



1  
2 **Universidad  
de Guanajuato**

**UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO.**

DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS.

Departamento de Astronomía.

3 **Pérdidas radiativas de la cromósfera.**

4 Tesis presentada por:

5 **María Isabel Pérez Martínez.**

6 Para obtener el grado de:

7 **DOCTOR EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA).**

8 Director de tesis:

9 **Dr. Klaus Peter Schröder.**

10

ENERO 2013.

---



1

# 2 **Pérdidas radiativas de la cromósfera.**

3

Tesis presentada por:

4

**María Isabel Pérez Martínez.**

5

Para obtener el grado de:

6

**DOCTOR EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA).**

7

Director de tesis:

8

**Dr. Klaus Peter Schröder.**

9

Sinodales:

**Dr. Juan Pablo Torres Papaqui.**  
Departamento de Astronomía.  
Universidad de Guanajuato.

**Dr. Erick Nagel Vega.**  
Departamento de Astronomía.  
Universidad de Guanajuato.

10

**Dr. Dennis Jack.**  
Departamento de Astronomía.  
Universidad de Guanajuato.

**Prof. Jürgen Schmitt**  
Observatorio de Hamburgo.  
Universidad de Hamburgo.

**Dr. Philippe Eenens.**  
Departamento de Astronomía.  
Universidad de Guanajuato.

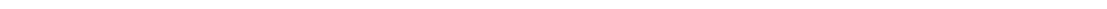
**Dr. Emanuele Bertone.**  
Instituto Nacional de Astrofísica  
Óptica y Electrónica.

---



1  
2

*A mi tía.*  
*In memoriam.*





# 1 Índice general

2	<b>Resumen</b>	<b>viii</b>
3	<b>Abstract</b>	<b>x</b>
4	<b>1. Introducción.</b>	<b>1</b>
5	1.1. La cromósfera estelar. . . . .	1
6	1.2. Actividad cromosférica. . . . .	3
7	1.3. Variabilidad solar y su impacto en la Tierra. . . . .	5
8	1.4. En este trabajo. . . . .	7
9	<b>2. Mecanismos de calentamiento de la cromósfera.</b>	<b>10</b>
10	2.1. Indicadores observacionales. . . . .	11
11	2.2. Mecanismos de calentamiento magnéticos. . . . .	15
12	2.3. Mecanismos de calentamiento acústicos. . . . .	18
13	<b>3. Observaciones de la cromósfera de estrellas gigantes.</b>	<b>20</b>
14	3.1. Proyecto UVESPOP. . . . .	25
15	3.2. Características de la muestra. . . . .	28
16	<b>4. Cálculo del flujo estelar superficial.</b>	<b>31</b>
17	4.1. Flujo estelar superficial . . . . .	31
18	4.1.1. Modelos de atmósferas estelares. . . . .	33
19	4.1.2. El ajuste. . . . .	35
20	4.1.3. Resultados del procedimiento de ajuste: Temperatura efectiva y gra-	
21	vedad superficial. . . . .	39
22	4.1.4. <i>Bondad del ajuste</i> . . . . .	42
23	4.2. Flujo basal. . . . .	45
24	<b>5. Comparación con índices de actividad cromosférica históricos.</b>	<b>48</b>
25	5.1. Índice S basal. . . . .	53
26	5.1.1. Primer acercamiento. . . . .	55
27	5.1.2. Segundo acercamiento. . . . .	56
28	<b>6. Conclusiones y discusión de los resultados.</b>	<b>59</b>
29	6.1. Temperatura efectiva y gravedad superficial. . . . .	59
30	6.1.1. Temperatura efectiva. . . . .	61
31	6.1.2. Gravedad superficial. . . . .	64

