

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA ACTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA
DEL SOL

ORLANDO ARGOTY ERASO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMATICAS
PROGRAMA DE FISICA
SAN JUAN DE PASTO
2007

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA ACTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA
DEL SOL

ORLANDO ARGOTY ERASO

Trabajo presentado como requisito para optar el título de físico

Director
ALBERTO QUIJANO VODNIZA
Master en Física. Director línea de investigación en astrofísica

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
PROGRAMA DE FÍSICA
SAN JUAN DE PASTO
2007

“Las ideas y conclusiones aportadas en este trabajo de grado son responsabilidad exclusiva del autor”

Artículo primero del acuerdo número 324 de octubre 11 de 1966, emanado por el honorable consejo directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

Director

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, febrero de 2007

DEDICATORIA

A Dios, por hacerme quien soy, por darme la familia que tengo y sobre todo por permitirme culminar con éxito una de mis metas.

A mis padres, que por sus correctivos y su apoyo incondicional me ayudaron a ser una mejor persona que da lo mejor en cada una de las metas que se plantea.

A mi hermana, hermanos, mi novia y amigos, que con su apoyo e insistencia aportaron con un granito de arena para la culminación de este trabajo

AGRADECIMIENTOS

El autor de este trabajo expresa su agradecimiento a:

Alberto Quijano Vodniza, quien con mucha paciencia y tolerancia me brindo su valiosa colaboración, apoyo y motivación para culminar con éxito este trabajo.

Ángel Alberto Coroas, a pesar de la distancia me brindo su valiosa colaboración en la asesoría de algunos temas.

Todas aquellas personas que ayudaron de alguna forma en la realización de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	25
1. OBJETIVOS	26
1.1 OBJETIVO GENERAL	26
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	26
2. EL SOL	27
2.1 CONCEPTOS PRELIMINARES	27
2.2 ENERGIA SOLAR	27
2.2.1 La radiación solar y la atmósfera	30
2.3 LA ESTRUCTURA DEL SOL	33
2.3.1 El Interior del Sol	33
2.3.2 Zona intermedia (o de transporte radiactivo)	35
2.3.3 Zona convectiva	35
2.3.4 La Fotosfera	36
2.3.5 La Atmósfera Solar	36
2.3.5.1 La Cromosfera	36
2.3.5.1.1 Protuberancias	37
2.3.5.1.1.1 Bucle	37
2.3.5.1.1.2 Sosegada	37
2.3.5.1.1.3 Eruptiva	37
2.3.5.2 La Corona Solar	37
2.4 ACTIVIDAD SOLAR	38

2.4.1 Manchas Solares	39
2.4.1.1 Nomenclatura del fenómeno de las manchas solares	39
2.4.1.1.1 Poros	39
2.4.1.1.2 Áreas de vacío	39
2.4.1.1.3 Umbra	39
2.4.1.1.4 Punto umbral	40
2.4.1.1.5 Puentes de luz	40
2.4.1.1.6 Anillo luminoso interno	40
2.4.1.1.7 Anillo luminoso externo	40
2.4.1.1.8 Penumbra	40
2.4.1.2 Desarrollo de un área grande de actividad	40
2.4.1.3 Campo Magnético de las Manchas solares	45
2.4.1.4 Clasificación de las manchas solares	46
2.4.1.4.1 Clasificación de Zürich de los grupos de manchas	47
2.4.1.4.1.1 Clasificación de Zürich de la evolución de los grupos	49
2.4.1.4.2 Clasificación de McIntosh de los grupos de manchas	49
2.4.1.4.2.1 Clasificación de la penumbra de la mancha principal	51
2.4.1.4.2.2 Distribución de las manchas dentro del grupo	52
2.4.1.4.3 Clasificación magnética de Monte Wilson	52
2.4.2 Medida del tamaño y la posición de las manchas solares	53
2.4.2.1 Nitidez de la imagen (Escala de Kiepenheuer)	55
2.4.2.2 Movimiento de la imagen (escala de Kiepenheuer)	56
2.4.2.3 Visión astronómica (escala de Kiepenheuer)	57
2.4.3 Medida de la actividad de las manchas solares	57

3. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	59
3.1 REGISTRO DE LAS SEÑALES	59
3.2 MANCHAS SOLARES Y SU POSIBLE INFLUENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE EXPLOSIONES ELECTROMAGNÉTICAS EN EL SOL.	61
3.2.1 Medida de la actividad de las manchas solares en el periodo de estudio.	63
3.2.1.1 Actividad solar durante el mes de Abril del 2003.	63
3.2.1.2 Actividad solar durante el mes de Mayo del 2003.	65
3.2.1.3 Actividad solar durante el mes de Junio del 2003.	67
3.2.1.4 Actividad solar durante el mes de Julio del 2003.	70
4. VIENTO SOLAR	88
4.1 EL VIENTO SOLAR	88
4.1.1 Modelo matemático de Parker sobre el viento solar	89
4.2 PROPIEDADES DEL VIENTO SOLAR	93
4.3 DINAMICA DEL MEDIO INTERPLANETARIO	96
4.3.1 Regiones de Interacción Corrotante	97
4.3.2 Eyecciones de Masa Coronal	97
4.3.3 Destellos Solares	101
4.3.4 Eventos de Partículas Energéticas	102
5. METODO, RESULTADOS Y DISCUSION	103
5.1 CASOS PARTICULARES DE EYECCIONES DE MASA CORONAL TIPO HALO.	116
5.1.1 Eyección de masa coronal del 28 de mayo del 2003	116
5.1.2 Eyección de masa coronal del 17 de junio del 2003	118
5.1.3 Eyección de masa coronal del 28 de octubre del 2003	119
5.1.4 Eyección de masa coronal del 04 de noviembre del 2003	121

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	132
BIBLIOGRAFIA	134
ANEXOS	137

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Datos actuales del Sol.	28
Cuadro 2. Calculo del índice de Wolf del mes de Abril del 2003.	64
Cuadro 3. Calculo del índice de Wolf del mes de Mayo del 2003.	66
Cuadro 4. Calculo del índice de Wolf del mes de Junio del 2003.	69
Cuadro 5. Calculo del índice de Wolf del mes de Julio del 2003.	72
Cuadro 6. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.11	77
Cuadro 7. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.12	78
Cuadro 8. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.13	79
Cuadro 9. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.14	80
Cuadro 10. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.15	81
Cuadro 11. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.16	82
Cuadro 12. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.17	83
Cuadro 13. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.18	84
Cuadro 14. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.19	85
Cuadro 15. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.20	86
Cuadro 16. Datos obtenidos al aplicar la ecuación (3.21) para diferentes distancias desde el Sol en el sistema solar	96

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Conversión de constante H solar a potencia solar H_s emitida.	28
Figura 2.2 Variación de la radiación solar extraterrestre durante un año.	29
Figura 2.3 Representación esquemática del espectro de radiación solar fuera de la atmósfera terrestre y las pérdidas de energía a su paso por la atmósfera. a) Energía en la parte superior de la atmósfera. b) Energía absorbida por la atmósfera. c) Energía recibida en la superficie terrestre.	30
Figura 2.4 (a) Diagrama de transferencia de radiación solar a través de la atmósfera. (b) Radiación infrarroja emitida por la Tierra.	31
Figura 2.5 Sección del Sol y su atmósfera inferior. Los espesores de la capa inversora y de la cromosfera han sido exagerados.	34
Figura 2.6 Capas del Sol. En el diagrama, las capas no están dibujadas a escala.	37
Figura 2.7 El rompimiento Zeeman de un nivel $l = 1$ en un campo magnético externo.	42
Figura 2.8 El efecto Zeeman normal. Cuando se conecta el campo, la longitud de onda λ se convierte en tres longitudes de onda separadas.	43
Figura 2.9 Curso del campo magnético en un área de actividad bipolar.	44
Figura 2.10 Sistema de clasificación de Zurich de las manchas solares.	47
Figura 2.11 Sistema de clasificación de McIntosh de las manchas solares.	50
Figura 2.12 Clasificación de Monte Wilson de las manchas solares.	52
Figura 2.13 Plantilla con coordenadas heliográficas para el cálculo de la posición de las manchas solares.	54
Figura 2.14 Variación anual de la posición del eje solar y el ecuador.	54
Figura 2.15 Ángulos que caracterizan la posición de la red de coordenadas sobre el disco solar.	55
Figura 3.1 Ventana principal del programa RADIO SKY-PIPE.	60
Figura 3.2 Montaje final del sistema utilizado para capturar las radioemisiones procedentes del Sol.	61
Figura 3.3 Gráfica del índice de Wolf durante el mes de abril del 2003.	63
Figura 3.4 Gráfica del índice de Wolf durante el mes de mayo del 2003.	65
Figura 3.5 Gráfica del índice de Wolf durante el mes de junio del 2003.	68
Figura 3.6 Gráfica del índice de Wolf durante el mes de julio del 2003.	70
Figura 3.7. Formato de una Señal en donde se muestra fecha, Observatorio, periodo de tiempo utilizado e intensidad de la señal capturada.	74
Figura 3.8. (a). Señal capturada donde se observa que el nivel de actividad solar es elevado e indica que el sistema funciona. (b). Señal filtrada o suavizada, que se exhibe en un rango más definido.	75
Figura 3.9. (a) Señal capturada el 28 de mayo desde las 10:09:57 hasta el 29 de mayo a las 03:02:41 horas. (b). Señal filtrada o suavizada, que se exhibe en un rango más definido.	75
Figura 3.10. (a) Señal capturada el 07 de abril desde las 10:18:26 hasta las 23:59:59 horas. (b). Señal filtrada o suavizada, que se exhibe en un rango	

más definido.	76
Figura 3.11. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Azul capturada por el Observatorio SCSURO en Orangebur, Carolina del Sur (Estados Unidos). (b). Señales filtradas o suavizadas, que se exhiben en un rango más definido.	78
Figura 3.12. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Verde y Señal en Azul capturadas por el Observatorio Área 1487 en Saginaw, Miami (Estados Unidos). (b). Señales filtradas o suavizadas, que se exhiben en un rango más definido.	79
Figura 3.13. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Azul capturada por el Observatorio SCSURO en Orangebur, Carolina del Sur (Estados Unidos). (b). Señales filtradas o suavizadas, que se exhiben en un rango más definido.	80
Figura 3.14. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Verde y Señal en Azul capturadas por el Observatorio SCSURO en Orangebur, Carolina del Sur (Estados Unidos). (b). Señales filtradas o suavizadas, que se exhiben en un rango más definido.	81
Figura 3.15. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en azul capturada por el Observatorio Área 1487 RO en Saginaw, Miami (Estados Unidos). (b). Señales filtradas o suavizadas, que se exhiben en un rango más definido.	82
Figura 3.16. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Azul capturada por el Observatorio SSF, Std JOVE Ant, MT 46N/114W en Sula, Montana (Estados Unidos). (b). Señales filtradas o suavizadas, que se exhiben en un rango más definido.	83
Figura 3.17. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en azul capturada por el Observatorio Área 1487 RO en Saginaw, Miami (Estados Unidos). (b). Señales filtradas o suavizadas, que se exhiben en un rango más definido.	84
Figura 3.18. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Azul capturada por el Observatorio KB7YPFRO en Sierra Vista, AZ en Arizona (Estados Unidos). (b). Señales filtradas o suavizadas, que se exhiben en un rango más definido.	85
Figura 3.19. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Azul capturada por el Observatorio Área 1487 en Saginaw, Miami (Estados Unidos). (b). Señales filtradas o suavizadas, que se exhiben en un rango más definido.	86
Figura 3.20. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Verde y Señal en Azul capturadas por el Observatorio Área 1487 en Saginaw, Miami (Estados Unidos). (b). Señales filtradas o suavizadas, que se exhiben en un rango más definido.	87
Figura 4.1 variación de la velocidad con respecto a la distancia al Sol (r) para una temperatura coronal de un millón de grados de acuerdo al modelo hidrodinámico de Parker para el viento solar	89
Figura 4.2 Cuatro clases de soluciones en las que se puede observar su punto crítico.	91
Figura 4.3 Esquema del viento solar emergiendo del Sol, la extensión tridimensional de la heliosfera, la heliopausa y el medio interestelar.	94

Figura 4.4 Esquema que ilustra mediante flechas, partículas del viento solar alejándose radialmente del Sol.	95
Figura 4.5 Formación de una región corrotante de interacción en el medio interplanetario, dibujo en dos dimensiones en el plano de la eclíptica.	97
Figura 4.6 Esquema del proceso de una eyección de masa coronal, donde se señalan los “Streamer” coronales, lazos de eyecciones de masa coronal ascendentes, prominencia eruptiva y una región activa sobre la fotosfera.	98
Figura 4.7 (a) Helmet Streamers, (b) CME a pequeña escala, (c) CME a gran escala con estructura de “Flux Rope”.	100
Figura 4.8 Ilustra la topología magnética y el proceso explosivo durante un destello solar. Según Cliver et .al. (1986).	101
Figura 5.1 Registro de los parámetros del Viento Solar del 01 al 05 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	104
Figura 5.2 Registro de los parámetros del Viento Solar del 06 al 10 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	104
Figura 5.3 Registro de los parámetros del Viento Solar del 11 al 15 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	105
Figura 5.4 Registro de los parámetros del Viento Solar del 16 al 20 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	105
Figura 5.5 Registro de los parámetros del Viento Solar del 21 al 25 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	106
Figura 5.6 Registro de los parámetros del Viento Solar del 26 al 30 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	106
Figura 5.7 Registro de los parámetros del Viento Solar del 01 al 05 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	107
Figura 5.8 Registro de los parámetros del Viento Solar del 06 al 10 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	107
Figura 5.9 Registro de los parámetros del Viento Solar del 11 al 15 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	108
Figura 5.10 Registro de los parámetros del Viento Solar del 16 al 20 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	108
Figura 5.11 Registro de los parámetros del Viento Solar del 21 al 25 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	109
Figura 5.12 Registro de los parámetros del Viento Solar del 26 al 31 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	109
Figura 5.13 Registro de los parámetros del Viento Solar del 01 al 05 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	110
Figura 5.14 Registro de los parámetros del Viento Solar del 06 al 10 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	110
Figura 5.15 Registro de los parámetros del Viento Solar del 11 al 15 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	111
Figura 5.16 Registro de los parámetros del Viento Solar del 16 al 20 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	111
Figura 5.17 Registro de los parámetros del Viento Solar del 21 al 25 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	112
Figura 5.18 Registro de los parámetros del Viento Solar del 26 al 30 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	112
Figura 5.18 Registro de los parámetros del Viento Solar del 26 al 30 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	112

del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	113
Figura 5.20 Registro de los parámetros del Viento Solar del 05 al 10 de julio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	113
Figura 5.21 Registro de los parámetros del Viento Solar del 11 al 15 de julio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	114
Figura 5.22 Registro de los parámetros del Viento Solar del 16 al 20 de julio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	114
Figura 5.23 Registro de los parámetros del Viento Solar del 21 al 25 de julio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	115
Figura 5.24 Registro de los parámetros del Viento Solar del 26 al 31 de julio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.	115
Figura 5.25 Imagen de la eyección de masa coronal del 28 de mayo del 2003 captada por el cronógrafo LASCO a bordo del satélite SOHO, la flecha indica la región activa S07W17 (mancha 365) fuente del destello y de la eyección de masa coronal.	117
Figura 5.26 Registro de los parámetros del Viento Solar del 28 al 30 de mayo del 2003. a) Temperatura en función del tiempo. b) velocidad en función del tiempo y c) densidad en función del tiempo. La flecha indica el incremento de densidad luego de ocurrida la eyección de masa coronal.	117
Figura 5.27 Imagen de la eyección de masa coronal del 17 de junio del 2003 captada por el cronógrafo LASCO a bordo del satélite SOHO, la flecha indica la región activa S08E61 (mancha 386) fuente del destello y de la eyección de masa coronal.	118
Figura 5.28 Registro de los parámetros del Viento Solar del 18 al 20 de junio del 2003. a) Temperatura en función del tiempo. b) velocidad en función del tiempo y c) densidad en función del tiempo. La flecha indica el incremento de densidad luego de ocurrida la eyección de masa coronal.	119
Figura 5.29 Imagen de la eyección de masa coronal del 28 de octubre del 2003, captada por el cronógrafo LASCO a bordo del satélite SOHO, la flecha indica la región activa S16E08 (mancha 486) fuente del destello y de la eyección de masa coronal.	120
Figura 5.30 Registro de los parámetros del Viento Solar del 28 de octubre al 01 de noviembre del 2003. a) Temperatura en función del tiempo. b) velocidad en función del tiempo y c) densidad en función del tiempo. La flecha indica el incremento de densidad luego de ocurrida la eyección de masa corona.	120
Figura 5.31 Imagen de la eyección de masa coronal del 04 de noviembre del 2003, captada por el cronógrafo LASCO a bordo del satélite SOHO, la flecha indica la región activa S19W83 (mancha 486) fuente del destello y de la eyección de masa coronal.	121
Figura 5.32 Registro de los parámetros del Viento Solar del 05 al 09 de noviembre del 2003. a) Temperatura en función del tiempo. b) velocidad en función del tiempo y c) densidad en función del tiempo. La flecha indica el incremento de densidad luego de ocurrida la eyección de masa coronal.	122
Figura 5.33 Velocidad de arribo del Viento Solar en función del tiempo de propagación desde el Sol hasta las inmediaciones de la Tierra.	123
Figura 5.34 Temperatura medida en el viento solar en función del número de manchas solares, para el periodo comprendido entre el 01 de abril y 31	

de Julio de 2003.	123
Figura 5.35 Densidad medida en el viento solar en función del número de manchas solares, para el periodo comprendido entre el 01 de abril y 31 de Julio de 2003.	124
Figura 5.36 Velocidad medida en el viento solar en función del número de manchas solares, para el periodo comprendido entre el 01 de abril y 31 de Julio de 2003.	124
Figura 5.37 Temperatura en función de la velocidad en las inmediaciones de la Tierra medida en el viento solar, para el mes de abril del 2003.	125
Figura 5.38 Logaritmo de temperatura en función de logaritmo de velocidad medida en el viento solar, para el mes de abril del 2003.	126
Figura 5.39 Temperatura en función de la velocidad en las inmediaciones de la Tierra medida en el viento solar, para el mes de mayo del 2003.	126
Figura 5.40 Logaritmo de temperatura en función de logaritmo de velocidad medida en el viento solar, para el mes de mayo del 2003.	127
Figura 5.41 Temperatura en función de la velocidad en las inmediaciones de la Tierra medida en el viento solar, para el mes de julio del 2003.	128
Figura 5.42 Logaritmo de temperatura en función de logaritmo de velocidad medida en el viento solar, para el mes de julio del 2003.	128
Figura 5.43 Temperatura promedio en función de la velocidad promedio diaria medida en el viento solar, para el periodo de 01 abril a 31 de julio del 2003.	129
Figura 5.44 Logaritmo de temperatura promedio en función de logaritmo de velocidad promedio diaria medida en el viento solar, para el periodo de 01 abril a 31 de julio del 2003.	130
Figura 5.45 Velocidad de arribo del Viento Solar en función del tiempo de propagación desde el Sol hasta las inmediaciones de la Tierra.	131
Figura 5.46 Velocidad de arribo del Viento Solar en función del tiempo de propagación desde el Sol hasta las inmediaciones de la Tierra para densidades mayores a 10 cm^{-3} .	131

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Parámetros de viento solar promedios diarios para el mes de abril de 2003.	137
Anexo B. Parámetros de viento solar promedios diarios para el mes de mayo de 2003.	137
Anexo C. Parámetros de viento solar promedios diarios para el mes de junio de 2003.	138
Anexo D. Parámetros de viento solar promedios diarios para el mes de julio de 2003.	139
Anexo E. Parámetros del viento solar para la eyección de masa coronal tipo halo del 28 de mayo de 2003.	140
Anexo F. Parámetros del viento solar para la eyección de masa coronal tipo halo del 17 de junio de 2003.	141
Anexo G. Parámetros del viento solar para la eyección de masa coronal tipo halo del 28 de octubre de 2003.	143
Anexo H. Parámetros del viento solar para la eyección de masa coronal tipo halo del 04 de noviembre de 2003.	146

GLOSARIO

Agujeros coronales: Regiones de la corona, frías y poco densas, que aparecen como zonas oscuras en las imágenes ultravioletas o de rayos X, y que constituyen intensas fuentes de viento solar. Las líneas de campo magnético que surgen de ellas no se cierran sobre la superficie sino que están abiertas.

CME: (Coronal Mass Ejections). Erupciones de materia que cruzan la corona hacia el espacio exterior. Pueden estar ocasionadas por fulguraciones o erupciones de protuberancias.

Complejo de actividad: Región de gran actividad y larga duración. Puede tener una vida superior a un año produciendo grupos de manchas de forma casi continua.

Corona: Capa externa del Sol que se observa como un halo durante un eclipse total. Su aspecto está modelado por el campo magnético y varía considerablemente con el ciclo.

Cromosfera: Capa situada entre la fotosfera y la corona. Sólo puede observarse durante un eclipse total o a través de algunas líneas del espectro solar. La baja cromosfera es la parte más fría del Sol (unos 4000^o).

Fáculas: Regiones brillantes de la superficie solar. Junto con las manchas son las principales manifestaciones en luz blanca de una región activa.

Fotosfera: Es la capa que emite la luz visible y suele recibir el nombre de "superficie solar".

Fulguraciones: Explosiones que se producen en las regiones activas. Están ocasionadas por la reconfiguración del campo magnético y liberan una enorme cantidad de energía. Las ondas de choque originadas pueden alcanzar la Tierra siendo una de las causas de las tormentas magnéticas.

Granulación: Conjunto de pequeñas celdas brillantes separadas por espacios oscuros, que cubre toda la fotosfera. Es la manifestación superficial del movimiento convectivo que existe por debajo de la superficie.

Limbo: Borde del disco visible de un cuerpo celeste. En el Sol, la zona próxima al limbo es menos brillante que el centro del disco porque en esa dirección observamos las capas superiores, más frías, de la fotosfera.

Manchas: Regiones oscuras y frías de la fotosfera. Están creadas por la emersión de campo magnético desde el interior solar y son una de las principales manifestaciones de una región activa.

Penumbra: Zona de una mancha que rodea a la umbra. Su brillo y temperatura son mayores que los de la umbra pero menores que los de la fotosfera. Su estructura está constituida por filamentos claros y oscuros.

Protuberancias: Condensaciones de materia en la corona. Sólo pueden observarse en un eclipse total o a través de ciertas líneas del espectro. Alrededor del limbo aparecen brillantes, pero en el interior del disco son oscuras y reciben el nombre de "filamentos".

Poros: Manchas sin penumbra y, generalmente de pequeño tamaño.

Puentes luminosos: Áreas brillantes visibles en el interior de una mancha. Sus formas, brillos y tamaños pueden ser muy diversos y variables.

Región activa: Conjunto de todas las manifestaciones de actividad magnética asociadas a una zona determinada de la superficie y de la atmósfera del Sol.

Rotación diferencial: Fenómeno que consiste en que el ecuador gira a mayor velocidad que las regiones polares.

Umbra: Núcleo o región más oscura de una mancha.

Viento solar: Flujo de partículas emitido por el Sol.

RESUMEN

La investigación, tanto experimental como teórica, se centra en las emisiones transientes en el rango de radiofrecuencias provenientes del Sol, que son detectadas mediante un radiotelescopio en el rango de frecuencia de los 19MHz a los 21MHz.

A partir del estudio de las radiaciones solares de radiofrecuencia se buscó un mayor entendimiento de la dinámica de las manchas solares en función de las "explosiones" o eyecciones de masa coronal que algunas de ellas producen, mayor entendimiento de la interacción entre el Sol y la Tierra en función de los parámetros del viento solar.

Los resultados obtenidos muestran la importancia de correlacionar los parámetros de las eyecciones de masa coronal, el Viento Solar y los eventos protónicos, en la búsqueda de una visión más integral de los fenómenos analizados, contribuyendo con más elementos en la caracterización del estado del medio interplanetario.

ABSTRACT

The investigation, so much experimental as theoretical, is centered in the emissions in the range of radio frequencies coming from the Sun, that is detected by means of a radiotelescope in the range of frequency of 19MHz at 21MHz.

Starting from the study of the solar radiations of radio frequency was looked a bigger understanding of the dynamics of the sunspots in function of "explosions" or ejections of mass coronal that some of them take place, bigger understanding of interaction between Sun and Earth in function of the parameters of the solar wind.

The obtained results show the importance of correlating parameters of the ejections of mass coronal, Solar Wind and events of protons in search of more integral vision of the analyzed phenomena, contributing with more elements in characterization of state of the interplanetary means.

INTRODUCCIÓN

El Sol, como estrella más cercana a nuestro planeta ha sido la estructura más estudiada en el transcurso de los años, sin embargo, es mucho lo que se desconoce de ella y aún más lo que no se puede comprender. Uno de los fenómenos que tiene consecuencias directas sobre la Tierra son las ondas electromagnéticas que emite el Sol a través del viento solar, y con esto, se pretende hacer un análisis detenido y observar la influencia que tienen las manchas solares sobre dicha emisión ondulatoria.

A simple vista el Sol no parece cambiar. Sin embargo, en la actualidad se están haciendo muchos interesantes descubrimientos gracias al uso de instrumentos capaces de detectar la radiación solar en muchas frecuencias diferentes del espectro solar (algunas no visibles desde la Tierra), y de potentes ordenadores para analizar los datos. Ahora se sabe que el Sol Sí cambia, y de forma importante. Por ejemplo, las tormentas en el Sol son miles de veces mayores que las terrestres y más poderosas que miles de millones de bombas atómicas. Entre las tareas del Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño está la de estudiar el Sol, para lo que se tiene actualmente un proyecto en operación y desarrollo.

La energía solar como una energía limpia y no contaminante merece un estudio detallado. Para conocer la influencia que ésta tiene sobre nuestro planeta, necesitamos un modelo de referencia que nos permita hacer esta clase de observaciones y así dar manejo a las ventajas y desventajas que esta presenta. Por esta razón, se hace un análisis experimental, que permita obtener buenos resultados en esta parte del planeta. La eficiencia de estos datos depende del buen seguimiento que haga el Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño que de alguna forma los correlacionará con otras instituciones vigentes.

OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar las manchas solares y su posible influencia en la producción de explosiones electromagnéticas en el Sol.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1.2.1 Analizar física y matemáticamente la naturaleza del viento solar (plasma) y producción de manchas solares según modelos actuales.

1.2.2 Construir una base de datos de las mejores señales capturadas por el receptor JOVE como base principal de la investigación y que sirva para futuros proyectos de grado.

1.2.3 Investigar la posible correlación entre el número de manchas solares y los siguientes parámetros: velocidad de viento solar, densidad de partículas eléctricas provenientes del Sol y producción de emisiones solares que serán detectadas por el receptor JOVE.

1.2.4 Analizar señales obtenidas por instituciones involucradas en el estudio del tema a nivel internacional.

2. EL SOL

2.1 CONCEPTOS PRELIMINARES

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y es el elemento más importante de nuestro sistema solar. Es muy grande y contiene aproximadamente el 98% de la masa total del sistema solar. Se encuentra ubicado en el centro de un sistema planetario, es fuente de la mayor cantidad de energía que incide sobre la Tierra, es fuente de alimentación de las plantas, la causa de los flujos atmosféricos y del agua, el origen del calor que hace posible la vida. Nada existiría sin él.

La masa del Sol es aproximadamente 300.000 veces superior a la masa de la Tierra y su diámetro es unas 109 veces el terrestre, su volumen podría contener más de 1.3 millones de tierras. Por su parte, la temperatura superficial del Sol alcanza los 6.000°C^1 .

Observando el disco solar con algo de detalle, se distingue una apariencia similar a la de *granos de arroz* separados por un tenue límite oscuro; esta *granulación* cubre toda la superficie solar. La dimensión de cada gránulo alcanza unos 500 kilómetros y su duración sobre la superficie es efímera: aparecen y desaparecen en minutos. Cada gránulo parece corresponder a una cierta porción de gas caliente que asciende desde el interior del Sol; las regiones oscuras que rodean a los gránulos son la zona donde desciende el gas una vez enfriado.

Sin embargo, en el disco solar observable desde la Tierra, lo más llamativo son las llamadas *manchas solares*: un fenómeno conocido desde mucho tiempo atrás (inclusive antes de la invención del telescopio) y confirmado por Galileo en sus observaciones de 1610. En condiciones particulares del cielo diurno es posible observarlas a simple vista, siempre y cuando las manchas sean grandes, muchas veces mayores que el tamaño de la tierra.

2.2 ENERGIA SOLAR

Para tomar un modelo más realista de la estructura del Sol, se debe tener en cuenta, de alguna manera, el flujo de energía que produce el Sol. Esta cuestión puede ser explicada haciendo algunos cálculos basados en la constante solar H , que se define como la cantidad de energía solar que incide sobre la Tierra de manera perpendicular cuando el Sol se encuentra a su distancia promedio, en cantidades numéricas, despreciando la absorción atmosférica, cada centímetro cuadrado de área recibe 1,96 calorías por minuto, que equivale a 1367 Julios por metro cuadrado por segundo.

¹ HAMILTON, Calvin. Using the World-wide web to deliver complex Electronic Documents: The Sun. <planetscapes.com/solar/span/sun.htm> Julio 2003.

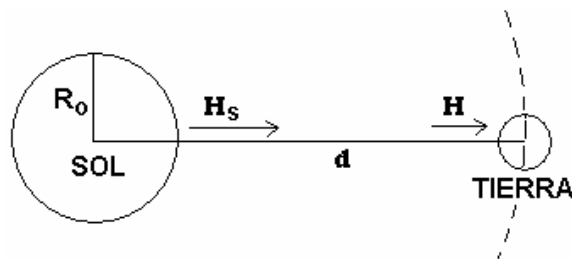
Cuadro 1. Datos actuales del Sol.

DATOS DEL SOL		
Masa	$1,989 \times 10^{30}$	Kg.
Masa (Tierra = 1)	332,830	Tierras.
Radio ecuatorial	695,000	Km.
Radio ecuatorial (Tierra = 1)	108,970	Tierras.
Densidad media	1,410	g./cm ³
Período Rotacional	25 - 36*	Días.
Velocidad de escape	618,020	Km./s.
Luminosidad	$3,827 \times 10^{33}$	Ergios/s.
Magnitud	-26,800	
Temperatura en superficie	6.000,000	°C.
Edad	4,500	Miles millones de años
Componentes químicos principales:	92,1%	Hidrógeno
	7,8%	Helio
	0,061%	Oxígeno
	0,030%	Carbono
	0,0084%	Nitrógeno
	0,0076%	Neón
	0,0037%	Hierro
	0,0031%	Silicio
	0,0024%	Magnesio
	0,0015%	Azufre
	0,0015%	Otros

Fuente: www.planetscapes.com/span/sun.htm#stats

Si representamos esta cantidad de energía sobre el mismo Sol, se observa que la energía solar es emitida desde una superficie que tiene un área de $4\pi R_0^2$. La energía que llega a la Tierra se ha dispersado sobre una esfera mucho mayor de $4\pi d^2$, por tanto, usando la ley del cuadrado inverso, la densidad de energía se reduce por el factor $(R_0/d)^2$. Siendo d la distancia desde el Sol a la Tierra

Figura 2.1 Conversión de constante H solar a potencia solar H_s emitida.



* El periodo de rotación del Sol en la superficie varía desde aproximadamente 25 días en el ecuador hasta 36 días en los polos. Un poco más abajo, bajo la zona de convección, todo parece rotar con un periodo de 27 días

Entonces, se observa que la emisión solar por unidad de área en la superficie del Sol es²:

$$H_s = H(d/R_o)^2 \quad (2.1)$$

Como la distancia d al sol es de 150 millones de kilómetros, y su radio es de 695.000 kilómetros, se tiene $d/R_o = 216$ y así:

$$H_s = H(216)^2 = 9,1445 \times 10^4 \text{ cal/cm}^2/\text{min} = 1524,1 \text{ cal/cm}^2/\text{s}.$$

Si se multiplica esta cifra por el área total del Sol ($6,0698 \times 10^{22} \text{ cm}^2$), se tiene que la emisión solar total es de $9,251 \times 10^{25} \text{ cal/s}$. que en otras unidades, equivale a $3,8723 \times 10^{23} \text{ Kw}$.

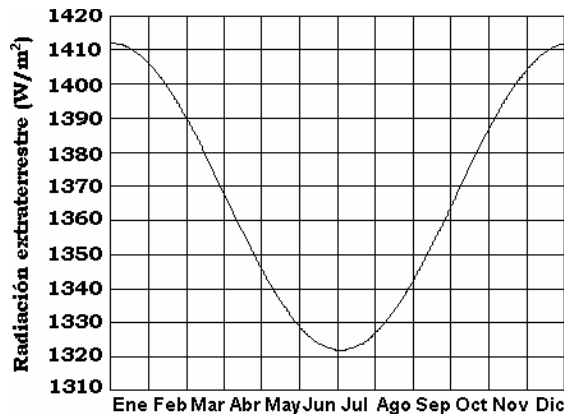
Debido a que la intensidad de la energía solar varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia Tierra-Sol, durante el año da lugar a una variación de la radiación solar como lo muestra la Figura 2.2.

Analíticamente³:

$$G(n) = H \times d(T-S) \quad (2.2)$$

Donde, $G(n)$ es la variación de la radiación solar y n es el número del día en el año ($1 \leq n \leq 365$), H es la constante solar, $d(T-S)$ es la distancia relativa entre el Sol y la Tierra, valor que se puede estimar a partir de la formulación $d(T-S) = (1+0.033 \times \cos(2\pi n/365))$. Esta función tiene una variación de máximo 3,3%, con el máximo de 1412 W/m^2 el primero de enero y el mínimo de 1321 W/m^2 el primero de julio.

Figura 2.2 Variación de la radiación solar extraterrestre durante un año.



Fuente: Frohlich y R. W. Brusa. Solar Radiation and its Variation in time

² SMITH, Alex G. Radio Exploration of the Sun. Van Nostrand Company, Inc., 120 Alexander Street Princeton, New. Jersey. (1967) 15-17.

³ C., Frohlich y R. W. Brusa. Solar Radiation and its Variation in Time. Sol. Phys. 74 (1981) 209-215.

2.2.1 La radiación solar y la atmósfera. La radiación solar son ondas electromagnéticas (de la misma naturaleza que las ondas de radio y televisión) de diferentes longitudes de onda. La constante solar es la energía total por unidad de área y de tiempo sin tener en cuenta la frecuencia de la radiación solar. Sin embargo, para muchos propósitos (por ejemplo, fotosíntesis y celdas solares) es conveniente conocer como está distribuida esa energía de acuerdo a su longitud de onda o frecuencia, es decir, su distribución espectral.

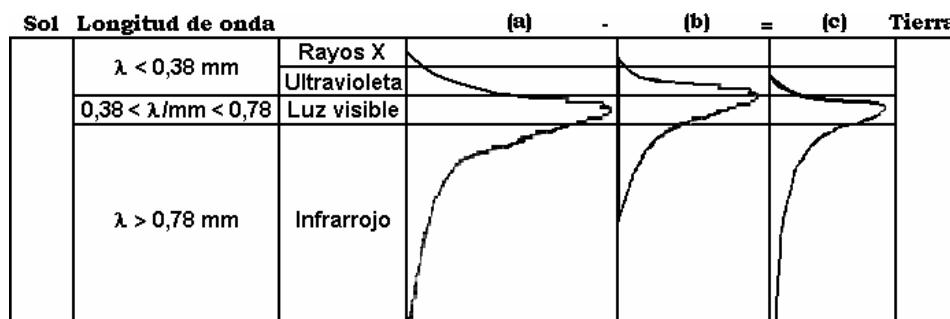
En primer lugar, de la enorme cantidad de energía radiada por el Sol en forma de ondas electromagnéticas, la Tierra intercepta tan sólo una dos mil millonésima parte del total emitido.

- La región llamada visible ($0,38 < \lambda/\text{mm} < 0,78$) porque es el rango que puede detectar el ojo humano y dentro del cual están los colores violeta (0,42 mm), azul (0,48 mm), verde (0,52 mm), amarillo (0,57 mm), anaranjado (0,60 mm) y rojo (0,70 mm).
- La región invisible más allá del rojo ($\lambda > 0,78$ mm), conocida como infrarrojo lejano.
- La región invisible después del violeta ($\lambda < 0,38$ mm), denominada ultravioleta.

De acuerdo a lo anterior, a cada región corresponde una fracción de la constante solar, distribuida así⁴: 7% al ultravioleta (esto es 95,7 W/m²), 47,3% al visible (o sea 646,6 W/m²), y 45,7% al infrarrojo (o sea 624,7 W/m²).

En la Figura 2.3 se puede ver esquemáticamente las proporciones de cada una de las ondas del espectro electromagnético según su llegada a la parte superior de la atmósfera. La longitud de las flechas es proporcional a la cantidad de energía transportada por cada longitud de onda. Podemos ver que la energía más intensa proviene de las partes del visible y el ultravioleta del espectro, mientras que la intensidad de la radiación de longitudes de onda larga, como el infrarrojo, es relativamente baja.

Figura 2.3 Representación esquemática del espectro de radiación solar fuera de la atmósfera terrestre y las pérdidas de energía a su paso por la atmósfera.

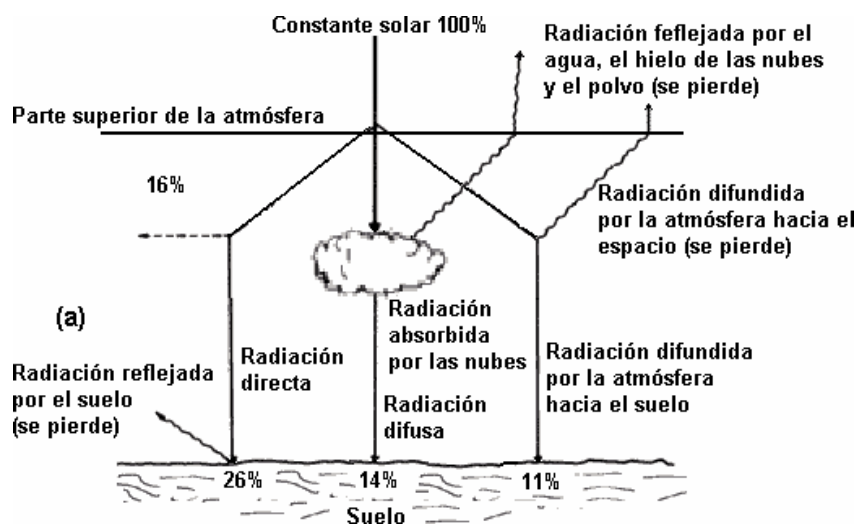


⁴ M, Iqbal. An Introduction to Solar Radiation, academic press (1983) Toronto.

En la grafica se puede observar que a) Energía en la parte superior de la atmósfera. b) Energía absorbida por la atmósfera. c) Energía recibida en la superficie terrestre.

De esa cantidad de radiación que llega a la parte superior de la atmósfera, las nubes reflejan cerca de un 25%, absorben un 1% y difunden, a través de las gotas de agua y cristales de hielo de las nubes, alrededor de un 14% que llega a la superficie terrestre como radiación de onda muy corta. En el resto de la atmósfera, donde no hay nubes, se absorbe directamente un 16% de la radiación incidente (3% por el ozono estratosférico y 13% por el vapor de agua de la troposfera) y se difunde un 18% (11% que alcanza la superficie y 7% que se pierde en el espacio exterior). Por lo tanto, de manera directa, a la superficie de la Tierra llega sólo un 26% de la radiación incidente, y de ésta se refleja un 5% que se pierde hacia el exterior (Figura 2.4 (a)).

Figura 2.4 (a) Diagrama de transferencia de radiación solar a través de la atmósfera.



Fuente: M. Iqbal. An Introduction to Solar Radiation.

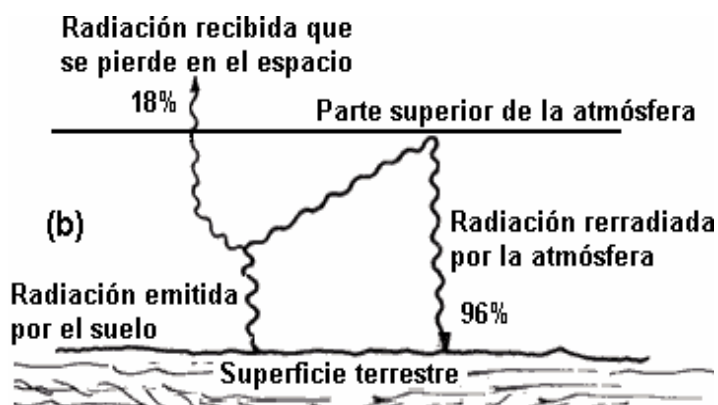
De lo anterior, se observa que la cantidad de radiación efectiva que absorbe la superficie terrestre es un 46% de la radiación extraterrestre incidente en la parte alta de la atmósfera.

