables y los fenómenos que aquí ocurren. La definición que da la ESA es la única que incluye los rayos cósmicos como parte de los procesos de clima espacial. Según Moldwin (2008) la definición más aceptada (y que en realidad es una compilación de las anteriores) del CE dice que: “...es el estudio, en tiempo real, de la actividad solar que logra influenciar directa o indirectamente las propiedades físicas del Sol, el medio interplanetario, la magnetósfera terrestre, su ionosfera y atmósfera en general e, incluso, la superficie terrestre.”

Según el National Weather Service, el Space Weather Prediction Center, estas mediciones en tiempo real se pueden dividir en tres categorías: sobre la superficie solar (ráfagas solares y EMC), en el medio interplanetario (eventos-radio,viento solar y centelleo interplanetario) y en la vecindad terrestre (campo magnético, condiciones del viento solar in situ, ionósfera y partículas energéticas). A cada medición se le asocia un índice que mide el nivel de perturbación asociado a eventos solares eruptivos y a su vez, define una escala de intensidad (Méndez Bedolla (2017); SWPC, NOAA).

1.4.1.1. Efectos en Tierra

Se ha encontrado que las tormentas geomagnéticas intensas (producto de eventos de partículas energéticas en el Sol) pueden dañar o destruir no solo a los satélites que se encuentran orbitando la Tierra, sino también a los astronautas durante misiones largas en la Estación Espacial Internacional y que son

potencialmente peligrosas para misiones de larga duración en la Luna o en Marte. En el pasado han ocurrido fenómenos que han impactado a la Tierra y que por ejemplo han dejado sin energía eléctrica a ciudades del hemisferio norte de la misma. Actualmente se ha visto que la confiabilidad y la precisión de los instrumentos de comunicación y navegación basados en GPS puede verse afectada en gran medida por este tipo de eventos (Moldwin, 2008) (Lanzerotti, 2007).

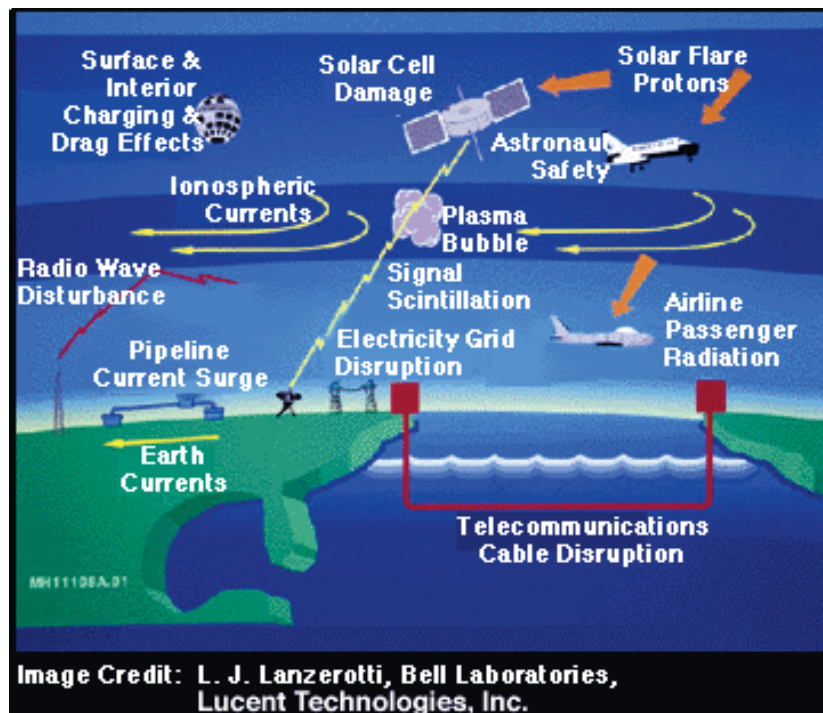


Figura 1.19: Efectos del Clima Espacial en el entorno terrestre. Obra original de Lanzerotti (1997): Lanzerotti (2007).

Según Baker y Lanzerotti (2016) los efectos del CE se pueden dividir de la siguiente forma:

A) Efectos en Sistemas en Superficie

- **Conductores largos (Long Conductors):** “Los grandes conductores instalados en tierra han sido susceptibles a la actividad geomagnética, desde su primera instalación en el siglo XIX” (Baker y Lanzerotti, 2016). En su forma más simple, corrientes eléctricas variables en el espacio y tiempo fluyen en la ionosfera y magnetosfera produciendo campos magnéticos variables en la superficie de la Tierra. Estos campos magnéticos que varían en el tiempo inducen corrientes en la superficie terrestre, mismas que buscan los caminos de mayor conductividad, estos caminos se los dan los conductores largos. Hoy en día hay 3 tecnologías primordiales que utilizan conductores largos:

- Redes eléctricas entre grandes distancias (usualmente entre continentes).
- Cables de comunicación de larga distancia (usualmente entre continentes).
- Tuberías.

- **Comunicaciones por radio:** Todas las comunicaciones, incluso las utilizadas en las comunicaciones tempranas (~1901), son susceptibles al estado de la ionosfera, y ésta a su vez se ve afectada por los cambios de exposición a rayos X provenientes del Sol, a emisiones ultravioleta y, en general, a la actividad solar. Partículas energéticas solares (SEPs), producidas durante la actividad solar, pueden entrar a la Tierra por los polos produciendo un aumento en la ionización de la ionosfera (Absorción del casquete polar; PCA), lo que puede afectar seriamente la propagación de señales. La ocurrencia del PCA significa que los vuelos con altas latitudes (vuelos con rutas polares) tengan que ser desviados a latitudes más bajas, lo que también significa rutas más largas (Baker y Lanzerotti, 2016).
- **Radares y Geolocalización:** “Obviamente cualquier tecnología que opere en o cerca del suelo se ve afectado por condiciones atmosféricas y/o geomagnéticas, ya sea que son de uso militar o civil” (Baker y Lanzerotti, 2016).

Los problemas de comunicación anteriormente mencionados son de interés militar de igual manera que lo son para las aerolíneas, estaciones de radio, personal de emergencia, etc. Aunque hay tecnología que se ve afectada que es de especial interés militar, por ejemplo, sistemas de radar sobre el horizonte (OTH; over the horizon) y varios tipos de sistemas de geolocalización. Los radares OTH utilizan la ionosfera para reflejar señales y así encontrar blancos a largas distancias, por lo tanto dependen de las condiciones ionosféricas y de la actividad solar en ese momentos, así que la gente que opera los OTH debe de estar siempre al pendiente de las condiciones del clima espacial.

De igual manera la ionosfera afecta a todos los aparatos que utilicen “geolocalización” y cualquier disturbio va a generar un decremento en la capacidad de operación.

- **Exploración:** “El termino exploración es utilizado comúnmente para cubrir temas en donde mayormente son usadas técnicas de medición magnética para estudios de la Tierra y sus recursos” (Baker y Lanzerotti, 2016). Esta sección se menciona los métodos de exploración y estudios de la Tierra por medio del campo magnético. Estos estudios utilizan variaciones del campo geomagnético debidas clima espacial como fuente, sin embargo, los autores mencionan que no son realmente relevantes en el campo del clima espacial, y sus impactos en sistemas tecnológicos.

B) Efectos en sistemas espaciales

- **Radiación en Naves Espaciales:** Las naves espaciales pueden operar desde fuera de la atmósfera “densa” hasta prácticamente los límites del sistema solar. Es por eso que los diferentes aspectos del clima espacial son de gran importancia, además de que los fenómenos pueden ser muy diferentes entre si. Cercanas a la Tierra hay partículas magnéticamente atrapadas y plasmas calientes que pueden generar grandes tensiones en las naves espaciales. “A medida que los satélites alcanzan mayores altitudes o viajan más lejos en el espacio en trayectorias interplanetarias, estos sistemas se vuelven más susceptibles a partículas de alta energía, rayos cósmicos, etc.” (Baker y Lanzerotti, 2016), es por eso que la tecnología espacial debe estar mejor preparada para este tipo de problemas.

- **Arrastre de Satélites (*Satellite Drag*):** Variaciones en la atmósfera terrestre, ya sea de densidad, temperatura, composición, etc, afectan el modo de operación de satélites, que proveen información para distintas cosas, más precisamente su órbita. Saber dónde se encuentra un satélite en todo momento permite ajustar orbitas o hacer pequeños cambios necesarios para su óptimo funcionamiento ya sea para alargar su vida útil o terminarla, esto se hace utilizando combustible que el satélite carga destinado para este propósito específicamente.
- **Orientación de naves espaciales:** La orientación de los satélites puede estar dada por “sensores estelares” (*star/Sun sensors*), la cual se utiliza para satélites tanto astronómicos como militares y civiles; la radiación de partículas cargadas puede producir falsas señales en los sensores ópticos haciendo que el satélite pierda su orientación, lo que puede terminar en la pérdida de comunicación con el satélite o la nave espacial.

Otro método de orientación es la respuesta a la dirección del campo magnético en la localización del satélite. Este proceso es efectivo mientras que el satélite se mantenga dentro de la magnetosfera terrestre donde la orientación está bien definida. Sin embargo, durante los periodos de intensa actividad solar y geomagnética, estos satélites pueden encontrarse fuera del lado día de la magnetósfera, es decir, dentro de la magnetofunda donde la dirección del campo está al revés. En estos casos los sensores que manejan la orientación por medio del campo magnético se ven inhabilitados.

Como se puede ver, los efectos del Clima Espacial son muchos y, debido a la gran dependencia tecnológica de hoy en día, repercuten directamente en la vida diaria de las personas en la Tierra. Es por esto que estudiar y entender los fenómenos solares y su impacto en la Tierra es de vital importancia ya que esto ayuda generar alertas y planes de acción que ayuden a la población, no sólo a estar informados sobre qué es lo que realmente sucede sino también, a estar preparados en caso de un evento importante.

Entre los esfuerzos realizados en México por estudiar, comprender y generar consciencia sobre el Clima Espacial se encuentra el Servicio de Clima Espacial México (**SCiESMEX**). Fundado en el 2014, el SCiESMEX es el encargado de contextualizar, almacenar y diseminar la información al CENAPRED y a otros actores afectados: CFE, Fuerzas Armadas, Protección Civil, IFETEL, Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, y al público en general en tiempo real o cercano al tiempo real. El SCiESMEX cuenta con una red de instrumentación que mida el CE en territorio nacional que se constituye de: el radiotelescopio MEXART (centelleo interplanetario), la red de GPS Tlaloc-Net/SSN (ionosfera), el radioespectrógrafo Callisto (eventos de radio solares), observatorio de rayos cósmicos (partículas energéticas), observatorio magnético de Teoloyucan (campo geomagnético) y las antenas schumann (ionosfera). Las funciones de este servicio incluyen medir y analizar en tiempo real el conjunto de propiedades físicas del Sol, el medio interplanetario, la magnetosfera, la atmósfera y la superficie terrestre que se encuentran influenciadas directa o indirectamente por la actividad solar y las cuales tienen un impacto en nuestra infraestructura, tecnología, sociedad y salud ([De la luz, 2016](#)).

1.5. Motivación y Estructura de la tesis

Estudiar el Sol en diversas longitudes de onda es vital para contar con un panorama más completo de aquellos fenómenos que tienen relevancia en el entorno terrestre como ya se ha mostrado a lo largo de este capítulo y poder estudiar de éstos propiedades físicas en general. En este sentido, hacer un monitoreo de esta estrella mediante el uso de la fotografía científica, sirve como apoyo visual para registrar aquellas regiones donde se manifiestan diversos fenómenos que pueden tener un impacto en nuestro entorno.

La motivación para realizar este trabajo surge fundamentalmente por dos razones. Primero porque queremos que a través de la fotografía científica México cuente con un registro diario del comportamiento del Sol en diversas longitudes de onda accesible a la comunidad científica del país. En este sentido, es importante decir que aunque México cuenta con varios observatorios astronómicos importantes (como los del OAN o el INAOE) muy pocos están dedicados al monitoreo de nuestra estrella en el contexto del Clima Espacial que es, como ya se mencionó a lo largo de este capítulo, de suma importancia por la dependencia tecnológica que la sociedad tiene actualmente y segundo, porque es importante informar de forma responsable todo esto al público en general como parte de la comunicación de la ciencia que se necesita en nuestro país. Mucha de esta labor se da desde el Laboratorio Nacional del Clima Espacial (LANCE, www.lance.unam.mx) con quienes se colabora en los reportes que semanalmente se emiten por este laboratorio.

El trabajo muestra los métodos de adquisición y observación para la obtención de fotografías solares en $H\alpha$ y posteriormente en Ca II K, que permiten diversificar en tres frentes el quehacer del Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales (LACIGE, www.lacige.unam.mx): a) la docencia, donde los estudiantes del Posgrado en Ciencias de la Tierra (PCT, www.pctierra.unam.mx/) y de la Licenciatura en Geociencias (LG, www.enesmorelia.unam.mx) pueden aprender estas metodologías, b) en la investigación, donde se analizan dichas imágenes para comprender la dinámica de las regiones activas y/o filamentos de plasma con la finalidad de relacionar éstas con posibles efectos en el entorno terrestre y, finalmente c) en la comunicación de la ciencia, donde a través de eventos, tales como observaciones, talleres, foros, pláticas, etc., se ha llevado este conocimiento al público en general para destacar la relevancia actual de monitorear al Sol. Cabe mencionar que los dos últimos casos están íntimamente relacionados y la finalidad de este trabajo es mostrar el uso que puede darse de estas imágenes en ambos sentidos.

Es importante destacar que al generar productos de divulgación basados en la fotografía científica, se busca apelar al sentido emocional y a la naturaleza curiosa del ser humano que, muchas veces, responde mejor ante los estímulos visuales que a otros recursos. Se busca motivar o incentivar el interés del público ante las Ciencias Espaciales y específicamente ante el Sol, que tiene un papel primordial en la vida, y su cotidianidad, pero que tantas veces pasa desapercibido.

El presente trabajo se divide en 6 capítulos y dos apéndices. En el capítulo 1 se hablará del Sol, sus características, los procesos que ocurren en la estrella así como de su interacción con el entorno

terrestre. El capítulo 2 trata la astrofotografía solar, desde los fenómenos físicos para observar, como el espectro electromagnético y las líneas de emisión, hasta llegar a los instrumentos de observación como el telescopio y la cámara. El capítulo 3 describe el proceso de obtención y procesado de las imágenes solares hasta llegar a su análisis para la obtención de medidas de las estructuras observadas en las mismas, el código utilizado como parte del análisis se encuentra en el apéndice A. En el capítulo 4 se hablará de divulgación científica describiendo qué es, por qué es importante y cómo se aplica en las Geociencias, dentro del mismo capítulo se incluye la motivación personal de incluir el tema en esta tesis. En el capítulo 5 se tratan algunos casos de estudio utilizando las imágenes obtenidas en el Laboratorio de Ciencias Geoespaciales (LACIGE) donde se presentan los resultados obtenidos de su análisis, este capítulo también aborda la utilidad de las imágenes para realizar investigación y divulgación de la ciencia. Finalmente, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones obtenidas al final de la tesis que derivan en el trabajo a realizar en un futuro. El apéndice B consiste de un disco compacto donde se encuentran las imágenes trabajadas en la tesis en caso de que se quiera verlas con más detalle.

Capítulo 2

Astrofotografía: Fotografía Solar

La astrofotografía es una mezcla entre la astronomía y la fotografía que consiste en capturar imágenes de cuerpos celestes. Su práctica en la astronomía permite ciertas ventajas respecto a la observación común, ya que, incluso, en largas exposiciones la emulsión fotográfica se imprime radiación de intensidad demasiado débil para ser percibida por el ojo humano (incluso cuando se utiliza un potente telescopio) (O'Donnell, 2016).

El primer uso de la astrofotografía se le atribuye a John William Draper el 23 de marzo de 1840 por un daguerrotipo¹ de la Luna. Sin embargo, la astrofotografía comenzó en serio en 1883, cuando Andrew Ainslie Common fotografió la nebulosa de Orión con un reflector de 36 pulgadas (0.91 m), registrando estrellas que no podían ser vistas visualmente con el mismo instrumento. Los astrónomos rápidamente explotaron el nuevo medio, y durante los siguientes cien años fue el primer medio de realizar observaciones ópticas. Su aplicación a la espectroscopia fue igualmente importante (Mármol, 2017).

La fotografía solar pertenece a uno de los 4 tipos principales de astrofotografía que se practican hoy en día. Los cuales, según Spiers-Madge (2013) y Cava (2002), son:

- Fotografía de espacio profundo.
- Fotografía planetaria o solar.
- Fotografía de paisaje nocturno o paisaje astronómico.
- Fotografía de *time-lapse*.

Aunque la fotografía solar es relativamente nueva (en el sentido que su contra parte planetaria o de espacio profundo son más practicadas) es de gran ayuda para el monitoreo y estudio de la actividad solar ya que provee de una herramienta visual que complementa la investigación.

¹El daguerrotipo fue el primer procedimiento fotográfico anunciado y difundido oficialmente en el año 1839. Fue desarrollado y perfeccionado por Louis Daguerre y se distingue de otros procedimientos porque la imagen se forma sobre una superficie de plata pulida como un espejo (Kurtz, 2001).

Para poder realizar un estudio fotográfico del Sol primero es necesario comprender cómo observamos el mundo que nos rodea, por eso es importante entender la luz, ya que es esta la que no sólo nos permite ver y diferenciar un objeto de otro, también nos permite fotografiar dichos objetos, e incluso enriquecer el estudio de diversos fenómenos a partir de su fenomenología en distintas longitudes de onda.

En este capítulo se pretende abordar la astrofotografía explicando un poco qué se observa y cómo, pasando por el espectro electromagnético y las líneas de absorción o emisión así como los instrumentos necesarios para poder realizarla.

2.1. El Espectro Electromagnético

La manera en la que interactuamos con el mundo depende en gran parte de la luz. El Sol radia energía que se distribuye por el espacio, a esta radiación se le conoce como *electromagnética* que se propaga mediante la interacción de campos magnéticos y eléctricos oscilantes (ver figura 2.1). Estos campos se propagan en el vacío con una velocidad constante: la velocidad de la luz $c \sim 300,000 \text{ km s}^{-1}$. Toda esta radiación que llega a la Tierra se clasifica según su longitud de onda² (λ), su frecuencia o su energía, a esta clasificación de radiación electromagnética se le conoce como *Espectro Electromagnético* (Lang, 2007)

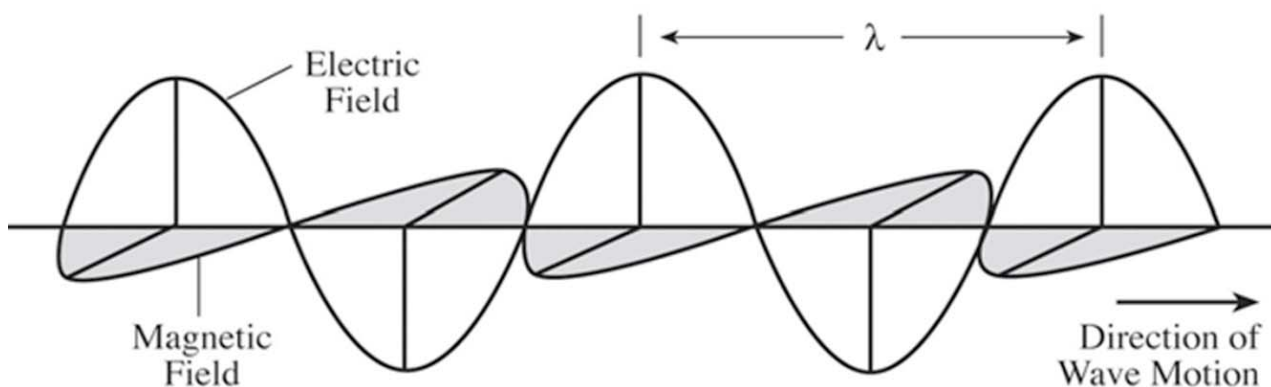


Figura 2.1: Una onda electromagnética consistente de campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Obtenido de Lang (2007).

Las longitudes de onda que abarca el espectro electromagnético son muy variadas: desde las más largas ondas de radio cuyas longitudes de onda se miden en km hasta las más pequeños en rayos X cuyas longitudes de onda están por los $10^{-11}m$. Los rayos γ también son parte del espectro electromagnético y pertenecen a la región de la longitud de onda corta, sin embargo están mas relacionados con transiciones nucleares en los átomos (Thorne, Litzén y Johansson, 1999) (ver figura 2.2).

En algunas ocasiones la radiación se describe en términos de su frecuencia; la frecuencia de una onda es el número de crestas que pasan frente a un observador estacionario por segundo. Por lo tanto,

²La longitud de onda se define como la distancia entre crestas o valles consecutivas en una onda.

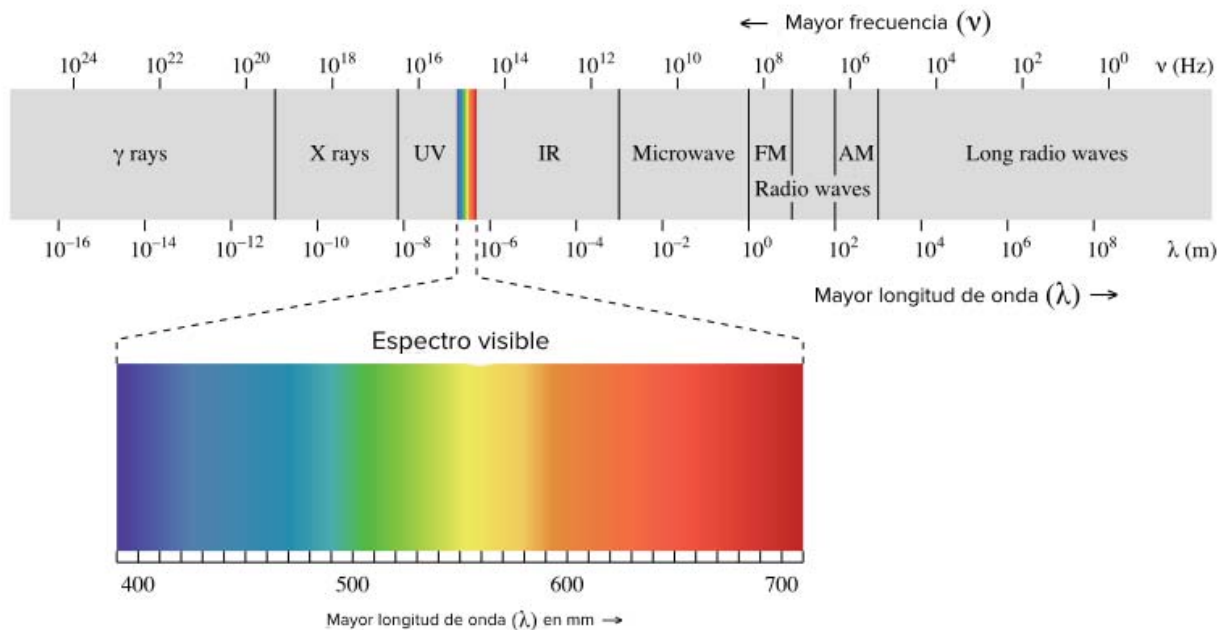


Figura 2.2: El espectro electromagnético con sus distintas longitudes de onda. Obtenido de *Khan Academy*.

la frecuencia indica que tan rápido la radiación oscila. Del producto de la longitud de onda y de la frecuencia se obtiene la velocidad de la luz (c) de modo que, cuando λ aumenta la frecuencia disminuye y vice versa. La energía de los fotones es inversamente proporcional a la longitud de onda y directamente proporcional a la frecuencia; radiación con longitudes de onda corta pero con altas frecuencias tiene energías más altas.

Cuando la luz es absorbida o emitida por átomos se comporta como paquetes de energía llamados fotones que se producen cuando un objeto material emite radiación electromagnética y se “consume” cuando un objeto absorbe dicha radiación además, cada átomo solo puede absorber o emitir fotones en cierta longitud de onda por lo que, el patrón de energía emitida y absorbida puede ser utilizado para identificar dicho átomo (Lang, 2007).

Sin embargo, la energía de la radiación estelar puede ser relacionada con la energía térmica del gas que emite. A finales del siglo XIX, se descubrió que el espectro emitido por objetos calientes no dependía de su composición química o de su forma sino de su temperatura y Max Planck desarrolló una fórmula para este “cuerpo negro”. Un cuerpo negro se trata de un cuerpo ideal que emite y absorbe en λ diferentes toda la radiación electromagnética que llega a él. Para mantenerse en equilibrio el cuerpo debe emitir radiación a la misma tasa a la que la absorbe. Una estrella, en una primera aproximación, puede ser considerada un cuerpo negro ya que, su espectro de emisión es muy parecido al de estos cuerpos. Una de las principales características del cuerpo negro es que la longitud de onda donde se encuentre el máximo de emisión depende completamente de su temperatura, es decir, si el máximo cae en el azul, violeta, rayos-X, etc depende sólo de la temperatura (ver figura 2.3).

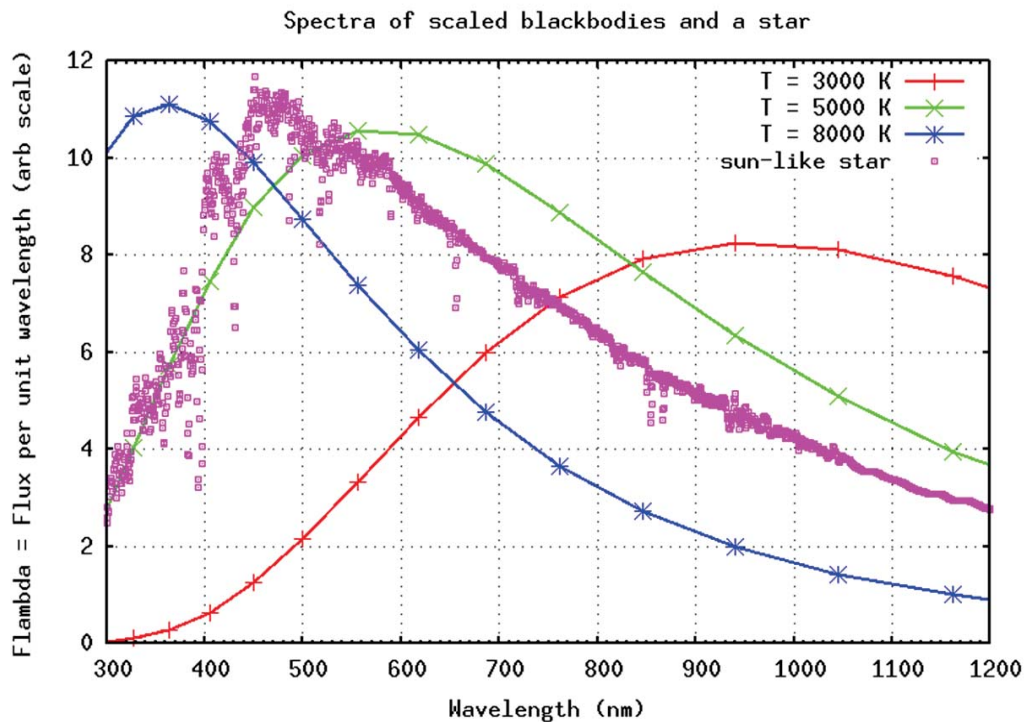


Figura 2.3: Los máximos de emisión de distintos cuerpos negros dependiendo de su temperatura y el espectro de emisión de una estrella tipo Sol, se puede observar el espectro de una estrella (línea rosa) y un cuerpo negro son muy parecidos. También se observa como, según la temperatura, el pico de emisión cae en un longitud de onda distinta. Obtenido de ([Richmond, 2010](#)).

Por ejemplo, las estrellas más calientes tienden a ser de un color azul mientras que las estrellas más frías tienen a ser más rojizas, esto es porque la emisión más intensa ocurre con la radiación cuya frecuencia (y energía) aumentan con la temperatura del disco de la estrella. En otras palabras, a mayor temperatura de un objeto menor será la longitud de onda de la radiación que este emita ([Thorne, Litzén y Johansson, 1999](#)). De hecho, si se tienen dos objetos iguales en tamaño y forma, que solo difieren en temperatura, el objeto más caliente emitirá muchas más energía que el otro objeto.

A continuación se describe un poco cada clase de radiación electromagnética.

- Ondas de Radio: La radio astronomía es una rama de la astronomía que cubre un rango de frecuencias desde unos cuantos megahertz ($1 \times 10^6 \text{HZ}$) (1m) hasta $\sim 300 \text{GHz}$ (1mm), aumentando la capacidad de observación del espectro electromagnético por muchos ordenes de magnitud ([Karttunen et al., 2016](#)).
- Microondas: Las microondas se parecen, en muchos sentidos, a las ondas de radio, pero son más difíciles de generar, ya que se requieren dispositivos electrónicos especiales. A diferencia de la onda corta, las microondas pueden focalizarse en forma de radiación muy potente cuya dirección

puede ser controlada. En su interacción con la materia, su energía puede ser reflejada, como ocurre cuando inciden sobre superficies metálicas, transmitida con poca pérdida de energía en medios transmisores, como el vidrio, o absorbida por la materia irradiada, lo que origina un aumento de temperatura en ésta (Antia, Bhatnagar y Ulmschneider (2003); Thorne, Litzén y Johansson (1999)).

- Radiación infrarroja: Fue descubierta por el astrónomo William Herschel (1738-1822) en 1800, al medir una zona más caliente más allá de la zona roja del espectro visible. La radiación infrarroja se localiza en el espectro entre 3×10^{11} Hz hasta aproximadamente los 4×10^{14} Hz. El infrarrojo se divide en tres secciones de acuerdo a su distancia a la zona visible: próxima (780 - 2500 nm), intermedia (2500 - 50000 nm) y lejana (50000 - 1mm). Toda molécula que tenga una temperatura superior al cero absoluto (-273 K) emite rayos infrarrojos y su cantidad está directamente relacionada con la temperatura del objeto (Karttunen et al. (2016); Golub y Pasachoff (2002)).
- Visible: Isaac Newton fue el primero en descomponer la luz visible blanca del Sol en sus componentes mediante la utilización de un prisma. La luz blanca está constituida por la combinación de ondas que tienen energías semejantes sin que alguna predomine sobre las otras. La radiación visible va desde 384×10^{12} hasta 769×10^{12} Hz. Las frecuencias más bajas de la luz visible (longitud de onda larga) se perciben como rojas y las de más alta frecuencia (longitud corta) aparecen violetas. La luz blanca es un conjunto de longitudes de onda (λ) que varía de ~ 400 nanómetros (nm) a 700 nm y es la luz que podemos ver (Lang (2007); Thorne, Litzén y Johansson (1999)).
- Ultravioleta (UV): La radiación ultravioleta pertenece a la franja del espectro electromagnético con longitudes de onda entre 400 y 100 nm^3 aproximadamente. Se extiende desde la parte violeta del espectro visible hasta la zona de rayos X blandos, aunque ambos límites son arbitrarios. A partir de 1932, el espectro ultravioleta se ha segmentado en tres zonas: A, B y C cuyas características se han estudiado con interés:
 - La radiación ultravioleta A (UVA) abarca longitudes de onda entre 320 y 400 nm; es la parte menos energética de la radiación UV (3,1-3,9 eV).
 - La radiación ultravioleta B (UVB) se extiende entre los 200 y 290 nm.
 - La radiación ultravioleta C (UVC) se extiende entre los 200 y 290 nm; es la porción más energética del espectro, la mayor parte de la radiación UVC procedente de la radiación solar es absorbida por la atmósfera superior, de forma que no alcanza la superficie terrestre. Además, el UVC ioniza los gases atmosféricos, por lo que contribuye a la creación y mantenimiento de la capa de ozono. Las bandas menos energéticas (UVA y UVB) penetran en la atmósfera y contribuyen a la fotosíntesis de las plantas, y a la síntesis de vitamina D en la piel de los mamíferos (Portero, 2004).
- Rayos X: Es la radiación electromagnética cuya longitud de onda va desde los 10 nm hasta los 0.01 nm. Los rayos X cercanos a la banda ultravioleta de espectro se conocen como “blandos” (10 - 0.1 nm), y los que están más cerca de la banda de la radiación gamma, se conocen como “duros” (0.1 - 0.01 nm). Los más recientes satélites que observan en rayos X son: Chandra por

³1 nm=1⁻⁹ m

parte de Estados Unidos; y el europeo XMM-Newton, estos dos satélites fueron lanzados en 1999 (Karttunen et al., 2016).

- Rayos γ : Las primeras observaciones de fuentes γ fueron obtenidas al final de los 60's cuando un instrumento dentro del OSO 3 (Orbiting Solar Observatory) detectó radiación γ de la Vía Láctea. Los rayos γ se producen por transiciones en los núcleos atómicos o por interacciones de partículas elementales a diferencia de otros tipos de radiación como la visible o la infrarroja. Es por eso que las observaciones en las longitudes de onda más cortas, como la de la radiación γ , proveen información sobre procesos distintos a los de la información que dan las longitudes más largas. Las energías de la radiación γ son millones de veces más grandes que las de la luz visible, de hecho, la astronomía en rayos γ estudia radiación con energías de $10^5 - 10^{14} eV$. Sin embargo, esta radiación puede ser observada con los mismos detectores (Karttunen et al. (2016); Thorne, Litzén y Johansson (1999)).

2.2. Líneas Espectrales

Como se mencionó anteriormente, las capas del Sol se encuentran distintas temperaturas una de otra, es por eso que que las longitudes de onda o el tipo de radiación en el que cada una emite también es distinto de las otras, entonces para observar alguna capa específica del Sol, se debe escoger la radiación que dicha capa emite. Por ejemplo, para observar la fotosfera se utiliza "luz blanca" (radiación continua de un plasma extremadamente caliente y denso); para ver la cromosfera se debe observar en la línea del hidrógeno ($H\alpha$) o en las líneas del calcio ionizado, por ejemplo.

Los átomos neutros poseen en su núcleo dos clases de partículas: protones de carga positiva y los neutrones que son neutros. Alrededor del núcleo se encuentran los electrones de carga negativa. La carga de átomo estable debe ser neutra, de tal manera que la carga positiva de los protones (p^+) se contrarreste con la negativa de los electrones (e^-).

Los electrones del átomo pueden rodearlo en órbitas que corresponden a niveles energéticos establecidos los cuales se conocen como orbitales. Sin embargo, un e^- puede cambiar de posición y acercarse o alejarse del núcleo, esto siempre y cuando el orbital de destino esté desocupado. Para pasar a una órbita más baja (más cerca del núcleo) el e^- necesita emitir energía, la cual libera en forma de fotones mientras que, para pasar a un orbital más alto (más alejado del núcleo) el e^- necesita absorber energía en forma de fotones, "...El fotón emitido o absorbido es específico para cada órbita de cada átomo específico. De esta manera al estudiar la energía electromagnética emitida o absorbida por un átomo se puede determinar que tipo de átomo es"(Thorne, Litzén y Johansson, 1999).

Una línea espectral es una línea oscura o brillante en un espectro de emisión continuo resultado de una abundancia o carencia de fotones en cierto intervalo de frecuencias (ver figura 2.4). Cuando se sitúa un gas frío y tenue frente a uno caliente y denso, los átomos en el gas frío absorben radiación en longitudes de onda específicas produciendo líneas oscuras de absorción. Sin embargo, cuando el

gas frío está por sí solo y se calienta hasta volverse incandescente, se producen líneas de emisión que brillan en las mismas longitudes de onda que las oscuras. Los componentes atómicos del Sol pueden inferirse por las líneas de absorción, que aparecen impuestas sobre los colores de la luz solar, se ven como líneas oscuras cuando la radiación solar es desplegada como una función de la longitud de onda, tal despliegue es conocido como un espectro (Lang, 2007).

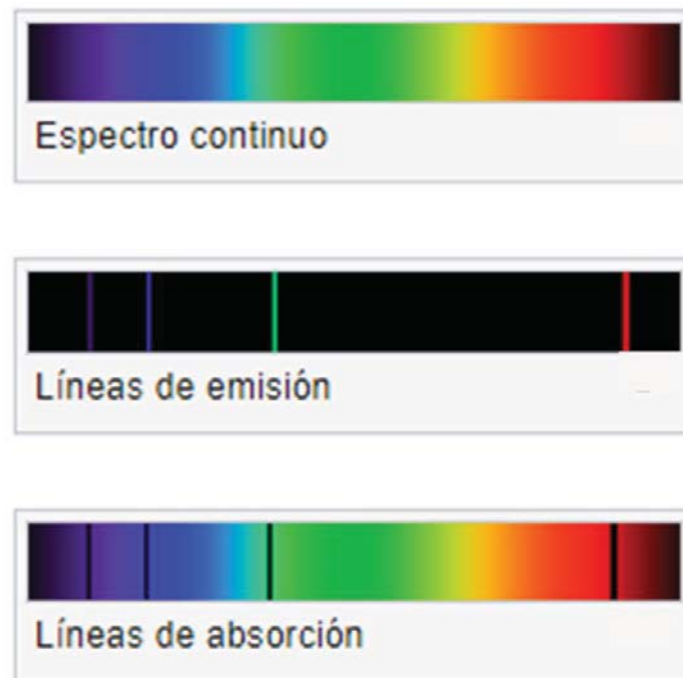


Figura 2.4: Visualización de las líneas de emisión y absorción en un espectro continuo. Obtenido de Khan Academy.

Las líneas espectrales fueron descubiertas en 1814 por el fabricante de vidrios Joseph Fraunhofer, cuando al analizar la luz solar se dio cuenta de que había líneas que aparecían en frecuencias muy bien definidas. Fraunhofer descubrió aproximadamente unas 600 líneas oscuras en el espectro solar de las cuales emprendió un estudio cuidadoso, midiendo su frecuencia con precisión. Las líneas más intensas las designó con las letras de la A (en el rojo oscuro) a la K (en el violeta) (Golub y Pasachoff, 2002).

A mediados del siglo XIX, Kirchoff y Bunsen encontraron que cada una de estas líneas estaba asociada con un elemento químico de manera que funcionaban como las huellas dactilares de los elementos presentes en la atmósfera del Sol (ver figura 2.5). El trabajo de Kirchoff y Bunsen llevó a la identificación de un gran número de líneas en el Sol y en espectros estelares ayudando a la comprensión sobre los componentes químicos de las estrellas (Thorne, Litzén y Johansson (1999); Bueche (1998)).

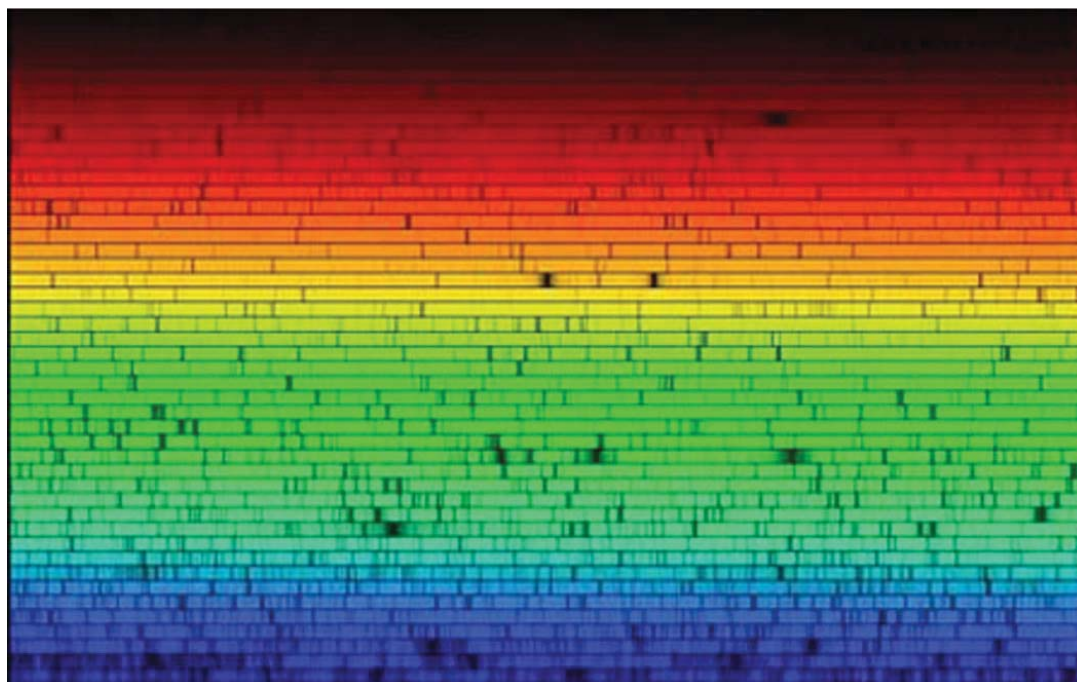


Figura 2.5: Espectro solar con sus líneas de absorción. Obtenido de NOAO.

2.2.1. Línea del $H\alpha$

Dentro de las líneas de Fraunhofer hay algunas que tienen una nomenclatura especial. Tal es el caso de las líneas del hidrógeno, el cual tiene uno de los espectros atómicos más simples.

La serie de Balmer es el conjunto de líneas que resultan de la emisión de un átomo de hidrógeno cuando uno de los electrones del gas pasa de un nivel de energía $n \geq 3$ a $n=2$. Las transiciones son denominadas secuencialmente por letras griegas: desde $n = 3$ a $n = 2$ es llamada $H\alpha$, 4 a 2 es $H\beta$, 5 a 2 es $H\gamma$, etc. (Bueche, 1998).

La longitud de onda, para cada línea de Balmer, se puede calcular mediante la ecuación de Rydberg:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{l^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (2.1)$$

donde R_H es la constante de Rydberg para el hidrógeno ($\sim 1.097 \times 10^7 m^{-1}$), $l = 2$ y m un entero mayor que 2. La ecuación anterior la obtuvo el espectroscopista sueco Johannes Robert Rydberg después de que Balmer propusiera su ecuación empírica para la longitud de onda de las líneas del espectro del hidrógeno la cual dice:

$$\lambda = B \left(\frac{m^2}{m^2 - n^2} \right) = B \left(\frac{m^2}{m^2 - 2^2} \right), \quad (2.2)$$

donde $B=364.56$ nm, $n=2$ y m es un entero que toma los valores: 3, 4, 5, 6, ... Balmer propuso la ecuación anterior basado en sus observaciones, es decir, no la obtuvo de un modelo o teoría. Simplemente utilizó

sus observaciones para encontrar una relación matemática que fuera consistente con las mismas. Sin embargo, el cálculo era muy preciso para las longitudes de onda en el espectro de hidrógeno, incluso para el caso más complicado ($n=11$) las longitudes de onda calculadas por Balmer estaban dentro de 0.1 % del valor medido (Bueche, 1998).

Al dar a conocer su ecuación, Balmer sugirió que quizá fuera un caso especial de alguna fórmula más general que se aplicara a otras series de líneas en otros elementos y fue ahí donde Rydberg se dedicó a la búsqueda de dicha ecuación general. En 1889 Rydberg encontró varias series espectrales que encajaban en una fórmula empírica que era equivalente a la fórmula de Balmer. La fórmula de Rydberg puede escribirse para producir el inverso de la longitud de onda como:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (2.3)$$

donde $n_1 < n_2$.

En esa ecuación $R_H = 10973758.306m^{-1}$ y n_1 y n_2 son números enteros pero, para la serie de Balmer, $n_1 = 2$ y n_2 toma los valores de 3, 4, 5, 6...

Las líneas del hidrógeno, específicamente el $H\alpha$, permite observar la atmósfera baja del Sol, es decir, la cromosfera. Esto es porque, como se mencionó anteriormente, la energía de la radiación está relacionada con la temperatura del cuerpo que la emite entonces, con una temperatura de $\sim 6000K$ la emisión de la cromosfera pertenece, en parte, a la longitud de onda de los 656.28nm (6562.8 Å) que corresponde a la línea del $H\alpha$. Esta línea es la más brillante y es la responsable de darle a la cromosfera su color rojo ya que esta línea es visible en la parte roja del espectro electromagnético (Lang (2007); Bhatnagar y Livingston (2005); Golub y Pasachoff (2002))

De hecho, durante los eclipses se puede observar lo que se conoce como *Espectro Flash* o espectro cromosférico. Esto es, un espectro de líneas de emisión que contiene alrededor de 3000 líneas identificadas donde una de las más fuertes es la del hidrógeno α . Como el $H\alpha$ es una línea de absorción muy intensa, si se toma una fotografía en esta longitud de onda, lo que se obtendrá es una imagen de la cromosfera (ver figura 2.6). Para este propósito se utiliza un filtro con ancho de banda muy delgado que sólo deje pasar la línea del $H\alpha$ y el resultado muestra al Sol como un disco manchado y oscilante (Karttunen et al., 2016).

Las manchas solares se extienden desde la fotosfera a la cromosfera donde en las fotografías en $H\alpha$ se ven como manchas oscuras. Regiones brillantes conocidas como *plague*⁴ aparecen brillantes y filamentos oscuros y largos se extienden sobre el disco en $H\alpha$.

Sin embargo, una vista completamente diferente se obtiene cuando se observa en otra longitud de onda como la del calcio K. Regiones muy brillantes de la luz en calcio K corresponden a zonas

⁴Del francés para *playa*.

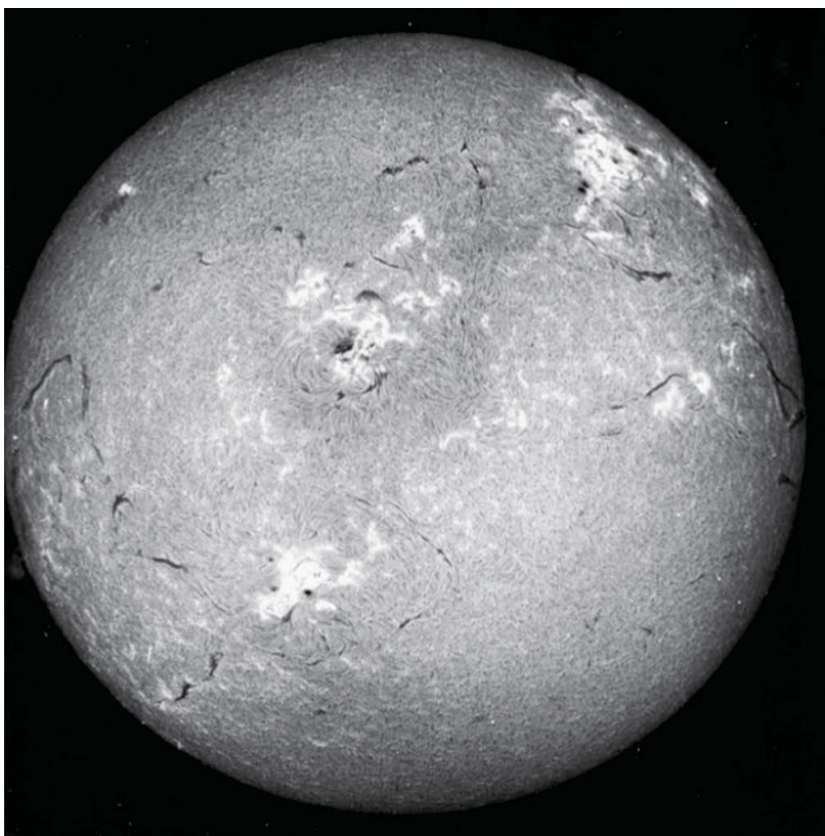


Figura 2.6: Fotografía de la cromosfera en $H\alpha$. Se pueden observar manchas oscuras, filamentos largos y delgados así como regiones brillantes. Tomada por el Observatorio Astrofísico de Baikal, Academia de Ciencias de Rusia. Obtenido de [Lang \(2007\)](#).

donde hay campos magnético muy intensos tanto en las manchas solares como en la superficie solar en una red de magnetismo. Regiones de campo muy intensas están, probablemente, asociadas con el calentamiento de la cromosfera que resulta en las emisiones brillantes de calcio que coinciden con las celdas de granulación y la red magnética de la fotosfera (([Lang, 2008](#)); [Golub y Pasachoff \(2002\)](#)).

En la literatura la línea del calcio II K se encuentra dividida en tres regiones: K1, K2, Y K3. Cada una de estas regiones muestra una región distinta de la cromosfera. La línea del calcio es muy sensible a los campos magnéticos. Si hay campos magnéticos presentes, la absorción es menor (más luz transmitida), y los campos magnéticos débiles se muestran como zonas oscuras.

2.3. ¿Cómo observamos?

“Observar el Sol es algo relativamente sencillo pero, se requiere de sentido común y una buena cantidad de paciencia” ([Antia, Bhatnagar y Ulmschneider, 2003](#)).

Lo primero para poder obtener fotografías solares es contar con el instrumento adecuado. En este trabajo se mencionará el tipo de telescopio, filtros y cámara utilizados para el desarrollo del mismo.

2.3.1. El telescopio

Hasta la Edad Media el mejor instrumento de observación era el ojo humano y no fue hasta el siglo XVII que se inventó el telescopio; en 1609 Galileo hizo sus primeras observaciones utilizando este nuevo instrumento. En 1613 descubre las manchas solares y fue publicado en *Istoria intorno alle macchine solari*. La fotografía astronómica fue introducida a finales del siglo XIX y en las últimas décadas se han ido implementando nuevas técnicas e instrumentos para detectar la radiación electromagnética del espacio (Karttunen et al., 2016).

La finalidad del telescopio es aumentar los objetos lejanos o, más precisamente, conseguir una imagen de un objeto lejano con mayor detalle de la que se podría obtener a simple vista y, hasta cierto punto, entre mayor es el telescopio, mayor es la cantidad de luz que éste puede recolectar.

Según Karttunen et al. (2016) el telescopio debe cumplir tres tareas principales en la observación astronómica:

- Recolectar luz de un área grande haciendo posible estudiar fuentes muy débiles.
- Aumentar el diámetro angular de un objeto aumentando así la resolución.
- Medir la posición de los objetos celestes.

Para hacer esto, los telescopios emplean una combinación de lentes y/o espejos que alteran el frente de onda luminoso procedente del objeto de tal forma que el tamaño angular del objeto aumenta. Dependiendo de si el elemento principal de un telescopio es una lente o un espejo se pueden clasificar los telescopios ópticos en refractores y reflectores respectivamente.

El telescopio de Galileo era refractor, el cual utilizaba lentes a través de los cuales la luz pasada para formar una imagen. Tiempo después Newton inventó el telescopio reflector que utilizaba espejos como el componente óptico principal (Carroll y Ostlie, 2007).

Según la ley de Snell, cuando un rayo de luz viaja de un medio transparente a otro su camino se “dobla” en la interfaz de los dos medios (ver figura 2.7). Cuanto se doble o curve el rayo dependerá de los índices de refracción ($n_\lambda = c/v_\lambda$) de cada material (este índice depende de la longitud de onda), donde v_λ representa la velocidad de la luz dentro del medio⁵.

Si θ_1 es el ángulo de incidencia entre los dos medios y θ_2 es el ángulo de refracción entonces, la ley de Snell está dada por:

$$n_{1\lambda} \sin\theta_1 = n_{2\lambda} \sin\theta_2. \quad (2.4)$$

Dependiendo de la forma de los lentes, los rayos de luz se comportarán de una manera o de otra. En una lente convergente un haz de luz que viaja paralelo aleje de simetría del lente (eje óptico) puede

⁵En el vacío la velocidad de la luz se mide como: $v_\lambda = c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

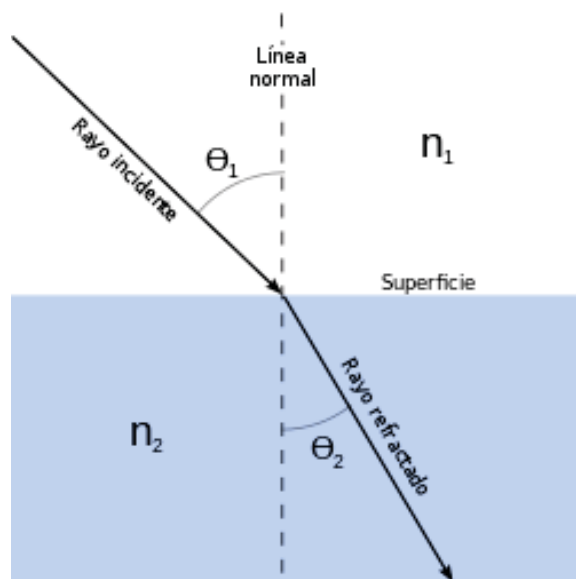


Figura 2.7: Diagrama ilustrativo de la ley de Snell. Obtenido de *Geogebra.org*.

ser dirigido a un punto específico a lo largo del eje. De forma contraria con una lente divergente se hace que la luz diverja y parece que se origina de un punto específico en el eje de simetría (ver figura 2.8).

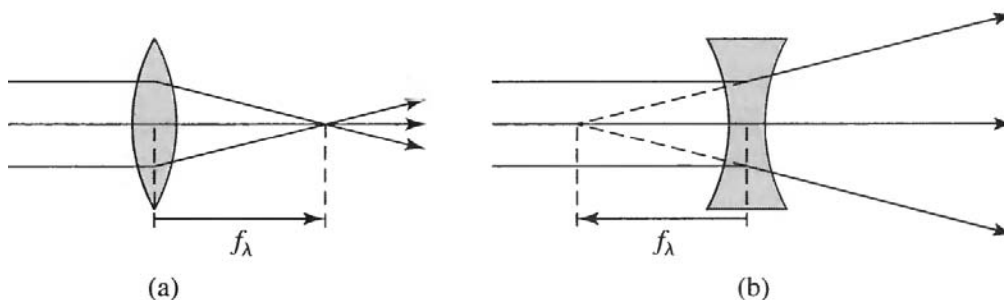


Figura 2.8: Diagrama de una lente convergente (a) y una lente divergente (b). Obtenido de *Carroll y Ostlie (2007)*.