1	6.2. Flujo basal. . . . .	64
2	6.2.1. El flujo basal en este trabajo. . . . .	67
3	6.3. Índice S-MWO basal. . . . .	70
4	6.4. Conclusiones y trabajo a futuro. . . . .	74
5	6.4.1. Naturaleza del flujo basal. . . . .	75
6	6.4.2. Trabajo a futuro. . . . .	78
7	<b>7. Anexo A.</b>	<b>79</b>
8	<b>8. Anexo B: Resultados del procedimiento de ajuste.</b>	<b>83</b>
9	<b>9. Anexo C: Publicaciones como resultado del trabajo de tesis</b>	<b>122</b>
10	9.1. The basal chromospheric Mg II h + k flux of evolved stars: probing the energy	
11	dissipation of giant chromospheres . . . . .	122
12	9.2. Basal chromospheric flux and Maunder Minimum-type stars: The quiet Sun	
13	chromosphere as a universal phenomenon. (Research note) . . . . .	122



# 1 Índice de figuras

2	1.1. <i>Izquierda</i> : eclipse total de Sol. <i>Derecha</i> : Modelo de estratificación de la temperatura en la atmósfera del Sol. . . . .	2
3		
4	1.2. Diagrama mariposa de los ciclos 18 - 23, tomado de Hathaway et al. (2003) .	6
5	2.1. Grupo de manchas solares. . . . .	11
6	2.2. Línea de Ca II de una estrella de secuencia principal. . . . .	12
7	2.3. . . . .	13
8	2.4. Técnica de sustracción espectral. . . . .	15
9	2.5. Índice S-MWO para HD103095 . . . . .	16
10	2.6. Generación y diferentes tipos de tubos de flujo magnético. . . . .	17
11	2.7. <i>Izquierda</i> : Representación del factor de llenamiento. <i>Derecha</i> : Modelo de los mecanismos de calentamiento acústicos y magnéticos. Tomado de Fawzy et al. (2002a) . . . . .	18
12		
13		
14	2.8. Resultado de modelos de mecanismos de calentamiento acústicos. Tomado de Buchholz et al. (1998) . . . . .	19
15		
16	3.1. Espectro estelar de HD102212 tomado de diferentes catálogos de espectros estelares. . . . .	21
17		
18	3.2. Diagrama Hertzsprung Russell del cúmulo abierto NGC6475 y la muestra seleccionada para este trabajo . . . . .	22
19		
20	3.3. Imagen del espectrógrafo UVES y del VLT. . . . .	25
21	3.4. Espectro de alta resolución del UVES, de la estrella HD14802. . . . .	27
22	3.5. <i>Izquierda</i> . Distancia en relación del índice de color (B-V). <i>Derecha</i> . Temperatura efectiva en relación del índice de color (B-V) . . . . .	28
23		
24	3.6. <i>Izquierda</i> : Distancia en relación del índice de color, mostrando el efecto de la extinción. <i>Derecha</i> : $v_{sini}$ en relación de $(B - V)$ . . . . .	29
25		
26	4.1. Representación de los espectros sintéticos disponibles de acuerdo a sus parámetros estelares. . . . .	32
27		
28	4.2. Procedimiento de ajuste. Paso 1. . . . .	36
29	4.3. Ajuste entre espectros sintéticos y estelares. Paso 2. . . . .	36
30	4.4. Ajuste entre espectros sintéticos y estelares. Paso 3. . . . .	37
31	4.5. Ajuste entre espectros sintéticos y estelares. Paso 4. . . . .	38
32	4.6. Producto del procedimiento de ajuste. . . . .	39
33	4.7. <i>Izquierda</i> . Predicción de temperaturas mediante el ajuste descrito en la sección 4.1.2. . . . .	40
34		