Si la Tierra no cede esa energía, el planeta se calentaría indefinidamente. De ahí que la superficie terrestre tenga que emitir sin interrupción energía radiante en forma de ondas electromagnéticas, pero en esta ocasión, de onda larga. Ahora bien, debido a que el suelo emite una energía equivalente a un 114% de la constante solar, de ésta un 96% es absorbido en la baja troposfera y reemitida hacia el suelo y únicamente un 18% se pierde hacia el exterior (Figura 2.4 (b)). De aquí que si a la radiación efectiva recibida por el suelo se le resta ahora la que se pierde definitivamente (46%-18%), se obtiene que en el planeta queda atrapada

una cantidad cercana al 28% de la constante solar, la cual será utilizada en producir alteraciones en el clima.

Se puede considerar a la troposfera como una gigantesca máquina termodinámica, con la fuente de calor en el ecuador y la de enfriamiento en los polos. La diferencia de temperatura entre los dos da lugar al movimiento horizontal de grandes masas de aire (circulación atmosférica), el cual transporta aire caliente hacia los polos y aire frío hacia el ecuador.

Figura 2.4 (b) Radiación infrarroja emitida por la Tierra.



Fuente: M. Iqbal, An Introduction to Solar Radiation.

Este simplificado modelo de la troposfera es mantenido por la radiación solar. El máximo flujo de esta radiación se recibe en la denominada *zona tórrida* que se extiende entre los paralelos 23,45° N y 23,45° S, latitudes de los trópicos de Cáncer y de Capricornio, respectivamente. Cerca de los polos el flujo de radiación solar, aunque depende de la estación del año, es de alrededor de 2,4 veces menor en promedio que en el ecuador⁵.

La capacidad de transformar calor en trabajo, es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y la de enfriamiento, e inversamente proporcional a la temperatura del ecuador. Ahora bien, de acuerdo a estimaciones aproximadas, la eficiencia de la troposfera es del orden de 2%, lo que significa que 0,02 de la energía (potencial) radiante que llega a la Tierra es transformada en "energía cinética de movimiento atmosférico".

Matemáticamente⁶, la ecuación calorimétrica muestra:

$$Q = m \cdot c_e \cdot (T_f - T_i) \quad (2.3)$$

⁵ MORRISON, P. Neutrino Astronomy, Sci. Am. 207 (agosto, 1962), pag. 90-98.

⁶ Disponible en versión HTML: <http://www.fisicanet.com.ar/fisica/fi_1_unidades.php>. Calor y Trabajo. 2000-2005 Ituzaingó - Argentina.

Donde, Q = Calor cedido o absorbido por un cuerpo medido en julios, m = Masa medida en g., c_e = Calor específico del material medido en cal/g.°C, T_f = Temperatura final medida en °C y T_i = Temperatura inicial medida en °C.

De acuerdo con el principio de la conservación de la energía y suponiendo que no existen pérdidas cuando dos cuerpos a diferentes temperaturas se ponen en contacto, el calor tomado por uno de ellos ha de ser igual en cantidad al calor cedido por el otro. Para todo proceso de transferencia calorífica que se realice entre dos cuerpos puede escribirse entonces la ecuación:

$$Q_1 = -Q_2 \quad (2.4)$$

En donde el signo (-) indica que en un cuerpo el calor se cede, mientras que en el otro se toma. Recurriendo a la ecuación calorimétrica, la igualdad anterior puede escribirse en la forma:

$$m_1 \cdot c_{e1} \cdot (T_e - T_1) = - m_2 \cdot c_{e2} \cdot (T_e - T_2) \quad (2.5)$$

Donde, el subíndice 1 hace referencia al cuerpo frío y el subíndice 2 hace referencia al cuerpo caliente y T_e hace referencia a la temperatura de equilibrio siendo superior a T_1 y T_2 .

La anterior ecuación indica que si se conocen los valores del calor específico, midiendo temperaturas y masas, es posible determinar cantidades de calor.

Como calor y trabajo son formas de energía en tránsito de unos cuerpos o sistemas a otros, deben estar relacionadas entre sí[®].

De acuerdo con el principio de conservación de la energía, el calor se convierte íntegramente en trabajo mecánico y por tanto podría observarse movimiento:

$$W_1 = Q_2 \quad (2.6)$$

2.3 LA ESTRUCTURA DEL SOL

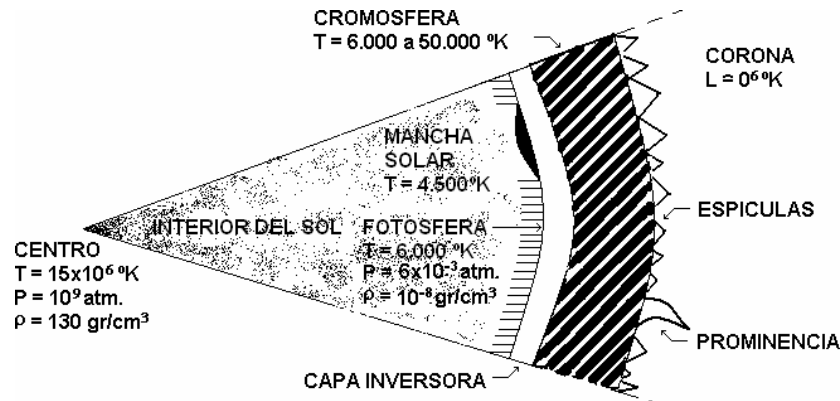
2.3.1 El Interior del Sol. Se estima que la materia próxima al centro del Sol⁷ tiene una temperatura de 15.000.000 °K y una densidad de 130 g./cm³. La presión se halla en la proximidad de los mil millones de atmósferas. Bajo estas condiciones extremas son frecuentes las colisiones entre átomos y muchos núcleos son desprovistos de sus capas protectoras de electrones. Las circunstancias están,

[®] La comprobación de este tipo de relación fue uno de los objetivos experimentales perseguidos con insistencia por el físico inglés James Prescott Joule (1818-1889)

⁷ ABETTI, G. El Sol. Faber y Faber. London, 1962

como para la producción de reacciones nucleares cuando estos núcleos se aniquilan entre sí a alta velocidad. El Sol obtiene su energía de la conversión de hidrógeno en helio, en lo que se llama *reacción por fusión*.

Figura 2.5 Sección del Sol y su atmósfera inferior. Los espesores de la capa inversora y de la cromosfera han sido exagerados.



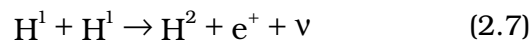
Fuente: Morrison, P., Neutrino Astronomy.

La transmutación básica implica la combinación de cuatro núcleos de hidrógeno, o protones, para formar un solo núcleo de helio, He^4 . En esta reacción hallamos que el núcleo de helio tiene una masa de $4,7 \times 10^{-26}$ g. menos que la masa combinada de los cuatro protones originales, y que esta materia perdida reaparece como energía de acuerdo con la relación⁸:

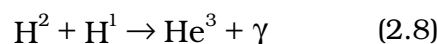
$$E = mc^2 = (4,7 \times 10^{-26} \text{ g.})(3 \times 10^{10} \text{ cm/s})^2 = 4,2 \times 10^{-5} \text{ ergios.}$$

Dado que es extremadamente improbable que cuatro protones interactúen simultáneamente, es necesario formar una cadena de sucesos, más artificiosa en cierto modo, para la formación de He^4 .

Conforme a las condiciones existentes en las regiones centrales del Sol, la llamada *reacción protón-protón* genera probablemente la mayor parte de energía. El proceso comienza con la colisión de dos protones (H^1) para formar un núcleo de hidrógeno pesado (H^2), junto con un positrón (e^+) y un neutrino (ν). O, expresado como una ecuación nuclear,

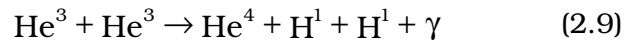


Posteriormente, el núcleo H^2 interactúa con otro protón para formar un isótopo ligero de helio y radiación gama:



⁸ SMITH, Op. cit. p. 20.

La última reacción es la colisión de dos de los núcleos He^3 recién creados para producir un núcleo de helio ordinario, más dos protones y radiación gama:



Si observamos de nuevo las ecuaciones (2.7), (2.8) y (2.9) vemos que un total de seis protones entraron en la creación de dos núcleos He^3 , pero al final se recupera dos protones, por tanto la transmutación neta fue la deseada de $4\text{H}^1 \rightarrow \text{He}^4$.

Para iniciar el proceso *protón-protón* se necesita una temperatura inmensamente elevada que se produjo debido a la contracción gravitacional de la gran masa difusa de gas que constituía el Sol primitivo.

Las ecuaciones (2.8) y (2.9) muestran que parte de la energía nuclear liberada aparece directamente como energía radiante con la apariencia de fotones de radiación gama. El positrón creado en la ecuación (2.7) es en realidad un antielectrón que es rápidamente atraído por un electrón negativo ordinario, y los dos se aniquilan entre sí en la bien conocida reacción



Liberando todavía más energía en forma de radiación gama. Por cada núcleo de He^4 que se forma, se emite un total de siete fotones de radiación gama.

El combustible que posee el Sol, es el hidrógeno a temperatura y presión enormes. A medida que se consume este combustible, la energía es dispersada en forma de radiación de gama, en tanto que el helio es dejado atrás como las cenizas de la reacción. Los fotones de radiación gama son absorbidos y emitidos repetidamente a medida que encuentran átomos innumerables en su viaje hacia la superficie del Sol, y en estos encuentros su energía se va degradando gradualmente, primero en la región de rayos X del espectro, después en la ultravioleta, y finalmente en la luz visible y radiación infrarroja inmediata a la superficie solar o *fotosfera*. A partir de ésta encontramos diferentes capas que van desde el interior hacia el exterior:

2.3.2 Zona intermedia (o de transporte radiactivo). En esta capa de gases de hidrógeno y de helio la energía liberada en el proceso de fusión del Hidrógeno en la zona interior es transportada hacia el exterior y se realiza a través de ésta hacia la zona convectiva por radiación.

2.3.3 Zona convectiva. En esta capa la temperatura del interior del Sol disminuye tanto que el plasma se vuelve convectivamente inestable. Si se produce el desplazamiento de un volumen de plasma hacia el exterior, su temperatura se mantiene por encima de la temperatura del plasma circundante y, por lo tanto, su densidad es menor; así se genera una fuerza que lo impulsa hacia arriba. Este es un fenómeno semejante al que ocurre cuando se produce la ebullición del agua

en un recipiente puesto al fuego. El transporte en esta región se produce por convección, es decir por el movimiento de materia caliente.

2.3.4 La Fotosfera. El nombre de fotosfera (esfera luminosa) está bien elegido debido a que la mayor parte de la luz directa y del calor que recibimos del Sol proviene de esta superficie brillante, posee una temperatura de aproximadamente 6.000°K . Esta capa tiene una apariencia manchada debido a las erupciones de energía que se dan en la superficie.

De esta capa proviene esencialmente la luz solar, su estructura, observada con instrumentos sencillos aparece formada de gránulos brillantes distribuidos por zonas oscuras (granulares) con dimensiones del orden de 100 Km. de diámetro en perpetuo movimiento turbulento hasta el punto en que un gránulo posee una vida media de varios minutos.

2.3.5 La Atmósfera Solar. Sobre la fotosfera se halla la atmósfera solar. Su masa total⁹ se aproxima a las 10^{17} Toneladas, que es la veinte mil millonésima parte de la masa total del Sol. Para facilitar su estudio, la atmósfera del Sol se dividió en capas, cromosfera (porción intermedia) y corona (la capa más externa).

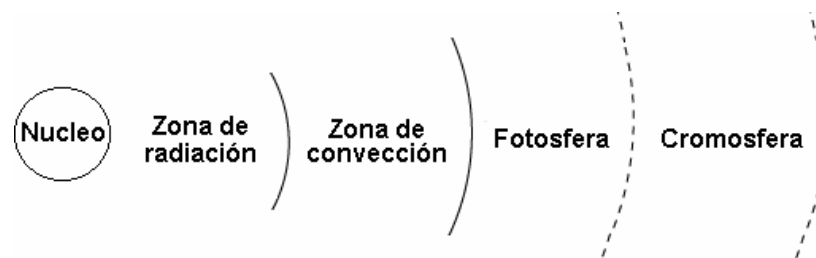
2.3.5.1 La Cromosfera. Durante los eclipses totales de Sol, el resplandor de esta es ocultado por la Luna y es cuando el Sol se ve rodeado por un estrecho anillo de luz rojiza que brota de una capa de la atmósfera solar llamada cromosfera (esfera de color). Es una región relativamente transparente que se encuentra sobre la fotosfera.

En un espectroscopio, la cromosfera exhibe un espectro de emisión de líneas brillantes que indican que está compuesto de gas incandescente a baja presión. Esta capa recibe el nombre de cromosfera debido al color rojizo producido por el brillo de una de estas líneas de emisión, la línea H-alfa de hidrógeno en una longitud de onda de 6563Å . A unos 15.000 kilómetros por encima de la fotosfera se desvanece el espectro de la cromosfera y esta altura se toma como el límite superior de la capa que está compuesta de lenguas de gas llamadas espículas, en ellas se dan fenómenos importantes como las protuberancias. Su temperatura varía entre 4.500°C en la región cercana a la fotosfera hasta alrededor de los 500.000°C en la parte superior donde comienza la corona.

La radiación solar pasa a través de ésta región en su trayectoria de salida del Sol. Las Fácúlas y destellos se levantan a la cromosfera. Las Fácúlas son nubes de hidrógeno brillantes y luminosas las cuales se forman sobre las regiones donde se forman las manchas solares. Los destellos son filamentos brillantes de gas caliente y emergen de las regiones de manchas solares.

⁹ Disponible en versión HTML: <http://www.fisicanet.com.ar/fisica/fi_1_unidades.php>. Calor y Trabajo. 2000-2005 Ituzaingó - Argentina

Figura 2.6 Capas del Sol. En el diagrama, las capas no están dibujadas a escala



2.3.5.1.1 Protuberancias. Son chorros de gas que desde la cromosfera se proyectan hacia el exterior. Tienen formas complejas y estructuras fibrosas, son relativamente persistentes; algunas alcanzan hasta 100.000 Km. de altura sobre la fotosfera y su evolución es muy rápida. Están asociadas casi siempre a las zonas de actividad solar; pero, mientras que las manchas no aparecen nunca en latitudes superiores a 50° , las protuberancias se presentan en todas partes. Se desconoce aun como se forman, pero se cree que el magnetismo debe desempeñar un papel importante.

Las protuberancias son fenómenos espectaculares que se observan en el Sol y se asemejan a grandes llamaradas. En algunos casos tienen un movimiento circular ascendente y descendente, como armando un gran remolino. Las protuberancias se detectan muy bien sobre el borde del disco solar; en los eclipses totales de Sol se las logra ver a simple vista, brillando con un color rojizo contra el fondo blanco de la corona. Pueden tener diferentes tipos:

2.3.5.1.1.1 Bucle. Protuberancias con forma de bucle, obtienen su forma cuando el plasma caliente capturado por las líneas de campo magnético se condensa y comienza a caer en forma de lluvia.

2.3.5.1.1.2 Sosegada. Este tipo de protuberancia solar se llama "sosegada" porque permanece relativamente estable antes de desaparecer. Plasma frío, aislado del calor abrasador de la corona por potentes líneas de campo magnético toman forma de seto encima de una región superficial inactiva. En esta situación la protuberancia sosegada puede establecerse durante meses.

2.3.5.1.1.3 Eruptiva. Cambios en el ordenado campo magnético de una protuberancia sosegada puede causar la explosión de la estructura sin previo aviso. Al expandirse la protuberancia eruptiva fuera a través de la corona, sus líneas de campo magnético se separan en pedazos, el arco revienta y su detritus gaseoso cae en cascada sobre la superficie del Sol o escapa en el viento solar.

2.3.5.2 La Corona Solar. Corresponde a la parte más alta de la atmósfera solar y envuelve a la cromosfera. Se presenta como un débil halo brillante o una aureola plateada alrededor del disco solar. Es en ésta región donde aparecen las erupciones solares que son inmensas nubes de gas resplandeciente formadas en la parte superior de la cromosfera. Las regiones externas de la corona se estiran

hacia el espacio y consisten en partículas que viajan lentamente alejándose del Sol. La corona se puede ver sólo durante los eclipses totales de Sol.

La corona solar posee llamaradas que se extienden a modo de rayos solares. Es como una atmósfera inmensa, tenue y de estructura muy diversa. Está compuesta de polvo (corona F), electrones e iones (corona K). Su temperatura es de 200.000.000 °C, por lo que los átomos se hallan en estado muy ionizados.

La extensión de la corona no tiene un límite preciso y se expande a través de todo el Sistema Solar, aunque el efecto que produce sobre el movimiento de los planetas es nulo. Tal como se la observa en los eclipses totales de Sol, la corona presenta diferencias en su estructura relacionadas estrechamente con el número de manchas solares: cuando el número es máximo la corona muestra una forma circular; en cambio, en el mínimo de manchas, tiende a ser un halo de apariencia alargada hacia la región de los polos.

2.4 ACTIVIDAD SOLAR

La estructura básica de la atmósfera solar exhibe un conjunto de fenómenos espectaculares como manchas, fulguraciones solares y protuberancias, englobados bajo la denominación de actividad solar. Uno de los medios más sencillos de medir esta actividad es a través de indicadores directos, como el número de manchas visibles en el disco solar en un instante de tiempo dado: cuanto mayor sea su número, más activo estará el Sol.

Un Sol activo producirá otro tipo de eventos¹⁰, de carácter esporádico, como las *fulguraciones (flares o destellos)*, las cuales son enormes explosiones de energía electromagnética principalmente en las porciones del visible, ultravioleta y rayos X del espectro de radiación solar. Son repentinos aumentos de brillo, en zonas ubicadas en las cercanías de las manchas solares. Se corresponden con nubes gaseosas que se elevan miles de kilómetros sobre la fotosfera, a una temperatura que puede llegar a los 10.000 °C. Estas, pueden durar desde unos minutos hasta unas cuantas horas y son acompañadas de emisiones electromagnéticas en el rango de frecuencias de radio. Cuanto mayor es el número de manchas, mayor es la actividad de las fulguraciones.

Durante las grandes fulguraciones solares, el Sol a menudo emite *rayos cósmicos* que son partículas cargadas (protones, partículas alfa y electrones) con energías relativistas. Esta energía irradiada por el Sol conduce las partículas en todas las direcciones, y esas partículas es lo que se conoce como el *viento solar*: partículas que se mueven con velocidades entre 400 y 700 Km./s. Muchas de las partículas del viento solar son atrapadas por los campos magnéticos de los planetas.

Entre los indicadores indirectos de la actividad solar tenemos a las auroras boreales, las tormentas geomagnéticas y las variaciones en la intensidad de la

¹⁰ MACAIZA, G. R; SINTON, W. M. Instrumentos de Astronomía, (Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1961), pag. 241-243.

radiación cósmica galáctica. Otro indicador importante lo constituyen los cruces de las fronteras de los llamados sectores magnéticos solares por la Tierra, los cuales se ha encontrado que están asociados con otros indicadores de la actividad solar (por ejemplo, la intensidad del campo magnético interplanetario, la velocidad del viento solar, su densidad, la actividad geomagnética y las variaciones en la intensidad de los rayos cósmicos galácticos).

2.4.1 Manchas Solares. Constituyen la manifestación más evidente de los fenómenos de actividad solar. Cuando la superficie del Sol sufre alguna perturbación aparecen entre los intersticios de la granulación unos puntos oscuros denominados poros, los cuales pueden multiplicarse rápidamente, o ampliarse, originando la formación de manchas. Las manchas continuamente cambian de forma y de tamaño; sus dimensiones son muy variadas: algunas pueden llegar a ser mayores que la misma Tierra. Se trata de regiones oscuras que se destacan de su entorno brillante. Aparecen aisladas o en grupos más o menos complejos de hasta decenas de miembros, pueden alcanzar extensiones de centenares de kilómetros cuadrados, sus tamaños son muy diferentes entre sí. Estrechamente unidos a las regiones donde aparecen las manchas están los llamados *flóculos brillantes* que son zonas irregulares y a veces muy extensas alrededor de los grupos de manchas, similares a nubes filamentosas. Los flóculos son más brillantes que la fotosfera circundante y aparecen más luminosos hacia los bordes del disco solar. Este fenómeno se llama *oscurecimiento en el borde*. El fenómeno es puramente óptico.

2.4.1.1 Nomenclatura del fenómeno de las manchas solares. Las manchas solares presentan diferentes características que se explican a continuación¹¹:

2.4.1.1.1 Poros. Son puntos oscuros considerados como manchas que carecen de penumbra, se caracterizan por cambiar rápidamente. Pueden marcar la posición de la formación de nuevas manchas o aparecer en grupos. Tienen por lo general un diámetro aproximado entre 1 y 10 segundos, siendo lo normal entre 2 y 5 segundos. Las manchas de diámetro inferior a 3 segundos se consideran poros. Su duración varía desde unas horas a un día.

2.4.1.1.2 Áreas de vacío. Son zonas en las que la granulación se pierde para volverse a formar en pocos minutos. Pueden variar en brillo y así convertirse en poros. Se distinguen porque la granulación desaparece, tienen un diámetro de entre 1" y 5", siendo lo normal encontrarlas entre 2 y 3". Su duración es de pocos minutos y son más brillantes que los poros.

2.4.1.1.3 Umbra. Es considerada como el "corazón" negro de la mancha. Son del orden de los 10.000 Km. de diámetro; ellas pueden variar su color entre el negro y el marrón rojizo. Los centros más oscuros están separados por zonas brillantes. Cuanto mayor es el campo magnético, más negras son, así, son mucho más oscuras durante un máximo solar que durante un mínimo.

¹¹ R., J. Bray, R., E. Loughhead. Sunspots. Chapman and Hall, London, (1964), p. 250.

2.4.1.1.4 Punto umbral. Aparecen en la umbra en forma brillante, son puntos manchados con un diámetro aparente aproximadamente de 0,5". Su tamaño e intensidad son deformados por turbulencia atmosférica y dispersión de luz.

2.4.1.1.5 Puentes de luz. En manchas de diámetros del orden de 30.000 Km, se observan zonas más brillantes situadas en el interior de las propias manchas.

2.4.1.1.6 Anillo luminoso interno. Es una zona muy estrecha que se encuentra entre la umbra y la penumbra, es un iluminar de la penumbra y no deber ser confundido con los puentes de luz en los que la granulación es similar a la ocurrida en la fotosfera.

2.4.1.1.7 Anillo luminoso externo. Es una zona situada entre la penumbra y la fotosfera, y de temperatura superior a la de la fotosfera del orden de 50 a 100 °K. Su formación se cree debida a la emanación de energía del interior del Sol hacia su superficie y que al encontrar una zona de umbra interactúa con ella y escapa hacia los laterales de esta, terminando por fluir a su alrededor.

2.4.1.1.8 Penumbra. La penumbra es una capa que rodea a la umbra a especie de "corona" negra con filamentos brillantes de longitudes del orden de 0.3" (200 Km.). Su duración ronda los 45 minutos y la velocidad de cambio es de 12 minutos.

2.4.1.2 Desarrollo de un área grande de actividad. El aspecto de un grupo de manchas solares se conecta con los más amplios fenómenos, tales como, faculas, filamentos, explosiones (la causa de todos estos), campos magnéticos. El desarrollo de los fenómenos tiene lugar a diferentes razones y son diferentes para cada área de actividad. La siguiente descripción puede cubrir unos aspectos generales sobre el desarrollo típico de un área de actividad grande en un determinado periodo de tiempo¹²:

Día 1: Un tubo de flujo de campo magnético alcanza la fotosfera. Si su densidad excede las 0.1 T, comienza a ser visible una pequeña facula en $H\alpha$.

Día 2: Al oeste de ella, aparece entonces una pequeña mancha. Mientras, el campo magnético sigue aumentando.

Día 3: Una o varias manchas aparecen en el este de la facula con polaridad contraria a la de la mancha inicial.

Día 4: La mancha del oeste forma una penumbra, con lo que la facula queda bipolarizada.

Días 5-13: La mancha del este forma una penumbra. Aparecen numerosas pequeñas manchas en el centro del grupo. La actividad de flares es máxima.

¹² BECK, Rainer; HILBRECHT, Heinz; REINSCH, Klaus y VÖLKER, Peter. Solar Astronomy Handbook, Willmann-Bell, inc. 1995, pag. 141-145.

Días 14-30: Desaparecen todas las manchas excepto la principal *mancha p* (la oeste). Disminuye la actividad y el campo magnético es máximo.

Días 30-60: La mancha principal desaparece y la brillantes de la facula se debilita y la facula se divide en pequeñas áreas individuales.

Días 60-100: La facula cromosférica desaparece y la facula fotosférica se disuelve.

Días 100-250: No se observan más faculas, los filamentos se rompen gradualmente.

El aspecto oscuro de las manchas nos muestra el interior de la región que ocupa la mancha, donde la temperatura es menor en unos 1.000 °C que la temperatura de la región circundante; por esta sencilla razón, la zona de una mancha aparece más oscura que el resto luminoso de la superficie solar.

Los astrónomos analizaron detalladamente este fenómeno y han podido comprobar que las manchas solares están asociadas con una actividad magnética muy fuerte. Como generalmente las manchas aparecen en parejas o grupos, siendo relativamente poco frecuente las manchas aisladas, son sede de importantes movimientos de materia. Su aparición y desaparición es un fenómeno variable. Se desplazan del borde este al oeste en un período de trece días, y durante 11 años su número aumenta de un mínimo a un máximo, volviendo después a un mínimo, es el denominado *ciclo oncenal* de la actividad solar, del que las manchas son los fenómenos más evidentes y observables.

Las observaciones magnetográficas ponen de manifiesto que las manchas solares son la sede de intensos campos magnéticos. “La evidencia del magnetismo de las manchas es su luz emitida. Los gases resplandecientes emiten luz en longitudes de onda bien definidas, un conjunto diferente para cada sustancia. Sin embargo en 1897, Pieter Zeeman halló que cuando se emite esa luz desde la región de un fuerte campo magnético, la emisión *se divide en longitudes de onda ligeramente diferentes*, con una separación que se incrementa con la fuerza del campo*”.

Matemáticamente¹³, se considera por un momento que el electrón no tiene espín, y por lo tanto no tiene momento magnético de espín. Supóngase que se prepara un átomo de hidrógeno en el nivel 2p ($l = 1$) y se coloca en un campo magnético uniforme externo B (suministrado por un electroimán en el laboratorio, por ejemplo). El momento magnético μ asociado con el impulso angular orbital interactúa con el campo y la energía asociada con esta interacción es:

$$V = - \mu \cdot B \quad (2.11)$$

* P. STERN, David. El Magnetismo Solar. En: Revista Ciencia Hoy. (15, sep., 1990); p. 12

¹³ R. Feynman, RB. Leighton, M. Sands. Física Vol. 1. Mecánica, Radiación y Calor. Editorial Addison Wesley Longman 1987, pág. 230-231.

Esto es, los momentos magnéticos que se encuentran alineados en la dirección del campo tienen menos energía que aquellos que están alineados en dirección opuesta al campo. Supóngase que el campo está en la dirección de la z, y como

$$\mu = \frac{-e}{2m} \hbar \quad (2.12)$$

Se tiene,

$$V = -\left(\frac{-e}{2m} \hbar\right) \cdot B = \frac{e}{2m} \hbar l_z B \quad (2.13)$$

Donde este último resultado viene de escoger a B en la dirección de z, ya que l_z es igual a $m_l \hbar$

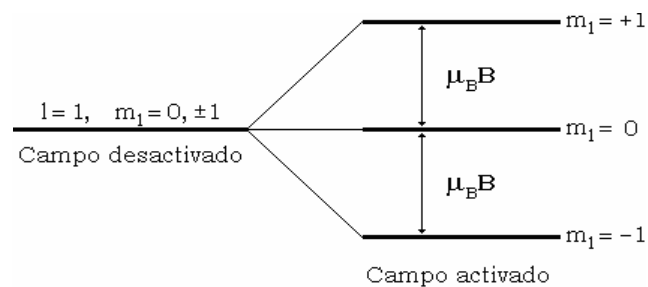
$$V = m_l \left(\frac{e\hbar}{2m}\right) B = m_l \mu_B B \quad (2.14)$$

La cantidad $e\hbar/2m$ se conoce como el *magnetón de Bohr*, con el símbolo μ_B y un valor de $9,27 \times 10^{-24} \text{J/T}$. En ausencia de un campo magnético, el nivel 2p tiene cierta energía E_0 (-3,4eV). Cuando se aplica el campo la energía se vuelve

$$E_0 + V = E_0 + m_l \mu_B B \quad (2.15)$$

Esto es, ahora hay tres energías distintas posibles para ese nivel, dependiendo del valor de m_l . la figura muestra esta situación

Figura 2.7 El rompimiento Zeeman de un nivel $l = 1$ en un campo magnético externo. (Ignorando los efectos de impulso angular de espín del electrón.) La energía en un campo magnético es distinta para los valores diferentes de m_l .



Fuente: R. Feynman, RB. Leighton, M. Sands. Física Vol. 1

Ahora, suponiendo que el átomo emite un fotón en una transición al estado base (1s). En ausencia de un campo magnético se emite un solo fotón con una energía de 10,2 eV y una longitud de onda correspondiente a 122 nm. Cuando se encuentra presente el campo magnético se emiten tres fotones con energías de

$$10,2 \text{ eV} + \mu_B B, \quad 10,2 \text{ eV} \quad \text{y} \quad 10,2 \text{ eV} - \mu_B B$$

La longitud de onda del fotón se puede determinar usando $E = hc / \lambda$. Se examina ahora, como un cambio pequeño en la energía ΔE (donde ΔE es $\mu_B B$) afecta la longitud de onda. Derivando se obtiene

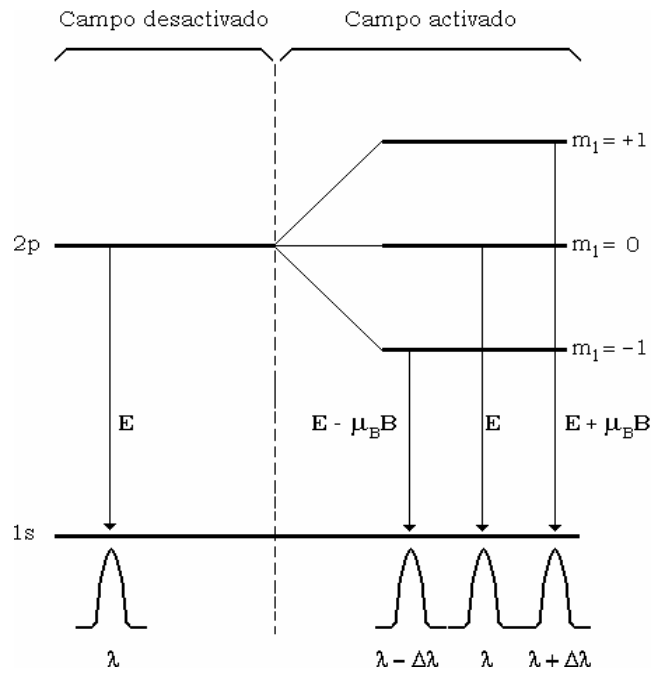
$$dE = -\frac{\hbar c}{\lambda^2} d\lambda \quad (2.16)$$

Y tomando diferenciales pequeños con magnitudes absolutas,

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{hc} \Delta E \quad (2.17)$$

La figura ilustra las tres transiciones y muestra un ejemplo del resultado de la medición de las tres longitudes de onda.

Figura 2.8 El efecto Zeeman normal. Cuando se conecta el campo, la longitud de onda λ se convierte en tres longitudes de onda separadas.

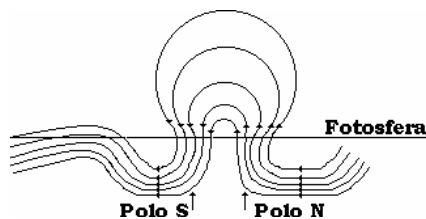


Fuente: R. Feynman, RB. Leighton, M. Sands. Física Vol. 1

Una mancha solar típica consiste en dos manchas de polaridad magnética opuesta, una “norte” y otra “sur”. La primera mancha de la pareja, en términos de la dirección de la rotación solar, se llama *mancha “delantera”* o *mancha P* (del inglés “preceding”), mientras que la otra se conoce como *mancha “trasera”* o

mancha F (del inglés “following”). Con pocas excepciones todas las manchas delanteras de grupos bipolares en un hemisferio tienen la misma polaridad magnética, mientras que todas las manchas delanteras del otro hemisferio tienen la polaridad opuesta; de forma similar las manchas traseras de ambos lados del ecuador tienen polaridades opuestas.

Figura 2.9 Curso del campo magnético en un área de actividad bipolar.



“Asociado con este fenómeno¹⁴, está la inversión del débil “campo polar”. A pesar de que el Sol no tiene un campo dipolar global como el de la Tierra, tiene en cambio un campo constituido por un gran número de elementos de flujo distribuidos por las capas superiores del Sol. Sin embargo hay grandes áreas con una polaridad neta en las regiones polares, con la polaridad del polo Norte heliográfico opuesta a la del polo Sur heliográfico.

La polaridad magnética de los polos tiende a invertirse aproximadamente un año después del máximo de manchas solares, es decir, a mitad del ciclo, porque el incremento de actividad hasta el máximo tiende a ser más rápido que el descenso hacia el mínimo (el incremento dura un promedio de 4,6 años, comparado con 6,7 años para el descenso). El cambio en los polos opuestos no ocurre simultáneamente y en ocasiones una polaridad puede cambiar hasta un año o dos antes que la otra. Por ejemplo, el polo Sur magnético se convirtió en polo Norte magnético en 1957, pero el polo Norte magnético no se convirtió en Sur hasta finales de 1958, por lo tanto, durante un tiempo el Sol puede tener dos polos magnéticos Norte o Sur.

Por lo general, si todas las *manchas P* del hemisferio norte tienen, por ejemplo, polaridad magnética Norte, todas las *manchas P* del hemisferio Sur tendrán polaridad Sur. Al final de cada ciclo de 11 años se invierte la distribución de las polaridades de las manchas. Continuando con el ejemplo anterior, todas las nuevas parejas de manchas que aparecen alrededor de la latitud de 30° N tendrían polos magnéticos Sur asociados con sus *manchas P*, mientras que las *manchas P* de los correspondientes grupos nuevos en el hemisferio Sur tendrían una polaridad magnética Norte. A causa de la inversión de polaridad al final de cada ciclo de 11 años, transcurren 22 años antes de que el Sol vuelva completamente a la misma configuración global”.

¹⁴ COROAS, Ángel Alberto. Re: Las Manchas Solares. (On line). Mensaje to: Orlando ARGOTY. Julio de 2003. personal communication. Available from Internet: <angel@met.cmw.inf.cu>.

Se encontró que en los máximos el número de manchas solares no es siempre el mismo; en algunas circunstancias el número es muy grande, pero en otras puede ser bastante pequeño. Poco después del descubrimiento del ciclo de los 11 años, se comprueba que las manchas solares alcanzan su máxima actividad al mismo tiempo que se detectan *perturbaciones magnéticas* sobre la Tierra. Esas perturbaciones se aprecian, por ejemplo, por la aparición de las *auroras boreales*. A simple vista, las auroras semejan "cortinas" de luces multicolores y ondulantes que aparecen en zonas del cielo terrestre, particularmente en ciertas regiones geográficas cercanas a los polos magnéticos de la Tierra. A las manchas están vinculados otros fenómenos, como las explosiones de gas, con expulsión de partículas de energía, y las radio emisiones.

2.4.1.3 Campo Magnético de las Manchas solares. El campo magnético vertical en la umbra de una mancha es¹⁵ normalmente del orden de 2.000 a 4.000 Gauss, unas 10.000 veces más intenso que el campo en la superficie de la Tierra, que varía entre unos 0,3 Gauss en el ecuador y un máximo de unos 0,7 Gauss en el polo. La disposición de las líneas de campo magnéticas entre manchas de polaridad opuesta en un grupo bipolar se pone de manifiesto fácilmente en los espectroheliogramas tomados, por ejemplo, en las rayas Ha o K del calcio ionizado. El diagrama de las fibrillas, alineadas según las líneas de fuerza magnéticas, se parece mucho al obtenido con limaduras de hierro esparcidas sobre una hoja de papel encima de un imán ordinario (las líneas de fuerza delinean la dirección del campo magnético, siguiendo sus bucles que van del polo norte magnético al Sur).

La materia solar está altamente ionizada, los iones y electrones tienen carga eléctrica. Las partículas pueden interactuar en el campo magnético produciendo de este modo, inducción electromagnética. La fuerza resultante se opone al movimiento de la partícula. Por lo tanto el flujo de materia ionizada ocurre a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético local. La elevada conductividad eléctrica de la materia solar, resultado de su alto nivel de ionización, asegura que la materia y el campo magnético del Sol están fuertemente acoplados; se dice que el campo está "*congelado*" en la materia. Esto implica que, donde la energía del campo es dominante, el flujo de materia estará gobernado por la configuración del campo magnético local, sin embargo, si la energía cinética de la materia es mayor que la energía magnética del campo, las líneas de campo serán distorsionadas y seguirán el movimiento de la materia. El magnetismo solar es, de hecho, el factor de control de una amplia variedad de fenómenos solares.

Los grupos de manchas solares se dividen según sus propiedades magnéticas en tres clases principales tal como sigue:

¹⁵ BABCOCK, H. W. The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-Year Cycle. *Astrophys. J.*, (1961), pag. 133, 572-587.

a: Grupos unipolares, manchas aisladas o grupos de manchas con igual polaridad magnética.

b: Grupos bipolares, en los que las manchas P y F son de polaridad magnética opuesta.

g: Grupos complejos, en los que están mezcladas muchas manchas de cada polaridad magnética.

Las regiones de polaridad opuesta en un grupo están separadas por una línea neutra o inversora donde la componente vertical del campo magnético es cero. Cerca de las líneas neutras ocurren violentas explosiones de energía magnética que producen fulguraciones. También se encuentran filamentos oscuros absorbentes de materia, que son protuberancias vistas desde el fondo del disco.

En los campos magnéticos del Sol, se puede contemplar la energía que se libera cuando se produce una fulguración. Un campo magnético almacena energía W a razón de¹⁶:

$$W = \left(\frac{B^2}{8\pi} \right) \text{ergios/cm}^3, \quad (2.18)$$

Donde, B es la fuerza del campo magnético medida en gauss. Un gran destello o fulguración puede liberar una energía de 10^{32} ergios en un volumen de 10^{29} cm^3 , creando una *densidad* de energía pasajera de 1.000 ergios/ cm^3 . Dado que ésta es centenares de veces mayor que la densidad de energía térmica de la corona. La ecuación (2.18) muestra que un campo magnético de 160 gauss almacena la energía necesaria, y esos campos son corrientes en las zonas activas del Sol. Así, las teorías recientes de las fulguraciones suponen que son originadas por una repentina conversión de energía magnética en calor y otras formas de radiación.

La *magnetohidrodinámica* que trata los movimientos de los plasmas en los campos magnéticos sugiere que un campo magnético tiende a “congelarse” en un plasma, es decir, que las líneas de fuerza magnética son arrastradas con el plasma cuando este se mueve.

2.4.1.4 Clasificación de las manchas solares. Las manchas suelen aparecer en grupos, típicamente un grupo consiste en dos manchas de polaridad magnética opuesta, extendidas en el sentido de los paralelos, con múltiples manchitas y poros en la parte intermedia. Se han propuesto varios sistemas para la clasificación de las manchas solares; el más utilizado es la clasificación de manchas de Zürich, en la cual, una mancha bien desarrollada pasa por nueve clases, designadas con las letras¹⁷ A, B, C, D, E, F, G, H, y J. Esencialmente el sistema se basa en las etapas evolutivas por las que pasan los grupos de manchas, aunque no todas las manchas siguen la secuencia completa, un grupo

¹⁶ SMITH, Op. cit. p. 40.

¹⁷ WALDMEIER, M. The Classification of Sunspot Groups. Astr. Mitt. Eidgen. Sternw. Zurich no. 358 (1978a).

de tamaño moderado puede seguir una secuencia abreviada de desarrollo, mientras que un grupo muy pequeño puede que no se desarrolle más allá de la primera etapa, esto es, algunas manchas solares evolucionan pasando del tipo E al G, un alto porcentaje sólo llega a desarrollarse hasta el tipo D y la mayoría se quedan en los estados A, B y C. Las manchas, que empiezan como una pequeña agrupación (tipo A) o como un grupo bipolar (B), crecen rápidamente y en un período de 8 a 10 días alcanzan su tipología máxima (F) después de pasar por los estados intermedios (C, D y E). Luego disminuyen más lentamente y el grupo pasa la mayor parte de su vida en la etapa final de la clasificación (G a J). La actividad asociada, como las fulguraciones, tiende a alcanzar un máximo bastante temprano en la evolución del grupo, típicamente durante las etapas D, E y F. El tiempo de vida total de un grupo grande puede ser hasta de varias semanas, el promedio es de menos de dos semanas. El tiempo de vida está más o menos relacionado con el área del grupo de manchas solares: si se expresa el área en millonésimas del disco visible, se obtiene una estimación burda del tiempo de vida del grupo en días dividiendo el área entre 10. De esta forma, una mancha pequeña de 10 millonésimas es probable que dure sólo un día, mientras que una mancha de 100 millonésimas de área se espera que sobreviva unos 10 días.

