

Estudio de la Actividad Solar

Apunte para los talleres de Observación Astronómica
Lic. Rodrigo F. Díaz

Revisado y actualizado por el Prof. Luis G. López
Observatorio Héctor Ottonello
Colegio Nacional de Buenos Aires
<http://www.astro.cnba.uba.ar>

2 de julio de 2007

1. Breve introducción y consideraciones generales

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra, y debido a la relativa pequeña distancia que nos separa de ella, es hasta el momento la única en la cual podemos distinguir estructuras de su superficie.

Las estructuras observables en el Sol son muy variadas, si bien la mayoría es producto de los grandes campos magnéticos presentes en la superficie de nuestra estrella. En el taller nos concentraremos casi exclusivamente en el estudio de las estructuras conocidas como **manchas solares**.

Las manchas son regiones de la superficie del Sol que se encuentran a una temperatura menor que el resto¹. Debido a esto, las manchas se ven como zonas oscuras sobre el fondo brillante del Sol (ver figura 1). El proceso de enfriamiento, y su relación con el campo magnético solar son temas de continua investigación científica y escapan a los objetivos del taller².

¹La temperatura promedio de la superficie solar es de alrededor de 5700 °K, mientras que en las manchas se han medido temperaturas de alrededor de 3300 °K.

²En el **Curso General de Astronomía**, que se dicta en este Observatorio, se estudian estos fenómenos de una manera más profunda.

Generalmente, las manchas se presentan en grupos, que muchas veces tienen apariencia bipolar. Esto quiere decir que dentro de un grupo se presentan las dos manchas más grandes en los extremos del mismo, y entre ellas se ubica el resto.

Figura 1: Imagen del disco solar. Pueden verse varios grupos de manchas sobre la superficie.



El estudio de la cantidad de manchas solares presentes, así como de su estructura interna, permite conocer —entre otras cosas— el grado de actividad solar. De hecho, fue mediante observaciones de manchas solares que se descubrió que el Sol posee un ciclo de alrededor de 11 años de duración, en el cual se produce un cambio significativo en la actividad presente. Durante este ciclo, el número de manchas y el tamaño de las mismas varía notablemente.

El estudio que se realiza en el taller consiste básicamente en contar la cantidad de manchas presentes en un determinado día, clasificarlas de distintas formas (como se explica en **Obtención de índices de actividad solar**, más abajo), y determinar su posición en el Sol (ver **Método para determinar la posición de las manchas en el disco solar**, en la sección *Hemeroteca* del sitio *web* del Observatorio). Los datos obtenidos de esta manera permiten hacer una numerosa cantidad de estudios. Parte de estos datos es enviada al SIDC (*Solar Influences Data analysis Center*), donde se realizan estadísticas con datos recopilados de estaciones colaboradoras alrededor del mundo y se elabora un boletín mensual que es distribuido en forma gratuita.

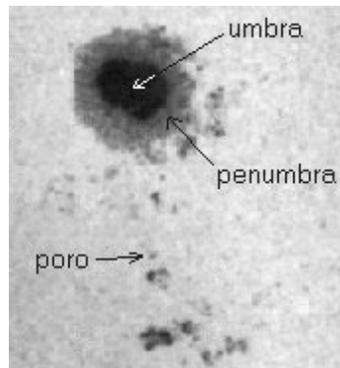
1.1. La estructura de las manchas solares

Como se menciona más arriba, los grupos de manchas presentan en general una estructura bipolar. Esto quiere decir que el grupo tiene dos manchas principales, más grandes que el resto, y que las demás se ubican entre ambas.

Las manchas más grandes consisten en una **umbra** oscura y una **penumbra** que la rodea. Cuando las manchas no tienen penumbra, se las conoce como **poros**.