El punto específico que se menciona en ambos casos es conocido como el *punto focal* del lente, y la distancia desde el centro del lente hasta ese punto se llama *distancia focal* y se denota con la letra f . Para un lente convergente la distancia focal se toma como positiva mientras que, para un lente divergente se considera negativa. Es importante mencionar que, mientras para un lente la distancia focal sí depende de la longitud de onda, para un espejo la distancia focal es independiente de la misma, ya que para la reflexión el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión ($\theta_1 = \theta_2$) (*Carroll y Ostlie, 2007*).

Al diámetro del objetivo (D) se le conoce como la apertura del telescopio, de tal manera que la razón entre D y la distancia focal f se conoce como radio de apertura ($F = f/D$) o radio focal. Esta cantidad es utilizada para caracterizar la potencia de acumulación de luz (*light-gathering*) del telescopio. Si el radio de apertura es grande (cerca de la unidad) se tiene un telescopio “rápido” y poderoso, esto significa que se pueden tomar fotografías utilizando una baja exposición ya que la imagen es brillante

(Karttunen et al., 2016); sin embargo, un radio de apertura pequeño ($f \gg D$) se tiene un telescopio “lento”, en otras palabras, con un telescopio rápido se requiere un tiempo menor para captar la misma cantidad de luz que uno lento u oscuro (típicamente F10 o más)(Alvarez, 2011). En astronomía, así como en la fotografía, al radio de apertura se le denota como f/n (por ejemplo: $f/8$), donde n es la distancia focal dividida entre la apertura. Para telescopios rápidos esto puede ser $f/1\dots f/5$, y usualmente es menor a $f/10$. Entre menor sea el radio de apertura (distancia focal pequeña) se tiene una amplificación menor, un campo de visión más amplio y una imagen más brillante(Karttunen et al., 2016).

2.3.1.1. Plano Focal y Escala de placa de telescopio

Para un objeto extendido, su imagen también deberá estar extendida y si algún detector o placa fotográfica va a “grabar” esta imagen deberá ser colocada en el plano focal del telescopio.

El plano focal se describe como el plano que pasa a través del punto focal y es perpendicular al eje óptico del sistema óptico. Como los objetos astronómicos están lo suficientemente lejos y se puede considerar que se encuentran a una distancia infinita del telescopio, los rayos de luz que vienen de algún objeto son, esencialmente, paralelos entre sí (aunque no necesariamente paralelos al eje óptico). La separación en la imagen de dos fuentes puntuales en el plano focal está relacionada con la distancia focal del lente que está siendo utilizado (Carroll y Ostlie, 2007). En la imagen 2.9 se muestra la luz proveniente de dos fuentes, una paralela al eje óptico del lente y la otra que llega con un ángulo θ con respecto al eje.

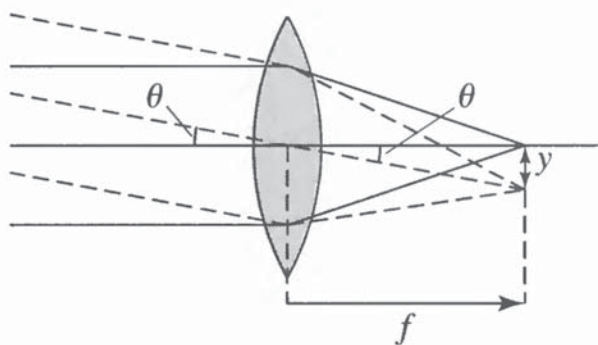


Figura 2.9: La escala de placa, determinada por la distancia focal. Obtenido de Carroll y Ostlie (2007).

En la posición del plano focal, la luz paralela al eje va a converger en el punto focal mientras que la luz que incide con cierto ángulo lo hará, aproximadamente, a una distancia y del punto focal, de tal manera que por geometría se obtiene la relación:

$$y = f \tan \theta. \quad (2.5)$$

Si se asume que el campo de visión es pequeño entonces θ también será pequeño por lo que se puede asumir que $\tan \theta \approx \theta$ (con θ expresado en radianes), por lo tanto

$$y = f\theta. \quad (2.6)$$

esta última ecuación lleva a la relación diferencial conocida como **escala de placa**, que se escribe:

$$s = \frac{d\theta}{dy} = 1/f. \quad (2.7)$$

Esta ecuación relaciona la separación angular⁶ de los objetos con la separación lineal de sus imágenes en el plano focal (Carroll y Ostlie, 2007). Es decir, la escala de placa muestra qué tan grande es la imagen del objeto en el foco primario del telescopio y, básicamente, relaciona cuantos arco segundos de cielo hay por cada milímetro de detector.

Mientras la distancia focal del lente aumenta, la separación lineal de las imágenes separadas por θ también aumenta.

El aumento (ω) del telescopio puede obtenerse con la siguiente ecuación

$$\omega = \theta' / \theta \approx f / f', \quad (2.8)$$

donde se uso $y = f\theta$. En la ecuación anterior f es la distancia focal del objetivo y f' es la del ocular, por ejemplo si $f = 100\text{cm}$ y $f' = 2\text{cm}$, el aumento va a ser de 50 veces. El aumento no es una de las características principales del telescopio ya que se puede cambiar simplemente cambiando el ocular (Carroll y Ostlie, 2007).

Una característica más importante y que depende de la apertura D del telescopio es el poder de resolución.

Antes de continuar con el poder de resolución se muestra, a manera de ejercicio, el cálculo de la escala de placa para los telescopios del observatorio solar de la ENES Morelia con un detector que en este caso es una cámara CCD.

Telescopio SolarMax II 90mm

- Distancia focal (f)= 800mm⁷
- Tamaño de píxel (de la cámara)= 3.75 μm

Entonces, se puede utilizar la siguiente formula:

⁶La separación angular es la distancia entre dos objetos observados en el cielo, es independiente de la distancia física entre los objetos y está directamente relacionada con la distancia entre las imágenes de los objetos en el plano focal (también conocido como plano de imagen), es decir, la separación angular no depende de la distancia real entre los dos objetos en el cielo, sólo depende de la distancia observada.

⁷ f no necesariamente tiene que estar en milímetros, puede estar en otra unidad de longitud pero la más común son los mm.

$$s = \frac{206265}{f} \quad [s] = [\text{arcseg}/\text{mm}] = ["/\text{mm}], \quad (2.9)$$

el número 206265 sale porque:

$$1\text{rad} = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{60'}{1^\circ} \cdot \frac{60''}{1'} = 206265''. \quad (2.10)$$

Para el SolarMax II 90mm:

$$s = \frac{206265}{800\text{mm}} = 257.83 \text{ ''}/\text{mm}. \quad (2.11)$$

Pero se quiere conocer la escala de placa en *arcseg/pixel* y se sabe que:

$$3.75\mu\text{m} = 3.75 \times 10^{-6}\text{m} \cdot \frac{1000\text{mm}}{1\text{m}} = 3.75 \times 10^{-3}\text{mm}, \quad (2.12)$$

de modo que:

$$3.75 \times 10^{-3}\text{mm} \rightarrow 1 \text{ pixel} \quad (2.13)$$

$$1\text{mm} \rightarrow 266.66 \text{ pixeles}, \quad (2.14)$$

Entonces se tiene que:

$$s = 257.83 \frac{\text{arcseg}}{\text{mm}} \div 266.66 \frac{\text{pix}}{1\text{mm}} = 0.966886672 = \mathbf{0.97 \text{ ''}/\text{pix}}. \quad (2.15)$$

El cálculo anterior utiliza la distancia focal inherente del telescopio; sin embargo, para realizar observaciones del disco solar completo se utiliza un reductor focal. Debido a lo anterior la escala de placa cambia y el cálculo debe considerar el factor de reducción utilizado. A continuación se presenta el cálculo de la escala de placa considerando al reductor focal.

- Factor de reducción (f_r) = 0.5x.

Si se multiplica la distancia focal original del telescopio entre el factor de reducción se puede obtener la nueva distancia focal del telescopio:

$$f_1 = f \cdot f_r = 800 \cdot 0.5 = 400\text{mm}. \quad (2.16)$$

Ahora ya es posible calcular la nueva escala de placa. Añadiendo la nueva distancia focal f_1 a la ec. 2.9 y resolviendo la ec. 2.15 se tiene que la nueva escala de placa es de: **1.94 ''/pix**.

Ahora se obtiene la escala de placa del telescopio **Meade ETX-90EC Astro Telescope**, el cual por defecto tiene una distancia focal más grande que el telescopio anterior.

- Distancia focal= 1250mm.
- Tamaño de píxel (de la cámara)= $3.75 \mu\text{m}$.

Se repiten los pasos anteriores utilizando las ecs. 2.9 y 2.15 de modo que la escala de placa del telescopio MEADE ETX-90EC es de: **0.62 "/pix**.

Y si se agrega el reductor focal ($f_r=0.5x$), tenemos que la nueva distancia focal f_1

$$f_1 = f \cdot f_r = 1250 \cdot 0.5 = 625 \text{ mm}, \quad (2.17)$$

de nuevo, se utilizan las ecs. 2.9 y 2.15 y se obtiene que $s=1.24 "/pix$.

La escala de placa es un factor muy importante para este trabajo puesto que, como se mencionó anteriormente, al telescopio se le puede agregar un detector fotográfico como una cámara. La escala de placa es relevante para el análisis de imágenes FITS (ver 3) ya que este dato permite realizar cálculos sobre las estructuras solares observadas en las imágenes obtenidas con la cámara fotográfica. Además permite saber la separación mínima que tendrán dos objetos en una fotografía de modo que si se modifica la escala de placa también se modifica esta separación para ver mejor, o con mayor definición, uno u otro objeto.

2.3.1.2. Resolución y Criterio de Rayleigh

Desafortunadamente la habilidad para ver dos objetos con una separación angular (θ) pequeña no solo es cuestión de buscar una distancia focal lo suficientemente grande para que produzca la escala de placa necesaria ya que, existe un límite en la capacidad de resolver dichos objetos. Esta limitación se da debido a la difracción producida por el avance de los frentes de onda de la luz producida por los objetos observados ((Carroll y Ostlie, 2007)).

La resolución teórica de un telescopio se da, usualmente, en la forma introducida por Rayleigh (Criterio de Rayleigh) que dice⁸:

$$\sin\theta \approx \theta = 1.22\lambda/D \quad [\theta] = \text{rads}. \quad (2.18)$$

Como una regla práctica se dice que dos objetos se ven separados si la distancia angular mínima entre ellos es:

$$\theta_{min} \geq \lambda/D. \quad (2.19)$$

A la ecuación anterior se le conoce como límite de Dawes, y dice que la resolución aumenta a medida que la apertura del telescopio también aumenta y cuando se observan longitudes de onda cortas.

⁸Esta relación es válida para ángulos pequeños. Esto es una simplificación de las leyes trigonométricas que tiene una precisión aceptable cuando el ángulo tiende a cero, y surge de la linealización de las funciones trigonométricas. Para tales ángulos, las funciones se pueden aproximar con el primer término de su serie.

2.3.1.3. Refractores y Reflectores

Como se mencionó anteriormente, los telescopios *refractores* utilizan dos lentes: el objetivo, el cual recolecta la luz y forma la imagen en el plano focal; y el ocular, que funciona como una pequeña lupa para observar la imagen. Los lentes se encuentran opuestos al final de un tubo que puede ser dirigido hacia cualquier punto. La distancia entre el ocular y el plano focal puede ser ajustada de manera que la imagen quede enfocada (Karttunen et al., 2016).

Los primeros telescopios refractores tenían un lente objetivo simple, por lo cual, las observaciones estaban obstaculizadas por la aberración cromática (figura 2.10). Como el vidrio refracta los diferentes colores en cantidades distintas, los colores no se “encuentran” en el mismo punto focal, más bien la distancia focal aumenta con la longitud de onda. Para quitar esta aberración en el siglo XVIII se desarrollaron lentes “acromáticos” los cuales consisten de dos lentes ya que, la dependencia al color de la distancia focal es mucho menor que en lentes sencillas. De hecho, en alguna longitud de onda λ_0 , la distancia focal tiene un extremo (usualmente un mínimo) y cerca de este punto el cambio en la distancia focal es muy pequeño. Al combinar varios lentes de distintos tipos de vidrio en el objetivo la aberración cromática puede ser corregida aun más (Karttunen et al. (2016); Malacara y Malacara (1995)).

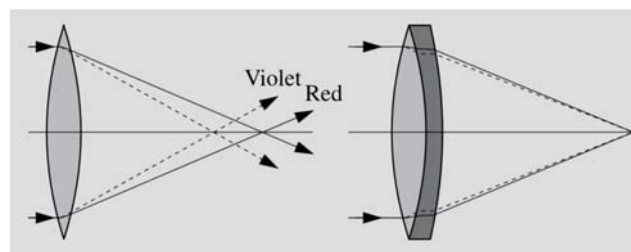


Figura 2.10: Aberración Cromática. Los rayos de luz de distintos colores son refractados a distintos puntos focales (izq). La aberración puede ser corregida con un lente acromático. Obtenido de Karttunen et al. (2016).

Los telescopios refractores más grandes del mundo tienen una apertura de ~ 1 metro: 102 cm en el telescopio del observatorio de Yerkes y 91cm en el telescopio del observatorio Lick; y su apertura típicamente es de $f/10 \dots f/20$. El uso de refractores está muy limitado por su campo de visión, el cual es muy pequeño, y porque tienen una estructura muy grande. Usualmente, son usados para observaciones de estrellas binarias y para medir la posición de las estrellas. Es posible ampliar el campo de visión al implementar sistemas de lentes más complejos, este tipo de telescopios se conocen como astrógrafos y tienen un objetivo compuesto, usualmente, por 3 a 5 lentes y una apertura de menos de 60 cm. Los astrógrafos son utilizados para fotografiar grandes áreas del cielo por ejemplo, para estudiar con precisión el movimiento de las estrellas (Karttunen et al., 2016) (Carroll y Ostlie, 2007).

Los telescopios que utilizan un espejo, también conocidos como *reflectores* son los telescopios más usados en astronomía e investigación astrofísica.

Estos últimos se componen de un espejo recubierto de una fina capa de aluminio y de forma parabó-

lica. Este tipo de espejo refleja todos los rayos de luz que entran al instrumento de manera paralela al eje mayor hacia el mismo punto focal. La imagen formada en ese punto puede ser observada a través de un ocular o registrada con un detector. Una de las grandes ventajas de los reflectores es que no hay aberración cromática ya que todas las longitudes de onda son reflejadas al mismo punto (Karttunen et al., 2016).

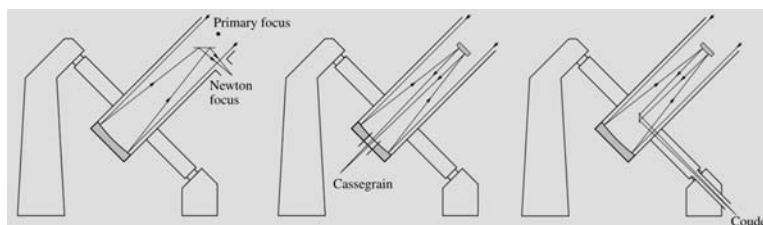


Figura 2.11: Distintos tipos de enfoque en los telescopios reflectores. Obtenido de *Karttunen et al. (2016)*.

El primer telescopio reflector fue construido por Isaac Newton, quien guió la luz de manera perpendicular hacia afuera del telescopio con un pequeño espejo plano, de tal manera que cualquier enfoque que utilice este sistema se conoce como enfoque Newton. El radio de apertura típico de un telescopio Newtoniano es de $f/3...f/10$.

Otra opción para un reflector es hacer una apertura en el espejo primario y reflejar la luz a través del mismo con ayuda de un espejo secundario pequeño e hiperbólico el cual se posiciona en la parte frontal del telescopio. Este tipo de enfoque se conoce como enfoque Cassegrain, este tipo de sistemas tiene un apertura de $\sim f/8...f/15$.

La distancia focal efectiva (f_e) de un Cassegrain está determinada por la posición y la convexidad del espejo secundario.

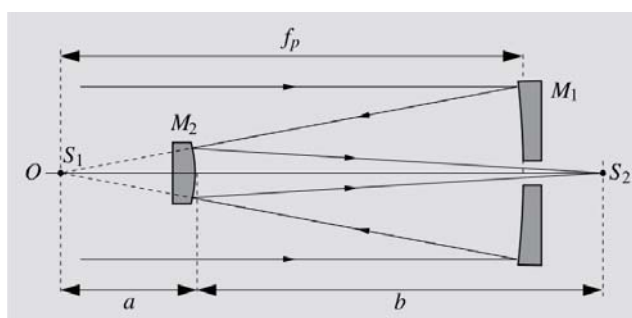


Figura 2.12: El principio de un telescopio Cassegrain. Un espejo primario cóncavo M_1 refleja la luz paralela al eje mayor hacia el foco primario S_1 . Un espejo secundario convexo M_2 refleja los rayos de luz de regreso a través de un pequeño hoyo en el espejo primario hacia el foco secundario S_2 que se encuentra fuera del telescopio. Obtenido de (*Karttunen et al., 2016*).

Si vemos la figura 2.12 podemos obtener:

$$f_e = \frac{b}{a} f_p. \quad (2.20)$$

Si se escoge $a \ll b$ se tiene que $f_e \gg f_p$, de esa manera se pueden construir telescopios pequeños con distancias focales grandes. Los reflectores Cassegrain son especialmente buenos para ser utilizados con espectrógrafos, fotómetros y otros instrumentos que pueden ser montados en el foco secundario de manera accesible para el observador (Karttunen et al., 2016).

Hay arreglos más complicados que utilizan varios espejos para guiar la luz a través del eje de declinación del telescopio hacia un punto fijo llamado enfoque Coudé. La distancia focal para estos telescopios es muy grande y el radio de apertura es aproximadamente de $f/30 \dots f/40$. El enfoque Coudé es utilizado, principalmente, para realizar espectroscopia precisa ya que, los espectrógrafos pueden mantenerse fijos y a una temperatura constante.

Sin embargo, una de las principales fallas del sistema Coudé es que al ser reflejada por los distintos espejos, mucha de la luz que entra al telescopio se pierde. Un espejo aluminizado refleja $\sim 80\%$ de la luz que cae sobre él, entonces, para un sistema Coudé de 5 espejos, por ejemplo, solamente $0.8^5 \approx 30\%$ de la luz llega al detector (Karttunen et al., 2016).

Así como los telescopios refractores presentan la aberración cromática, los reflectores tienen su propio tipo de aberración: aberración de coma. Esta aberración afecta las imágenes desplazadas del eje óptico: los rayos de luz no convergen todos al mismo punto, más bien, se forma una figura parecida a un cometa. Debido a la aberración, el reflector clásico con un espejo paraboloide tiene un campo de visión efectivo muy pequeño, de hecho, la coma limita el diámetro del campo útil de 2 a 20 minutos de arco (dependiendo del radio de apertura del telescopio). El campo de visión puede ser aumentado agregando varios lentes correctivos.

Este tipo de aberración no se daría si el espejo primario fuera esférico, sin embargo, esta clase de espejos tiene su propia aberración, la aberración esférica: donde los rayos de luz del centro y de las orillas convergen a distintos puntos. Para quitar este tipo de aberración Bernhard Schmidt desarrolló un lente correctivo muy delgado, el cual se coloca en el camino de la luz que entra al telescopio. A este tipo de instrumento se les llama cámara Schmidt y tienen un campo de visión muy amplio, con muy pocas fallas y el lente es tan delgado que absorbe muy poca luz, de tal manera que las imágenes resultantes son muy nítidas (Carroll y Ostlie, 2007).

2.3.1.4. Tipos de monturas de telescopios

Un telescopio debe estar sostenido en un soporte estable para evitar que vibre, además, debe rotar suavemente durante las observaciones. Existen dos clases principales de monturas para telescopios: las **ecuatoriales** y las **altazimutales** (figura 2.13).

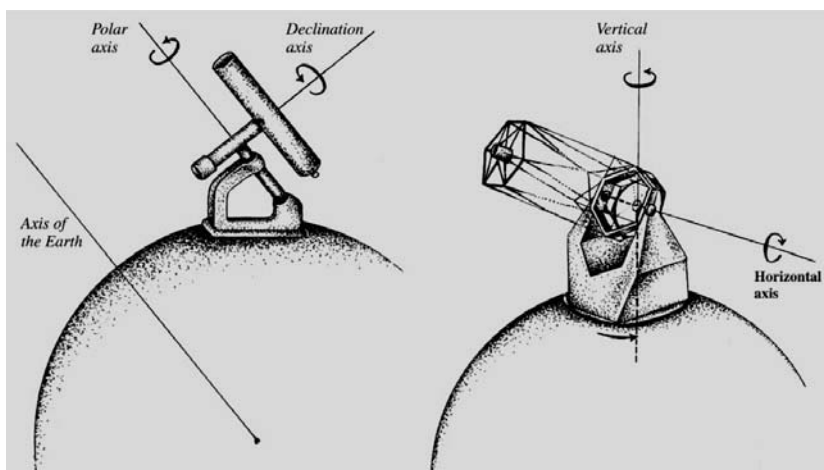


Figura 2.13: Montura ecuatorial (izquierda) y montura azimutal (derecha) de un telescopio. Obtenido de *Karttunen et al. (2016)*.

En la montura ecuatorial, uno de los ejes está dirigido hacia el polo norte celeste y se conoce como eje polar. El otro eje, el eje de declinación, se coloca perpendicular al primero. Como el eje polar es paralelo al eje de la Tierra, la rotación del cielo puede ser compensada girando el telescopio sobre su eje a una tasa constante.

El mayor problema de las monturas ecuatoriales es el eje de declinación: cuando el telescopio está apuntando al sur, su peso causa una fuerza perpendicular al eje; cuando se está siguiendo un objeto y gira hacia el Oeste los soportes deben sostener una gran carga paralela al eje de declinación.

Por otro lado, en la montura altazimutal, uno de los ejes es vertical y el otro horizontal. Esta clase de montura es más fácil de armar que la ecuatorial y es más estable para los telescopios más grandes. Para poder seguir la rotación del cielo, el telescopio debe girar sobre los dos ejes a distintas velocidades, sin embargo, el campo de visión también rotará. Esta rotación debe ser compensada cuando el telescopio se utilice para fotografía. Ya que si un objeto llega cerca del zenit, su azimut cambiará 180° en muy poco tiempo por lo tanto, cerca del zenit hay una pequeña región donde no es posible realizar observaciones.

Los telescopios más grandes del mundo tenían monturas ecuatoriales hasta que el avance de la tecnología facilitó los sistemas de guiado de las monturas altazimutales que antes eran muy complicados, de hecho, la mayoría de los grandes telescopios del mundo hoy en día ya vienen montados altazimutalmente, por ejemplo, el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) (ver figura 2.14) del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) tiene este tipo de montura.

2.3.2. Condiciones de observación

2.3.2.1. El Seeing

Los frentes de onda solo pueden conservar su forma si el medio por el que se mueven es ópticamente homogéneo, es decir, si todos los puntos del frente se mueven a la misma velocidad. Por lo anterior, un medio no homogéneo produce desviaciones arbitrarias en el frente de onda lo que resulta en aberracio-



Figura 2.14: El Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano perteneciente al INAOE y ubicado en Sierra Negra, Puebla. Obtenido de CONACyT.

nes ópticas. El aire es el mayor medio por el cual la luz debe pasar antes de formar la imagen de un objeto en un telescopio (Telescope Optics, 2015).

Lo que causa que el aire sea un medio no homogéneo son los efectos térmicos, que crean estructuras como corrientes y remolinos de distintas temperaturas que cambian arbitrariamente. La atmósfera terrestre afecta las observaciones astronómicas de muchas maneras, por ejemplo: el aire nunca está realmente quieto; las distintas capas atmosféricas tienen diferentes densidades y temperaturas, lo que causa turbulencia y convección. Cuando la luz de las estrellas pasa a través del aire *inestable* se dan cambios rápidos en la refracción de la luz en distintas direcciones. Por lo tanto, la cantidad de luz que llega a un detector varía constantemente y se dice que la estrella *centellea*.

Como los telescopios recolectan luz en un área más grande pueden compensar los cambios rápidos y disminuir el centelleo. Sin embargo, las diferencias en refracción a lo largo de distintos caminos de luz a través de la atmósfera "manchan" (*smear*) la imagen y las fuentes puntuales se ven, a través del telescopio, como puntos vibrantes. A este fenómeno se le conoce como *seeing*⁹ y describe la calidad de la imagen de una fuente puntual en una observación dada en un momento dado (Karttunen et al., 2016) (Malacara y Malacara, 1995). Hay que tomar en cuenta que si bien lo que se menciona al comienzo de este párrafo es cierto, también es cierto que el *seeing* es función del área colectora de la lente/espejo primario del telescopio, para un nivel de *seeing* dado el error en el frente de onda inducido por la turbulencia atmosférica aumenta con la apertura del telescopio .

Los dos mecanismos principales que propician errores por turbulencia atmosférica en los telescopios son: movimiento vertical del aire causado por aire caliente que sube y se mezcla con aire más frío y vientos de gran altitud que acarrear estructuras compuestas de bolsas de aire que varían en tamaño, temperatura e índice de refracción a través del radio de apertura. Variaciones en la temperatura causan

⁹*Seeing* no tiene una traducción literal al español, pero se puede utilizar el término *turbulencia atmosférica* para referirse a este fenómeno.

variaciones en el índice de refracción lo que, en consecuencia, aceleran o atrasan puntos del frente de onda, rompiendo su forma (Telescope Optics, 2015) (ver figura 2.15).

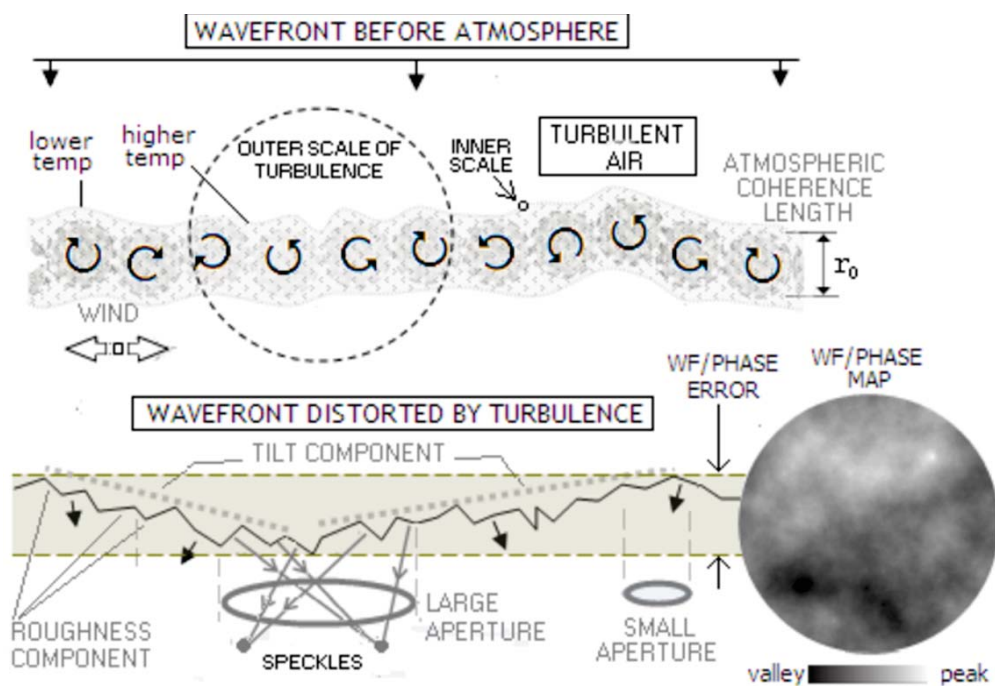


Figura 2.15: Ilustración de la dinámica atmosférica que genera distorsiones en el frente de onda. Obtenido de *Telescope Optics* (2015).

El primero que se dio cuenta de la importancia del seeing fue Christian Huygens, quien notó que las estrellas centellaban y que las orillas de la Luna y de los planetas vibraban aun cuando la atmósfera estaba aparentemente calmada y serena. La estructura real de las capas atmosféricas turbulentas varían inmensamente con la localidad y el tiempo; en general las contribuciones más significativas provienen del nivel límite o nivel de suelo y de múltiples capas (con mayor turbulencia) en la atmósfera alta. Usualmente el seeing es mejor cuando las capas turbulentas de la atmósfera alta son más débiles, dejando a la turbulencia del nivel de suelo como el componente principal (Telescope Optics, 2015).

Una de las consecuencias más importantes del seeing atmosférico es que tiende a aumentar el tamaño de las imágenes y la desplaza de su posición con lo que disminuye el poder de resolución del telescopio. Como se menciona anteriormente, la turbulencia atmosférica se puede ver como bolsas de aire en la atmósfera, que se encuentran en constante movimiento. Cada bolsa tiene una temperatura y un índice de refracción distinto de la otra y un diámetro de entre 10 y 25cm. Por lo tanto, en telescopios con aperturas menores de 10 centímetros el efecto de la turbulencia es un movimiento continuo y al azar, con desenfoques ocasionales de la imagen. Esta es la razón de la centelleo de las estrellas cuando se ven a simple vista. Si la abertura del telescopio es mucho mayor de 20 centímetros, la imagen no se mueve, mas bien su tamaño aumenta, y adquiere una forma que en promedio es circular, pero que cambia constantemente (Malacara y Malacara, 1995).

Como lo predice la teoría de la difracción¹⁰, cuando la luz se propaga en un medio homogéneo, la

¹⁰La difracción es el fenómeno del movimiento ondulatorio en el que una onda de cualquier tipo se extiende después de

imagen de una fuente puntual producida por un telescopio de diámetro D a una longitud de onda dada λ , es un punto de Airy de tamaño $\epsilon_D \sim \lambda/D$. El disco de Airy fue introducido por el astrónomo inglés George Airy como respuesta al problema matemático de la difracción de la luz a través de una apertura circular. La teoría dice que una fuente puntual es reproducida como un patrón de discos concéntricos (ver figura 2.16) donde el 84 % de la luz se encuentra en el disco central y el resto se encuentra distribuida en los anillos que lo rodean. El tamaño del disco de Airy depende de la apertura del telescopio y de la longitud de onda observada (Hubbell, 2013).

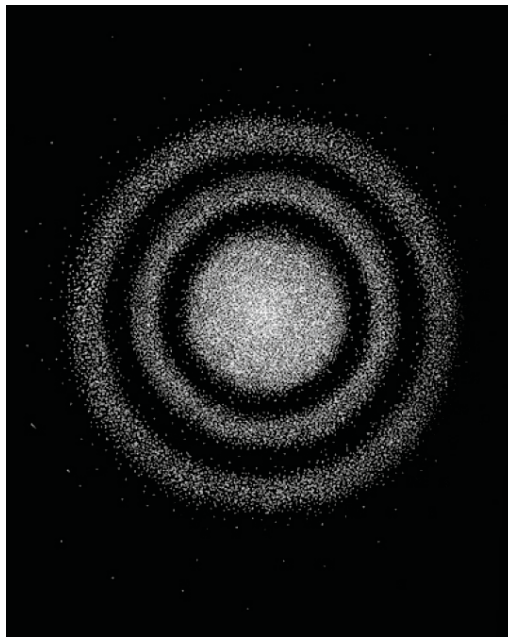


Figura 2.16: El disco de Airy con el 84 % de la luz en el disco central. Obtenido de Hubbell (2013).

Sin embargo, la turbulencia degrada las imágenes astronómicas y la luz proveniente de una estrella cruza varias capas atmosféricas turbulentas lo cual, perturba la propagación del haz de luz. Es por esto que con el enfoque de un telescopio es imposible alcanzar la resolución angular ϵ_D de un espejo perfecto (Vernin y Muñoz-Tuñón, 1995). En otras palabras, cuando la luz de una fuente (el Sol, por ejemplo) pasa a través de las capas turbulentas de la atmósfera, su trayectoria (o su frente de onda) se ve afectada, dando como resultado una imagen distorsionada o *borrosa*.

Analíticamente el *seeing*, como la resolución angular, se mide en arco segundos y se manifiesta como un fenómeno gaussiano que da como resultado imágenes estelares circulares (en vez de puntuales) y borrosas (como el disco de Airy), donde la distribución de intensidad forma una campana de Gauss.

Tanto el disco de Airy como la turbulencia atmosférica pueden ser medidas con la distribución gaussiana del flujo de intensidad. A esta distribución, formada en el plano de la imagen se le conoce como PSF (Point Spread Function) y se mide en unidades de arco segundo llamadas FWHM (Full Width at Half Maximum) (ver figura 2.17). Esta es una medida de qué tan ancha es la campana a la mitad del pasar junto al borde de un objeto sólido o atravesar una rendija estrecha, en lugar de seguir su avance en línea recta (véase Hecht (2002)), es decir, que la capacidad de una onda de doblarse al rededor de un objeto.

pico de amplitud y es la manera tradicional de caracterizar la degradación de la imagen, ya que esta se degrada de tal manera de su tamaño depende en gran medida de la turbulencia integrada sobre las capas de la atmósfera. (Hubbell (2013); Vernin y Muñoz-Tuñón (1995)). Cuando la turbulencia es lo suficientemente fuerte para alargar el máximo central del PSF la resolución del telescopio se determina por la atmósfera mas que por la apertura del mismo. El máximo central del PSF expandido por la turbulencia se conoce como *disco de seeing* y, por lo tanto, su FWHM es el *seeing* (Telescope Optics, 2015).

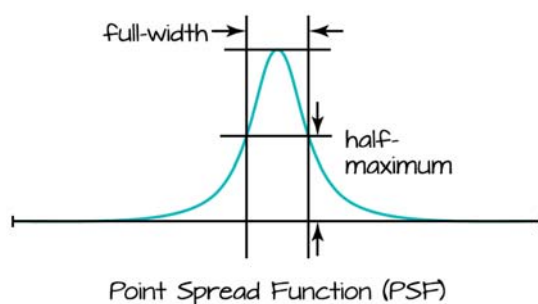


Figura 2.17: La función SPF y el FWHM. Obtenido de Hubbell (2013).

Una de las manera de medir el *seeing* es tomar una exposición de un campo estelar y medir el FWHM de una muestra de las estrellas en la imagen CCD. El valor FWHM medido es una buena indicación del *seeing* atmosférico en el lugar y el momento.

Según Vernin y Muñoz-Tuñón (1995) la teoría de Fried dice que la degradación de la imagen producida por la turbulencia atmosférica se caracteriza por el parámetro r_o el cual, se puede imaginar como el diámetro del telescopio que produciría un punto de difracción del mismo tamaño que el generado por la turbulencia de una fuente puntual.

La relación entre ϵ_{FWHM} y r_o es la que sigue

$$\epsilon_{FWHM} = 0.98\lambda/r_o \quad (2.21)$$

donde $r_o \ll D$.

En astronomía el *seeing* se refiere a la mejor resolución angular posible que puede ser lograda por un telescopio óptico que observa el cielo a través de la atmósfera, también se refiere al diámetro angular ϵ_{FWHM} de la imagen de una estrella tomada con una exposición grande en el foco de un telescopio de gran diámetro.

Las condiciones del *seeing* describen qué tanto perturba la atmósfera terrestre las imágenes vistas a través de un telescopio o qué tanto modifica los frentes de onda de los objetos astronómicos. El tamaño del disco del *seeing* (el diámetro aparente de las estrellas debido a este efecto) puede variar desde menos de un arco segundo hasta varias decenas de arco segundo y depende del lugar, el día y la hora. Si el

disco de *seeing* es pequeño entonces, se habla de un buen seeing. El seeing y el centelleo difuminan detalles pequeños en la imagen vista a través del telescopio (Vernin y Muñoz-Tuñón, 1995).

Como se mencionó anteriormente, el *seeing* expande la imagen a un diámetro, típicamente, de un arco segundo. Por lo tanto el límite teórico de la difracción (eq.2.18) no puede alcanzarse realmente en la superficie terrestre, es por eso que se busca construir observatorios en lugares de gran altitud. Uno de los sitios de observación con mejores condiciones de seeing son los Observatorios de Mauna Kea, Hawaii con una altitud de 4200 msnm y con una resolución de entre 0.5" y 0.6" llegando a ser tan buena como 0.25" en algunas noches. Otros lugares donde el seeing llega a ser bueno son: el Observatorio nacional de Kitt Peak cerca de Tucson, Arizona; Tenerife y La Palma en las Canarias; así como varios sitios en los andes chilenos (Observatorio Ínter-Americano de Cerro Tololo, Cerro La Silla y Cerro Paranal pertenecientes al Observatorio Austral Europeo, y Cerro Pachón donde se encuentra el Observatorio Géminis Sur) (Carroll y Ostlie, 2007).

Las deformaciones en el frente de onda causadas por turbulencia atmosférica están siempre presentes, simplemente varían en amplitud. Para efectos prácticos el error de *seeing* se puede caracterizar mediante escalas empíricas de calidad de seeing. Por ejemplo, existe la escala de Antoniadi que va del 1 al 5 donde: 1 es una visibilidad casi perfecta y se pueden obtener imágenes claras; 2, 3 y 4 varían de visibilidad clara con algunas oscilaciones, a visibilidad moderada con oscilaciones frecuentes, hasta llegar a visibilidad mala con oscilaciones continuas; y, finalmente, 5 significa que la visibilidad es muy mala y es prácticamente imposible realizar observaciones astronómicas (Antoniadi, 1930).

Otra escala utilizada para la caracterización de la calidad de *seeing* es la de Pickering (ver figura 2.18) que, aunque esta diseñada para un telescopio refractor de 5 pulgadas, puede ser generalizada basando el tamaño relativo del patrón vs. el disco de Airy. La escala de visibilidad, que va del 1 al 10 donde 1 es la peor visibilidad y 10 es la mejor, va de la siguiente manera:

- **1 -2:** Muy mala.
- **3:** Muy mala a mala.
- **4:** Mala.
- **5:** Razonable.
- **6:** Razonable a buena.
- **7:** Buena.
- **8:** Buena a excelente.
- **9:** Excelente.
- **10:** Perfecta.

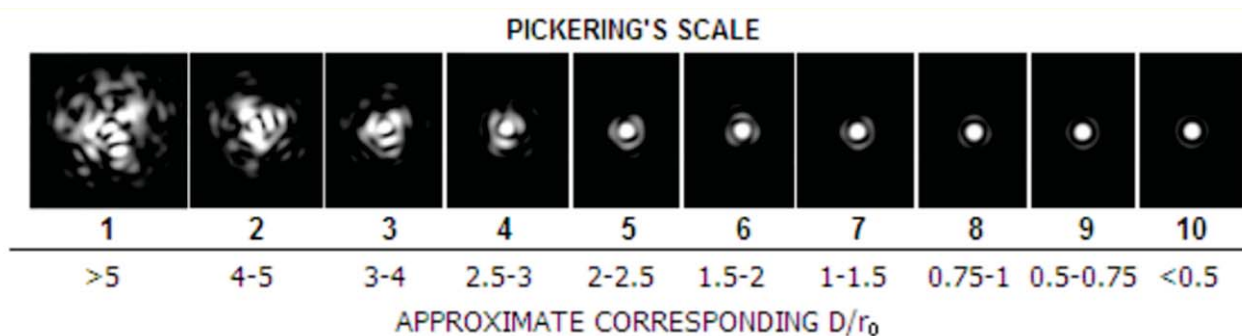


Figura 2.18: La escala de Pickering para caracterizar la turbulencia atmosférica. Es posible comparar como cambia el disco de Airy en relación con el seeing. Obtenido de *Telescope Optics* (2015).

Con el refractor de 5 pulgadas perfecto, el FWHM es un poco mayor a $0.9''$.

Es importante mencionar que si bien el concepto de turbulencia atmosférica, o *seeing*, y sus efectos, son los mismos para todo tipo de observaciones (diurnas o nocturnas), las medidas de *seeing*, así como las escalas que existen están hechas para observaciones y mediciones astronómicas nocturnas por ejemplo, la astrofotografía de espacio profundo cuyos objetos se encuentran a gran distancia del observador y se observan como objetos puntuales. Para un objeto con una distancia de observación no tan grande, como el Sol, no hay caracterizaciones del seeing, en términos de la obtención de una medida como el FWHM o de una escala como la de Pickering. De modo que, cuando se habla del *seeing* para las imágenes de este trabajo en realidad se refiere a las consecuencias en la calidad de la imagen en relación con los efectos ya mencionados de la turbulencia atmosférica.

2.3.3. La cámara

2.3.3.1. CCD

Las cámaras digitales han reemplazado a los métodos analógicos en lo que a astrofotografía se refiere, el uso del Charged Couple Device (CCD) ha revolucionado esta práctica así como también la astrometría, fotometría y la espectroscopía. El funcionamiento del chip CCD es mucho mayor que la tecnología usada previamente, por ejemplo, la película fotográfica o los tubos foto-multiplicadores.

De la manera más básica un CCD puede ser visto como un arreglo bi-dimensional de recolectores o contenedores de fotones. El material del CCD convierte fotones en electrones (cargas), es decir, convierte una señal luminosa en una señal eléctrica, los receptores tienen un límite sobre cuantos fotones pueden recolectar, de la misma manera que una cubeta sólo puede almacenar cierta cantidad de agua y para saber cuál es esa cantidad se vacía el agua de la cubeta a otro contenedor cuya capacidad de contención es bien sabida. El CCD funciona de manera similar: se llena el píxel hasta cierto nivel (exponiéndolo a la luz) y después, se vacía y se cuentan cuantos electrones hay en dicho píxel (Hubbell, 2013) (ver figura 2.19).

El funcionamiento de un CCD se puede resumir así:

- Cada píxel de la matriz CCD corresponde a un elemento semiconductor dentro de un condensador eléctrico.
- Un fotón incidente crea un fotoelectrón cuando da a un electrón del semiconductor la energía necesaria para pasar el umbral energético.
- Los fotoelectrones son guardados en el “contenedor” de potencial (un píxel correctamente polarizado).
- La lectura de estos fotoelectrones es controlada por la polarización de los píxeles, determinada por transistores de efecto campo. Esta lectura ocurre, o bien directamente mientras un obturador tapa el objeto (la fuente de luz), o bien por transferencia de trama. En este caso, una mitad de la superficie del CCD se dedica a recibir la señal, mientras que la otra solamente ve los fotones durante su tránsito hacia el registro de lectura.

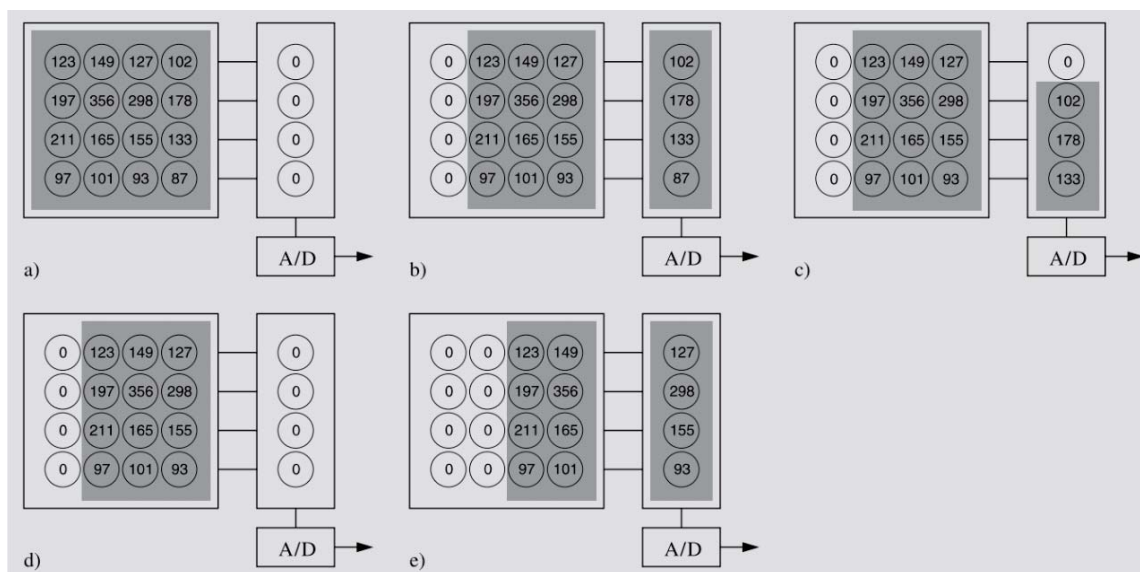


Figura 2.19: Funcionamiento del lector de una cámara CCD. a) Durante la exposición los electrones son contenidos en pozos de potencial que corresponden a píxeles de la cámara. El número en cada píxel muestra el número de electrones. b) Luego de la exposición cada línea horizontal se mueve un píxel hacia la derecha; la fila en el extremo derecho se mueve hacia el lector. c) Los contenidos del lector se mueven un píxel hacia abajo y la carga de hasta abajo se mueve al convertidor A/D, el cual envía el número de electrones a la computadora. d) Después de mover el lector hacia abajo varias veces, una fila vertical ha sido leída. e) La imagen es desplazada una vez más hacia la derecha por un píxel. Este proceso se repite hasta que toda la imagen es leída. Obtenido de *Karttunen et al. (2016)*.

Hay dos características que hacen del CCD un buen instrumento de medición científica: linealidad; y eficiencia cuántica (QE por sus siglas en Inglés) (*Hubbell, 2013*). Los CCDs tienen una respuesta lineal a la luz, mantienen su precisión; sin embargo, resulta complicado cubrir un rango alto de brillo; en cambio, el ojo y la película fotográfica tienen una respuesta no-lineal a la luz; esto significa que la

sensibilidad del ojo (o la película fotográfica), cuando se expone a la luz, se adapta dependiendo de cuanta luz está recibiendo. Además la cantidad de luz necesaria para grabar una señal está determinada por la QE del chip CCD. La eficiencia cuántica (QE) se define como el porcentaje de fotones que son convertidos a electrones dentro del chip CCD (Típicamente, un CCD tiene una QE de $\sim 60\%$; el equivalente en la película fotográfica es de solamente el 1 o 2%. La eficiencia cuántica es aumentada incluyendo un micro-lente enfrente de cada píxel o manufacturando el CCD como un chip de iluminación trasera (Back-Illuminated sensor, BSI¹¹).

Según Gerald Hubbell (2013) los parámetros físicos principales de un chip CCD son los siguientes:

- **Resolución:** El CCD es un arreglo bidimensional de píxeles construido en un plano. La resolución es el número de píxeles en los ejes x & y , por ejemplo, un CCD típico puede estar construido de 1024×768 píxeles para una webcam.
- **Tamaño de píxel:** El tamaño típico de un píxel puede variar desde 4.65 micrómetros (mm) hasta 24.0mm¹²
- **Profundidad:** Cada píxel en un chip CCD puede recolectar una cierta cantidad de electrones dependiendo de su tamaño y construcción. La profundidad es la cantidad de electrones que puede contener un píxel.
- **Tamaño del CCD:** Este parámetro es, simplemente, el tamaño físico del sensor. Se puede calcular multiplicando el tamaño del píxel (en mm) por la resolución en x & y . Entre más grande sea el CCD, se puede cubrir más área del cielo en una sola imagen.

Todas las características antes mencionadas afectan el comportamiento del CCD, sin embargo, no son las únicas, las características electrónicas del chip también afectan su funcionamiento. Las principales características electrónicas de un CCD, según Hubbell (2013), son las que siguen:

- **Profundidad de bit:** La medida de la profundidad del bit es una función del convertidor análogo-digital (ADC, por sus siglas en inglés) que se usa para convertir los electrones en ADUs (Analog Digital Units). El convertidor típico de una cámara utiliza un convertidor de 12 bits, pero los CCDs de las cámaras astronómicas utilizan convertidores de 16 bits. Un convertidor de 16 bits puede calcular 2^{16} o 65,536 niveles. Estos niveles, algunas veces, son llamados cuentas.
- **Ganancia (g):** La ganancia de una cámara CCD es un valor utilizado para graduar la máxima cantidad de electrones medidos por un píxel al máximo número de cuentas que la cámara puede sostener.
- **Ruido de lectura (Readout Noise):** Este tipo de ruido es un número fijo de electrones agregados por cada vez que los píxeles son leídos y convertidos a ADUs. Típicamente esta cantidad puede

¹¹Un BSI es un sensor para imágenes digitales que usa un cierto tipo de arreglo de elementos de imagen para aumentar la cantidad de luz capturada, mejorando así el desempeño cuando hay poca luz.

¹²Un micrón es un 1/1000 de un milímetro.

ser $\sim 10 - 15$ electrones, sin embargo, para cámaras muy buenas puede ser tan bajo como 5 electrones.

- **Ruido Negro (*Dark Noise*):** El ruido negro está basado en un valor dependiente del tiempo llamado corriente negra. Es un valor que depende mucho de la temperatura y puede variar desde menos de 1 electrón/segundo por cada píxel hasta 0.005 electrones/segundo, esto para CCDs enfriados a -30°C . La disminución de este tipo de ruido es del 50% por cada caída de 6°C . El ruido negro es un valor acumulativo que aumenta a medida que el tiempo de exposición de la imagen crece.
- **Linealidad:** La linealidad es la respuesta de entrada/salida del CCD convirtiendo fotones en electrones. La cuenta de los electrones de salida debe corresponder a la cuenta de entrada de fotones de manera lineal. Esta característica es una indicación de qué tan bien funciona el CCD en este aspecto.

Hay dos tipos principales de cámaras para realizar astrofotografía: cámaras CCD tipo webcam; y cámaras de larga exposición, cada una de estas cámaras tiene sus ventajas y desventajas, para este trabajo se utiliza una cámara tipo webcam monocromática.

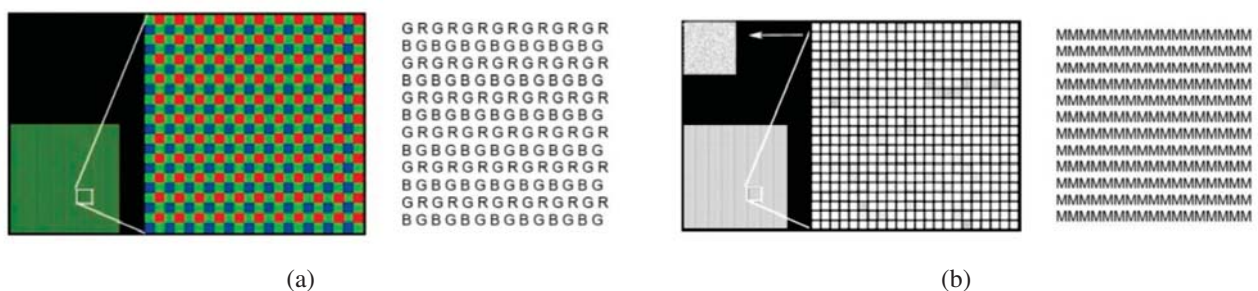


Figura 2.20: Comparación entre una matriz de Bayer a color (a) y una monocromática (b). Obtenido de *O'Donnell (2016)*.

Una cámara monocromática puede recolectar más señal (luz) que una cámara a color, de hecho, puede recolectar 3 veces más señal. Esto es porque el arreglo de la matriz de Bayer encontrado en las cámaras a color reducen la cantidad de luz total recibida del objeto que se está fotografiando. La matriz del detector CCD de la cámara fotográfica está compuesta por píxeles sensibles al rojo (R), verde (G) y azul (B). Dado que nuestra vista es más sensible al verde un 50% de los sensores son verdes, otro 25% azules y el 25% restante rojos (*O'Donnell, 2016*). Por lo tanto, si se utiliza una cámara en color para fotografiar el Sol solo se aprovecha el 25% de los píxeles de la cámara. Es decir, estamos desperdiciando buena parte de su potencial. Por diseño el sensor de una cámara con un arreglo a color requiere de mayores exposiciones para obtener el mismo nivel de señal que una cámara monocromática ya que, al acomodar automáticamente la luz que llega al telescopio en canales RGB (Red Green Blue) se sacrifica parte de la luz que se está obteniendo. Es por eso que en este caso son preferibles las cámaras monocromáticas, ya que permiten aprovechar todos los píxeles de la cuadrícula (*Jones, 2018*).

Para este trabajo se utiliza un sensor CCD ICX445ALA para cámaras monocromáticas el cual tiene una alta sensibilidad para la región del $H\alpha$ (ver figura 2.21), además de una alta resolución y baja corriente negra, lo que lo hace ideal para obtener fotografías solares en la longitud de onda antes mencionada.