Figura 2.10 Sistema de clasificación de Zurich de las manchas solares

A				
B				
C				
D				
E				
F				
G				
H				
J				

Fuente: Beck, Hilbrecht, Reinsch, Volker, Solar Astronomy Handbook.

2.4.1.4.1 Clasificación de Zürich de los grupos de manchas. La clasificación de Zürich o Waldmeier se basa en si el grupo tiene una distribución unipolar o bipolar, en la existencia o no de penumbra y en este último caso, si se halla

presente en uno o en ambos extremos, así como a la extensión del grupo en grados de longitud heliográfica¹⁸:

A: Unipolar. Poro o pequeño grupo de poros concentrados en dos o tres grados cuadrados. En ellos no se observa presencia de penumbra.

B: Bipolar. Grupo mayor de poros o poros sin penumbra, alineados generalmente en dirección Este-Oeste. En casos particulares, a gran aumento y con excelentes imágenes se puede apreciar que algunos de los poros muestran un rudimento de penumbra (unos pocos filamentos).

C: Bipolar. Mancha pequeña o mediana con penumbra con un grupo de poros.

D: Bipolar. Dos o más manchas con penumbra y poros intermedios y una extensión inferior a 10° heliográficos.

E: Grupo bipolar grande de estructura complicada, con penumbras complejas y generalmente con gran número de poros y manchas intermedias. Longitud comprendida entre 10 y 15° heliográficos.

F: Bipolar. Fase de máximo desarrollo de un grupo. Manchas muy extensas y complejas (generalmente con grandes sombras y penumbras), con numerosos poros. Extensión superior a los 15° heliográficos.

G: Bipolar. Grupo en decadencia, con manchas en los extremos, penumbras redondeadas, con eventuales poros intermedios. En fases más avanzadas de evolución, Dimensión cercana a los 15° heliográficos.

H: Unipolar. Mancha con penumbra, en ocasiones grupo compacto de manchas por subdivisión de la principal, con algunos poros en su proximidad. Dimensión superior a 2,5° heliográficos.

J: Unipolar. Mancha con penumbra redondeada, o pequeña mancha en proceso de disolución. Dimensión inferior a 2,5° heliográficos.

Como sea que en ocasiones las diferencias de un tipo a otro (D y E, E y F, F y G, H y J), únicamente pueden establecerse por la extensión en longitud del grupo, es recomendable utilizar una plantilla que muestre los meridianos y paralelos del Sol y por proyección determinar el tamaño de los grupos que puedan resultar conflictivos.

De este modo se evitarán también errores subjetivos de clasificación, por ejemplo, el de anotar como tipo F a las manchas tipo E "compactas". Es imprescindible un buen conocimiento de la clasificación de Zürich antes de iniciarse en otras clasificaciones.

¹⁸ BRAY, R. J., LOUGHEAD, R. E. Op. cit. p. 260.

2.4.1.4.1.1 Clasificación de Zürich de la evolución de los grupos. Esta clasificación se basa en como evolucionan los grupos de manchas¹⁹:

A: En cualquier zona de la superficie solar entre 5 y 40° heliográficos surgen uno o varios poros muy próximos.

B: Surgen uno o varios poros al Este u Oeste del anterior (sistema bipolar). Se incrementa el número de poros donde aparecieron los primeros y los segundos.

C: Algunos de los poros extremos inician la formación de penumbra. El poro que va más adelantado suele transformarse en mancha, más hacia el Oeste (mancha de cabeza).

D: Se forman una o varias manchas en el extremo opuesto donde se formó la primera. Se forman nuevos poros entre ambas manchas y pueden formarse poros dentro de las manchas.

E: Se forman manchas en la zona intermedia del grupo y aumenta en extensión. Se pueden formar nuevas manchas en los extremos. La extensión es de 10° heliográficos como mínimo. Se puede formar en el hemisferio opuesto y en la misma latitud un nuevo sistema.

F: El grupo sigue creciendo de forma irregular, surgen proyecciones de poros y puentes brillantes, las manchas son irregulares y cambian rápidamente de forma. Se pierde la bipolaridad y surge la multipolaridad. Es el máximo.

G: En esta etapa, se inicia la disolución. Desaparecen los poros, así como las manchas intermedias, las manchas de los extremos se redondean y se vuelve a la bipolaridad.

H: Desaparecen los poros y las manchas de un extremo, desaparece la bipolaridad y queda una o varias manchas con o sin poros agrupadas en una zona.

J: Sólo queda una o dos manchas pequeñas, normalmente sin poros en su proximidad.

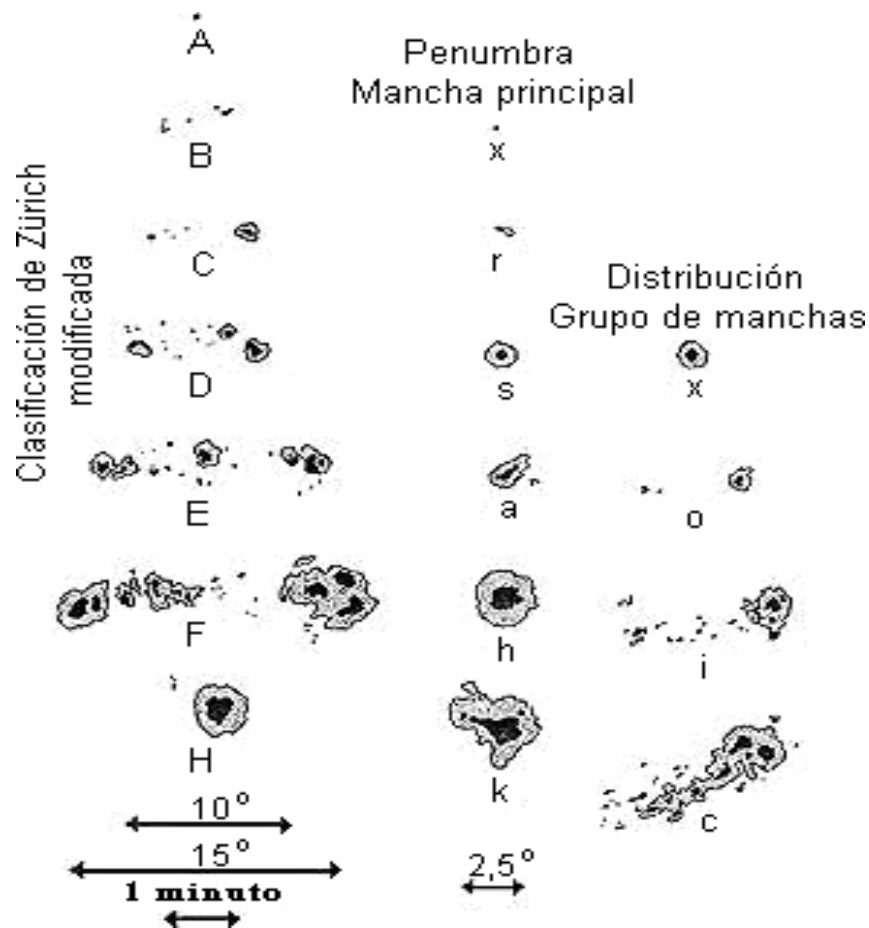
2.4.1.4.2 Clasificación de McIntosh de los grupos de manchas. La clasificación de McIntosh consiste en una descripción más detallada de las manchas solares. Este sistema de clasificación de manchas consiste en un esquema de tres dígitos, el primero hace referencia a la clasificación de Zürich pero sin los tipos G y J (el tipo G se incluye en el tipo E o F y el tipo J en el tipo H), el segundo se refiere al tamaño de la penumbra y de las manchas (6 tipos) y el tercero hace referencia a la distribución de las manchas dentro del grupo (4 tipos). La combinación de los tres parámetros de clasificación permite definir 60 tipos distintos de manchas solares frente a los 9 tipos de la clasificación de Zürich, y por tanto permite

¹⁹ ARAUJO, Gema. Manual de Observación Solar Vol. 4., Marzo 2001.

realizar nuevos estudios estadísticos y de correlación con otros fenómenos solares²⁰.

La progresión evolutiva se aplica mejor a grupos de manchas bipolares aislados, pues los espacialmente próximos o los grupos compactos experimentan una evolución más compleja, incluyendo fusiones entre manchas y dando origen a configuraciones poco repetitivas. En otras palabras, la clasificación refleja el comportamiento de las manchas "normales", pero el observador debe prestar especial atención a las manchas más complejas, pues los grupos "patológicos" normalmente son los más interesantes en lo que respecta a la aparición de actividad en forma de fulguraciones.

Figura 2.11 Sistema de clasificación de McIntosh de las manchas solares



Fuente: Beck, Hilbrecht, Reinsch, Volker, Solar Astronomy Handbook.

A: Grupo unipolar que no posee penumbra.

²⁰ MCINTOSH, P. S., "The Classification of Sunspot Groups", Sol. Phys 125, 251. (1990).

B: Bipolar sin penumbra. No existe límite superior o de extensión en la dimensión de los grupos de tipo B.

C: Bipolar con penumbra en una de las manchas de una de las polaridades, generalmente es una de los extremos. No existe límite de extensión para la longitud de los grupos de tipo C, pero cuando la penumbra sobrepasa los 5º heliográficos, debe clasificarse como clase D compacta.

D: Bipolar. Grupo de manchas con penumbra, generalmente en las manchas de ambas polaridades las cuales son las manchas de los extremos. Su extensión no excede los 10º heliográficos.

E: Bipolar con penumbra en las manchas de ambas polaridades. Extensión comprendida entre 10 y 15º heliográficos.

F: Bipolar con penumbra en las manchas de ambas polaridades. La extensión del grupo es superior a los 15º heliográficos.

H: Unipolar con penumbra. Las manchas eventuales que lo escoltan están a menos de 3º heliográficos de la penumbra de la mancha principal. Normalmente se trata de la mancha principal que perdura de un grupo bipolar viejo. Cuando la penumbra sobrepasa los 5º heliográficos de longitud debe clasificarse como tipo D compacta.

2.4.1.4.2.1 Clasificación de la penumbra de la mancha principal. El tamaño de las penumbras para una mancha principal, se puede clasificar en seis tipos, como siguen:

x: Sin penumbra. Se considera penumbra cuando la región gris que redondea a las manchas tiene más de 3" de arco.

r: Penumbra rudimentaria. Normalmente incompleta, delgada, de contorno irregular, más de 3" de arco y más clara que las penumbras normales. Su estructura es granular o formada por manchas pequeñas y finas.

s: Penumbra simétrica, circular o elíptica y con un diámetro inferior a 2,5º heliográficos. Los núcleos están compactados cerca del centro de la penumbra. Las penumbras elípticas son simétricas alrededor de un solo núcleo. Estas manchas son de lenta evolución.

a: Penumbra asimétrica o compleja, con estructura filamentosa, puede tener varias sombras, contorno irregular y de forma alargada y un diámetro como máximo de 2,5º heliográficos. Estas manchas pueden cambiar rápidamente de forma.

h: Penumbra simétrica, circular o elíptica y con un diámetro superior a 2,5º heliográficos. Posee las mismas características que la penumbra de tipo "s".

k: Penumbra asimétrica y compleja, con estructura filamentosa y un diámetro superior a 2,5º heliográficos. Posee las mismas características que la penumbra de tipo "a".

2.4.1.4.2.2 Distribución de las manchas dentro del grupo. Dentro de un grupo, las manchas se pueden distribuir de cuatro formas diferentes:

x: Mancha única.

o: Distribución abierta de las manchas. La zona intermedia entre la mancha delantera (P) y la trasera (F) está libre de manchas, quedando el grupo claramente dividido en dos zonas de polaridad magnética opuesta.

i: Distribución intermedia de las manchas. Pueden verse algunas manchas sin penumbra entre la mancha delantera (P) y la mancha trasera (F)

c: Distribución compacta de manchas. El área entre la mancha delantera (P) y trasera (F) está poblado de manchas importantes, con al menos una mancha interior con penumbra. El caso extremo de distribución compacta lo constituye un grupo de manchas rodeado enteramente por una penumbra continua.

2.4.1.4.3 Clasificación magnética de Monte Wilson. Esta clasificación fue ideada por Hale en 1919 y está basada en los patrones magnéticos de los grupos de manchas medidos en el Observatorio de Monte Wilson.

Figura 2.12 Clasificación de Monte Wilson de las manchas solares.

GRUPOS BIPOLARES				GRUPOS UNIPOLARES			GRUPOS COMPLEJOS
β	$\beta\rho$	βf	$\beta\gamma$	α	$\alpha\rho$	αf	γ

Fuente: Bray & Loughhead. Sunspots

Las manchas poseen un campo magnético predominantemente de una de las dos posibles polaridades magnéticas, positiva o negativa. En esta clasificación hay

esencialmente cuatro configuraciones magnéticas: unipolar α , bipolar β , compleja γ y polaridad opuesta δ , que pueden combinarse para dar las siguientes clases²¹:

α : Grupo unipolar puro. Compuesto de una o más manchas de la misma polaridad magnética.

β : Grupo bipolar puro. Compuesto de dos conjuntos de manchas separados. En cada conjunto todas las manchas tienen la misma polaridad y la polaridad de un conjunto es opuesta a la del otro. Las polaridades no se mezclan.

γ : Grupo complejo. Las polaridades están mezcladas de modo irregular de forma que no se puede clasificar como bipolar.

$\beta\gamma$: Grupo bipolar con mezcla. Las partes de polaridad opuesta no están completamente separadas o hay pequeñas manchas en las zonas de polaridad contraria a la que les corresponde.

δ : Grupo unipolar con polaridad opuesta. Una mancha tiene una umbra de polaridad opuesta a la de la penumbra.

$\beta\delta$: Grupo bipolar con polaridad opuesta. Alguna mancha posee una penumbra de polaridad contraria a la de las umbras de su interior.

$\beta\gamma\delta$: Grupo bipolar con mezcla y de polaridad opuesta. Se dan simultáneamente las condiciones de los grupos $\beta\gamma$ y $\beta\delta$.

2.4.2 Medida del tamaño y la posición de las manchas solares. Si no se pretende realizar una estadística o un estudio preciso de manchas solares, se puede evitar el método de cálculo estricto y proceder a determinar los tamaños en el mismo instante de la observación. Para ello bastará con utilizar una plantilla que posea impresos los meridianos y los paralelos, formando una cuadrícula. Se proyecta encima la imagen solar y con un lápiz se dibuja el contorno de las manchas. Se suele utilizar un tipo de plantilla que muestra la superficie solar en grados.

Para fijar la posición de un punto sobre la superficie terrestre utilizamos dos coordenadas: la latitud y la longitud. La latitud se mide desde el ecuador hacia los polos y desde 0° hasta 90°. Para la longitud, se fija arbitrariamente un meridiano origen (Greenwich) y, a partir de él, se mide hacia el Este y el Oeste, desde 0° hasta 180°. Análogamente, en el Sol se define una longitud y una latitud heliográfica.

Para fijar la posición de una mancha solar sobre la fotosfera utilizamos dos coordenadas: la latitud y la longitud heliográfica²². La latitud heliográfica se mide hacia el norte o hacia el sur desde el ecuador solar y toma valores de 0° hasta $\pm 90^\circ$, mientras que la longitud heliográfica se mide paralelamente al ecuador

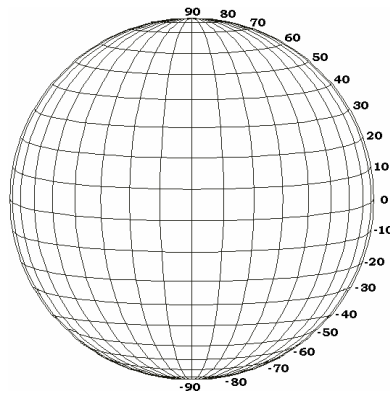
²¹ BRAY, R. J., LOUGHEAD, R. E. Op. cit. p. 234.

²² ARAUJO, Gema. Manual de Observación Solar Vol. 3., Marzo 2001.

solar desde un meridiano de referencia. Este meridiano se define como el que cruzó el centro del disco visible el 1 de enero de 1854 a las 12:00 U.T. y que ha girado desde entonces con un período uniforme.

La plantilla se usa para calcular la extensión del grupo de manchas en grados, conociendo que un grado de longitud heliográfica equivale a 12,140 Km, bastará con efectuar una multiplicación para conocer sus dimensiones reales. Esta plantilla se usa también para calcular las coordenadas heliográficas de las manchas sobre la fotosfera solar. Teniendo en cuenta que, lo que se mide en principio es la posición de una mancha solar sobre el disco aparente.

Figura 2.13 Plantilla con coordenadas heliográficas para el cálculo de la posición de las manchas solares.

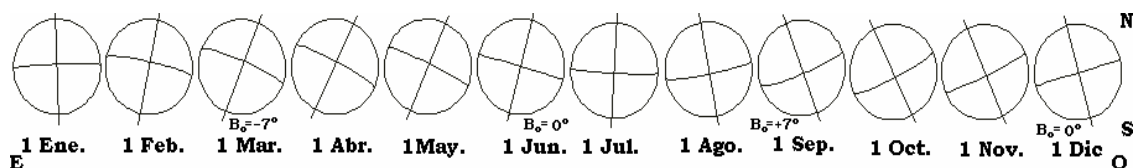


Fuente: Beck, Hilbrecht, Reinsch, Volker, Solar Astronomy Handbook.

Se debe tener en cuenta que en el Sol, las manchas solares no son estructuras estáticas, por tanto, lo normal es que las coordenadas varíen con el tiempo. Si los ejes de rotación del Sol y la Tierra fuesen paralelos entre sí y perpendiculares a la eclíptica, el eje de rotación solar siempre se vería en dirección Norte-Sur y el ecuador solar sería una línea recta que pasaría por el centro del disco aparente. Ahora bien, el eje terrestre está inclinado $23^{\circ} 26'$ y apunta hacia la estrella Polar, mientras que el eje de rotación solar está inclinado $7^{\circ} 15'$ y se dirige hacia un punto de la constelación de Cefeo situado aproximadamente en $23h +77^{\circ}$.

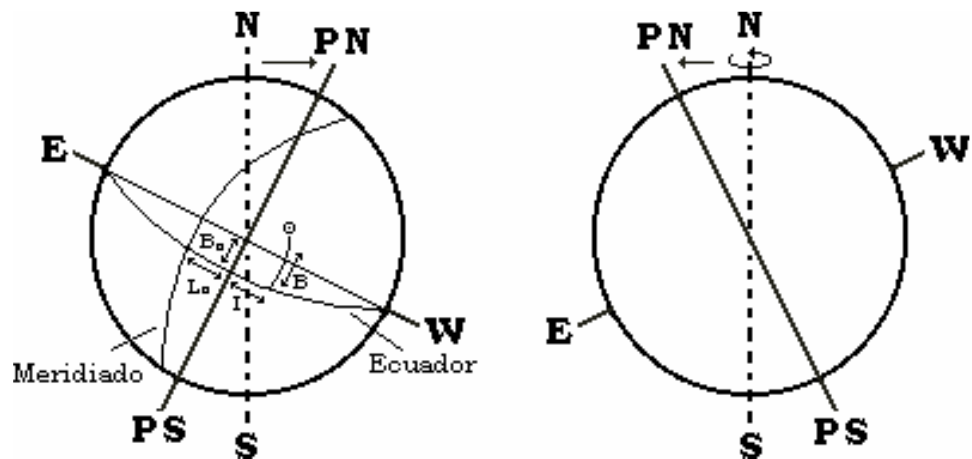
La combinación de ambas inclinaciones provoca, a lo largo del año, una desviación del eje solar respecto a la dirección Norte-Sur y una inclinación del ecuador respecto a la visual.

Figura 2.14 Variación anual de la posición del eje solar y el ecuador.



Para realizar las debidas correcciones, se definen dos ángulos que caracterizan la posición de la red de coordenadas sobre el disco solar²³. Al primero de estos ángulos se le asigna la letra P y es el ángulo de posición del extremo Norte del eje de rotación medido desde el punto Norte del disco, positivo hacia el Este y negativo hacia el Oeste. P puede variar a lo largo del año desde $-23,32^\circ$ hasta $+23,32^\circ$.

Figura 2.15 Ángulos que caracterizan la posición de la red de coordenadas sobre el disco solar.



Fuente: webs.ono.com/usr038/helio/docpl.html & Beck, Hilbrecht, Reinsch, Volker, Solar Astronomy Handbook.

El segundo ángulo se designa con la letra B_0 y es la latitud heliográfica del centro del disco. B_0 puede variar desde $-7,25^\circ$ hasta $+7,25^\circ$ y da idea de la inclinación del ecuador respecto a la visual. Así, por ejemplo, $B_0 = -5^\circ$ significa que el ecuador pasa 5° al Norte del centro del disco.

Para determinar las coordenadas de una mancha solar, definimos el ángulo de la longitud del meridiano central, que puede variar desde 0° hasta 360° heliográficos y, tal como se define la longitud heliográfica, va disminuyendo día a día a medida que el Sol gira.

Un factor que se debe tener en cuenta en el momento de una observación son las condiciones atmosféricas ya que la estabilidad de la atmósfera afecta a las observaciones. Este factor se mide valorando la nitidez y el movimiento de la imagen a través de la escala de Kiepenheuer o simplemente por el número de aumentos que nos permite tener una visión clara.

2.4.2.1 Nitidez de la imagen (Escala de Kiepenheuer). Para determinar la nitidez de una imagen, se debe tener en cuenta la siguiente escala²⁴:

²³ BECK; HILBRECHT; REINSCH y VÖLKER. Op. cit. p 170-176.

²⁴ MCINTOSH, Op. cit. p. 251.

- (1,0) Visible alguna estructura en las grandes sombras como gránulos umbrales. Estructuras muy finas en la penumbra.
- (1,5) Estructuras finas en la penumbra. Granulación muy definida.
- (2,0) Alguna fina estructura en la penumbra y en las divisiones sombra - penumbra y fotosfera - penumbra. Granulación muy definida.
- (2,5) Estructura de la granulación bien visible. Clara división entre la sombra, la penumbra y la fotosfera pero sin finas estructuras.
- (3,0) La granulación se puede detectar cuando se desplaza la imagen solar. Poco contraste en la división sombra-penumbra.
- (3,5) No es visible la estructura granular. Dificil separación entre sombra y penumbra.
- (4,0) Sombra y penumbra sólo distinguibles en las grandes manchas. No puede detectar la estructura granular.
- (4,5) Sombra y penumbra distinguibles sólo en las manchas muy grandes.
- (5,0) Sombra y penumbra se confunden.

2.4.2.2 Movimiento de la imagen (escala de Kiepenheuer). Para determinar el movimiento de una imagen, se debe tener en cuenta la siguiente escala:

- (1,0) No se puede detectar movimiento alguno en la imagen, ya sea en el limbo o en el disco
- (1,5) Movimiento de la imagen, puede ser agitación en el limbo menor o igual a 0,5".
- (2,0) Movimiento de la imagen en el limbo entre 1" y 1"5. Débiles ondulaciones. Movimiento en las manchas solares prácticamente imperceptible.
- (2,5) Movimiento en el limbo de 2" a 2,5" visible también en las manchas solares. Ondulaciones en el limbo solar.
- (3,0) Movimiento de la imagen entre 3" y 3"5. Se presentan fuertes ondulaciones en el limbo.
- (3,5) Agitación entre 4" y 5".
- (4,0) Movimiento de 6" a 7".
- (4,5) Movimiento de la imagen de 8 a 10".

- (5,0) Movimiento de más de 10".

2.4.2.3 Visión astronómica (escala de Kiepenheuer). Para esta escala se debe tener en cuenta cinco niveles como siguen:

- (1) Cielo severamente perturbado. La visión incluso a bajos aumentos resulta inutilizable.
- (2) Visión mediocre. La observación a bajos aumentos proporciona una visión clara y estable, pero a medio se degrada
- (3) Visión buena. Se puede emplear hasta la mitad del aumento utilizable por el telescopio. La visión a aumentos superiores sólo produce imágenes borrosas.
- (4) Visión muy buena. Aumentos medios producen imágenes claras y estables. La visión a aumentos grandes es bastante buena, aunque existe algo de turbulencia.
- (5) Visión excelente. Prácticamente cualquier aumento empleado produce imágenes claras y estables.

2.4.3 Medida de la actividad de las manchas solares. Las manchas solares son manifestaciones de actividad solar. Para medir el nivel de la actividad de estas manchas se utiliza el *número o índice de Wolf o de Zürich*.

En 1848 Rudolph Wolf introdujo su método de registro de la actividad solar a partir del recuento del número de grupos y de manchas. Con él no sólo pudo confirmar la existencia del ciclo sino que consiguió reconstruir ciclos anteriores. Aunque Wolf pensaba que el área de las manchas era un mejor indicador de la actividad, al final optó por un simple recuento, mucho más fácil de calcular durante una observación del Sol. El número de Wolf (R ó W) se calcula a partir de una fórmula empírica denotada por²⁵:

$$R = k(10g + f) \quad (2.19)$$

Donde g es el número de grupos de manchas, además es un factor que introduce una mayor imprecisión a la hora de determinar el número de Wolf. La razón es la ambigüedad que existe en el concepto de "grupo", principalmente cuando los grupos son muy pequeños o cuando hay varios en la misma región activa, es frecuente que dos o más grupos aparezcan próximos entre sí y, a veces, la única forma de distinguirlos es observar su evolución. Por eso también es recomendable mantener una continuidad en las observaciones. f es el número total de las manchas individuales existentes en esos grupos. Incluye, tanto poros, como umbras. No existe un criterio estándar pero, en general, los poros de pequeño tamaño no son incluidos en el recuento. Cuando hay varios núcleos dentro de

²⁵ BRAY, R. J., LOUGHEAD, R. E. , Op. cit. p. 255.

una misma penumbra, cada uno es contabilizado como una mancha. Una mancha aislada es considerada un grupo. k , es un coeficiente corrector que se asigna individualmente a cada observador teniendo en cuenta el instrumental utilizado y sólo se emplea para resultados estadísticos, para promediar datos de varios observadores. Un observador, actuando individualmente, puede considerar $k = 1$.

Por ejemplo, si en un momento dado en la superficie solar, un observador aprecia 4 grupos de manchas, conteniendo respectivamente 9, 13 y 15 manchas individuales, el índice de Wolf será 77.

Esta manera de llevar el cálculo de la actividad merece muchas críticas, pues determina el mismo valor a un grupo de manchas que a una simple mancha formada por un poro individual. De este modo, volviendo al ejemplo anterior, obtendríamos el mismo índice si se hallase sobre el Sol 7 grupos individuales formados cada uno de ellos por un único poro. Aunque para poder relacionar los casi cuatro siglos de observaciones que se poseen de este modo, se recomienda no modificar la manera de calcular el índice.

3. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

La investigación, tanto experimental como teórica, se centra en las emisiones transientes en el rango de radiofrecuencias provenientes del Sol, que son detectadas mediante un radiotelescopio llamado receptor JOVE y el software "RADIO-SKYPIPE" versión 01.01.30 suministrado por la NASA. El receptor JOVE, que consta de una antena y un receptor de señales fue armado y calibrado para un primer trabajo²⁶ en el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño.

En los inicios del año 2003, se planteó a través del Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño, el proyecto de investigación y análisis de las emisiones solares en radiofrecuencia con el fin de verificar si existe una estrecha relación entre el número de manchas solares y su posible influencia en la producción de "explosiones" electromagnéticas en el Sol.

Después de plantear los objetivos de este proyecto se procedió a instalar el receptor JOVE, que consta de una antena tipo dipolo y un receptor de señales en la estación de observación que se encuentra ubicada en la ciudad de San Juan de Pasto, localizada al Sur-occidente de la republica de Colombia (Departamento de Nariño) con coordenadas 1° 13' 56" latitud Norte y 77° 16' 56" longitud Oeste y una altura sobre el nivel del mar de 2.527 metros. En esta ciudad se encuentra ubicado el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño.

3.1 REGISTRO DE LAS SEÑALES

Antes de hacer las primeras observaciones del Sol, es importante probar el radiotelescopio. Una buena idea es instalar la antena y el receptor para confirmar que todo está trabajando correctamente. Para este proceso se puede utilizar una computadora y un amplificador de audio. Sin importar la configuración exacta.

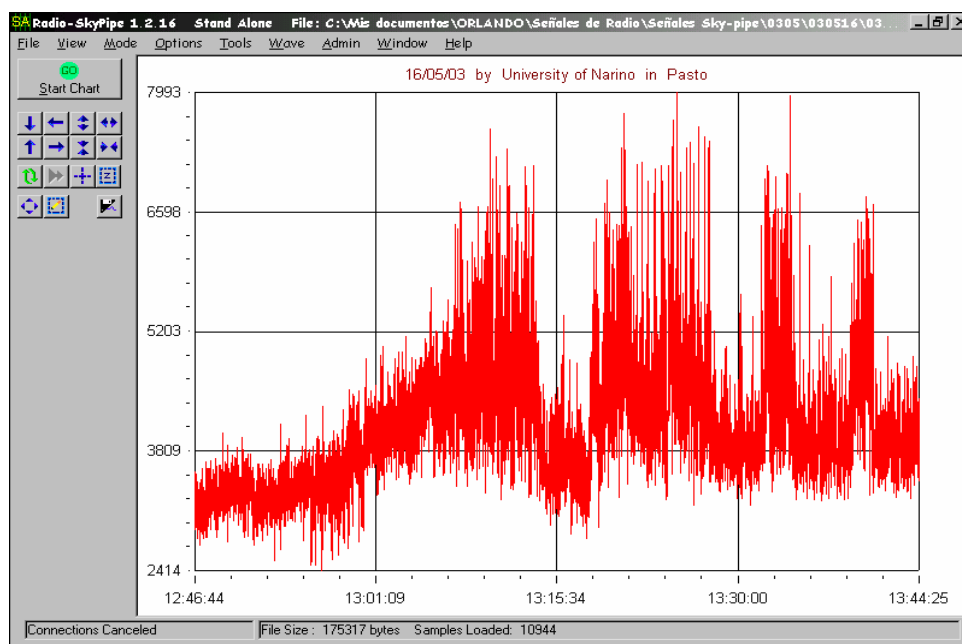
Cuando la antena (en fase) está conectada, debe haber un aumento significativo en la señal que viene del receptor. Si la antena no está conectada y el control de volumen del receptor se fija entre las posiciones 12 y 3 en sentido horario, se puede oír levemente un sonido a manera de silbido en los auriculares. Con la antena conectada, el sonido debe aumentar perceptiblemente, siendo más fácil de escuchar.

Las señales capturadas y amplificadas por el receptor JOVE se transforman a un rango de frecuencias audibles para el ser humano. Debido a esto, se toma una de las salidas de audio del receptor y se une por medio de un cable a la entrada de audio del computador.

²⁶ PERENGUEZ LOPEZ, James. Estudio Teórico y Experimental de emisiones de radio provenientes del planeta Júpiter a la frecuencia de operación de 20,1 MHz. San Juan de Pasto, 2003. Trabajo de grado (Físico). Universidad de Nariño. Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. Área de Astrofísica.

Se empleó un programa de graficación que permite registrar las señales capturadas. En este programa, los datos numéricos se registran a través de líneas continuas en la pantalla del computador.

Figura 3.1 Ventana principal del programa RADIO SKY-PIPE utilizado para registrar eventos de actividad solar capturados en tiempo universal.



Durante el tiempo que permanecía encendido el radiotelescopio, los registros gráficos realizados con el software se hacían automáticamente, especificándose en ellos el tiempo: fecha, hora, minuto y segundo.

Con el software RADIO SKY-PIPE se puede visualizar, grabar y procesar señales en Tiempo Universal Coordinado, tiempo que se debe sincronizar con el software PRECISION TIME cada vez que se realiza un registro de datos. Este software permite una sincronización en el tiempo con una incertidumbre de ± 1 segundo. Esta función es muy importante para realizar el análisis de correlación entre dos o más señales capturadas en diferentes lugares de la Tierra.

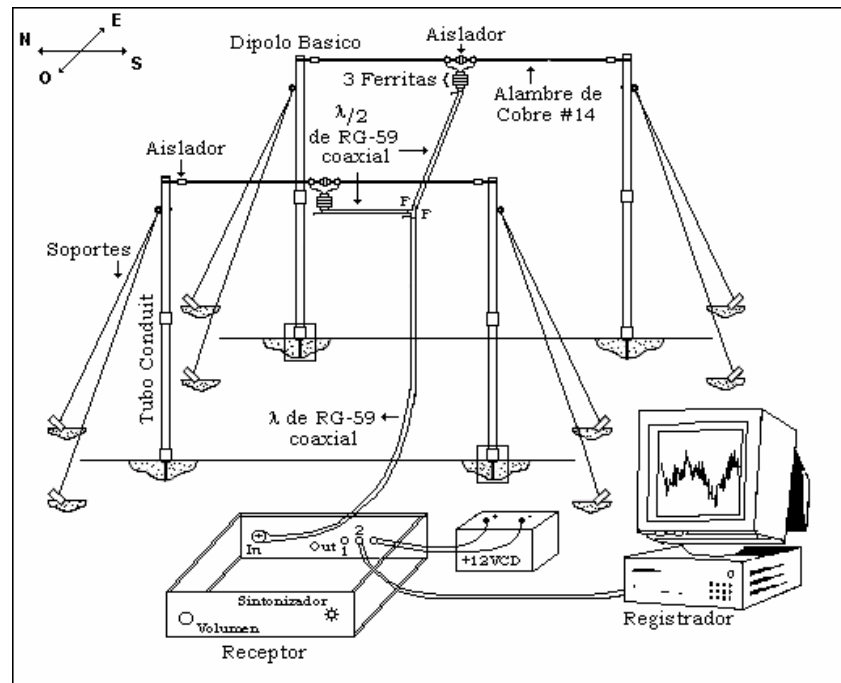
El Tiempo Universal (U.T.) es la zona horaria de referencia respecto a la cual se calculan todas las otras zonas del mundo. Estas zonas horarias son cada una de las veinticuatro áreas en que se divide la Tierra y que siguen la misma definición de tiempo. Las zonas horarias están centradas en meridianos de una longitud que es múltiplo de 15° .

Puesto que la Tierra gira de Oeste a Este al pasar de un huso horario a otro en dirección Este habría que sumar una hora. Por el contrario, al pasar de Oeste a Este habría que restar una hora. De esta manera, el huso horario para Colombia es UTC-5.

Al usar el software RADIO SKY-PIPE, se observa un aumento significativo en el rastro del fondo cuando la antena está conectada. El rastro se levanta agudamente al variar el control de frecuencia debido a que en ese instante el receptor ya está captando frecuencias dentro de los rangos de estudio. El control de volumen del receptor se debe fijar cerca de la posición 12 en sentido horario para las observaciones solares y alrededor de la posición 3 en sentido horario para las observaciones de Júpiter, cambiando de este modo, la ganancia.

Después de instalar y probar el sistema de recepción, el siguiente paso es, la realización de la observación solar.

Figura 3.2 Montaje final del sistema utilizado para capturar las radioemisiones procedentes del Sol.



3.2 MANCHAS SOLARES Y SU POSIBLE INFLUENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE EXPLOSIONES ELECTROMAGNÉTICAS EN EL SOL.

Después de instalar el radiotelescopio en las instalaciones de la Universidad de Nariño y con el propósito de encontrar una estrecha relación entre el número de manchas solares y su posible influencia en la producción de “explosiones” electromagnéticas en el Sol, se procedió a registrar señales durante un periodo de cuatro meses, todos los días, a diferentes horas entre las 08:00 y las 18:00 horas. Al familiarizarse con el sonido que capta el receptor, se percibe que el Sol emite una señal de radio del tipo descrito como ruido. Un ejemplo de este tipo de señal es el sonido que se escucha en un receptor de radio o televisión cuando se sintoniza en lugares donde no trabajan emisoras con volumen al máximo.

El sonido que emite una explosión solar se escucha como un rápido aumento en el silbido seguido por una suave declinación hasta el nivel original, siguiendo la forma típica del acontecimiento.

Debido a que se está buscando erupciones en la superficie del Sol, las observaciones poseen mayor probabilidad de éxito si se hacen durante periodos conocidos de actividad solar: un grupo grande de manchas cerca del centro del disco solar constituye precisamente un pronóstico favorable.

En el desarrollo de este proyecto de investigación se utilizó información registrada en las páginas Web de NASA, la cual se toma como referencia de comparación e información adicional. Además de la información, se registró imágenes diarias de la superficie solar de la página de Internet www.spaceweather.com para visualizar la morfología de las manchas solares y poder estimar mejor la existencia de baja o alta actividad solar.

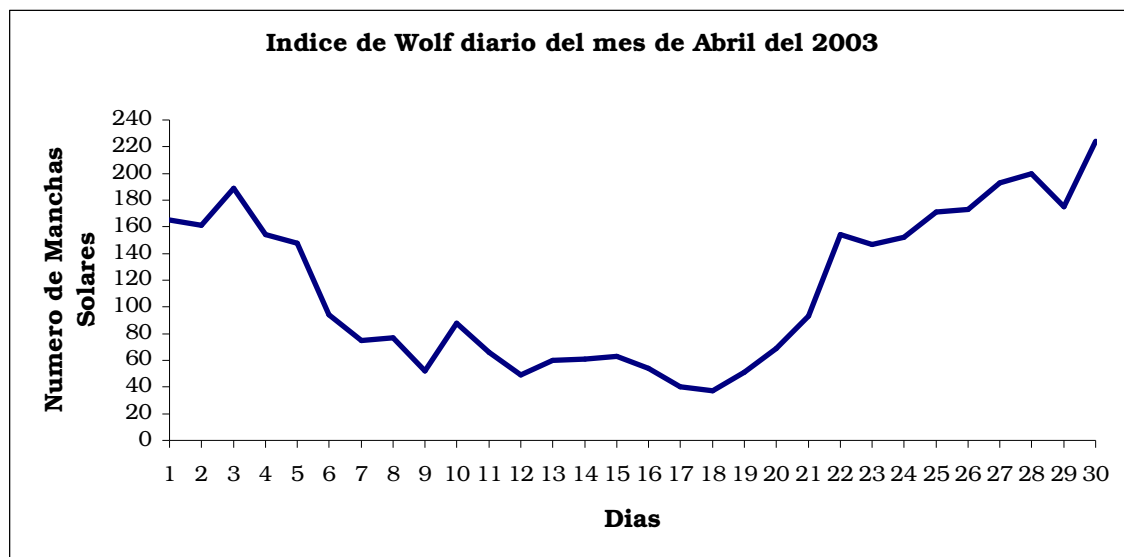
A continuación, se presenta una “medida” de la actividad de las manchas solares, realizadas por el autor de este trabajo con datos adquiridos de la página de Internet www.spaceweather.com y con la asesoría del doctor Ángel Alberto Coroas, licenciado en Física y meteorólogo del Observatorio Meteorológico de Camaguey - Cuba, con la que se puede suponer que días son más propicios para encontrar eventos de actividad solar:

3.2.1 Medida de la actividad de las manchas solares en el periodo de estudio. La medida de la actividad solar depende de la variación del número de manchas sobre el disco solar o índice de Wolf. Esta medida de actividad se realiza en cuatro etapas que corresponden al número de meses que cubren el periodo de investigación, que va desde el primero de abril del 2003 al primero de agosto del mismo año.

3.2.1.1 Actividad solar durante el mes de Abril del 2003. La actividad solar durante el mes de abril se comporta de una forma dinámica, de tal manera que el número de manchas solares o índice de Wolf varía en unos días con respecto a otros. Cuando el número de manchas solares es elevado, la actividad solar también muestra un comportamiento creciente y viceversa. Abril cierra con una media mensual en el número de manchas solares de 114,5 unidades. Por hemisferios fue más activo el sur con una media mensual de 60 unidades, mientras que el hemisferio norte cerró con una media mensual de 54,5 unidades.

Observando la Figura 3.3 realizada por el autor de este trabajo con datos adquiridos de la página de Internet www.spaceweather.com y datos compartidos por el doctor Ángel Alberto Coroas del Observatorio Meteorológico de Camaguey - Cuba, se demuestra la variación de la actividad solar. El mes se inicia con una actividad solar elevada y un índice de Wolf de 165 unidades, el día 3 alcanza un índice de 181 unidades, a partir de aquí se observa un descenso lento hasta alcanzar el valor mínimo del mes el día 18 con 37 unidades. Un incremento rápido en la cantidad de manchas se observa en los días siguientes hasta llegar al máximo del mes el día 30 con un valor en índice de Wolf de 224 unidades.