Las umbrae son los “núcleos” oscuros de las manchas. Generalmente tienen un diámetro de alrededor de 10.000 km y presentan una variación de color, que va de negro a marrón-rojizo. Cuanto mayor sea la intensidad del campo magnético presente, más oscura será la umbra; además, son más oscuras durante un máximo de actividad que durante los mínimos. La temperatura en las umbrae ronda los 3300 °K (comparar con los 5700 °K presentes en el resto de la superficie solar). El campo magnético típico en una umbra es de alrededor de 2000 Gauss —4000 veces más intenso que el valor del campo magnético terrestre.

Figura 2: manchas en el Sol.



La penumbra rodea a la umbra como una corona oscura con filamentos que son radiales a la umbra. El ancho de los filamentos es de aproximadamente 200 km (0,3”) y duran alrededor de 45 minutos. La penumbra tiene un campo magnético promedio de alrededor de 1000 Gauss.

Los poros son manchas sin penumbra que están caracterizadas por cambios rápidos. Pueden marcar la posición de manchas en formación o aparecer en grupos.

2. Técnicas de observación y registro de los datos

Las observaciones pueden realizarse con dos métodos diferentes: proyectando la imagen del sol obtenida con un telescopio sobre una pantalla, o de manera directa, a través del mismo instrumento, con el empleo indispensable de un filtro eficaz.

En caso de utilizar el método de observación directa, es de suma importancia asegurarnos de que el filtro se encuentre en posición antes de comenzar las observaciones. **OBSERVAR EL SOL A TRAVÉS DE UN TELESCOPIO SIN FILTRO, INCLUSO DURANTE UNA PEQUEÑA FRACCIÓN DE SEGUNDO, PRODUCE DAÑOS OCULARES INSTANTÁNEOS E IRREVERSIBLES.**

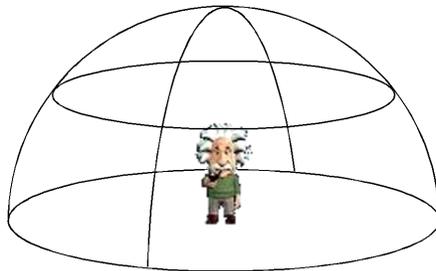
Una vez que tenemos una imagen del disco solar centrada en el ocular, debemos determinar la dirección Norte-Sur y Este-Oeste en el campo de visión, de forma estimada. En el documento **Método para determinar la posición de las manchas en el disco solar**, disponible en la sección *Hemeroteca* del sitio *web* del Observatorio, se describe un método preciso de ubicar las manchas sobre la superficie solar. A esta altura de las observaciones, alcanza con tener una idea aproximada de las direcciones en el cielo. Para conseguir esto se apaga el sistema de relojería del telescopio. La imagen del disco solar va a derivar hacia el Oeste, ya que la Tierra rota de Oeste a Este. La parte del disco solar que desaparece del campo del ocular en último lugar marcará la dirección Este en el disco. Para determinar la dirección Norte-Sur se utiliza un método similar, pero en lugar de apagar el sistema de seguimiento, se mueve el telescopio hacia el Norte (o hacia el Sur). La parte del disco solar que desaparezca última marcará la dirección Norte (o Sur). Es recomendable realizar este procedimiento varias veces para lograr visualizar la dirección de los puntos cardinales sobre el disco solar.

Para registrar las observaciones utilizamos una planilla de observación como la que se muestra en la figura 3.

Como primer paso debemos registrar el **DÍA** y **HORA** de las observaciones, el nombre del **OBSERVADOR**, el **INSTRUMENTO** y la **TÉCNICA** utilizada (esto es, observación directa o por proyección). Luego se registran las condiciones atmosféricas: **TEMPERATURA**, **PRESIÓN**, **HUMEDAD** y **NUBOSIDAD**. Para determinar la nubosidad se divide el cielo en ocho porciones como muestra la figura 4 y se determina cuantas de ellas

presentan nubosidad. El resto de los parámetros pueden leerse directamente de los instrumentos presentes en la cúpula del Observatorio.

Figura 4: Esquema para la determinación del valor de nubosidad.