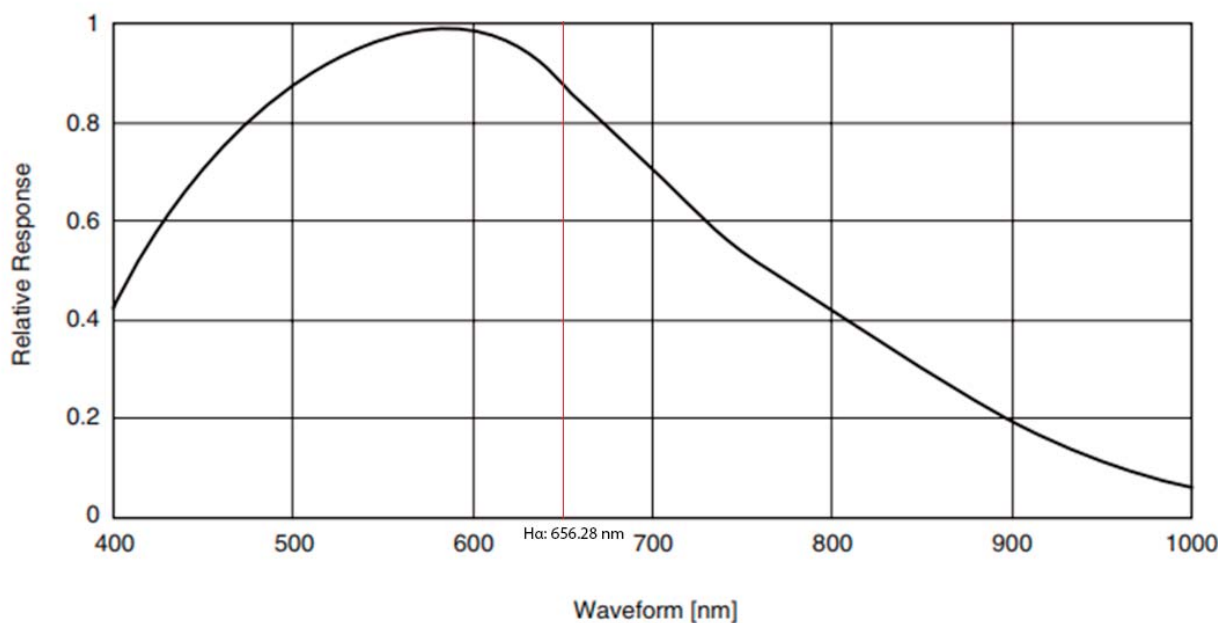


Figura 2.21: Gráfica de la sensibilidad del sensor ICX445ALA. Se puede observar que para la región del $H\alpha$ el sensor tiene una alta sensibilidad lo que lo hace favorable para obtener imágenes en esta longitud de onda. Obtenido de *Manual para sensor diagonal 6.0mm ICX445ALA, SONY*.

2.3.4. Filtros para observar al Sol

Al inicio de los años 30s el astrónomo francés Bernard Lyot, el también inventor del coronógrafo, sugirió un método que permitía observar al Sol de manera directa sin necesitar dispersar la luz como en un espectroscopio; el filtro Lyot. Este filtro funciona bajo el principio de la interferencia de la luz conocido como birrefringencia, para aislar una banda de luz monocromática. La birrefringencia, o doble refracción de la luz, ocurre cuando un haz luminoso se encuentra con vidrios ópticos especiales como los cristales de calcita o cuarzo. Los dos rayos de luz secuenciales (polarizados perpendicularmente con el otro) pasan a través del cristal a velocidades diferentes (Hecht, 2002). Dependiendo del grosor del cristal se vuelve posible tener un haz con una ganancia de media longitud de onda sobre el otro es decir, los haces tienen un desfase de 180° e interfieren destructivamente. Al combinar varios cristales con grosores diferentes, se puede construir un filtro birrefringente que permita el paso de una banda estrecha¹³ de luz en cualquier longitud de onda (Jenkins, 2009).

¹³Los filtros de ancho de banda estrecha (narrowband filters) son utilizados para aislar bandas de frecuencias específicas relacionadas con elementos que existen en el espacio y para bloquear otras longitudes de onda que muchas veces están relacionada a la contaminación del aire.

El filtro de Lyot permitió la observación de la línea de $H\alpha$ en un instrumento compacto. Los filtros iniciales tenían un ancho de banda mayor que 1 \AA solo permitían la observación de prominencias solares sin embargo, a medida que se lograron hacer filtros con anchos de banda cada vez más estrechos se podría observar más detalles en el disco solar.

Durante los 1800s Charles Fabry y Alfred Perot investigaban la posibilidad de construir un interferómetro¹⁴ basado en múltiples reflexiones entre dos espejos ligeramente recubiertos de plata y alejados entre sí (Jenkins, 2009) (ver figura 2.22).

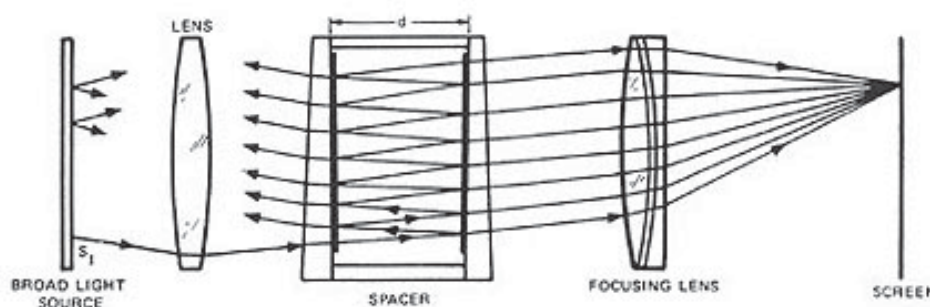


Figura 2.22: Funcionamiento de un interferómetro de Fabry-Perot. Obtenido de *School of Physics and Astronomy, Cardiff University (2016)*.

Un etalon es una clase de filtro óptico basado en el interferómetro de Fabry Perot y se utiliza mucho en telescopios solares ya que, como se mencionó anteriormente, se desea una banda de frecuencias muy estrecha. El etalon es, probablemente, el diseño más simple para un filtro óptico que, al mismo tiempo, utiliza especificaciones ópticas muy precisas.

Un etalon Fabry Perot se compone de 2 superficies planas y paralelas de cuarzo, que pueden estar recubiertas con una capa dieléctrica reflectora (con el material reflector centrado en el pasa bandas deseado). Las dos superficies están separadas por un espacio pequeño, del orden de unos cientos de micras o menos, que puede ser aire o algún material sólido (Pismish, 1982) y la luz de un rayo monocromático que incide con un ángulo i , con la normal a la superficie del mismo. Si se observa la figura 2.23 se observa que se nombró e a la separación de las superficies planas y se puede designar como n al índice de refracción del material entre las placas.

La luz incidente tiene múltiples reflexiones entre las dos superficies que son altamente reflectoras y no absorbentes, sin embargo, una parte de la luz atravesará el etalon. Parte de la luz se transmite cada vez que llega a la segunda superficie, pero la radiación transmitida será observable sólo cuando el rayo transmitido esté en fase con el rayo incidente. Esto resulta en múltiples rayos desfasados que pueden interferir unos con otros: la segunda superficie está desfasada de la primera por un número par de longitudes de onda de manera que, cuando la luz llega a esta superficie un poco de ella es reflejada (y actúa de manera destructiva con la que va llegando), dejando pasar solamente una banda muy estrecha

¹⁴La interferometría es la sobre posición de múltiples ondas de luz generadas por el interferómetro con el propósito de estudiar las diferentes características entre una onda que entra y otra que sale.

de luz (656.28 ± 0.07 nm). El gran número de rayos de interferencia, produce un interferómetro con una resolución extremadamente alta (School of Physics and Astronomy, Cardiff University (2016); Pismish (1982)).

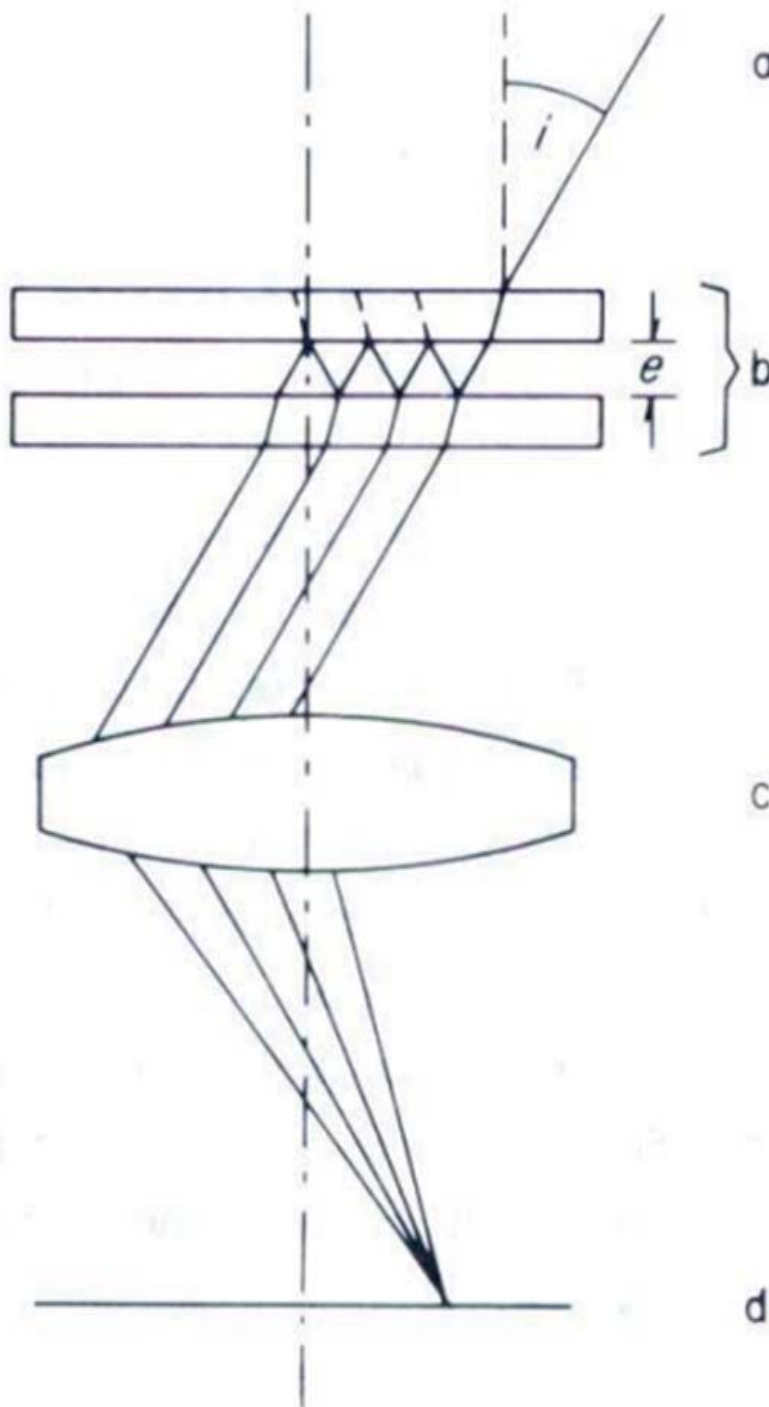


Figura 2.23: El etalon de Fabry-Perot acoplado a un objetivo: a- rayo monocromático; b- etalon FP; c- objetivo de la cámara; d- detector. Obtenido de *Pismish (1982)*.

Sin embargo, lo anterior requiere que el camino óptico de las reflexiones del rayo para la λ escogida satisfaga la relación:

$$2necos(i) = p\lambda, \quad (2.22)$$

donde si p es un número entero; la luminosidad transmitida será entonces, un máximo. Si p no es entero los rayos no están en fase y esto causa la disminución de la luminosidad hasta llegar a un mínimo donde la interferencia es destructiva y no se observará nada. Si i cambia se observarán sucesivamente anillos brillantes y oscuros donde los máximos estarán donde p sea entero. La p a la máxima transmisión (interferencia constructiva) para el mínimo valor de i se conoce como orden de interferencia del etalón (Pismish, 1982). Si se acopla un objetivo, los rayos paralelos transmitidos forman un punto sobre el plano focal de la cámara. Dado que los rayos incidentes con inclinación i forman un cono, el lugar geométrico de la máxima iluminación será un círculo, el siguiente círculo con máxima iluminación se dará en $p-1$ (ya que $\cos i$ será menor) y así sucesivamente. Para un etalón de separación fija e , la posición del anillo (su radio en el plano focal) aumenta conforme se disminuye la longitud de onda incidente.

Pismish (1982) menciona que de la ec. 2.22 se puede notar que el orden de interferencia p para una λ dada se puede variar de tres maneras:

- Cambiando la separación e .
- Cambiando el índice de refracción n .
- Inclinando el etalon.

El último método mencionado tiene sus limitantes y no es muy usado actualmente.

Ahora, hay dos maneras de agregar un filtro de banda estrecha (ver Figura 2.24) a un telescopio: una se conoce como carga frontal (*front loading*) y usa un etalón de gran diámetro sobre la entrada del telescopio; otra, se llama carga final (*end loading*) y utiliza un etalon más pequeño que se posiciona dentro de la trayectoria que la luz sigue dentro del telescopio (Hubbell (2013); Jenkins (2009)).

Uno de los principales parámetros que definen a un etalón es el paso de banda: es el ancho de la curva que define la transmitancia del filtro en el 50% de la transmisión total. La transmisión de un etalón tiene una base ancha y un pico estrecho, usualmente el pico de transmisión debe de estar en el 80 – 90% para que el paso de banda sea medido en los puntos de entre 40 y 45%. Para aplicaciones solares es aceptado que entre menor sea este número es mejor, de hecho, entre más estrecho sea el pasa banda del filtro, más aislada queda la línea de $H\alpha$ del resto del continuo solar y la imagen resultante tiene más contraste. El paso de banda en una función del espacio entre las dos superficie reflectoras; entre más grande sea el espacio mas estrecha sera el paso de banda (Jenkins (2009); Lunt Solar Systems (2016)).

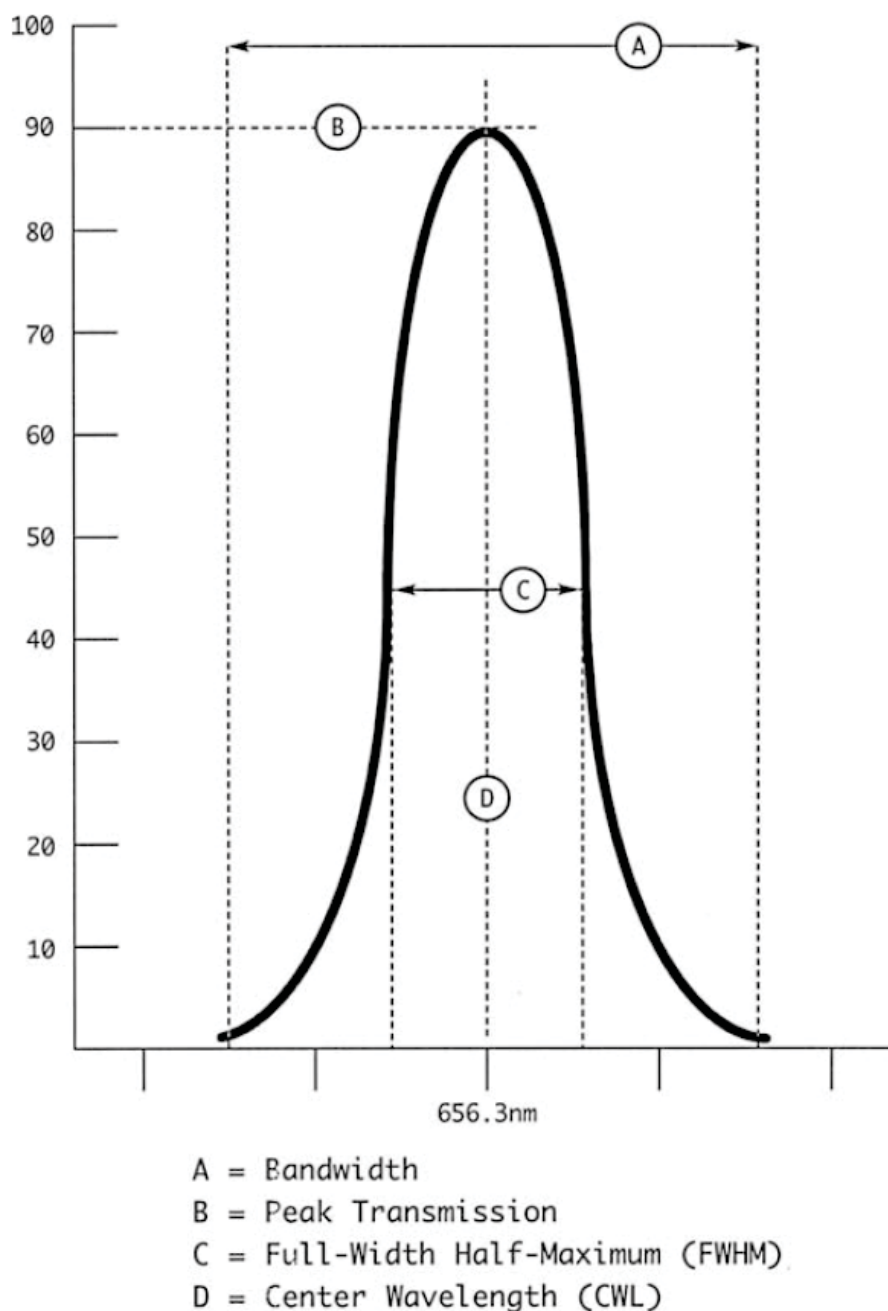


Figura 2.24: Curva de un filtro pasa bandas centrado en la longitud de onda del $H\alpha$. Obtenido de ([Jenkins, 2009](#)).

Todos los etalones transmiten “bandas de lado” (*side-bands*) del espectro que no corresponden a la longitud de onda central¹⁵ y que deben quitarse con filtros de bloqueo, en un filtro Coronado (como el utilizado en este trabajo) el componente de bloqueo se encuentra al final del telescopio en el ocular ([Jenkins, 2009](#)).

¹⁵La longitud de onda central corresponde a la parte del espectro en la que está centrada la banda del filtro.

Algunas veces, para estrechar aun más la banda del filtro ($< 0.5 \text{ \AA}$) se hace lo que se conoce como *apilado doble*. Esta técnica consiste en poner un segundo etalón en la entrada del telescopio. Como se mencionó anteriormente, un ancho de banda más estrecho significa más contraste en la imagen resultante.

Los filtros de carga frontal tienen la ventaja de ser más portátiles, están diseñados, mayormente, para observar el disco solar completo y solo los limita la apertura del telescopio y su distancia focal. Por otro lado, los filtros de carga final permiten una resolución muy grande. Ambos tipos de filtro dan una visión excelente del Sol y sus estructuras (Jenkins, 2009).

Capítulo 3

Análisis y Procesamiento de Imágenes del Sol

Este capítulo describe los pasos a seguir para la obtención de fotografías del Sol para el estudio de la actividad solar en el contexto del Clima Espacial (CE). Se hablará específicamente de las fotografías solares obtenidas en el Observatorio Solar de la ENES Morelia así como de su procesamiento y análisis.

El Observatorio Solar es parte del Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales ([LACIGE](#)) de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), unidad Morelia que pertenece a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y fue creado en el segundo semestre de 2015 con fondos directos de la UNAM y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

En este laboratorio se realiza investigación relacionada con el área de las ciencias espaciales, la Astrofísica y el cómputo en apoyo a las Geociencias.

3.1. Metodología

Ya que se conocen las clases de telescopios que existen y los fundamentos de la astrofotografía podemos enfocarnos en el material utilizado en esta tesis:

- Telescopio Coronado SolarMax II 90mm.
- Cámara de vídeo Celestron Skyris 445M.
- Software libre de procesado de vídeo Registax 6.
- Software de procesamiento de imágenes Photoshop.
- Software de análisis de imágenes SaoImage DS9.

A continuación se describirán un poco los telescopios pertenecientes al observatorio de la ENES Morelia, dando a conocer sus especificaciones.

3.1.1. Telescopio Coronado SolarMax II 90mm

El telescopio SolarMax II es un telescopio específicamente diseñado para observar al Sol en H- α . Es el telescopio con la mayor apertura dentro de la línea Coronado y se utiliza para ver con gran definición los detalles finos de la superficie solar (filamentos, prominencias, espículas, etc.)

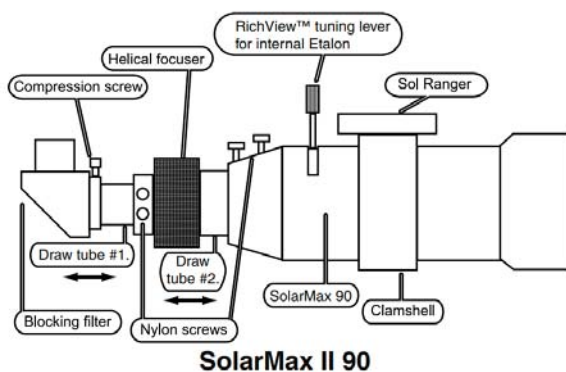


Figura 3.1: Diagrama de los componentes del telescopio Coronado SolarMax II. Obtenido de *Manual Meade Instruments para telescopio Coronado SolarMax II*.

Este tipo de telescopio tiene un filtro de carga frontal con una pieza de bloqueo insertada en una diagonal en el ocular. El instrumento tiene las siguientes características:

- Apertura: 90mm.
- Distancia focal (f): 800mm.
- Radio focal (f/): 8.8, es decir: f/8.8.
- Filtro de bloqueo: 15mm.
- Ancho de banda (apilado simple): $< 0.7\text{\AA}$.
- Estabilidad térmica: $0.005 \text{\AA}/^{\circ}\text{C}$.

3.1.2. Telescopio Meade ETX-90EC Astro Telescope

Este telescopio tiene un diseño óptico tipo Cassegrain-Maksutov, lo que lo hace un buen instrumento para observaciones de cielo profundo ya que además, tiene una base de datos con ~30,000 objetos para localizar. Al mismo tiempo, provee de imágenes lunares y planetarias muy detalladas y con gran aumento. Tiene una cobertura de alta transmisión (UHTC, Ultra High Transmission Coating) que provee de imágenes brillantes y con alto contraste. El telescopio posee un espejo que puede girar de modo que la luz se dirija hacia la parte posterior del telescopio (en vez de reflejar la luz a 90° hacia el ocular) permitiendo colocar una cámara fotográfica. Este tipo de telescopio ha servido para obtener las primeras fotografías en CaK del observatorio de la ENES Morelia.



Figura 3.2: Diagrama de los componentes del telescopio Meade ETX-90EC. Obtenido de *Manual Meade Instruments para telescopio ETX*.

3.1.3. Montura Orion Sirius EQ-G

La montura utilizada en este trabajo (ver figura 3.3) es una montura ecuatorial que inicialmente tiene un tripié de acero (ahora se encuentra montada en una columna en el observatorio de la ENES Morelia), tiene un peso de 30lbs (13.6078 kg) y un contrapeso de 11lbs (5 kg) . Puede ser operada tanto en el hemisferio Norte como en el Sur y tiene una mirilla para ser alineado con la estrella polar.

La montura tiene tres tipos de rastreo: sidereal; lunar; y solar. Con velocidades de guiado de: 2x; 1.75x; 1.5; y 1.25x. Tiene una base de datos que incluye los catálogos M, NGC e IC, es decir puede encontrar un total de 13,436 objetos en el cielo.

3.1.4. Obtención de vídeo del Sol

La obtención de las imágenes comienza en el observatorio solar donde primero se revisa el porcentaje de humedad del día y hora en la que se va a hacer la observación, este dato, se puede obtener de la página de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM para Morelia. Es importante conocer el porcentaje de humedad ya que si es $\geq 80\%$ no se puede abrir el domo debido a que la humedad puede dañar los sistemas ópticos de los telescopios. Además, se revisa la imagen de ese día del instrumento GONG el cual observa en $H\alpha$ y que pertenece al Observatorio Solar Nacional (NSO) el cual pretende avanzar en el conocimiento sobre el Sol, tanto como un objeto astronómico así como el objeto de mayor influencia externa sobre la Tierra, proveyendo de oportunidades de observación a la comunidad científica. La misión incluye la operación de instalaciones modernas de investigación,

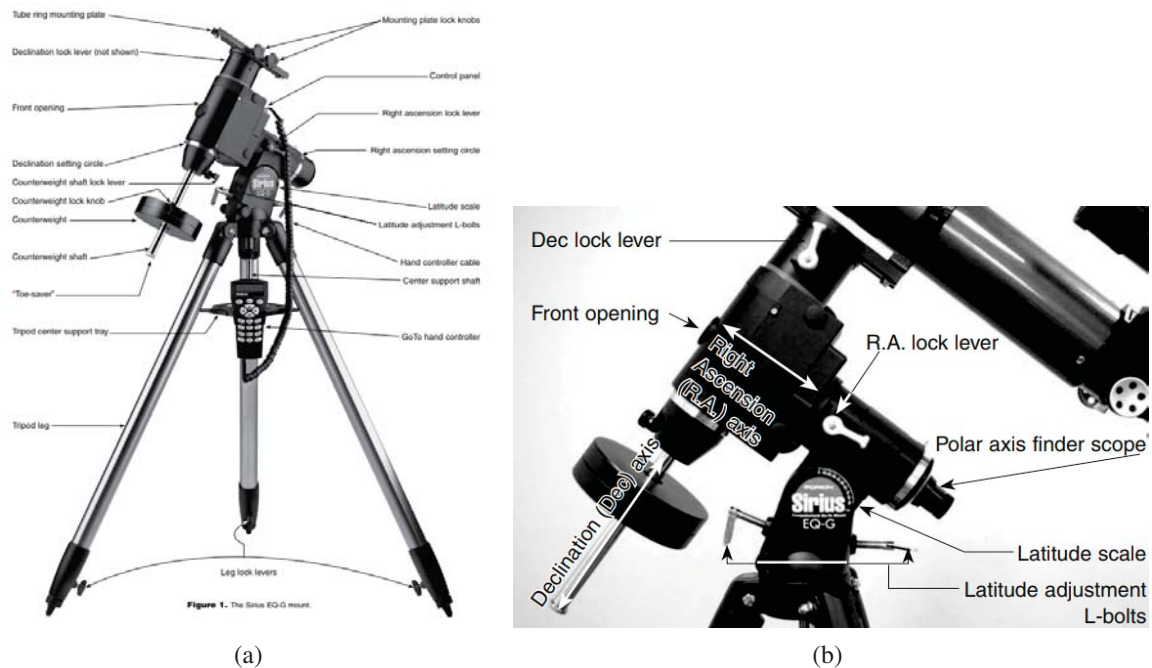


Figura 3.3: La montura utilizada con el telescopio. a)Esquema de la montura y sus partes. b)Detalles de los ejes. Obtenido de *Manual Orion para montura Sirius EQ-G*.

el continuo desarrollo de instrumentación avanzada, llevar a cabo investigación sobre el Sol así como proveer de un acercamiento educativo y público de dicha investigación.

Dentro del proyecto del NSO se encuentra en Programa Sinóptico Integrado (NISIP) el cual provee observaciones sinópticas¹ del Sol como apoyo a la investigación científica y para aplicaciones en el monitoreo del clima espacial a instituciones y comunidades (nacionales o internacionales) que se dedican al estudio de la física solar o a las relaciones Tierra-Sol.

El NISP opera una serie de instrumentos desde los programas *Global Oscillation Network Group* (GONG) y el *Synoptic Optical Long-term Investigations of the Sun* (SOLIS).

GONG es un programa realizado en comunidad para llevar a cabo estudios detallados de la estructura interna solar y su dinámica utilizando heliosismología. Para poder explotar esta técnica, GONG ha desarrollado una red de seis estaciones, localizadas alrededor del mundo (ver figura 3.4), que proveen de imágenes de velocidad² de ondas sonoras extremadamente sensibles y estables para obtener observaciones casi continuas de las pulsaciones/oscilaciones de “cinco minutos” del Sol (Hill et al., 1994).

¹Las Observaciones sinópticas son las que proveen una imagen amplia (*broad view*) de un sujeto/objeto en un periodo de tiempo particular.

²Velocity Imagers

Los sitios de observación que componen la red GONG son:

- The Big Bear Solar Observatory en California, USA.
- The High Altitude Observatory at Mauna Loa en Hawaii, USA.
- The Learmonth Solar Observatory en Australia Occidental.
- The Udaipur Solar Observatory en India.
- The Observatorio del Teide en las Islas Canarias.
- The Cerro Tololo Interamerican Observatory en Chile.

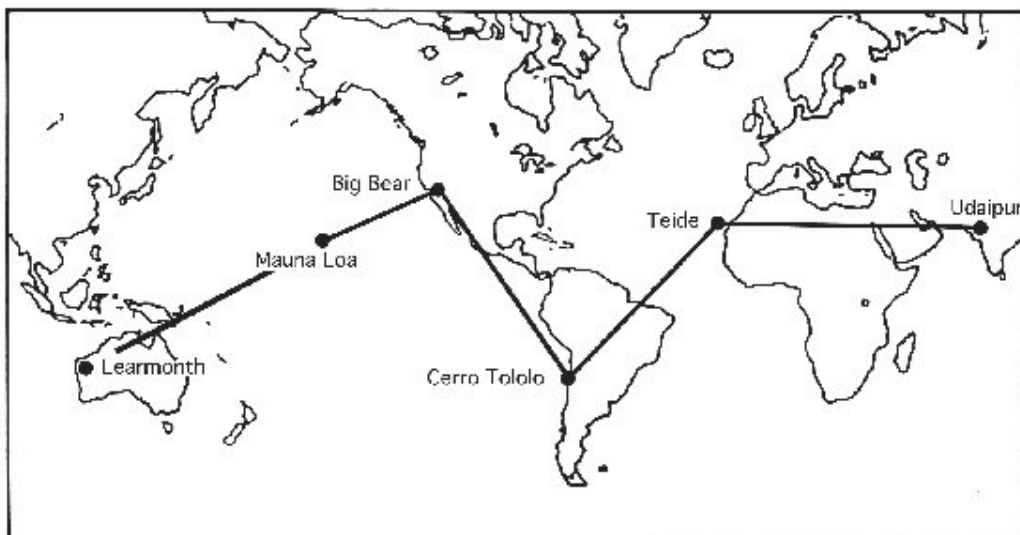


Figura 3.4: Mapa de la localización global de los observatorios de la red GONG. Obtenido de *The GONG Network of Sites*.

En este caso se utiliza la imagen (para cada día) del observatorio de Cerro Tololo en Chile (ver figura 3.5) ya que esta imagen, al observar, al igual que nosotros, en $H\alpha$, permite darse cuenta de qué clase de estructuras hay ese día en el Sol y además, permite orientar o posicionar la cámara de tal manera que la imagen que se va a obtener sea consistente con la orientación real de Sol.

Además, también se obtiene la imagen en el espectro visible proporcionada por el sitio [Space Weather](#), la cual es una página web que proporciona noticias e información sobre el entorno Sol-Tierra (es importante mencionar que dicha imagen es obtenida por el sitio web de la galería de fotos del Solar Dynamics Observatory (SDO) de la NASA). Esta imagen es importante ya que en caso de existir una región activa, la misma aparece nombrada según la nomenclatura asignada por el Space Weather Prediction Center ([SWPC](#)) de la NOAA.

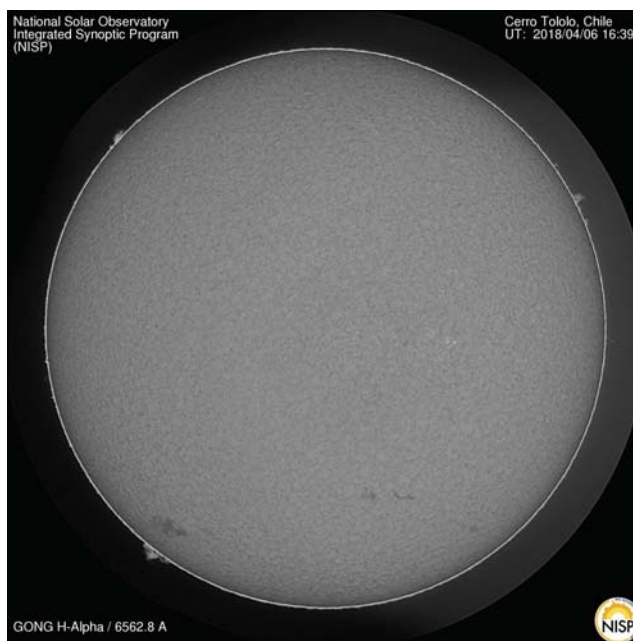


Figura 3.5: Imagen del Sol obtenida por el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo (Chile) para el 06 de abril de 2018. Obtenido de *GONG H-Alpha Network Monitor*.

Como se puede ver del párrafo anterior, se utilizan varias imágenes pertenecientes a distintos observatorios para complementar la investigación realizada en el LACIGE, es por esto que es de suma importancia que México cuente con una red de observatorios (tanto en $H\alpha$ como en otras longitudes de onda) que provean de observaciones constantes de imágenes solares no solo al país, sino que también permitan que México se convierta en un colaborador importante en la investigación global.

Las imágenes obtenidas de Spaceweather y la red GONG se guardan en la carpeta específica para el día en que se realiza la observación, ahí también se guardarán los vídeos tomados y las imágenes ya procesadas del Sol. Esto con la finalidad de tener bien organizadas y clasificadas las imágenes.

Una vez que se realizó lo anterior se procede a encender el telescopio y conectar la cámara a la computadora, donde se abre el software iCap cuya interfaz luce como se puede ver en la figura 3.6.

Se orienta el telescopio para que observe al Sol y se configura la paleta de seguimiento para que lo siga, de esta manera se puede confiar en que el telescopio se irá moviendo junto con la estrella durante todo el proceso de captura de vídeo. Una vez que ya se orientó en telescopio y podemos observar la silueta del Sol en la pantalla de la computadora (ver figura 3.7), ajustamos un poco el enfoque macro en el telescopio para que la silueta del disco no se vea tan dispersa (ver figura 3.8). Una vez realizado esto, se modifican ciertos parámetros dentro del programa iCap:

- Se ajusta la pantalla al 75%. Esto con la finalidad de poder observar el disco completo.
- Se selecciona la opción de voltear la imagen ya que el telescopio actúa como un espejo entonces, si no volteamos la imagen lo que estamos viendo está en realidad, de cabeza.

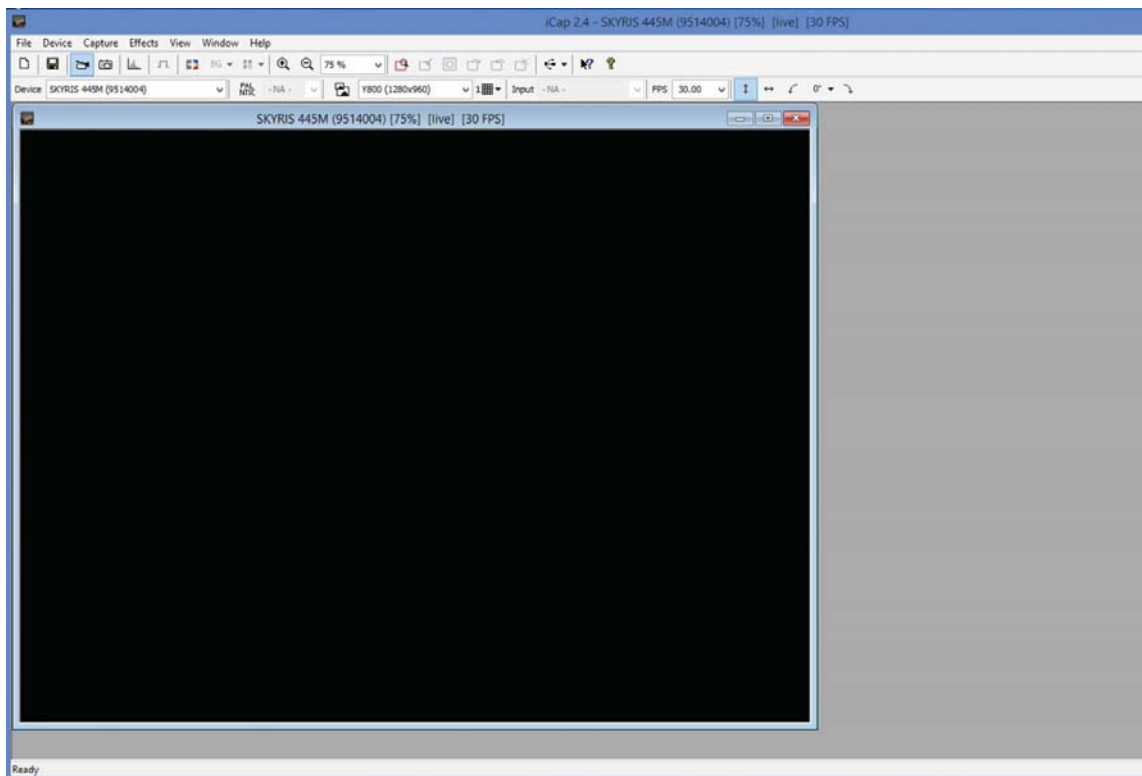


Figura 3.6: Interfaz gráfica del software iCap.

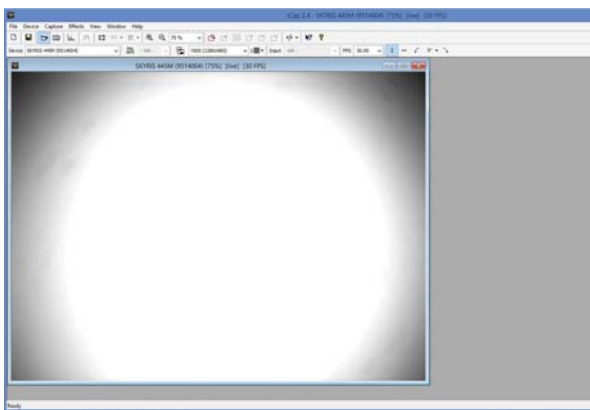


Figura 3.7: Silueta del Sol visto por el telescopio antes de enfocar.

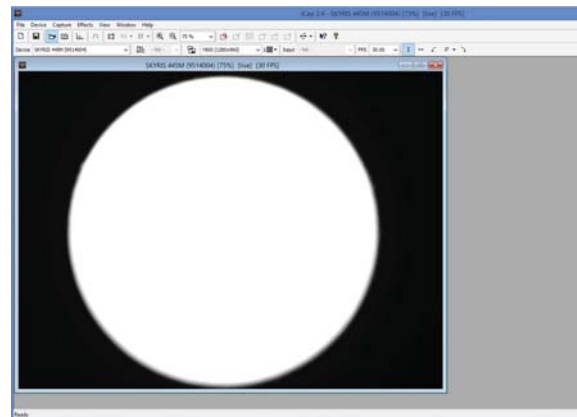


Figura 3.8: Silueta de Sol una vez que ya se enfocó el macro del telescopio.

- Abrimos la pestaña "Device" donde se selecciona la opción de propiedades de la cámara de manera que podamos controlar la exposición y el brillo de la imagen (ver figura 3.9a y 3.9b).
- En la pestaña "Capture" se abre el comando "Toggle Recording Info Dialog" para poder ajustar en qué carpeta se guardará el vídeo y cómo se va a llamar (ver figura 3.9c).

El programa da la opción de nombrado automático con la fecha y la hora en la que se capturó el vídeo y es la que se selecciona ya que permite que todos los vídeo tengan la información de cuándo se tomaron.

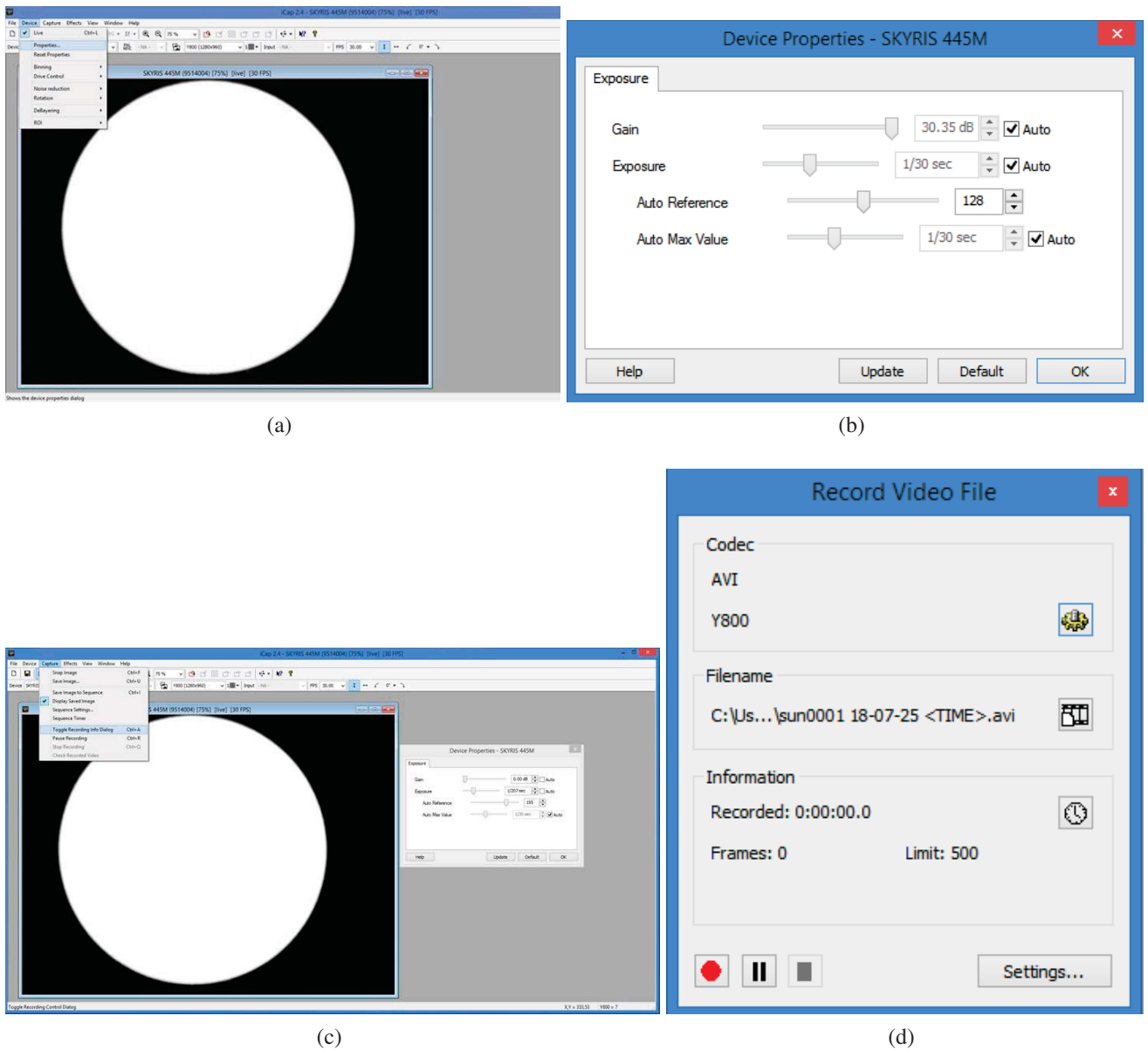


Figura 3.9: Selección de las pestañas de ajustes para la captura de vídeo: a) Selección de la pestaña “properties”. b) La pestaña de propiedades ya abierta. c) Selección de la pestaña “Toggle Recording Info Dialog”. d) La pestaña de captura y guardado de vídeo ya abierta.

Una vez que ya se realizaron los pasos anteriores se puede comenzar con la captura, para esto se cambia la exposición de la imagen de manera que no quede muy brillante y se puedan distinguir formas en el disco también, se termina de ajustar el enfoque “macro” (detalles a gran escala de la imagen, como tamaño del disco) (ver figura 3.11) y se ajusta el “micro” (detalles finos, como las espículas) de manera que ya se puedan apreciar algunas estructuras solares.

El vídeo que se toma es un vídeo típico de 500 cuadros a una tasa de ~ 30 cuadros (frames) por segundo. Esto se puede cambiar de modo que el vídeo contenga más o menos cuadros, sin embargo,

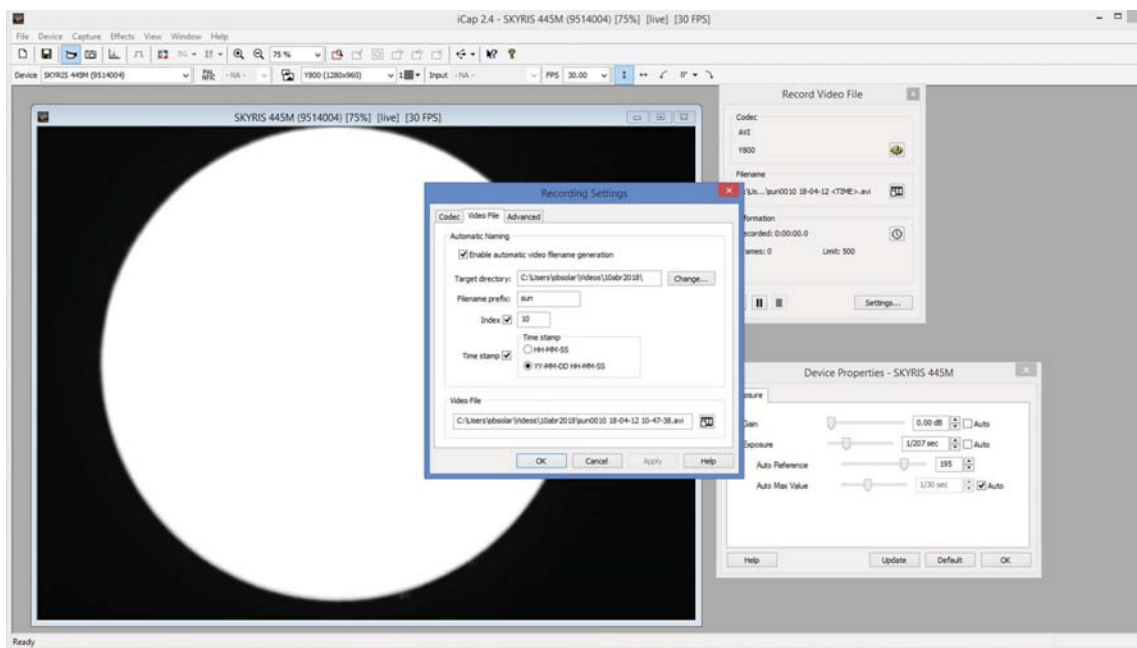


Figura 3.10: Pestaña con las opciones para nombrar y guardar los vídeos capturados.

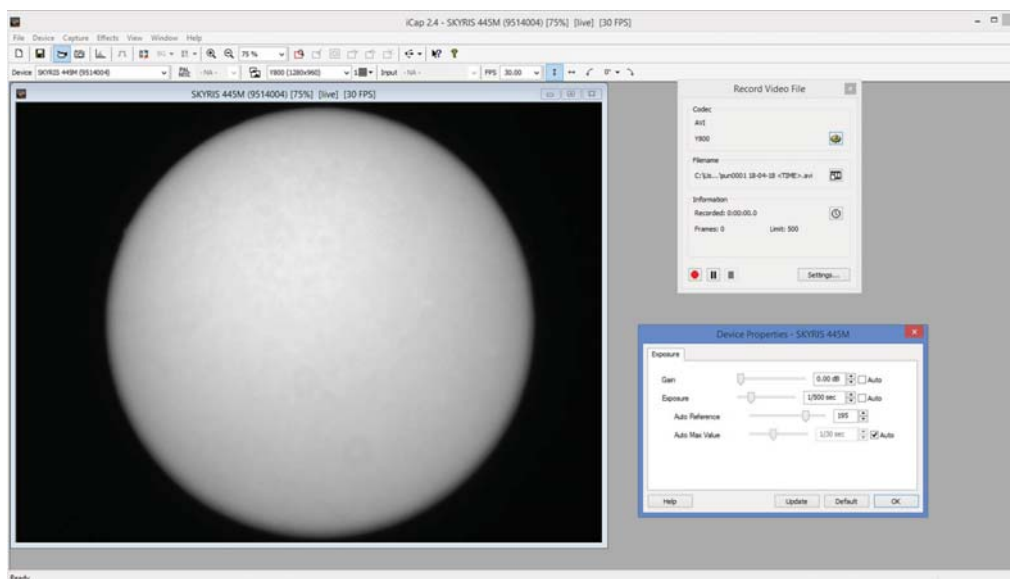


Figura 3.11: El disco solar una vez que se ajustó la exposición de la imagen y se termino de realizar el enfoque macro.

500 son un buen promedio ya que normalmente el *seeing* no es realmente excelente y de esta manera se tiene una buena cantidad de cuadros, donde en promedio no se van a ver muy afectados por el *seeing*, es decir, si se escogiera un vídeo con más cuadros y el *seeing* de ese día fuera malo hay más probabilidad de que al final haya una mayor cantidad de cuadros de vídeo afectados por la turbulencia atmosférica que cuadros “buenos”.

Ahora, es importante mencionar que dependiendo del vídeo se tiene que adaptar la cámara, es decir, si queremos tomar un vídeo de una zona específica en el Sol (con zoom) se monta sólo la cámara en el telescopio pero, si se quiere tomar un vídeo del disco completo, entonces, hay que agregarle un reductor focal a la cámara (ver figura 3.12). Un reductor focal se utiliza para ajustar la distancia focal inherente del objetivo primario del telescopio, de manera que el campo de visión del mismo aumente. Es decir, se utiliza para reducir el *zoom* del telescopio.

Los reductores focales vienen en una gran variedad de factores de reducción que, típicamente van desde 0.33x hasta 0.8x (Hubbell, 2013), de hecho este valor es uno de los principales parámetros a considerar cuando se utiliza un reductor focal, el otro es la distancia focal. Por ejemplo si el telescopio tiene una distancia focal de 800mm y se utiliza con un reductor focal con un factor de reducción de 0.63x entonces, el telescopio tendrá una distancia focal efectiva de 504mm. El reductor utilizado en el presente trabajo tiene un factor de reducción de 0.5x es decir, reduce la distancia focal a la mitad (ver figura 3.13).



Figura 3.12: Imagen de la cámara SkyRis 445M y el reductor focal.



Figura 3.13: El reductor focal (con factor de reducción de 0.5x) utilizado para fotografías del disco completo.

3.1.4.1. Procesamiento de vídeo

Ya que se tienen todos los vídeos de ese día, se puede proceder a procesarlos. Para comprimir un vídeo en un sola fotografía se utiliza el software [Registax v6](#) el cual apila y comprime los cuadros (frames) del vídeo para obtener una sola fotografía, en este caso, del Sol.

Registax v6 es un software libre de procesamiento de imagen para astrofotógrafos “amateurs”. Su propósito es producir imágenes aumentadas de observaciones astronómicas mientras combina fotografías consecutivas de la misma escena, la cuales fueron tomadas durante un periodo corto de tiempo. El procesado depende de que el sujeto (por ejemplo: un planeta, el Sol, etc.) no cambie entre fotografías para que de esta manera cualquier diferencia entre las mismas pueda ser considerado como ruido o interferencia atmosférica.

El programa alinea y apila las imágenes de forma que al final del proceso se obtenga una sola fotografía del objeto, en este caso del Sol. El apilado de las imágenes puede hacerse de dos maneras:

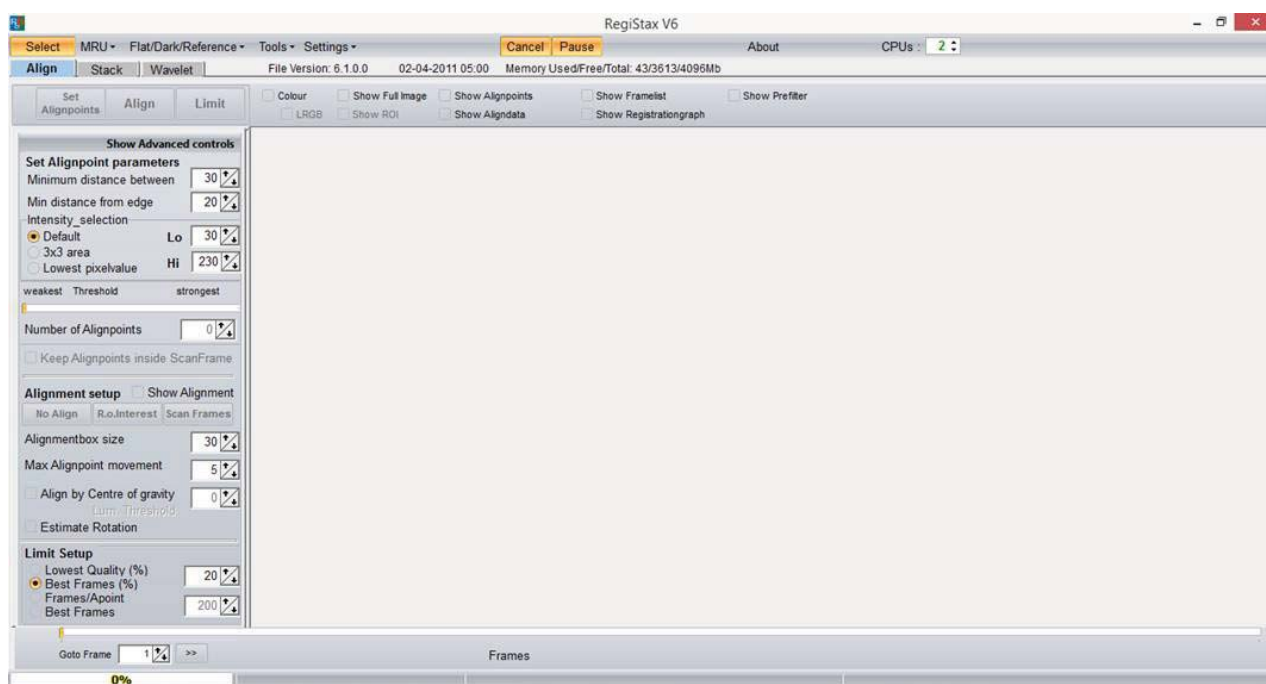


Figura 3.14: Interfaz gráfica del software [RegiStax v6](#).

mediante fotografías individuales consecutivas o en la forma de cuadros de vídeo de una cámara fijada en un objetivo. Para este trabajo se utiliza la segunda forma. A continuación se describirá el procedimiento para apilar y comprimir el vídeo.

En la interfaz del programa con el botón “Select” escogemos y abrimos el vídeo que queremos procesar (ver figura 3.15).