Figura 3.3 Gráfica del índice de Wolf durante el mes de abril del 2003.



Entre los grupos de manchas (según la clasificación de Zurich para manchas solares descrito en el punto 2.4.1.4) más importantes que se presentaron en el mes de abril se puede mencionar:

El día 1 se observó un grupo C (324) en el hemisferio sur, el día 2 se transforma en D y el día 8 se mantiene con igual tipología cuando está a punto de desaparecer. Para el día 4 aparece por el limbo Este en el hemisferio norte un impresionante grupo H (330), el mismo se mantiene con igual tipología hasta desaparecer definitivamente el día 16.

El día 11 aparece por el limbo Este en el hemisferio Sur un grupo C (334), el día 18 se transforma en D y el día 19 se transforma en H y se mantiene con igual tipología hasta desaparecer definitivamente el día 22. Para el día 18 emerge del hemisferio no visible, por el limbo Este en el hemisferio Norte un grupo H (336), el día 22 se transforma en C y se mantiene con igual topología hasta el 26 donde se transforma en B y cierra el mes con esta tipología.

El día 19 emerge del hemisferio no visible, por el limbo Este en el hemisferio Sur un grupo H (337), el día 20 se transforma en C, el día 21 se transforma en D hasta cerrar el mes con tipología E.

El día 20 aflora un grupo B (338) en el hemisferio Norte, el 21 se transforma en D, el día 24 se convierte en E y desaparece el 29 con igual tipología. Para el día 24 aflora un grupo B (344) en el hemisferio norte, al día siguiente se convierte en D, el día 26 se transforma en E, el 28 retorna a D y cierra el mes con igual tipología. Para el día 25 aflora un grupo C (345) en el hemisferio sur, al día siguiente se transforma en D y cierra el mes con igual tipología y el día 28 aflora

un grupo B (349) en el hemisferio sur al día siguiente se transforma en D y cierra el mes con igual tipología.

Para abril del 2003 se obtuvo el siguiente Cuadro realizado por el autor de este trabajo con datos adquiridos de la página de Internet www.spaceweather.com y con la asesoría del doctor Ángel Alberto Coroas, licenciado en Física y meteorólogo del Observatorio Meteorológico de Camaguey - Cuba:

Cuadro 2. Cálculo del índice de Wolf del mes de Abril del 2003.

Día	U.T.	C.O.	Número de grupos			Número de manchas			Número de Wolf		
			Norte	Sur	Total	Norte	Sur	Total	Norte	Sur	Total ²⁷
1	22:56	1	3	6	9	31	44	75	61	104	165
2	22:46	1	3	6	9	26	45	71	56	105	161
3	22:56	1	3	6	9	37	62	99	67	122	189
4	22:52	1	4	4	8	27	47	74	67	87	154
5	22:44	1	4	4	8	23	45	68	63	85	148
6	22:46	1	3	3	6	9	25	34	39	55	94
7	14:40	1	2	3	5	10	15	25	30	45	75
8	12:46	1	3	3	6	9	8	17	39	38	77
9	14:06	1	3	1	4	11	1	12	41	11	52
10	13:14	1	4	2	6	22	6	28	62	26	88
11	13:56	1	2	2	4	18	8	26	38	28	66
12	22:56	1	2	1	3	15	4	19	35	14	49
13	22:44	1	2	1	3	24	6	30	44	16	60
14	13:36	1	2	2	4	13	8	21	33	28	61
15	22:47	1	2	2	4	13	10	23	33	30	63
16	22:46	1	2	2	4	5	9	14	25	29	54
17	13:47	1	0	2	2	0	20	20	0	40	40
18	22:45	1	1	2	3	1	6	7	11	26	37
19	22:44	1	1	3	4	1	10	11	11	40	51
20	22:45	1	2	3	5	5	14	19	25	44	69
21	15:27	1	3	3	6	16	17	33	46	47	93
22	16:26	1	3	5	8	42	32	74	72	82	154
23	14:06	1	4	4	8	39	28	67	79	68	147
24	13:16	1	5	3	8	50	22	72	100	52	152
25	14:26	1	6	3	9	53	28	81	113	58	171
26	14:37	1	6	2	8	67	26	93	127	46	173
27	22:39	1	6	5	11	54	29	83	114	79	193
28	13:16	1	6	5	11	38	52	90	98	102	200
29	14:25	1	3	5	8	22	73	95	52	123	175
30	13:26	1	3	6	9	24	110	134	54	170	224
Media mensual del Número Relativo de Wolf									54,5	60	115

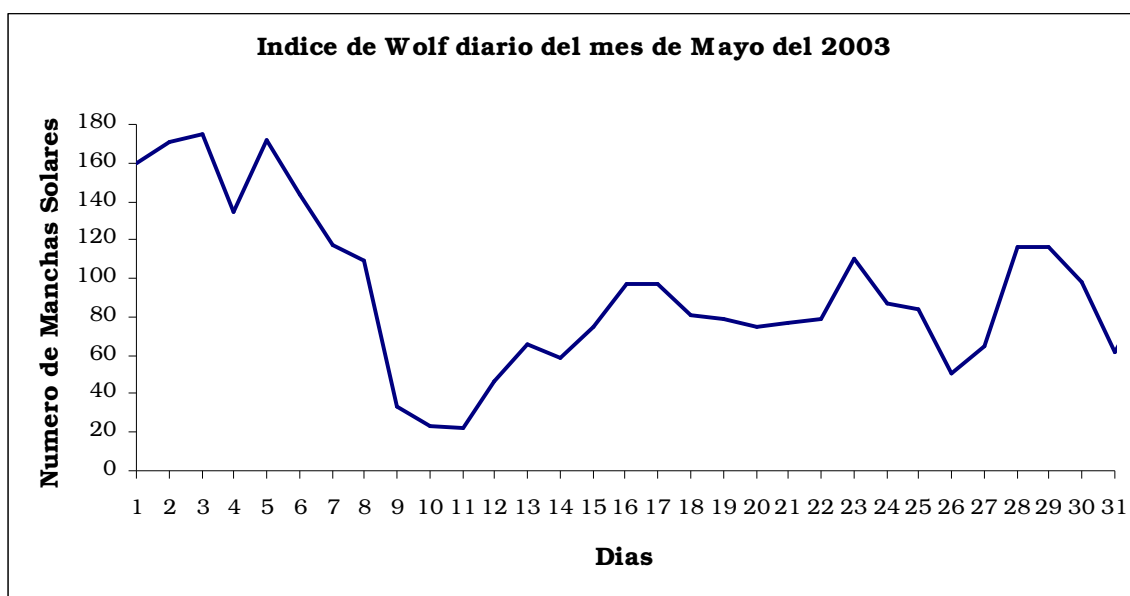
Donde U.T. es el tiempo universal y C.O. es la calidad de la observación

²⁷ Disponible en Internet: <<http://www.spaceweather.com>>

3.2.1.2 Actividad solar durante el mes de Mayo del 2003. La actividad solar durante el mes de mayo se comporta de una forma dinámica, de tal manera que el número de manchas solares o índice de Wolf varía en unos días con respecto a otros. Desciende en relación con el mes anterior, cerrando con una media mensual en el índice de Wolf de 92,9 unidades. Por hemisferios fue más activo el Sur con una media mensual de 65 unidades, mientras que el hemisferio opuesto cerró con una media mensual de 27,9 unidades.

Observando la Figura 3.4 realizada por el autor de este trabajo con datos adquiridos de la página de Internet www.spaceweather.com y datos compartidos por el doctor Ángel Alberto Coroas del Observatorio Meteorológico de Camaguey - Cuba, se demuestra la variación de la actividad solar. El mes se inicia con una actividad elevada, alcanza un índice de Wolf de 160 unidades sobre la superficie solar y el día 3 obtiene el máximo del mes con un valor en el índice de Wolf de 175 unidades. Para el día 4, se obtiene un descenso en el índice de Wolf de 134 unidades, y para el día 5 asciende nuevamente a 172 unidades. A partir de aquí se observa un descenso lento hasta alcanzar el valor mínimo del mes en el día 11 con 22 unidades. Un incremento lento en la cantidad de manchas se observa en los días siguientes hasta llegar a un valor de 97 unidades para el día 16, 110 unidades para el día 23. Nuevamente se encuentra un descenso de 51 unidades para el día 26 y un ascenso de 116 unidades para los días 27 y 28. Se cierra el mes con una actividad solar baja, encontrando un índice de Wolf de 62 unidades para el día 31 del mes.

Figura 3.4 Gráfica del índice de Wolf durante el mes de mayo del 2003.



Entre los grupos de manchas más importantes (según la clasificación de Zurich para manchas solares descrito en el punto 2.4.1.4) que se presentaron en el mes de mayo se puede mencionar:

El día 26 de abril afloró un grupo de tipología D (349) en el hemisferio sur, el 1 de mayo alcanza la tipología E y el día 6 se encuentra clasificado como F y desaparece el día 9 con tipología E.

El día 1 se observaba un grupo H (351), se mantiene con la misma tipología hasta desaparecer el día 15.

El día 12 aparece por el limbo Este en el hemisferio sur un grupo C (357), al siguiente día se clasifica como E, el día 14 se transforma en D, el día 20 retorna nuevamente a C, y desaparece el día 24 clasificado como C.

Para el día 16 aparece por el limbo Este en el hemisferio sur un grupo D (362), el día 20 se aprecia que se trata de un grupo de tipología C, el 21 se clasifica nuevamente como D, el 25 como C y al día siguiente se disuelve.

El día 21 aflora un grupo A (365) en el hemisferio sur, el 25 se transforma en un grupo de tipología C, el 27 se convierte en E y cierra el periodo analizado con igual clase.

El día 23 aparece por el limbo Este en el hemisferio sur un grupo H (368), el día 29 aparece con tipología C, al día siguiente posee una tipología D y finaliza su periodo analizado con igual clase.

Como dato curioso, el día 7 de mayo transitó mercurio por delante del Sol, fenómeno que se repite en el año 2016. El recorrido comenzó a primera hora de la mañana y se observó que el diámetro aparente de este planeta es de 12" de arco.

Para mayo del 2003 se obtuvo el siguiente Cuadro realizado por el autor de este trabajo con datos adquiridos de la página de Internet www.spaceweather.com y con la asesoría del doctor Ángel Alberto Coroas, licenciado en Física y meteorólogo del Observatorio Meteorológico de Camaguey - Cuba:

Cuadro 3. Cálculo del índice de Wolf del mes de Mayo del 2003.

Día	U.T.	C.O.	Número de grupos			Número de manchas			Número de Wolf		
			Norte	Sur	Total	Norte	Sur	Total	Norte	Sur	Total ²⁸
1	14:06	1	3	5	8	11	69	80	41	119	160
2	13:55	1	3	6	9	12	69	81	42	129	171
3	14:06	1	3	5	8	13	82	95	43	132	175
4	14:42	1	3	3	6	6	68	74	36	98	134
5	13:36	1	4	4	8	9	83	92	49	123	172
6	15:41	1	4	3	7	4	70	74	44	100	144
7	13:56	1	4	3	7	4	43	47	44	73	117
8	10:44	1	4	3	7	4	35	39	44	65	109
9	14:56	1	2	1	3	2	1	3	22	11	33

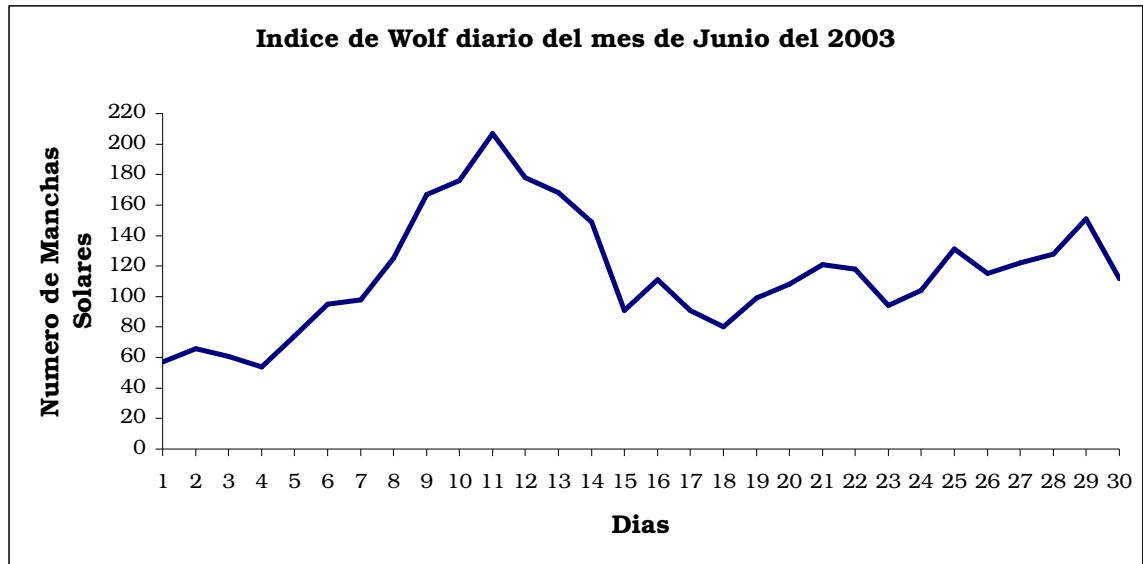
²⁸ Disponible en Internet: <<http://www.spaceweather.com>>

10	13:56	1	2	0	2	3	0	3	23	0	23
11	14:47	1	2	0	2	2	0	2	22	0	22
12	12:46	1	3	1	4	4	3	7	34	13	47
13	19:46	1	3	2	5	7	9	16	37	29	66
14	13:47	1	2	2	4	14	5	19	34	25	59
15	12:57	1	2	3	5	15	10	25	35	40	75
16	14:17	1	3	4	7	18	9	27	48	49	97
17	14:37	1	3	3	6	20	17	37	50	47	97
18	22:45	1	3	2	5	10	21	31	40	41	81
19	14:17	1	2	3	5	4	25	29	24	55	79
20	22:45	1	1	3	4	2	33	35	12	63	75
21	14:47	1	0	4	4	0	37	37	0	77	77
22	14:34	1	0	4	4	0	39	39	0	79	79
23	14:08	1	1	6	7	2	38	40	12	98	110
24	22:43	1	3	4	7	7	10	17	37	50	87
25	14:37	1	3	4	7	3	11	14	33	51	84
26	15:19	1	0	3	3	0	21	21	0	51	51
27	15:05	1	1	3	4	3	22	25	13	52	65
28	15:57	1	1	5	6	1	55	56	11	105	116
29	14:17	1	1	5	6	2	54	56	12	104	116
30	19:06	1	1	4	5	3	45	48	13	85	98
31	14:57	1	1	2	3	1	31	32	11	51	62
Media mensual del Número Relativo de Wolf									27,9	65	92,9

3.2.1.3 Actividad solar durante el mes de Junio del 2003. La actividad solar durante el mes de junio se comporta de una forma poco dinámica, de tal manera que el número de manchas solares o índice de Wolf varía discretamente en unos días con respecto a otros. El mes empieza con un índice de Wolf de 57 unidades; lo cual, se considera bajo, aunque se incrementa en relación con el mes anterior, se cierra con una media mensual en el índice de Wolf de 115,3 unidades. Por hemisferios fue más activo el Norte con una media de 65,83 unidades, mientras que el hemisferio opuesto cerró con una media mensual de 49,2 unidades.

Observando la Figura 3.5 realizada por el autor de este trabajo con datos adquiridos de la página de Internet www.spaceweather.com y datos compartidos por el doctor Ángel Alberto Coroas del Observatorio Meteorológico de Camaguey - Cuba, se demuestra la variación de la actividad solar. El mes de junio se inicia con una actividad solar baja, se presenta un registro de 57 unidades en el índice de Wolf, hasta llegar al día 4 donde se alcanza el valor mínimo del mes con un registro de 54 unidades. A partir de aquí se observa un ascenso apresurado, con el que se obtiene el valor máximo del mes con un índice de Wolf de 207 unidades para el día 11. Después de este día se percibe una lenta disminución en la actividad Solar con oscilaciones que van desde 91 unidades para el día 15 hasta los finales del mes que se cierran con índices de 131, 115, 122, 128, 151 y 112 para los días 25, 26, 27, 28, 29 y 30.

Figura 3.5 Gráfica del índice de Wolf durante el mes de junio del 2003.



Entre los grupos de manchas más importantes (según la clasificación de Zurich para manchas solares descrito en el punto 2.4.1.4) que se presentaron en el mes de junio se puede mencionar:

El día 1 de junio se observó un grupo H (373) en el hemisferio norte que proviene del mes anterior, el día 2 se transforma en C, el 4 queda como D, el día 7 vuelve a la tipología C y desaparece el día 10 con tipología H. El día 2 se observa un grupo D (375) en el hemisferio norte muy próximo al borde, el día 5 se transforma en E, el día 7 regresa a su tipología D, el día 9 es de tipología E y al día siguiente toma la tipología F desaparece definitivamente el 15 con tipología E.

El día 5 aflora un grupo C (377) en el hemisferio norte, al día siguiente se transforma en D, el día 9 se convierte en E, el 11 retorna a D, el día 12 vuelve a tener tipología E, el día 14 tome tipología C y desaparece el 16 con igual clasificación.

El día 8 aparece por el limbo Este en el hemisferio sur un grupo E (380), al día siguiente se aprecia con igual tipología hasta el día 14 que toma una tipología F, el 16 queda como D, el día 19 es de tipo C y desaparece el día 20 con igual tipología. Para el día 16 aparece por el limbo Este en el hemisferio sur un grupo D (365), el 18 se convierte en E, el 19 se clasifica como C, el 25 se transforma en B y el 28 se disuelve con igual tipología. El día 16 también aparece un grupo D (385) en el hemisferio Norte, el día 18 toma tipología C, al día siguiente vuelve a la tipología D y el día 20 es de tipo B. El día 22 desaparece con igual tipología.

El 19 aflora un grupo C (387) en el hemisferio Norte, al día siguiente se transforma en D, el día 22 se convierte en E y regresa a tipología D el día 28 con la misma que desaparece el 30.

El día 23 aflora un grupo D (390) en el Hemisferio Norte, al día siguiente se convierte en H, el 25 pasa a una tipología C y desaparece definitivamente como H el día 30 y el día 28 aparece por el limbo Este en el Hemisferio Norte un grupo E (375), al día siguiente se aprecia que se trata de un grupo F, el cual se mantiene con igual clase hasta el cierre del mes.

Para junio del 2003, se obtuvo el siguiente Cuadro realizado por el autor de este trabajo con datos adquiridos de la página de Internet www.spaceweather.com y con la asesoría del doctor Ángel Alberto Coroas, licenciado en Física y meteorólogo del Observatorio Meteorológico de Camaguey - Cuba:

Cuadro 4. Cálculo del índice de Wolf del mes de Junio del 2003.

Día	U.T.	C.O.	Número de grupos			Número de manchas			Número de Wolf		
			Norte	Sur	Total	Norte	Sur	Total	Norte	Sur	Total ²⁹
1	22:45	1	1	2	3	1	26	27	11	46	57
2	22:55	1	2	2	4	9	17	26	29	37	66
3	19:16	1	2	2	4	16	5	21	36	25	61
4	12:35	1	2	1	3	18	6	24	38	16	54
5	15:19	1	3	1	4	27	7	34	57	17	74
6	14:27	1	4	1	5	44	1	45	84	11	95
7	14:23	1	4	2	6	34	4	38	74	24	98
8	14:56	1	4	2	6	51	14	65	91	34	125
9	15:16	1	4	2	6	84	23	107	124	43	167
10	17:26	1	4	2	6	75	41	116	115	61	176
11	19:56	1	3	3	6	84	63	147	114	93	207
12	14:57	1	3	3	6	61	57	118	91	87	178
13	22:46	1	3	3	6	53	55	108	83	85	168
14	15:15	1	3	3	6	23	66	89	53	96	149
15	22:46	1	2	3	5	6	35	41	26	65	91
16	14:56	1	4	3	7	14	27	41	54	57	111
17	14:46	1	2	3	5	11	30	41	31	60	91
18	15:07	1	2	2	4	15	25	40	35	45	80
19	18:24	1	3	2	5	21	28	49	51	48	99
20	22:39	1	2	3	5	12	46	58	32	76	108
21	14:57	1	2	3	5	23	48	71	43	78	121
22	22:45	1	2	3	5	24	44	68	44	74	118
23	22:45	1	2	2	4	23	31	54	43	51	94
24	14:04	1	3	2	5	33	21	54	63	41	104
25	20:46	1	4	3	7	42	19	61	82	49	131
26	15:16	1	5	2	7	36	9	45	86	29	115

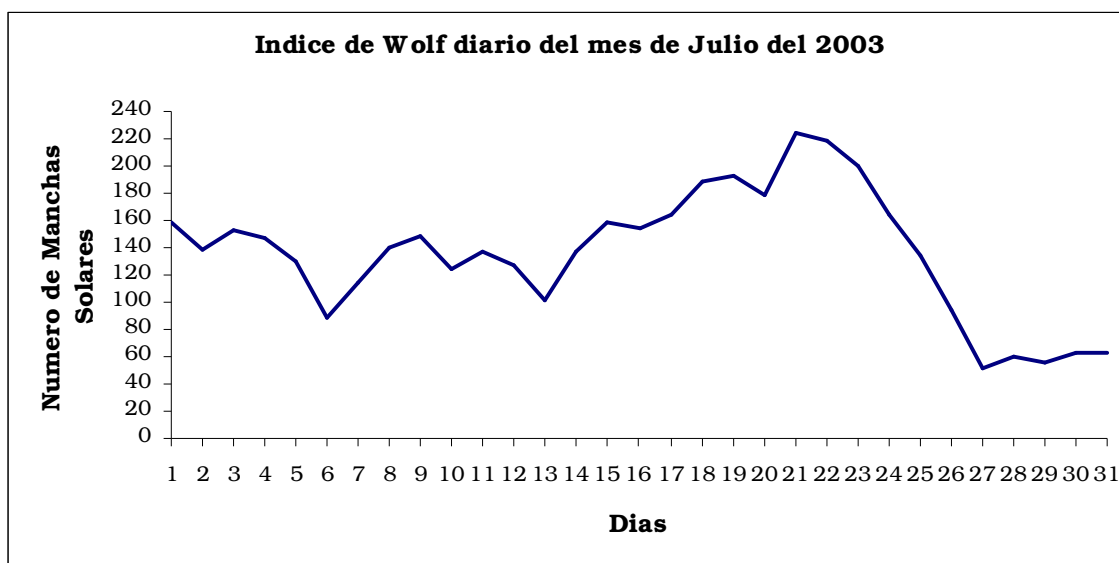
²⁹ Disponible en Internet: <<http://www.spaceweather.com>>

27	13:56	1	6	2	8	34	8	42	94	28	122
28	22:45	1	7	2	9	29	9	38	99	29	128
29	22:45	1	7	2	9	39	22	61	109	42	151
30	14:37	1	6	1	7	23	19	42	83	29	112
Media mensual del Número Relativo de Wolf									65,83	49,2	115

3.2.1.4 Actividad solar durante el mes de Julio del 2003. La actividad solar durante el mes de junio se comporta de una forma dinámica, de tal manera que el número de manchas solares o índice de Wolf varia en unos días con respecto a otros. Empieza con un índice de Wolf de 159 unidades. Se observa un incremento de la actividad solar en relación con el mes anterior y los demás, se cierra con una media mensual de 135,9 unidades. Por hemisferios fue muy activo el Norte con una media de 80,42 unidades, mientras que el hemisferio opuesto cerró con una media mensual de 55,5 unidades.

Observando la Figura 3.6 realizada por el autor de este trabajo con datos adquiridos de la página de Internet www.spaceweather.com y datos compartidos por el doctor Ángel Alberto Coroas del Observatorio Meteorológico de Camaguey - Cuba, se demuestra la variación de la actividad solar. El mes se inicia con un incremento en el índice de Wolf que alcanza las 159 unidades con respecto al cierre del mes anterior de 112 unidades. Para el día 6 se encuentra un descenso que alcanza las 88 unidades y se observa una oscilación que va hasta el día 13 con 102 unidades. A partir de este día, se percibe un incremento rápido hasta alcanzar el máximo del mes el día 21 con 224 unidades en el índice de Wolf. Después de este día se presenta un rápido descenso hasta alcanzar el valor mínimo del mes el día 27 con 52 unidades. Luego se observa un lento movimiento en la actividad solar hasta los finales del mes.

Figura 3.6 Gráfica del índice de Wolf durante el mes de julio del 2003.



Entre los grupos de manchas más importantes (según la clasificación de Zurich para manchas solares descrito en el punto 2.4.1.4) que se presentan en el mes de julio se puede mencionar:

El día 1 de julio se observó en el hemisferio norte un grupo F (375) que proviene del mes anterior, el mismo desaparece el día 10 por el limbo Oeste con igual tipología.

El día 2 aparece por el limbo Este en el hemisferio norte un grupo H (400), al día siguiente se transforma en D, el día 7 se clasifica como E, el día 13 se convierte en B y al día siguiente se disuelve.

El día 7 aflora un grupo A (401) en el hemisferio sur, el día 8 se transforma en C, el día 9 se convierte en B, el día 10 se transforma en D y continúa con esa tipología hasta el 17 que obtiene un tipo H y al día siguiente desaparece por el limbo Oeste con igual tipología.

El día 11 aflora un grupo C (405) en el hemisferio sur, al día siguiente se transforma en H, el día 13 se convierte en C y el 15 se clasifica como D. El día 19 pasa a tipología C y el 20 es tipo H cuando está a punto de desaparecer.

El día 14 aflora un grupo E (409) en el hemisferio norte, el 16 se transforma en F, el 18 vuelve ser E, el 19 evoluciona a E, el 21 pasa a tipología D, el día 23 se transforma en C y el 24 desaparece con igual tipología.

El día 14 también aflora un grupo C (410) en el hemisferio sur, el día 17 se transforma en D, el 20 toma tipología E, y el 26 desaparece con una tipología H.

El día 16 aparece un grupo D (411), en el hemisferio norte, el día 20 se transforma en H y desaparece el día 26 con igual tipología.

El día 18 aparece un grupo H (414) en el hemisferio sur, el 25 se transforma en una mancha de tipología C, y el 26 desaparece con igual tipología.

El día 25 aparece por el limbo Este en el hemisferio norte un grupo H (420) y conserva la misma tipología hasta la finalización del mes.

El día 28 aparece por el limbo Este en el hemisferio sur un grupo H (421), el día 29 se transforma en E, el día 30 vuelve a su estado H y con esta tipología termina el mes.

Para julio del 2003, se obtuvo el siguiente cuadro realizado por el autor de este trabajo con datos adquiridos de la página de Internet www.spaceweather.com y con la asesoría del doctor Ángel Alberto Coroas, licenciado en Física y meteorólogo del Observatorio Meteorológico de Camaguey - Cuba:

Cuadro 5. Cálculo del índice de Wolf del mes de Julio del 2003.

Día	U.T.	C.O.	Número de grupos			Número de manchas			Número de Wolf		
			Norte	Sur	Total	Norte	Sur	Total	Norte	Sur	Total ³⁰
1	14:37	1	8	1	9	52	17	69	132	27	159
2	14:27	1	8	1	9	40	8	48	120	18	138
3	22:45	1	8	1	9	60	3	63	140	13	153
4	22:45	1	7	0	7	77	0	77	147	0	147
5	22:56	1	5	0	5	80	0	80	130	0	130
6	22:37	1	3	0	3	58	0	58	88	0	88
7	22:45	1	3	1	4	71	3	74	101	13	114
8	17:26	1	2	4	6	60	20	80	80	60	140
9	14:57	1	2	4	6	58	31	89	78	71	149
10	15:07	1	2	4	6	43	22	65	63	62	125
11	14:57	1	2	4	6	38	39	77	58	79	137
12	15:47	1	2	6	8	14	33	47	34	93	127
13	22:46	1	2	4	6	11	31	42	31	71	102
14	22:56	1	3	5	8	19	38	57	49	88	137
15	14:57	1	3	5	8	36	43	79	66	93	159
16	14:46	1	4	5	9	41	23	64	81	73	154
17	15:17	1	6	4	10	49	15	64	109	55	164
18	15:25	1	5	4	9	64	35	99	114	75	189
19	15:16	1	5	3	8	66	47	113	116	77	193
20	22:45	1	5	3	8	56	42	98	106	72	178
21	22:46	1	5	6	11	40	74	114	90	134	224
22	14:56	1	5	6	11	42	67	109	92	127	219
23	22:45	1	5	6	11	30	60	90	80	120	200
24	22:45	1	5	5	10	22	42	64	72	92	164
25	14:26	1	6	4	10	12	22	34	72	62	134
26	22:44	1	6	2	8	10	4	14	70	24	94
27	22:44	1	3	1	4	10	2	12	40	12	52
28	22:55	1	3	2	5	7	3	10	37	23	60
29	22:46	1	2	2	4	10	6	16	30	26	56
30	22:45	1	2	2	4	9	14	23	29	34	63
31	22:45	1	3	1	4	8	15	23	38	25	63
Media mensual del Número Relativo de Wolf									80,42	55,5	135,9

De acuerdo con las anteriores gráficas, sus respectivos datos y los registros de temperatura, densidad y velocidad de viento solar que se explican más adelante, los días en que el número de manchas solares es elevado existe mayor probabilidad de encontrar eventos de actividad solar; esto, debido a que cuando existe un evento sobre la superficie solar, el valor de los parámetros de viento solar se incrementan y por tanto el radio captura señales de mucha importancia para la realización de esta investigación.

³⁰ Disponible en Internet: <<http://www.spaceweather.com>>

Al observar la actividad solar durante el periodo de estudio, la variación del índice de Wolf llega a un promedio por encima de las 100 unidades, lo cual indica, que la probabilidad de encontrar explosiones es buena. Esto se debe a que el mayor índice de Wolf encontrado hasta el momento ha sido de 250 unidades, que sería el valor máximo de actividad solar y cualquier valor que este por encima de su promedio es buen indicio de actividad solar elevada.

El Sol como objeto de estudio, no es un poderoso emisor de ondas de radio como algunos otros objetos, sin embargo, su proximidad a nosotros hace que las mediciones sean buenas. Este alcanzó el máximo nivel de actividad solar en el año 2000 y durante el año 2003 va en descenso. Eso significa que todavía existen muchas posibilidades de encontrar eventos de actividad sobre la superficie solar. En otras palabras, este es un periodo muy bueno para monitorear el Sol con receptores de radio.

La mayoría de perturbaciones, provienen de explosiones solares o eyecciones de masa coronal que van acompañadas de rayos X. Estas explosiones se clasifican de la siguiente manera:

- TIPO I: Pequeños eventos de banda estrecha que usualmente ocurren en gran número junto con una banda continua más ancha. Pueden durar horas o días.
- TIPO II: De tendencia lenta, de altas y bajas frecuencias. A menudo, muestran una estructura de frecuencia armónica.
- TIPO III: De tendencia rápida, de altas y bajas frecuencias. Exhiben armónicos y a menudo acompañan la fase de destello de grandes explosiones.
- TIPO IV: Explosión de banda ancha continua.
- TIPO V: De banda ancha continua que pueden aparecer con explosiones de tipo III y con una duración de 1 o 2 minutos. Incrementan las frecuencias decrecientes.

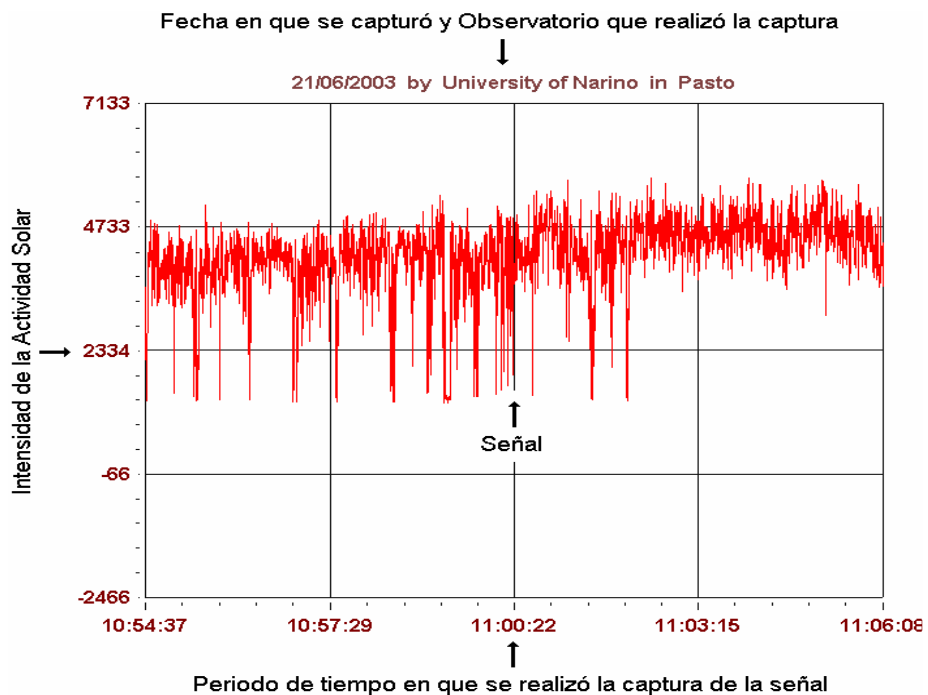
El monitoreo del Sol a través del receptor JOVE, permitió la captura de 206 registros de los cuales 60 corresponden a eventos de actividad solar en 122 días y corresponden a un periodo de cuatro meses de investigación.

No se presenta la totalidad de las señales, debido a que se extendería de manera significativa este trabajo y todas las señales capturadas muestran un comportamiento similar. En las señales presentadas a continuación se exhibe la existencia de actividad solar en función del tiempo real local. Primero, se aprecia las señales crudas, es decir, sin ningún tipo de tratamiento, después, se aplica la opción "Smooth by Averaging" incluida en el software RADIO SKY-PIPE, que suaviza de manera efectiva las señales a través de la integración de la función. Se usa un factor de 100, que es el número de muestras que se promedian para cada señal resultante. Si se toma un factor menor a 100, la señal que se obtiene no se

observa en un rango más definido y si el factor es mayor a 100, la señal pierde detalles fundamentales, como son cada una de sus crestas.

En cada una de las figuras presentadas a continuación se puede observar la fecha en que se capturó y el observatorio que realizó la captura, en el eje de las X, se aprecia el tiempo de duración real local de cada señal y en el eje de las Y, la intensidad de la actividad solar:

Figura 3.7. Formato de una Señal en donde se muestra fecha, Observatorio, periodo de tiempo utilizado e intensidad de la señal capturada.



Para validar la confiabilidad de las señales capturadas por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño, se tomó como muestra de referencia señales de diferentes observatorios de América, las cuales han sido confirmadas como eventos de actividad solar y pueden encontrarse en la página de Internet de RADIO JOVE en el link jovearchive.gsfc.nasa.gov/rjdataclean/#señals/.

Además se muestra el cuadro de confirmación de eventos solares para cada señal realizado por SEC.NOAA (The Space Environment Center of National Oceanic and Atmospheric Administration EEUU). Este cuadro de confirmación de actividad solar por SEC.NOAA presenta un elemento fundamental, la aparición de ráfagas (tormentas) solares.

El SEC (Space Environment Center) o centro del ambiente espacial es una parte del departamento de administración y comercio del océano y la atmósfera NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y su objetivo, la predicción

medioambiental, supervisa y pronostica continuamente el ambiente espacial de la Tierra; proporciona información Solar-Terrestre exacta y confiable en tiempo real sobre eventos solares, como las condiciones en el sol, el viento solar, la magnetosfera, la ionosfera, la termosfera y geofísicos como terremotos, huracanes, etc.

Figura 3.8. (a). Trabajando el receptor con la antena desconectada, se captura una señal que describe el ruido electrónico del radio. Al conectar la antena se observa que el nivel de actividad solar se incrementa e indica que el sistema funciona, como lo muestra la gráfica. Sin embargo, en ésta no hay variación alguna que determine un evento de actividad solar, de igual manera se confirma en los archivos de SEC.NOAA. (b). Señal filtrada o suavizada, que exhibe un rango más definido, se aprecia con detalle que la señal continua se debe al “ruido cósmico” de nuestra galaxia.

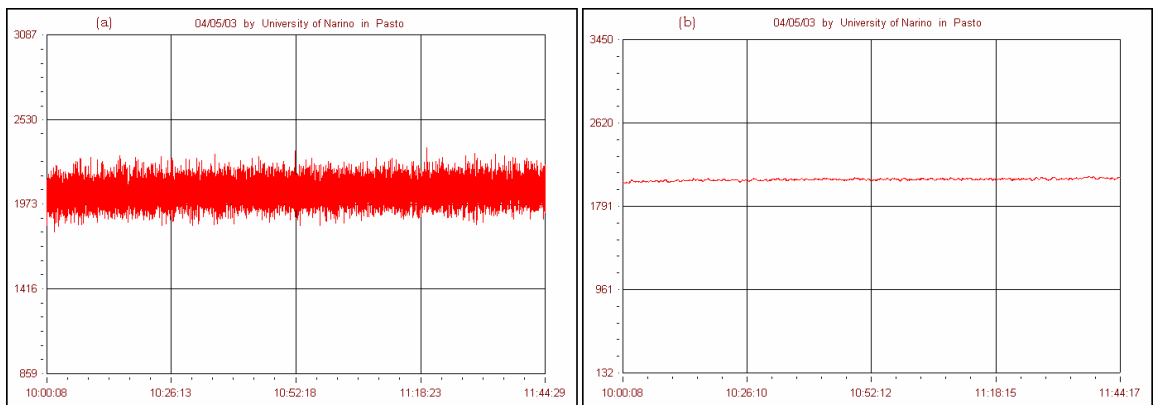
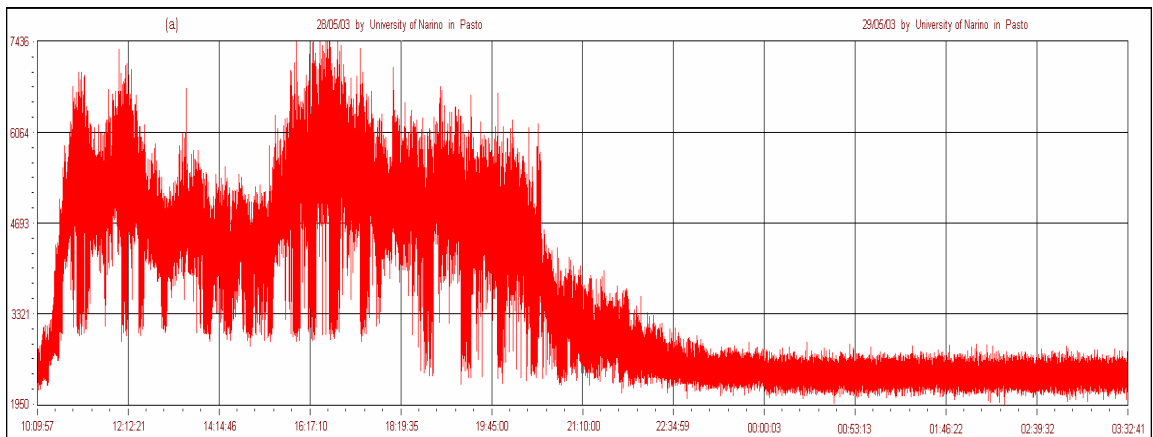


Figura 3.9. (a) Señal capturada el 28 de mayo desde las 10:09:57 hasta el 29 de mayo a las 03:02:41 horas. En la Señal capturada se aprecia el comportamiento de una señal durante un periodo de 17 horas y 20 minutos, parte de ese periodo corresponde a un día de actividad electromagnética producida por el Sol y el planeta Júpiter y una noche donde la presencia de los dos astros es nula.



(b) Al filtrar esta señal, se puede observar con detenimiento tres etapas fundamentales, la primera, desde las 10:00 hasta las 18:00 horas, en la cual se observa una variación en la señal que demuestra la existencia de actividad solar, la segunda, de las 18:00 hasta las 22:00 horas, en donde se debería tener actividad solar nula, debido al ocultamiento del Sol. No obstante, la actividad presente en esta sección se debe al tránsito del planeta Júpiter que salió a las 10:42, paso por el meridiano a las 16:45 y se ocultó a las 22:48 horas y la tercera, de 22:48 a las 03:32 horas, donde la actividad es nula debido al ocultamiento del Sol y del planeta Júpiter.