Una vez hecho esto, bosquejamos rápidamente la posición de los grupos de manchas sobre el disco solar utilizando el espacio destinado a ello en la parte inferior de la planilla de observación. Los grupos son numerados para facilitar la referencia posterior.

El paso central de la observación consiste en el dibujo detallado de cada grupo, registrando la forma y posición relativa de las umbrae, penumbrae, poros, y todo detalle que parezca de importancia. Para esto, al reverso de la planilla de observación hay cuadros donde pueden realizarse los dibujos correspondientes a cada grupo.

Por último, indicamos tanto la calidad de la imagen (“*DEF*”) como su estabilidad (“*MOV*”) en una escala de 1 a 5 (para la calidad de la imagen, ver tabla 1).

Cuadro 1: Calidad de la imagen

1	muy pobre (no se ve la penumbra).
2	pobre (penumbra visible, pero no se percibe estructura alguna en ella).
3	regular (estructura visible en la penumbra, pero no se ve granulación en la superficie solar).
4	buena (granulación apenas visible).
5	excepcional (granulación bien visible).

Es importante señalar que los dibujos deben ser tan fieles a la imagen

observada como sea posible. Muchas veces nos encontraremos con formaciones de manchas que no parecen responder a ninguna clasificación. Esta no es razón para alterar el dibujo de un grupo de manchas con el objetivo de poder clasificarlo a posteriori.

2.1. Obtención de índices de actividad solar

Los índices de actividad solar permiten caracterizar la actividad solar presente en un determinado momento. Se utilizan una gran cantidad de índices, dependiendo en gran parte de la faceta de la actividad solar que se desee estudiar. En el Observatorio y en el taller, calculamos y estudiamos los tres índices más usados: el **número de Wolf** (también conocido simplemente con el nombre de “número de manchas solares”), el **índice de Beck** (o “nuevo número de área”) y el **índice de McIntosh**.

A continuación se describe brevemente cada uno de los índices, se explica la forma de calcularlos.

■ Número de Wolf

El “número de manchas solares” fue introducido por Rudolf Wolf en 1848. Es una manera simple y ampliamente utilizada de caracterizar la actividad solar, si bien puede resultar de uso limitado para investigaciones físicas.

El número de Wolf (R) se define como:

$$R = k \cdot (10 \cdot G + M)$$

Donde G es el número de grupos de manchas (ver más abajo), M es el número total de manchas, y k es el llamado “factor de reducción”, que se explica más abajo. De esta forma, si hay *una sola mancha* en el Sol, $R = 11$; si hay *un grupo* que contiene *cinco manchas*, $R = 15$; por otro lado, *cinco manchas aisladas* dan $R = 55$ (supusimos, en los tres casos, que el valor de k era igual a 1).

En la planilla de observación, el número de manchas (M) se consigna en el recuadro señalado con una **M**, el número de grupos (G) en el recuadro marcado **G**, y el número de Wolf en el recuadro con una **R**.

Para calcular el número G y M hay que tener en cuenta las siguientes reglas:

Número de grupos (G): como se explica más arriba, los grupos de manchas solares suelen presentar una estructura bipolar. En las etapas más tempranas y las más tardías, sólo uno de los polos magnéticos se encuentra señalado por una mancha. Estas manchas sueltas también deben ser consideradas como grupos. Se pueden formular algunas reglas que faciliten la identificación de grupos.

1. Dos manchas que se encuentren dentro de un área de $5^\circ \times 5^\circ$ en el Sol deben ser consideradas como un solo objeto, aun si no se detecta estructura bipolar.
2. Manchas en formación bipolar separadas hasta 30° son consideradas como pertenecientes a un solo grupo.

Número de manchas (M): el número de manchas totales es más difícil de determinar que el número de grupos. Los poros deben ser contados como manchas (hay que tener cuidado de no confundirlos con las llamadas “áreas vacías”: zonas que por breves minutos aparecen más oscuras que el entorno). Por otro lado, cuando un grupo es muy grande, pueden presentarse problemas para determinar el número de manchas. Se suelen aplicar las siguientes reglas:

1. Si una penumbra contiene más de una umbra separada, cada una de ellas debe ser contada como una mancha.
2. El engrosamiento de los filamentos de la penumbra no debe ser contado como una mancha. (Esta regla no nos incumbe demasiado, ya que generalmente no contamos con la suficiente resolución angular para observar los filamentos de la penumbra).