Una vez seleccionado el vídeo deberá aparecer la pantalla como se muestra en la figura 3.16 donde aparece la imagen del Sol llena de puntitos de color rojo, estos son los puntos de alineación que escoge automáticamente el programa para alinear todos los cuadros contenidos en el vídeo. Sin embargo, no todos esos puntos son “buenos”, es decir, muchos de esos puntos pueden resultar confusos para el software al momento de hacer la alineación a que, por ejemplo, pueden estar en píxeles iguales o posicionados en alguna mancha de polvo que tuviera el telescopio o la cámara. Todas estas cuestiones, si no se tiene cuidado, alteran el alineado y la imagen final puede quedar movida, por ejemplo.

Para asegurarnos que nuestros puntos van a propiciar un buen alineamiento recorreremos el control deslizante hacia la derecha que es donde se encuentra la marca de “Strongest” de tal manera que solo quede en la imagen el punto más fuerte (ver figura 3.17a), a partir de ahí podemos poner de manera manual los puntos que nosotros escojamos ya que, es mejor tener pocos puntos que sean “fuertes” o útiles a muchos puntos “débiles”. Para escoger los puntos se eligen regiones en la imagen donde haya una clara distinción entre una y otra, por ejemplo, en las regiones activas o en los filamentos, incluso el limbo solar funciona como punto de alineación (ver figura 3.17b)

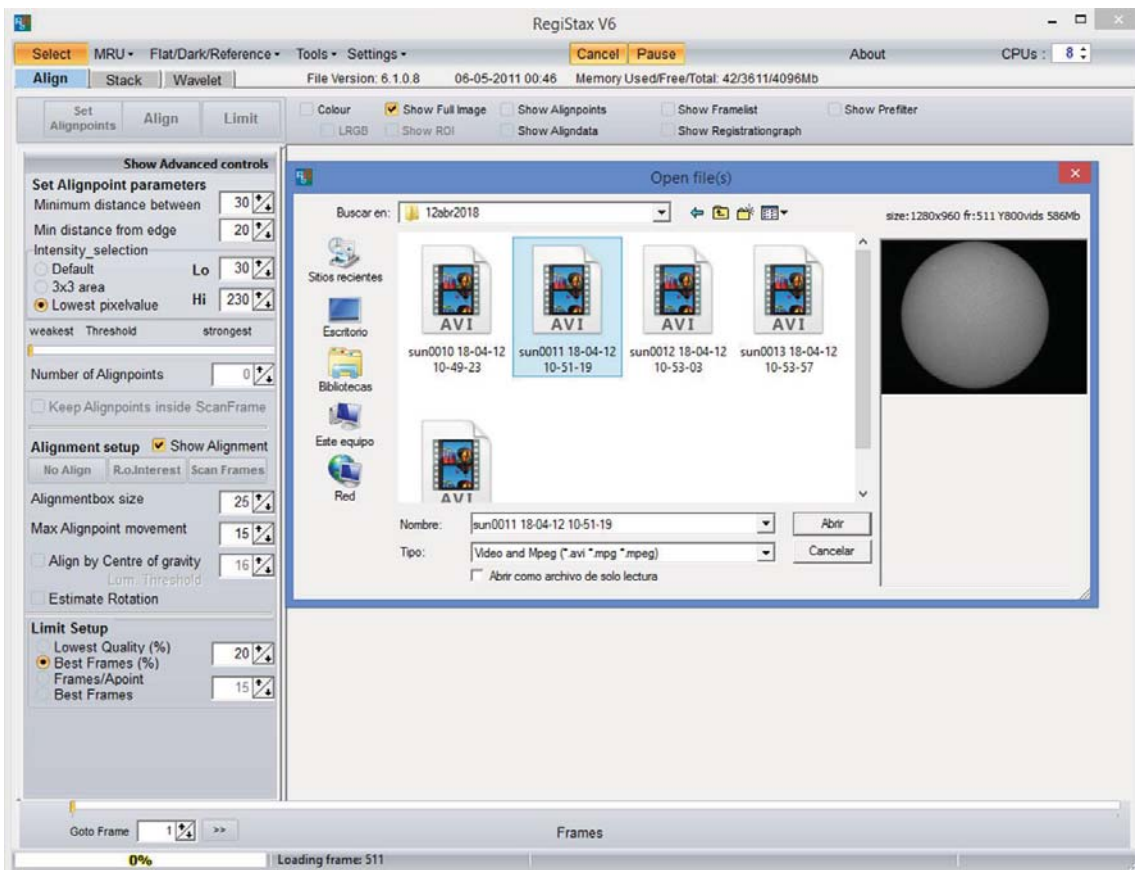


Figura 3.15: Proceso de selección del vídeo que se quiere procesar.

Lo anterior asegura, de cierta manera, que el software va a poder distinguir claramente los puntos escogidos lo que aseguraría una buena alineación de los cuadros del vídeo. Una vez que ya se tienen los puntos es posible seleccionar “Align” para que RegiStax pueda comenzar la alineación. En la figura 3.18 se puede observar como la barra inferior izquierda va cambiando de acuerdo va avanzado la alineación. El programa, para este caso, realiza el apilado de manera automática y pasa directamente a *Wavelets* lo que nos permite afinar las capas de la imagen.

Un wavelet es una función de “minionda”, es decir una función de onda con un periodo de oscilación corto ($A_i = A_f = 0$) o limitado tanto en tiempo como en frecuencia. La transformada de wavelet u ondeleta es un tipo de transformada matemática que representa una señal en términos de versiones trasladadas y dilatadas de una onda finita. Las transformadas de wavelets (TW) están dadas por la transformada wavelet continua (TWC) y la transformada wavelet discreta (TWD), ambas son herramientas que permiten el análisis de señales de manera similar a la transformada de Fourier, de hecho la transformada de Fourier es un caso particular de la de wavelets, con la diferencia que la TW lleva la serie de valores a la dimensión temporal y frecuencial en forma casi-simultánea, mientras que la Transformada de Fourier solo da una representación frecuencial de los valores (Addison, 2002).

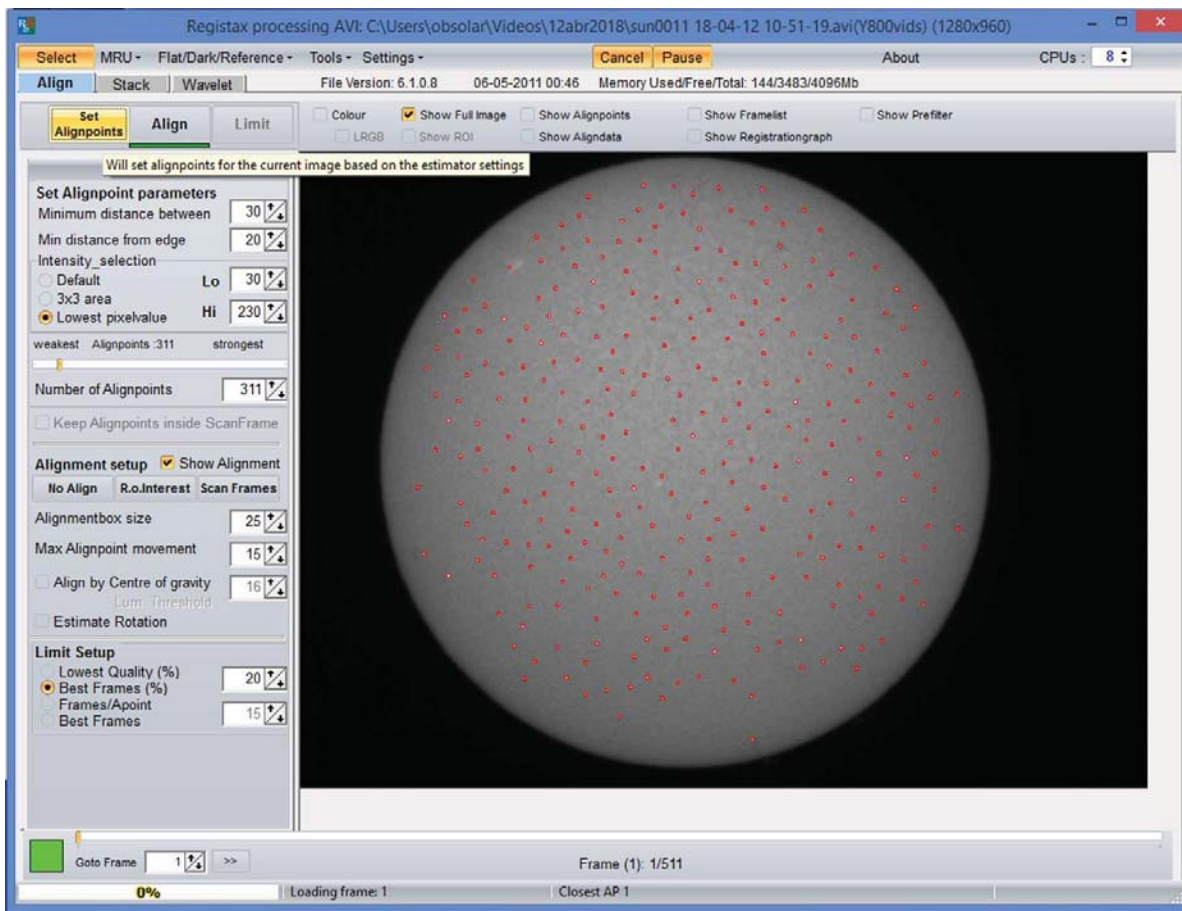
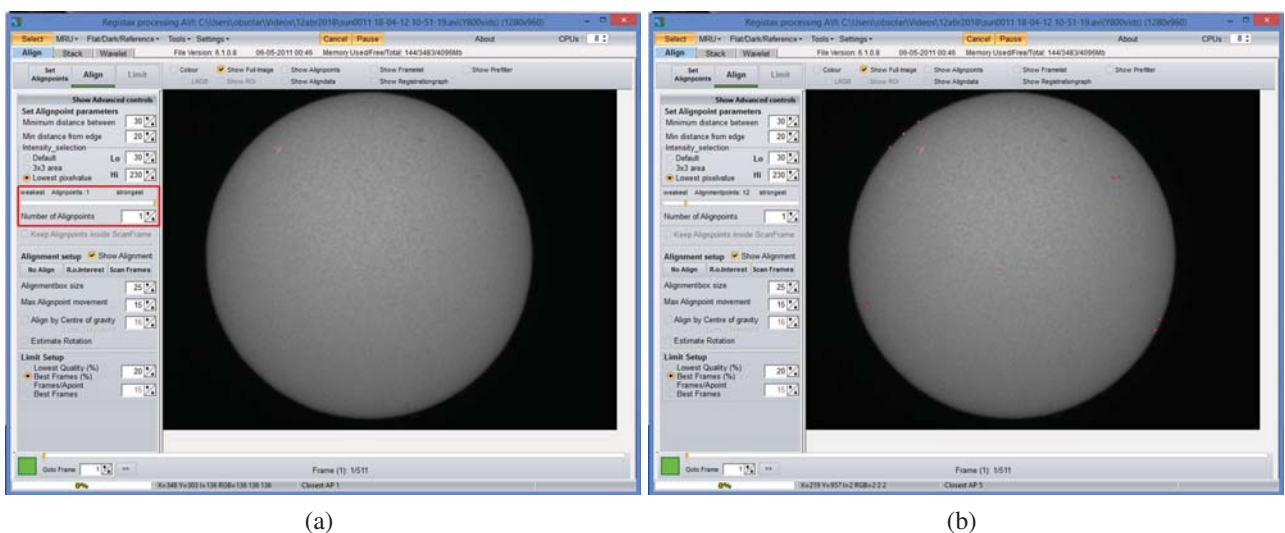


Figura 3.16: Así se debe ver la interfaz del software una vez que ya se escogió el vídeo para procesarlo.



(a)

(b)

Figura 3.17: a) Se puede observar cómo en la imagen del Sol solo queda un punto rojo. Este punto, de acuerdo con el software, es el más fuerte para la alineación. b) Selección de los puntos de alineación del vídeo.

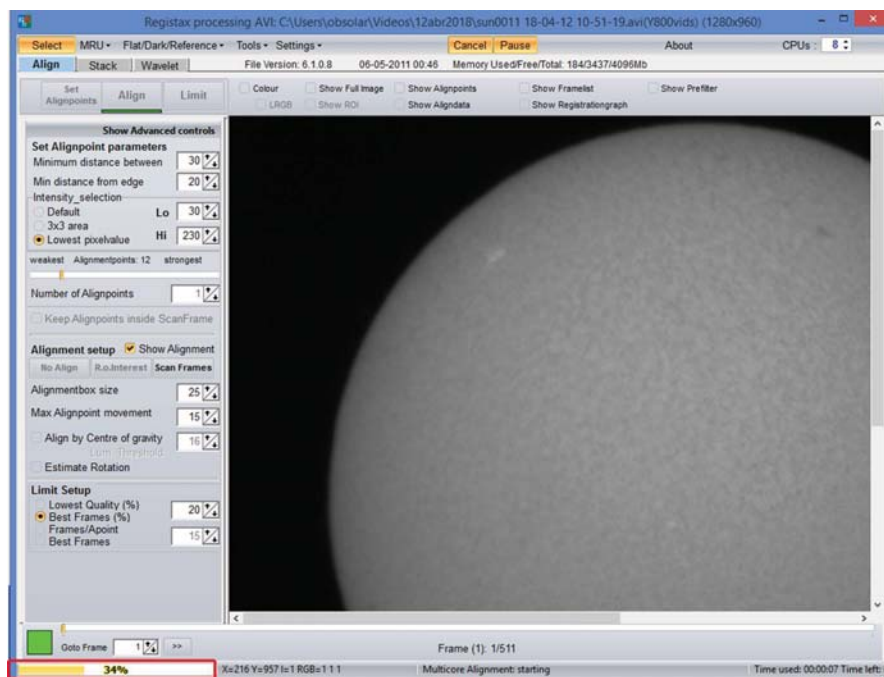


Figura 3.18: Proceso de alineación de todos los cuadros del vídeo según los puntos escogidos antes. Se puede ver como la barra inferior va cambiando según avanza la alineación.

Sus aplicaciones son muy variadas que van desde eliminar ruido, comprimir información, modular, filtrar, codificar, etc. La transformada de wavelet discreta se utiliza para la codificación de señales, mientras la continua se utiliza en el análisis de señales. Como consecuencia, la versión discreta de la transformada se utiliza fundamentalmente en ingeniería e informática, mientras que la continua se utiliza en varias ramas la física como: la dinámica molecular, la geofísica, la óptica, el estudio de las turbulencias y el análisis digital de imágenes, por ejemplo (Kaiser, 1994).

Como se puede ver en la figura 3.19 incluso antes de aplicar los wavelets la imagen ya se ve un poco más nítida que al inicio. En estas imágenes solo modificamos la capa 1 y 2, las cuales son el detalle fino de la fotografía.

Para modificar las capas antes mencionadas se puede ir cambiando cada capa hasta que la imagen quede como se desee. En este trabajo se utiliza el mismo esquema (Scheme) para todas las imágenes. Cada vez que se genera un esquema nuevo, es decir, cada vez que se modifican una o varias capas se puede guardar esa configuración para poder utilizarla en un futuro.

3.1.5. Procesamiento de la imagen

Una vez que se procesó el vídeo y se obtuvo una sola imagen se puede continuar con el procesamiento de imágenes en formato Portable Network Graphics (PNG).

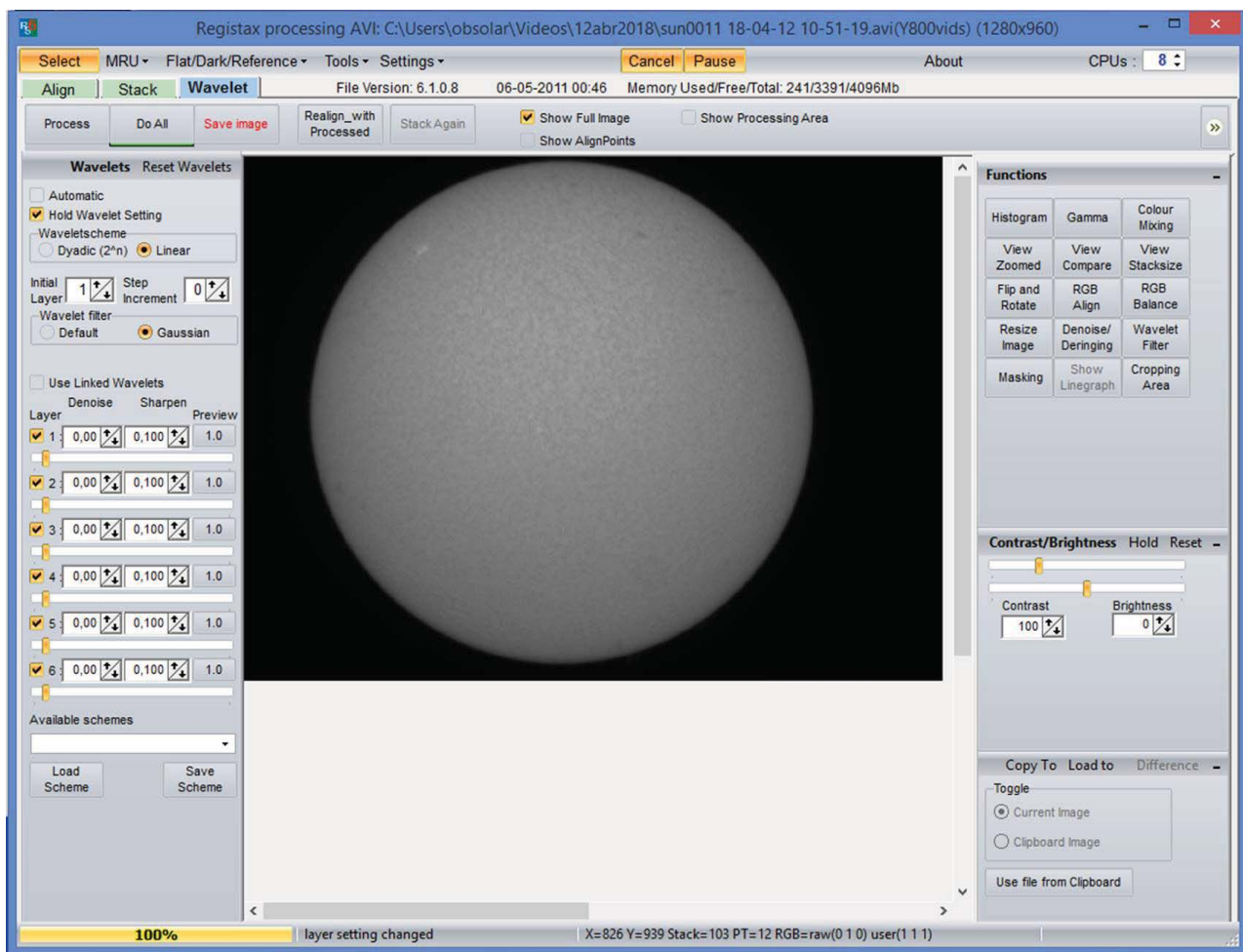


Figura 3.19: La imagen resultante de alineado y apilado de los cuadros del vídeo, antes de aplicar el proceso de wavelets.

Este proceso se realiza con el software Photoshop el cual permite limpiar de cierta manera algunas imperfecciones así como agregar detalles de color a la fotografía. Photoshop es un editor de gráficos rasterizados³ desarrollado por Adobe Systems Incorporated. Este software se usa principalmente para el retoque de fotografías y gráficos.

Para comenzar, en Photoshop se abre el logotipo del laboratorio Geoespacial (LACIGE) de la ENES Morelia el cual fue creado específicamente para el laboratorio. A continuación se selecciona la pestaña “Archivo” → “Abrir” para seleccionar la imagen .png que se acaba de generar con Registax. Ya que se tiene abierta la imagen hay algunas cosas que hay que revisar y corregir.

Muchas veces al finalizar el apilado de los cuadros de vídeo queda un reborde blanco en la fotografía o a veces, el borde de la imagen queda “borroso” (ver figura 3.20) el cual es necesario remover.

³Una imagen en mapa de bits, imagen ráster o imagen de píxeles, es una estructura o fichero de datos que representa una rejilla rectangular de píxeles o puntos de color, denominada matriz, que se puede visualizar en un monitor, papel u otro dispositivo de representación.

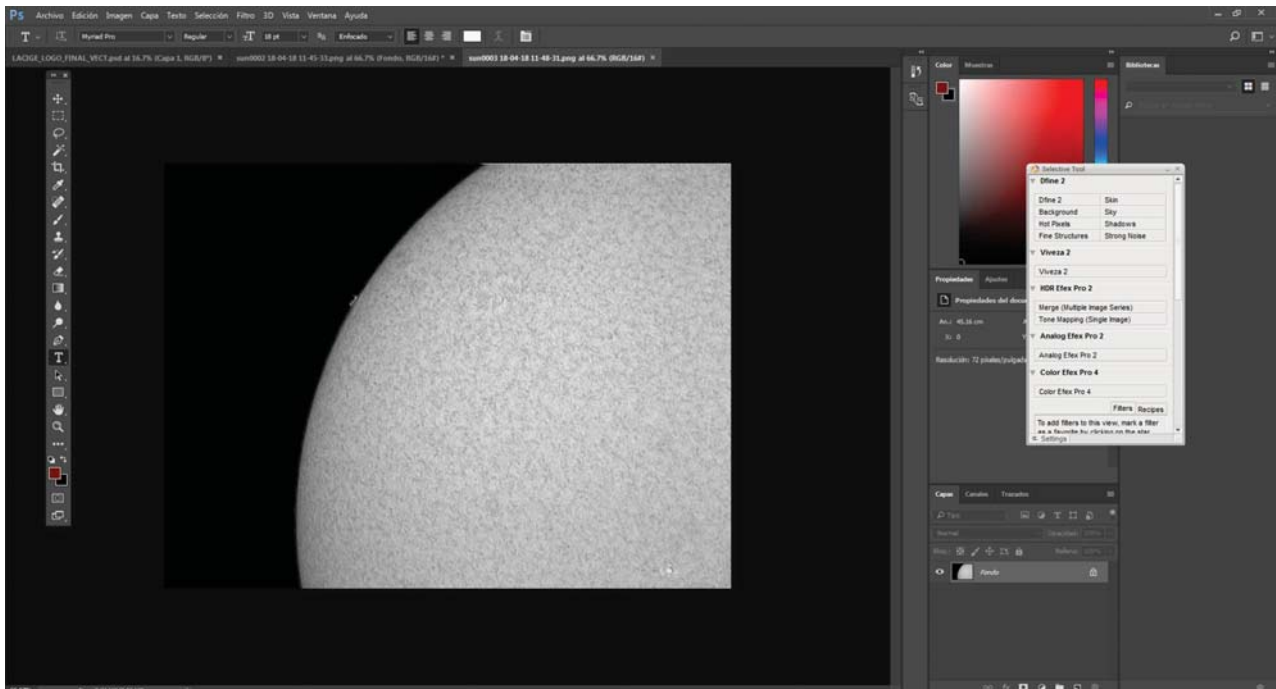


Figura 3.20: Se puede observar como en el borde de la imagen hay un pequeño reborde blanco que quedó del apilado del video.

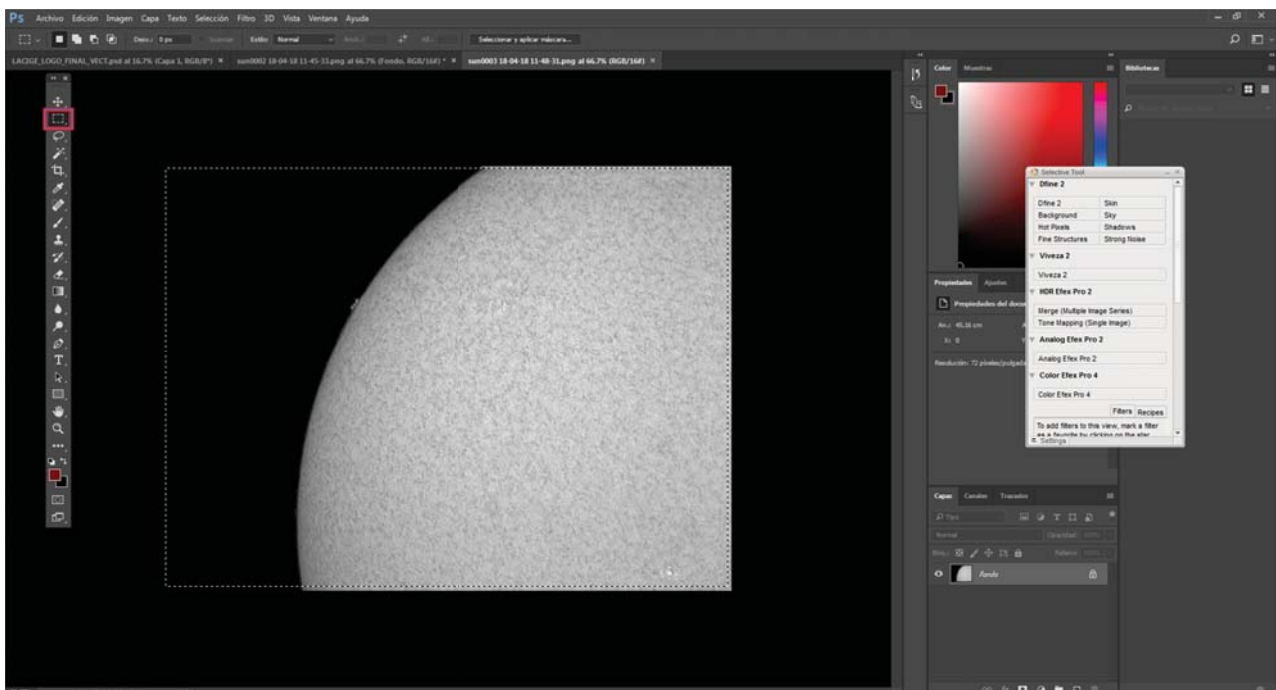


Figura 3.21: Proceso para remover el borde blanco de la imagen.

Para hacerlo, se escoge la herramienta de selección en la barra de herramientas que se encuentra a la izquierda de la pantalla y se dibuja un cuadro de la imagen que no incluya el reborde blanco o la sección borrosa (ver figura 3.21).

Una vez que se hizo lo anterior, se puede recortar la imagen para quitar el borde que queda fuera de la selección, para hacerlo se utiliza la herramienta de recorte presionando doble “enter” para cortar.

Es importante mencionar que normalmente este reborde solamente aparece en las imágenes que fueron tomadas sin el reductor focal, es decir, las imágenes en donde no se observa el disco completo. Sin embargo, nunca está de más revisar todas las imágenes y en caso de presentar estos bordes removerlos. Ahora, el método para procesar las imágenes a partir de aquí es prácticamente el mismo para todas, a menos que haya una excepción esta se explicará.

Una vez que se recortó la imagen (en caso de ser necesario) se revisa si la misma presenta algún tipo de mancha. Estas manchas son, en realidad, polvo que cae en el telescopio o en la cámara y se refleja en la imagen como círculos oscuros (ver figura 3.22). Para removerlos seleccionamos la herramienta “Pincel corrector puntual” en la barra de herramientas. Esta herramienta permite hacer clic sobre cierta área de la imagen (modificable) y limpiarla, es decir, remover la mancha. Es importante verificar que manchas si son manchas de polvo y cuales no dado que a veces es fácil confundirlas, para esto también es útil la imagen del día tomada del NSO GONG (figura 3.5).

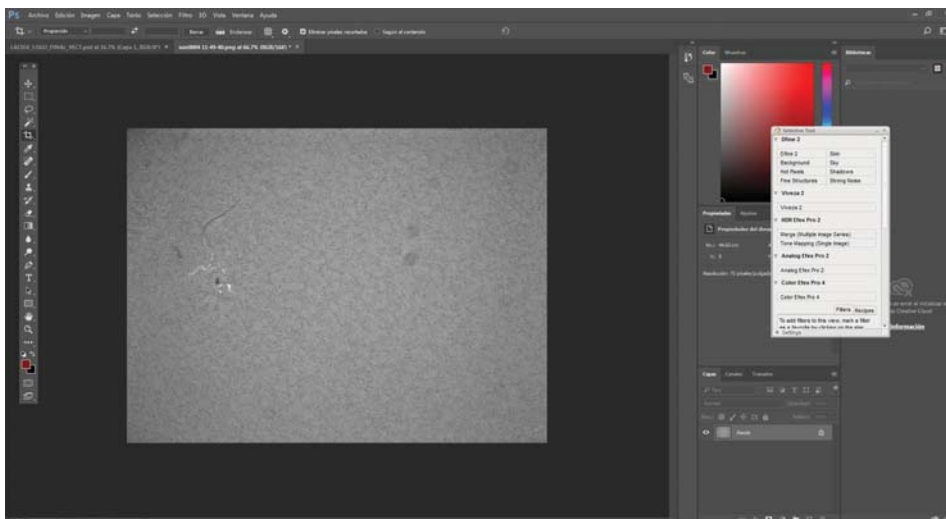


Figura 3.22: Pequeñas manchas de polvo en la imagen derivadas del polvo en la cámara y el telescopio.

Cuando se han removido las manchas se puede proceder a ajustar el brillo, el contraste, la saturación y la estructura de la imagen. En el lado derecho de la pantalla (en Photoshop) se encuentra un recuadro gris que dice “Selective tool” en la parte superior y que tiene varios comandos (ver figura 3.23), esta barra es una colección de herramientas de procesamiento de imágenes llamada **Nik Collection** (ver figura 3.23) que pertenece a Google y está disponible para instalar en Photoshop en Windows o en IOS (Mac). Estas herramientas actúan como filtros, o herramientas complementarias en la edición de las imágenes.

La suite de Nik Collection incluye:

- **Analog Efex Pro:** Permite emular los resultados conseguidos con cámaras y películas analógicas.
- **Color Efex Pro:** Se trata de un conjunto de filtros para corregir y retocar colores y conseguir efectos cromáticos sorprendentes.
- **Silver Efex Pro:** Es una de las herramientas más deseadas para el revelado en blanco y negro.
- **Viveza:** Trabaja de forma precisa el color y la tonalidad de las imágenes.
- **HDR Efex Pro:** Permite generar fotografías HDR.
- **Sharpener Pro:** Maneja con precisión el nivel de nitidez de las imágenes.
- **Dfine:** Reduce el nivel de ruido de las imágenes, sin perder definición.

Para la edición de las imágenes en este proyecto se usa, principalmente, Viveza que cuenta con sencillas barras de control (ver figura 3.24) que permiten ajustar rápidamente el brillo, el contraste, la saturación, las sombras, la gama de rojos, verdes y azules, el tono y la calidez de la imagen.

Siguiendo con el procesado de la imagen, en el panel de herramientas de Nik Collection seleccionamos Viveza 2, lo que abre una ventana como la siguiente la de la figura 3.24. En esta ventana, como se mencionó anteriormente, se puede modificar la luminosidad o tonalidad de la imagen según se necesite. Este es un proceso un tanto subjetivo que depende del contraste y el tipo de objetos que se quieran resaltar en la imagen.

En las imágenes utilizadas en este trabajo, usualmente se baja el brillo de modo que no haya zonas especialmente brillantes en la imagen (a menos que se trate de una región activa), esto es importante a la hora de agregar color. Hay algunos casos donde es necesario subir el brillo, ya que en algunas ocasiones el vídeo se toma con una menor saturación (menos brillo) con el propósito de aumentar el brillo durante el procesado en Photoshop para destacar estructuras que son mucho más difusas (en comparación al disco) como las prominencias en el limbo solar; se aumenta o disminuye un poco el contraste, este el el parámetro que más varía y depende mucho de la imagen que se trabaja; y se aumenta muy poco la estructura de modo que haya definición en las estructuras solares, sin embargo, hay que cuidar no aumentarla demasiado ya que entre más aumentemos la estructura más pixelada se ve la imagen.

La figura 3.26a muestra la imagen que obtenemos al terminar el procesado del vídeo en Registax, se puede observa como se ve un tanto borrosa y sin mucha definición, mientras que la figura 3.26b muestra la imagen una vez que ya se realizó el ajuste de tonalidades (brillo, contraste y estructura) y se puede observar como ya se observan estructuras así como también desapareció la región brillante del centro, además la mancha solar aparece mucho más definida que en la imagen inicial. Ya que se realizó este ajuste, se procede a afinar ciertos detalles para que la imagen final pueda ser utilizada ya sea para divulgación o como apoyo a la investigación.

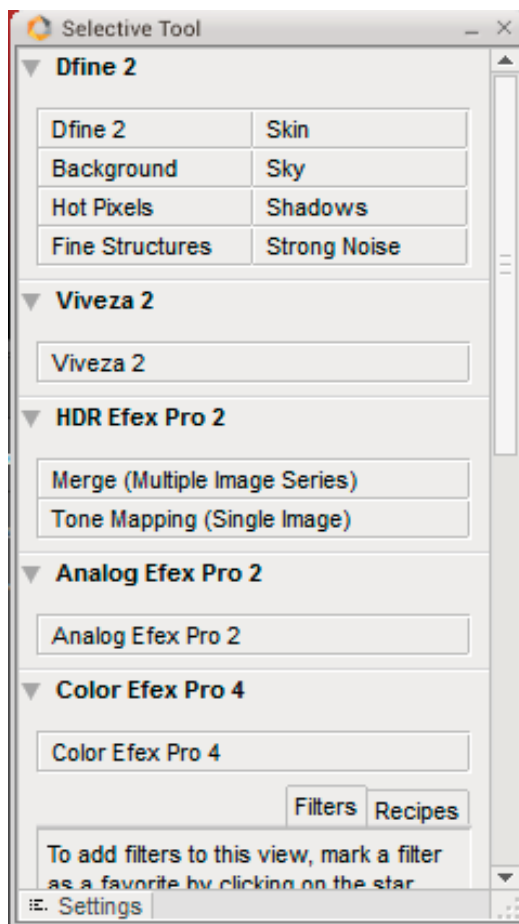


Figura 3.23: Suite de herramienta Nik Collection.

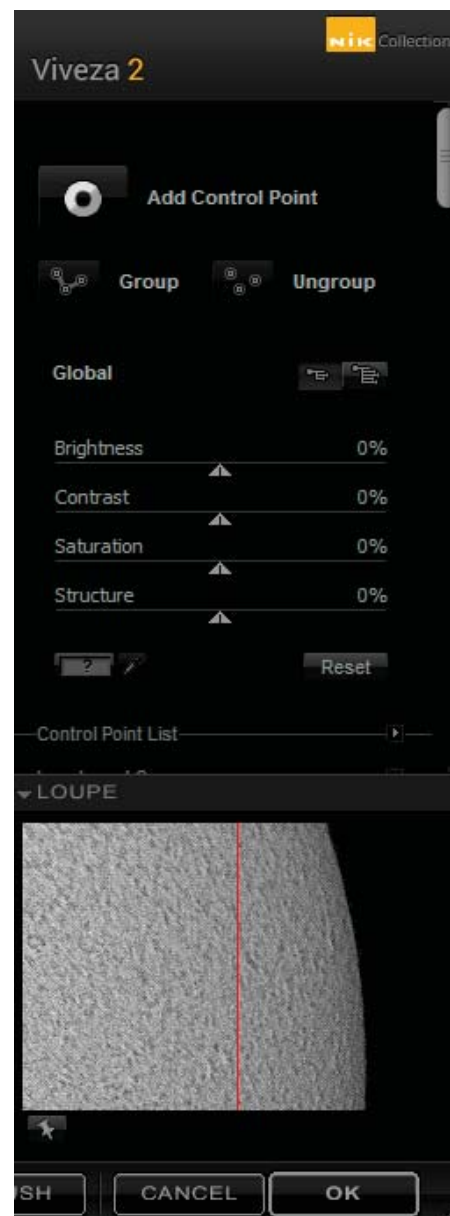


Figura 3.24: Set de controles de la herramienta Viveza 2.

Lo primero es, en caso de que hubiera una o más regiones activas, como en el caso de la figura 3.26, nombrarla según la nomenclatura de la NOAA, la cual puede ser verificada en la imagen obtenida de [Space Weather](#), como se menciona al inicio de este capítulo. Hay algunas ocasiones donde la región activa no está nombrada ya sea por que es muy pequeña o se está esperando para ver su evolución, en ese caso se nombra la imagen hasta que haya certeza por parte de la comunidad internacional en un nombre.

Lo que sigue es agregar el logotipo del laboratorio, simplemente copiamos y pegamos el que se abrió cuando se inició a Photoshop. Cuando se inserta el logo en la imagen, este es muy grande así que ajustamos su tamaño para que quede acorde. El tamaño aquí utilizado es de ~5cm. También, añadimos

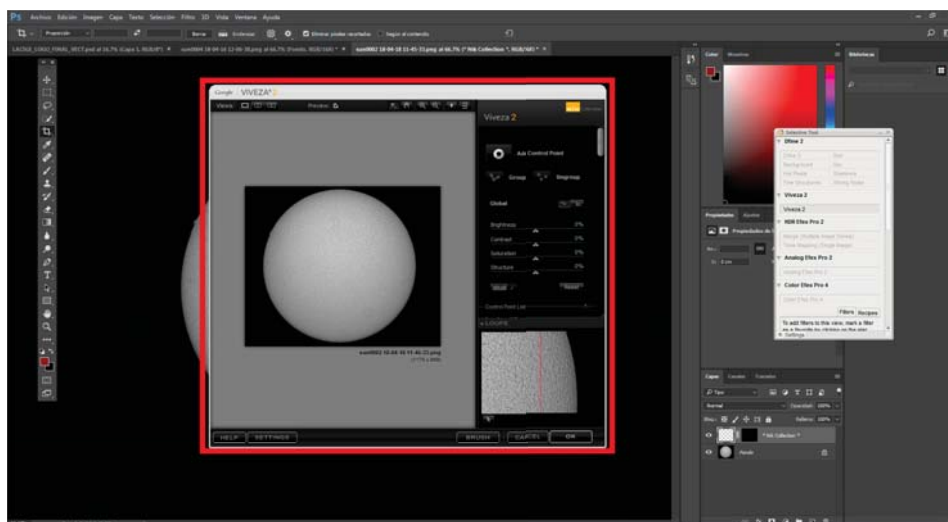


Figura 3.25: Ventana de trabajo para el ajuste de tonalidad de la imagen proporcionado por la herramienta Viveza 2.

el tipo de imagen que es: $H-\alpha$ (6562.8 Å); y la hora a la que fue capturada, este dato se pone en tiempo universal (UT) que, dependiendo de la fecha del año, son +5 o +6 hrs según el horario de verano o invierno (ver figura 3.27).

Ya que se realizó esta última parte, se puede exportar la imagen. Para hacerlo vamos a la pestaña “archivo” → “Exportar” → “Exportación rápida como png”. La imagen que se acaba de guardar está en blanco y negro.

Para agregar color a la imagen lo que se hace es ir a la pestaña “Imagen” → “Ajustes” → “Equilibrio de color”, lo que abre una pequeña ventana desde donde se puede controlar las tonalidades de color que la imagen tendrá.

En la paleta mostrada en la figura 3.29b podemos ajustar los medios tonos, la iluminación y el sombreado de la imagen. De nuevo, este paso es algo subjetivo ya que depende mucho de la persona que está realizando la edición de color.

Para las imágenes en este trabajo la configuración de color va de la siguiente manera: +84, -84 para los medios tonos, esto le da la tonalidad rojiza a la base de la imagen; +10, -10 para las sombras; y +23, -23 para las iluminaciones, esta parte funciona para terminar de darle a la imagen un tono más rojo o más amarillo, dependiendo de quién esté realizando este proceso. Ahora, ya se puede exportar la imagen a color, para hacerlo repetimos los mismos pasos de cuando se exportó la imagen en blanco y negro.

Estas imágenes ya están listas para ser utilizadas como apoyo en investigación o para fines de divulgación científica como pósters, presentaciones orales, etc. sin embargo, la imagen en sí misma no provee de información alguna como el tamaño de las manchas solares, por ejemplo.

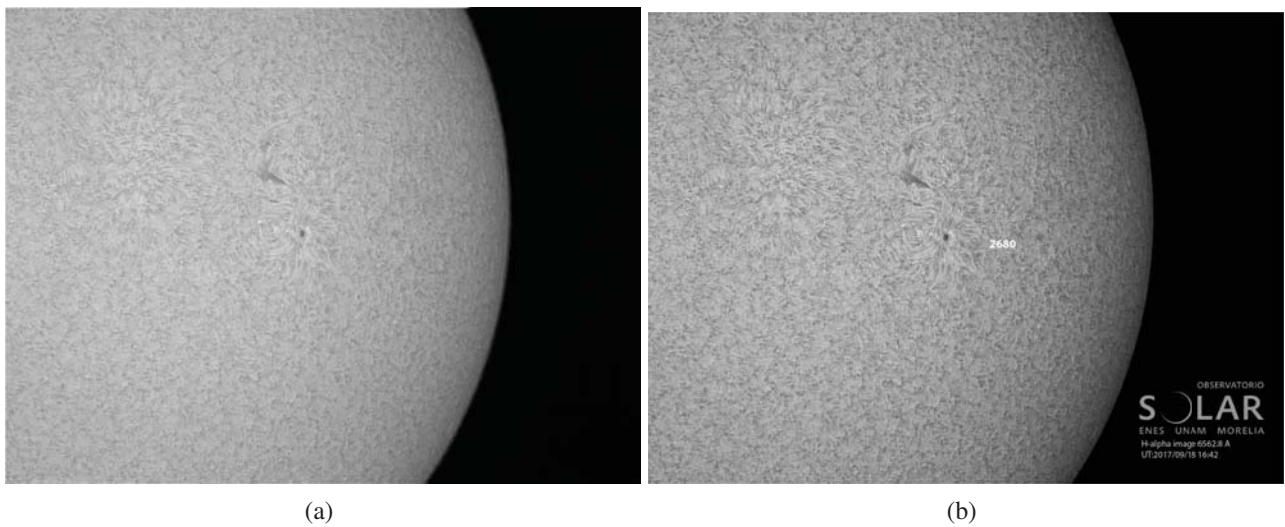


Figura 3.26: Comparación entre la imagen inicial (a) y la imagen al final (b) del ajuste de tonalidad realizado con la herramienta Viveza 2 en Photoshop.

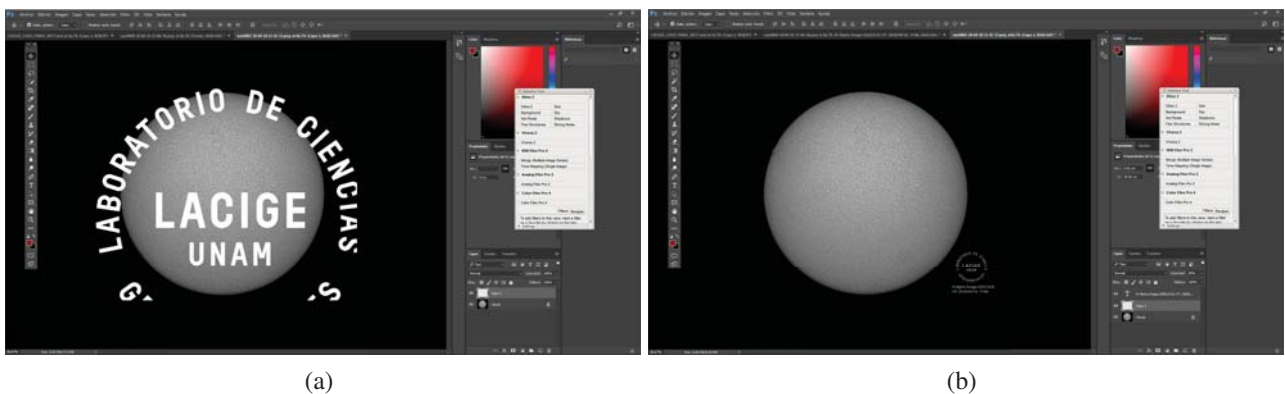


Figura 3.27: Agregado del logotipo del LACIGE a la imagen. a) Cuando se inserta el logotipo este es muy grande y cubre toda la imagen. b) Una vez reducido el tamaño del logotipo se puede posicionar en cualquier parte de la imagen según se desee.

Para poder obtener esta información se utiliza el archivo Flexible Image Transport System (FITS) generado con Registax.

3.1.6. Imágenes FITS

Los archivos FITS son a menudo utilizado para almacenar también datos que no son imágenes, como espectros electromagnéticos, listas de fotones, por ejemplo. Un archivo FITS podría contener varias extensiones, y cada una de ellas podría contener datos de un objeto. Por ejemplo, es posible almacenar imágenes de rayos X y también imágenes pertenecientes al infrarrojo en el mismo archivo FITS.

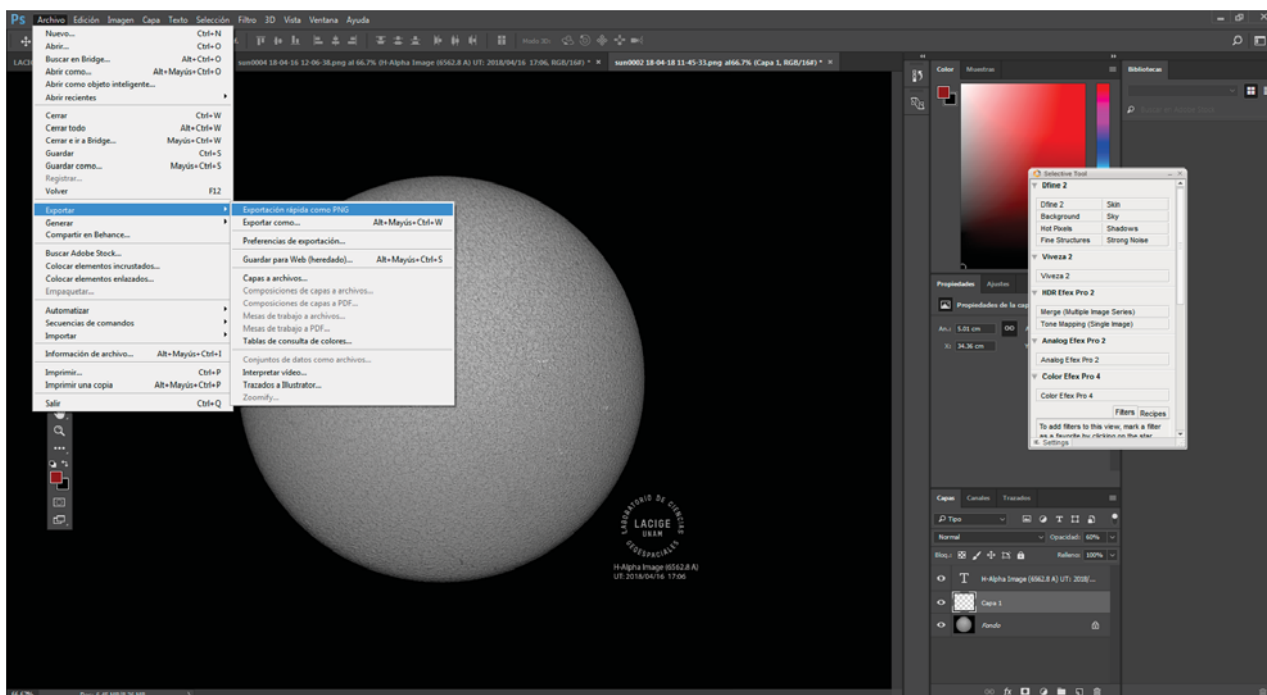
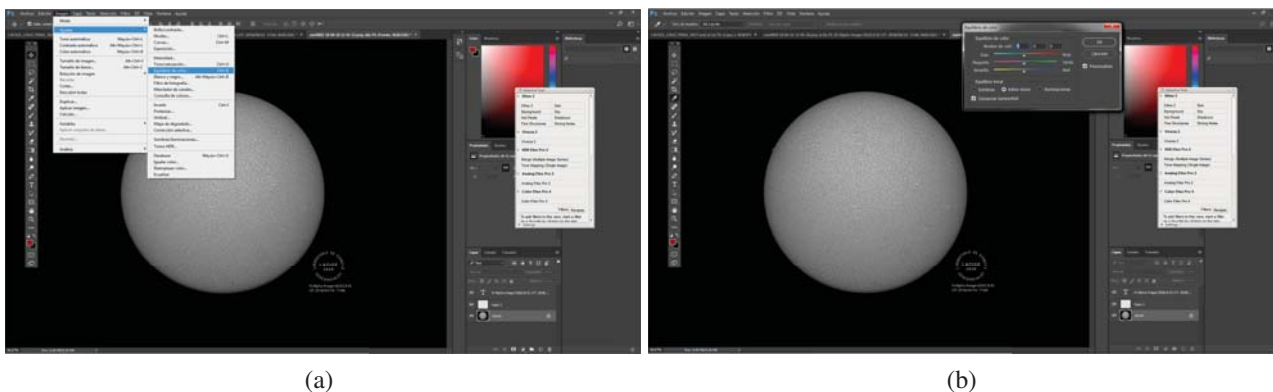


Figura 3.28: Exportación de la imagen como .png para ser utilizada después.



(a)

(b)

Figura 3.29: Para dar color a la imagen: a) Selección de la pestaña equilibrio de color. b) La pestaña para el ajuste de tonalidades en la imagen.

La mayor ventaja de los FITS para datos científicos es que la información de las cabeceras (header) es legible en ASCII, de modo que el usuario puede examinar las cabeceras para investigar sobre un archivo de procedencia desconocida. Cada archivo FITS consiste de una o más cabeceras que contienen secuencias de 80 cadenas de caracteres fijos que llevan pares de valores, interpolados entre los bloques de datos. Los pares de valores proveen información como son el tamaño, origen, formato binario de los datos, comentarios, historia de los datos y cualquier otra información que el creador desee, mientras varias palabras están restringidas para FITS, el estándar permite el uso de todas las palabras.

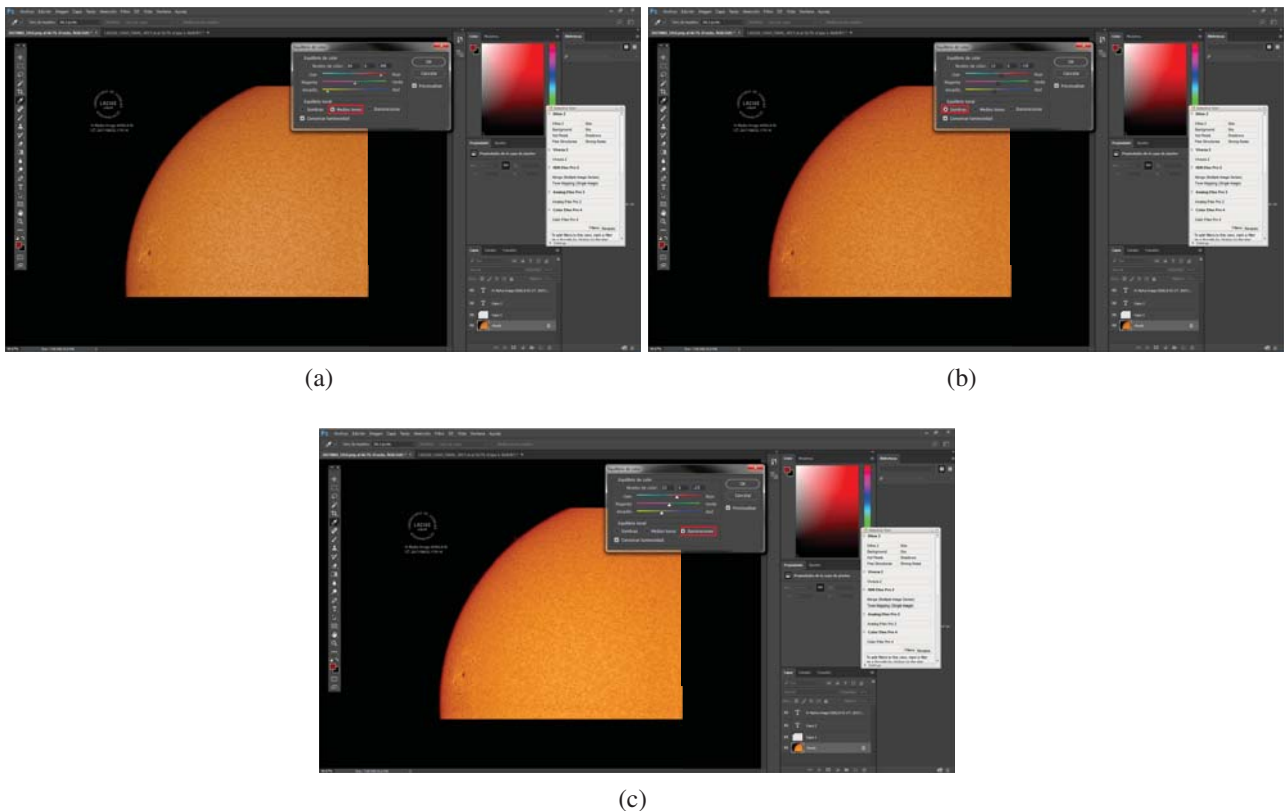


Figura 3.30: Las diferentes ajustes a realizar para agregar color a la imagen. a) Medios tonos. b) Sombras. c) Iluminaciones.

El FITS que se generó al procesar el vídeo con RegiStax v6 puede contener errores en el encabezado o en los caracteres de mismo, para corregirlo se utilizó el programa Fv diseñado para manipular y analizar archivos de datos FITS y que se puede descargar de la página web [HEASARC](#) (High Energy Astrophysics Science Archive Research Center) de la NASA.