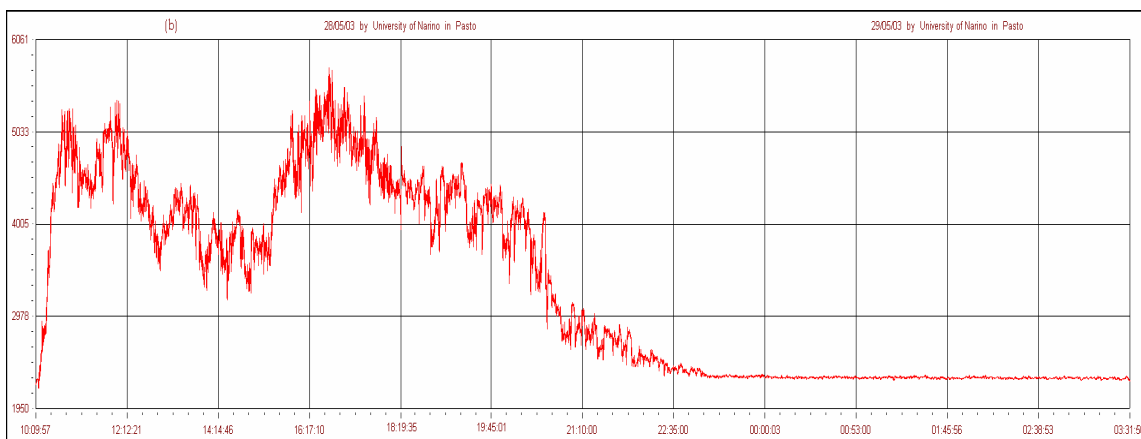
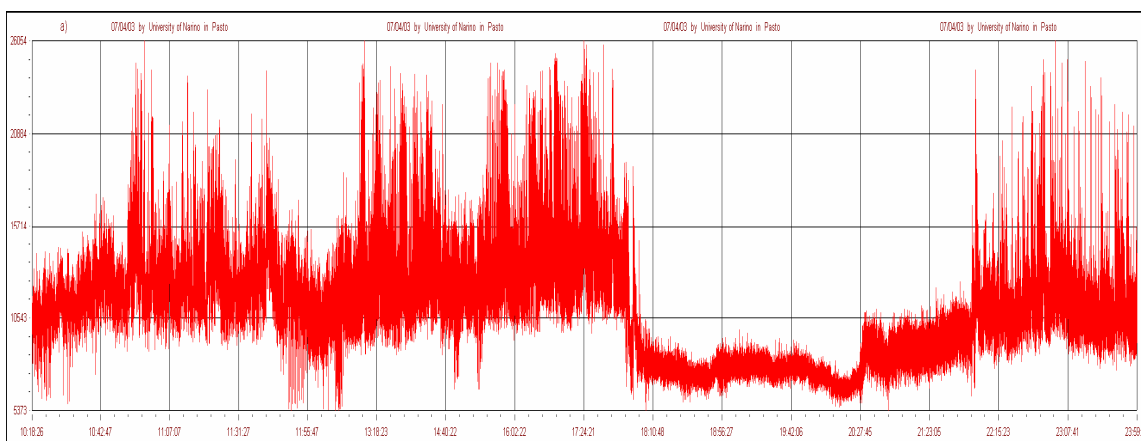
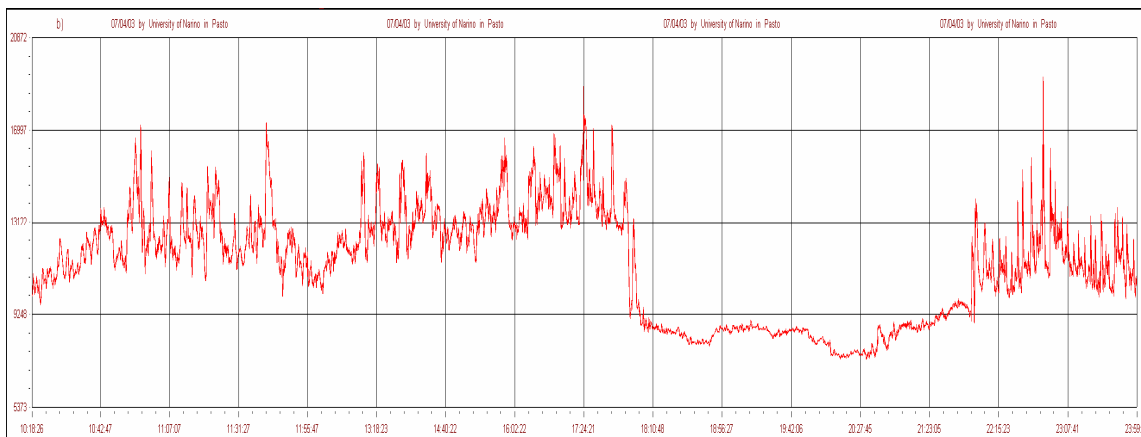


Figura 3.10. (a) Señal capturada el 07 de abril desde las 10:18:26 hasta las 23:59:59 horas. En la Señal capturada se aprecia el comportamiento de una señal durante un periodo de 13 horas y 41 minutos, en el cual, se puede observar actividad solar en las horas del día, actividad solar nula a partir de las 18:00 horas y actividad electromagnética ejercida por el planeta Júpiter desde las 20:27:45 horas.



(b) Señal filtrada en la que se observa con detalle el comportamiento de la actividad solar que marcha desde las 10:18:26 hasta las 18:00 horas, punto en el cual, se produce el ocultamiento del Sol. Su receso desde las 18:00 hasta las

21:00 horas y la actividad electromagnética que ejerce el planeta Júpiter al transitar sobre nuestro planeta a partir de las 21:00 horas.



Los cuadros de confirmación que brinda SEC.NOAA al público, se encuentran disponibles en versión HTML <<http://www.sec.noaa.gov>> en el link <sec.noaa.gov/alerts/archive.html> o por solicitud a través del correo electrónico sec@sec.noaa.gov.

Para todos los cuadros de confirmación, el significado de cada abreviatura es: Event: Evento, Obs: observatorio que reporta el evento, Q: calidad, Type: tipo del reporte, Loc/Frq: Localización y frecuencia y Reg: el número de la región solar asignada.

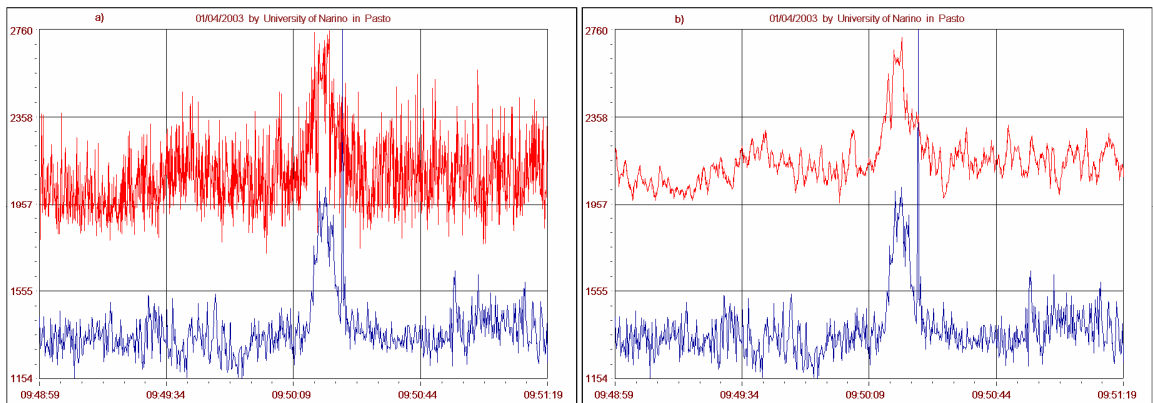
Cuadro 6. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.11, la cual presenta un elemento fundamental, que es la aparición de una ráfaga (tormenta) solar.

Product: 20030401events.txt									
Created: 2003 Apr 04 0302 UT									
Date: 2003 04 01									
Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center.									
Please send comments and suggestions to sec@sec.noaa.gov									
Missing Data:		/////							
Updated every 30 minutes.									
Edited Events for 2003 Apr 01									
Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg
5500 +	1450	/////	1454	SAG	C	RSP	030-080	III/2	0318

Fuente: SEC.NOAA

Donde SAG es el observatorio Sagamore Hill en Estados Unidos, C es reporte correcto, RSP es Sweep-frequency radio burst (erupción de barrido de radiofrecuencia)

Figura 3.11. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Azul capturada por el Observatorio SCSURO en Orangebur, Carolina del Sur (Estados Unidos). (b) Señales filtradas que poseen similares características. Se observa con detalle el comportamiento de la actividad solar. Las señales mantienen una línea continua y presentan un pico pronunciado que corresponde a un evento de actividad sobre la superficie solar.



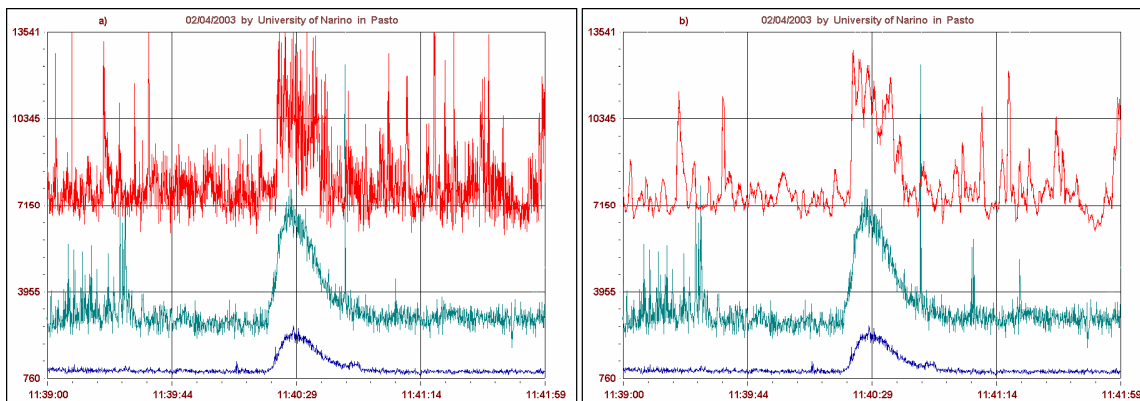
Cuadro 7. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.12, la cual presenta un elemento fundamental, que es la aparición de una ráfaga (tormenta) solar.

Product: 20030402events.txt									
Created: 2003 Apr 05 0302 UT									
Date: 2003 04 02									
Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center.									
Please send comments and suggestions to sec@sec.noaa.gov									
Missing Data:		/////							
Updated every 30 minutes.									
Edited Events for 2003 Apr 02									
Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg
5730 +	1640	/////	1640	HOL	C	RSP	025-136	III/1	

Fuente: SEC.NOAA

Donde HOL es el observatorio Holloman AFB en Estados Unidos, C es reporte correcto, RSP es Sweep-frequency radio burst (erupción de barrido de radiofrecuencia)

Figura 3.12. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Verde y Señal en Azul capturadas por el Observatorio Área 1487 en Saginaw, Miami (Estados Unidos). (b) Señales filtradas que poseen similares características. Se observa con detalle el comportamiento de la actividad solar. Las señales mantienen una serie de picos que se superponen sobre una señal continua. El pico más elevado de esta señal corresponde a un evento de actividad sobre la superficie solar.



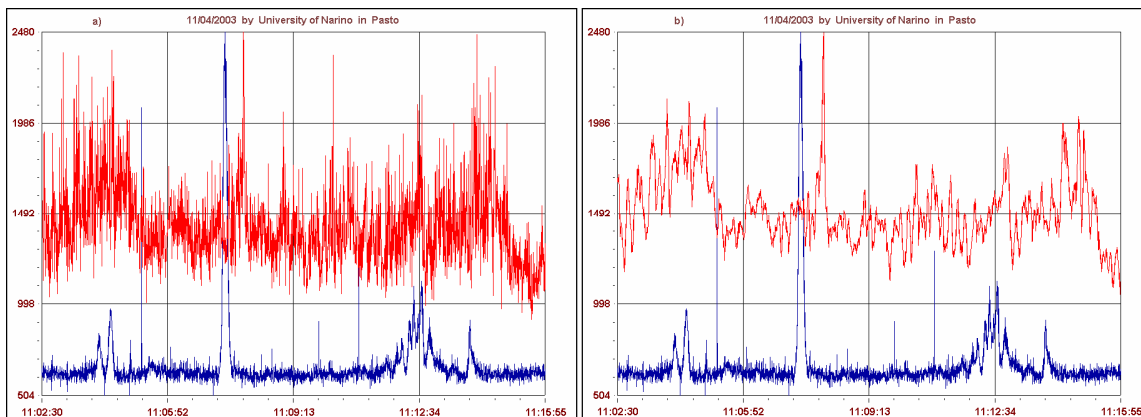
Cuadro 8. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.13, la cual presenta un elemento fundamental, que es la aparición de una ráfaga (tormenta) solar.

Product: 20030411events.txt									
Created: 2003 Apr 14 0302 UT									
Date: 2003 04 11									
Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center.									
Please send comments and suggestions to sec@sec.noaa.gov									
Missing Data:		/////							
Updated every 30 minutes.									
Edited Events for 2003 Apr 11									
Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg
7580	1607	/////	1616	SAG	C	RSP	030-055	III/1	

Fuente: SEC.NOAA

Donde SAG es el observatorio Sagamore Hill en Estados Unidos, C es reporte correcto, RSP es Sweep-frequency radio burst (erupción de barrido de radiofrecuencia)

Figura 3.13. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Azul capturada por el Observatorio SCSURO en Orangebur, Carolina del Sur (Estados Unidos). (b) Señales filtradas que poseen similares características. Se observa con detalle el comportamiento de la actividad solar. Las señales mantienen una serie de picos que se superponen sobre una señal continua. El pico más elevado de esta señal corresponde a un evento de actividad sobre la superficie solar.



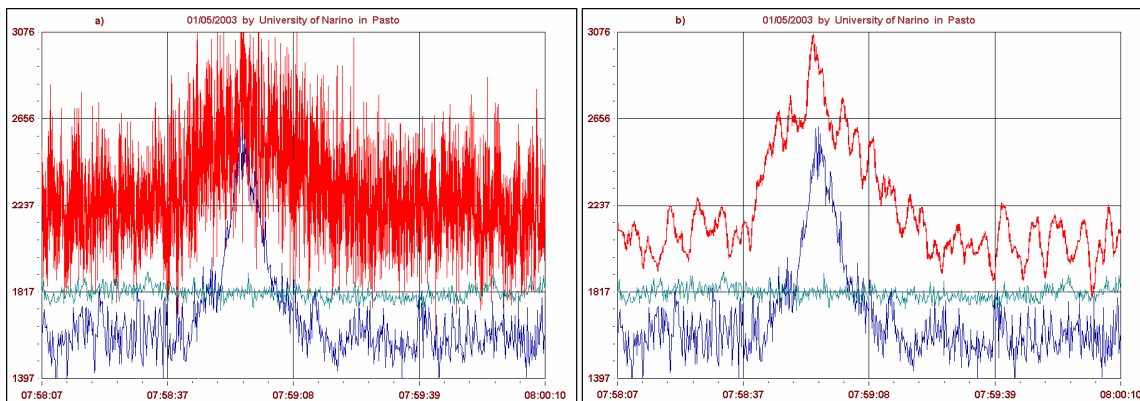
Cuadro 9. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.14, la cual presenta un elemento fundamental, que es la aparición de una ráfaga (tormenta) solar.

Product: 20030501events.txt									
Created: 2003 May 04 0302 UT									
Date: 2003 05 01									
Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center.									
Please send comments and suggestions to sec@sec.noaa.gov									
Missing Data:		/////							
Updated every 30 minutes.									
Edited Events for 2003 May 01									
Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg
1700	1258	/////	1258	HOL	C	RSP	025-070	III/1	

Fuente: SEC.NOAA

Donde HOL es el observatorio Holloman AFB en Estados Unidos, C es reporte correcto, RSP es Sweep-frequency radio burst (erupción de barrido de radiofrecuencia)

Figura 3.14. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Verde y Señal en Azul capturadas por el Observatorio SCSURO en Orangebur, Carolina del Sur (Estados Unidos). (b) Señales filtradas que poseen similares características. Se observa con detalle el comportamiento de la actividad solar. La señal presenta una elevación y un descenso gradual que se superpone sobre una señal continua y corresponde a un evento sobre la superficie solar.



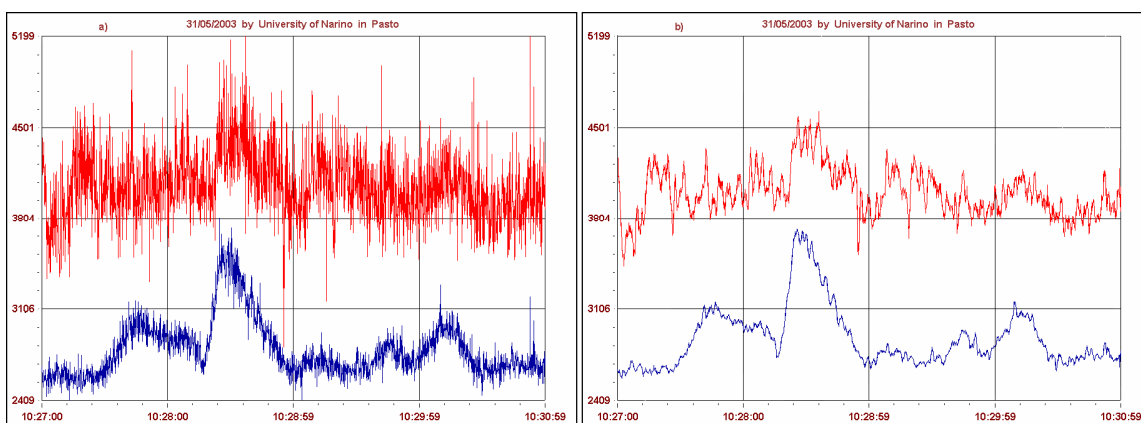
Cuadro 10. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.15, la cual presenta un elemento fundamental, que es la aparición de una ráfaga (tormenta) solar.

Product: 20030531events.txt									
Created: 2003 Jun 03 0302 UT									
Date: 2003 05 31									
Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center.									
Please send comments and suggestions to sec@sec.noaa.gov									
Missing Data:		/////							
Updated every 30 minutes.									
Edited Events for 2003 May 31									
Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg
6560 +	1527	/////	1532	SAG	G	RBR	4995	110	0365

Fuente: SEC.NOAA

Donde SAG es el observatorio Sagamore Hill en Estados Unidos, G es reporte bueno, RBR es Fixed-frequency radio burst (erupción de radiofrecuencia fija)

Figura 3.15. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en azul capturada por el Observatorio Área 1487 RO en Saginaw, Miami (Estados Unidos). (b) Señales filtradas que poseen similares características. Se observa con detalle el comportamiento de la actividad solar. Las señales presentan un pico pronunciado que corresponde a un evento de actividad sobre la superficie solar.



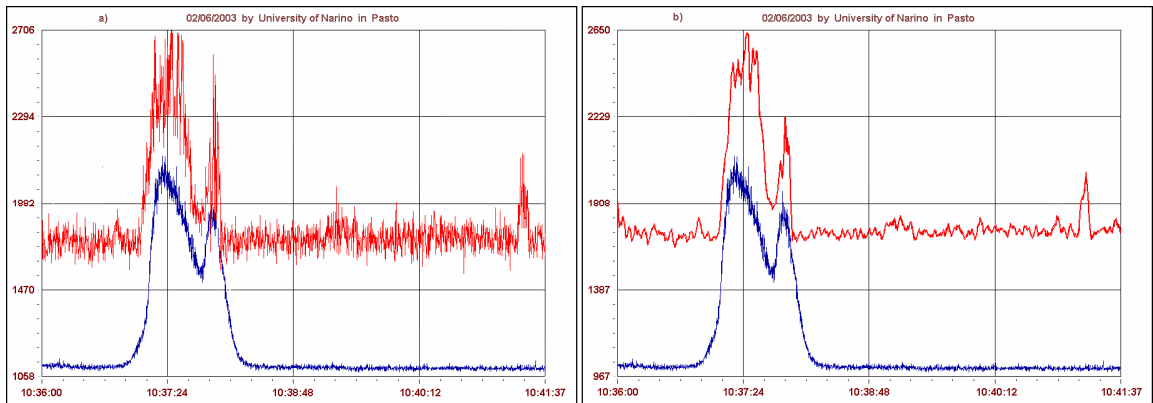
Cuadro 11. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.16, la cual presenta un elemento fundamental, que es la aparición de una ráfaga (tormenta) solar.

Product: 20030602events.txt									
Created: 2003 Jun 05 0302 UT									
Date: 2003 06 02									
Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center.									
Please send comments and suggestions to sec@sec.noaa.gov									
Missing Data:		/////							
Updated every 30 minutes.									
Edited Events for 2003 Jun 02									
Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg
7060	1536	/////	1537	SVI	C	RSP	025-083	V/2	0365
7060 +	1536	/////	1537	SAG	C	RSP	030-055	III/2	0365

Fuente: SEC.NOAA

Donde SVI es el observatorio San Vito en Italia y SAG es el observatorio de Sagamore Hill en Estados Unidos, C es reporte correcto, RSP es Sweep-frequency radio burst (erupción de barrido de radiofrecuencia)

Figura 3.16. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Azul capturada por el Observatorio SSF, Std JOVE Ant, MT 46N/114W en Sula, Montana (Estados Unidos). (b) Señales filtradas que poseen similares características. Se observa con detalle el comportamiento de la actividad solar. Las señales mantienen una línea continua y presentan un pico pronunciado que corresponde a un evento de actividad sobre la superficie solar.



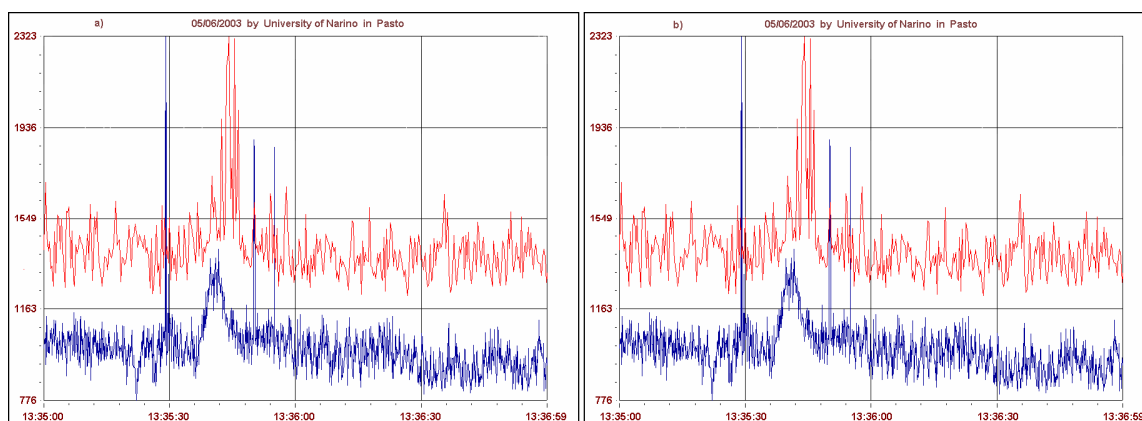
Cuadro 12. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.17, la cual presenta un elemento fundamental, que es la aparición de una ráfaga (tormenta) solar.

Product: 20030605events.txt									
Created: 2003 Jun 08 0302 UT									
Date: 2003 03 05									
Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center.									
Please send comments and suggestions to sec@sec.noaa.gov									
Missing Data:		/////							
Updated every 30 minutes.									
Edited Events for 2003 Jun 05									
Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg
7830	1835	/////	1835	PAL	C	RSP	025-141	III/1	

Fuente: SEC.NOAA

Donde PAL es el observatorio Palahua en Estados Unidos, C es reporte correcto, RSP es Sweep-frequency radio burst (erupción de barrido de radiofrecuencia)

Figura 3.17. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en azul capturada por el Observatorio Área 1487 RO en Saginaw, Miami (Estados Unidos). (b) Señales filtradas que poseen similares características. Se observa con detalle el comportamiento de la actividad solar. Las señales presentan un pico pronunciado que corresponde a un evento de actividad sobre la superficie solar.



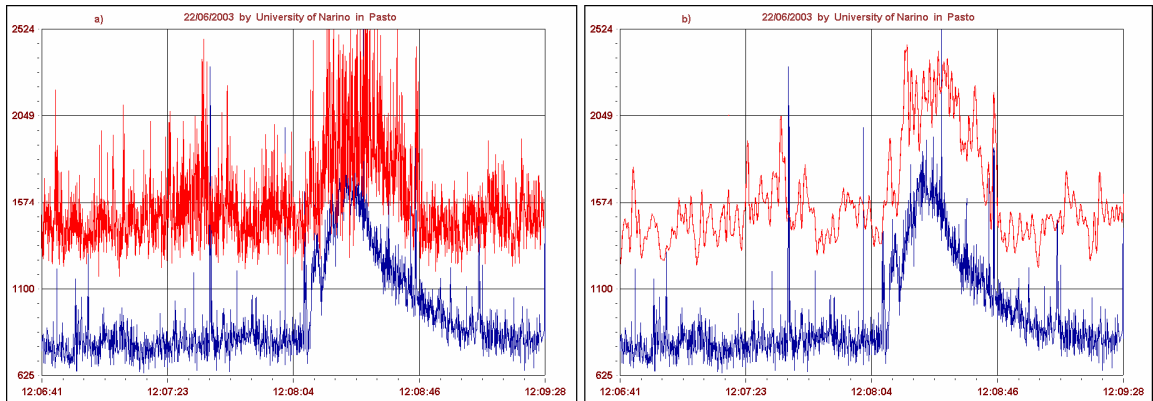
Cuadro 13. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.18, la cual presenta un elemento fundamental, que es la aparición de una ráfaga (tormenta) solar.

Product: 20030622events.txt									
Created: 2003 Jun 25 0302 UT									
Date: 2003 06 22									
Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center.									
Please send comments and suggestions to sec@sec.noaa.gov									
Missing Data:		/////							
Updated every 30 minutes.									
Edited Events for 2003 Jun 22									
Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg
3710 +	1708	/////	1708	SAG	C	RSP	030-050	III/2	

Fuente: SEC.NOAA

Donde SAG es el observatorio Sagamore Hill en Estados Unidos, C es reporte correcto, RSP es Sweep-frequency radio burst (erupción de barrido de radiofrecuencia)

Figura 3.18. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Azul capturada por el Observatorio KB7YPFRO en Sierra Vista, AZ en Arizona (Estados Unidos). (b). Señales filtradas que poseen similares características. Se observa con detalle el comportamiento de la actividad solar. Las señales mantienen una línea continua y presentan un pico pronunciado que corresponde a un evento de actividad sobre la superficie solar.



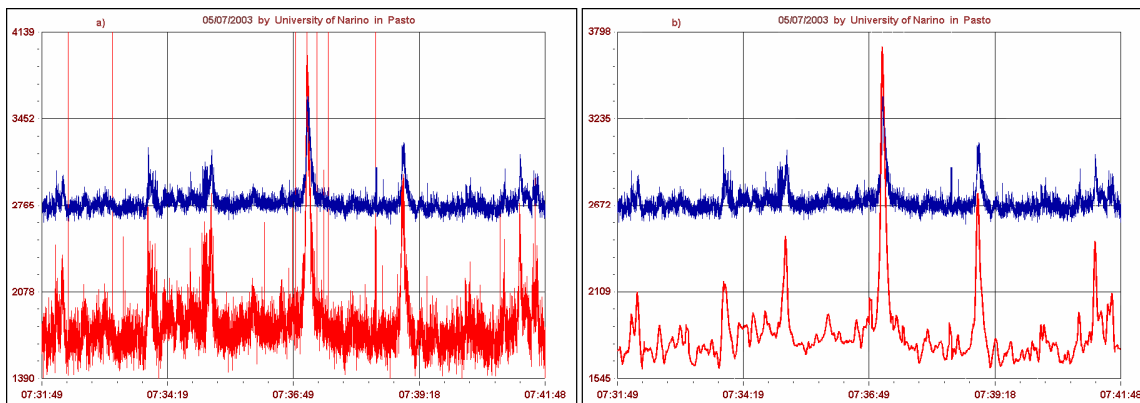
Cuadro 14. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.19, la cual presenta un elemento fundamental, que es la aparición de una ráfaga (tormenta) solar.

Product: 20030705events.txt									
Created: 2003 Jul 08 0302 UT									
Date: 2003 07 05									
Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center.									
Please send comments and suggestions to sec@sec.noaa.gov									
Missing Data:		/////							
Updated every 30 minutes.									
Edited Events for 2003 Jul 05									
Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg
6290 +	1231	/////	1255	G12	5	XRA	1-8A	C2.5 2.3E-03	0397

Fuente: SEC.NOAA

Donde G12 es el satélite GOES 12, 5 es reporte excelente, XRA es X-ray flare (erupción en rayos X)

Figura 3.19. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Azul capturada por el Observatorio Área 1487 en Saginaw, Miami (Estados Unidos). (b) Señales filtradas que poseen similares características. Se observa con detalle el comportamiento de la actividad solar. Las señales mantienen una serie de picos que se superponen sobre una señal continua. Los picos de esta señal corresponden a eventos de actividad sobre la superficie solar



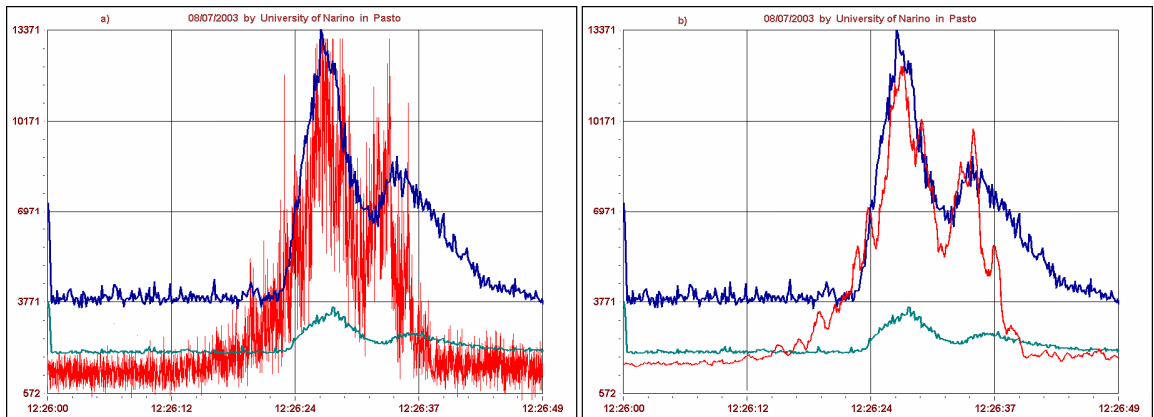
Cuadro 15. Cuadro de confirmación de eventos de actividad solar de SEC.NOAA para las señales de la Figura 3.20, la cual presenta un elemento fundamental, que es la aparición de una ráfaga (tormenta) solar.

Product: 20030708events.txt									
Created: 2003 Jul 11 0302 UT									
Date: 2003 07 08									
Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center.									
Please send comments and suggestions to sec@sec.noaa.gov									
Missing Data:		/////							
Updated every 30 minutes.									
Edited Events for 2003 Jul 08									
Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg
7200 +	1726	/////	1733	SAG	C	RSP	030-080	III/2	

Fuente: SEC.NOAA

Donde SAG es el observatorio Sagamore Hill en Estados Unidos, C es reporte correcto, RSP es Sweep-frequency radio burst (erupción de barrido de radiofrecuencia)

Figura 3.20. (a) Señal en Rojo capturada por el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño. Señal en Verde y Señal en Azul capturadas por el Observatorio Área 1487 en Saginaw, Miami (Estados Unidos). (b) Señales filtradas que poseen similares características. Se observa con detalle el comportamiento de la actividad solar. Las señales mantienen dos picos que se superponen sobre una señal continua. Las elevaciones de esta señal corresponden a un evento de actividad sobre la superficie solar.



Las señales dispuestas en este capítulo, muestran el comportamiento de la actividad sobre la superficie solar. Son perturbaciones que se comportan como explosiones impulsivas o elevaciones y descensos graduales que se superponen sobre una señal continua debida al “ruido cósmico” del espacio exterior.

4. VIENTO SOLAR

4.1 EL VIENTO SOLAR

La existencia de viento solar se predijo teóricamente antes de enviar naves espaciales capaces de detectarlo en el espacio. A finales del siglo XIX se pensaba que el medio interplanetario ligaba los fenómenos solares con los terrestres. El primero en mencionar dicha relación fue G. Fitzgerald, quien escribió³¹: "Hay muchas cosas que parecen mostrar que las colas de los cometas, las auroras y la corona solar son fenómenos estrechamente relacionados".

Más adelante, para explicar ciertos fenómenos percibidos desde la Tierra, varios científicos sugirieron la existencia de partículas emitidas desde el Sol. En 1934, Champan³² formuló que las tormentas magnéticas eran causadas por partículas cargadas emitidas por el Sol que al interactuar con el campo geomagnético lo comprimían del lado día y formaban una cola magnética del lado noche. En 1938, Forbush³³ encontró que la densidad de protones contenidos en los rayos cósmicos, es mayor durante el mínimo de actividad solar y menor en el máximo del ciclo. Hasta ese momento, se creía que el plasma solar se originaba solamente en explosiones solares y no se pensaba que el medio interplanetario estuviera ocupado por este plasma. Para explicar la variación de la densidad de protones, los científicos sugirieron que las explosiones expulsaban nubes de plasma que transferían parte del campo magnético solar y barrían los rayos cósmicos hacia fuera del espacio interplanetario.

En 1951 se demostró la existencia de un flujo continuo derivado del Sol. Al tratar de explicar el hecho de que las colas de los cometas apuntan hacia fuera del Sol, F. Biermann³⁴ demostró que el plasma proveniente de éste, podría deflectar las colas al interactuar con los cometas.

En 1958 el profesor Eugene N. Parker³⁵, catedrático de la Universidad de Chicago formuló la explicación más válida demostrando que una corona estática y extendida como la de Chapman no puede existir sin una presión externa que la esté confinando. Como la presión interestelar es muy pequeña, la corona solar debe expandirse continuamente a muy alta velocidad, constituyendo lo que Parker llamó el viento solar.

La corona es un gas compuesto principalmente de hidrógeno que se encuentra a una temperatura del orden de un millón de °C. A esta temperatura, el hidrógeno está ionizado, los electrones se "liberan" de sus protones y el gas se convierte en plasma. Los plasmas al igual que los gases tienen propiedades de un fluido, pero

³¹ BLANCO CANO, Xochitl. "Skylab: El Descubrimiento del Viento Solar", Volumen 10, mayo 1998.

³² BOLEY, Forrest. "Plasmas en el Laboratorio y en el Cosmos", Plasmas Naturales. Pág. 135.

³³ BLANCO CANO. Op. cit. p. 2.

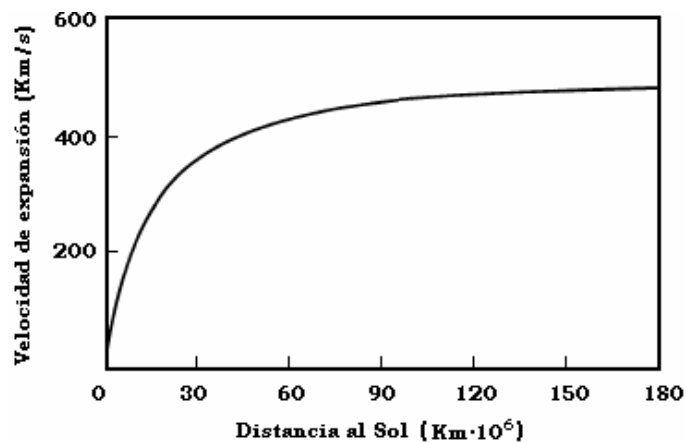
³⁴ L., Biermann. 1951. Zs. Astrophysics. 29:274.

³⁵ PARKER, Eugene N. Interplanetary Dynamical Processes. New York. Intersciences. 1963.

a diferencia de estos últimos, su enorme conductividad eléctrica hace que sean también muy sensibles a campos electromagnéticos.

La corona solar es tan caliente y su temperatura decrece con su distancia al Sol tan lentamente que a partir de una cierta distancia la gravedad y el campo magnético del Sol ya no la pueden contener y se escapa radialmente, formando el viento solar. La velocidad del viento empieza a aumentar conforme se aleja del Sol hasta alcanzar una velocidad terminal que conserva por el resto de su viaje. Cuando se estudia la dinámica del viento solar se debe tener en cuenta sus propiedades de fluido y sus propiedades electromagnéticas.

Figura 4.1 variación de la velocidad con respecto a la distancia al Sol (r) para una temperatura coronal de un millón de grados de acuerdo al modelo hidrodinámico de Parker para el viento solar.



La velocidad con que se propaga el viento solar es tan elevada, que supera la velocidad de las ondas que se transmiten en él. Esto hace que cuando el viento solar encuentra un obstáculo en su camino, tal como el campo magnético de la Tierra, se generen ondas en el plasma que tratan de propagarse en todas direcciones. Las ondas que tratan de propagarse hacia el Sol no pueden hacerlo, sino que son arrastradas por el viento mismo y se genera una región de transición conocida con el nombre de onda de choque, en donde las propiedades del plasma cambian bruscamente. Esta onda de choque es similar al efecto de choque de proa que se observa delante de un barco, debido a que éste viaja con una velocidad mayor a la de las ondas en el agua. En las cercanías del choque, el plasma es muy turbulento y la estructura detallada de la región aún es desconocida.

4.1.1 Modelo matemático de Parker sobre el viento solar. El modelo de Parker³⁶ describe una atmósfera solar desde el punto de vista de la magnetohidrodinámica. La cual representa leyes de conservación de la mecánica. La conservación de la materia se describe por las ecuaciones de continuidad:

³⁶ Ibid., p. 2.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \rho + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (4.1)$$

Donde ρ es la densidad y \vec{V} es la velocidad del fluido. La ecuación de conservación del momento para la corona, se describe por

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \vec{V} \right) = -\vec{\nabla} p + \vec{F} \quad (4.2)$$

Donde \vec{F} representa una fuerza por unidad de volumen arbitraria y p la presión.

Si la atmósfera solar se encuentra en equilibrio y por simetría se espera que el flujo coronal (electrones, protones, partículas alfa), sea puramente radial, las anteriores ecuaciones se transforman en

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.3)$$

$$\rho (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) = -\nabla p + \rho \vec{g} \quad (4.4)$$

$$p = \rho RT \quad (4.5)$$

$$T = T_0 \quad (4.6)$$

La velocidad del viento solar varía radialmente $\vec{V} = v\hat{r}$ y la aceleración gravitacional obedece la ley del inverso del cuadrado radial $\vec{g} = -GM_o/r^2$. Utilizando coordenadas esféricas, la ecuación (4.3) se transforma en

$$\frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 \rho v)}{dr} = 0 \quad (4.7)$$

Y la ecuación de conservación del momento radial para la corona es

$$\rho v \frac{dv}{dr} = -\frac{dp}{dr} - \rho \frac{GM_o}{r^2}, \quad (4.8)$$

La definición de velocidad del sonido para la corona solar $c_s^2 = p/\rho$, de donde, la ley de los gases se puede expresar como

$$p(r) = \rho c_s^2, \quad (4.9)$$

Derivando,

$$\frac{dp}{dr} = c_s^2 \frac{d\rho}{dr} \quad (4.10)$$

Con lo cual, la ecuación (4.8) toma la forma

$$v \frac{dv}{dr} = -\frac{c_s^2}{\rho} \frac{d\rho}{dr} - \frac{GM_o}{r^2} \quad (4.11)$$

Con ayuda de la ecuación (4.7) se llega finalmente a

$$\left(v - \frac{c_s^2}{v}\right) \frac{dv}{dr} = \frac{2c_s^2}{r^2} (r - r_c) \quad (4.12)$$

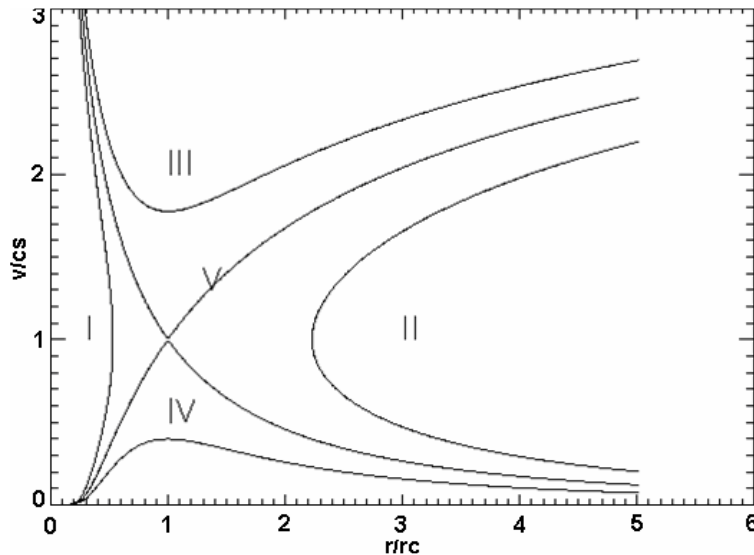
Donde $r_c = GM_o/2c_s^2$ y es importante porque $r_c = r$ y $v = c_s$. Integrando la ecuación (4.12) se obtiene

$$\left(\frac{v}{c_s}\right)^2 - \ln\left(\frac{v}{c_s}\right)^2 = 4 \ln\left(\frac{r}{r_c}\right) + 4\left(\frac{r_c}{r}\right) + C \quad (4.13)$$

Donde C es una constante de integración.