El factor de reducción (k): para uniformizar las observaciones realizadas por distintos astrónomos, o en distintas condiciones de observación, se introduce el factor k , que caracteriza a cada observador y a las condiciones de observación (instrumento de observación, ubicación, condiciones climáticas, etc.). Se obtiene haciendo el cociente entre el número de Wolf que consideremos estándar (el provisto por el SIDC, en nuestro caso) y el obtenido por nosotros:

$$k = \frac{R_{SIDC}}{R_{obs}}$$

Es pertinente aclarar que el valor del factor k no dice nada acerca de la “calidad” del observador. Un k bajo puede querer decir que el

observador tiene una vista muy aguda, o bien que las condiciones atmosféricas fueron excelentes, pero también puede indicar que los grupos y las manchas fueron contados de manera más generosa de la que se esperaría de un observador competente. Por otro lado, un valor de k muy grande puede indicar que es necesario prestar atención a la calidad del filtro solar utilizado, o que el número de manchas y grupos fue subestimado. En cualquier caso, lo que sí es de mayor importancia es la estabilidad del factor a lo largo del tiempo: un k estable es indicación de un número de Wolf confiable. Por último, hay que tener en cuenta que el valor de k puede presentar —sobre todo cuando un observador se inicia en este trabajo— variaciones diarias. Es por eso que es necesario realizar un número importante de observaciones antes de calcular el k correspondiente a un observador, utilizando métodos estadísticos que escapan al enfoque de este apunte³.

En 1856 Wolf escribió que hubiera preferido introducir un número que diera cuenta del área del disco solar cubierta por manchas más que de la cantidad de manchas. Es claro que el número de Wolf tiene una aplicación física muy limitada si una gran mancha con penumbra tiene el mismo peso que un pequeño poro. Por otro lado, debemos reconocer que el promedio mensual (o en un período solar) de dicho número permite estudiar, entre otras cosas, el ciclo de 11 años, por lo que no deja de ser útil.

■ Índice de Beck

El cálculo del área de las manchas presenta grandes ventajas a la hora de precisar la actividad presente (mayor área implica la presencia de campo magnético más intenso en la mancha). Sin embargo, esta técnica no es utilizada comúnmente, en parte debido a la dificultad de medir áreas, en comparación con la facilidad de obtener el número de Wolf.

La búsqueda de un método que reuniera las ventajas del cálculo de áreas con la simpleza de la obtención del número de Wolf llevó a Beck a introducir el índice que lleva su nombre (también conocido como “nuevo

³Para los inclinados a la matemática, digamos que se grafica R_{SIDC} en función de R_{obs} y se realiza una regresión lineal utilizando el método de cuadrados mínimos. La pendiente de la curva obtenida es el valor del factor k .

número de área”). Para calcularlo, a cada grupo debe asignársele una letra según la clasificación de Waldmeier (o clases Zurich), la cual tiene en cuenta el nivel de desarrollo que haya alcanzado el grupo. La letra correspondiente se indica en la columna **CLASIFICACIÓN** en la planilla de observación. En el cuadro 2 se da una descripción de cada clase, así como una imagen de tres grupos característicos de cada una. Una vez completada la clasificación, se cuentan las manchas que conforman cada grupo.

Para calcular el índice de Beck se utiliza la siguiente fórmula:

$$BX = N_1 \cdot B_1 + N_2 \cdot B_2 + N_3 \cdot B_3 + \dots$$

Donde N_i es el número de manchas del grupo número i y B_i es una constante (llamada *constante de Beck*) que depende de la clase a la que pertenezca el grupo. El producto $N_i \cdot B_i$ se consigna para cada grupo en la columna de la planilla denominada **BECK**. Los valores de B para cada clase Zurich se presentan en el cuadro 3.