1	4.8. Parámetro de gravedad superficial obtenidos mediante el procedimiento de	
2	ajuste en relación con valores encontrados en catálogos. . . . .	42
3	4.9. Residuales para los diferentes tipos espectrales G, K y M . . . . .	43
4	4.10. Ejemplo de la contribución cromosférica para HD10361. . . . .	44
5	4.11. Flujo estelar superficial vs temperatura efectiva con flujo basal calculado . . .	46
6	5.1. Regiones de Integración para obtener el índice S. . . . .	49
7	5.2. <i>Izquierda</i> . Relación entre el índice S de la muestra UVES, y el del Monte	
8	Wilson. <i>Derecha</i> . Índice S de la muestra junto con la muestra completa de	
9	Duncan (1991) . . . . .	50
10	5.3. Flujo en el continuo en relación con el índice de color (B-V) . . . . .	51
11	5.4. Factor de conversión. . . . .	52
12	5.5. Índice S-MWO basal, primer acercamiento. . . . .	56
13	5.6. Índice S-MWO basal, segundo acercamiento. . . . .	57
14	6.1. Residuales promedio de acuerdo a los diferentes tipos espectrales de la	
15	muestra: <i>en azul</i> para tipo G, <i>en verde</i> para tipo K, y <i>en rojo</i> para tipo M. . . .	60
16	6.2. <i>Izquierda</i> : reproducción de la figura 4.7 <i>izquierda</i> . <i>Derecha</i> : Gravedad super-	
17	ficial en relación a la temperatura efectiva, del catálogo de Soubiran et al.	
18	(2010) . . . . .	62
19	6.3. <i>Izquierda</i> : Reproducción de la figura 4.7 <i>derecha</i> . <i>Derecha</i> : Reproducción de	
20	la figura 4.8 . . . . .	63
21	6.4. Modelos en equilibrio radiativo de Linsky et al. (1979) . . . . .	66
22	6.5. Reproducción de la figura 4.10 . . . . .	68
23	6.6. Representación del incremento de la emisión fotosférica para temperaturas	
24	de 4500, 4700 y 4900 K, en la región central del Ca II K, para una gravedad	
25	de $\log g = 3,0$ . <i>Izquierda</i> : Reproducción de la figura 4.11. . . . .	69
26	6.7. Reproducción de la figura 5.2 <i>izquierda</i> : Índice S-UVES de la muestra en re-	
27	lación a su respectivo valor en el catálogo del índice S-MWO. La línea sólida	
28	representa la regresión lineal entre ambos índices, el área sombreada repre-	
29	senta el rango de error de la regresión lineal. . . . .	72
30	6.8. <i>Reproducción de la figura 5.4</i> : Factor de conversión. . . . .	73
31	6.9. Índice S-MWO basal obtenido mediante ambos acercamientos. . . . .	74
32	6.10. Flujo de las líneas de Ca II (H+K) en relación a su índice de color, para la	
33	muestra seleccionada para determinar el flujo basal, junto con las estrellas	
34	catalogadas como de secuencia principal por Skiff (2009). . . . .	77
35	B.1. estructura de los resultados gráficos. . . . .	83
36	B.2. HD100623 . . . . .	84
37	B.3. HD102212 . . . . .	84
38	B.4. HD10361 . . . . .	85
39	B.5. HD104304 . . . . .	85
40	B.6. HD105113 . . . . .	86
41	B.7. HD107446 . . . . .	86

1	B.8. HD109379 . . . . .	87
2	B.9. HD110458 . . . . .	87
3	B.10.HD115383 . . . . .	88
4	B.11.HD115617 . . . . .	88
5	B.12.HD11643 . . . . .	89
6	B.13.HD117440 . . . . .	89
7	B.14.HD119149 . . . . .	90
8	B.15.HD121416 . . . . .	90
9	B.16.HD123214 . . . . .	91
10	B.17.HD123934 . . . . .	91
11	B.18.HD125809 . . . . .	92
12	B.19.HD12642 . . . . .	92
13	B.20.HD130328 . . . . .	93
14	B.21.HD136352 . . . . .	93
15	B.22.HD136537 . . . . .	94
16	B.23.HD138688 . . . . .	94
17	B.24.HD140573 . . . . .	95
18	B.25.HD14802 . . . . .	95
19	B.26.HD148291 . . . . .	96
20	B.27.HD148451 . . . . .	96
21	B.28.HD149447 . . . . .	97
22	B.29.HD149661 . . . . .	97
23	B.30.HD152311 . . . . .	98
24	B.31.HD156274 . . . . .	98
25	B.32.HD160691 . . . . .	99
26	B.33.HD163652 . . . . .	99
27	B.34.HD167818 . . . . .	100
28	B.35.HD169916 . . . . .	100
29	B.36.HD189124 . . . . .	101
30	B.37.HD189763 . . . . .	101
31	B.38.HD190248 . . . . .	102
32	B.39.HD190421 . . . . .	102
33	B.40.HD196171 . . . . .	103
34	B.41.HD198357 . . . . .	103
35	B.42.HD199642 . . . . .	104
36	B.43.HD199951 . . . . .	104
37	B.44.HD202320 . . . . .	105
38	B.45.HD204075 . . . . .	105
39	B.46.HD20807 . . . . .	106
40	B.47.HD209100 . . . . .	106
41	B.48.HD210066 . . . . .	107
42	B.49.HD210066 . . . . .	107
43	B.50.HD211415 . . . . .	108
44	B.51.HD211998 . . . . .	108