La solución para diferentes valores de C, se muestran en la Figura 4.2, en la cual es fácil observar que la solución I no es físicamente aceptable, debido a que no es posible para el viento abandonar la superficie solar con una velocidad por debajo de la velocidad del sonido, alcanzar un radio máximo a muy poca distancia y regresar al Sol con una velocidad supersónica.

Figura 4.2 Cuatro clases de soluciones en las que se puede observar su punto crítico.



Fuente: <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/lectures/node66.html>

La solución II no es físicamente aceptable puesto que nunca comienza en la superficie solar.

La solución III predice flujos supersónicos en la base de la corona solar que de ningún modo han sido observados, por lo tanto esta solución, también debe despreciarse.

Los dos tipos de solución que son físicamente aceptables son IV y V. La solución V es un caso particular donde el plasma abandona la superficie solar con una velocidad particular y pasa a través del punto crítico en $r_c = r$ y $v = c_s$. Para estos valores específicos, de la ecuación (4.13) se encuentra que $C = -3$.

La solución IV siempre permanece por debajo de la velocidad del sonido y se conoce como solución "Brisa solar". El comportamiento de la solución V se puede obtener fácilmente para valores grandes de r .

De la Figura 4.2 se tiene que $v \gg c_s$, así que la ecuación (4.13) es aproximadamente

$$\left(\frac{v}{c_s}\right)^2 \approx 4 \ln\left(\frac{r}{r_c}\right) \quad (4.14)$$

De donde,

$$v = 2c_s \left[\ln\left(\frac{r}{r_c}\right) \right]^{1/2} \quad (4.15)$$

Observando la ecuación (4.7) se encuentra que, cuando r tiende a infinito, ρ tiende a cero y como consecuencia de la ecuación (4.9) p también tiende a cero. Por lo tanto, para grandes distancias, la presión se iguala con la baja presión del medio interestelar.

El comportamiento de la solución IV para grandes valores de r es diferente. De la Figura 4.2 se observa que v tiende a cero cuando r tiende a infinito, así la ecuación (4.13) toma la forma

$$-\ln\left(\frac{v}{c_s}\right)^2 = 4 \ln\left(\frac{r}{r_c}\right) \quad (4.16)$$

Con lo cual

$$v \approx c_s \left(\frac{r_c}{r}\right)^2 \quad (4.17)$$

Y reemplazando este valor en la ecuación (4.7) se tiene que

$$\rho = \frac{\text{cte}}{c_s r_c^2} \quad (4.18)$$

Como ρ tiende a un valor constante cuando r tiende a infinito, así mismo lo hace la presión; por lo tanto, esta presión con un valor finito no puede igualarse con la presión del medio interestelar.

Visiblemente, la solución IV no es aceptable físicamente y se concluye que el modelo de Parker para el viento solar está dado por la solución V de la ecuación (4.13). Esta solución predice que la corona solar se expande radialmente con velocidades subsónicas que se incrementan hasta un punto crítico (punto sónico), en el cual alcanza la velocidad del sonido y luego es acelerada gradualmente hasta alcanzar velocidades supersónicas mientras la presión y la densidad del gas decrecen.

Anteriormente, se observó que, para $r_c = r$ y $v = c_s$ la constante $C = -3$, por tanto, la ecuación (4.13) se puede expresar como

$$\left(\frac{v^2}{c_s^2} - 1\right) - \ln\left(\frac{v}{c_s}\right)^2 = 4 \ln\left(\frac{r}{r_c}\right) + 4\left(\frac{r_c}{r} - 1\right) \quad (4.19)$$

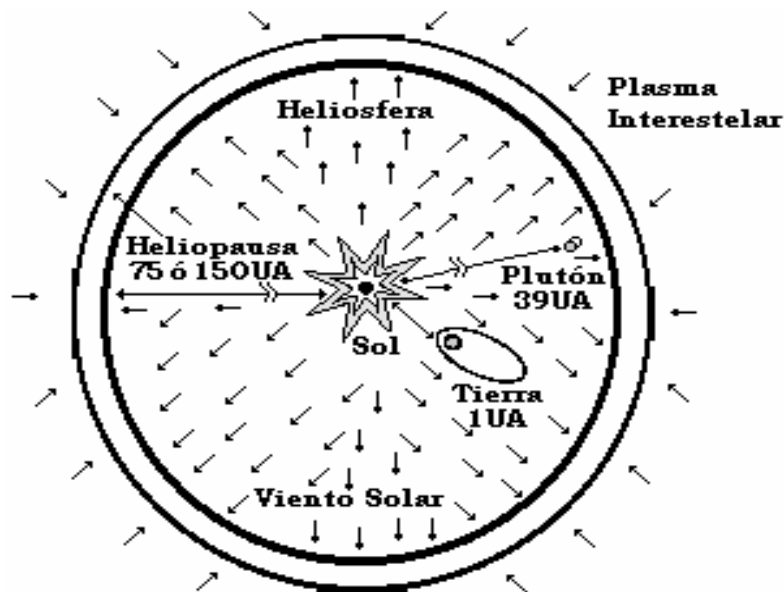
4.2 PROPIEDADES DEL VIENTO SOLAR

El viento solar es variable, la magnitud de su velocidad terminal es directamente proporcional a la temperatura de la corona, es decir, a mayor temperatura, mayor es la velocidad. Las observaciones del viento solar muestran la existencia de tres tipos de viento: un viento rápido con velocidades entre 500 y 750 Km/s, el cual posee alta temperatura y baja densidad; un viento lento con velocidades entre 250 y 400 Km/s, más denso y frío; y zonas transitorias de viento emitidas en eventos de actividad solar. Exceptuando las zonas transitorias de viento solar, cuyo origen está bien definido, no es claro todavía dónde y cómo se origina el viento rápido y el viento lento. Dado que la velocidad del viento solar es muy sensible a la temperatura de la corona, se ha sugerido que ambos tipos de viento solar emergen de regiones en el Sol de diferentes temperaturas.

El viento solar se expande esféricamente y su flujo rebasa la órbita del último planeta, sin embargo, debe existir un punto donde su expansión termina y es contenido por la presión externa del viento interestelar. En ese sentido, el universo está compuesto de zonas de plasma que rodean cada estrella y delimitan de alguna manera su dominio dentro del espacio. Todavía no se sabe donde se encuentra esa frontera, pero los modelos predicen que debe estar alrededor de 100 UA del Sol. El medio interplanetario está contenido en una región del espacio controlada por el viento solar y por el campo magnético del Sol que es transportado por el flujo de este viento. Esta región es conocida como la heliosfera y está limitada por una frontera que divide el plasma solar del plasma

interestelar conocida como heliopausa. En esta enorme región del espacio, se llevan a cabo una gran variedad de fenómenos físicos ocasionados principalmente por la actividad del Sol.

Figura 4.3 Esquema del viento solar emergiendo del Sol, la extensión tridimensional de la heliosfera, la heliopausa y el medio interestelar.

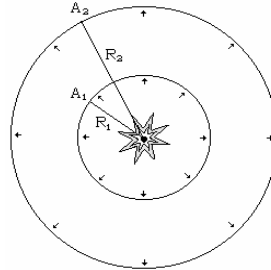


A diferencia de la velocidad, la temperatura y la densidad del viento solar, disminuyen al alejarse del Sol. La temperatura disminuye con el inverso de la distancia desde el Sol y la densidad disminuye con el cuadrado del inverso de la distancia desde el Sol, ya que se trata de una expansión esférica. A la altura de la órbita de la Tierra ($R_1 = 1UA$), la temperatura del viento solar varía entre casi un millón de grados Kelvin y la densidad del viento solar es de aproximadamente 7 protones por cm^3 .

Los principios de conservación son leyes físicas fundamentales que deben cumplirse en todos los sistemas y modelos estudiados. Uno de estos principios es la conservación de la masa, que en el caso de un fluido como lo es el viento solar, se expresa como la conservación del flujo de masa.

Este principio nos dice: “El flujo neto de partículas que pasan por unidad de tiempo a través de una superficie cerrada, será siempre igual a cero a menos que exista dentro de la superficie una fuente que genere partículas o un “sumidero” que las destruya”. El Sol se puede considerar como una fuente que expulsa partículas hacia el medio interplanetario. El viento solar es la atmósfera del Sol en expansión y está compuesto aproximadamente por el 98% de protones y electrones libres más un pequeño porcentaje de iones más pesados. Se supone que el viento solar se expande con simetría esférica, es decir, posee homogeneidad y se expande radialmente con una velocidad constante V_R .

Figura 4.4 El esquema ilustra mediante flechas, partículas del viento solar alejándose radialmente del Sol. Primero pasan a través de la superficie esférica A_1 y luego pasan a través de la superficie esférica A_2 .



Para calcular la variación de la densidad del viento solar, primero se estima el número de partículas que pasan por A_1 cada segundo. Este número n_1 , va a ser igual a la densidad del viento solar N_1 a esa distancia por la velocidad de las partículas, por el área de toda la superficie:

$$n_1 = N_1 V_R A_1 \quad (4.20)$$

Del mismo modo, El número de partículas que pasan por A_2 en cada segundo, esta dado por:

$$n_2 = N_2 V_R A_2 \quad (4.21)$$

Entre A_1 y A_2 no existe ninguna fuente que produzca partículas o sumidero que las absorba, el número total de partículas que pasa por ambas superficies por unidad de tiempo debe ser necesariamente el mismo. Entonces,

$$n_1 = n_2 \quad (4.22)$$

En consecuencia, se puede igualar las ecuaciones (4.20) y (4.21), para obtener:

$$N_1 V_R A_1 = N_2 V_R A_1 \quad (4.23)$$

Al cancelar V_R , se tiene:

$$N_1 A_1 = N_2 A_2 \quad (4.24)$$

Ahora bien, como las dos superficies son esferas y sabiendo que su área es proporcional al cuadrado de su radio:

$$A = 4\pi R^2 \quad (4.25)$$

La ecuación (4.24) se puede expresar como:

$$N_2 = N_1 \times \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \quad (4.26)$$

Esta última ecuación nos indica que al expandirse el viento solar de manera radial, con velocidad constante, su densidad va a decaer con el inverso del cuadrado de la distancia al Sol. Usando esta relación es posible hacer un cuadro de valores de la densidad del viento solar a diferentes distancias con respecto al Sol.

Para calcular valores de densidad para diferentes distancias, basta aplicar $R_1 = 1\text{UA}$, que es la altura de la órbita de la Tierra y $N_1 = 7 \text{ protones/cm}^3$ que es la densidad del viento solar, de este modo,

$$N_2 = \frac{7 \text{ Protones}}{\text{cm}^3} \times \left(\frac{1}{R_2} \right)^2 \quad (4.27)$$

Cuadro 16. Datos obtenidos al aplicar la ecuación (4.27) para diferentes distancias desde el Sol en el sistema solar.

Planeta	R_2 (U.A.)	N_2 (cm^{-3})
Mercurio	0,39	46
Venus	0,72	13,5
Tierra	1,00	7
Marte	2,50	1,1
Júpiter	5,40	$2,4 \times 10^{-1}$
Saturno	9,50	$7,8 \times 10^{-2}$
Urano	19,20	2×10^{-2}
Neptuno	30,10	$7,7 \times 10^{-3}$
Plutón	39,50	$4,5 \times 10^{-3}$

4.3 DINÁMICA DEL MEDIO INTERPLANETARIO

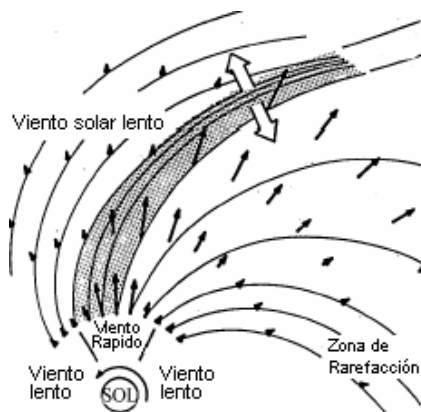
La dinámica del viento solar se puede caracterizar por los siguientes aspectos: dos diferentes tipos de corrientes de viento solar (viento rápido y lento); el campo magnético interplanetario y la espiral de Parker; los sectores magnéticos y la hoja neutra; las regiones de interacción y las ondas de choque corrotantes; las eyecciones de masa coronal y las ondas de choque transitorias; las ondas de choque de "proa" oponiéndose al flujo del viento solar en frente de todos los cuerpos planetarios; y finalmente, la heliopausa y la onda de choque terminal. En seguida se hace una breve descripción de los fenómenos que interesan para la realización de este trabajo.

4.3.1 Regiones de Interacción Corrotante. Existen dos fuentes principales conocidas como causantes de perturbaciones en el Viento Solar, una de ellas son las llamadas Regiones de Interacción Corrotante (CIR, del inglés Corotating Interaction regions).

A causa de la rotación y la emisión radial del plasma del Sol, las corrientes de Viento Solar se propagan formando una espiral de Arquímedes y arrastrando consigo las líneas de campo magnético congeladas en él. Las corrientes de baja velocidad, son fuertemente curvadas y alcanzadas por aquellas de alta velocidad, provenientes de Huecos Coronales. De este modo se forma una región de interacción que constituye una estructura estable nombrada CIR

Las CIR están asociados a regiones de campo magnético abierto y pueden formarse en todas las fases del ciclo solar, pero los más fuertes y persistentes ocurren durante el mínimo de actividad y se distribuyen mayormente en un rango de latitud de 0 a 20 grados, declinando su formación con el incremento de las latitudes heliográficas³⁷ Además, juegan un importante papel en la generación de las tormentas recurrentes en la Magnetosfera terrestre.

Figura 4.5 Formación de una región corrotante de interacción en el medio interplanetario, dibujo en dos dimensiones en el plano de la eclíptica.



4.3.2 Eyecciones de Masa Coronal. Otra de las fuentes conocidas de perturbaciones del Viento Solar son las Eyecciones de Masa Coronal (del inglés Coronal Mass Ejection).

Varios estudios sobre geofectividad de tormentas geomagnéticas, muestran que las más grandes están asociadas con los efectos de las eyecciones de masa coronal³⁸. De ahí la importancia de una mejor caracterización de estas.

³⁷ PHILLIPS, J. L., A. BALOGH, S. J. BAME, B. E. GOLDSTEIN, J. T. GOSLING, J. T. HOEKSEMA, D. J. MCCOMAS, M. NEUGEBAUER, N. R. SHEELEY y Y.-M. Wang, Ulysses at 50° south: Constant immersion in the high-speed solar wind, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1105, 1994.

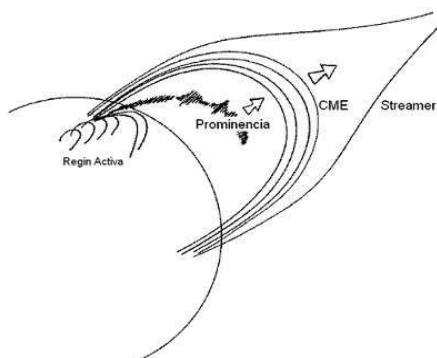
³⁸ GOSLING, J. T., in *Coronal mass Ejections*, Eds. N. Crooker, J.A. Joselinng y J. Feynman, *Geophysical Monograph* 99, (American Geophysical Union, Washington DC), 9, 1997.

Las Eyecciones de masa coronal son enormes estructuras de plasma asociadas a campos magnéticos cerrados³⁹ que son expelidas desde el Sol. Constituyen también un proceso en el cual la energía libre no potencial, contenida en el campo magnético coronal, es liberada en forma de energía cinética y potencial en el plasma eyectado⁴⁰, convirtiéndose en el ejemplo más cercano de procesos magnetohidrodinámicos de expulsión de material a gran escala.

Son las Eyecciones de masa coronal una consecuencia del desbalance entre la tendencia de los campos magnéticos a permanecer cerrados y la tendencia global de la corona a expandirse, predominando una de ellas, en dependencia de la circunstancia física en que se desarrolla esta pérdida del equilibrio, siendo teóricamente concebible que la estructura eyectada pueda mantener su forma interna y pueda moverse en un amplio rango de velocidades, expandiéndose durante su propagación debido a que son eyectadas con una presión interna que excede la del plasma que las circunda⁴¹, presentando una sobreexpansión cuando se originan en las altas latitudes heliosféricas⁴².

Las imágenes de Eyecciones de masa coronal fueron observadas por primera vez en 1973 por medio del Coronógrafo en Luz blanca a bordo de la nave espacial Orbiting Solar Observatory (OSO7), a partir de entonces muchas de sus propiedades básicas, tales como su morfología, localización, ancho, velocidad, aceleración y masa, han sido determinadas con la ayuda de Coronógrafos a bordo de diferentes naves: SKYLAB (1973-1985), P78-1 (1979-1985), Solar Maximum Mission (SMM, 1980 y desde 1984 a 1989) y Solar and Heliospheric Observatory (SOHO, desde 1995 hasta nuestros días). A menudo aparecen como una estructura en forma de lazo, con un borde luminoso seguido por una cavidad oscura y un centro brillante de material denso, sugiriendo una erupción de una prominencia preexistente como se muestra en la Figura 4.6.

Figura 4.6 Esquema del proceso de una eyección de masa coronal, donde se señalan los “Streamer” coronales, lazos de eyecciones de masa coronal ascendentes, prominencia eruptiva y una región activa sobre la fotosfera



³⁹ HARRISON, R. A., The source regions of solar coronal mass ejections, *Solar Phys.*, 126, 185, 1990.

⁴⁰ FORBES, T. G., A review on the genesis of mass ejections, *J. Geophys. Res.*, 105, 23153, 2000.

⁴¹ GOSLING, J. T., Mass ejections from the Sun. A view from Skylab, *J. Geophys. Res.*, 79, 4581, 1974.

⁴² P. RILEY, D. J. MCCOMAS y V. J. Pizzo, Overexpanding coronal mass ejections at high heliographic latitudes: Observations and simulations, *J. Geophys. Res.*, 103, 1941, 1998.

Una eyección de masa coronal típica posee una masa que puede variar entre 10^{15} - 10^{16} g, así como una energía de 10^{32} Ergios⁴³ y su velocidad en regiones cercanas al Sol ($<10R_{\odot}$) oscila entre 10 y 2000 Km/s, con un promedio de 450 Km/s⁴⁴. Más allá de varios radios solares la velocidad de las eyecciones de masa coronal parece constante, en contraste con la alta aceleración que presenta en la baja atmósfera.

Las Eyecciones de masa coronal más rápidas, que ocurren cerca del plano de la eclíptica muestran desaceleración, puesto que interactúan con el plasma del medio interplanetario, mientras que las más lentas se piensa que son aceleradas por las mismas fuerzas que actúan sobre un Viento Solar normal. Por otro lado las eyecciones de masa coronal de las altas latitudes heliográficas alcanzan altos valores de velocidad (730 Km/s), según registros de la nave espacial Ulysses, siendo mucho mayores que las medidas en el plano de la eclíptica. Estas velocidades son comparables con las mayores alcanzadas por el Viento Solar en las altas latitudes, que caracterizan también a los Huecos Coronales.

Una característica de las Eyecciones de masa coronal, es que ocurren más frecuentemente cerca de las regiones ecuatoriales durante los períodos de mínimo de actividad solar, mientras que en épocas de máximo se distribuyen por todas las latitudes. Apareciendo en dos escenarios importantes, líneas neutrales asociadas a campos magnéticos débiles y regiones activas (Plagas y grupos de manchas) asociadas a campos fuertes^{45,46}. Su grado de ocurrencia también está de acuerdo a estos ciclos, observándose de 4 a 5 eventos por día durante el máximo solar y 1 por día durante el mínimo^{47,48}.

Durante la ocurrencia de una eyección de masa coronal pueden observarse uno o más de los siguientes eventos: prominencias o filamentos eruptivos, emisiones en rayos X de larga duración seguidas a menudo por explosiones en ondas de radio métrica tipo II y IV, intensas emisiones en microondas y eventos de partículas energéticas solares en el espacio.

Por otro lado es conocido que el campo magnético ligado a las Eyecciones de masa coronal es el mismo involucrado en las prominencias eruptivas y destellos, lo cual sugiere que estos fenómenos son el resultado de un mismo proceso en el Sol, esto explica la asociación encontrada entre destellos y prominencias con eyección de masa coronal. Sin embargo existe una relación particular entre

⁴³ HUNDHAUSEN, A. J., BAME, S. J y MONTGOMERY, M. D, Large-scale characteristics of flare associated solar wind disturbances, *J. Geophys Res.*, 75, 4631, 1970.

⁴⁴ _____ In the many faces of the Sun, eds. K. T. Strong et al. (Springer-Verlag, New York), 143, 1999

⁴⁵ RODRIGUEZ, R.E., G. Gil, A. MÉNDEZ y R. PÉREZ, CME associations with quiet and active solar features, *New Astronomy*, 3, 321, 1998.

⁴⁶ _____ CME PHENOMENOLOGY IN DIFFERENT SOLAR MAGNETIC SCENARIOS, *Astrophysics and Space Science*, 256, 373, 1998.

⁴⁷ HOWARD, R. A., N. R. SHEELEY, D. J. MICHELS, y M. J. Koomen, In the Sun and the Heliosphere in three dimensions, ed. R.G. Marsden, (D.Reidel, Norwel), 107, 1986.

⁴⁸ St. Cyr, O. C., J. T. BURKEPILE., A. J. Hundausen., y A. R. Lecinski, A comparison of ground-based and spacecraft observations of coronal mass ejection from 1980 - 1989, *J.Geophys.Res.*, 104, 12493, 1999.

Eyecciones de masa coronal y destellos de un tipo especial llamado “Two Ribbon”, que han sido bien explicado en términos de reconexión magnética⁴⁹.

Se denominan eyecciones de masa coronal Interplanetarias (ICMEs) a la manifestación de una eyección de masa coronal en el Viento Solar. Una ICME puede ser identificada en el Viento Solar por una serie de características tales como: la presencia de una onda de choque, variaciones en la densidad, flujos con excesiva abundancia de helio, flujos bidireccionales de electrones y protones de baja energía a lo largo de las líneas de campo, inusuales estados de ionización y fuertes campos magnéticos con bajas variaciones, débil rotación de los campos y bajo plasma⁵⁰. Sin embargo, la dinámica de la ICME está determinada por tres fuerzas principales: la fuerza de Lorentz (F_L), la fuerza de gravedad (F_g) y la fuerza debida a la interacción de la ICME con el Viento Solar, llamada fuerza de arrastre (F_D)⁵¹.

La ecuación de movimiento que describe las eyecciones de masa coronal interplanetaria viene dada por:

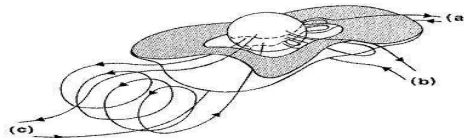
$$M_* \frac{dv_i}{dt} = F_L + F_g + F_D \quad (4.22)$$

Donde, M_* , es la masa efectiva de la eyección de masa coronal, v_i , la velocidad de la eyección de masa coronal interplanetaria, F_L , la fuerza de Lorentz, F_g , la fuerza de gravedad, F_D , la fuerza de arrastre y finalmente:

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{F_D}{M_*} = -\gamma C_D (v_i - v_e) |v_i - v_e| \quad (4.23)$$

γ , incluye la dependencia radial de la fuerza de arrastre, C_D es el coeficiente de arrastre, v_i , es la velocidad de la ICME y v_e , la velocidad del Viento Solar. Algunas ICMEs son consideradas, de acuerdo con sus características y topología magnética, como nubes magnéticas. Estas se identifican principalmente por los fuertes campos magnéticos, los cuales exhiben una suave rotación coherente. Estas estructuras pueden ser modeladas como una serie de líneas de campos helicoidales como espiras.

Figura 4.7 (a) Helmet Streamers, (b) CME a pequeña escala, (c) CME a gran escala con estructura de “Flux Rope”.



⁴⁹ WEBB, D. F., Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, eds., (Nature Publishing Group), 3866, 2001

⁵⁰ MANOHARAN, P. K., The Solar Wind, eds. H.M.Antia et al. (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg), 299, 2003

⁵¹ Cargill, P. J., On the aerodynamic drag force acting on interplanetary coronal mass ejections, Solar Phys, 221, 135, 2004.

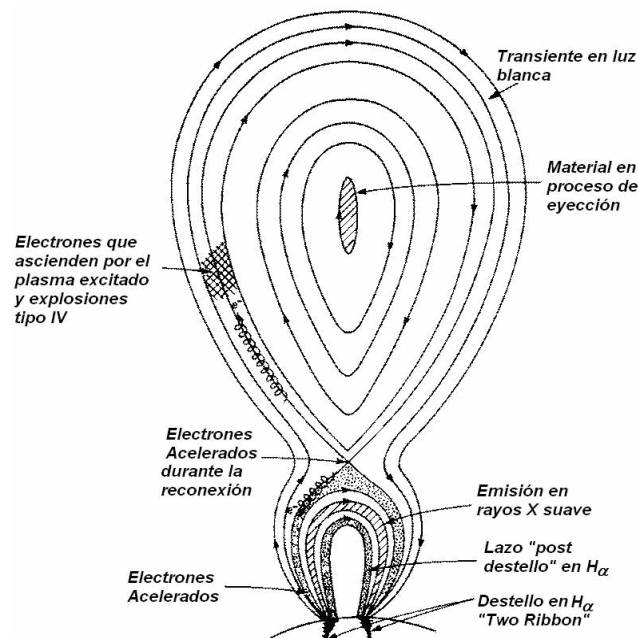
Aproximadamente la mitad de todas las CMEs detectadas conducen ondas de choque en el medio interplanetario, pero no todas aceleran partículas.

4.3.3 Destellos Solares. Uno de los fenómenos más importantes observados en la atmósfera externa del Sol son los destellos solares. Estos pueden ser observados durante la ocurrencia de una CME.

Un destello solar es definido como un rápido e intenso incremento en la brillantez, observado en H_{α} , causado por la liberación de energía de aproximadamente $10^{27}J$ en pocos minutos. Esta energía liberada comprende un gran número de fenómenos que se registran en todas las longitudes de ondas, desde radio hasta rayos gamma; la aceleración de partículas elementales a velocidades relativistas, e incluyen también la formación de ondas de choque.

La energía liberada por los destellos durante el proceso de reconexión magnética acelera las partículas hasta energías de 20 KeV y más. Las partículas precipitan dentro de la densa cromosfera donde colisionan, depositando parte de su energía. De esta forma el material cromosférico experimenta un calentamiento hasta temperaturas de unos 10 millones de grados, observado en rayos X suaves y en H_{α} . Este se mezcla con la atmósfera de la región de transición y continúa en su movimiento, llenando los lazos coronales que luego se expanden. En la Figura 4.8 se observa el proceso explosivo de un destello gradual o eruptivo.

Figura 4.8 Ilustra la topología magnética y el proceso explosivo durante un destello solar. Según Cliver et .al. (1986)



El gran número de nano y micro destellos es uno de los posibles mecanismos de calentamiento de la corona.

4.3.4 Eventos de Partículas Energéticas. Las partículas energéticas pueden ser aceleradas en destellos solares, en ondas de choque conducidas por eyecciones de masa coronal y en regiones de interacción entre corrientes de baja y alta velocidad en el Viento Solar (CIR). Sus fuentes son identificadas por diferentes características.

La actividad solar produce dos tipos de eventos de partículas energéticas, los impulsivos y los graduales, los impulsivos son mucho mas frecuentes (100 por año cerca del máximo solar) y duran sólo unas pocas horas, se piensa que son acelerados durante los destellos aunque actualmente los mas impulsivos se han asociado a CMEs estrechas y moderadas⁵² y han sido pobremente asociados a ondas de choque⁵³; por otro lado los eventos graduales duran varios días y se detectan aproximadamente 10 en un año en épocas de máxima actividad, son mas intensos que los impulsivos y se asocian con CME rápidas^{54,55}.

Los más intensos eventos de partículas energéticas son graduales, la aceleración de estas partículas ocurre en ondas de choques conducidas por CMEs a altas velocidades, entre 1500 y 2000 Km/s. Por otro lado, la aceleración de protones hasta energías próximas a 10 MeV frecuentemente continúa hasta 1 unidad astronómica (UA) y más allá en la mayoría de los eventos moderados, mientras que aquellos protones con energías entre 100 MeV y 1 GeV se aceleran primeramente cerca del Sol en la mayoría de los eventos, pero continúa hasta 1 UA en los más grandes eventos.

Una característica de los eventos graduales de partículas energéticas es su estructura espacial grande y compleja, que produce una gran variedad de perfiles de intensidad de partículas en el tiempo.

⁵² KHALER, S. W., D. V. REAMES, y N. R. Sheeley, Jr., Coronal Mass Ejections Associated with Impulsive Solar Energetic Particle Events, *ApJ*, 562, 558, 2001.

⁵³ YASHIRO, S., N. GOPALSWAMY, E. W. CLIVER, D. V. REAMES, M. L. KAISER y R. A. Howard, Association of Coronal Mass Ejections and Type II Radio Bursts with impulsive Solar Energetic Particle Events, *ASP Conference series*, Vol. 325, 2004.

⁵⁴ KHALER, S. W., The correlation between solar energetic particle peak intensities and speeds of coronal mass ejections: Effects of ambient particle intensities and energy spectra, *J. Geophys. Res.*, 106, 20947, 2001.

⁵⁵ GOPALSWAMY, N., S. YASHIRO, G. MICHALEK, M. L. KAISER, R. A. HOWARD, D. V. REAMES, R. LESKE, y T. von Roseninge, Interacting Coronal Mass Ejections and Solar Energetic Particles, *ApJ*, 572, L103, 2002.

5. METODO, RESULTADOS Y DISCUSION

Para realizar el presente trabajo, fueron tomados aquellos eventos protónicos, que ocurrieron en un periodo de tiempo de cuatro meses, a partir del 01 de abril de 2003 al 01 de agosto del mismo año. Estos eventos fueron capturados a través del receptor JOVE (fig. 2.8 a fig. 2.20 en el capítulo 2) y aparecen reportados como eventos de actividad solar en el sitio Web de SEC NOAA http://www.sec.noaa.gov/ftplib/indices/warehouse/2003/2003_events.tar.gz. De esta forma se trabajo con 40 registros de los 60 obtenidos por el receptor.

Los destellos solares en rayos X, reportados como asociados a los flujos protónicos y a las eyecciones de masa coronal se buscaron también en los reportes de SEC NOAA. Estos destellos son clasificados de acuerdo al flujo máximo, dado en las unidades W/m^2 , de esta forma se clasifica por las letras A, B, C, M, o X, correspondientes a las siguientes potencias (10^{-8} , 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4}) y un número que es su múltiplo, así un destello X8 tiene un flujo máximo de $8 \times 10^{-4} W/m^2$.

Fueron examinados también los registros de densidad, velocidad y temperatura del Viento Solar que se tomaron durante el periodo de estudio. Estos datos se obtuvieron de los sitios SPACEWEATHER y OMNIWEB de NASA <http://www.spaceweather.com> y <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/> que recopilan datos de parámetros de viento solar en las proximidades de la Tierra.

El método para determinar el tiempo de arribo de las eyecciones de masa coronal a la Tierra, se hace partiendo de los datos de los parámetros del viento solar, se construyen gráficos de densidad, velocidad y temperatura en función del tiempo. De los perfiles obtenidos se considera el tiempo de arribo de las eyecciones de masa coronal como el correspondiente al instante del incremento súbito de los parámetros antes mencionados, que se asume provocado por la irrupción de la onda de choque en el medio interplanetario.

En las figuras presentadas a continuación, se observa gráficos sucesivos de temperatura, velocidad y densidad de viento solar en función del tiempo medido en horas. Se distinguen por medio de una línea azul para la temperatura, una línea roja para la velocidad y de una línea verde para la densidad de viento solar.

Debe apreciarse las variaciones en los valores de velocidad, lo cual muestra, como las corrientes rápidas y lentas del viento solar se van alternando y revelan a simple vista una correlación con los datos de temperatura. Por otra parte, al observar la variación en los valores de densidad, se nota que el comportamiento de esta, es inverso al de velocidad y temperatura: cuando su valor aumenta, disminuye la densidad y viceversa.

Figura 5.1 Registro de los parámetros del Viento Solar del 01 al 05 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

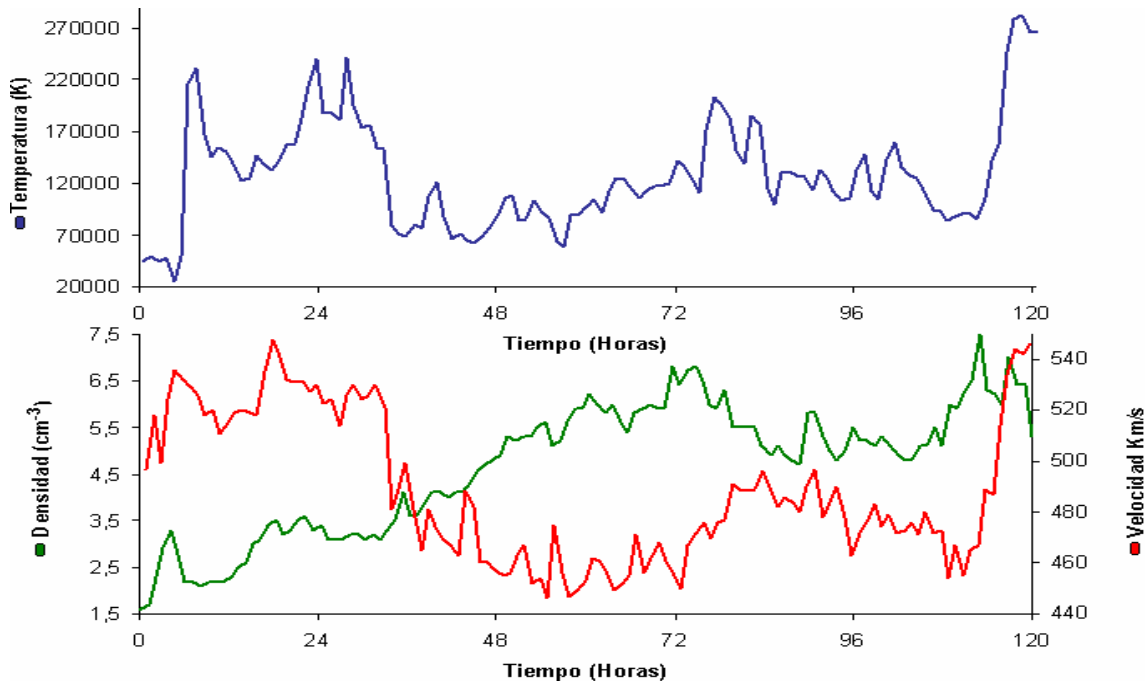


Figura 5.2 Registro de los parámetros del Viento Solar del 06 al 10 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

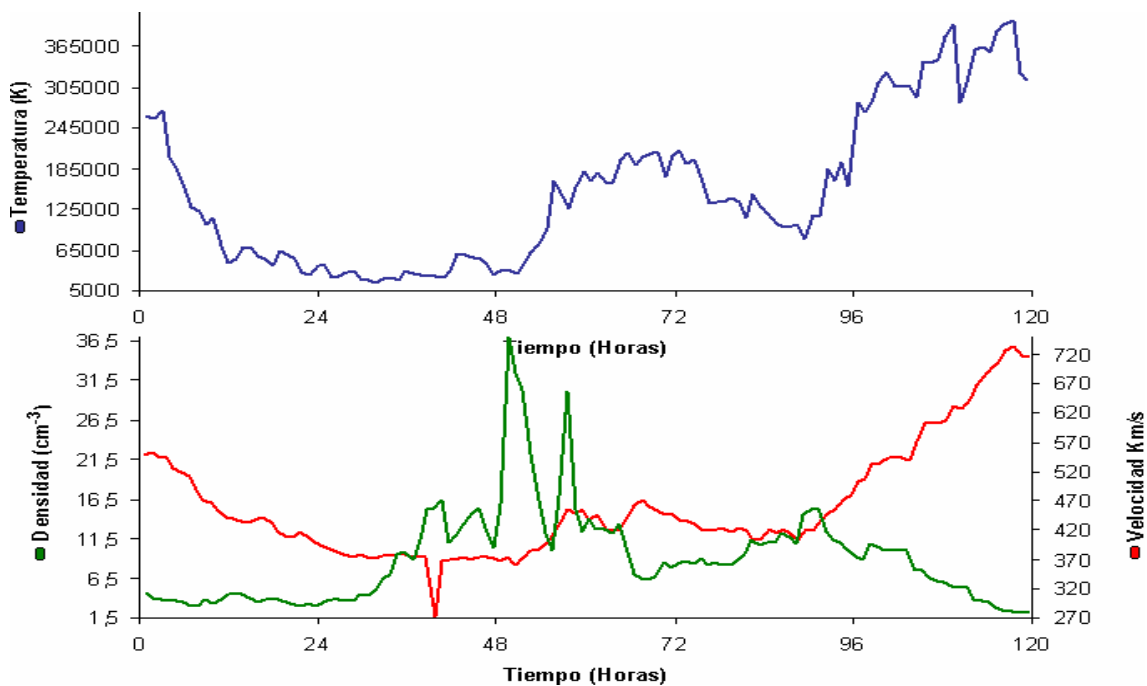


Figura 5.3 Registro de los parámetros del Viento Solar del 11 al 15 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

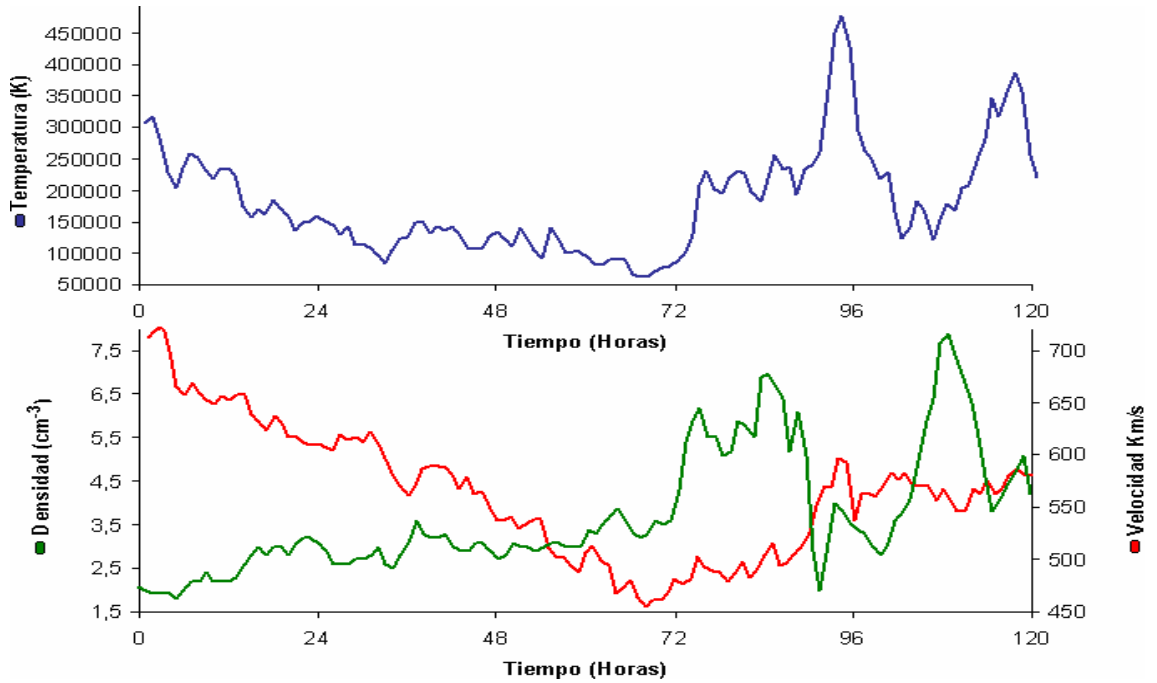


Figura 5.4 Registro de los parámetros del Viento Solar del 16 al 20 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