Para corregir las imágenes FITS de manera más eficiente se utiliza un programa realizado como parte de este proyecto en código Python con la finalidad de resolver los problemas de encabezados de los archivos. El programa ejecuta el software Fv en todos los FITS que haya en una carpeta para corregirlos y sobre-escribirlos, es decir, corrige el archivo, borra el FITS que tenía el error y salva el nuevo archivo corregido, además, el programa agrega algunos datos al encabezado de la imagen. El script de este código puede revisarse en el Apéndice A de este trabajo.

Una vez que se corre el código y los archivos ya no tienen error se puede comenzar a analizar las imágenes para obtener los parámetros físicos de las estructuras solares (longitud de un filamento, diámetro de una mancha, etc.).

Para realizar lo anterior se utiliza el software [SaoImage DS9](#) cuyo manual de usuario puede ser consultado [aquí](#).

Ya que se tiene abierta la interfaz del software se puede seleccionar el archivo FITS que se quiere ver. Solo hay que ir a la pestaña “File” → “Open” y seleccionar el archivo (ver figura 3.32).

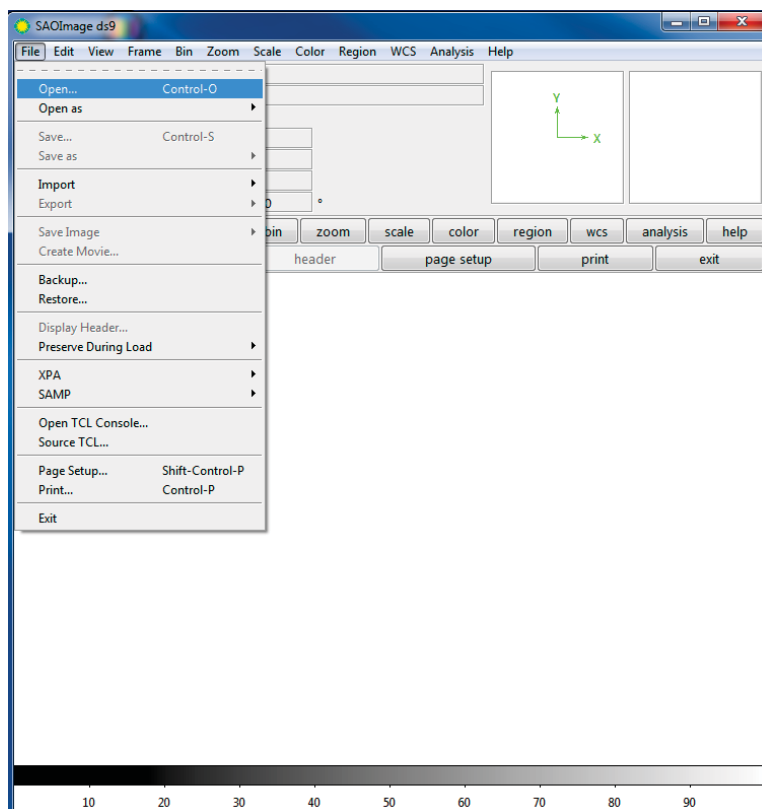


Figura 3.32: Proceso para selección del archivo que se va a abrir.

Una vez que se seleccionó el archivo y se puede observar la imagen en el panel inferior de la interfaz, está la opción de visualizar el encabezado que ya está corregido.

En la figura 3.33b se puede ver que hay información sobre el telescopio y la cámara con los que se obtuvo la imagen, la escala de placa del telescopio, la fecha y hora en la que se realizó la observación, la longitud de onda de la observación, etc.

Ahora, el principal motivo para el análisis de las imágenes es el poder obtener datos de las estructuras solares (en este caso datos físicos como longitudes) de modo que las fotografías ya sea que se utilicen para investigación o para divulgación provean de ciertos datos que ayuden a dimensionar las escalas con las que se trabaja.

Antes que nada es necesario poder encontrar una referencia para saber que nuestras medidas son correctas. Para esto es importante contar con dos datos: uno que sea muy bien conocido, como el radio del Sol (6.9×10^5 km); y otro del que se pueda estar prácticamente seguro que es correcto, como la escala de placa del telescopio.

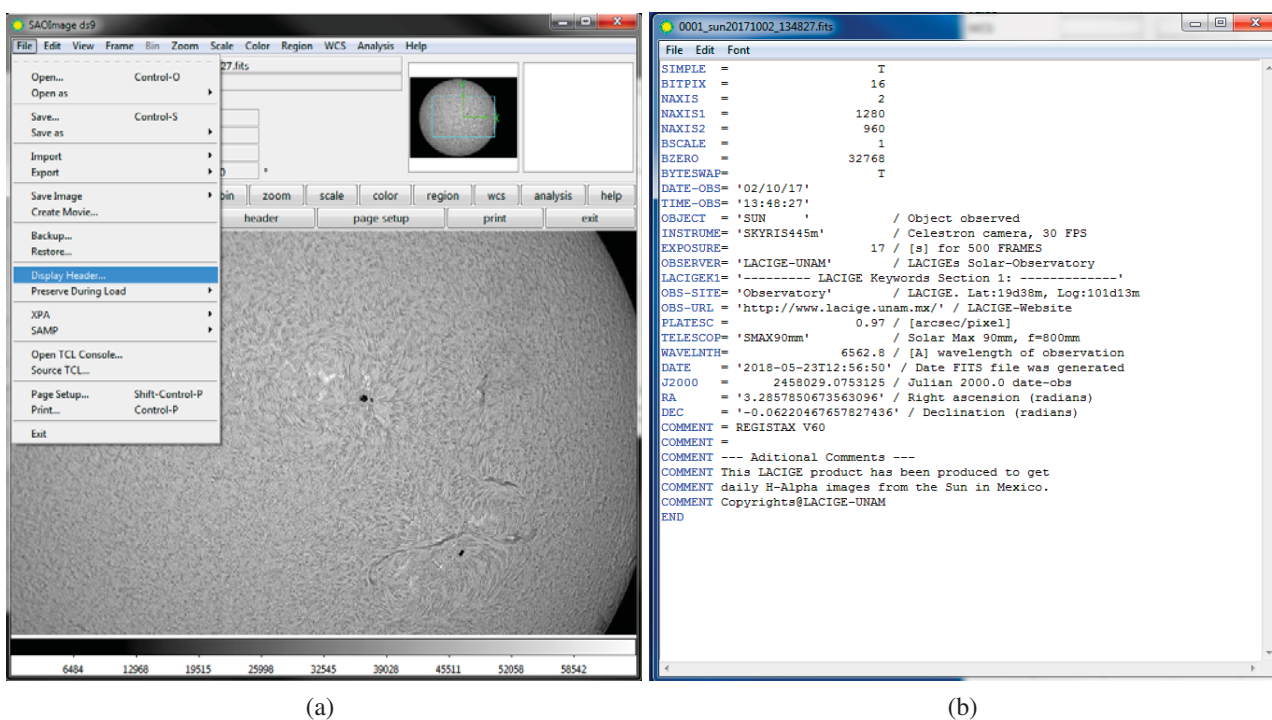


Figura 3.33: Visualización del encabezado o header de la imagen. a) Selección para abrirlo. b) El header con información sobre la imagen.

Para saber si la escala de placa es correcta y poder utilizarla como dato para el cálculo de estructuras solares lo que se hace es cargar en el software SaoImage una imagen del disco solar completo. Como se mencionó en el 2, cuando se obtienen imágenes del disco completo se utiliza un reductor focal con lo que se reduce la distancia focal del telescopio y aumenta la escala de placa. Para este tipo de imágenes, de acuerdo al cálculo realizado en el capítulo 2 la escala de placa es: $s = 1.94''/pixel$.

Ya que se tiene la imagen desplegada en la interfaz del software se puede comenzar a hacer la medición. Lo primero es escoger una región para “dibujarla” sobre la imagen. Esta región puede ser un círculo con el que se delimite la circunferencia del Sol, así como una regla para obtener el número que píxeles del diámetro del Sol en la imagen (ver figura 3.34). Se pueden colocar varias regiones al mismo tiempo de modo que la imagen quede como se observa en la figura 3.35, y es posible obtener información sobre las regiones colocadas, por ejemplo el radio del círculo y la longitud de la regla (ver figuras 3.36a y 3.36b).

Como se puede ver en la figura 3.36 el radio del círculo corresponde a 462 píxeles, mientras que la longitud de la regla es de 924 píxeles y si se divide es número a la mitad $924/2 = 462$, de modo que las medidas corresponden entre sí.

Ya que se hizo lo anterior se puede proceder a verificar si la escala de placa del telescopio es correcta de modo que pueda ser utilizada para medir estructuras solares.

Se tiene que:

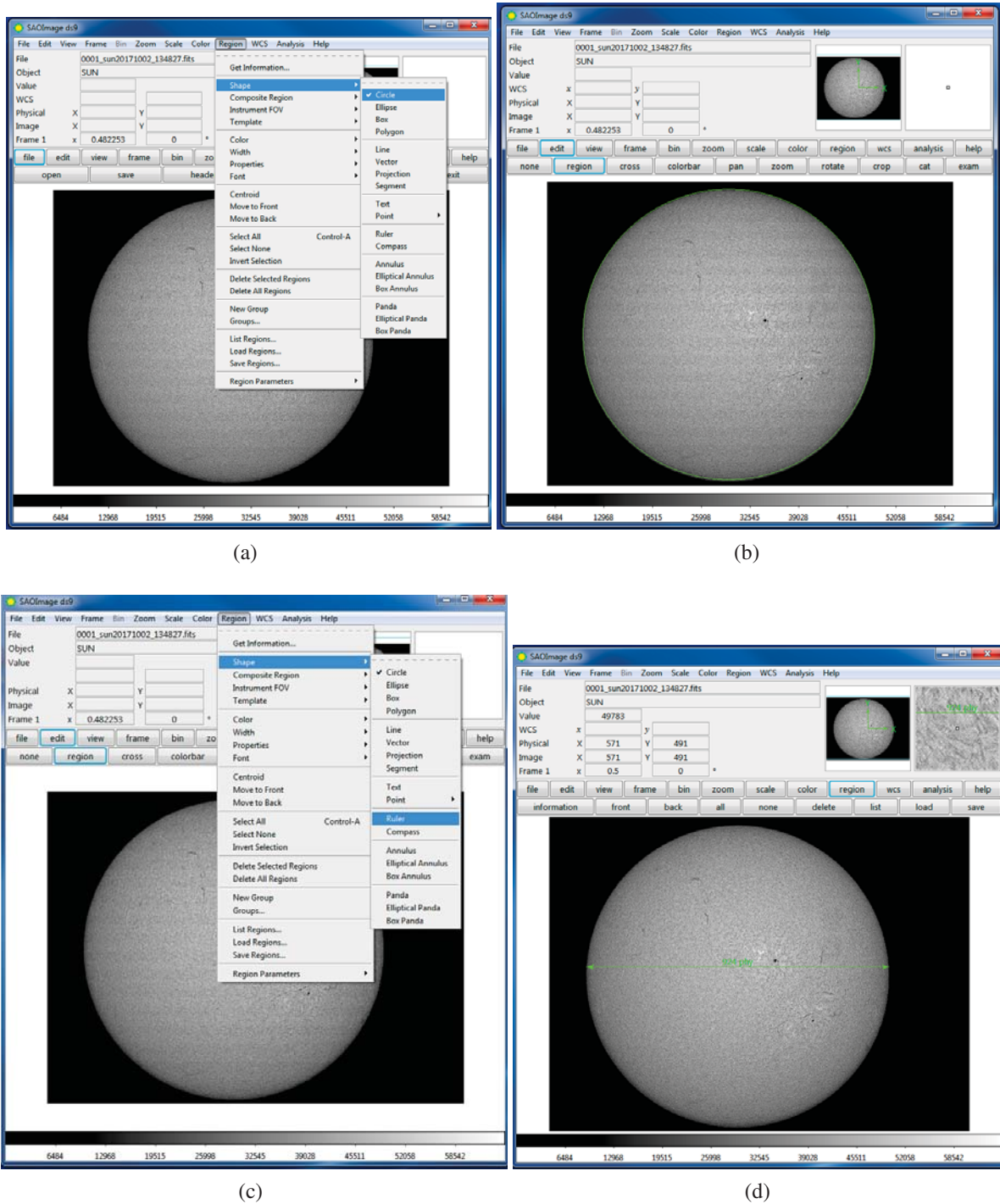


Figura 3.34: Selección de las regiones a dibujar sobre la imagen: a) Selección de la región “circle”. b) Un círculo dibujado (verde) sobre el disco solar. Se puede cambiar el tamaño y posición de la figura. c) Selección de la región “ruler” (regla). d) La regla dibujada (verde) a lo largo del diámetro solar.

- $R_{\odot} = 462$ píxeles.
- $s = 1.94''/\text{píxel}$.

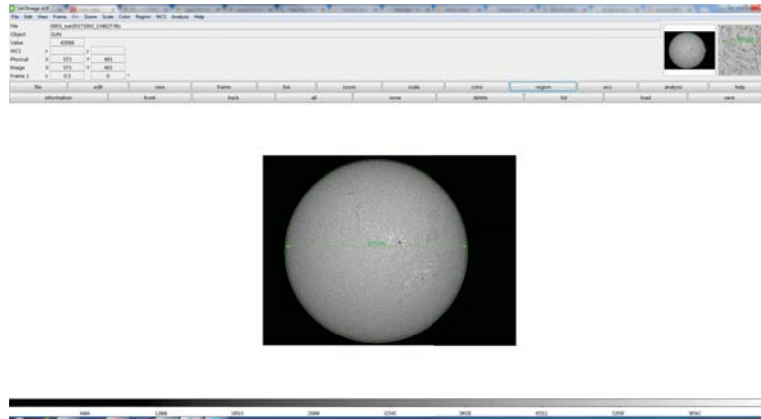


Figura 3.35: Las dos regiones (círculo y regla) colocadas al mismo tiempo sobre la imagen.

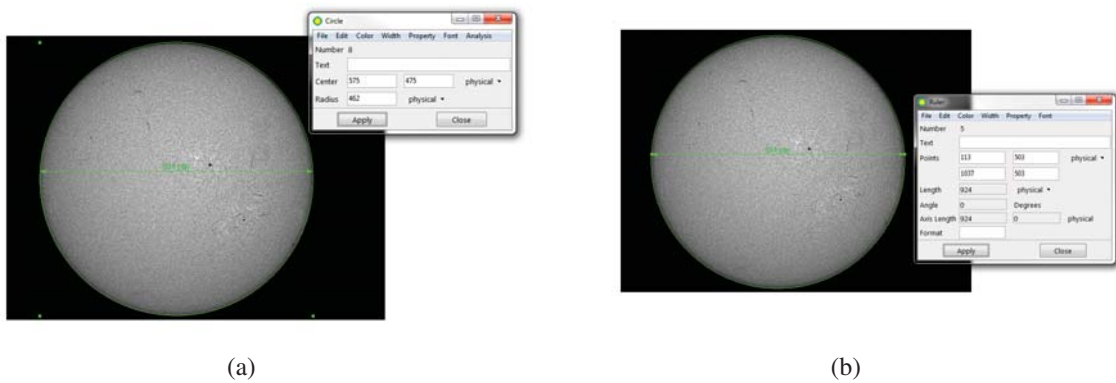


Figura 3.36: Información provista por el programa sobre las regiones dibujadas sobre la imagen. a) Información del círculo. b) Información de la regla.

Si se multiplican las cantidades anteriores se obtendrá el radio solar (de la fotografía) en arco segundos:

$$R_{\odot} ["] = (s)(R_{\odot}) = 462 \text{ pixels} \cdot 1.94'' / \text{pixel} = 896.28'' \tag{3.1}$$

Y se conoce que el radio del Sol (real) es de 6.9×10^5 km y es equivalente a 15' (minutos de arco). Entonces, si se divide la medida del radio obtenida en arco segundos entre 60 para convertirla a minutos de arco se obtiene que:

$$896.28'' \cdot \frac{1'}{60''} = 14.93' \tag{3.2}$$

Este resultado es muy cercano al que se esperaba de 15' de modo que se puede decir que el cálculo de la escala de placa es correcto y puede utilizarse para mediciones posteriores.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, no todas las imágenes fueron tomadas con la misma distancia focal, es decir, la escala de placa de ciertas imágenes, específicamente aquellas tomadas SIN el reductor focal, cambia. Según el cálculo del capítulo dos la escala de placa de dichas imágenes es $s=0.97$

”/píxel. Pero ¿cómo saber si ese número es correcto? Para eso se realizan dos mediciones de la misma estructura en las diferentes imágenes y se comparan los resultados, los cuales deberían ser muy parecidos.

Por ejemplo, en la imagen del disco completo que ya se tiene abierta en SaoImage se pueden observar dos manchas solares. Se puede medir la distancia entre ellas para después volver a realizar la misma medición en otra imagen obtenida sin el reductor focal.

Siguiendo los pasos ya mencionados se selecciona la región regla y se dibuja de una mancha a otra.

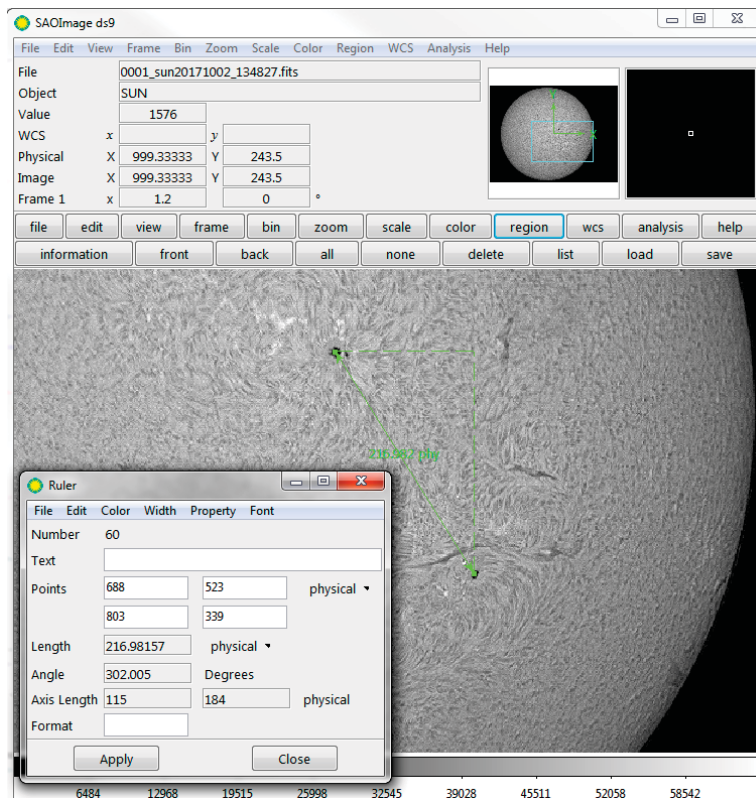


Figura 3.37: Medición de la distancia entre las dos manchas solares de la imagen.

Como se puede ver en el panel de información la longitud de la regla es de 216.98 píxeles. Se vuelve a repetir el cálculo de la ecuación 3.1, y se tiene que la distancia entre las estructuras ($D_{manchas}$) es de:

$$D_{manchas}[""] = (s)(R_{\odot}) = 216.98 \text{ píxeles} \cdot 1.94''/\text{píxel} = 420.9'' \quad (3.3)$$

Ese número se convierte a minutos de arco:

$$420.9'' \cdot \frac{1'}{60''} = 7.01' \quad (3.4)$$

Ahora, se abre en el software una imagen del mismo día, pero obtenida sin reductor focal cuya escala de placa es $s=0.97''/\text{píxel}$. Se escoge la regla y se vuelve a dibujar de una mancha a otra.

El panel información indica que la distancia entre las dos manchas es de 457.09 píxeles y se repiten los pasos que ya conocemos, introduciendo la escala de placa de $0.97''/\text{píxel}$ y se tiene que:

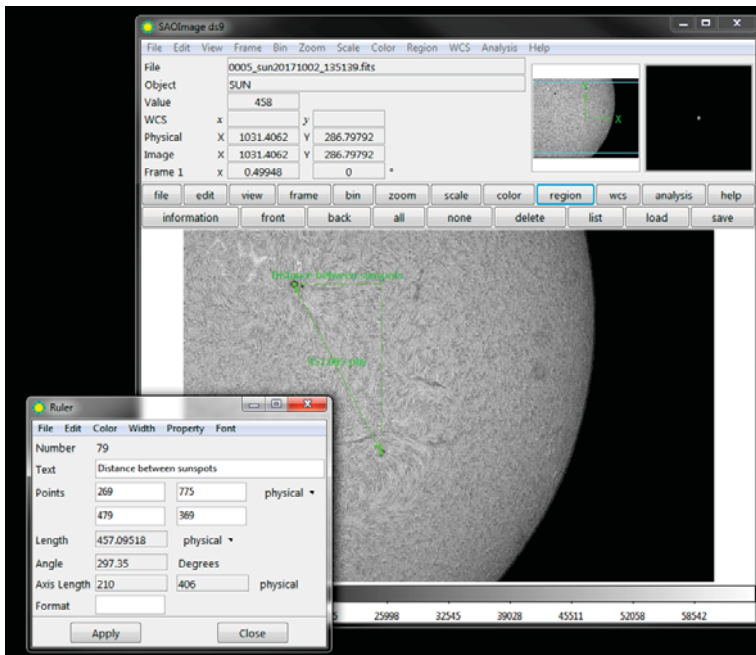


Figura 3.38: Medición de la distancia entre las dos manchas solares de la imagen tomada sin el reductor focal.

$$D_{manchas} ["] = (s)(R_{\odot}) = 457.09 \text{ pixels} \cdot 0.97''/\text{pixel} = 443.3'' . \quad (3.5)$$

$$443.3'' \cdot \frac{1'}{60''} = 7.3' . \quad (3.6)$$

Se puede notar que hay una ligera diferencia entre una medida y otra, esto puede darse ya que cuando se trabaja con imágenes los límites y bordes de las estructuras no son claros de modo que es fácil dibujar la regla una cierta cantidad de píxeles más hacia abajo o hacia arriba o ponerla más hacia un lado o hacia el otro. Lo mismo sucede con la medida del radio solar (ecuación 3.2), como no hay un límite claro del limbo solar no hay un borde específico para comenzar a medir y por eso no se obtienen los 15 minutos de arco exactos.

En la figura 3.39 se pueden ver, de manera general y a manera de resumen, los pasos a seguir para realizar todo el proceso desde la obtención del vídeo hasta el procesamiento de las imágenes.

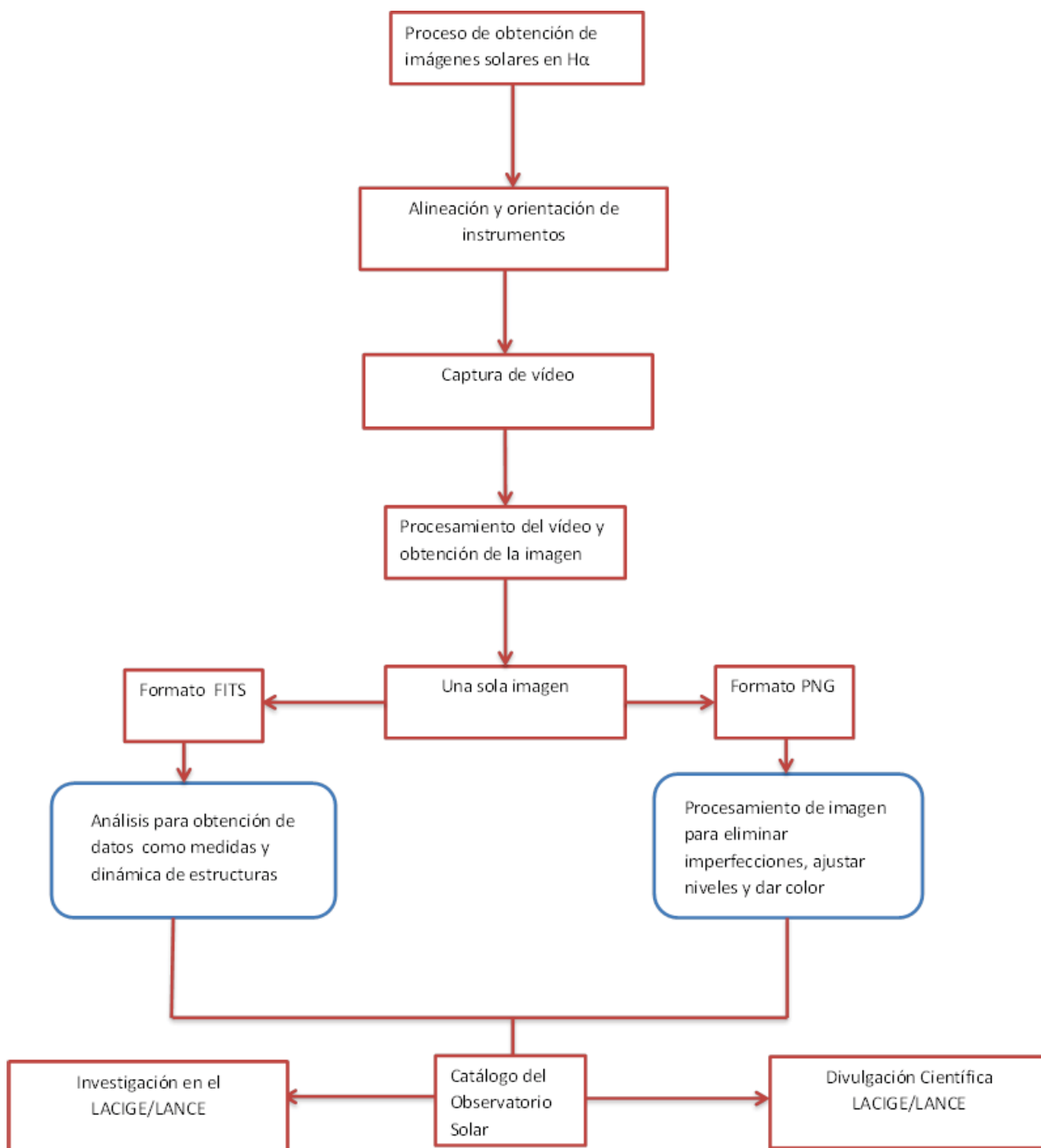


Figura 3.39: Proceso a seguir para generar las imágenes.

En el capítulo 5 se realizarán mediciones de algunas imágenes obtenidas en el observatorio solar de modo que se puedan obtener datos sobre las estructuras observadas en las imágenes, así como también se compararán los datos de las condiciones atmosféricas del momento de la observación con la calidad de la imagen.

Capítulo 4

Divulgación Científica

Promover la comprensión pública de la ciencia es una necesidad social ya que en la sociedad actual, en la que la dependencia tecnológica es cada vez mayor, los individuos deben ser capaces de tomar decisiones informadas respecto a temas que afecten su vida personal y, también, su vida como parte de una comunidad (Brossard et al., 2005).

En este capítulo se describirá en qué consiste la divulgación o comunicación de la ciencia, se explicarán los modelos implementados para llevarla a cabo, así como también se explicarán algunos de los esfuerzos realizados para divulgar las geociencias y en específico las ciencias espaciales. Al final de este capítulo se explica la motivación de incluir el tema de la divulgación científica en este trabajo.

4.1. ¿Qué es la divulgación de la ciencia?

“Existen distintas formas para referirse a transmisión de conocimiento científico al público. Los términos cambian de una cultura a otra y varían según el enfoque ideológico que llevan, de los objetivos que buscan así como de la relación a establecer con los receptores de la información. Los términos más empleados en Iberoamérica son: la apropiación social del conocimiento científico (Colombia), popularización de la ciencia y la técnica (fundamentalmente en el Cono Sur) y divulgación de la ciencia (México, España y otros países latinoamericanos). También se emplean los términos difusión y comunicación de la ciencia” (Tagüeña, Rojas y Reynoso, 2006)

La comunicación pública de la ciencia, también conocida en México como divulgación de la ciencia, es un concepto complicado de definir. Esto es debido a que sus delimitaciones o fronteras no son claras y se mueven a lo largo de una fina línea que es fácil confundir. Sin embargo, hay algunos puntos claros de los que se puede partir para hacer una definición con la cual trabajar pero, antes se debe partir del significado mismo de la palabra divulgación.

La divulgación está muy relacionada con la comunicación en el sentido mismo de sus significados (Huergo, 2001). *Comunicar* (como verbo transitivo): poner en común; *Divulgar*: transmitir al vulgo.

La comunicación suele conocerse como la acción de hacer participar a un individuo, o a un sistema, de los estímulos del medio ambiente de otro individuo situado en otro lugar o época, utilizando los elementos que tienen en común. Es decir, comunicar implica una relación entre dos individuos, uno que tiene un mensaje y otro que lo recibe (Trigueros, 2002).

Sin embargo la comunicación no es simplemente un proceso de transmisión de información, es un proceso donde existe un contexto que le da sentido. El verbo comunicar, además de su significado transitivo, tiene un significado reflexivo: comunicarse. Este significado hace referencia al hecho de compartir y dialogar, convirtiéndose en un encuentro entre iguales basado en la participación, disminuyendo así la relación de poder vertical que presenta el significado transitivo del verbo aunque, esto no significa que la comunicación sea completamente simétrica y armoniosa.

Huergo (2001) propone la siguiente definición de divulgación: acción o proceso por el cual la ciencia, sus productos y sus actores se relacionan con la cultura de una comunidad. La anterior es una definición muy amplia y ambigua y es preciso comprender cómo la comunicación opera dentro de la divulgación para poder olvidar el concepto mismo de divulgación para reemplazarlo por el de popularización. Adoptando este último término como un cambio de perspectiva para lograr un mejor posicionamiento frente al problema que representa la relación entre ciencia y tecnología, y cultura.

La comunicación puede entenderse como un proceso social donde se producen significados y se construyen sentidos; un proceso fundamental del estudio histórico-social de la ciencia. Es por esto que hay que considerarla como una cuestión básica para cualquier acción que pretendamos realizar con el fin de restaurar la relación, entre ciencia y cultura. Así, la popularización de la ciencia consiste en “democratizar” la ciencia, es decir, favorecer la apropiación y el uso de las producciones científicas y tecnológicas para que dejen ser producto de individuales y comiencen a ser procesos colectivos que finalmente caigan en la generación de significados que puedan ser utilizados para resolver cuestiones cotidianas (Huergo, 2001).

Para Sánchez Mora, A. M (2010), la definición de divulgación de la ciencia está compuesta por varios elementos que, si bien, no la hacen una definición única, sí la hacen una buena definición útil para varios contextos y de donde se puede partir hacia definiciones más elaboradas. Para comenzar, Sánchez Mora menciona que definir a la divulgación de la ciencia no es fácil ya que, primordialmente, no hay un consenso sobre sus límites o fronteras y participan en ella gran cantidad de disciplinas. Sin embargo, hay varios puntos que se deben conservar a la hora de definir la divulgación científica y sobre los que hay un acuerdo general. Según Sánchez Mora son los siguientes:

- La divulgación científica trata sobre ciencia. Es decir, sobre el conjunto de prácticas y sistemas utilizados para representar al mundo que nos rodea.
- Por lo anterior, quedan fuera del campo de la divulgación las pseudo-ciencias así como las inexactitudes científicas, etc.

- La divulgación se debe tratar como un acto de “hacer saber”.

Así mismo, la definición de divulgación de la ciencia debe de tomar en cuenta ciertas “restricciones” que la distinguen de otras prácticas, por ejemplo: el público es voluntario y no científico; el lenguaje debe ser casual y no especializado; debe cuidarse la falta de contexto; debe hacer las ideas accesibles al público.

Siguiendo lo anterior, [Sánchez Mora, A. M \(2010\)](#) propone la siguiente definición: "La divulgación es una tarea multidisciplinaria que pretende, al utilizar gran cantidad de medios y recreando con fidelidad el conocimiento para públicos voluntarios, comunicar el conocimiento científico, de manera que este se vuelva accesible."

Aunque esta definición es muy generalizada, y de cierta manera práctica, presenta algunos problemas que surgen debido a su propia ambigüedad. Podemos darnos cuenta que el simple hecho de dar a conocer datos no es divulgar la ciencia. Falta proveer de contexto, de hacer notar ¿qué con eso? Hay una gran diferencia entre tener información y tener conocimiento y la divulgación científica debe tener esto bien claro. Divulgar la ciencia no es dar información solo porque sí, de manera indiscriminada, ya que de hecho, es la falta de contexto lo que puede llevar a la especulación y al sensacionalismo.

Además, independientemente del enfoque empleado para la divulgación, hay un consenso en cuanto a que no sólo hay que transmitir información, también es importante ayudar al público a darse cuenta cómo se hace la ciencia ([Tagüeña, Rojas y Reynoso, 2006](#)).

4.2. ¿Por qué divulgar la ciencia?

Vivimos en una sociedad donde la tecnología cada vez está más presente en la vida cotidiana, sin embargo, la gente conoce poco de los avances científicos que son la base de dichas tecnologías. La ciencia ha dejado de ser parte de la cultura y las personas que tienen el interés de acercarse a ella se detienen por un cierto miedo hacia la dificultad de los conceptos científicos ([Trigueros, 2002](#)).

La ciencia resulta ser el mejor instrumento de conocimiento que tiene el ser humano, este instrumento, sin embargo, es exigente y demanda ser expresado y desarrollado en un idioma técnico, especializado y propio. Al mismo tiempo, es capaz de generar complejas estructuras cognitivas que permiten un mejor entendimiento del mundo. El acceso a estas estructuras, entenderlas y ser capaces de utilizarlas representa una adquisición de poder intelectual, económico, político, industrial y militar. Por ello, es importante para los carentes de este conocimiento -el gran público- ser capaces de acceder a este mundo ([Sánchez Ron, 2007](#)).

La ciencia, como profesión, fue en aumento desde que el hombre estaba cada vez más interesado en comprender la naturaleza. Sin embargo, su verdadero auge se dio con la invención de la imprenta, la cual permitió el acceso a la información científica de una manera más eficiente, rápida y amplia mediante

la impresión de revistas científicas. Además esto, junto con las recién formadas academias de ciencias, propició que la ciencia se convirtiera en una práctica avalada como una profesión respetada (Sánchez Mora, A. M, 2010). Esta realidad ayudó al desarrollo de muchas teorías, conceptos y aplicaciones pero, también surgieron nuevos retos para la creciente comunidad científica, donde uno de los principales era la comunicación “global”, es decir, la ciencia ya era un agente de cambio social y ya se podía comunicar de manera eficiente y veloz los progresos científicos, pero ¿cómo hacer para que todos, sin importar el lugar donde se encontraran, lo entendieran?

Para resolver dicho problema la comunidad científica se vio en la necesidad de crear un lenguaje que pudiera ser entendido y reproducido por todos, un lenguaje que expresara “la esencia de las cosas”, como menciona Sánchez Mora, A. M (2010). Este lenguaje debía ser claro, preciso, cualificado para adaptarse a cada especialidad científica pero sobre todo debía ser internacional. Para lograrlo se adaptó un lenguaje adoptando fórmulas definidas, símbolos, números, etc. Así, se creó el “lenguaje científico” para describir, narrar y cuantificar distintos conceptos. Sin embargo, como también menciona la autora, quienes no conocen los códigos para descifrar este lenguaje científico, que usualmente requiere de conceptos no tan fáciles de comprender o de antecedentes elaborados, difícilmente pueden ser parte de él. De esta manera y debido a la dificultad de verbalizar las descripciones científicas de la realidad se han creado dominios separados de percepción, los cuales han tenido grandes consecuencias; la divulgación de la ciencia entre estas.

Es notable que el crecimiento de la empresa científica se debió en gran parte al crecimiento del lenguaje mismo que la describía. Con este lenguaje el progreso científico llegaba más lejos y conectaba a personas que, tal vez, de otro modo no hubieran podido compartir ideas, teorías o descubrimientos, además, de que hizo notar la necesidad de un segundo lenguaje que facilitara el acceso al conocimiento a las personas que no estaban familiarizadas con el entorno de la ciencia, naciendo así la divulgación (Sánchez Mora, A. M, 2010).

En el trabajo de Trigueros de (2002) se menciona que: “Cada día es más necesario tener un puente entre la investigación científica y la población. Es indispensable que la ciencia se vuelva parte de la cultura y que la gente sienta que puede entenderla aunque no se dedique a ella. Para establecer este punto se necesita reflexionar seriamente sobre el proceso de comunicación de la ciencia”.

La divulgación de la ciencia es el primer acercamiento que cualquiera de nosotros tiene con el medio científico, es la encargada de atraernos y atraparnos para despertar nuestra curiosidad por el mundo que nos rodea. Sin embargo, en nuestro país no se toma en cuenta lo suficiente y no se buscan nuevas y mejores maneras para divulgar ya que comúnmente se cree que es una práctica menos válida que la investigación “formal”. Además, dado que muchas veces la divulgación se considera como parte de la educación informal (aquella que se aprende fuera de las escuelas), la comunicación de la ciencia puede funcionar como una manera de compensar el rezago educativo que existe en nuestro país así como en muchas otras partes del mundo (Escalón, 2005).

Pérez Tamayo, R. (2011) se pregunta ¿Qué debe perseguirse con la divulgación de la ciencia? y responde que para el caso de nuestro país el objetivo es claro: "...incorporar el espíritu de la ciencia en la cultura nacional." Sin embargo, los obstáculos no solo son milenarios también, están profundamente arraigados a nuestra cultura y a nuestras raíces ya que el esquema mágico-religioso de la vida, como lo llama el autor, se conserva en muchos detalles de nuestra vida cotidiana. Esto no significa que la meta, en realidad, sea que la cultura científica reemplace al esquema mágico-religioso y Pérez Tamayo, R. (2011) menciona que no se trata de cambiar un fanatismo por otro, más bien de sustituir una forma de relacionarse con el mundo que resulta poco eficiente por otra que desde hace mucho tiempo ha probado ser un camino más seguro y rico para alcanzar el conocimiento.

Siguiendo lo anterior, la popularización de la ciencia deberá basarse en estrategias y metas que no solo den conocimiento al público sino que también, sean capaces de proporcionar a la sociedad con oportunidades que den paso a la crítica de la realidad en la que vive, de sus procesos y de la propia sociedad, no para minimizarlas o discriminarlas sino para descubrir qué les falta y como puede obtenerlo (Huergo, 2001), es decir, que la sociedad pueda notar sus propias deficiencias y, al mismo tiempo, sea capaz de repararlas haciendo uso de un conocimiento colectivo ampliado por la popularización de la ciencia.

4.3. Modelos de Divulgación Científica

El término popularización de la ciencia alude a un grupo de actividades, disciplinas y acercamientos que buscan comunicar la ciencia a una audiencia voluntaria (Bonfil, 2004).

Como ya se mencionó anteriormente, no hay un termino "oficial" para la Comunicación Pública de la Ciencia (CPC) ni tampoco hay uno que sea aceptado globalmente por los divulgadores. Bonfil (2004) menciona que esto es, principalmente, porque sus definiciones nacen de un método práctico sin una teoría que lo sustente.

Lo anterior permite sugerir que la CPC debe estar basada en modelos teóricos que de cierta manera definen o modelen los prácticos. Es decir, hay teorías sobre cómo comunicar la ciencia, la relación con el público, etc. que marcan las pautas a seguir a la hora de practicar la divulgación científica.

Hay muchos modelos para la CPC pero los más comunes son los que se describirán a continuación, simplemente para poder comparar como no hay una visión absoluta para comunicar la ciencia en realidad, hay muchos caminos y todos aportan algo al esquema global de la divulgación, aunque esto solo sea contexto sobre que tipo acercamientos no resultan realmente efectivos.

4.3.1. Modelo de apreciación pública de la ciencia y la tecnología (PAST)

También conocido como modelo de déficit cognitivo o de alfabetización científica (Brossard y Lewenstein (2010); Välvirronen (1993)), es el modelo más elemental y más aplicado porque el flujo de información va de la ciencia, quien controla el significado de “lo científico” y “lo no-científico”, al público, que funciona como un depósito de información. Por definición (del modelo), el público es ignorante y por eso hay que educarlo por medio de información persuasiva. Para Tinker (2013), PAST (Public Appreciation of Science and Technology) es un término más adecuado que el clásico PUS (Public Understanding of Science) porque en realidad no existe una “comprensión” sino una “apreciación” de la ciencia y en efecto, para los defensores de este modelo la mayor prioridad es que el público aprecie el valor intrínseco de la ciencia, aunque se constate una y otra vez (mediante encuestas de percepción) que este modo unidireccional de comunicar la ciencia no contribuye de manera significativa a incrementar la cultura científica de la población. El PAST tiene otras denominaciones, tales como: modelo de diseminación/difusión (Horst, 2008); enfoque dominante (Myers (2003); Hilgarten (1990)); o enfoque canónico de popularización de la ciencia (Grundman y Cavallé, 2000).

El modelo PAST es problemático por varias razones. En primer lugar, tiende a considerar que la ciencia es una especie de reserva de hechos que corresponden de manera precisa a partes del mundo natural, con lo que deja de lado que el conocimiento científico es un constructo social (Woolgar, 1991). En segundo lugar, el modelo asume que el científico posee autoridad *per se*, con lo que olvida que *especialista* y *no especialista* son conceptos relativos y que el *especialista* solo es experto en el campo de su especialidad (Fehér, 1990). En tercer lugar, considera que el déficit está restringido exclusivamente al conocimiento no científico. Si el público no reconoce los hechos científicos (que son como son), tal falla se atribuye a deficiencias en los mediadores al transmitir la información o a creencias irracionales del público, o a ambas. En cuarto lugar, es un modelo de comunicación lineal, generalizado y bastante simplista (Hansen, 2009).

Además, este modelo no fomenta la participación pública y refleja únicamente las expectativas e intereses de una élite científica y tecnológica (Logan, 2001) (Miller, 2001).

Con las ideas anteriores es sencillo darse cuenta por qué el modelo de déficit no funciona. El mundo ha avanzado de manera tal que el público necesita interactuar y hacer preguntas de forma que la información que está recibiendo le provea de contexto y le permita generar conexiones y significados con los cuales relacionarse con el mundo alrededor. Además, es muy fácil dar información sin importar cómo es recibida (o si es recibida) y cuando no tiene el efecto deseado culpar al receptor de dicha información por su falta de comprensión o de interés.

4.3.2. Modelo de compromiso público con la ciencia y la tecnología (PEST)

El PEST (Public Engagement with Science and Technology) es un modelo que trasciende la noción de déficit porque concibe la comunicación como un flujo bidireccional entre ciencia y público. La diferencia con el modelo anterior es que enfatiza la necesidad de establecer mecanismos que favorezcan el diálogo entre ciencia y sociedad, por ello también se lo conoce como modelo de diálogo (Brossard y Lewenstein, 2010) (Trench, 2008) (Miller, 2001).

Sin embargo, como argumenta Tinker (2013), aunque el PEST mejora el PAST también presenta problemas. En primer lugar, sigue separando ciencia y sociedad, incluso cuando intenta establecer un diálogo entre ambas los maneja como personajes separados entre los cuales hay que construir algún tipo de puente o conexión. En segundo lugar, sigue manteniendo el centro de gravedad en la ciencia: la ciencia es una entidad fija, perfecta y hacia la que el público debe moverse para interactuar con ella. A pesar de que el PEST asume que los miembros del público son agentes activos que crecen mediante sus interacciones con la ciencia, todavía enfatiza que el cambio y la comprensión, deben darse en el público.

4.3.3. Modelo de comprensión crítica de la ciencia en público (CUSP)

El CUSP (Critical Understanding of Science in Public) supera a los dos modelos anteriores en considerar todos los aspectos que intervienen en las interacciones ciencia-sociedad. En este sentido, el CUSP reconoce que la comunicación no se puede reducir a un simple proceso lineal de difusión de información y remarca su carácter multidimensional y contextual (Tinker, 2013). El problema ya no es identificar los motivos por los que el público ignora la ciencia sino que más bien se trata de establecer vías para que este pueda alcanzar una comprensión crítica del fenómeno científico y, por lo tanto, pueda cuestionar y responder a los pros y contras que ocasiona la tecnociencia (Horst, 2008). Entonces, como menciona Collins y Pinch (1996), el público debe aprender más acerca de la ciencia (como institución social) que de ciencia (contenidos). Este modelo también se conoce como modelo de deliberación (Horst y Michael, 2011) y se le relaciona con el modelo democrático (Durant, 1999) y con el modelo contextual (Gross, 1994).

Hay dos diferencias principales entre el CUSP y los dos modelos anteriores. La primera está en que la base es distinta. El CUSP se centra sobre todo en la producción de sentido, es decir, no se pone tanto énfasis a la exactitud con la que se transmiten los hechos científicos, como a que los hechos emergen gracias a complejas interacciones entre las intenciones y necesidades de productores y consumidores de textos, en contextos sociales y culturales dados (Tinker, 2013).

El conocimiento y su difusión siguen importando pero se pone más el énfasis en cómo se usa socialmente ese conocimiento. La segunda diferencia elemental es que mientras que el PAST y el PEST son implementados por instituciones científicas o por organismos públicos dedicados a la política científica, el CUSP nace de la reflexión crítica propia del mundo académico (Tinker, 2013).

El CUSP ofrece cuatro ventajas sobre los modelos anteriores:

1. Tiene un carácter relacional y enfatiza que la ciencia es una parte interactiva de la sociedad. Reconoce, por lo tanto, que la ciencia no está aislada de otras instituciones sociales (Tinker, 2013).
2. Considera que las formas de conocimiento científicas y las no-científicas tienen valor. Esto implica que la participación de todos los agentes sociales involucrados en los debates públicos sobre asuntos tecno-científicos es necesaria para alcanzar el consenso (Tinker, 2013).
3. Propone una doble obligación para la CPC. Por una parte, la de informar y educar al público y, por otra, la de explorar y criticar a la ciencia, como la institución social que es. Este papel crítico está ausente en los modelos PAST y PEST y, además, es inevitable porque siempre se da cierta apropiación social de conocimiento científico, es decir, de utilización de este en determinados contextos extra-científicos (Sørensen, Aune y Hatling, 2000).
4. Asume que hay una imagen pública de la ciencia ambivalente, que resulta del entusiasmo que generan los logros de la investigación científica y de la reticencia que provocan sus aplicaciones y que se cree pueden socavar la calidad de la vida humana (y a menudo de la no humana) (Tinker, 2013).

Lewenstein (2003) menciona que con base en los modelos de la comunicación pública de la ciencia hay varias tareas a desarrollar para mejorar la misma, ya que los propios modelos simplemente proveen una herramienta para mejorar nuestro acercamiento a la CPC, es decir, no son visiones absolutas ni únicas.

Actualmente los modelos más importantes y más usados son aquellos que incluyen al público y consideran la divulgación una actividad abierta. Estos modelos poco a poco han desplazado la visión de déficit intentando acercar a la gente a los temas científicos mediante diálogos y sistemas abiertos donde es importante la retroalimentación de la sociedad hacia la ciencia. Esto permite tener ciudadanías con criterio científico que puedan tomar decisiones responsables en los temas tecnológicos y científicos que influyen en todo el contexto social. Estos modelos también toman en cuenta uno de los mayores problemas de divulgación científica: la necesidad de llamar la atención del público sin perder la credibilidad a largo plazo (Piñera, 2010).

Los modelos deben ayudar a visualizar cómo los proyectos de divulgación pueden ser imaginados/planeados y cómo pueden relacionarse con los que ya existen. También, deben ayudar al público a resolver problemas locales con conocimiento local al mismo tiempo que, llenan el déficit y promueven la participación pública de modo que se genere un “cambio de visión” es decir que se incite la curiosidad de la gente por los fenómenos y problemas a su alrededor.

Además, es necesario comprender que, como la divulgación de la ciencia trata con personas no podemos encasillarlas a todas en el mismo modelo, es decir, para unas sirven ciertas acciones y para otras

se aplican acciones diferentes. Como también menciona [Carcavilla et al. \(2010\)](#) “Es necesario asumir que no se puede diseñar un material divulgativo que satisfaga simultáneamente al público general, al aficionado, al docente y al experto. Así que partir de la idea de que un discurso, un panel, un folleto o una guía valen para “todos los públicos” es un error conceptual grave, desgraciadamente más frecuente de lo deseable.”

En resumen, utilizar solo un modelo para basar las actividades o los acercamientos de la divulgación no parece algo muy productivo, sin embargo y como también menciona [Lewenstein \(2003\)](#), es posible combinar ciertas características de los modelos, lo cual, puede ampliar la visión que dan los mismos y así mejorar las actividades y proyectos de la CPC, porque a partir de la caracterización de los diferentes modelos de la CPC es posible pensar que puede mejorarse el quehacer de la divulgación.

4.4. Astrofotografía como un método para divulgar las Geociencias

“Las ciencias de la Tierra o Geociencias son las disciplinas de las ciencias naturales que estudian la estructura, morfología, evolución y dinámica del planeta Tierra. Su precedente más importante está formado por las ciencias naturales y su principal exponente es la geología. Forman parte de las ciencias planetarias, las cuales tratan el estudio de los planetas del sistema solar...” ([Alvarez y Leitaó, 2010](#)).

La definición anterior aunque da una buena idea sobre la materia, es muy ambigua y da la impresión de que cualquier disciplina que tenga que ver con las ciencias naturales es parte de las geociencias cuando no lo es exactamente. Definir a las Geociencias es algo complicado ya que abarcan un campo de acción muy amplio de modo que a continuación se dará una definición de Geociencias realizada por la autora con base en su experiencia como estudiante de la Licenciatura en Geociencias:

Las Geociencias, o ciencias de la Tierra, son el conjunto de prácticas científicas que se encargan del estudio de los fenómenos que tienen lugar en la Tierra como planeta. Es decir, toman a la Tierra como un sistema dinámico y se encargan del estudio de los procesos físicos, químicos y bio-químicos como causa de procesos, y como consecuencia de ellos en el sistema y de los cambios en el mismo. Además se incluyen las ciencias espaciales que estudian los fenómenos e interacciones del entorno espacial inmediato, como el Sistema Solar, cuyos efectos tienen consecuencias en el planeta y se pueden tomar como analogía los procesos en la Tierra para estudiarlos en otros planetas.

[Carcavilla et al. \(2010\)](#) dicen que es un hecho asumido que la ciencia y la tecnología no forman parte del bagaje cultural de la sociedad y que, de entre todas las ciencias, la Geología (y las Geociencias en general) es una de las que goza de menor popularidad. De hecho, los autores afirman que la Geología, por ejemplo, arrastra grandes problemas de percepción social ya que, generalmente, se considera aburrida en comparación con otras ciencias debido a la consideración de inmutable y poco moderna,

que apenas resalta cuando determinadas catástrofes naturales ponen a ciertos procesos geológicos en el centro de la actualidad (Gutiérrez-Marco, 2005).

Un hecho evidente es que el colectivo de profesionales de las Ciencias de la Tierra ha mostrado, de manera general, tradicionalmente poco interés por acercarse al público no especializado. Esto ha llegado a provocar que especialistas de otras disciplinas más motivadas por transmitir sus avances al gran público, la astronomía por ejemplo, acaparen el protagonismo, o incluso que otros colectivos traten de dar respuesta a los aspectos geológicos que exceden sus conocimientos y experiencias (Carcavilla et al., 2010) (Gutiérrez-Marco, 2005).

Sin embargo, parece que lo anterior está empezando a cambiar, la sociedad está comenzando a recibir con mayor entusiasmo productos divulgativos sobre Geología, por ejemplo. Iniciativas como la celebración del 2008 como Año Internacional del Planeta Tierra de la UNESCO (yearofplanetearth.org) aportan una oportunidad para incrementar la conciencia del público acerca del potencial de las Ciencias de la Tierra.

Para la comunidad geocientífica uno de los retos principales es que todavía hay que desarrollar un puente más versátil para disminuir la brecha entre ayudar al público a entender por qué las geociencias son relevantes y, al mismo tiempo, hacer la información entendible para todos (Stewart y Nield, 2013) (Walsby, 2008).

Como se mencionó anteriormente, la divulgación científica cuenta con algunas dificultades que parten de su propia naturaleza. De manera específica, la divulgación de las Geociencias posee dificultades propias independientemente del sistema utilizado para llevarla a cabo. Estos problemas provienen de un gran desconocimiento de la sociedad ante las Ciencias de la Tierra.

Según Carcavilla et al. (2010) las principales dificultades que se presentan al momento de divulgar las Geociencias, y que se deben tomar en cuenta a la hora de intentarlo, son las que siguen:

- Las magnitudes físicas manejadas para determinados procesos tienen órdenes de magnitud que se encuentran fuera de la experiencia “sensorial” de las personas. Es decir, son magnitudes con las que el público no se relaciona o que no puede dimensionar por ejemplo, las magnitudes manejadas en las Ciencias Espaciales.
- Lo mismo con las escalas geológicas, son tiempos inabarcables para la mayoría de las personas y en muchos casos sólo proporcionan un dato numérico carente de sentido emocional.
- Las Geociencias pueden ser, en algunas ocasiones, muy espectaculares y despiertan de inmediato la curiosidad pero, en otras ocasiones se trata de cuestiones que a los ojos del público no posee ningún interés. Esto deja a la divulgación de las Geociencias con temas un tanto limitados para trabajar.

- La comprensión de algunos procesos de las Ciencias de la Tierra requiere de cierta capacidad de abstracción que muchas veces es difícil de encontrar en el público. Por ejemplo, construir la tercera dimensión a partir de la vista de un corte.

Sin embargo, el autor también menciona que muchas veces el desconocimiento de las Geociencias hace que, cuando son explicadas de manera atractiva, el público experimente una sensación de descubrimiento de un mundo muy cercano al que hasta ese momento era desconocido.