1	B.52.HD212320 . . . . .	109
2	B.53.HD214952 . . . . .	109
3	B.55.HD216435 . . . . .	110
4	B.56.HD22049 . . . . .	110
5	B.57.HD224935 . . . . .	111
6	B.58.HD23249 . . . . .	111
7	B.59.HD24616 . . . . .	112
8	B.60.HD25069 . . . . .	112
9	B.61.HD27256 . . . . .	113
10	B.62.HD34055 . . . . .	113
11	B.63.HD37811 . . . . .	114
12	B.64.HD42682 . . . . .	114
13	B.65.HD49331 . . . . .	115
14	B.66.HD59468 . . . . .	115
15	B.67.HD59967 . . . . .	116
16	B.68.HD61913 . . . . .	116
17	B.69.HD63077 . . . . .	117
18	B.70.HD74006 . . . . .	117
19	B.71.HD77020 . . . . .	118
20	B.72.HD79698 . . . . .	118
21	B.73.HD83240 . . . . .	119
22	B.74.HD89736 . . . . .	119
23	B.75.HD92305 . . . . .	120
24	B.76.HD95405 . . . . .	120
25	B.77.HD99322 . . . . .	121
26	B.78.HD99648 . . . . .	121

## 1 Índice de cuadros

2	2.1. Mecanismos magnéticos de calentamiento, tomado de Ulmschneider & Mu-	
3	sielak (2003) . . . . .	16
4	3.1. Características principales de la muestra. . . . .	24
5	3.2. Configuraciones de los separadores de luz dicróicos para cubrir el rango del	
6	espectro de 3040 Å a 10400Å. . . . .	26
7	5.1. Parámetros estelares usados para obtener la emisión de la fotosfera. . . . .	54
8	A.1. Modelos de atmósferas estelares disponibles de acuerdo a gravedad super-	
9	ficial y temperatura efectiva. . . . .	80
10	A.2. Parámetros usados para cada estrella. . . . .	81
11	A.3. Parámetros usados para cada estrella. <i>Cont.</i> . . . . .	82