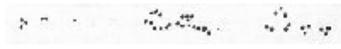
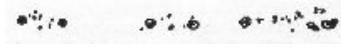
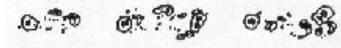
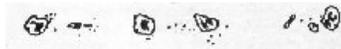
De esta manera, si en el Sol hay tres grupos, uno clase B y otros dos clase C, y el primero tiene 2 manchas, el segundo 5 y el tercero 7, el índice de Beck será $BX = 2 \cdot 4 + 5 \cdot 8 + 7 \cdot 8 = 104$.

Este valor se anota en el recuadro **BX** en la planilla de observación.

Con este criterio, valorando el número de manchas dependiendo del tipo de grupo al cual pertenecen, tenemos en cuenta el área que abarca una mancha, y por lo tanto la actividad relacionada con ella. De esta forma, por ejemplo, una mancha de clase H contribuye al índice de Beck 11 veces más que una mancha de clase A.

Al igual que en el caso del número de Wolf, para calcular el índice de Beck es preciso conocer el número de manchas presentes en la superficie del disco solar. Aquí es donde radica la mayor dificultad en el cálculo de estos índices de actividad. Determinar la clase Zurich de un grupo puede resultar difícil al principio, pero con la experiencia se torna una tarea progresivamente más sencilla. Sin embargo, el número de manchas observables en la superficie solar depende, además, de otros factores, como la calidad de la óptica del telescopio, las condiciones climáticas, la calidad de la vista del observador, etc. El conteo de las manchas es una de las causas que genera mayor diferencia

Cuadro 2: Descripción de las clases Zurich y un dibujo de grupos representativos de cada clase.

Clase	Descripción	
A	Poros o grupo de poros, sin penumbra ni estructura bipolar.	
B	Grupo de poros en formación bipolar. Alineados generalmente en la dirección Este-Oeste.	
C	Grupo de manchas en disposición bipolar. La mancha principal con penumbra.	
D	Dos o tres manchas con penumbra en formación bipolar, con poros intermedios. En general, longitud menor a 10°.	
E	Grupo grande bipolar de estructura compleja, con irregulares penumbrae y con gran número de poros intermedios. Longitud no inferior a 10°.	
F	Fase de máximo desarrollo del grupo. Manchas muy extensas de disposición bipolar o compleja estructura, con grandes penumbrae. Longitud no inferior a 15°.	
G	Principio de decadencia. Grupo bipolar grande. Prácticamente sin manchas intermedias entre las principales. Longitud no inferior a 15°.	
H	Mancha unipolar con penumbra, a veces grupo compacto de ellas por subdivisión de la principal, con algunos poros en su proximidad. Diámetro superior a 2,5°.	
J	Mancha unipolar con penumbra. Diámetro inferior a 2,5°.	

Cuadro 3: Constantes de Beck para cada clase Zurich.

Clase Zurich	Constante de Beck
A	4
B	4
C	8
D	18
E	25
F	36
G	50
H	44
J	37

entre observaciones solares realizadas en distintos momentos o por distintos observadores. Por eso, resulta deseable contar con un índice que no involucre la cantidad de manchas presentes.

El tercer índice que presentamos posee esta característica.

▪ Índice de McIntosh

También conocido como clasificación de McIntosh, fue propuesto por Patrick McIntosh en 1966.

A cada grupo de manchas presente en la superficie solar se le asigna un triplete de letras. Esta combinación se anota en la columna **McINTOSH** de la planilla, junto con el valor correspondiente, determinado como se explica más abajo.

La primer letra es la clase Zurich Modificada (ver más abajo). La segunda letra da cuenta del tamaño de la mancha principal (es decir, la de mayor tamaño), y la última letra es un indicador de la distribución de las manchas en el grupo.