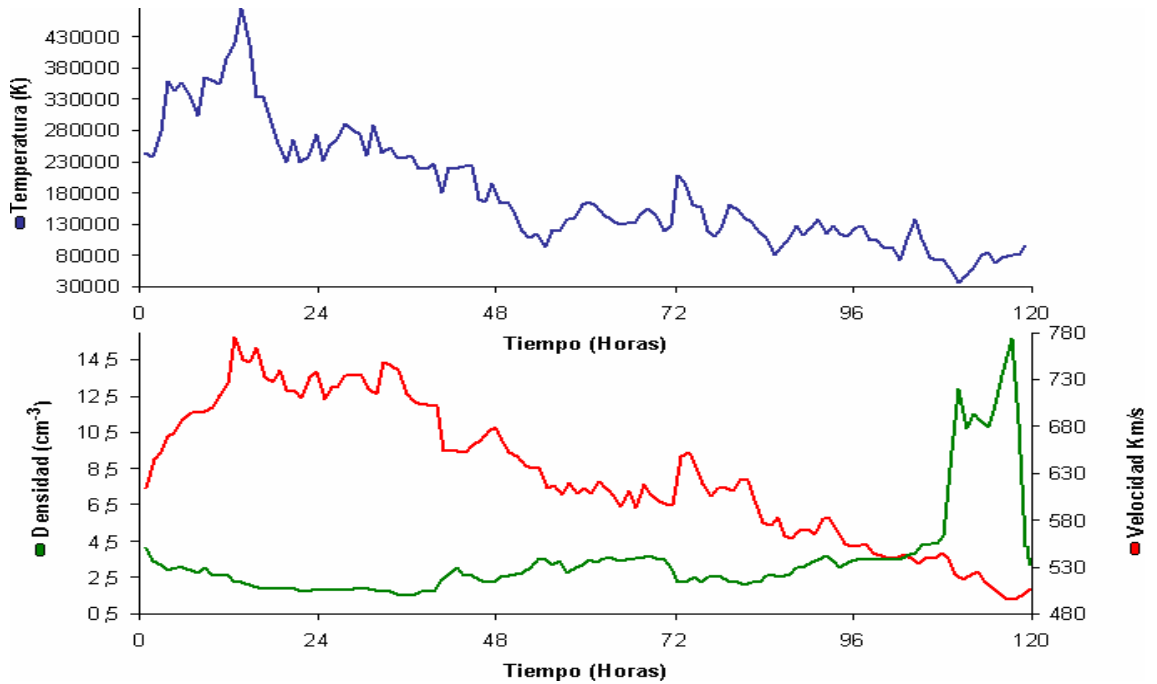


Figura 5.5 Registro de los parámetros del Viento Solar del 21 al 25 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

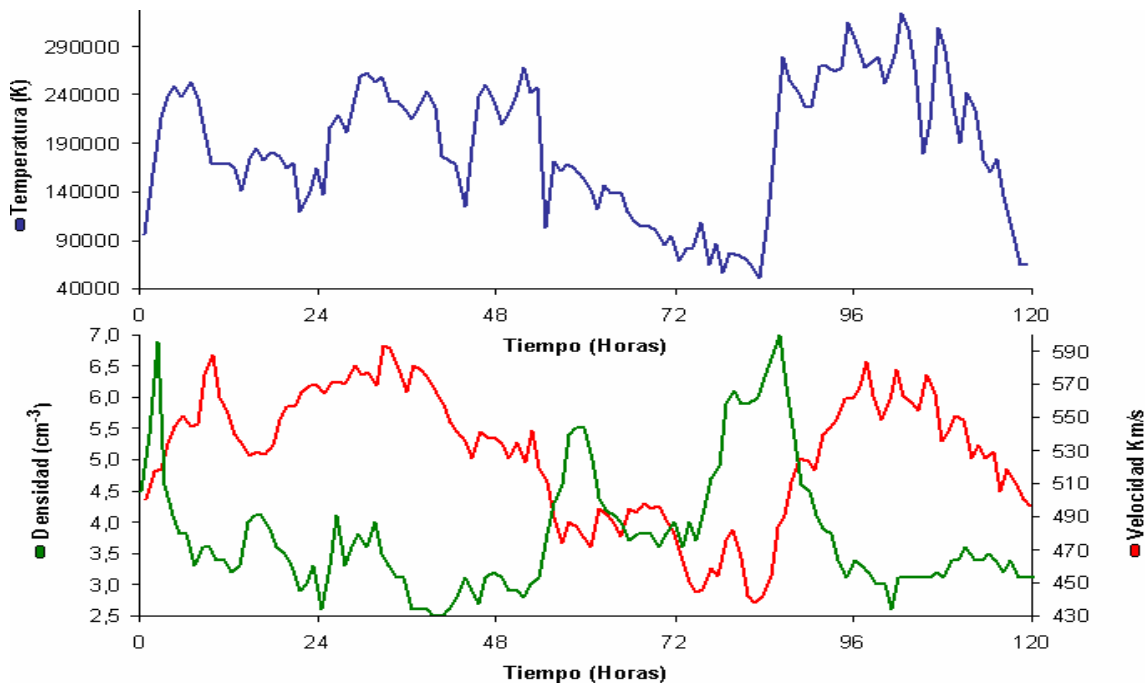


Figura 5.6 Registro de los parámetros del Viento Solar del 26 al 30 de abril del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

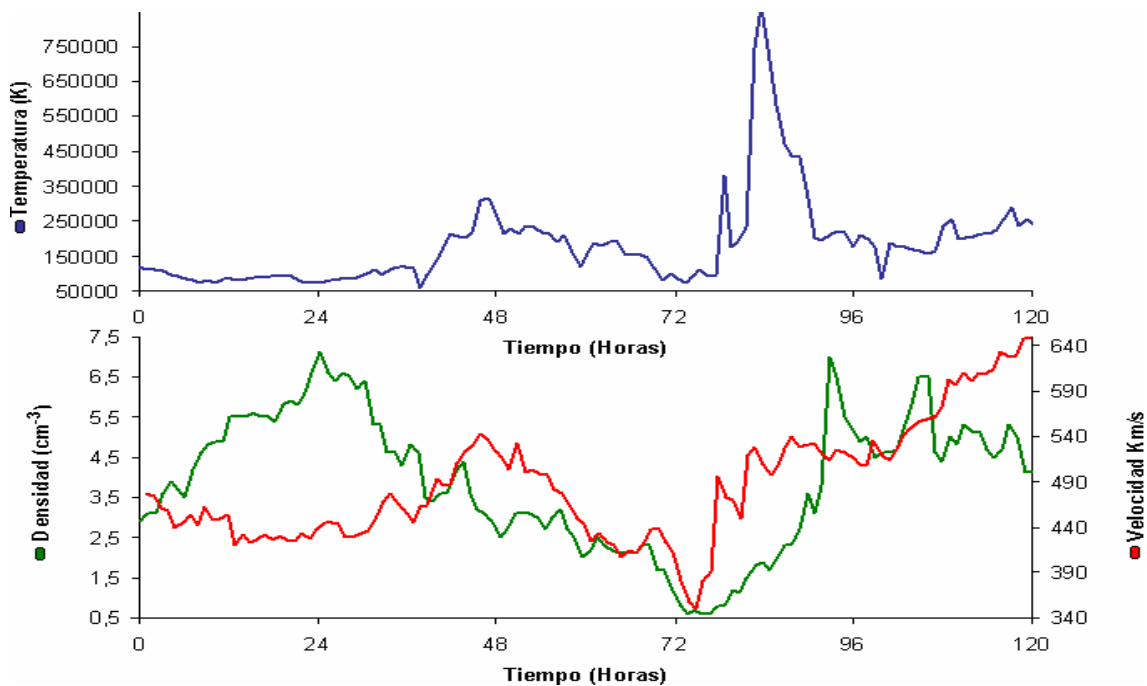


Figura 5.7 Registro de los parámetros del Viento Solar del 01 al 05 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

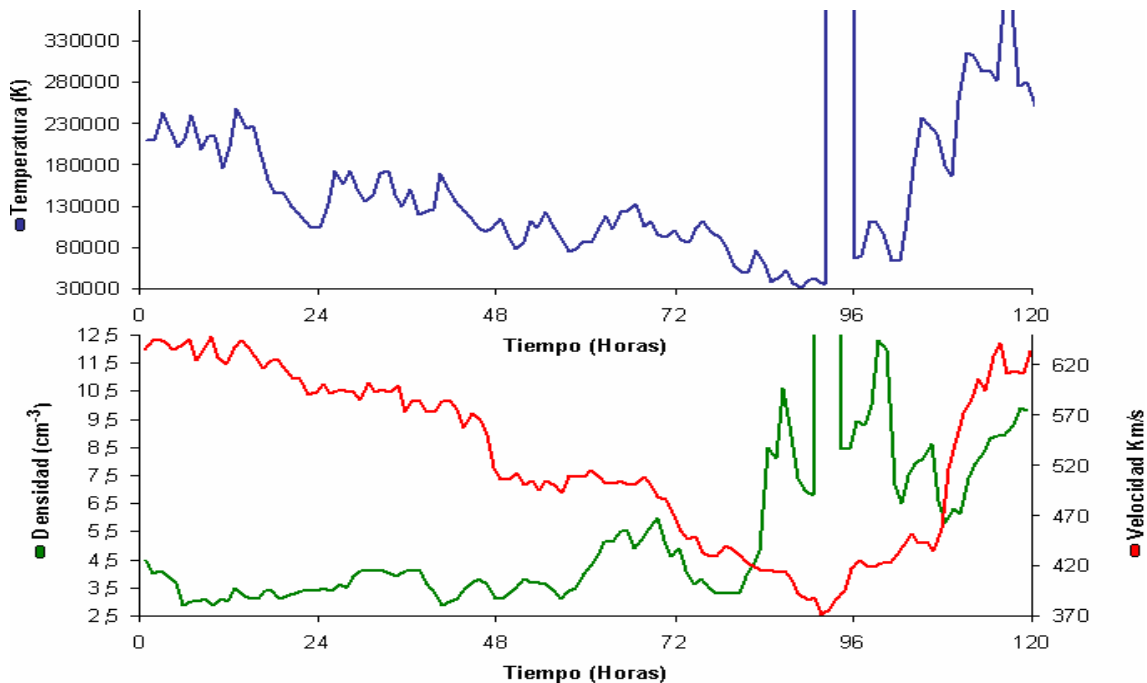


Figura 5.8 Registro de los parámetros del Viento Solar del 06 al 10 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

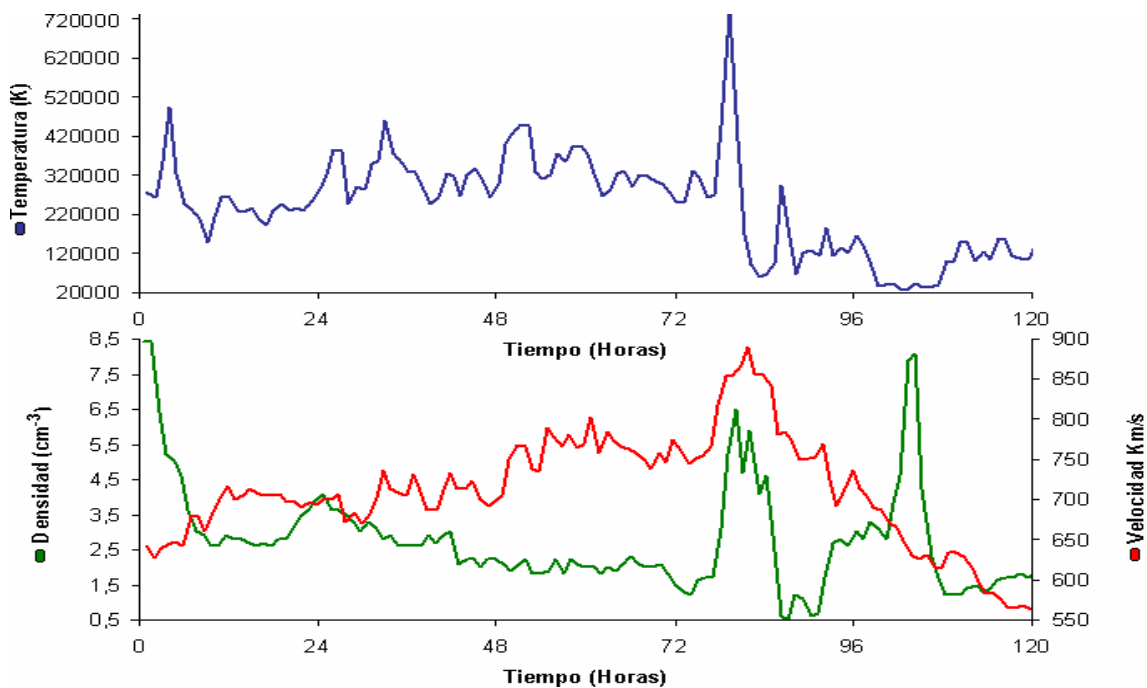


Figura 5.9 Registro de los parámetros del Viento Solar del 11 al 15 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

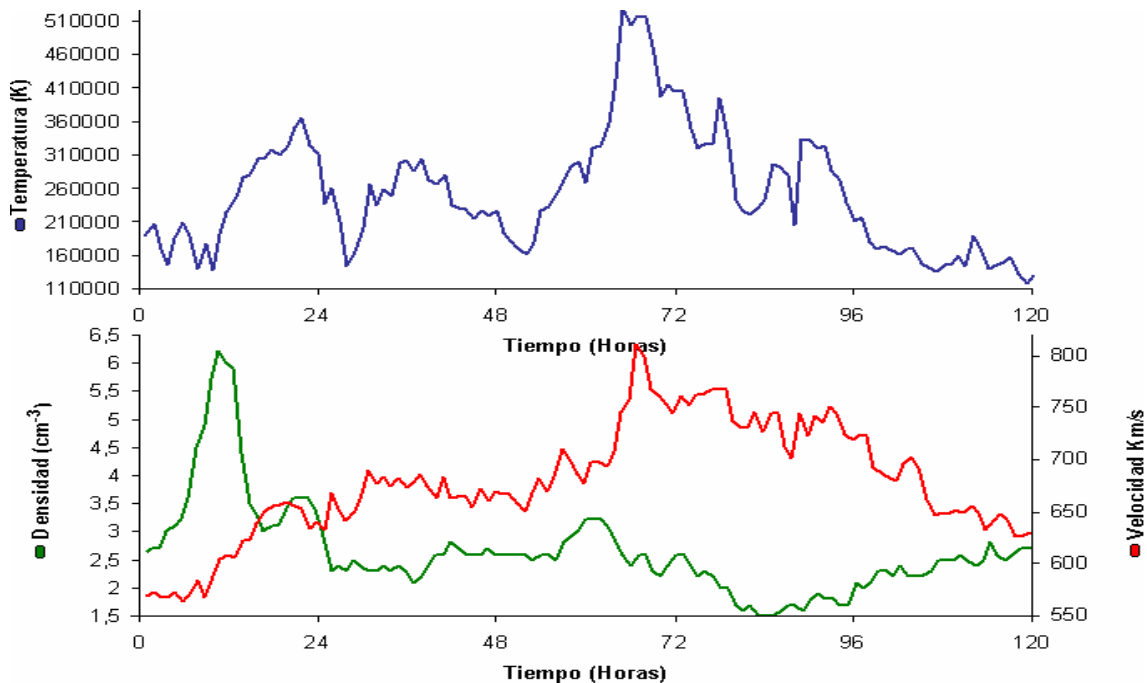


Figura 5.10 Registro de los parámetros del Viento Solar del 16 al 20 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

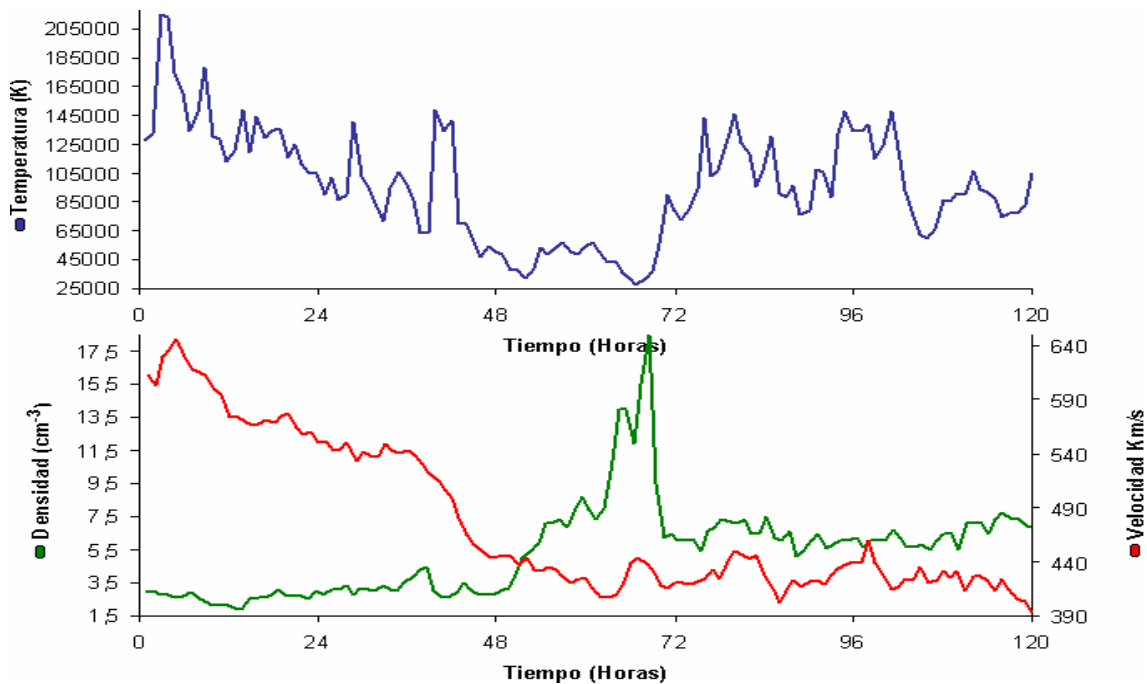


Figura 5.11 Registro de los parámetros del Viento Solar del 21 al 25 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

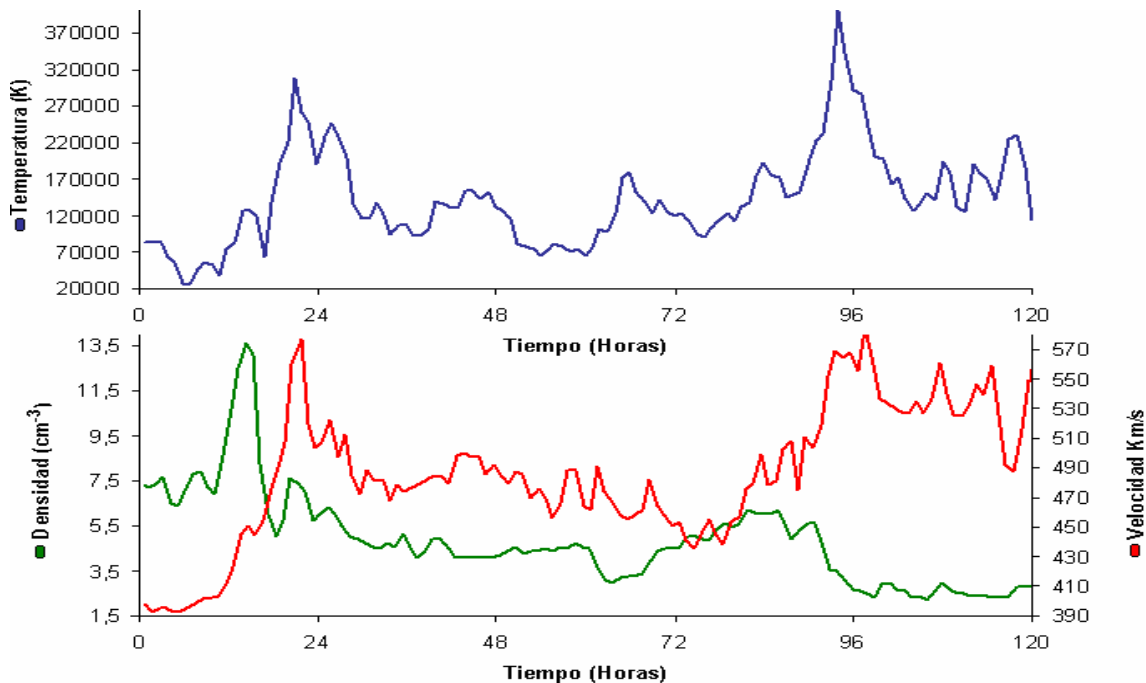


Figura 5.12 Registro de los parámetros del Viento Solar del 26 al 31 de mayo del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

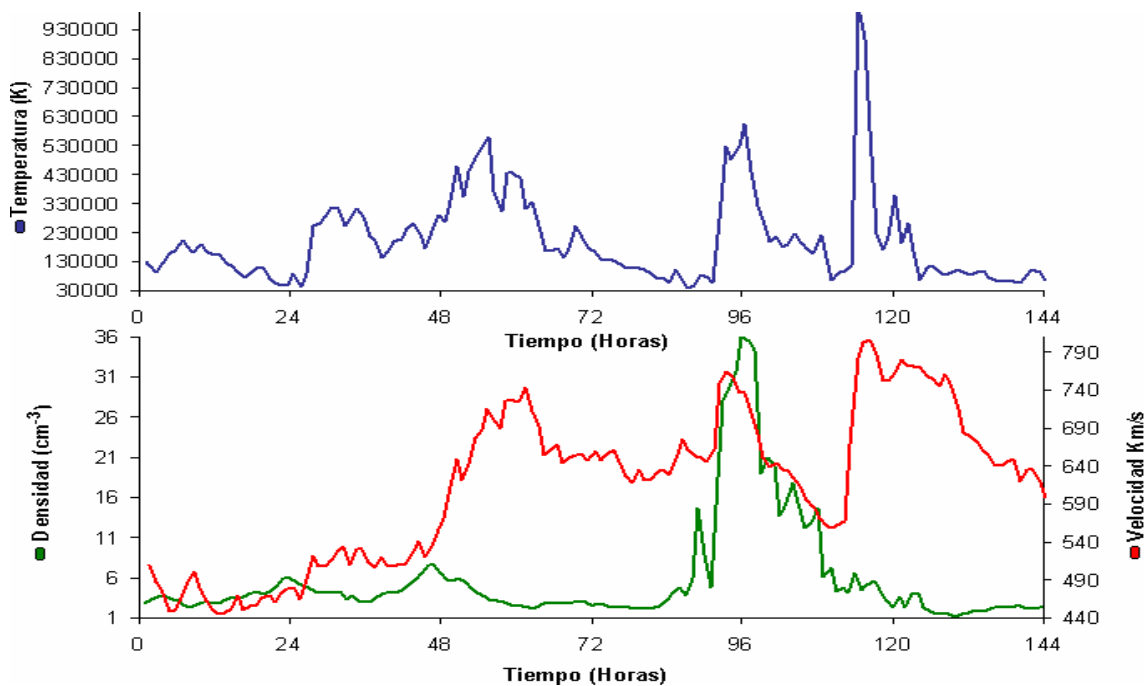


Figura 5.13 Registro de los parámetros del Viento Solar del 01 al 05 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

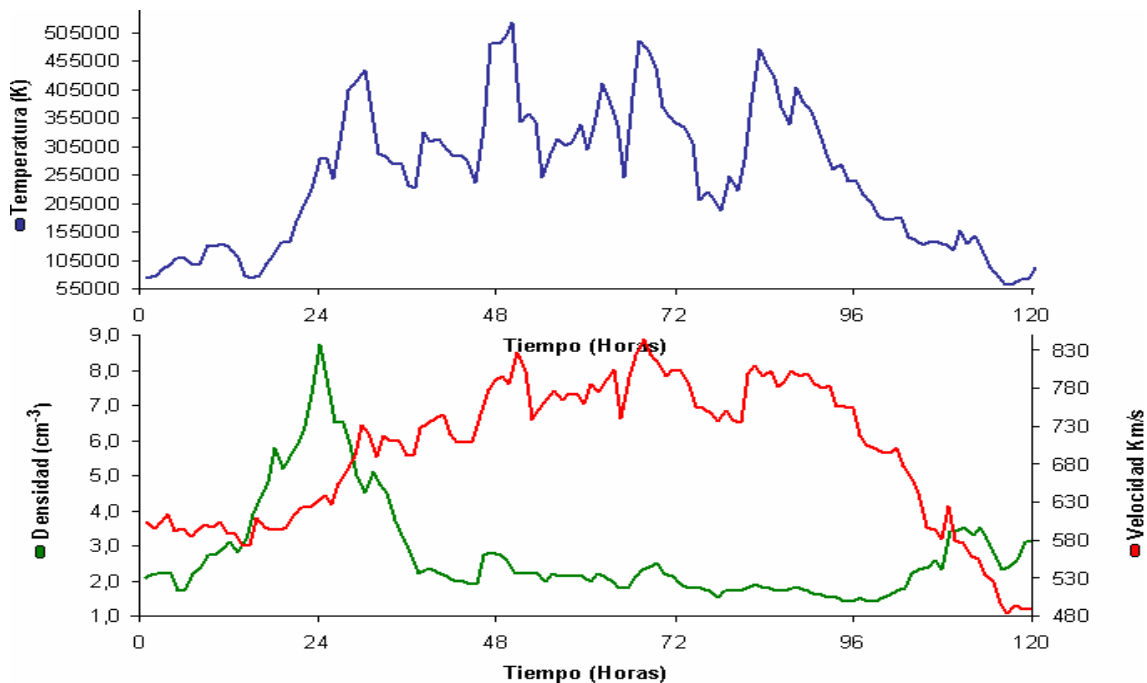


Figura 5.14 Registro de los parámetros del Viento Solar del 06 al 10 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

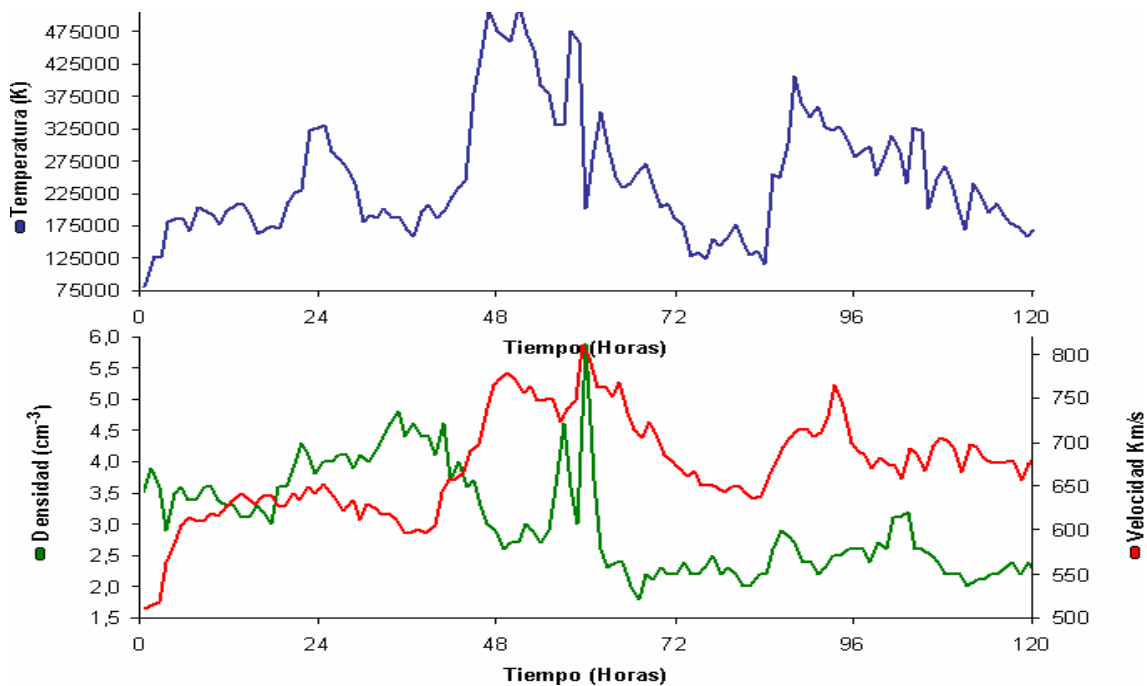


Figura 5.15 Registro de los parámetros del Viento Solar del 11 al 15 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

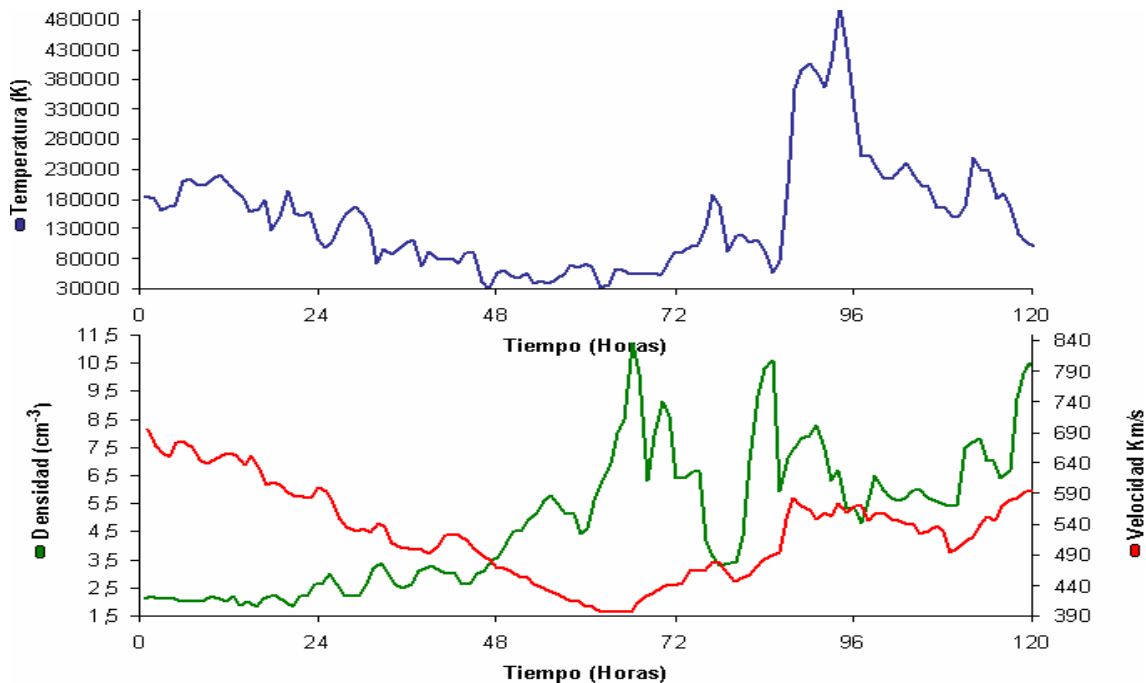


Figura 5.16 Registro de los parámetros del Viento Solar del 16 al 20 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

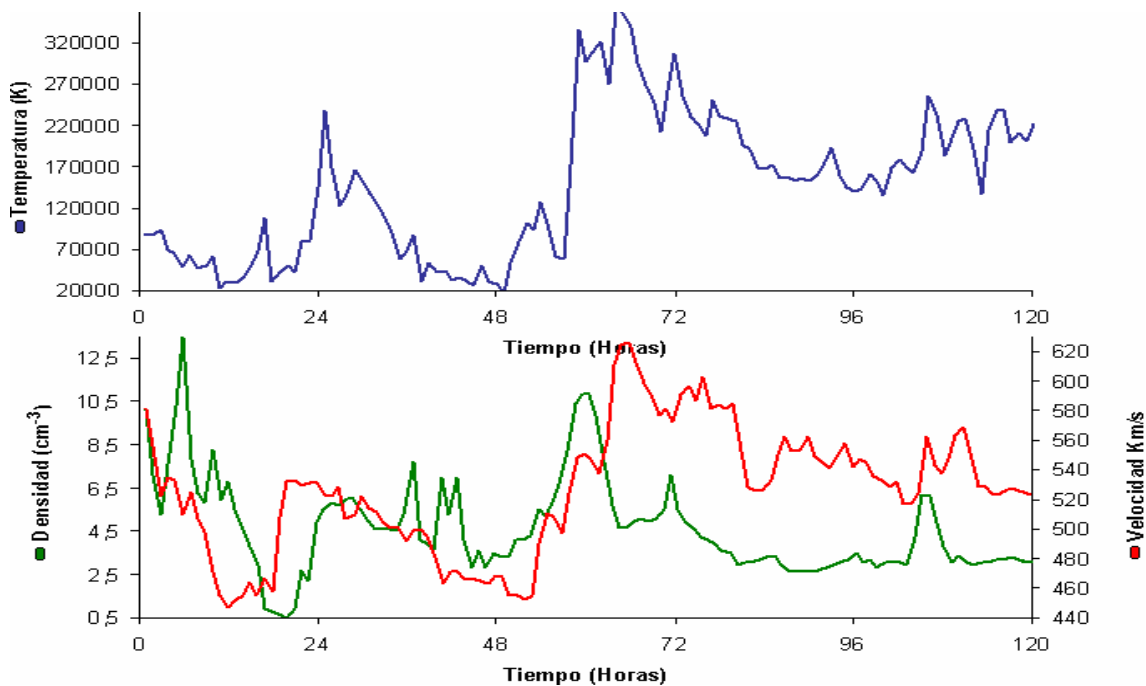


Figura 5.17 Registro de los parámetros del Viento Solar del 21 al 25 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

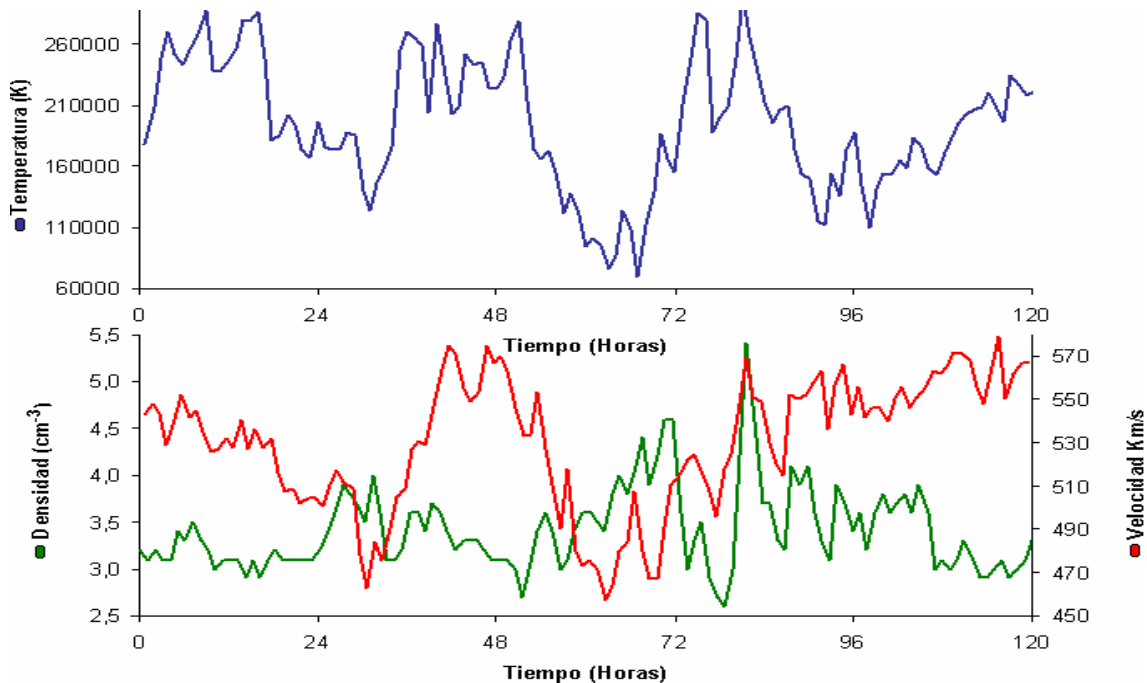


Figura 5.18 Registro de los parámetros del Viento Solar del 26 al 30 de junio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

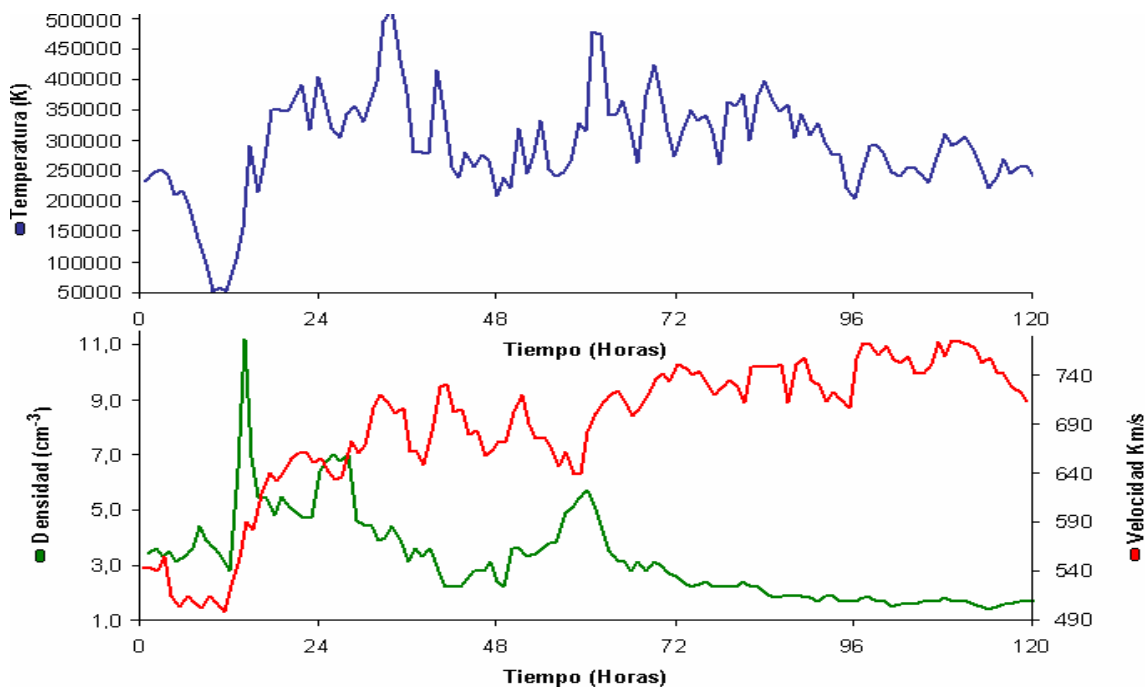


Figura 5.19 Registro de los parámetros del Viento Solar del 01 al 05 de julio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

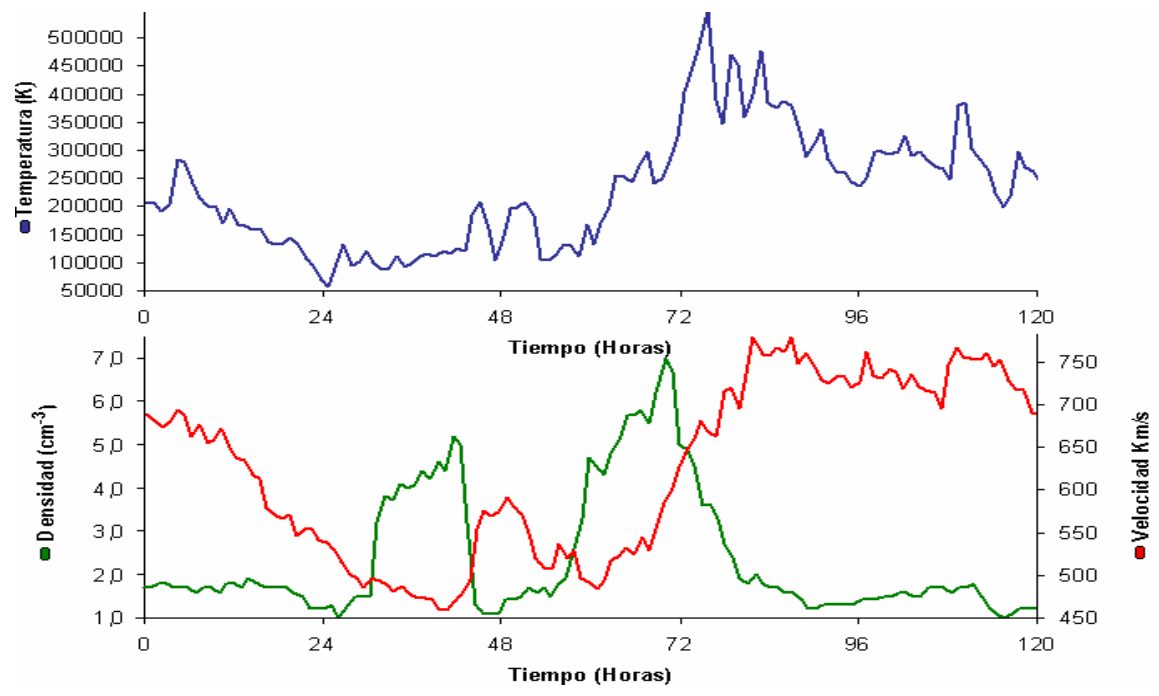


Figura 5.20 Registro de los parámetros del Viento Solar del 05 al 10 de julio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