## 1 Resumen

2 Las estrellas que pueden sustentar una cromósfera son aquellas que poseen una capa de convección en su  
3 superficie, condición que les permite sustentar un dínamo activo, así como para propagar ondas acústicas a lo  
4 largo de su cromósfera. El estudio de la cromósfera en diferentes etapas evolutivas nos permite comprender  
5 los mecanismos que la mantienen. Un ejemplo de este tipo de análisis es la ley de Skumanich (Skumanich  
6 (1972)) conocida como la relación *rotación-edad-actividad*, esta relación indica que la emisión en las líneas de  
7 calcio ionizado (líneas de emisión que se forman en la cromósfera de una estrella) aumenta al aumentar la ro-  
8 tación de la estrella, la rotación mantiene la acción del dínamo del campo magnético (ver Parker (1977) y Ayres  
9 (2010)). La edad se ve involucrada dentro de la ley de Skumanich, ya que las estrellas al evolucionar decrece  
10 su velocidad de rotación (ver Gray (1981), Gray & Pallavicini (1989), Gray (1992) entre otros). Schrijver (1987)  
11 analizó el flujo estelar superficial de la línea de calcio ionizado a partir del índice S del Observatorio del Monte  
12 Wilson (S-MWO, Wilson (1978)), Schrijver observó que sin importar la clase de luminosidad de las estrellas,  
13 existía una emisión mínima, que definió como *flujo basal*. Junto con la ley de Skumanich y el *flujo basal* definido  
14 por Schrijver, el exceso en la emisión en la línea de calcio ionizado se relaciona con una velocidad de rotación  
15 mayor, en cambio, el *flujo basal* al ser independiente de la clase de luminosidad no depende de la rotación  
16 ni de la edad de la estrella, y debido a que la rotación se relaciona con el campo magnético de la estrella, el  
17 exceso en emisión se relaciona con mecanismos de calentamiento *magnéticos* y el flujo basal con mecanismos  
18 de calentamiento *no-magnéticos*.

19 El objetivo principal es analizar el flujo basal en la línea de calcio ionizado (Ca II H y K) para una muestra  
20 constituida principalmente de estrellas evolucionadas tardías.

21 Para llevar a cabo este objetivo, se cuenta con una muestra de 76 estrellas de clase de luminosidad I-V, y de  
22 tipo espectral G, K y M. Sus espectros estelares fueron tomados del UVESPOP (Bagnulo et al. (2003), UVES  
23 Paranal Observatory Project), un catálogo de espectros de alta resolución. Para sustraer la contribución de  
24 la fotosfera se toman los espectros sintéticos de atmósferas estelares del código PHOENIX (ver Hauschildt &  
25 Baron (2005) y referencias ahí incluidas) como una referencia de emisión fotosférica. Se cuentan con 433 es-  
26 pectros sintéticos, con temperaturas efectivas de 3000 a 7000 K, cada 100 K, y un rango en gravedad superficial  
27 de  $0,0 < \log g < 5,5$  cada  $\log g = 0,5$ , con masa y metalicidad solar. El amplio rango en temperatura y gravedad  
28 superficial permite ajustar dichos parámetros a los espectros estelares, encontrando valores de temperatura  
29 efectiva y gravedad superficial para cada una de las estrellas de la muestra, además nos permite encontrar el  
30 flujo estelar superficial escalando el espectro estelar al espectro sintético.

31 La emisión de la cromósfera se obtiene sustrayendo la contribución de la fotosfera, de los espectros sintéticos,  
32 de los espectros estelares, a esta técnica se le conoce como *técnica de sustracción espectral* (ver Montes et al.  
33 (1995)). Una vez obtenido la emisión de la cromósfera, se obtiene una relación entre el *flujo basal* y el índice de  
34 color de la siguiente manera  $\log F_{CaII(H+K)} = 7,41(\pm 0,25) \log T_{ef} - 22,16(\pm 0,93)$ , relación que dentro del margen  
35 de error, se encuentra en concordancia con el flujo basal obtenido por Strassmeier et al. (1994). Una vez obte-  
36 nido el flujo correspondiente en las líneas de Ca II (H+K), se puede determinar el índice S-MWO, obteniendo la

1 emisión en las regiones V y R (en un rango de 20 Å centrados en 3901 y 4001 Å espectivamente). De acuerdo  
2 a la definición del índice S-MWO, se obtiene un factor instrumental  $\alpha = 25,28$ , y mediante la definición del  
3 índice  $R_{HK}$  se obtiene una relación entre el coeficiente de conversión y el índice de color (B-V) de la siguiente  
4 forma  $\log C_{cf} = 0,67(\pm 0,04) - 1,07(\pm 0,04)(B - V)$ . Tomando en cuenta el factor instrumental, el coeficiente de  
5 conversión y la definición del índice  $R_{HK}$ , se logra describir mediante la relación del flujo basal encontrado un  
6 índice S-MWO basal para estrellas de secuencia principal como para estrellas gigantes.  
7