A cada triplete de letras le corresponde un número que da cuenta de la actividad presente en el grupo en cuestión. La suma de los números correspondientes a cada grupo constituye el Índice de McIntosh, y se consigna en el recuadro **CV** de la planilla de observación.

A continuación describimos las clasificaciones correspondientes a cada una de las letras.

Letra inicial: Como se menciona más arriba, es parecida a la clase Zurich. Las modificaciones que se introducen convierten en redundantes las clases G y J, de acuerdo a las siguientes reglas:

- Dependiendo de su extensión, las manchas que se calificaban como G se incluyen en E o en F.
- Las clases J y H se combinan en la nueva clase H, que abarca todos los grupos unipolares con penumbra.

Segunda letra: Se refiere a la penumbra de la mancha más grande del grupo.

x - sin penumbra.

r - penumbra rudimentaria (incompleta), con bordes irregulares, ancho sólo de 2000km ($0,2^\circ$ en el Sol, $3''$ en el cielo). Más brillante que las penumbras normales.

s - penumbra simétrica, casi circular, con diámetro menor a $2,5^\circ$ en el Sol (30.000 km). Se incluyen en este tipo las penumbras elípticas alrededor de una sola mancha. Las manchas con penumbra **s** cambian lentamente.

a - penumbra asimétrica o compleja, con estructuras de filamentos, y diámetro menor a $2,5^\circ$ en el Sol. El borde de una penumbra **a** es irregular o elongado, y en su interior pueden encontrarse dos o más umbrae. Las manchas con penumbra **a** cambian su apariencia de día en día.

h - penumbra simétrica como el tipo **s**, pero con un diámetro de más de $2,5^\circ$.

k - penumbra asimétrica como el tipo **a**, pero con un diámetro de más de $2,5^\circ$ medido en la dirección N-S. (Si el diámetro excede los 5° , se puede asumir con seguridad que ambas polaridades magnéticas se encuentran dentro de la penumbra, y el grupo puede clasificarse como compacto —ver abajo la descripción de grupo compacto).

Tercera letra: Indica la distribución de las manchas dentro del grupo.

x - mancha individual.

o - distribución abierta. El área entre la mancha líder y la seguidora se encuentra libre de manchas.

i - distribución intermedia. Pueden observarse algunas manchas sin penumbra entre las manchas principales.

c - distribución compacta. El área entre las manchas principales se encuentra poblada con muchas manchas grandes, de las cuales al menos una tiene penumbra. En casos extremos, todo el grupo puede verse rodeado de una sola penumbra enorme.