A menudo, las Ciencias de la Tierra (exceptuando la rama de las Ciencias Espaciales) pueden ser comunicadas mediante una experiencia práctica es decir, es en el campo, sobre el terreno, donde la divulgación de las Geociencias adquiere la mayoría de su significado (Van Loon, 2008). Los Geoparques y el “geo-turismo”, donde estructuras, procesos y eventos relacionados con las Geociencias son el principal protagonista, están tomando popularidad y ésta iniciativa, inicialmente europea, se está extendiendo a nivel mundial gracias a la UNESCO. Actualmente existen varios Geoparques repartidos por el mundo y se espera que es numero crezca hasta superar los 500 para el 2025 [Carcavilla et al. (2010) cita a Gray (2004)].

Sin embargo, una experiencia práctica (presencial) no resulta alcanzable para las Ciencias Espaciales por razones obvias. Además, a veces los conceptos pasan desapercibidos y no solo no se logra el propósito de la comunicación, tampoco se logra generar ningún tipo de atracción por ellas. Por lo tanto, algunas veces, es necesario buscar alternativas utilizables en la divulgación de las Ciencias Espaciales para lograr sus propósitos dentro de la comunicación.

La fotografía, dentro del arte, una vez superada su condición esencialmente documental, ha alcanzado un gran desarrollo tecnológico en las últimas décadas donde se ha abierto un mundo de posibilidades creativas (Izquierdo, 2012) y hoy en día presenta una opción que puede servir a los propósitos de la divulgación de las Ciencias Espaciales, en combinación con los elementos en un museo de ciencia y los textos de divulgación. Como menciona, Piñera (2010): “...el arte permite al espectador estar de acuerdo o no con los temas y la forma en la que se presentan dentro de una obra, lo cual resulta valioso cuando una de las finalidades de la comunicación es la formación de ciudadanía con criterio científico.”

Entre los esfuerzos por llamar la atención de la gente se ha analizado el uso de la cotidianidad para acercar los conceptos abstractos a la vida de las personas, (Piñera, 2010). De tal modo, se considera que, mediante la referencia a la vida cotidiana y a los conceptos tangibles, fácilmente se puede provocar interés, generar reflexión e incluso el deseo de saber más por parte de la gente. Para esto se considera la necesidad de la creatividad en la divulgación presentando los temas de forma única y atractiva, pero teniendo cuidado de no deformar el mensaje científico. Es por eso que la fotografía, puede ayudar a generar espacios para la reflexión y discusión que de otra forma, muchas veces, no se logran.

Siguiendo la idea anterior, este trabajo intenta presentar la astrofotografía, específicamente la fotografía solar, como una herramienta nueva y versátil que permita apoyar al estudio del Clima Espacial y, al mismo tiempo, mejorar su difusión como parte de las Ciencias Espaciales en el ámbito divulgativo.

Además se intenta presentar un solo producto que tenga las características antes mencionadas ya que, muchas veces se piensa que para hacer divulgación se necesita de materiales complicados que nada tienen que ver con aquellos generados en la investigación.

Sin embargo, es muy importante mencionar que la fotografía no es el único método viable para comunicar las Ciencias Espaciales, hay muchos métodos para comunicarlas, como el texto de divulgación, es un método muy versátil y adaptable ya que puede ser usado junto con otro tipo de material como para complementar la información o como principal exponente del tema a comunicar. Además, definitivamente no es exclusivo de las Ciencias Espaciales, de hecho, la fotografía es útil en muchos ámbitos ya que es capaz de llevar al público imágenes de fenómenos, procesos, conceptos a los que muchas veces no se puede acceder, su lejanía o su tamaño por ejemplo. La fotografía puede acercar a las personas con la imagen de una célula, o los minerales en un roca, del mismo modo es capaz de mostrar un volcán, sus flujos de lava y los cambios que ha tenido a través del tiempo, también es útil en la astronomía donde los textos y el material museográfico por ejemplo, van acompañados de impresionantes imágenes de nebulosas, planetas, o simplemente de una fotografía de la Vía Láctea tomada desde la Tierra. Con todo lo anterior se trata de decir que la fotografía solo es un camino de muchos para tratar de lograr una comunicación más efectiva de la ciencia y la tecnología.

4.5. Motivación Personal

La ciencia es de las cosas más fascinantes que la sociedad ha impulsado. La ciencia rompe mitos para reemplazarlos con explicaciones reales que resultan igual de impresionantes que el mito original, ejemplo de esto son las auroras boreales.

No es un secreto que si la ciencia no se comunica, el mundo no avanza. Es seguro decir que si la ciencia no se difunde, no funciona, es decir, no completa el ciclo del proceso científico (y esto aplica tanto dentro de la comunidad científica como fuera de ella). La ciencia está para compartirse, y de hecho, vivimos en una época donde esta idea se aplica; se colabora para generar una red de conocimiento amplia y de la que todos puedan ser parte. Sin embargo esto último, usualmente, sólo aplica para los miembros de la comunidad científica, fuera de esta, usualmente, es poco el interés por compartir la información. Es del interés de cada institución que su investigación se difunda de manera rápida en el mundo para poder encontrar maneras de ampliarla y mejorarla mediante colaboraciones con otros institutos, universidades e investigadores, sin embargo no interesa compartirla fuera del mundo científico, no interesa ayudar a que el público entienda qué hacemos y por qué lo hacemos ¿Cómo es posible que haya tanta pasión por generar vínculos que hagan la investigación más grande (y mejor) pero no exista la misma pasión por atraer más gente hacia ella? Sí se quiere compartir la ciencia para generar mejor investigación, para obtener más fondos que la sustenten, etc, pero cuando se trata de compartir con quienes no forman “parte de ella” (el público lego) entonces ya el camino ya no es tan claro. No estoy segura si es porque hay un miedo derivado de la falta de experiencia en divulgación que la mayoría de los investigadores presenta o porque existe un genuino desinterés por compartir la ciencia con los públicos no expertos.

Hoy en día la noción de que los científicos deberían comunicar su trabajo más allá de la comunidad profesional a un público más amplio parece ser muy aceptada. La mayoría de los consejos e instituciones que aportan de fondos para la investigación exigen un componente de diseminación pública de tal modo que científicos de todas las áreas están bajo una presión constante de comunicar al público sus esfuerzos profesionales (Stewart y Nield, 2013). En general la profesión científica ahora respalda el acercamiento al público como una pieza fundamental de la investigación científica, sin embargo, existen ciertas reservas y asperezas (muchas de ellas institucionales) para lograr esa meta [Stewart y Nield (2013) citan a Marker (2008)]. De por sí la ciencia tiene una imagen complicada. La percepción pública de la ciencia está muy deteriorada e incluso estigmatizada ante la sociedad actual, y la actitud hermética que tiene hoy en día no ayuda.

Bonfil (2014) menciona que el científico, usualmente, es percibido a través de dos estereotipos: “...Uno es ridículo: el viejito canoso, despeinado tipo Einstein, distraído, sabio y bonachón, que más que científico es un inventor, y que vemos repetido hasta el cansancio en caricaturas, anuncios y películas. El segundo es negativo: el científico loco tipo Dr. Frankenstein que, guiado por su ambición, quiere apoderarse del mundo y desata fuerzas fuera de su control que acaban siempre causando una tragedia...”. En ambos casos se produce una visipon sesgada y mal informada del quehacer de un científico. Según este autor, en la *Encuesta sobre la percepción pública de la Ciencia y Tecnología* realizada en 2011 por el INEGI y el CONACyT, ante la afirmación “Debido a sus conocimientos, los investigadores científicos tienen un poder que los hace peligrosos”, el 50.1 % de las personas encuestadas dijeron estar “de acuerdo”. Esto nos da a entender que la ciencia, en efecto, tiene una muy mala imagen ante el público.

Y es que el principal problema con estos “modelos de científico” es que no son accesibles para el público, es decir, no se puede relacionar con ellos. No hay dentro de estos modelos uno que sea lo suficientemente “normal” (en el sentido de la gente normal o común y corriente) para que uno se pueda sentir identificado, porque ¿quién, realmente, siente que se parece, o que podría ser, un viejito loco o un genio malvado? La respuesta usualmente es: nadie. Lo anterior resulta en que puede suceder que no se vea a la ciencia como algo humano, algo normal de todos los días. Nadie, a menos que ya esté en el campo de la ciencia, la ve como algo que podría hacer.

Además, como advierte el filósofo y matemático Echeverría, J. (2005): “la actitud de las sociedades ante la tecnociencia es ambivalente”. Sin duda, hay muchas personas que aprecian sus logros, disfrutan sus beneficios y reconocen sus avances en la comprensión del mundo. Pero desde otro punto de vista, según Echeverría: “existe preocupación ante los riesgos que se derivan de las investigaciones científicas y de la tecnificación del mundo”.

Peor aun, de acuerdo con De la Peña (2005): “La ciencia, hoy día, padece una impopularidad sin precedentes. Frecuentemente se escuchan voces que hablan de los grandes trastornos que ha traído al mundo, desde las bombas atómicas hasta la contaminación y los organismos genéticamente modificados”. Otros dicen que el conocimiento científico es mal utilizado, que está vinculado a intereses

económicos y “que no ha resuelto los grandes males de la humanidad como el hambre, las enfermedades o las guerras”. Además, abundan ideas pseudo-científicas y supersticiones que contribuyen a esta mala imagen.

De lo anterior se podría pensar que uno de los propósitos de la divulgación de la ciencia es desmitificar al científico y a la ciencia misma, haciéndola accesible. Sin embargo, es como si la ciencia se auto-saboteara ya que, la falta de seriedad con la que hoy en día se toma a la comunicación de la ciencia es tal vez el mayor obstáculo que ésta enfrenta.

La idea anterior se traduce en una falta de interés por mejorarla, e incluso por aprender a realizarla. Como dice [Mapelli \(2004\)](#): "La divulgación científica, que se considera como la vertiente social de la ciencia, no es una actividad inmediata, ya que no transmite sólo información, nacida en un ámbito especializado, al gran público, sino que prevé un proceso de selección, formulación y recontextualización. Así pues, el divulgador se enfrenta con una situación conflictiva a varios niveles que impone una elección desde el punto de vista del contenido y de la forma..."

De la premisa de Mapelli podemos darnos cuenta que la divulgación no es fácil, no es un proceso automático que solamente transmite información sencilla de entender. Constantemente, la divulgación científica es considerada una labor fácil que simplemente consiste de traducir lo que dice el investigador sobre sus avances o descubrimientos a un lenguaje que sea entendible por cualquiera que lo vea, sin embargo, afirmar esto es sobre simplificar a la divulgación cuando se trata de un proceso de comunicación complejo que no debe ser tomado a la ligera.

Traducir lo que dice una persona sobre algo a otro lenguaje (en este caso un lenguaje común con el que las personas estén familiarizadas) sólo requiere de unas cuantas habilidades como, saber gramática, ser capaz de encontrar las ideas principales de la información y poder acomodarlas con las palabras adecuadas pero, esto nos deja un vacío; nos deja así, sin más que un montón de oraciones que de cierta manera se conectan unas con otras y que pueden estar llenas de muchos o pocos datos científicos. Se puede tener muchísima información en esas líneas pero, si no nos significa nada, si no tenemos un vínculo con ella; va a pasar al olvido, a ser algo que creemos que alguna vez leímos pero que realmente no recordamos. Y es que eso es, justamente, de lo que trata la divulgación de la ciencia: de crear lazos con el público. El divulgador, debe formar conexiones interpersonales con su público, ya sea que lo estén leyendo o escuchando, para que este público a su vez forme vínculos de interés y ¿por qué no? de disfrute con la ciencia.

Según [Burgos \(2001\)](#) a la ciencia no sólo hay que traducirla, hay que explicarla, enseñarla, demostrarla, etc. de manera que uno como divulgador logre generar, en el público, un significado que vaya más allá de la mera comprensión de la información presentada. Es decir, la divulgación debe de ser capaz de lograr que la ciencia nos deje algo emocionalmente significativo. Ese algo intangible que sentimos cuando hacemos algo que nos gusta, cuando leemos nuestro libro favorito o cuando comemos nuestra comida favorita, por ejemplo. El gusto por la ciencia, desde la perspectiva de este trabajo, no nace de

la lógica, nace de ese cosquilleo que sentimos cada vez que descubrimos algo nuevo, cada vez que logramos comprender algún proceso o concepto que antes no podíamos. Ese cosquilleo que hace que queramos saber más.

Decir que la divulgación científica es una simple traducción de la investigación formal, es como decir que cocinar solamente es mezclar cosas en una olla. No solo es sobre simplificar todo el asunto, es despojar el proceso de toda su belleza y de todo el arduo trabajo que conlleva. Porque, generar un sentimiento de disfrute y de aprendizaje que seamos capaces de recordar con gusto es uno de los trabajos más complicados que hay. Para divulgar hay que saber, y saber mucho y bien. Hay que dominar la información sobre un tema para poder caracterizarla y jerarquizarla de modo que después, lo más importante de dicha información pueda ser trabajado hasta llegar a ser explicado en un lenguaje común sin perder la esencia ni el contexto.

En este trabajo, por ejemplo, hay que conocer qué es y cómo funciona el Sol, que signos de actividad presenta y con qué efectos y consecuencias para después, de toda esa información tomar lo más relevante, lo que es más esencial que el público entienda, y moldearlo, contextualizarlo, adaptarlo, etc. para crear contenido que permita explicar la información antes mencionada con el apoyo de las fotografías solares, por ejemplo.

Además hay que ser capaces de distinguir qué clase de información va con cada tipo de público ya que, como se mencionó anteriormente, no todos los acercamientos (ni todos los modelos de la CPC) funcionan para todos los públicos. Por ejemplo, para un público infantil no sería muy efectivo presentar la información con las ecuaciones para la obtención de la escala de placa, es probable, además, que el propio concepto de escala de placa no sea relevante o necesario para este tipo de público, mientras que para un público universitario explicar este concepto y su importancia sí puede ser relevante e incluso las ecuaciones pueden servir como apoyo para explicarlo.

En el contexto de esta tesis, la divulgación científica no solo es una manera de dar a conocer los temas científicos tanto actuales como pasados, es también una manera de retribuirle un poco a la sociedad y de empoderarla para que pueda utilizar el conocimiento adquirido de manera útil y benéfica para ella misma. Como menciona Estrada (2002), la divulgación de la ciencia no busca que el público domine el tema del mismo modo que un especialista, mas bien se trata de que adquiera una idea clara del tema (aunque no con la misma precisión y detalles). Lo anterior con la finalidad de que el público participe en el mundo científico de manera activa e integral para formar un criterio propio con el cual interactuar con el mundo. Además es una forma de redimir a la ciencia y al científico, quitándole este velo que los aísla y de cierto modo los hace propensos a estereotipos; Una forma de reparar la fractura entre ciencia y sociedad de modo que la ciencia vuelva a ser de todos y para todos. Afortunadamente, los esfuerzos para generar más y mejor divulgación científica han ido en aumento en los últimos años y se está generando una conciencia internacional de popularización de la ciencia donde lo importante es no deformar el mensaje científico.

Con la idea anterior, la fotografía que aquí se presenta persigue dos posibilidades de llegar a la gente: en primer lugar con la investigación y en segundo lugar con la divulgación de las fotografías en el día a día. Esto puede ser con su publicación en medios escritos, digitales o en medios de comunicación en general, por ejemplo, en redes sociales, las cuales permiten llegar a un público muy amplio, de manera muy veloz y que conectan a la comunidad científica con la no científica.

Capítulo 5

Casos de Estudio y Resultados

A continuación se presentan los casos de algunas imágenes obtenidas en el Observatorio Solar de la ENES Morelia, en el periodo de agosto 2017 a mayo 2018, donde se realiza la obtención de parámetros de estructuras solares (manchas, filamentos, etc.) y donde, además, se analizan las características de temperatura y humedad relativa del día de obtención de la imagen con el propósito de intentar hacer una descripción de los días con mejor seeing.

Para cada caso, se presentará la fotografía de ese día, así como las condiciones de temperatura, humedad relativa, viento del día y radiación del día respectivo. Este último dato se grafica para observar su comportamiento y se toma como un parámetro inversamente proporcional a la nubosidad del periodo de obtención de cada imagen, es decir, se puede pensar que si la radiación disminuye en el periodo de observación es porque la nubosidad aumentó y vice versa.

Estas mediciones se realizaron con el software SaoImage DS9 y siguiendo el método explicado al final del capítulo 3. En esta sección no se pondrá todo el proceso de medición, simplemente se pondrán las medidas obtenidas así como las imágenes finales. Las imágenes presentadas en esta sección también se encuentran en el Apéndice B en caso que se deseara estudiarlas con más detalle. Así mismo, las imágenes se irán encontrando disponibles en la página web del Laboratorio de Ciencias Geoespaciales (LACIGE, www.lacige.unam.mx).

Es muy importante mencionar que para estos casos, las estructuras se están considerando como proyecciones planas en el plano del cielo y se están midiendo como tales, es decir, no se está tomando en cuenta la geometría ni del Sol ni de las estructuras encontradas en la imagen.

5.1. Agosto de 2017

5.1.1. 21/agosto/2017

El 21 de agosto del año pasado se observó un eclipse de Sol que en la ciudad de Morelia se pudo observar como eclipse parcial. El evento, que dio inicio aproximadamente a la 11:45am, fue observado en el observatorio solar de la ENES Morelia donde se obtuvieron varias fotografías a lo largo del día.

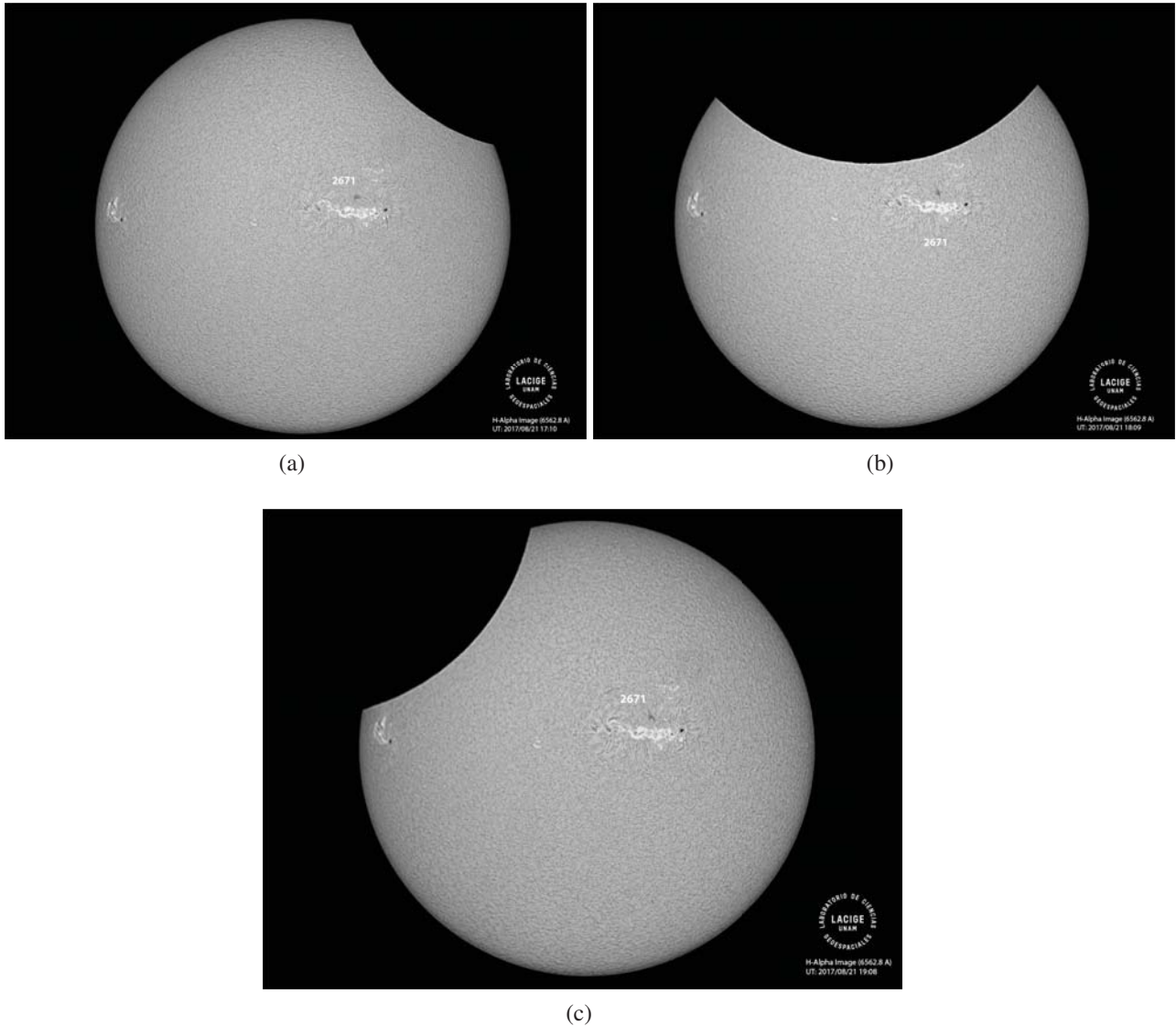


Figura 5.1: Fotografías obtenidas el 21 de agosto de 2017 a las: a) 12:10 tiempo local, b) 13:09 tiempo local y c) 14:08 tiempo local.

Además de la silueta de la Luna sobre el disco solar, se pueden observar dos manchas solares, pertenecientes a la región activa 2671, prácticamente sobre el ecuador solar y hacia la región oeste del disco.

En la región este se observa otra mancha solar cuya región activa no ha sido nombrada y la cual se esperará que avance hacia la región central del disco en los siguientes días.

La figura 5.3 indica que la temperatura promedio del día durante el periodo de observación fue de 21°C y la humedad fue de 61 %, la velocidad del viento máxima promedio de ese día fue alta, con 4.09 m/s. Se puede notar como la combinación de alta humedad con mucho viento repercute en la imagen si se observa la región activa en la zona este del disco, la cual no se ve tan enfocada como la región de la zona central. Además, las espículas en la zona este se ven menos definidas que aquellas en el centro y zona oeste del disco.

El panel superior de la figura 5.2 muestra como durante el periodo de observación (recuadro verde) comenzó a aumentar la temperatura y, al mismo tiempo, la humedad disminuyó (sin ser una disminución drástica), mientras que el panel inferior de la misma figura muestra como durante el periodo mencionado la radiación alcanzó su máximo, lo que supone una nubosidad muy baja, sin embargo, comenzó a disminuir aproximadamente a la mitad del periodo así que se puede suponer que la cantidad de nubes empezó a aumentar. También, la velocidad del viento comenzó a aumentar a medida que pasaba el tiempo y esto siempre puede generar problemas de vibración en el telescopio. En general, las mejores condiciones se dieron al comienzo de la observación cuando la temperatura era más baja y había menos viento; al mismo tiempo, el cielo estaba más despejado ya que la radiación comenzaba a aumentar.

Las mediciones que se realizaron sobre estas imágenes fueron: distancia entre las manchas solares (esta medida sólo se realizó en la primera imagen ya que en un intervalo de tiempo tan corto esta distancia, en realidad, no varía); y la distancia cubierta por la silueta de la Luna sobre el disco solar.

Para las imágenes obtenidas ese día, las medidas fueron las siguientes:

Mediciones 21 agosto 2017		
Distancia entre las dos manchas solares	$D_{manchas} = 147.89\text{píxeles}$	4.77'
Distancia que cubre la Luna:		
Imagen de las 12:10 tiempo local	$D_1 = 102\text{píxeles}$	3.29'
Imagen de las 13:09 tiempo local	$D_2 = 328.3\text{píxeles}$	10.61'
Imagen de las 14:08 tiempo local	$D_3 = 142.71\text{píxeles}$	4.61'

Tabla 5.1: Medidas obtenidas con el software SaoImage DS9 para las imágenes del 21 de agosto 2017.

Utilizando las ecuaciones vistas en el capítulo 3 esa cantidad de píxeles equivale a una cantidad de minutos de arco y eso, a su vez, a una cierta cantidad de km. Para obtener dicha cantidad se utiliza la escala de placa de la imagen que es de 1.94 píxeles/arco-segundo. Entonces, se multiplica la cantidad de píxeles medida por la escala de placa y se divide entre 60 para obtener la medida en minutos de arco utilizando la ec. 3.1.

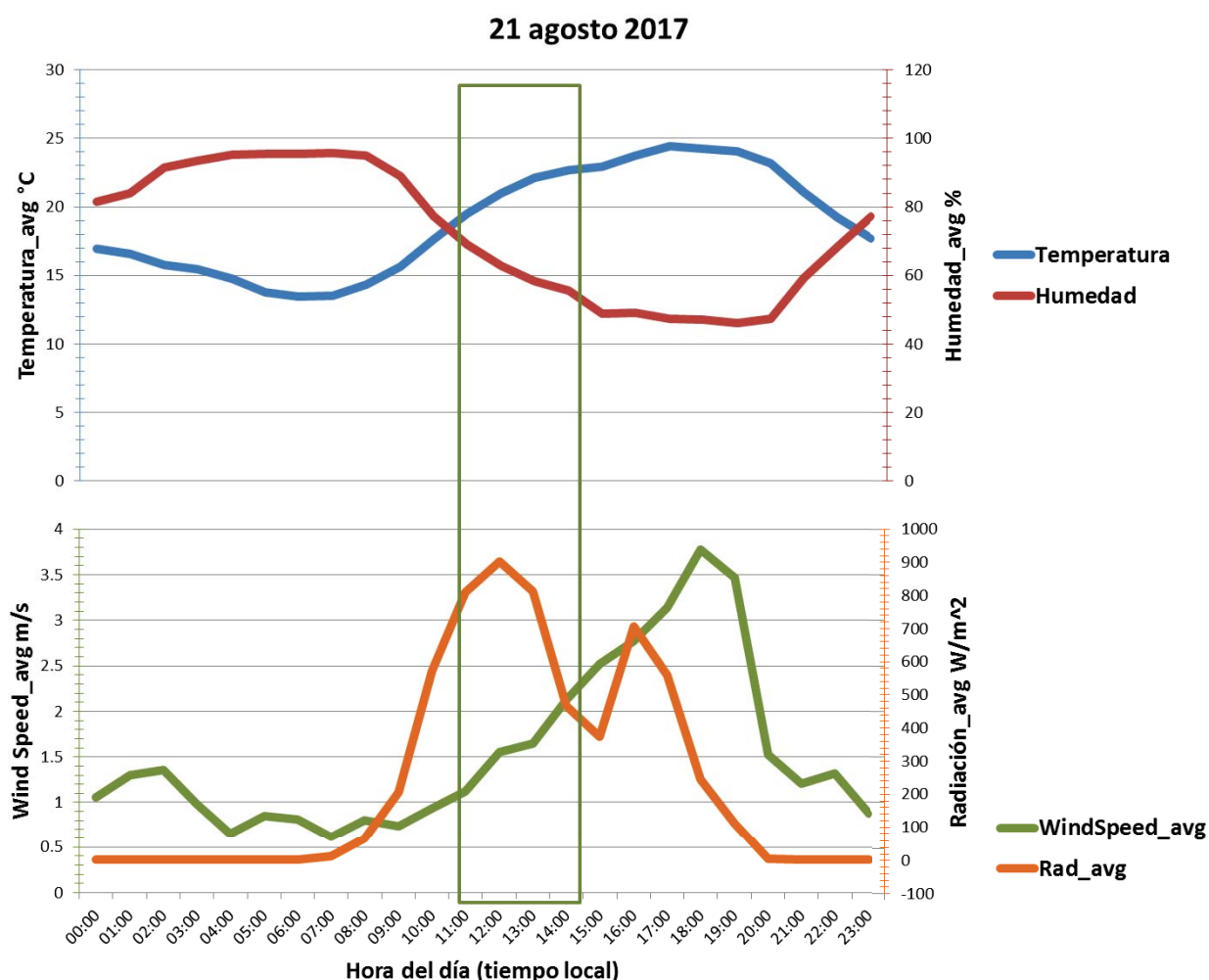


Figura 5.2: Gráficas de las condiciones atmosféricas del 21 de agosto del 2017. Arriba: Temperatura vs. Humedad. Abajo: Velocidad de viento promedio vs. Radiación promedio. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde indica el periodo de obtención de las fotografías.

TIME STAMP (dd-mm-yyyy) HH:MM:SS	Temp_Avg (°C)	RH_Avg (%)	WSpeed_Avg (m/s)	WSpeed_Max (m/s)	WDir_Avg (deg)	Rain_Tot (mm)	Press_Avg (hPa)	Rad_Avg (W/m²)
21/08/2017 11:00	19.52	69	1.123	2.84	20.1	0	808	808.7
21/08/2017 12:00	20.98	62.8	1.549	4.07	20.2	0	808	901.8
21/08/2017 13:00	22.14	58.4	1.651	4.28	23.3	0	807.2	812
21/08/2017 14:00	22.67	55.5	2.126	5.17	18.3	0	806.7	466.2
	21.3275	61.425	1.61225	4.09	20.475	0	807.475	747.175

Figura 5.3: Datos del periodo de obtención de la imagen. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM.

$$D_{manchas}[""] = \frac{(147.89 \cdot 1.94)}{60} = 4.77'. \quad (5.1)$$

Ahora se obtiene la medida en kilómetros. Como se mencionó en el capítulo 3 el radio del Sol equivale a 15 minutos de arco:

$$15' \rightarrow 6.9 \times 10^5 \text{ km}. \quad (5.2)$$

entonces, se puede utilizar esa relación para convertir los minutos de arco en kilómetros:

$$Distanciaentremanchas[km] = \frac{(4.77' \cdot 6.9 \times 10^5)}{15'} = 2.1 \times 10^5 \text{ km}. \quad (5.3)$$

Y se repiten los pasos anteriores para la distancia que cubre la Luna:

$$\frac{(102 \cdot 1.94)}{60} = 3.29', \quad (5.4)$$

y de nuevo se resuelve la relación 5.2 y se tiene que la distancia que cubre la Luna (en la imagen obtenida a las 12:10 tiempo local) es de: $D_1 = 1.5 \times 10^5 \text{ km}$.

Para las siguientes dos imágenes del eclipse, las medidas de la distancia cubierta por la Luna son las que se pueden ver en la tabla 5.1 (ya con la conversión a minutos de arco).

Para ambos casos se resuelve la regla de tres de la ec.5.2 y se obtiene que las distancias en kilómetros son de:

Mediciones 21 agosto 2017	
Distancia que cubre la Luna:	
Imagen de las 13:09 tiempo local	$D_2 = 4.8 \times 10^5 \text{ km}$
Imagen de las 14:08 tiempo local	$D_3 = 2.12 \times 10^5 \text{ km}$

Tabla 5.2: Distancia cubierta por la silueta de la Luna en km en las fotografías del 21 de agosto de 2017.

Todas las medidas anteriores son consistentes con las observaciones ya que, fue al rededor de las 13:09 hrs que el eclipse parcial llego a su máximo de observación (en la ciudad de Morelia), donde la silueta de la Luna cubrió $\approx 30\%$ del disco solar. Esta cantidad es comparable con el radio solar de $6.9 \times 10^5 \text{ km}$ y es sencillo darse cuenta que la sombra de la Luna cubrió casi un radio solar.

Las imágenes con las medidas pueden volver a ser procesadas en Photoshop de modo que, al final, también estas puedan utilizarse con diversos fines tanto de investigación como de divulgación científica (ver figura 5.4).

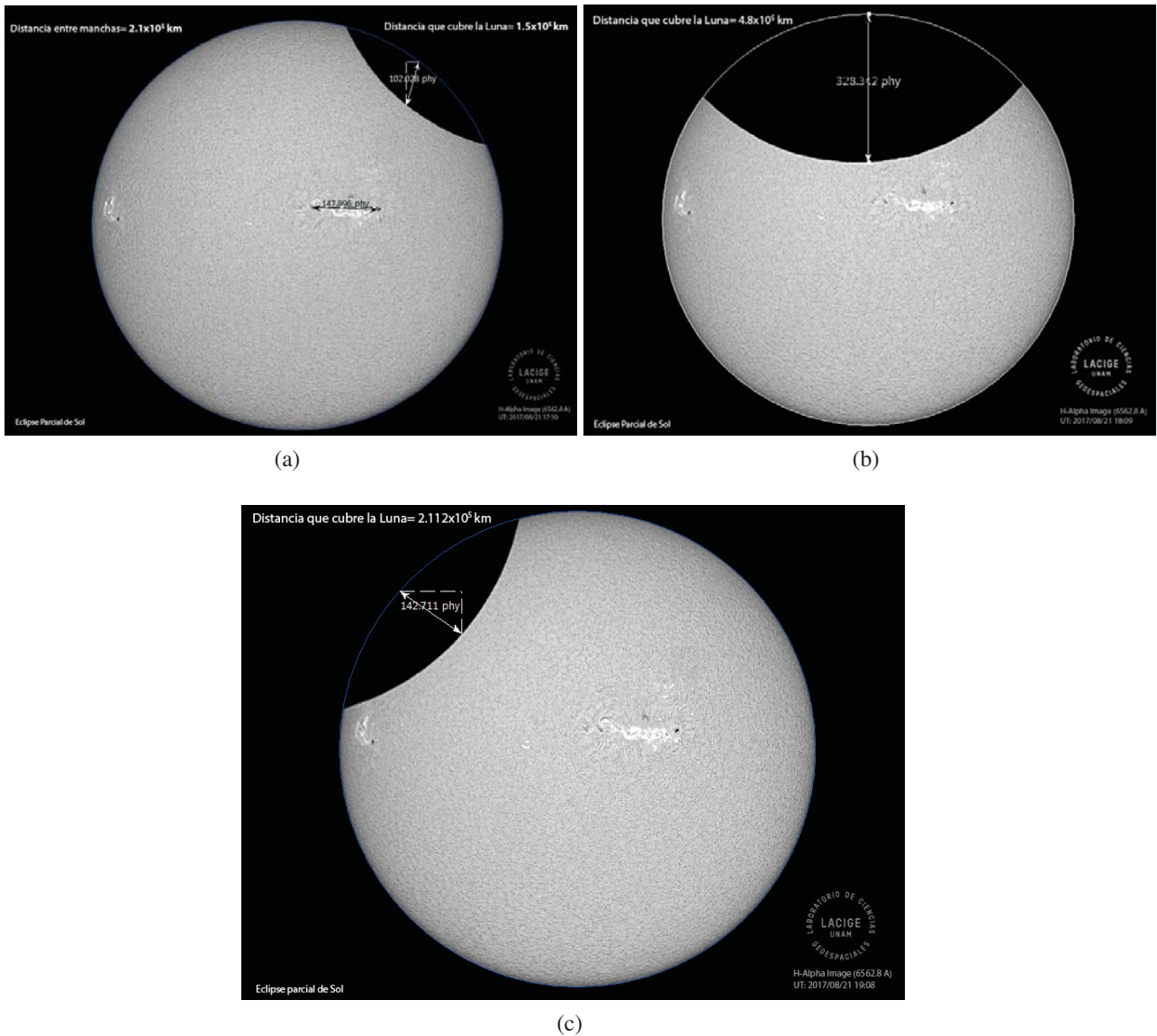


Figura 5.4: Las fotografías integradas con las medidas realizadas y editadas de nuevo.

5.2. Septiembre de 2017

5.2.1. 08/septiembre/2017

El 6 de septiembre del 2017 la región activa AR2673 liberó una fulguración solar muy intensa que alcanzó la clasificación X9.3, la cual se clasificó como la fulguración más fuerte de la última década ([spaceweather](#)). De hecho, en el periodo del 6 al 10 de septiembre hubo gran actividad solar donde se registraron 27 fulguraciones clase M y 4 clase X, además de varias eyecciones masa coronal ([NASA](#)). El 08 de septiembre todavía eran visibles los efectos de la fulguración clase X del día 06 de ese mes.

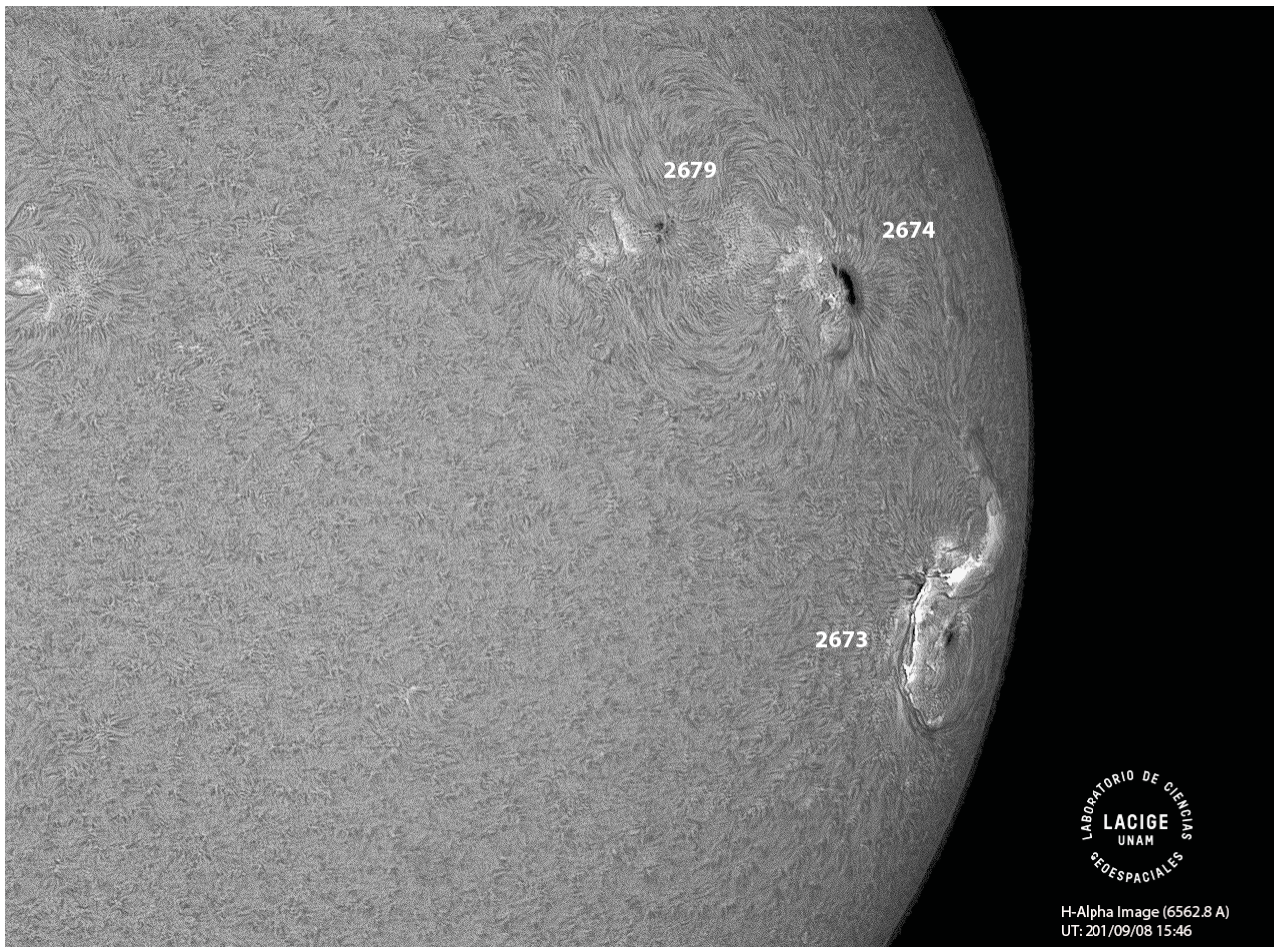


Figura 5.5: Fotografía obtenida el 08 de septiembre de 2017 a las 10:46 tiempo local.

Como se puede ver en la figura 5.5 hay varias regiones activas (por lo menos 3 en la imagen) en el disco solar. La región activa AR2673 se observa en la región central del disco, prácticamente llegando al limbo solar.

Si se observa la figura 5.7 se puede ver que la temperatura promedio durante la observación fue de 17.6°C , con una humedad de 70% y una velocidad de viento máxima promedio de 5.2m/s. El factor que podría afectar más la imagen en este caso es la humedad que tenía un porcentaje muy alto ese día, hay que recordar que si el porcentaje de humedad llega al 80% o más, no se puede abrir el domo del observatorio, sin embargo, es probable que la baja temperatura haya sido lo que ayudó a estabilizar la atmósfera y reducir los efectos de seeing para obtener una imagen bien enfocada y donde las estructuras se observan claramente. Al mismo tiempo, si se observa la figura 5.6 se puede ver que durante todo el periodo de observación la radiación promedio fue en aumento, lo que supone un cielo despejado (o muy despejado).

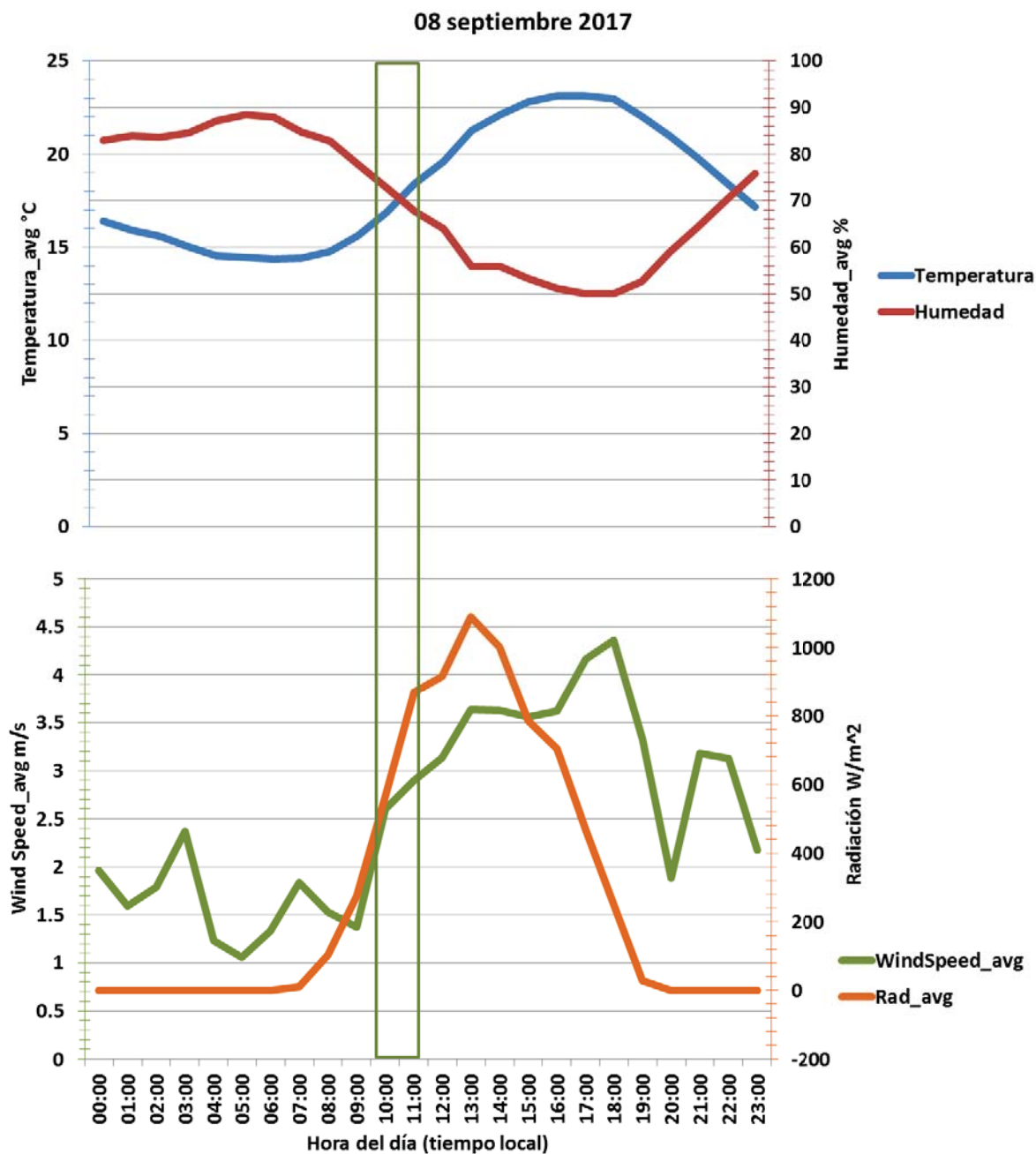


Figura 5.6: Gráficas de las condiciones atmosféricas del 08 de septiembre del 2017. Arriba: Temperatura vs. Humedad. Abajo: Velocidad de viento promedio vs. Máxima velocidad de viento. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde indica el periodo de observación.

TIME STAMP (dd-mm-yyyy) HH:MM:SS)	Temp_Avg (°C)	RH_Avg (%)	WSpeed_Avg (m/s)	Rain_Tot (mm)	Press_Avg (hPa)	Rad_Avg (W/m ²)
08/09/2017 10:00	16.89	72.7	2.598	0	807.2	564.6
08/09/2017 11:00	18.42	67.7	2.897	0	807.1	868.6
	17.655	70.2	2.7475	0	807.15	716.6

Figura 5.7: Datos del periodo de obtención de la imagen 5.5. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM.

Ahora, si se hace el análisis de imagen con el software SaoImage DS9 se puede obtener la distancia entre las manchas solares.

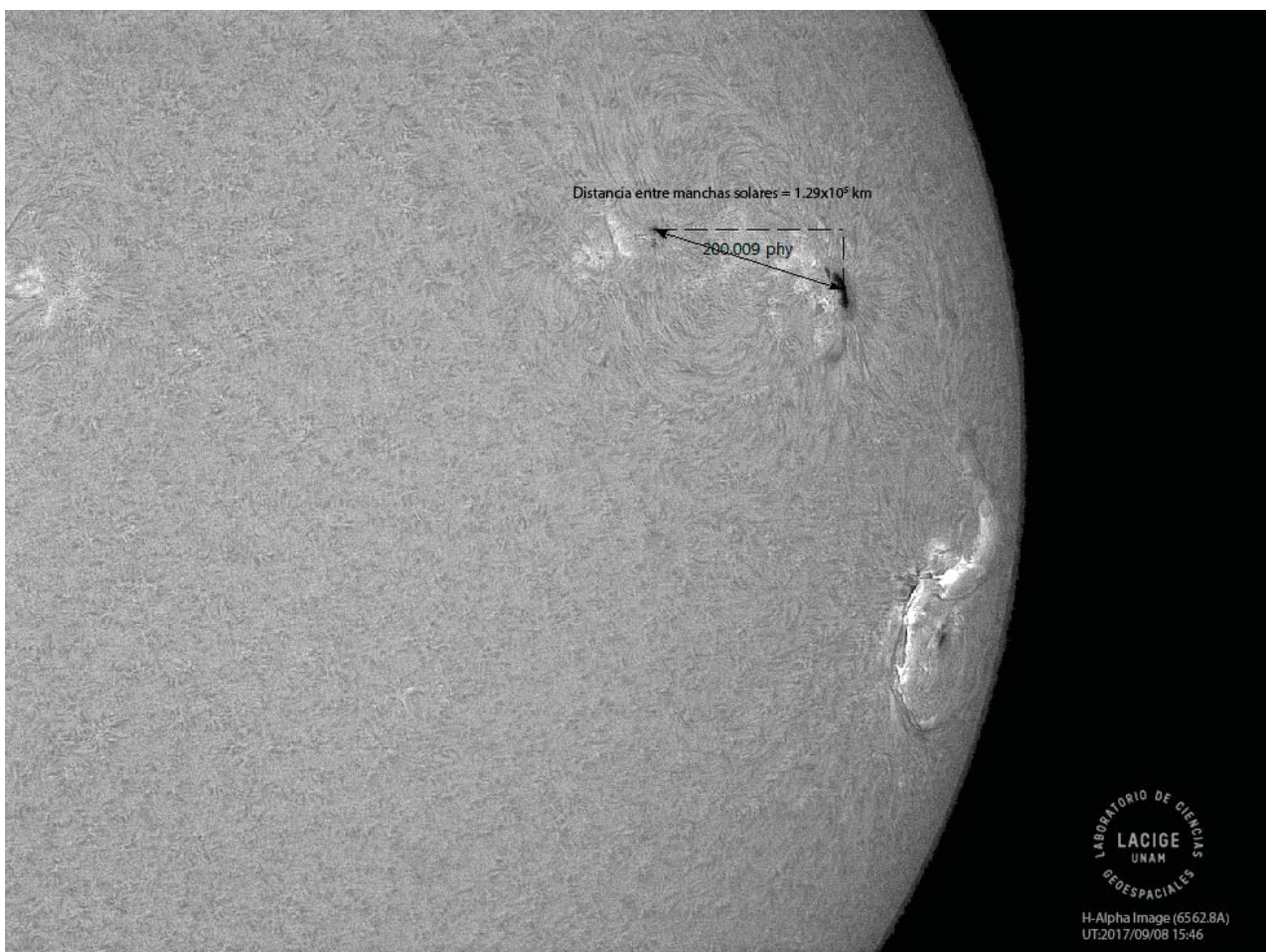


Figura 5.8: Fotografía del día 08 de septiembre indicando la distancia entre dos manchas solares observadas ese día.

Si se observa la figura 5.8 se puede notar que la distancia entre manchas es de 200 píxeles, y la escala de placa de la imagen es $s = 0.97$. Utilizando la ec. 3.1 y resolviendo la relación 5.2 se obtienen la medida observada en la tabla 5.3 la cual corresponde a $\sim 20\%$ del radio solar. Con este tipo de medidas

es posible dimensionar mejor las escalas con las que se trabaja cuando se trata del Sol. En el trabajo de González-Esparza J. A. et al., (2018), se hace una discusión a mayor profundidad de ésta imagen y el contexto presentado por nuestra estrella.

Mediciones 08 septiembre 2017		
	Minutos de arco	Kilómetros
Distancia entre manchas	3.23'	1.4×10^5 km

Tabla 5.3: Resultados de las medidas realizadas para la imagen del 08 de septiembre de 2017.

5.2.2. 18/septiembre/2017

En la imagen del 18 de septiembre se observa la región activa 2680 en la región oeste del disco solar mientras que, en la región este se observa un filamento solar.

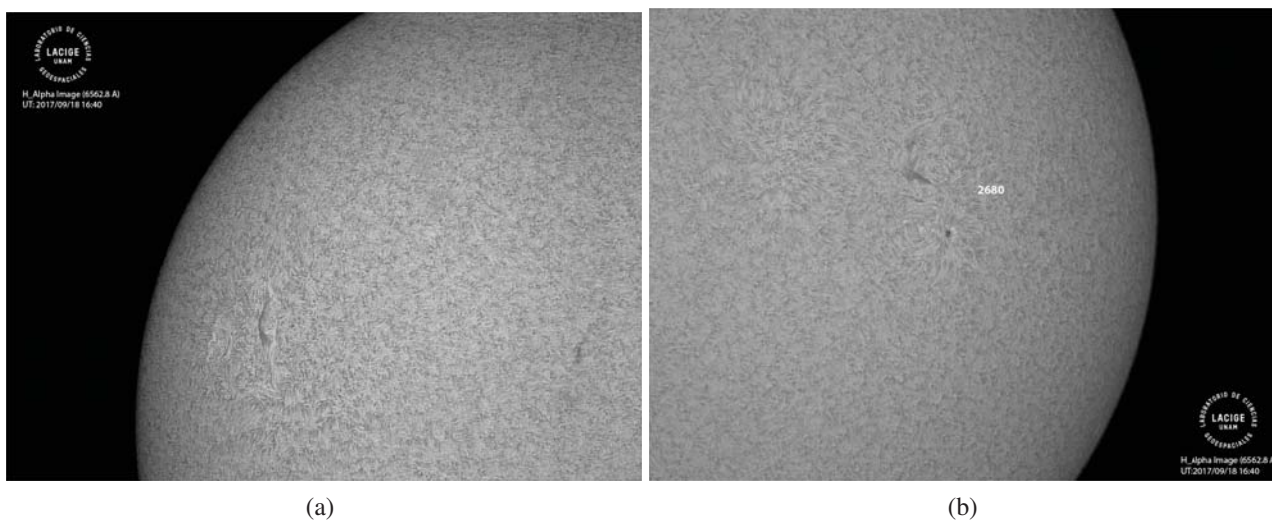


Figura 5.9: Imágenes obtenidas el 18 de septiembre de 2017 a las: a) 11:40 tiempo local y b) 11:42 tiempo local.

Como se puede observar en la figura 5.11 la temperatura promedio de ese día fue de 21°C mientras que la humedad fue de 58% y la velocidad promedio del viento fue de 2.1 m/s. Es notable que la temperatura, sin ser considerablemente alta, afectó un poco la calidad de la imagen que se observa un tanto desenfocada o borrosa en los bordes en contraste con la imagen del 08 de septiembre que está prácticamente perfectamente enfocada. Esto también puede deberse al porcentaje de humedad de ese día. Además en la figura 5.10 se puede observar que durante el periodo de observación la velocidad del viento fue en aumento lo que puede causar no sólo que las nubes se muevan pero también, que el telescopio vibre ocasionando un ligero desenfoco en la fotografía.