## 1 Abstract

2 A chromosphere can be hold only by those stars with convective shells beneath their surface, a condition that  
3 allow the star to have an active dynamo, and to propagat acoustic waves all along the chromosphere. In this  
4 sense the study of the chromosphere in different evolutionary stages can tell us about the mechanisms that heat  
5 the chromosphere. An example of this kind of analysis is the Sumanich law (Skumanich (1972)) known as the  
6 rotation-age-activity relation. This relation states that the emission in the Ca II lines (emission line formed in the  
7 chromosphere) increases with stellar rotation, which keeps the magnetic field dynamo (see Parker (1977), Ayres  
8 (2010) and references therein). The gets involve into the Skumanich law because the stars, as they evolve their  
9 stellar rotation decreases (see Gray (1981), Gray & Pallavicini (1989), Gray (1992)). Schrijver (1987) analized  
10 the Ca II surface stellar flux from the Mount Wilson Observatory S index (S-MWO, Wilson (1978)), Schrijver  
11 observed a minimum flux independent of luminosity class and defined it as "basal flux". Skumanich law re-  
12 lates the excess in the Ca II emission flux to higher values of stellar rotation velocities. On the other hand, since  
13 the "basal flux" is independent of luminosity, it is also independent of rotation and stellar age. Since stellar  
14 rotation is related to magnetic processes, the excess in the Ca II emission flux is related to magnetic heating  
15 mechanisms and the "basal flux" is related to *no-magnetic*.

16 The main purpose of this work is to analyze the basal flux at the Ca II (H+K) emission line in a sample formed of  
17 aminly cool evolved stars.

18 In order to achieve this purpose, the full sample consists of 76 main sequence and giant stars, of spectral type  
19 G, K and M. Their stellar spectra were taken from the UVESPOP a high resolution stellar library (see Bagnulo  
20 et al. (2003)). The synthetic spectra from the PHOENIX stellar atmosphere models (see Hauschildt & Baron  
21 (2005) and references therein) were used as photospheric templates to subtract the photospheric emission  
22 from the stellar spectra. The synthetic spectra used to subtract the photospheric emission have solar mass and  
23 metalicity, and have effective temperature from 3000 K to 7000 K, with steps of 100 K, and surface gravity of  
24  $0,0 < \log g < 5,5$  with steps of  $\log g = 0,5$ . The large range in effective temperature and surface gravity allow  
25 to find these parameters by a fitting procedure between the synthetic and stellar spectra. Besides, the fitting  
26 procedure allow to rescale the stellar flux to surface stellar flux.

27 The chromospheric emission is obtained by subtracting the photospheric contribution, in other words, by sub-  
28 tracting the synthetic spectra to the stellar spectra, this technique is called *spectral subtraction technique* (see  
29 Montes et al. (1995) and references therein). Once obtained the Ca II (H+K) chromospheric emission, it can be  
30 obtained the basal flux in relation to the effective temperature by choosing those stars with low emission. The  
31 basal flux found is  $\log F_{CaII(H+K)} = 7,41(\pm 0,25) \log T_{ef} - 22,16(\pm 0,93)$ , relation that agrees with the one found by  
32 Strassmeier et al. (1994). Once it is obtained the basal flux relation, it can be determined a *basal S-MWO* by  
33 obtaining the corresponding V and R emission flux. Since the synthetic spectra has been convolved with a gaus-  
34 sian to matcht the instrumental profile, the same instrumental factor found for the UVES sample can be used to  
35 obtained the basal S-MWO by means of the synthetic spectra, such instrumental factor is  $\alpha = 25,28$ . Since we  
36 are measuring surface stellar flux, a relation between the conversion coeficient (from the definition of the  $R_{HK}$   
37 index) and the color index can be determined from the UVES sample:  $\log C_{cf} = 0,67(\pm 0,04) - 1,07(\pm 0,04)(B - V)$ .



- 1 Then, together the basal flux relation, the instrumental factor, and the conversion factor, a basal S-MWO can be
- 2 determined.