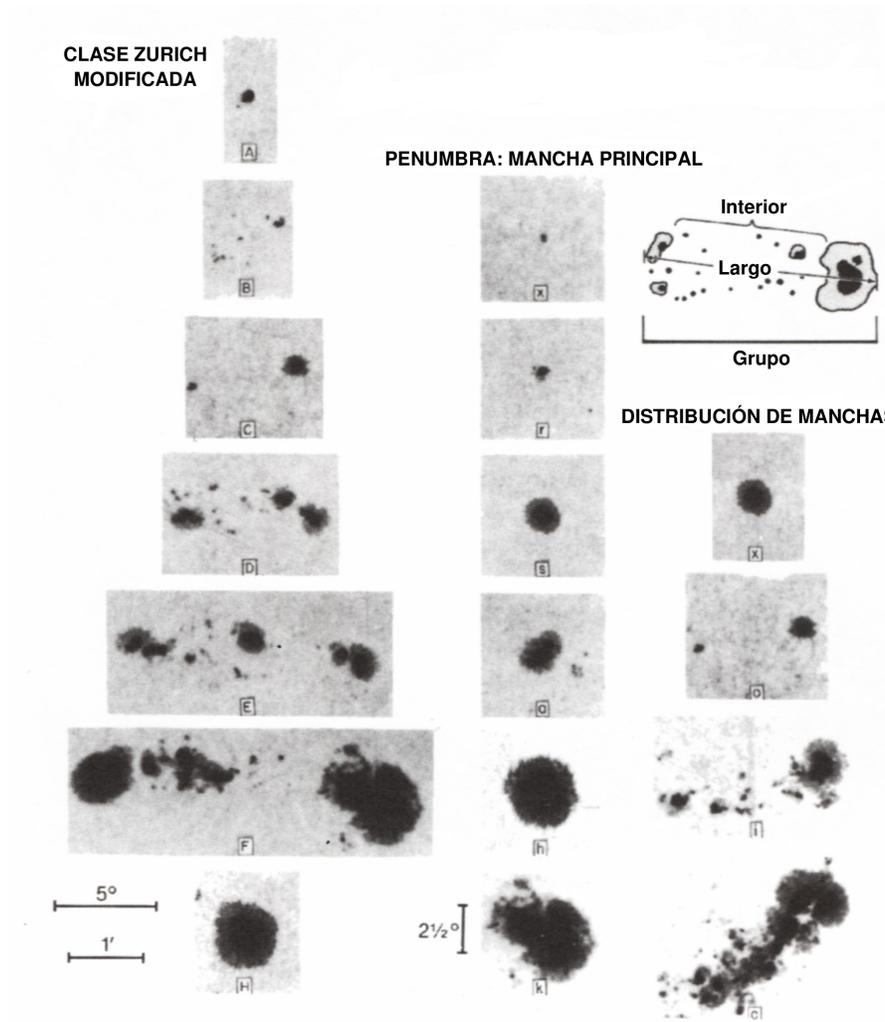
A cada combinación de estas tres letras le corresponde un número (ver cuadro 4). Estos números se suman para dar el Índice de McIntosh.

En la figura 5 se muestran ejemplos de manchas pertenecientes a las clases de McIntosh.

Cuadro 4: Asignación de valores para cada clase de la clasificación McIntosh. Nótese que algunas combinaciones no son permitidas. P.ej.: una mancha A nunca tiene penumbra y siempre se encuentra sola, por lo tanto, sólo Axx tiene un valor definido. De la misma manera, una mancha H siempre tiene penumbra, y por eso Hxx no está definido.

Letra inicial \ Segunda letra	Segunda letra					
	x	r	a	s	k	h
A	Axx=1	—	—	—	—	—
B	Bxo=2 Bxi=3	—	—	—	—	—
C	—	Cro=5 Cri=6	Cao=8 Cai=9	Cso=11 Csi=12	Cko=38 Cki=39	Cho=41 Chi=42
D	—	Dro=13 Dri=16	Dao=19 Dai=22 Dac=31	Dso=25 Dsi=28 Dsc=34	Dko=43 Dki=46 Dkc=55	Dho=49 Dhi=52 Dhc=58
E	—	Ero=14 Eri=17	Eao=20 Eai=23 Eac=32	Eso=26 Esi=29 Esc=35	Eko=44 Eki=47 Ekc=56	Eho=50 Ehi=53 Ehc=59
F	—	Fro=15 Fri=18	Fao=21 Fai=24 Fac=33	Fso=27 Fsi=30 Fsc=36	Fko=45 Fki=48 Fkc=57	Fho=51 Fhi=54 Fhc=60
H	—	Hrx=4	Hax=7	Hsx=10	Hkx=37	Hhx=40

Figura 5: Clasificación de McIntosh.



3. Finalidad del estudio de la actividad solar

La observación del Sol es de singular importancia en Astronomía. Al tratarse de la única estrella cuya superficie podemos estudiar detalladamente, se transforma en excelente fuente de información pormenorizada sobre las mismas; información muy representativa además, puesto que el Sol es una

estrella que podemos considerar “promedio”, en el sentido de que no presenta características globales muy distintas a la gran mayoría de ellas.

Si bien nuestro estudio en el taller se limita a la superficie solar, las manchas están íntimamente vinculadas con los procesos dinámicos internos del Sol, por lo que el seguimiento de la evolución de las mismas aporta valiosos datos para el conocimiento físico general de nuestra estrella.