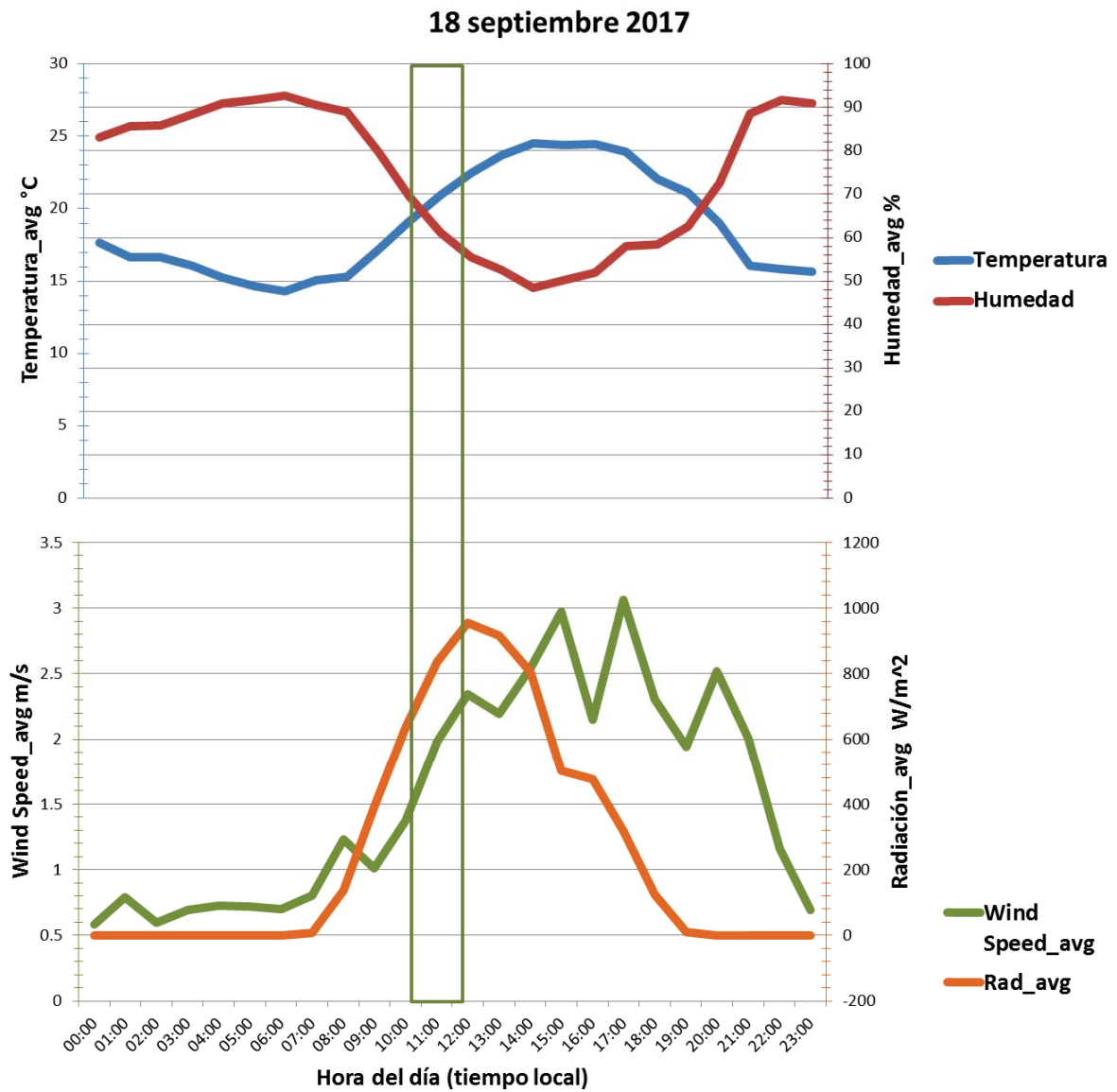


Figura 5.10: Gráficas de las condiciones atmosféricas del 18 de septiembre del 2017. a) Temperatura vs. Humedad. b) Velocidad de viento promedio vs. Máxima velocidad de viento. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde indica el periodo de observación.

TIME STAMP (dd-mm-yyyy) HH:MM:SS)	Temp_Avg (°C)	RH_Avg (%)	WSpeed_Avg (m/s)	WSpeed_Max (m/s)	WDir_Avg (deg)	Rain_Tot (mm)	Press_Avg (hPa)	Rad_Avg (W/m ²)
18/09/2017 11:00	20.91	61.2	1.982	5.32	15.7	0	808	835.5
18/09/2017 12:00	22.46	55.5	2.345	4.75	26.4	0	807.4	954
	21.685	58.35	2.1635	5.035	21.05	0	807.7	894.75

Figura 5.11: Datos del periodo de obtención de la imagen 5.9. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM.

Para las imágenes del 18 de septiembre (figura 5.9) se realizaron las medidas de las longitudes de dos filamentos y la medida de los radios interior y exterior (umbra y penumbra) de la mancha solar. Los resultados son como los muestra la tabla 5.4.

Mediciones 18 septiembre 2017: Filamentos y Mancha			
	Píxeles	Minutos de arco	Kilómetros
Para los filamentos:			
Longitud del filamento 1 (Figura 5.9a)	114.79 píxeles	1.85'	8.5×10^4 km
Longitud del filamento 2 (Figura 5.9b)	70.06 píxeles	1.132'	5.2×10^4 km
Para la mancha:			
Radio Umbra (interior)	8.321 píxeles	0.134'	6.16×10^3 km
Radio Penumbra (exterior)	16.64 píxeles	0.269'	12×10^3 km

Tabla 5.4: Resultados de las medidas realizadas para la imagen del 18 de septiembre de 2017.

Como se puede observar en la tabla los radios de la umbra y penumbra de la mancha solar son comparables con el radio y el diámetro de la Tierra (6.371×10^3 km y 12.742×10^3 km, respectivamente), esto da idea y ayuda a visualizar como las distancias y tamaños en un cuerpo celeste como el Sol son mucho más grandes de lo que se está acostumbrado en un planeta como la Tierra.

5.2.3. 27/septiembre/2017

El 27 de septiembre se observaron dos manchas solares en la región este del disco solar, también, se pudieron observar dos filamentos en zonas cercanas a las manchas.



Figura 5.12: Fotografía obtenida el 27 de septiembre de 2017 a las 13:06 tiempo local.

Como se observa en la figura 5.13 al momento de realizar la observación entre las 13:00 y las 14:00 horas, el porcentaje de humedad estaba subiendo. También, se puede observar que la radiación disminuyó durante todo el periodo mientras que la velocidad del viento fue en aumento. La disminución de la radiación se puede entender como un aumento en la nubosidad, cuestión que puede reducir significativamente la ventana observación. Sin embargo, la imagen 5.12 sugiere condiciones de observación favorables, es probable que esto se deba a que el aumento en la velocidad del viento ayudo a que la temperatura disminuyera, hasta quedar en un promedio de 21°C durante el periodo, reduciendo así los efectos de seeing y también a que las nubes estuvieran en constante movimiento abriendo una ventana de oportunidad para obtener la fotografía.

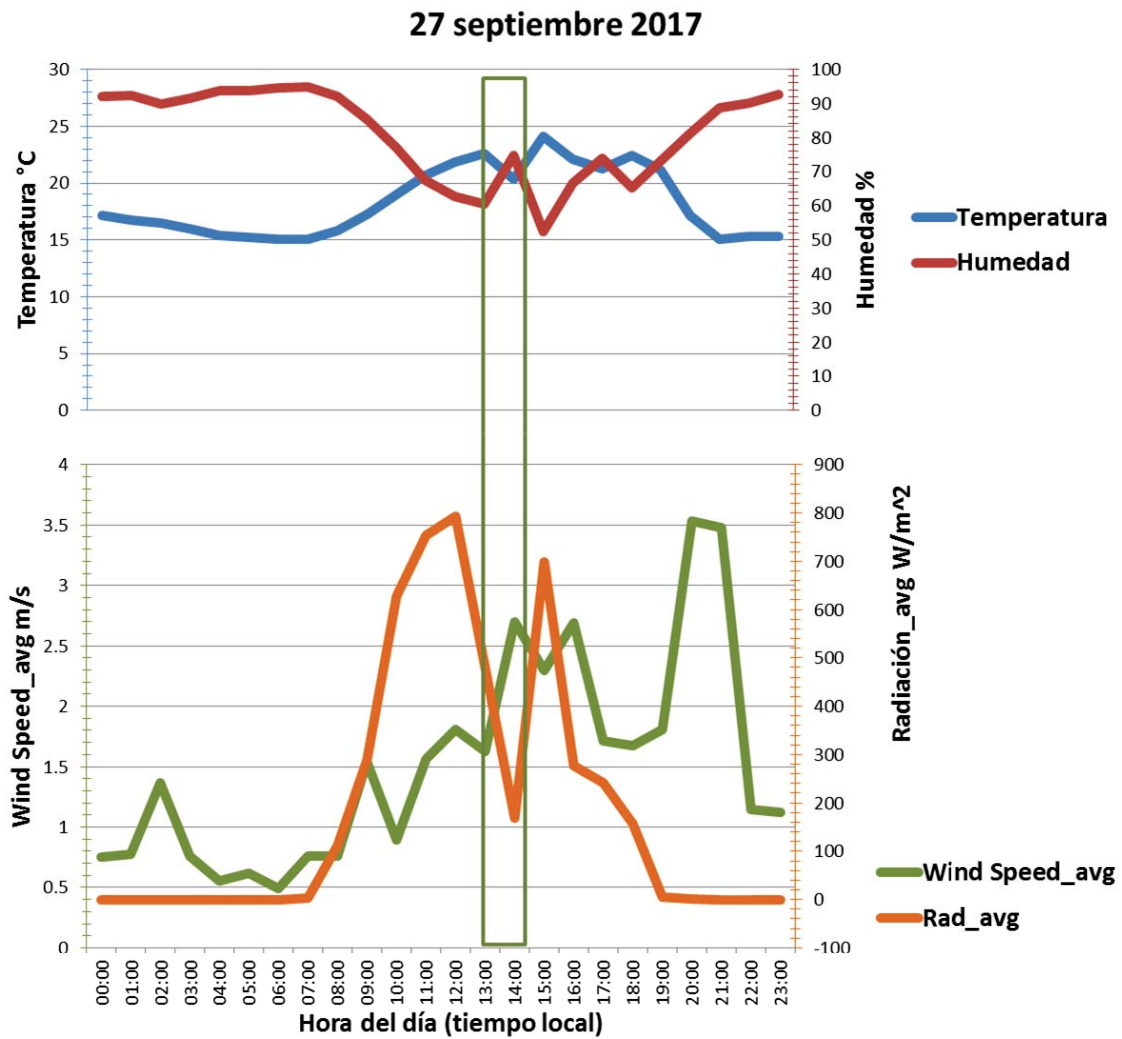


Figura 5.13: Gráficas de las condiciones atmosféricas del 27 de septiembre del 2017. Arriba: Temperatura vs. Humedad. Abajo: Velocidad de viento promedio vs. Radiación. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde corresponde al periodo de observación.

TIME STAMP (dd-mm-yyyy) HH:MM:SS	Temp_Avg (°C)	RH_Avg (%)	WSpeed_Avg (m/s)	WSpeed_Max (m/s)	WDir_Avg (deg)	Rain_Tot (mm)
27/09/2017 13:00	22.63	60.4	1.627	4.58	332	0
27/09/2017 14:00	20.34	74.8	2.701	5.94	172.9	0
	21.485	67.6	2.164	5.26	252.45	0

Figura 5.14: Datos del periodo de obtención de la imagen 5.12. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM.

Las medidas realizadas en esta imagen fueron la distancia entre las manchas solares, así como la longitud de los filamentos como se puede ver en la imagen 5.15.

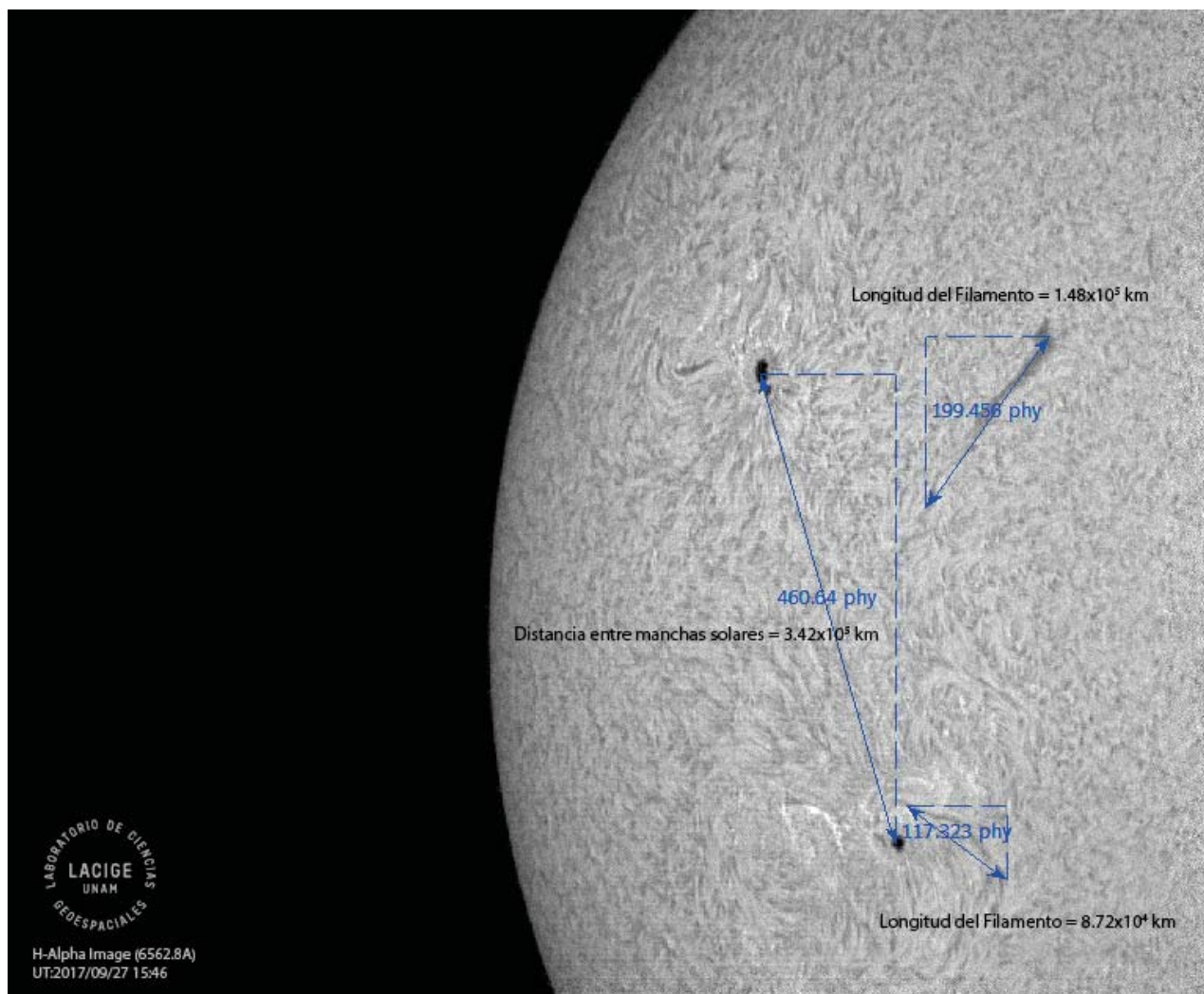


Figura 5.15: Fotografía del día 27 de septiembre indicando la distancia entre dos manchas solares observadas ese día, así como la longitud de dos filamentos de distintos tamaños.

Los resultados son como se muestra en la tabla 5.5. Se puede observar como todas estas medidas ya están incorporadas en la figura 5.15. Es posible comparar estos resultados con un dato conocido, por ejemplo el diámetro de la tierra, que es de 12.742×10^3 km, y es sencillo darse cuenta que las estructuras filamentosas, por ejemplo, son varios órdenes de magnitud más grandes que el diámetro de nuestro planeta, en este caso 1 o 2 órdenes de magnitud más grandes.

5.3. Octubre de 2017

5.3.1. 02/octubre/2017

El 02 de octubre de 2017 se pudieron observar dos manchas solares en la región oeste del disco, pertenecientes a las regiones activas 2683 y 2682, respectivamente. También, se pudo observar un filamento de gran tamaño entre las dos manchas solares así como dos más de menor tamaño en la zona cercana a

Mediciones 27 septiembre 2017: Filamentos y Mancha			
	Píxeles	Minutos de arco	Kilómetros
Para los filamentos:			
Longitud del filamento superior	199.48 píxeles	3.224'	1.48×10^5 km
Longitud del filamento inferior	117.32 píxeles	1.896'	8.72×10^4 km
Para las manchas:			
Distancia entre manchas	460.64 píxeles	7.446'	3.42×10^5 km

Tabla 5.5: Resultados de las medidas realizadas para la imagen del 27 de septiembre de 2017.

la región 2683, como se puede ver en la figura 5.16.



Figura 5.16: Fotografía obtenida el 02 de octubre de 2017 a las 13:29 tiempo local.

La figura 5.18 indica que la temperatura promedio de ese día fue de $21.8^{\circ}\text{C} \sim 22^{\circ}\text{C}$ con una humedad de 60%. La temperatura del día se considera templada es decir, ni muy alta ni muy baja, pero, el nivel de humedad sí puede considerarse como alto. Eso, aunado a la velocidad máxima promedio del viento que fue de $\sim 6\text{m/s}$, tuvo consecuencias en cuanto a la turbulencia atmosférica que pueden verse en la fotografía final.

Si se observa la imagen 5.16 se puede notar como la mayor parte del disco se ve borroso o desenfocado y realmente, la única región donde se pueden observar bien las estructuras es justamente la zona en la que se sitúan las regiones activas, ahí se pueden observar claramente las espículas así como las manchas solares y los filamentos.

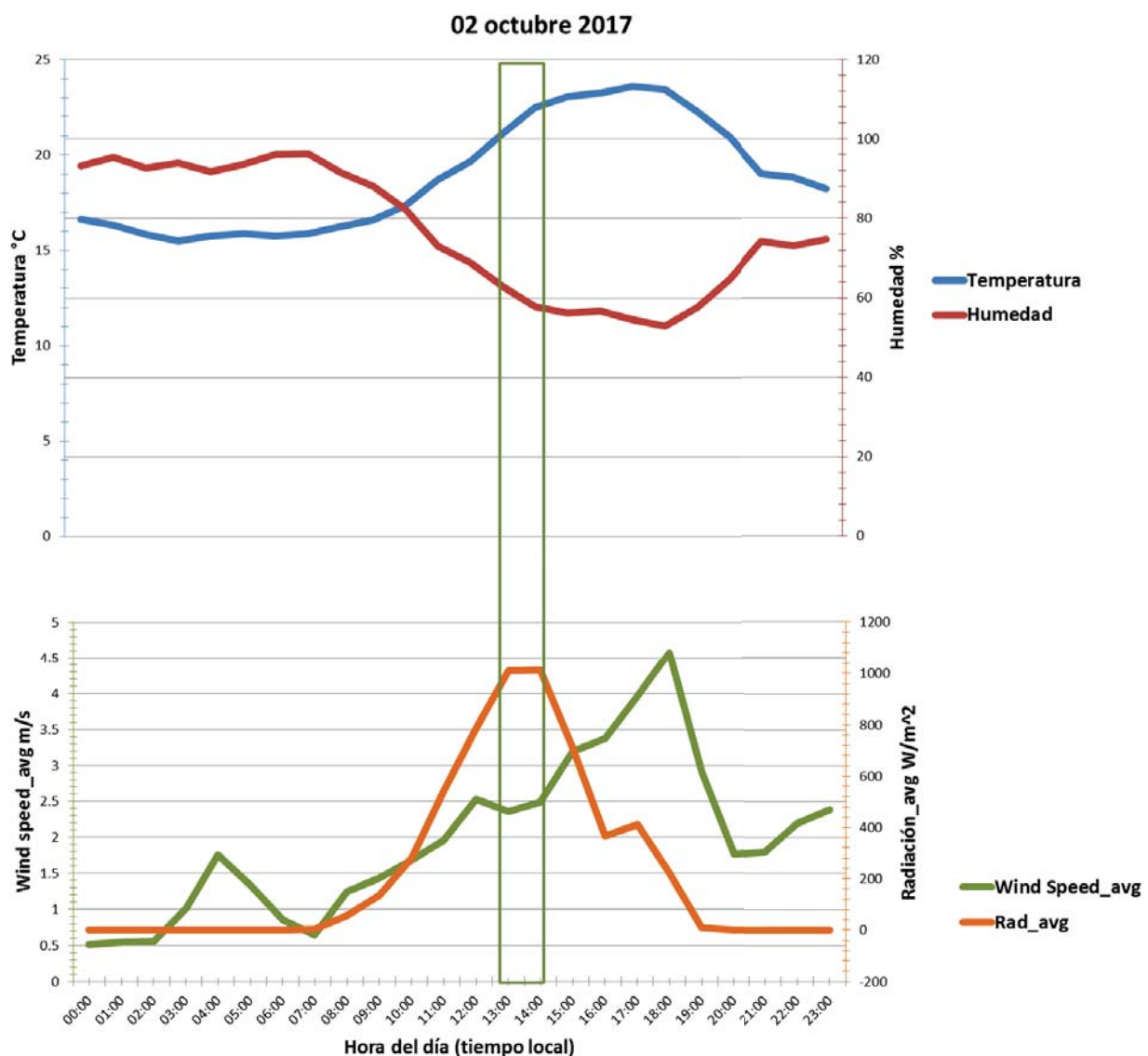


Figura 5.17: Gráficas de las condiciones atmosféricas del 02 de octubre del 2017. Arriba: Temperatura vs. Humedad. Abajo: Velocidad de viento promedio vs. Radiación promedio. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde corresponde al periodo de observación.

TIME STAMP (dd-mm-yyyy) HH:MM:SS)	Temp_Avg (°C)	RH_Avg (%)	WSpeed_Avg (m/s)	WSpeed_Max (m/s)	WDir_Avg (deg)	Rain_Tot (mm)	Press_Avg (hPa)	Rad_Avg (W/m ²)
02/10/2017 13:00	21.11	62.92	2.362	5.72	29	0	803.4	1007.4
02/10/2017 14:00	22.5	57.86	2.488	6.2	38.5	0	802.2	1010
	21.805	60.39	2.425	5.96	33.75	0	802.8	1008.7

Figura 5.18: Datos del periodo de obtención de la imagen. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM.

Al final del capítulo 3 se realizó la medida de la distancia entre las manchas solares observadas en la imagen 5.16 sin embargo, no se obtuvo esa distancia en km. Sabemos por el cálculo realizado con la ec. 3.6 que la distancia entre las manchas es de 7.3 minutos de arco. Se resuelve la relación 5.2 y se obtiene que la distancia entre manchas es de: 3.3×10^5 km.

Ahora, esa distancia puede observarse en la figura 5.19a, sin embargo, se realizaron algunas otras medidas sobre la misma imagen, que pueden verse en la figura 5.19b y cuyos resultados se observan en la tabla 5.7. De dicha tabla, se puede ver la longitud del filamento es aproximadamente una tercera parte del radio solar, el radio interior de la mancha superior es, prácticamente del tamaño del radio terrestre mientras que el radio exterior de la misma mancha es ~ 2250 km más grande que el diámetro de la Tierra.

Mediciones 02 octubre 2017: Filamento y Manchas			
	Píxeles	Minutos de arco	Kilómetros
Para el filamento:			
Longitud del filamento (entre manchas)	29.38 píxeles	4.75'	2.18×10^5 km
Para la mancha superior:			
Radio Umbra (interior)	8.65 píxeles	0.14'	6.4×10^3 km
Radio Penumbra (exterior)	20.41 píxeles	0.33'	15×10^3 km
Para la mancha inferior:			
Radio Umbra (interior)	4.94 píxeles	0.08'	3.6×10^3 km
Radio Penumbra (exterior)	12.98 píxeles	0.21'	9.6×10^3 km

Tabla 5.6: Resultados de las medidas realizadas para la imagen del 02 de octubre de 2017.

5.3.2. 20 octubre 2017

El 20 de octubre en la región oeste del Sol se observó un filamento mientras que en el limbo solar este se pudo observar una gran prominencia (figura 5.20b). Para realizar la imagen anteriormente mencionada se tuvieron que obtener dos fotografías que después fueron juntadas para crear lo que se llama “imagen compuesta”. Este tipo de imagen se construye obteniendo una fotografía con un nivel de

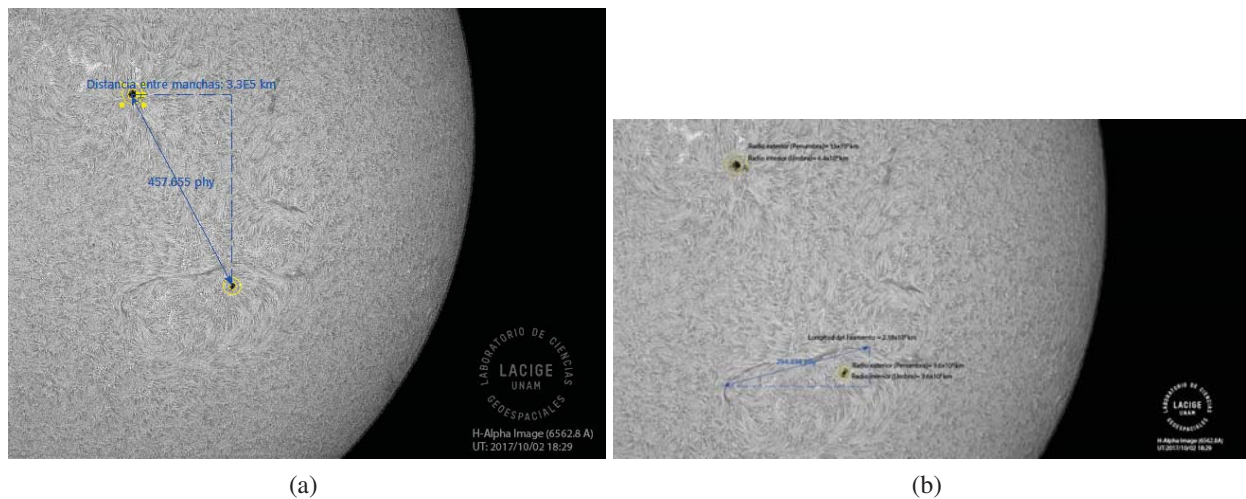


Figura 5.19: Imagen integrada con las medidas realizadas para el 02 octubre de 2018. a) Distancia entre manchas solares. b) Medidas del radio de la umbra y penumbra de cada mancha y medida de la longitud del filamento.

exposición muy bajo, es decir, un fotografía oscura y una fotografía, exactamente igual a la primera, tomada con un nivel de exposición normal.



Figura 5.20: Fotografías obtenidas el 20 de octubre de 2017 a las: a) 12:08 tiempo local. b) 12:09 tiempo local.

Una de las imágenes debe ser oscura de modo que, cuando se procesa o edita en Photoshop, se le pueda subir el brillo lo suficiente como para que se alcancen a distinguir estructuras en la atmósfera solar, que, como se mencionó anteriormente, es muy tenue. La fotografía “normal” se utiliza para sobreponer el disco solar en la primera imagen de modo que no quede demasiado brillante, es decir, que al final se obtenga una imagen donde se pueda observar la atmósfera brillante pero el disco tenga una tonalidad normal. Además, esto es útil cuando se quiere agregar color a la foto ya que, si se colorea la imagen que tiene mucho brillo, esta queda muy rojiza o amarilla y no se ve bien. Se puede observar en

la figura 5.22 que la temperatura era aproximadamente de 22°C y el porcentaje de humedad de 53%, sin embargo, en la figura 5.21 se observa como la humedad comenzó a disminuir. Dentro de la misma figura se puede ver como la velocidad del viento al principio del periodo de observación disminuyó pero empezó a aumentar a medida que pasó el tiempo, lo mismo sucedió con la temperatura, la cual, durante el periodo de la observación, solo fue en aumento.

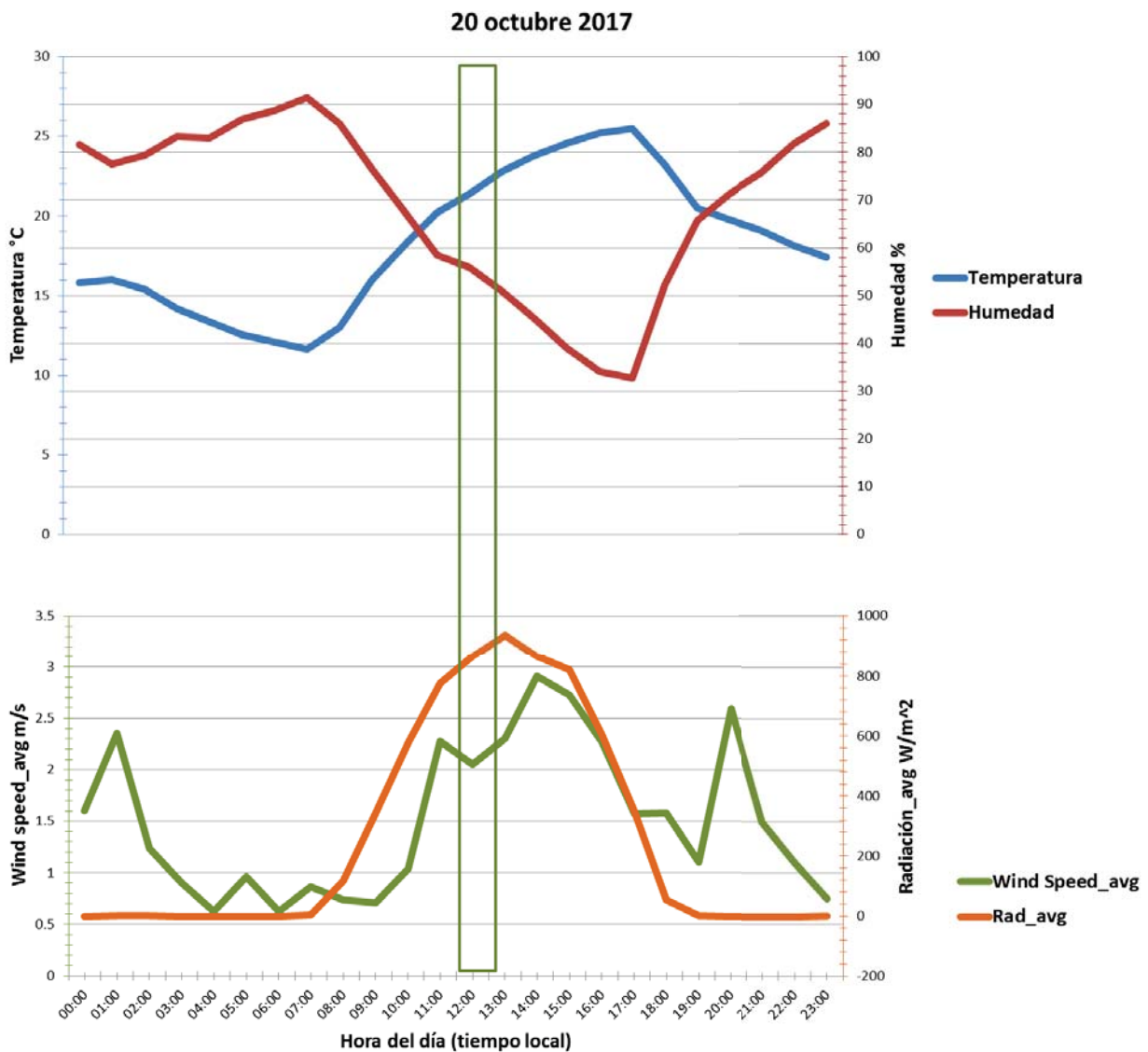


Figura 5.21: Gráficas de las condiciones atmosféricas del 20 de octubre del 2017. Arriba: Temperatura vs. Humedad. Abajo: Velocidad de viento promedio vs. Radiación promedio. Datos cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. El recuadro verde corresponde al periodo de observación.

TIME STAMP (dd-mm-yyyy) HH:MM:SS)	Temp_Avg (°C)	RH_Avg (%)	WSpeed_A vg (m/s)	WSpeed_Max (m/s)	WDir_Avg (deg)	Rain_Tot (mm)	Press_Avg (hPa)	Rad_Avg (W/m^2)
20/10/2017 12:00	21.42	55.85	2.054	4.32	28.1	0	807.1	865.2
20/10/2017 13:00	22.81	50.86	2.304	5.89	49.1	0	806.3	936.3
	22.115	53.355	2.179	5.105	38.6	0	806.7	900.75

Figura 5.22: Datos del periodo de obtención de la imagen. La tabla muestra los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima y cantidad de lluvia total. Las celdas marcadas en rosa indican el promedio de cada conjunto de datos. Cortesía de la estación Morelia de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM.

Los resultados de las medidas para estas imágenes son las siguientes:

Mediciones 20 octubre 2017: Filamento y Prominencia			
	Píxeles	Minutos de arco	Kilómetros
Para el filamento:			
Longitud del filamento	347.01 píxeles	5.610'	2.58×10^5 km
Para la prominencia:			
Longitud horizontal de la prominencia	747.42 píxeles	4.00'	1.8×10^5 km

Tabla 5.7: Resultados de las medidas realizadas para la imagen del 02 de octubre de 2017.

De nuevo, se puede ver como la longitud del filamento es aproximadamente una tercera parte del radio solar. Este dato, junto con la medida del filamento observado el 02 de octubre, dejan ver cómo las estructuras filamentosarias del Sol son realmente grandes aunque en las imágenes este tamaño no sea tan claro de ver.

La imagen 5.23b está a color ya que hay que recordar que el análisis y las medidas se realizan con el archivo FITS original, es decir, con el archivo sin ningún tipo de retoque por lo que la prominencia en el limbo solar era difícil de ver. El software SaoImage cuenta con una función para cambiar el color de la imagen según distintos parámetros o según cierta información contenida en el archivo ya que hay que recordar que un FITS no es sólo una imagen, y es capaz de guardar información diferente sobre la misma dentro de un mismo archivo. En este caso se cambió la configuración de color de escala de grises a una de calor que le dio a la fotografía una tonalidad amarilla y permitió observar la prominencia en el limbo.

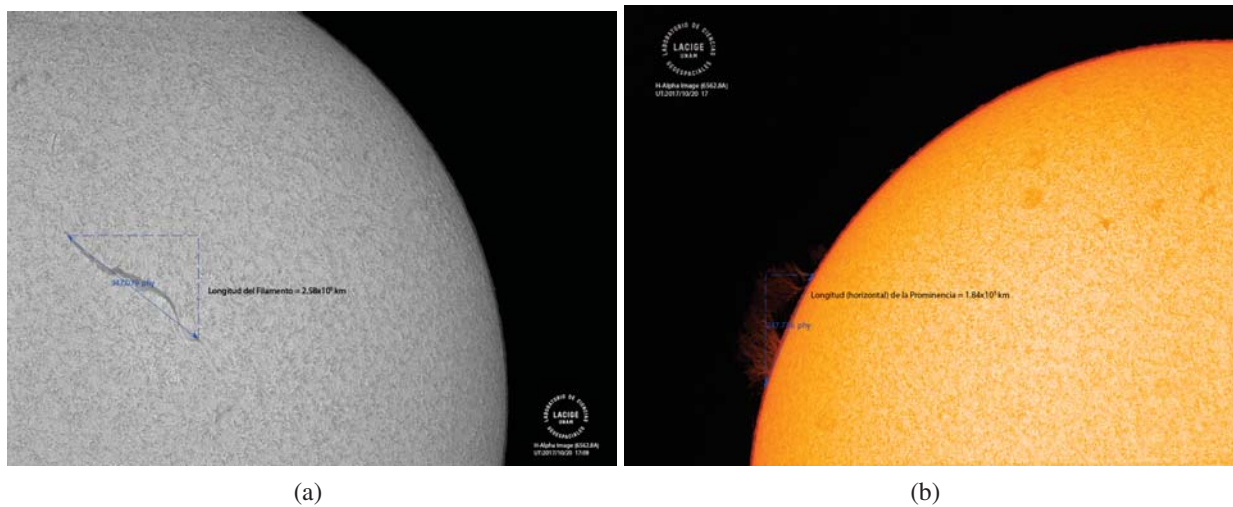


Figura 5.23: Imagen integrada con las medidas realizadas para la fotografía del 02 de octubre. a) Distancia entre manchas solares. b) Medidas del radio de la umbra y la penumbra de cada mancha.

5.4. Cálculo de la rotación solar

Como se ha visto a lo largo de este trabajo, las imágenes solares con ayuda del software SaoImage pueden ser útiles para la obtención de medidas de estructuras solares. Sin embargo, también pueden ser utilizadas como ejercicio para complementar la comprensión de otros conceptos sobre el Sol, por ejemplo: la rotación solar.

Como se mencionó en el capítulo 1, el Sol presenta una rotación diferencial, es decir, no rota uniformemente como la Tierra. A continuación se presenta el ejercicio del cálculo de la rotación solar por medio del movimiento de las manchas solares ¹.

Durante el mes de agosto se pudieron obtener fotografías donde aparecían manchas solares por varios días consecutivos. Del 02 al 08 de agosto las imágenes mostraron el avance de la región activa AR2670 que con la que se realizará el ejercicio.

El software SaoImage DS9 permite abrir varios cuadros para poder visualizar imágenes diferentes simultáneamente (ver Figura 5.24). Entonces, se seleccionan las imágenes FITS de los días antes mencionados y en lo que consiste el ejercicio es en trazar una región “regla” (véase Capítulo 3) desde el limbo solar izquierdo hasta la mancha solar para cada día de observación.

Como es de esperarse el valor de los píxeles recorridos por la mancha a partir de la primera imagen va a ir aumentando, el siguiente paso es calcular cuánto avanzó cada día la mancha, para esto simplemente hay que hacer una resta de entre los valores que se obtuvieron con el software y después convertir eso a

¹Para este ejercicio se tomo como analogía la práctica de la rotación solar “Laboratory Exercises in Astronomy- The Rotation of the sun” realizada por Owen Gingerich y Richard Tresch-Fienberg del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.

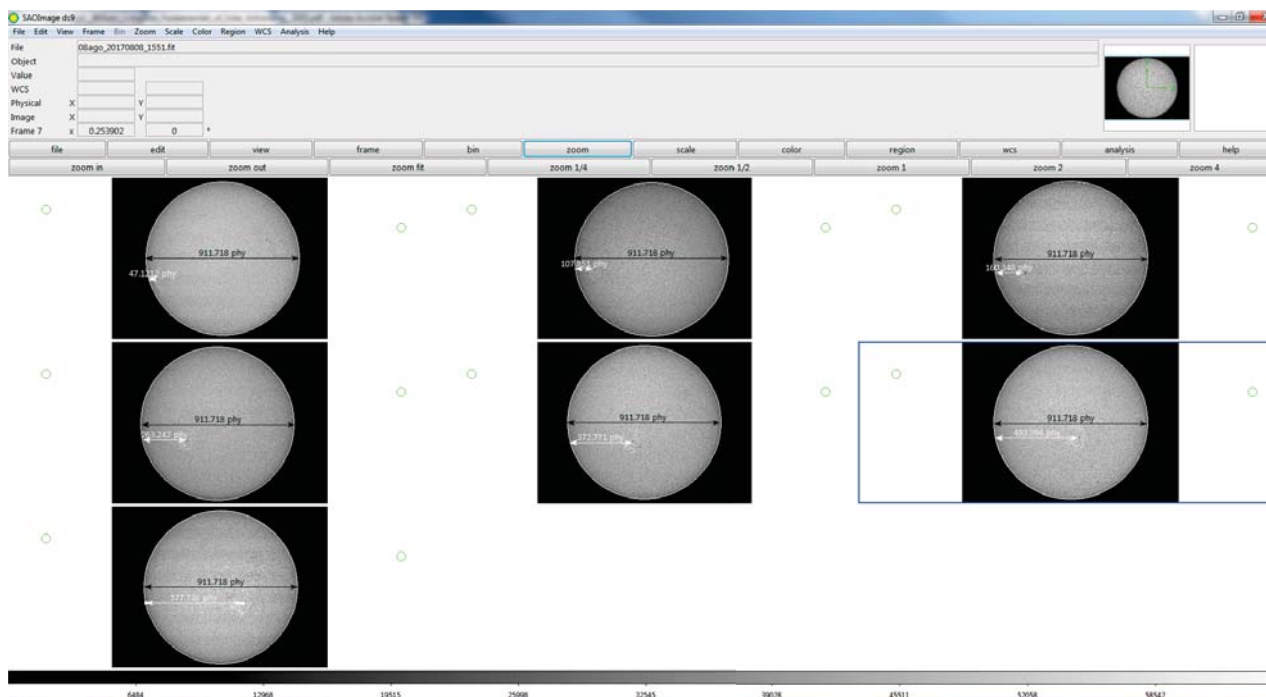


Figura 5.24: Visualización simultánea de las imágenes obtenidas del 02 al 08 de agosto de 2017. Se puede observar la distancia recorrida (en píxeles) de la mancha indicada por la regla dibujada en cada imagen.

minutos de arco utilizando el valor de la escala de placa de la imagen que en este caso es de $1.94''/\text{píxel}$. Los valores de estos cálculos se observan en la Tabla 5.8.

Avance de mancha solar del 02 al 08 de agosto 2017		
Día	Píxeles	Minutos de Arco
02 ago	47.12	1.52
Del 02 al 03 ago	60.73	1.96'
Del 03 al 04 ago	62.91	2.03
Del 04 al 05 ago	92.48	2.99'
Del 05 al 06 ago	109.53	3.54'
Del 06 al 07 ago	120.62	3.90'
Del 07 al 08 ago	84.33	2.72'
Promedio	82.53 píxeles/día	2.66' /día

Tabla 5.8: Avance de la mancha solar del 02 al 08 de agosto 2017.

Ya que se tienen los resultados es posible calcular el periodo sinódico de rotación ya que hay que recordar que las imágenes fueron obtenidas desde un planeta en movimiento y no de un punto “fijo” en el espacio relativo a las estrellas. El periodo sinódico se refiere al periodo aparente de rotación solar visto desde la Tierra, un planeta en movimiento.

Para calcular el periodo sinódico (S) se utiliza la siguiente formula:

$$S = 60' / (\text{avanceprom} / \text{dia})', \quad (5.5)$$

donde los 60' corresponden al diámetro solar dos veces, es decir, para una vuelta completa y el valor “(avance promedio/día)” corresponde al avance promedio de la mancha en minutos de arco.

Entonces, se tiene que el periodo sinódico es:

$$S = 60' / 2.66 \text{ [}' / \text{dia}] = 22.5 \text{ dias}. \quad (5.6)$$

Con este valor ya se puede calcular el periodo sideral que es el periodo “verdadero” de rotación, en relación a las estrellas, las cuales se consideran puntos fijos en el espacio.

El periodo sideral (P) se obtiene de la siguiente manera:

$$P = (S \cdot E) / (S + E), \quad (5.7)$$

donde E es igual a 365.25 días (un año sideral terrestre). Entonces:

$$P = (22.5 \cdot 365.25) / (22.5 + 365.25) = 21.96 \text{ dias}. \quad (5.8)$$

El valor del periodo sinódico y del periodo sideral no debe variar por más de un día.


De este ejercicio se puede notar que las manchas solares no avanzan lo mismo cada día y que a medida que se acercan al centro del disco solar se mueven más rápido. También, es importante notar que el cálculo no corresponde exactamente con el valor antes mencionado en el Capítulo 1 de ~25 días de rotación en el ecuador (aunque sí se encuentra en el orden de magnitud esperado), esto puede ser gracias a varios factores como que: la mancha no se encuentra exactamente en el ecuador; no se está tomando en cuenta la geometría del Sol (se está considerando como una proyección plana para esta primera aproximación); se está trabajando con imágenes donde no hay una delimitación clara entre píxel y píxel por lo que las medidas de la distancia recorrida por la mancha cada día pueden variar y, por lo mismo, puede variar el límite hasta donde se considera tanto la mancha, es decir desde qué parte de la mancha se comienza a medir, así como el limbo solar.

Ahora, este cálculo simplemente nos permite darnos cuenta del periodo de rotación de la mancha a cierta latitud, para realmente poder obtener la rotación diferencial del Sol habría que seguir manchas solares a diferentes latitudes y en distintas fases del ciclo solar.

5.5. Utilidad de las Imágenes


Las fotografías aquí presentadas, así como algunas otras del acervo del Laboratorio de Ciencias Geoespaciales han sido utilizadas con fines tanto académicos como divulgativos.

La fotografía del día del eclipse, específicamente la obtenida a las 13:09 hrs tiempo local (18:09hrs TU), fue utilizada para un póster como parte del proyecto “Obtención de imágenes solares en el LACIGE para proveer de información de actividad solar al LANCE ” realizado por Pedro Reyes Marín, Mario Rodríguez, Julio Mejía y Oyuki Chang pertenecientes a la facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la UMSNH, la ENES Morelia UNAM y la Unidad Michoacán del Instituto de Geofísica también de la UNAM. Dicho póster fue presentado en el Congreso Nacional de Física 2017. Así mismo la imagen obtenida el 08 de septiembre a las 10:46 tiempo local (15:46 TU) también fue utilizada en el póster.



FisMat

Obtención de imágenes solares en el LACIGE para proveer información de actividad solar al LANCE




Pedro Alberto Reyes Marín¹ Julio César Mejía Ambríz² Mario Rodríguez Martínez³ Oyuki Chang⁴

I. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas – UMSNH
II. CONACYT, LANCE, Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán – UNAM
III. Laboratorio de Ciencias Geoespaciales, Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia – UNAM
IV. LANCE, Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán – UNAM
Contacto: pedro_alberto.rm@hotmail.com


Introducción

El Laboratorio de Ciencias Geoespaciales (LACIGE) [www.lacige.unam.mx] de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES-UNAM) Unidad Morelia, cuenta con un observatorio dedicado a la obtención de imágenes solares. El laboratorio tiene las condiciones necesarias para realizar la observación y almacenamiento de imágenes diarias para el monitoreo de la cromosfera del Sol en H- α (6562.8 Å). El observatorio está conformado por 2 telescopios (un refractor de 3.5" y un telescopio reflector de 14"), así como una cámara Celestron Skyris 445M monocromática. Las imágenes obtenidas son procesadas y analizadas para ubicar en detalle regiones activas en nuestra estrella, las cuales suelen originar tormentas solares. Dada la dependencia tecnológica actual de la sociedad y la vulnerabilidad de algunas tecnologías ante tormentas solares intensas, hoy más que antes, es importante estudiar y monitorear la actividad solar. En este contexto de estudio, el LACIGE tiene una colaboración directa con el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE) [www.lance.unam.mx], en la que diariamente se obtienen estas imágenes en tiempo real para tener información del estado actual de la actividad en la atmósfera solar. Por su parte, el LANCE es la fuente oficial de información nacional sobre el estado del clima espacial y el desarrollo de las tormentas geomagnéticas.

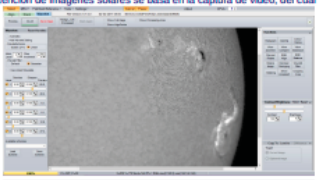


Metodología

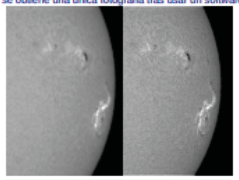
Una técnica para la obtención de imágenes solares se basa en la captura de video, del cual se obtiene una única fotografía tras usar un software que apila y alinea los mejores frames



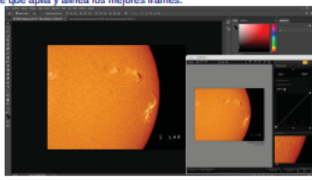
Se captura el video del Sol desde el observatorio solar (-30 s). El resultado es un video monocromático del Sol a 30 frames por segundo (fps).



Se procede a apilar y alinear los mejores frames (los menos movidos por turbulencia atmosférica) del video capturado anteriormente, para esto se usa algún software como Auto Staker o RegStax. En este caso usamos RegStax 6 por su automatización. El propósito del apilado es obtener una única imagen con la mejor calidad posible.



El resultado del apilado y alineado resalta los detalles de estructuras magnéticas que se forman en la cromosfera, como espículas, filamentos y protuberancias, así como la ubicación de regiones activas y manchas solares, lo cual facilitará el estudio de su estado.




Por último, se procede a colorear la imagen anterior, sin agregar detalles extra. Esto se puede hacer con algún software de diseño; en nuestro caso, Photoshop. Luego de la edición final, la imagen es dada a conocer al LANCE para ser reportada en informes semanales y especiales de clima espacial a través del Servicio de Clima Espacial México (SCISEMEX)[www.scisemex.unam.mx].

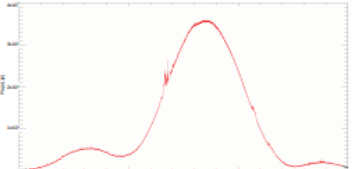
Aportaciones al LANCE

El aporte de información sobre el estado del Sol en H-Alpha (6562.8 Å), ayuda a analizar de mejor manera los datos obtenidos en el LANCE. El Sol tiene manifestaciones de energía conocidas como **tormentas solares**, las de mayor energía corresponden a **fulguraciones** y **eyecciones de masa coronal** (EMC). Estas manifestaciones tienen muchas veces su origen en grupos de **manchas solares**, donde se almacena una gran cantidad de energía magnética y suelen dar lugar a **regiones activas**. Estas regiones son sensibles de ser captadas en todo el espectro electromagnético, en particular, en longitudes de onda métricas, donde el Sol experimenta un aumento en su flujo y ruido (**fluctuaciones de flujo**) conocido como **estallido de radio tipo I**. El estudio de este ruido es un tema de investigación para entender la fuente de emisión solar no térmica más común [1].

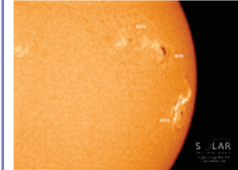
Se muestran observaciones simultáneas del Sol en H- α y radio a 140 MHz ($\lambda = 2.14m$) con el radiotelescopio MEXART [2,3].



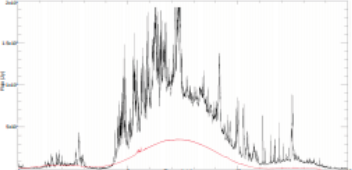
En la fotografía de la izquierda, una observación con el telescopio óptico sin regiones activas (Sol quieto) obtenida el 27 de julio 2017. A la derecha, el tránsito del Sol obtenido en la misma fecha con el MEXART usando un haz de 1" de ancho a potencia media.



En ausencia de regiones activas no se observa ruido de origen solar en radio y el flujo es aproximadamente constante (~36000 Jy a 140 MHz) al observar para distintos días [4].



En la fotografía de la izquierda, una observación con el telescopio óptico con 3 regiones activas obtenida el 8 de septiembre 2017. A la derecha, el tránsito del Sol obtenido en la misma fecha con el MEXART.



En presencia de regiones activas se observa ruido en radio y un aumento significativo del flujo, así como fluctuaciones de flujo, correspondiente a un estallido de radio tipo I.

Estamos en proceso de numerar las regiones activas de acuerdo a la estandarización internacional propuesta por la NOAA.

Conclusiones

En el observatorio SOLAR del LACIGE se obtienen imágenes diarias de la cromosfera solar para dar información al LANCE, de la actividad en tiempo real del clima espacial, con lo cual se elaboran y publican reportes dirigidos a instituciones gubernamentales y académicas en general.

De particular interés es el seguimiento de regiones activas, para identificar dónde pueden surgir tormentas solares.

El estudio de las regiones activas en radio puede dar lugar a entender el mecanismo de emisión de radio tipo I, esto lo podemos hacer con el análisis de observaciones solares del LACIGE y radio de MEXART.

Agradecimientos

Agradecemos a Aranza Fernández Álvarez del Castillo (OBSERVATORIO SOLAR – ENES Morelia – UNAM), por su colaboración con la obtención de las imágenes solares.

P. A. Reyes Marín agradece a la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM-UMSNH) por los apoyos recibidos para presentar este trabajo.

J. C. Mejía Ambríz y P. A. Reyes Marín agradecen a CONACYT por los fondos del proyecto de Ciencia Básica 256033 y al IGM por los apoyos recibidos.

M. Rodríguez Martínez agradece a los proyectos de infraestructura INFR-253911 del CONACYT y al proyecto PAPIIT RA107116 por el apoyo para la obtención de las imágenes solares y operación del Observatorio Solar en la ENES-UNAM Unidad Morelia.

Referencias

[1] Mercier, Subramanian, Chambe, Jandharan, The structure of solar radio noise storms, *Astronomy and Astrophysics*; 1-10, 576, 2015

[2] González-Esparza, Camilo, Andrade, Pérez-Enriquez, Kurtz, The MEXART interplanetary scintillation array in Mexico, *Geofísica Internacional* 61-73, 43, 2004.

[3] Mejía-Ambríz, Villanueva-Hernández, González-Esparza, Aguilar-Rodríguez, Joyakumar, IPS observations at the MEXART, *Solar physics*; 309-320, 265, 2010

[4] Berz, Radio emission of the quiet Sun; Springer; Cap. 4.1.1.6, 2009.0

Geofísica Nacional de Física 2017, Morelia, Micho.

Figura 5.25: Póster utilizado en el Congreso Nacional de Física 2017 donde se incluyen imágenes obtenidas en el Observatorio Solar de la ENES Morelia. Cortesía de Pedro Reyes Marín.

Algunas de las imágenes obtenidas en el mes de septiembre, incluyendo la del 08 de septiembre obtenida a las 10:46 tiempo local, serán incluidas en el trabajo “Space Weather Events, Hurricanes, and Earthquakes in Mexico in September 2017” realizado por González-Esparza et al., (2018) y que se encuentra en proceso de publicación en la revista Space Weather..

Las fotografías también son integradas en el reporte semanal del Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE) el cual está conformado por el Servicio de Clima Espacial México (SCiESMEX), el Repositorio Institucional de Clima Espacial (RICE), el Centro de Supercomputo de Clima Espacial (CESCE) y la Red de Instrumentación de Clima Espacial de la UNAM y de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Como se menciona en el párrafo anterior, cada semana (en la medida de lo posible) se integran las imágenes solares al reporte generado por el LANCE el cual, habla sobre las condiciones de viento solar, rayos cósmicos, estado de la ionosfera, entre otros temas, que ocurrieron durante esa semana. Las imágenes brindan de un apoyo observacional al estado de la cromosfera solar, de modo que se pueda ver cómo se encontraba el sol antes, durante o después de algún evento registrado por el laboratorio.



Figura 5.26: Diapositivas del reporte semanal del LANCE. a) Semana del 25 al 28 de septiembre del 2017. b) Semana del 28 al 31 de mayo del 2018. Crédito: LANCE.

En el sentido de la divulgación de la ciencia, las fotografías solares han sido utilizadas para algunos eventos. Por ejemplo, se realizó una pequeña muestra de las fotos para la Semana Mundial del Espacio 2017 organizada por la Licenciatura en Geociencias de la ENES Morelia con apoyo de la Unidad Michoacán del Instituto de Geofísica, donde además se realizaron visitas guiadas del observatorio solar y al LACIGE a grupos de escuelas primarias, secundarias y preparatorias. Durante estas visitas se mostró el quehacer del laboratorio y del observatorio explicando qué observamos, cómo observamos y por qué es importante el monitoreo del Sol. También, se explicó el proceso de obtención de las fotografías y se mostraron algunas de estas explicando qué se podía observar y en qué consistían los fenómenos fotografiados (manchas solares, filamentos, prominencias, espículas).

En otro evento se utilizaron algunas fotografías, las del eclipse por ejemplo, como parte de la exposición fotográfica “César Cantú: Espacio Profundo” que se inauguró el 26 de enero de 2018 en el Centro Cultural UNAM Morelia y que era un reconocimiento al trabajo del astro-fotógrafo mexicano César Cantú. También, se realizó un póster para dicha exposición, explicando de manera muy general el procedimiento de obtención, procesado y análisis de las fotografías (ver figura 5.27).

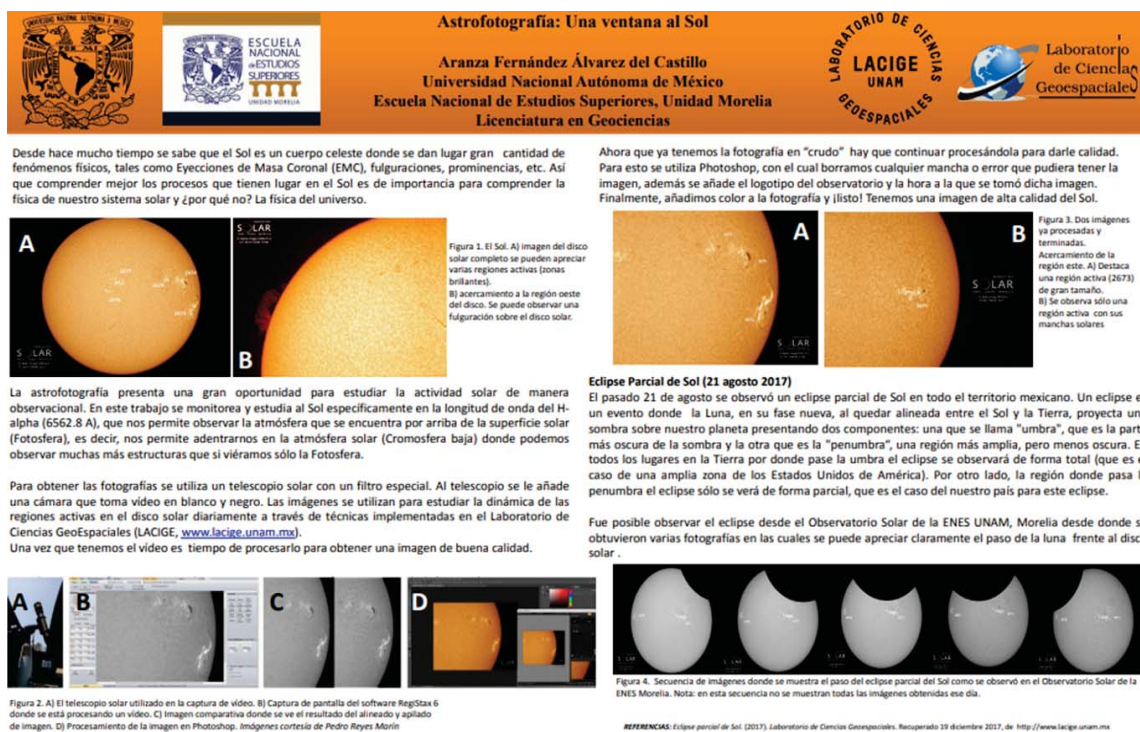


Figura 5.27: Póster utilizado en la exposición fotográfica “Cesar Cantú: Espacio Profundo” realizada en el Centro Cultural UNAM en Morelia.

En otro intento por popularizar el trabajo realizado en el observatorio, ocasionalmente se suben algunas fotografías del día al grupo SolarActivity de Facebook, el cual consiste en un grupo de entusiastas de la observación solar tanto académicos como aficionados. Dentro del grupo se selecciona una fotografía sobresaliente como la “Foto del día”. Algunas fotografías del observatorio han sido seleccionadas como fotos del día.

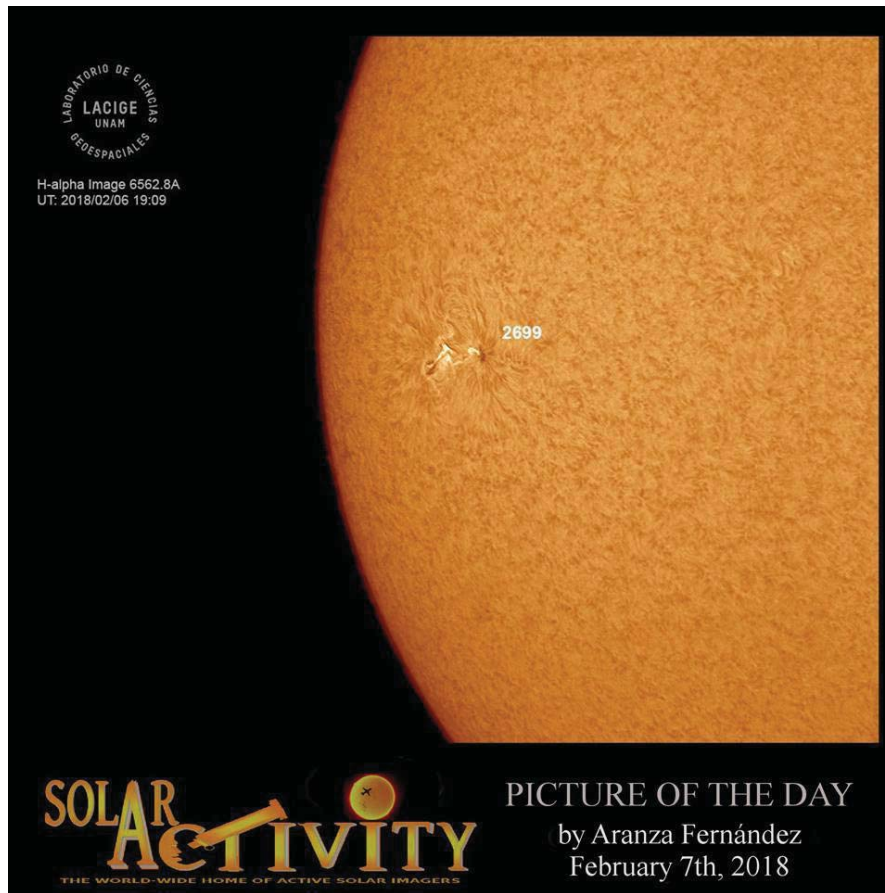


Figura 5.28: Fotografía tomada el 05 de febrero del 2018 y seleccionada por la página web SolarActivity como la foto del día (07 de febrero).

5.5.1. Acervo Fotográfico del Laboratorio de Ciencias Geoespaciales

Durante el periodo de junio 2017 a mayo 2018 se han obtenido fotografías del Sol de buena calidad prácticamente de manera diaria. Cuando no se obtienen fotografías se debe a que las condiciones de humedad y lluvia o de nubosidad no eran adecuadas para realizar una buena observación.

A lo largo del periodo antes mencionado se han obtenido un total de ~ 758 fotografías, siendo agosto el mes con más imágenes: 133. Sin embargo, eso no significa que sean las mejores imágenes ya que hay que recordar que no todos los días son iguales y el seeing puede variar considerablemente de un momento a otro.

Aunque este acervo puede considerarse como una buena base, hace falta aumentar las longitudes de onda en las que se observa de modo que se obtenga una visión más completa del Sol, ya que si se observa en varias longitudes de onda distintas se pueden observar fenómenos o características diferentes y así se puede obtener imágenes de un mismo momento con características diferentes. Esto puede ayudar a entender mejor el comportamiento y la dinámica del Sol. Un ejemplo, son la imágenes en CaII K (ver figura 5.30) que el observatorio recientemente ha comenzado a obtener gracias a la obtención de un

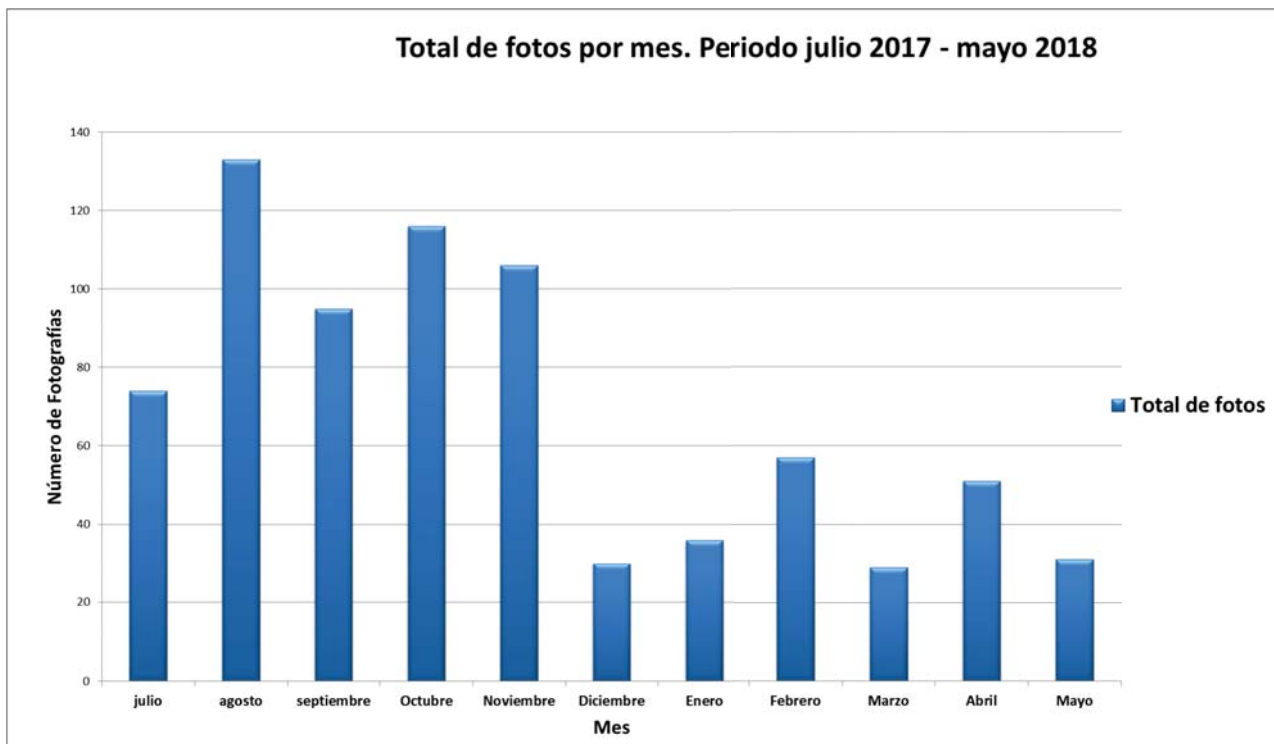


Figura 5.29: El número de fotografías obtenido cada mes en el observatorio.

filtro que permite el paso de dicha longitud de onda (398nm) el cual se coloca en la cámara digital. Este filtro puede ser utilizado con el reductor focal antes mencionado ya que se utiliza con el telescopio Meade ETX-90EC AstroTelescope que tiene una distancia focal de 1250mm.

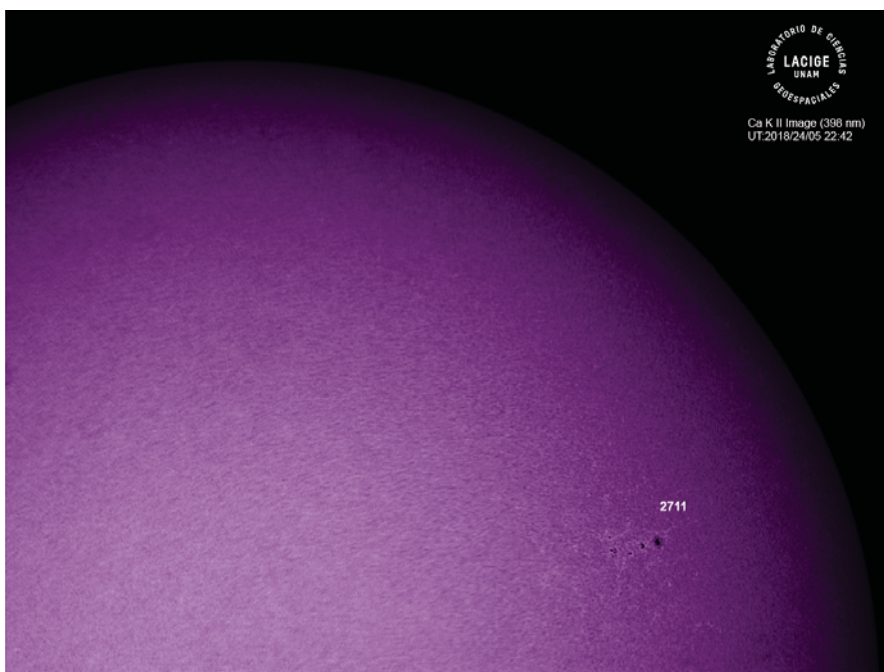


Figura 5.30: Primera fotografía solar tomada en la longitud de onda de Ca II K por el observatorio solar de la ENES Morelia.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo a Futuro

A lo largo de este trabajo se ha podido ver el potencial de la astrofotografía como herramienta de investigación científica y al mismo tiempo como herramienta de apoyo a la divulgación de la ciencia. Uno de los propósitos de este trabajo fue generar imágenes solares de buena calidad que pudieran ayudar a explicar los fenómenos solares al público en general para generar interés en las Ciencias Espaciales.

Estas fotografías pueden ser utilizadas dentro de un libro, en una exposición, como material museográfico, como parte de una sección fija en un periódico, compartidas en redes sociales o como parte de una investigación científica como es el caso donde las imágenes se utilizan como parte de la investigación y el monitoreo de Clima Espacial del LACIGE y el LANCE.

La astrofotografía presenta una propuesta valiosa e innovadora que complementa y amplía las técnicas actuales de investigación solar. Además puede fomentar la participación del público al ser una actividad relativamente fácil de realizar y de bajo costo, es decir, no se necesita material sumamente avanzado para realizarla. Este tipo de proyectos de *ciencia ciudadana* resultan muy valiosos ya que no solo proveen a la gente de información científica y tecnológica también, hacen notar el valor de la actividad científica y todo el trabajo que esta conlleva. Bajo esta idea, sería importante fomentar la creación de una página web de ciencia ciudadana, como la que ya se tiene en CONABIO, para que no solo se integre a la comunidad con información y datos, sino que a partir de esa información el público pueda realizar proyectos de fotografía solar siguiendo una metodología clara que le permita conocer de manera precisa cómo y qué se necesita para hacer observaciones del Sol, por ejemplo.

La relevancia de la divulgación científica reside en su labor de generar una conciencia colectiva del mundo que nos rodea para así desmitificar las pseudo-ciencias al mismo tiempo que, intenta generar un interés por parte del público hacia los temas de ciencia y tecnología (tanto actuales como pasados) donde el resultado sea una sociedad involucrada con el entorno global que la rodea. Además, en la vida cotidiana es necesaria la participación responsable de todas las actividades sociales por lo que se requiere que haya comunicación entre ellas. Por eso la comunicación de la ciencia resulta de gran importancia en la sociedad actual.

Las fotografías generadas como parte de este proyecto requieren del aprendizaje de distintas técnicas de análisis, reducción y procesamiento de imagen y vídeo que pueden considerarse valiosas no solo para la astrofotografía pero también dentro de otras disciplinas, lo que debería fomentar el apoyo interdisciplinario en materia de divulgación para generar productos de calidad que involucren distintas técnicas (artísticas, por ejemplo) pero que no deformen el mensaje científico y que sean capaces de ayudar a la ciencia a proveer de contexto sobre distintos temas.

Según lo anterior es necesario fomentar la divulgación científica como profesión y como línea de investigación, además de enseñar a realizarla desde niveles como la licenciatura para tener mejores encuentros con el público donde la presentación de contenidos sea efectiva así como la comprensión y apropiación de los mismos.

Como se mencionó anteriormente, la realización de medidas de las estructuras solares observadas en las fotografías ayuda a dimensionar las escalas y los fenómenos con los que trabajan las Ciencias Espaciales y, en este caso, la física solar, ya que aunque en las imágenes las distancias y tamaños se ven pequeños en realidad son enormes. Con este tipo de actividades no solo se puede informar al público sobre la física solar, también son muy útiles para la formación de estudiantes de Geociencias, específicamente del área de Ciencias Espaciales ya que, como se mencionó anteriormente, proveen de contexto sobre el entorno solar y sus dimensiones, además permiten que los estudiantes se den cuenta del quehacer científico que se lleva a cabo en un laboratorio como el LACIGE y al mismo tiempo las actividades brindan experiencia práctica que en un futuro puede ser de mucha ayuda para los estudiantes.

Se pudo notar que las condiciones atmosféricas afectan de manera considerable las observaciones solares siendo las más importantes la temperatura y la humedad. Sin embargo, la temperatura es el factor que tiene un impacto mayor y que, además, puede compensar los otros efectos de turbulencia atmosférica. Al mismo tiempo se puede concluir que las mejores condiciones de observación se dan en los días templados a fríos (temperaturas $\leq 21^{\circ}\text{C}$) y secos, ya que la atmósfera se encuentra mucho más estable (vibra menos) en esos días. Sin embargo, es importante hacer un muestreo atmosférico más preciso a partir de sensores que operen en una longitud de onda similar a la del telescopio. Actualmente esto último se está trabajando en el LACIGE.

Siguiendo la idea anterior se observó que los mejores meses para obtener fotografías solares son desde mediados de agosto a mediados de noviembre ya que no solo la temperatura baja, lo que puede ayudar a compensar cualquier aumento de humedad que pudiera darse, también hay vientos, cuestión que ayuda a mover los componentes contaminantes de la atmósfera que pueden afectar las observaciones. El principal problema de dichos meses es la cantidad de nubes sin embargo, no es un problema demasiado importante ya que como se observó en los casos de estudio los periodos de observación son máximo de una hora (incluso menos) lo que da oportunidad a que se de una ventana de observación. Se podría pensar que el invierno es la mejor época del año ya que las temperaturas son más bajas que en cualquier otra época, la mayoría de los días están despejados y casi no hay viento. Sin embargo, es la falta de viento lo que en realidad no ayuda ya que, las capas más bajas de la atmósfera no se mueven, y se forma

una capa de contaminantes, aerosoles, etc., que no permite que las condiciones de seeing sean favorables.

Como parte del trabajo a futuro está la realización de una galería fotográfica accesible tanto al público como a otros investigadores para que sea posible utilizar las imágenes obtenidas en el observatorio con fines académicos o como método de divulgación científica. De hecho, la realización de dicha galería está en proceso y en breve se pondrán las imágenes en la página web del LACIGE (www.lacige.unam.mx).

También es importante comenzar a desarrollar escalas/medidas de seeing para observaciones solares de modo que las condiciones atmosféricas puedan ser clasificadas en un lenguaje común que no resida en lo subjetivo. En este sentido es importante, en un futuro próximo diseñar, y construir, un dispositivo que pueda medir directamente el seeing en longitudes cercanas al $H\alpha$.

En conjunción con lo anterior, es necesario buscar la posibilidad de controlar los telescopios y el observatorio de manera remota de modo de la obtención de las imágenes y el monitoreo del Sol sea más sencillo de realizar y, sobretodo, sea más continuo. También, es de gran importancia fomentar la creación de una red nacional de observatorios solares para tener un monitoreo mucho más efectivo y que realmente esté al servicio de nuestro país para que que, al mismo tiempo, funcione para que México pueda contribuir más y mejor a la investigación solar y a las Ciencias Espaciales.

Además, ya que se tiene un acervo cuantioso en la longitud de onda de $H\alpha$ ahora sería muy bueno complementar estas observaciones con otras realizadas en alguna otra longitud de onda, como la del calcio K que permite observar la fotosfera solar. El proceso para la obtención de imágenes en Ca II K es un poco más complicado, ya que mediante algunas pruebas realizadas en el LACIGE, ha sido posible observar que se necesita un mejor comportamiento de la atmósfera (en comparación con el $H\alpha$) y, quizá, una cámara fotográfica más adecuada a esta longitud de onda.

Apéndice A

A continuación se presenta el código utilizado para leer y mejorar el archivo FITS inicial de Registax v6 y dar un buen encabezado a los archivos FITS generados del Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales.

```
1 #!/usr/bin/python
2 # Programa para leer imagenes FITS del Observatorio que forma parte del
3 # Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales (LACIGE) de la UNAM.
4 # Escuela Nacional de Estudios Superiores UNAM Morelia.
5 #     Por: Mario Rodriguez Martinez , ENES-UNAM, Morelia.
6 #
7 #     Version: 1.0.1
8 #     Fecha: 02/abril/2018
9 #####
10 __institution__ = "ENES-UNAM, unidad Morelia"
11 __author__      = "Mario Rodriguez-Martinez"
12 __copyright__   = "LACIGE-UNAM"
13 __version__     = "1.0.1"
14 __maintainers__ = "Mario Rodriguez-Martinez , Aranza Fernandez A. del C."
15 __email__       = "mrodriguez@enesmorelia.unam.mx"
16 __status__      = "Development"
17 #####
18 import pyfits
19 from datetime import date , time , datetime
20 import subprocess # <<--- Para correr comandos shell desde PyThon
21 import astropy.time
22 import dateutil.parser
23 import ephem
24
25 # Para generar la estampa de tiempo
26 time = datetime.now().strftime( '%Y-%m-%dT%H:%M:%S' )
27 #-----
28 # Se ejecuta el software FV NASA's HEASARC: software:
29 print( '-----' )
30 print( 'Ejecutando FV de NASAs HEASARC software ... ' )
31 print( 'Mas informacion: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/fv/' )
32 subprocess.run( ["fv5.4_pc_linux/fv5.4/./fv", "commands.fv"] )
33 #-----
34 hdulist = pyfits.open( 'xfile2.fits' )
35 print( '' )
36 print( '**** Informacion relevante del archvico FITS seleccionado: ' )
```

```

36 pyfits.info("xfile2.fit") # Se solicita informacion del archivo.
37 print('')
38 #-----
39 #----- Modificando el HEADER -----
40 prihdr = hdulist[0].header
41 prihdr['OBJECT'] = ('SUN', 'Object observed')
42 prihdr['INSTRUME'] = ('SKYRIS445m', 'Celestron camera, 30 FPS')
43 prihdr['EXPOSURE'] = (17, '[s] for 500 FRAMES')
44 prihdr['OBSERVER'] = ('LACIGE-UNAM', 'LACIGEs Solar-Observatory')
45 prihdr.set('LACIGEK1', '----- LACIGE Keywords Section 1: -----')
46 prihdr.set('OBS-SITE', 'Observatory', 'LACIGE. Lat:19d38m, Log:101d13m')
47 prihdr.set('OBS-URL', 'http://www.lacige.unam.mx/', 'LACIGE-Website')
48 prihdr.set('PLATESEC', 1.94, '[arcsec/pixel]')
49 prihdr.set('TELESCOP', 'SMAX90mm', 'Solar Max 90mm, f=800mm')
50 prihdr.set('WAVELNTH', 6562.8, '[A] wavelength of observation')
51 prihdr.set('DATE', str(time), 'Date FITS file was generated')
52 # Trabajando con las fechas de observacion:
53 d_o = prihdr['DATE-OBS']
54 h_o = prihdr['TIME-OBS']
55 yr = 2000 + float(d_o[6:8])
56 dd = float(d_o[0:2])
57 mm = float(d_o[3:5])
58 hh = float(h_o[0:2])
59 mi = float(h_o[3:5])
60 ss = float(h_o[6:8])
61 fecha = str(int(yr)).zfill(2)+str(int(mm)).zfill(2)+str(int(dd)).zfill(2)
62 fecha2 = str(int(yr)).zfill(2)+'/'+str(int(mm)).zfill(2)+'/'+str(int(dd)).zfill
        (2)
63 hora = str(int(hh)).zfill(2)+str(int(mi)).zfill(2)+str(int(ss)).zfill(2)
64 # Posicion del Sol en el cielo para la fecha de observacion:
65 dt = dateutil.parser.parse(fecha+hora)
66 timee = astropy.time.Time(dt)
67 prihdr.set('J2000', timee.jd, 'Julian 2000.0 date-obs')
68 # Calculando ephemerides del Sol:
69 sun = ephem.Sun()
70 sun.compute(fecha2, epoch=2000)
71 a1 = sun.ra # Right Ascension (RA)
72 a2 = sun.dec # Declination (Dec)
73 # Convirtiendo ambos valores a radianes:
74 ar = repr(ephem.hours(a1))
75 dec = repr(ephem.degrees(a2))
76 prihdr.set('RA', ar, 'Right ascension (radians)')
77 prihdr.set('DEC', dec, 'Declination (radians)')
78 prihdr['COMMENT'] = ('--- Additional Comments ---')
79 prihdr.set('COMMENT', 'This LACIGE product has been produced to get')
80 prihdr.set('COMMENT', 'daily H-Alpha images from the Sun in Mexico.')
81 prihdr.set('COMMENT', 'Copyrights@LACIGE-UNAM')
82 # Se escribe el nuevo archivo FIT que contiene la nueva informacion:
83 hdulist.writeto('sun'+fecha+'_'+hora+'.fits', clobber=True)
84 #-----

```

```
85 # Se elimina el primer archivo FIT:
86 subprocess.run(["rm", "xfile2.fit"])
87 # ***** F I N *****
88 print('')
89 print('* * * * *')
90 print('Author:', __author__)
91 print('Copyright:', __copyright__)
92 print('Version:', __version__)
93 print('E-Mail:', __email__)
94 print('Maintainers:', __maintainers__)
95 print('Institution:', __institution__)
96 print('* * * * *')
97 # END
98 plt.show()
```


Apéndice B

Este apéndice presenta un disco compacto que contiene las imágenes trabajadas en esta tesis (específicamente en el capítulo 5) en caso de que se desee verlas con más detalle. A continuación se describe qué es lo que se observa en cada imagen.

- **Figura B.1.0, Figura B.2.0 y Figura B.3.0:** Imágenes obtenidas el 21 de agosto de 2017 a las 12:10 hrs, 13:09 hrs y 14:08 hrs tiempo local. Se observa el eclipse parcial de Sol visto desde la ciudad de Morelia. En la región central del disco se puede ver la región activa 2671 y en la zona este se observa una pequeña región activa sin nombrar.
- **Figura B.1.1, Figura B.2.1 y Figura B.3.1:** Mismas fotografías que las figuras B.1.0., B.2.1 y B.3.1. Sin embargo, se añadieron los resultados de las medidas realizadas sobre la imagen: Distancia cubierta por la sombra de la luna; y distancia entre las manchas solares.
- **Figura B.4.0:** Imagen obtenida el 08 de septiembre 2017 a las 10:46 hrs tiempo local. Se observa la región oeste del disco solar donde se encuentran las regiones activas: 2673, 2674 y 2679. También se observan los remanentes de una fulguración clase X9.3 que se dio el 06 de septiembre del mismo año.
- **Figura B.4.1:** Misma fotografía que la figura B.4.0. Se añadió el resultado de la medida de la distancia entre las manchas solares.
- **Figura B.5.0:** Imagen obtenida el 18 de septiembre de 2017 a las 11:40 hrs tiempo local. Se observa la región este de disco donde se puede ver un filamento.
- **Figura B.5.1:** Misma fotografía que la figura B.5.0. Se añadió el resultado de la medida de la longitud del filamento.
- **Figura B.6.0:** Imagen obtenida el 18 de septiembre de 2017 a las 11:40 hrs tiempo local. Se observa la región oeste del disco donde se puede ver una pequeña mancha solar así como un filamento.
- **Figura B.6.1:** Misma fotografía que la figura B.6.0. Se añadió el resultado de la medida de la longitud del filamento así como las medidas de los radios de la umbra y penumbra de la mancha.
- **Figura B.7.0:** Imagen obtenida el 27 de septiembre de 2017 a las 13:13 hrs tiempo local. Se muestra la región este del disco solar donde se observan las regiones activas 2682 y 2683. También, se puede observar un filamento a la derecha de la región 2683 y otro más debajo de la región 2682.
- **Figura B.7.1:** Misma fotografía que la figura B.7.0. Se añadió el resultado de la medida de la longitud de los filamentos así como la medida de la distancia entre las manchas.
- **Figura B.8.0:** Imagen obtenida el 02 de octubre de 2017 a las 13:29 hrs tiempo local. Se muestra la región oeste del disco donde se observan las regiones activas 2682 y 2683 que, desde el 27 de septiembre, avanzaron hacia el limbo oeste solar. Se puede observar un filamento de gran tamaño entre las dos regiones activas.
- **Figura B.8.1 y Figura B.8.2:** Mismas fotografías que la figura B.8.0. Se añadieron los resultados de las medidas realizadas sobre la imagen: Distancia entre las manchas solares (figura B.8.1);

longitud del filamento y medidas de los radios de la umbra y penumbra de cada mancha (figura B.8.2).

- **Figura B.9.0:** Imagen obtenida el 20 de octubre de 2017 a las 12:08 hrs tiempo local. Se muestra la región oeste del disco donde se puede observar un filamento de gran tamaño.
- **Figura B.9.1:** Misma fotografía que la figura B.9.0. Se añadió el resultado de la medida de la longitud del filamento.
- **Figura B.10.0:** Imagen obtenida el 20 de octubre de 2017 a las 12:09 hrs tiempo local. Se observa la región este del disco donde se puede ver una gran prominencia sobre el limbo solar.
- **Figura B.10.1:** Misma fotografía que la figura B.10.0. Se añadió el resultado de la medida de la longitud (horizontal) de la prominencia.

Bibliografía

- Addison, Paul S. (2002). *The Illustrated Wavelet Transform Handbook*, Institute of Physics. ISBN 0-7503-0692-0.
- Alvarez, W., y Leitão, H. (2010). *The neglected early history of geology: The Copernican Revolution as a major advance in understanding the Earth*. *Geology*, 38(3), 231-234.
- Alvarez. (2011). Telescopios rápidos versus telescopios lentos en visual [Entrada de Blog]. Recuperado de [Espacio Profundo](#).
- Antia, H. M., Bhatnagar, A., y Ulmschneider, P. (Eds.). (2003). *Lectures on solar physics* (Vol. 619). Springer Science and Business Media.
- Antoniadi, E. M. (1930). *La Planète Mars: étude basée sur les resultats obtenus avec la grande lunette de l'observatoire de Meudon et expose analytique de l'ensemble des travaux exécutés sur cet astre depuis 1659*. Paris: Librairie scientifique Hermann et cie. Primera traducción al Inglés ed., *The Planet Mars*, trad. por Patrick Moore. Keith Reid Ltd (1975).
- Asia-Oceania Space Weather Alliance (AOSWA). (2010). Overview: Space Weather. En línea: <http://aoswa.nict.go.jp/about/index.html>
- Ashbrook J. (1984). *Richard Carrington and a Singular Appearance on the Sun*. The Astronomical Scrapbook, Cambridge, Massachusetts: Sky Publishing Corporation, ISBN:0933346-24-7.
- Bachiller, R. (2009). *El sol: nuestra estrella, nuestra energía*. Observatorio Astronómico Nacional. Instituto Geográfico Nacional-Ministerio de Fomento, 381-382.
- Baker, D. N., y Lanzerotti, L. J. (2016). *Resource letter SW1: Space weather*. *American Journal of Physics*, 84(3), 166-180.
- Baumjohann, W., y Treumann, R. A. (1996). *Basic Plasma Space Physics*. Ontiveros, p. 329.
- Bhatnagar, A., y Livingston, W. C. (2005). *Fundamentals of solar astronomy*. (Vol. 6). World Scientific Series in Astronomy and Astrophysics. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- Bonfil, M. (2004). *La ciencia por gusto*. Una invitación a la cultura científica. México. Paidós.
- Bonfil M., (2014). Científicos: ¿villanos o héroes?, Milenio diario, 20 de agosto de 2014, En línea: <http://lacienciaporgusto.blogspot.mx/search?q=Cient%C3%ADficos:+%C2%BFvillanos+o+h%C3%A9roes?>
- Borda, N., y Davidovich, I. (2009). *Estudio del efecto Zeeman en Hg y determinación del magnetón de Bohr*. Lecture, Instituto Balseiro, Universidad de Sao Paulo.
- Bothmer, V., y Daglis, I. A. (2007). *Space weather: physics and effects*. Springer Science and Business Media.
- Bravo, S. (2001). *Plasmas en todas partes* (No. Sirsi) i9681663683).
- Brekke, A. (1997). *Physics of the upper polar atmosphere*. Chichester: Wiley and Sons.
- Broks, P. (2006). *Understanding Popular Science*. New York: Open University Press.
- Brossard, D., Lewenstein, B., y Bonney, R. (2005). *Scientific knowledge and attitude change: The impact of a citizen science project*. *International Journal of Science Education*. Vol. 27. No. 9.
- Brossard, D. y Lewenstein, B. V. (2010). *A Critical Appraisal of Models of Public Understanding of Science: Using Practice to Inform Theory*. En Kahlor, L. y Stout, P. A. (eds.), *Communicating Science*. *New Agendas in Communication*, pp. 11-39. New York and London: Routledge.

- Bucchi, M. (1998). *Science and the media. Alternative routes in scientific communication*. London and New York: Routledge.
- Bucchi, M. (2013). *Style in science communication*. *Public Understanding of Science*, 22 (8), pp. 904-915, doi: 10.1177/0963662513498202.,
- Bueche, F. (1988). *Ciencias físicas*. Barcelona: Reverté.
- Burgos, E. (2002). *Ana Karenina y la fotosíntesis*. En: Tonda, J. y otros (coords.), *Antología de la divulgación de la ciencia en México*, Divulgación para divulgadores, DGDC-UNAM.
- Buonsanto, M. J. (1999). Ionospheric storms—A review. *Space Science Reviews*, 88(3-4), 563-601.
- Carcavilla, L., del Puy Berrio, M., Belmonte, Á., Durán, J. J., y López-Martínez, J. (2010). *La divulgación de la Geología al gran público: principios y técnicas para el diseño de material escrito*. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, 104, 93-110.
- Carroll, B., y Ostlie, D. (2007). *An introduction to modern astrophysics*. (2nd ed.). San Francisco: Pearson Addison-Wesley.
- Cava, S. (2002). Introducción a la Astrofotografía [Entrada de Blog]. Recuperado de <http://www.astrocava.com/astrofotografia/introduccion/tipos-de-fotografia-astronomica>
- Cerna Fraga, P. (2014). *Aves Urbanas* (Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia Michoacán.
- Christian R.E.(2012). *Coronal Mass Ejections*. NASA, Recuperado 9 Julio 2018.
- Collins, H. y Pinch, T. (1996). *El golem. Lo que todos deberíamos saber acerca de la ciencia*. Barcelona: Crítica.
- De la Luz, V. (2016). ¿Qué es el Clima Espacial? [Entrada de Blog]. Retrieved from <http://www.sciesmex.unam.mx/blog/que-es-el-clima-espacial/>
- De la Peña, José A. (2005). *La percepción pública de la ciencia en México*. *Ciencias* 78, abril-junio, 30-36. [En línea]<http://www.revistacienciasunam.com/es/75-revistas/revista-ciencias-78/589-la-percepcion-publisca-de-la-ciencia-en-mexico.html>
- Denardini, C.M., et al. (2016) *Review on space weather in Latin America*. 3. Development of space weather forecasting centers. *Adv. Space Res.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.03.011>
- Durant, J. (1999). *Participatory technology assessment and the democratic model of the public understanding of science*. *Science and Public Policy*, 26 (5), pp. 313-319, doi: 10.3152/147154399781782329.
- Durant, J.; Evans, G. A. y Thomas, G. P. (1989). *The public understanding of science*. *Nature*, 340 (6228), pp. 11-14, doi: 10.1038/340011a0.
- Echeverría, Javier. (2005). *La ciencia vista por la sociedad, la experiencia europea*. *Ciencias* 78, abril-junio, 38-44. En línea: [Revista Ciencias](#)
- Escalón, E. (2005). *Certeza y no sólo opiniones, busca la divulgación de la ciencia: J. Fierro*. *Gaceta de la Universidad Veracruzana*. No. 85-87.
- Estrada, L. (2002). *La divulgación de la Ciencia*. En: Tonda, J., Sánchez, A.M., Chávez, N. (Eds.) *Antología de la Divulgación de la Ciencia en México*. Divulgación Para Divulgadores. pp. 138-151.
- European Space Agency (ESA). (2017). *Space Weather and its hazards*.
- Evans, G. y Durant, J. (1995). "The relationship between knowledge and attitudes in the public understanding of science in Britain". *Public Understanding of Science*, 4 (1), pp. 57-74, Doi: 10.1088/0963-6625/4/1/004.

- Fehér, M. (1990). "Acercas del papel asignado al público por los filósofos de la ciencia". En Ordoñez, J. y Elena, A. (eds.), *La ciencia y su público*, pp. 421-443. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Fejer, B. G., y Kelley, M. C. (1980). Ionospheric irregularities. *Reviews of Geophysics*, 18(2), 401-454.
- Feldman U., Landi E. y Schwadron N. A. (2005). *On the Sources of Fast and Slow Solar Wind*. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 110, DOI: 10.1029/2004JA010918.
- Felt, U. (2000). "Why Should the Public Understand Science? A Historical Perspective on Aspects of the Public Understanding of Science". En Dierkes, M. y von Grote, C. (eds.), *Between Understanding and Trust. The Public, Science and Technology*, pp. 7-38. Amsterdam: Harwood Academic Publishers.
- Forcada S. J. (2013). *El Enigmático Ciclo de Actividad del Sol*. *Astronomía* No.172, p.3037.
- Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) (2015). VII Encuesta de Percepción Social de la Ciencia. Dossier informativo, [en línea].
- Golub, L., y Pasachoff, J. M. (2002). *Nearest star: the surprising science of our sun*. Harvard University Press.
- González D. W., Tsurutani T. B. y Clua De Gonzalez L. A. (1999). Interplanetary Origin of Geomagnetic Storms. *Space Science Reviews*. Vol. 88, DOI: 10.1023/A:1005260129098
- Gray, M. (2004). *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley and Sons.
- Gross, A. G. (1994). *The roles of rhetoric in the public understanding of science*. *Public Understanding of Science*, 3 (1), pp. 3-23, doi: 10.1088/0963-6625/3/1/001.
- Grundmann, R. y Cavaillé, J.-P. (2000). *Simplicity in Science and its Publics*. *Science as Culture*, 9 (3), pp. 353-389, doi: 10.1080/713695251.
- Gutiérrez-Marco, J. C. (2005). *¿Sabemos divulgar la Geología que hacemos?*.
- Hansen, A. (2009). *Science, communication and media*. En Holliman, R.; Whitelegg, E. S.; Smidt, S. y Thomas, J. (eds.), *Investigating Science Communication in the Information Age. Implications for public engagement and popular media*, pp. 105-127. New York: Oxford University Press.
- Hecht, E. (2002). *Optics*, 4th. International edition, Addison-Wesley, San Francisco, 3, 2.
- Hilgartner, S. (1990). "The Dominant View of Popularization: Conceptual Problems, Political Uses". *Social Studies of Science*, 20 (3), pp. 519-539, doi: 10.1177/030631290020003006.
- Hill, F., Fischer, G., Grier, J., Leibacher, J., Jones, H., y Jones, P. et al. (1994). *The global oscillation network group site survey*. *Solar Physics*, 152(2), 321-349. doi: 10.1007/bf00680443.
- Horst, M. (2008). *Communicating Science in Social Contexts. New models, new practices*. En Cheng, D.; Claessens, M.; Gascoigne, T.; Metcalfe, J.; Schiele, B. y Shi, S. (eds.), *Communicating Science in Social Contexts. New models, new practices*, pp. 259-274. Brussels: Springer.
- Horst, M. y Michael, M. (2011). *On the Shoulders of Idiots: Re-thinking Science Communication as 'Event'*. *Science as Culture*, 20 (3), pp. 283-306, doi: 10.1080/09505431.2010.524199.
- Howard, T. (2011). *Coronal mass ejections: An introduction* (Vol. 376). Springer Science & Business Media.
- Hubbell, G. (2013). *Scientific astrophotography*. New York: Springer.

- Hunsucker, R., & Hargreaves, J. (2003). *The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation*. Cambridge University Press.
- Huergo, J., 2001, *La popularización de la Ciencia y la Tecnología: Interpelaciones desde la comunicación*. Ponencia presentada en el Seminario Latinoamericano Estrategias para la Formación de Popularizadores en Ciencia y Tecnología. La popularización de la Ciencia y la Tecnología. Red-POP - Cono Sur. La Plata, 14 al 17 de mayo. En línea: <http://www.redpop.org/actividades/publicaciones-y-documentos/la-popularizacion-de-la-ciencia-y-la-tecnologia/>
- Izquierdo, J. L. (2012). *Fotografía y arte: encuentros y desencuentros*. Revista de comunicación, (11), 24-50.
- J. M. Pasachoff, L. Golub. (2001). *Nearest star: the surprising science of our Sun*. Harvard University Press
- Jenkins, J. (2009). *The Sun and How to Observe It (Astronomers' observing guides)*. Springer.
- Jones, B., Boteler, D., Fisher, G., Kunches, J., Murtagh, W. J., Rome, D., ... and Stills, M. (2010). Integrating Space Weather Observations and Forecasts into Aviation Operations: Aviation Space Weather User Requirements. In 14th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology.
- Jones, T.(2018). *Why I'm Switching to a Mono Astrophotography Camera*. [Entrada de blog] Recuperado de astrobackyard.com
- Kaiser, Gerald. (1994). *A Friendly Guide to Wavelets*. Birkhauser. ISBN 0-8176-3711-7
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., y Donner, K. J. (Eds.). (2016). *Fundamental Astronomy*. Springer.
- Kelley, M. (2009). *The earth's ionosphere*. Amsterdam: Academic Press. 1989.
- Kurtz, Gerardo F. (2001). *Origen de un medio gráfico y un arte. Antecedentes, inicio y desarrollo de la fotografía en España*. Summa Artis. Historia General del Arte. Vol. XLVII. La fotografía en España: de los orígenes al siglo XXI. Madrid: Espasa Calpe, S. A. ISBN 84-239-5492-7.
- Lang, K. R. (2001). *The Cambridge Encyclopedia of the Sun*. Cambridge University Press, 2001.
- Lang, K. R. (2007). *Sun, Earth and Sky*. Springer Science and Business Media.
- Lang, K. R. (2008). *The sun from space*. Springer Science and Business Media.
- Lawrence A. (2014) *Spectroscopy*. En: *Astronomical Measurement*. Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg
- Lanzerotti, L. J. (2007). *Space weather effects on communications*. En *Space Weather-Physics and Effects* (pp. 247-268). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Lewenstein, B. (2003). *Models of public communication of science and technology*. Ithaca, NY, Departments of Communication and of Science and Technology Studies, Cornell University
- Logan, R. A. (2001). *Science Mass Communication: Its Conceptual History*. Science Communication, 23 (2), pp. 135-163, doi: 10.1177/1075547001023002004.
- Lunt Solar Systems. (2016). *WHAT'S AN ETALON, AND HOW DO I MAKE ONE?*[Entrada de blog] Recuperado de luntsolarsystems.com
- Malacara, D., y Malacara, J. (1995). *Telescopios y estrellas* (4th ed.). Biblioteca Digital ILCE, La ciencia para todos. Ciudad de México.
- Mapelli, G. (2004). *Estrategias lingüístico-discursivas de la divulgación científica*. Università di Milano. AISPI. Actas XXII.

- Mármol, J. (2017). *¿Qué es la astrofotografía?*. [Entrada de blog] Recuperado de <http://www.astrociencia.com/2011/11/28/que-es-la-astrofotografia/>
- Mazón, J. T., Mora, A. M. S., y Arredondo, N. C. (2000). *Antología de la divulgación de la ciencia en México*. UNAM.
- Marker, B., 2008. *Communication of geoscience information in public administration: UK experiences*. In: Liverman, D., Pereira, C.P.G., Marker, B. (Eds.), *Communicating Environmental Geoscience*, vol. 305. Geological Society, London, Special Publications, pp. 185–196. Marr, A., 1999. Science is driving modern culture.
- Marín Santos, D. (2002). *Cambios a largo-plazo en la ionosfera y su relación con la actividad geomagnética* (Doctorado). Universidad Complutense de Madrid.
- Méndez Bedolla, V. (2017). *Análisis de perturbaciones ionosféricas utilizando el código USTEC, durante el ciclo solar 23* (Licenciatura). Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Meyer Vernet, N. (2007). *Basics of the solar wind*. Cambridge University Press.
- Miller, J. D. (2004). *Public Understanding of, and Attitudes toward, Scientific Research: What We Know and What We Need to Know*. *Public Understanding of Science*, 13 (3), pp. 273-294, doi: 10.1177/0963662504044908.
- Miller, S. (2001). *Public understanding of science at the crossroads*. *Public Understanding of Science*, 10 (1), pp. 115-120, doi: 10.1088/0963-6625/10/1/308.
- Mobberley, M. (2009). *Solar Flares, Giant Prominences and Flare Stars*. En: *Cataclysmic cosmic events and how to observe them*. New York: Springer.
- Moldwin, M. (2008). *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press.
- Myers, G. (2003). *Discourse Studies of Scientific Popularization: Questioning the Boundaries*. *Discourse Studies*, 5 (2), pp. 265-279, doi: 10.1177/1461445603005002006.
- Nepote, A. et al. (2013). *Gestión para la comunicación de la ciencia*. En Patiño, M. (Coord.), *La divulgación de la ciencia en México desde distintos campos de acción: visiones, retos y oportunidades*, SOMEDICYT, pp. 61-72.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2016). *Geomagnetic kp and ap Indices*. National Centers for Atmospheric Information, U.S. Government.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2018). *Solar Flares (Radio Blackouts)*. Space Weather Prediction Center, U.S. Government.
- O'Donnell, D. (2016). *Should You Get a Colour or Monochrome Camera?*. [Entrada de blog]. Recuperado de photographingspace.com
- Otaola, J., Mendoza, B., y Pérez, R. (2013). *El Sol y la Tierra: una relación tormentosa*. Fondo de Cultura Económica, La ciencia para todos.
- Pérez-Tamayo, R. (2011). *Acerca de Minerva*. Fondo de Cultura Económica.
- Pesnell, W. D. (2015). *Solar dynamics observatory (SDO)*. (pp. 179-196). Springer International Publishing.
- Peters, H. P. (2013). *Gap between science and media revisited: Scientists as public communicators*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (suppl. 3), pp. 14102-14109, doi: 10.1073.
- Pismish, P. (1982). *La Interferometría Fabry-Perot: Aplicaciones Astronómicas*. *Revista Mexicana De Física*, 29(1), 1-25.

- Piñera Barrera, S. F. (2010). *Escher: matemáticas, cristalografía e imposibles el arte como herramienta de divulgación científica*. (Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Filosofía de la Ciencia.
- Reynoso, E. (2012). *Formación y profesionalización de comunicadores de la ciencia y, Discusiones y definiciones*. En: La cultura científica en los museos en el marco de la educación informal, Facultad de Filosofía, UNAM, tesis doctoral.
- Richmond, M. (2010). *Continuous Spectra*. Lecture.
- Rishbeth, H., & Garriott, O. (1969). *Introduction to ionospheric physics*. New York: Academic Press.
- Rodríguez-Martínez, M., Pérez-Enríquez, H. R., Carrillo-Vargas, A., López-Montes, R., Araujo-Pradere, E. A., Casillas-Pérez, G. A., y Cruz-Abeyro, J. A. (2014). *Ionospheric disturbances and their impact on IPS using MEXART observations*. Solar Physics, Vol. 289, p. 2677-2695.
- Russell, C. T., (2007). *The coupling of the solar wind to the Earth's magnetosphere* En: Bothmer, V., y Daglis, I. A. (eds) Space weather: physics and effects. Springer Science and Business Media.
- Sánchez Mora, A. M., (2010). *Introducción a la comunicación escrita de la ciencia*, colección "Quehacer científico y tecnológico", Universidad Veracruzana.
- Sánchez Ron, J. M. (2007). *El poder de la ciencia: historia social, política y económica de la ciencia (siglos XIX y XX)* (No. Sirsi) i97884484327585).
- School of Physics and Astronomy, Cardiff University. (2016). *Fabry Perot Interferometer*. Cardiff University UK.
- Spiers Madge, G. (2013). *TIPOS DE ASTROFOTOGRAFÍA* [Entrada de Blog]. Recuperado de <https://astrofotoperu.com/astrofotografia-en-el-peru/tipos-de-astrofotografia/>
- Sørensen, K. H.; Aune, M. y Hatling, M. (2000). *Against Linearity –On the Cultural Appropriation Of Science And Technology*. En Dierkes, M. y von Grote, C. (eds.), Between Understanding and Trust. The Public, Science and Technology. Amsterdam: Harwood Academic Publishers
- Stewart, I. S., y Nield, T. (2013). *Earth stories: context and narrative in the communication of popular geoscience*. Proceedings of the Geologists' Association, 124(4), 699-712.
- Tafalla, M. (2002). *¿Cómo nació el Sol? Formación de estrellas tipo Solar*. Observatorio Astronómico Nacional. Instituto Geográfico Nacional-Ministerio de Fomento, 381-382.
- Tagüeña, J., Rojas, C., y Reynoso, E. (2006). *La divulgación de la ciencia en México en el contexto de la América Latina*. En Ponencia presentada el Primer Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Sociedad e Innovación CTS+ I. México DF (Vol. 19).
- Tandberg-Hanssen, E. (2013). *The nature of solar prominences* (Vol. 199). Springer Science and Business Media.
- Telescope Optics. (2015). *Seeing error*. Recuperado de: telescopeoptics.net
- Thorne, A., Litzén, U. y Johansson, S. (1999). *Spectrophysic*. Berlin: Springer Verlag.
- Tinker, P. S. (2013). *Communicating popular science. From deficit to democracy*. New York: Palgrave Macmillan.
- Tonda, J. (1999). *¿Qué es la divulgación de la ciencia?*. Ciencias 55, julio-diciembre, 76-81. En línea <http://www.revistacienciasunam.com/es/104-revistas/revista-ciencias-55/864-ique-es-la-divulgacion-de-la-ciencia.html>.
- Trench, B. (2008). *Towards an Analytical Framework of Science Communication Models*. En Cheng, D., Claessens, M., Gascoigne, T., Metcalfe, J., Schiele, B. y Shi, S. (eds.), Communicating Science in Social Contexts. New models, new practices, pp. 119-135. Brussels: Springer.

- Trigueros, M., 2002, *Un análisis del proceso de comunicación*. En: Tonda, J. et al. (coords.) Antología de la divulgación de la ciencia en México. UNAM.
- Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Lakhina, G. S., y Alex, S. (2003). *The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 108(A7).
- Portero, F. S. (2004). *Radiación ultravioleta*. Zhurnal Eksperimental'noi I Teoreticheskoi Fiziki.
- Väliverronen, E. (1993). *Science and the Media: Changing Relations*. Science Studies, 6 (2), pp. 23-34.
- van Ballegooijen, A. A., y Martens, P. C. H. (1989). *Formation and eruption of solar prominences*. The Astrophysical Journal, 343, 971-984.
- Van Loon, A.J. 2008. *Geological education of the future*. Earth Science Reviews 86: 247-254.
- Vernin, J., y Muñoz-Tunon, C. (1995). *Measuring astronomical seeing: the DA/IAC DIMM*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 107(709), 265.
- Vial, J. C., y Engvold, O. (Eds.). (2015). *Solar Prominences*. Berlin: Springer.
- Wackler, T. (2015). *National Science and Technology Council; National Space Weather Strategy Notices*. Fed. Reg. 80 (83), 24296-24297.
- Walsby, J. C. (2008). *GeoSure; a bridge between geology and decision-makers*. Geological Society, London, Special Publications, 305(1), 81-87.
- Webb, David F. y Howard, Timothy A. (2012) *Coronal Mass Ejections: Observations*. Living Rev. Solar Phys., 9, (2012), 3. [Online Article], En línea: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2012-3>
- Woolgar, S. (1991). *Ciencia: abriendo la caja negra*. Barcelona: Anthropos.
- Zamarron, G. (2002), *Divulgación de la ciencia. Un acercamiento*. En: Tonda, J. y otros (coords.), Antología de la divulgación de la ciencia en México, Divulgación para divulgadores, DGDC-UNAM.