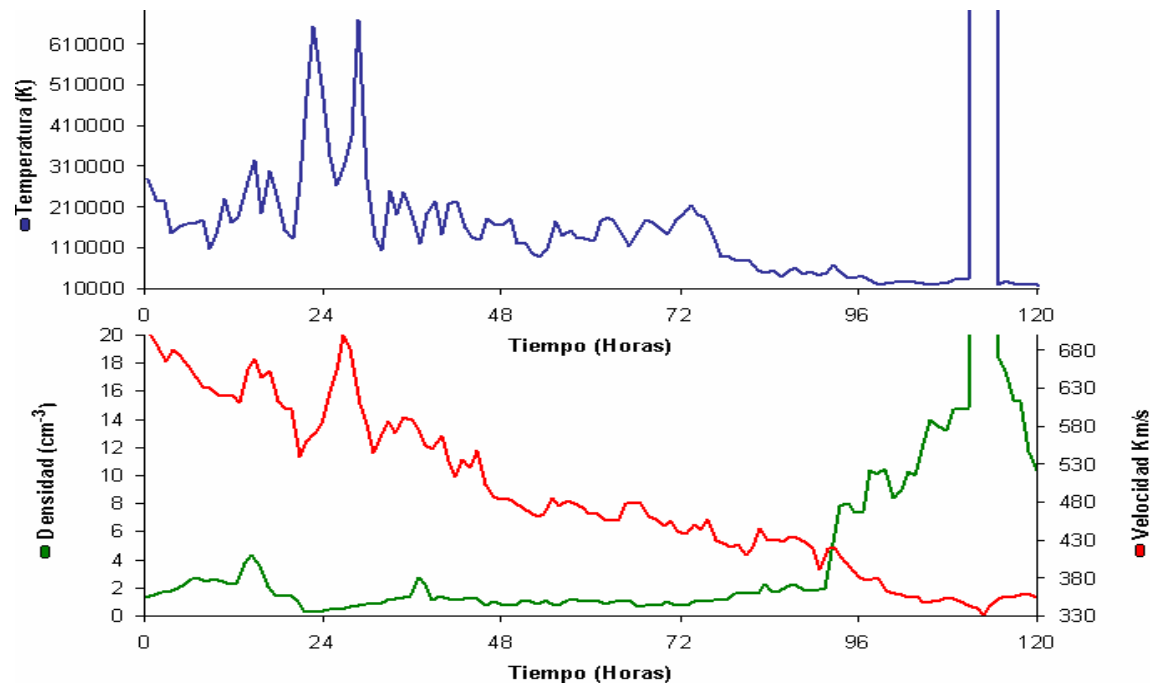


Figura 5.21 Registro de los parámetros del Viento Solar del 11 al 15 de julio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

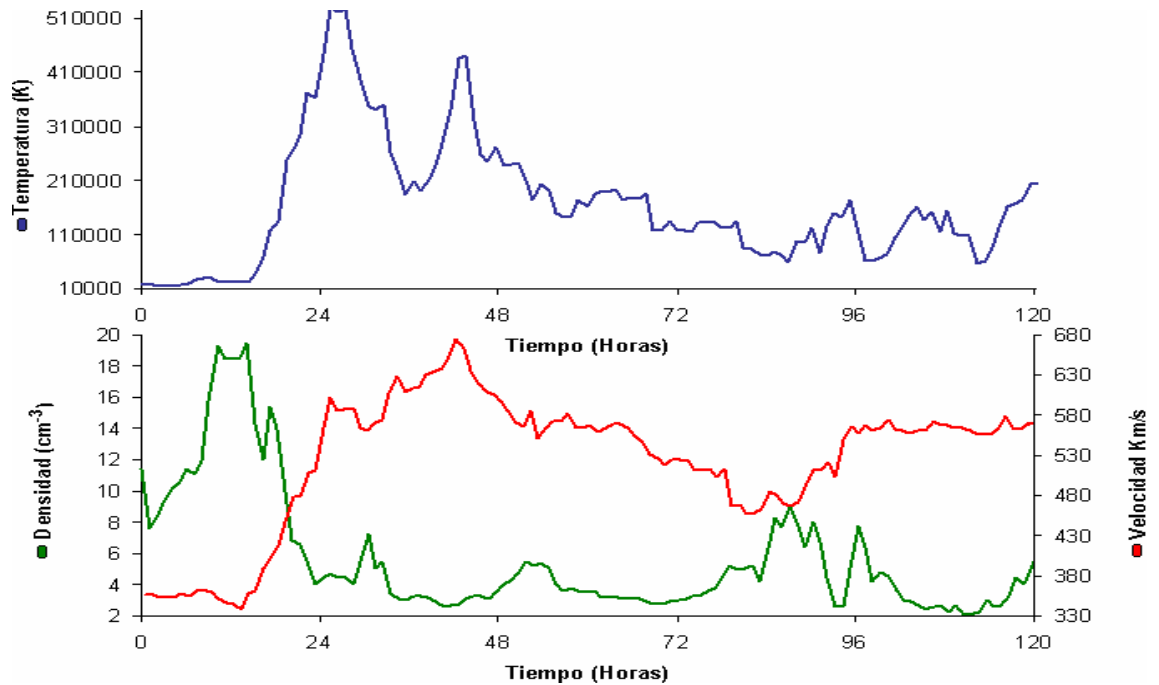


Figura 5.22 Registro de los parámetros del Viento Solar del 16 al 20 de julio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

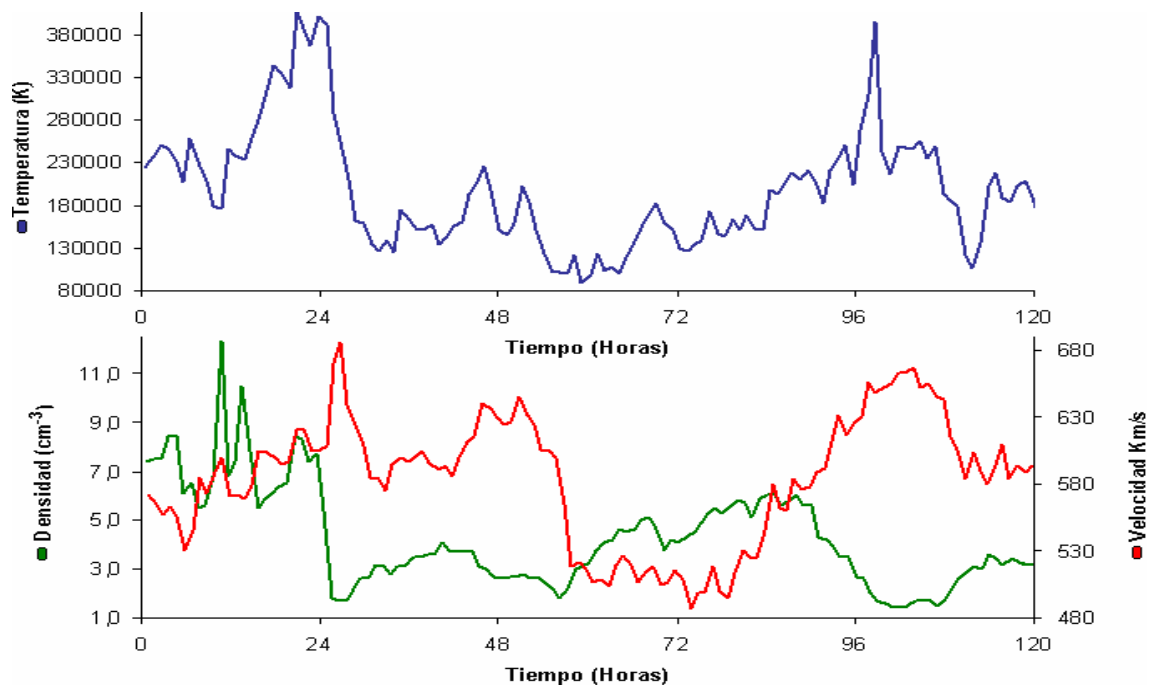


Figura 5.23 Registro de los parámetros del Viento Solar del 21 al 25 de julio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.

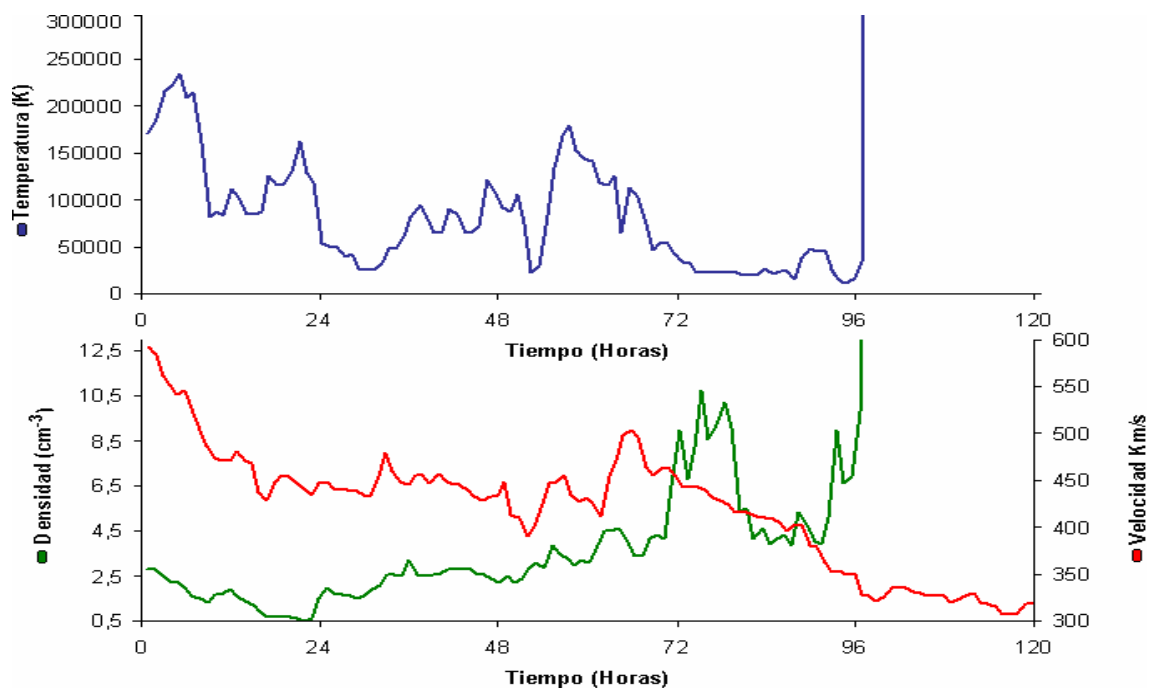
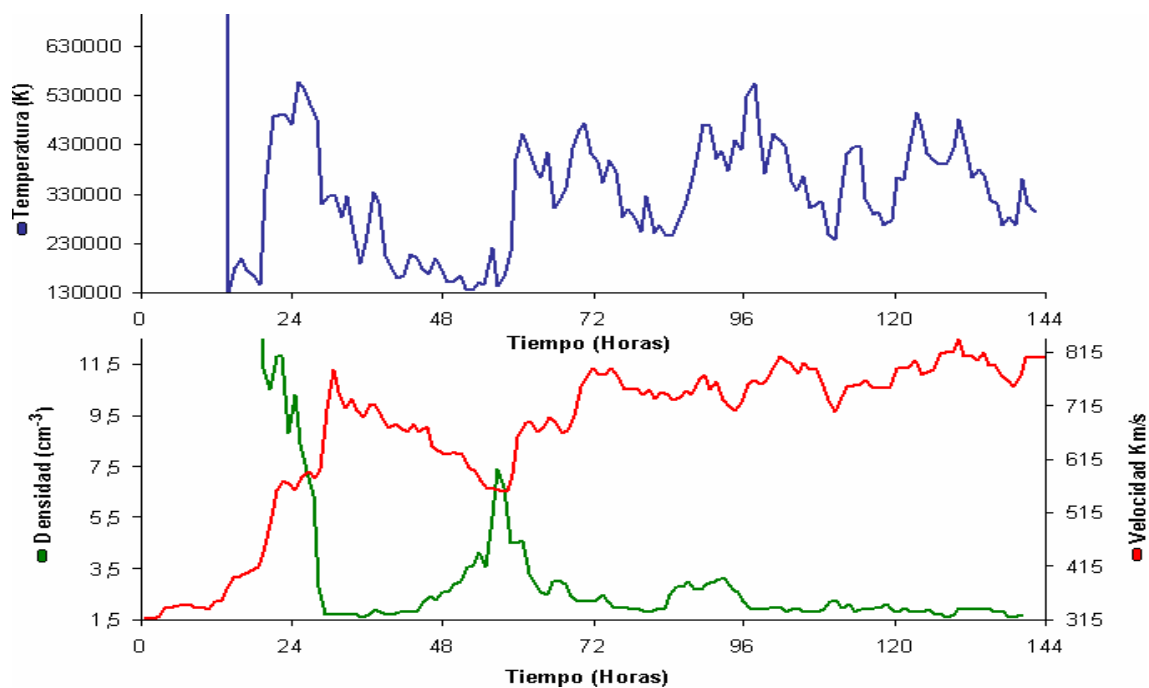


Figura 5.24 Registro de los parámetros del Viento Solar del 26 al 31 de julio del 2003. Temperatura, densidad y velocidad en función del tiempo.



De los 40 casos estudiados, se puede concluir que no existe una clara determinación del arribo de eyecciones de masa coronal en las observaciones del Viento Solar, debido a que el tipo de destellos en rayos X que es capaz de captar el receptor JOVE es del tipo C, y son destellos relativamente pequeños. Por tal motivo, se estudia casos particulares de eyecciones de masa coronal tipo halo, que son extremadamente grandes y producen una onda de choque capaz de incrementar súbitamente los parámetros de viento solar.

5.1 CASOS PARTICULARES DE EYECCIONES DE MASA CORONAL TIPO HALO

Las eyecciones de masa coronal tipo halo son eventos de actividad solar escasos, existe una complejidad que implica establecer asociaciones entre tales eventos, por lo que deben ser analizados cada caso en particular y así dejar demostrado que existe una estrecha relación entre las eyecciones de masa coronal y los parámetros de viento solar. Para ello, se hace una descripción de todos aquellos eventos que ocurrieron en el año 2003.

Este tipo de acontecimientos fueron observados detalladamente y seguidos hasta el final, desde su salida del Sol hasta su llegada a las inmediaciones de la Tierra y más allá por una flota de la nave espacial, incluyendo SOHO, RASTRO, AS, el VIENTO, y SMEI. La nave espacial situada más allá de 1 UA, incluyendo Ulises, Cassini y el Voyagers, también detectaron los choques de estas erupciones que dan por resultado enormes tormentas geomagnéticas, apagones de radio, auroras boreales intensas.

5.1.1 Eyección de masa coronal del 28 de mayo del 2003. Es un caso particular que ocurrió el 28 de mayo del 2003 a las 00:50 UT con una aceleración inicial de $25,9 \text{ m/s}^2$ y una velocidad de 1414 Km/s a $20 R_{\odot}$ desde el Sol. Este valor está por encima de las velocidades promedio de 957 Km/s para eyecciones de masa coronal tipo halo⁵⁶, fue asociado a un gran destello X3/2B.

La eyección de masa coronal ocurrida este día, fue relacionada también con explosiones en ondas de radio en todas las frecuencias y con explosiones tipo II espectral, lo cual indica que estuvo precedida por una onda de choque.

⁵⁶ Gopalswamy, N., S. Yashiro, M. L. Kaiser, R. A. Howard, y J.-L. Bougeret, Characteristics of coronal mass ejections associated with long wavelength type II radio bursts, *J.Geophys. Res.*, 106, 29219, 2001.

Figura 5.25 Imagen de la eyección de masa coronal del 28 de mayo del 2003, captada por el cronógrafo LASCO a bordo del satélite SOHO, la flecha indica la región activa S07W17 (mancha 365) fuente del destello y de la eyección de masa coronal.

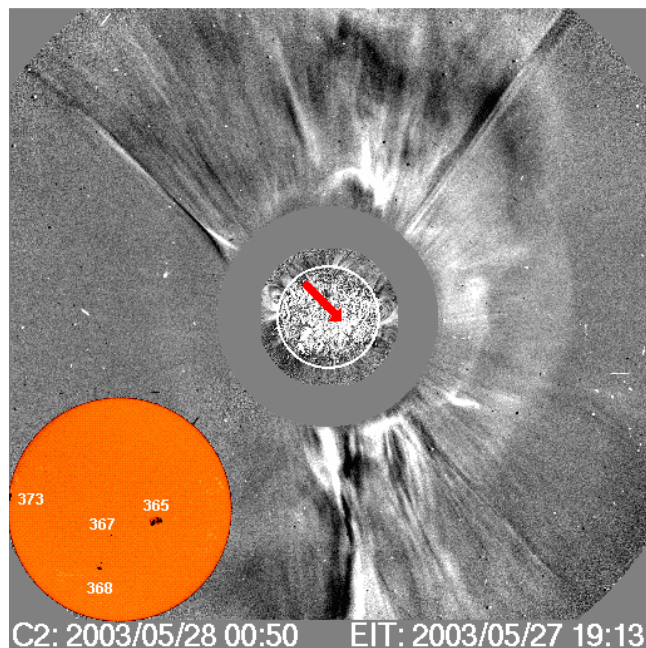
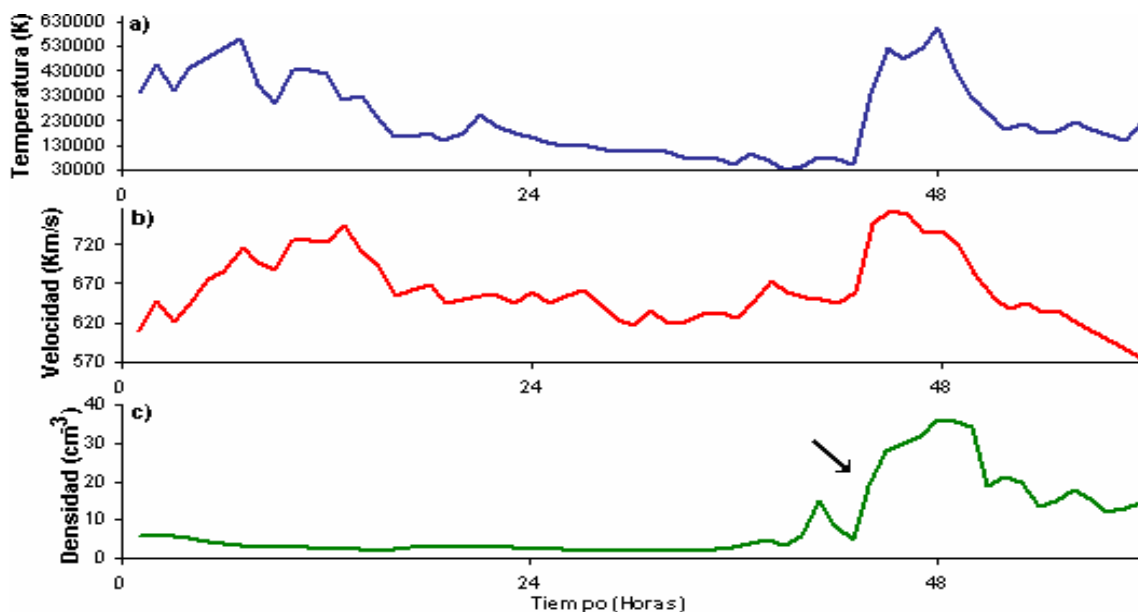


Figura 5.26 Registro de los parámetros del Viento Solar del 28 al 30 de mayo del 2003. a) Temperatura en función del tiempo. b) velocidad en función del tiempo y c) densidad en función del tiempo. La flecha indica el incremento de densidad luego de ocurrida la eyección de masa coronal.



5.1.2 Eyección de masa coronal del 17 de junio del 2003. Es un caso particular que ocurrió el 17 de junio del 2003 a las 23:18:14 UT con una aceleración inicial de $-2,9 \text{ m/s}^2$ y una velocidad de 1811 Km/s a $20 R_{\odot}$ desde el Sol. Este valor está por encima de las velocidades promedio de 957 Km/s para eyecciones de masa coronal tipo halo, fue asociado a un gran destello M6,8.

Esta eyección de masa coronal fue relacionada también a explosiones en ondas de radio en todas las frecuencias y a explosiones tipo I espectral, lo cual indica que estuvo precedida por una onda de choque.

En el presente caso, se liberó gran cantidad de energía en la atmósfera del Sol, sin embargo, los valores de velocidad, temperatura y densidad registrados posteriormente en las inmediaciones de la Tierra durante su arribo, no fueron de gran magnitud como pudiera esperarse.

Figura 5.27 Imagen de la eyección de masa coronal del 17 de junio del 2003, captada por el cronógrafo LASCO a bordo del satélite SOHO, la flecha indica la región activa S08E61 (mancha 386) fuente del destello y de la eyección de masa coronal.

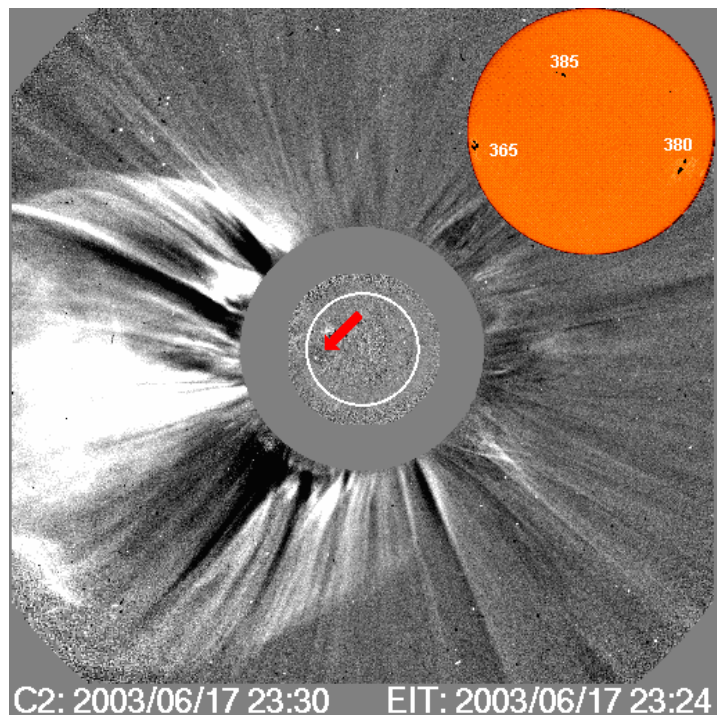
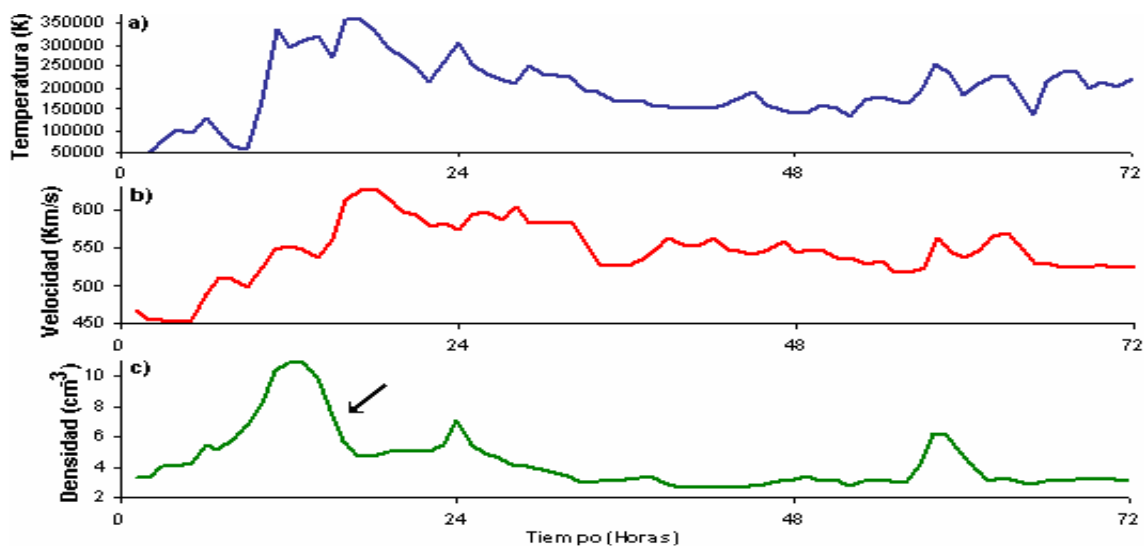


Figura 5.28 Registro de los parámetros del Viento Solar del 18 al 20 de junio del 2003. a) Temperatura en función del tiempo. b) velocidad en función del tiempo y c) densidad en función del tiempo. La flecha indica el incremento de densidad luego de ocurrida la eyección de masa coronal.

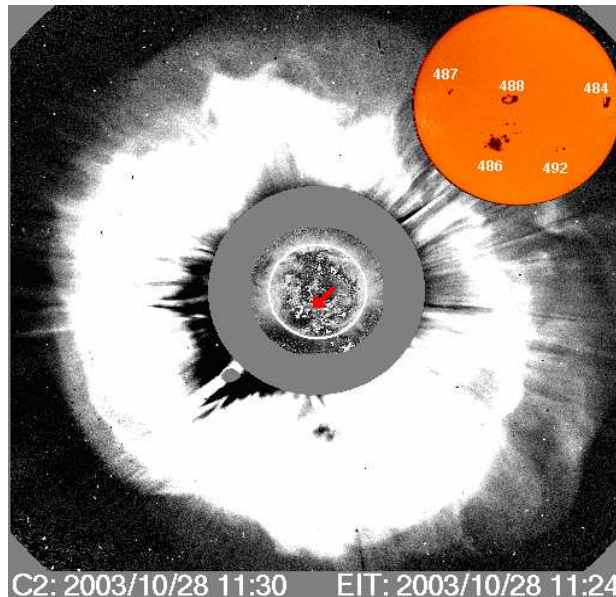


El Sol desencadenó una serie espectacular de erupciones durante los meses de octubre y noviembre de 2003, incluyendo la llamarada de mayor alcance de la radiografía y algo de las eyecciones totales coronales más energéticas registradas siempre. Tres regiones activas solares produjeron eyecciones de masa coronal, llamaradas, partículas energías y choques interplanetarios de intensidad sin precedente.

5.1.3 Eyección de masa coronal del 28 de octubre del 2003. La eyección de masa coronal ocurrida el 28 de octubre del 2003 a las 11:30 UT fue una de las señales luminosas más poderosas en años, su erupción fue causada por la mancha gigante 486. Cuando dejó el sol, la nube estaba viajando con una aceleración inicial de $-105,2 \text{ m/s}^2$ y una velocidad de 2268 Km/s a $20 R_{\odot}$ desde el Sol. Este valor esta por encima de las velocidades promedio para eyecciones de masa coronal tipo halo, fue asociado a un gran destello X17/4B. Tres regiones activas solares produjeron eyecciones de masa coronal, partículas con energías y choques interplanetarios de intensidad sin precedente sobre un período de dos semanas. Estos acontecimientos fueron observados detalladamente y seguidos hasta el final desde el Sol a la Tierra y más allá por una flota de la nave espacial incluyen do SOHO.

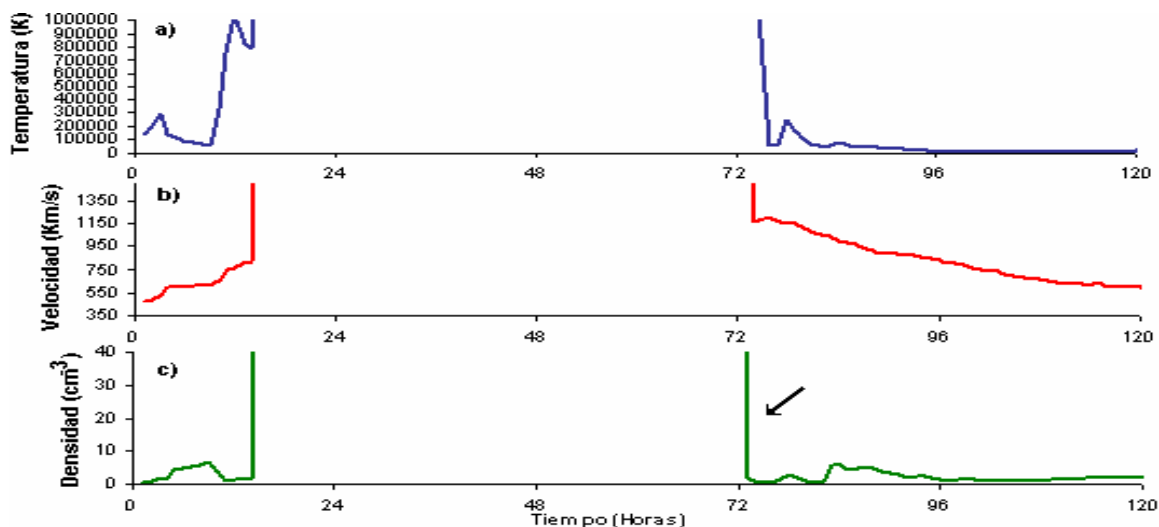
Esta eyección de masa coronal llegó a la Tierra en menos que un día, dando por resultado enormes tormentas geomagnéticas, apagones de radio, e intensas auroras que fueron observadas como lejos al sur de Florida en las noches del 29 y 30 de octubre. Estas erupciones proporcionan una oportunidad importante de entender los orígenes de la actividad solar extrema de la respuesta de la magnetosfera y de la atmósfera superior de la Tierra a esta actividad y del impacto en sistemas tecnológicos en la Tierra y en espacio

Figura 5.29 Imagen de la eyección de masa coronal del 28 de octubre del 2003, captada por el cronógrafo LASCO a bordo del satélite SOHO, la flecha indica la región activa S16E08 (mancha 486) fuente del destello y de la eyección de masa coronal.



La imagen LASCO C2 demuestra un halo rápido CME. Las motas brillantes en la imagen C2 son causadas por las partículas con energías que pulsan la cámara fotográfica durante la exposición. La localización y el tamaño del Sol son indicados por el círculo blanco, y el círculo llenado que rodea el Sol es la porción de la imagen que es bloqueada por la máscara ocultadora del coronógrafo.

Figura 5.30 Registro de los parámetros del Viento Solar del 28 de octubre al 01 de noviembre del 2003.



En la gráfica se observa que el evento de actividad solar saturó los sensores en rayos X de los satélites GOES durante un tiempo. Esto concuerda con que las altas velocidades de las eyecciones de masa coronal se asocian a grandes destellos en rayos X y en H_{α} .

5.1.4 Eyección de masa coronal del 04 de noviembre del 2003. El Sol arrojó una sucesión de erupciones durante el mes de noviembre de 2003, incluyendo la llamarada de mayor alcance en los registros de rayos X y eyecciones totales coronales con más energía registradas siempre. Cuando dejó el sol, la nube estaba viajando con una aceleración inicial de $434,8 \text{ m/s}^2$ y una velocidad de 3731 Km/s a $20 R_{\odot}$ desde el Sol. Este valor esta por encima de las velocidades promedio para eyecciones de masa coronal tipo halo, fue asociado a un gran destello X28/3B. Esta eyección fue relacionada a explosiones en ondas de radio en todas las frecuencias y a explosiones tipo IV y tipo II espectral, lo cual indica que estuvo precedida por una onda de choque.

Figura 5.31 Imagen de la eyección de masa coronal del 04 de noviembre del 2003, captada por el cronógrafo LASCO a bordo del satélite SOHO, la flecha indica la región activa S19W83 (mancha 486) fuente del destello y de la eyección de masa coronal.

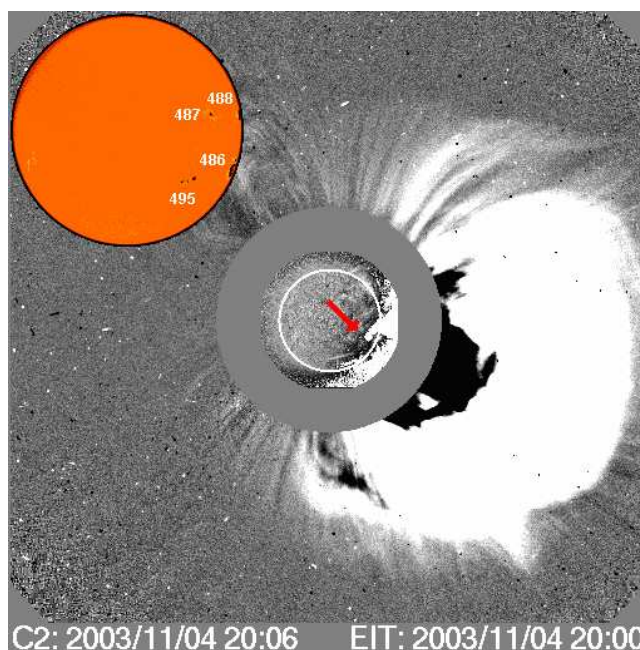
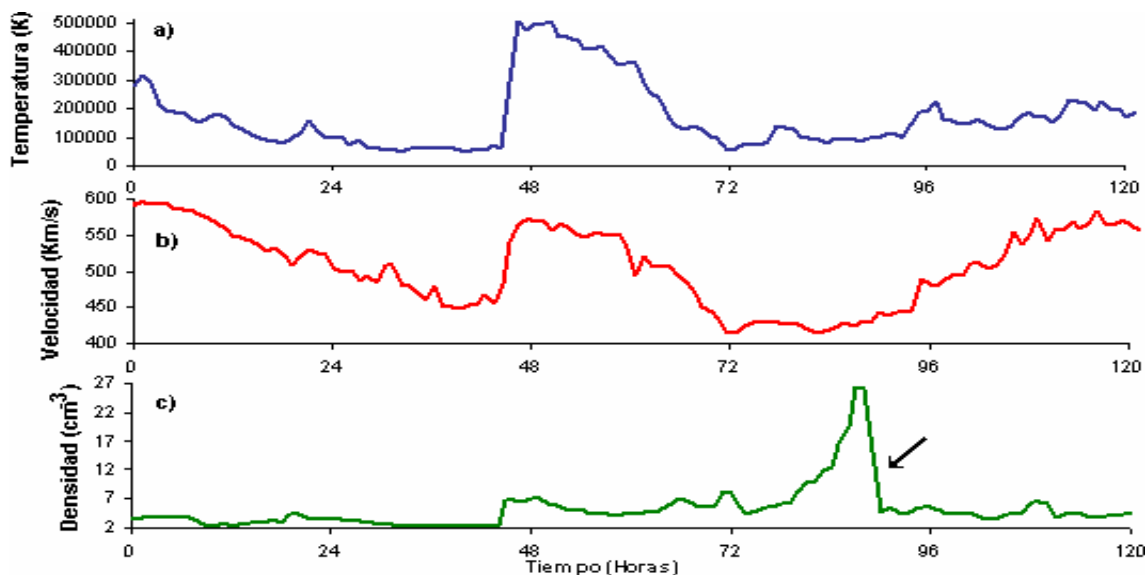


Figura 5.32 Registro de los parámetros del Viento Solar del 05 al 09 de noviembre del 2003. a) Temperatura en función del tiempo. b) velocidad en función del tiempo y c) densidad en función del tiempo. La flecha indica el incremento de densidad luego de ocurrida la eyección de masa coronal.



Con el arribo de la onda de choque del 6 de noviembre del 2003 a las inmediaciones de la Tierra, se produjo un incremento súbito del campo magnético hasta 31 nT aproximadamente.

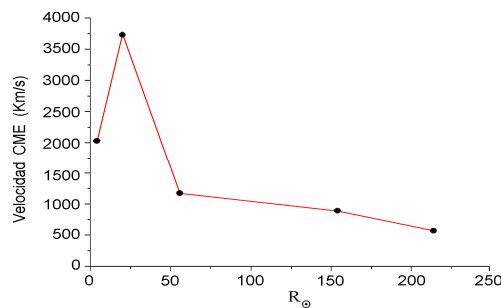
Esta perturbación formó parte de un periodo mayor de actividad que comenzó el 3 de noviembre, seguida un día después por la onda de choque asociada a la eyección de masa coronal del 2 de noviembre, relacionada esta última con el destello X8/2B. La llegada de dicha perturbación hasta las inmediaciones de la Tierra provocó un brusco incremento del campo magnético hasta valores de 72 nT. Entre los días 5 y 6 la actividad varió de tranquila a inestable, como puede observarse también en los parámetros del Viento Solar (Figura 5.32). En este entorno se desarrolla la tormenta geomagnética del 6 de noviembre asociada a la eyección de masa coronal referida.

Como particularidad es de notar la forma irregular en que se comportan la densidad y la velocidad respectivamente en las inmediaciones de la Tierra, donde se muestra un máximo principal de densidad el 8 de noviembre, aproximadamente un día después del arribo de esta eyección de masa coronal antecedido por una disminución en la velocidad (Figura 5.32).

Se asume que la alta densidad no fue provocada por eyección de masa coronal alguna, de acuerdo con la baja actividad solar reportada entre los días 6 y 9 de noviembre al quedar ocultas las regiones activas principales, luego de tres semanas de intensa actividad. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la región de interacción corrotante, observada hacia finales del día 8 de noviembre y

reportada por “Space Weather Alerts”, probablemente influyó en la alta densidad alcanzada. La región de interacción corrotante fue observada durante la reaparición de un hueco coronal asociado con el incremento gradual de la velocidad del Viento Solar a partir del día 9, acompañado de un aumento de la actividad geomagnética.

Figura 5.33 Con información del LASCO y los datos de centelleo interplanetario, se puede apreciar que esta CME fue notablemente acelerada desde su salida de la Corona hasta unos 20 R_{\odot} y después es bruscamente desacelerada aproximadamente entre los 20 y los 50 R_{\odot} de distancia desde el Sol.



Otro de los objetivos de este trabajo es investigar la posible correlación entre el número de manchas solares y los parámetros de viento solar. Para ello, fueron examinados los cuadros 1, 2, 3 y 4 de este trabajo, en donde se reporta el número de manchas y el índice de Wolf para cada hemisferio del Sol. Teniendo en cuenta estos datos y los registros de densidad, velocidad y temperatura de viento solar, se hace el análisis estadístico en el programa Excel para determinar si existe una correlación lineal entre estos.

Figura 5.34 Temperatura medida en el viento solar en función del número de manchas solares, para el periodo comprendido entre el 01 de abril y 31 de Julio de 2003.

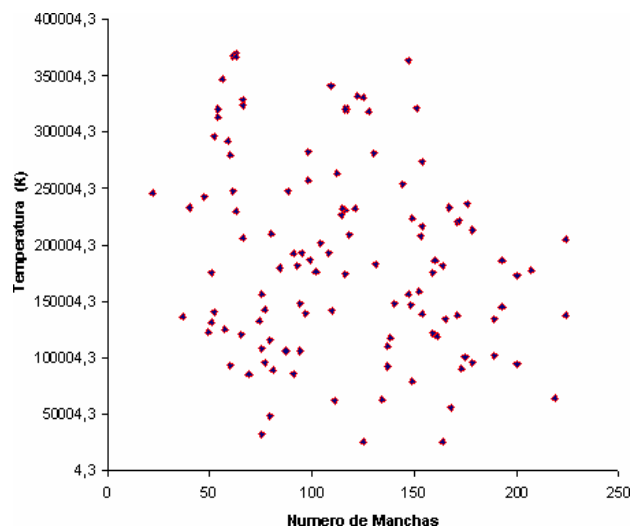


Figura 5.35 Densidad medida en el viento solar en función del número de manchas solares, para el periodo comprendido entre el 01 de abril y 31 de Julio de 2003.

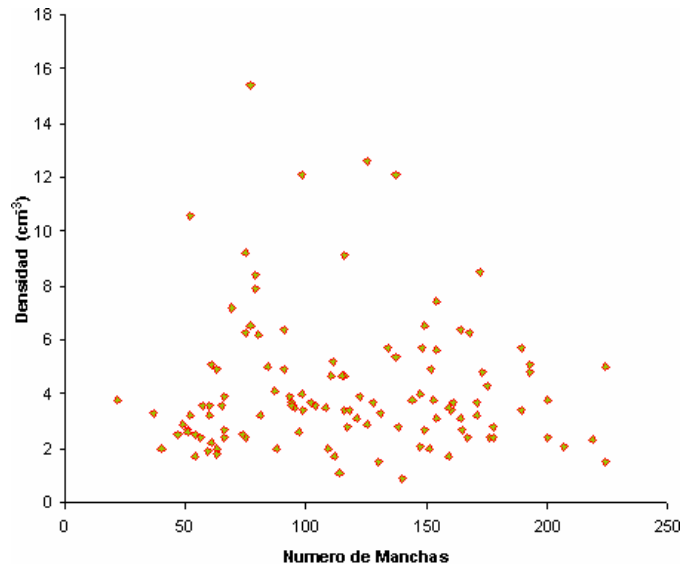
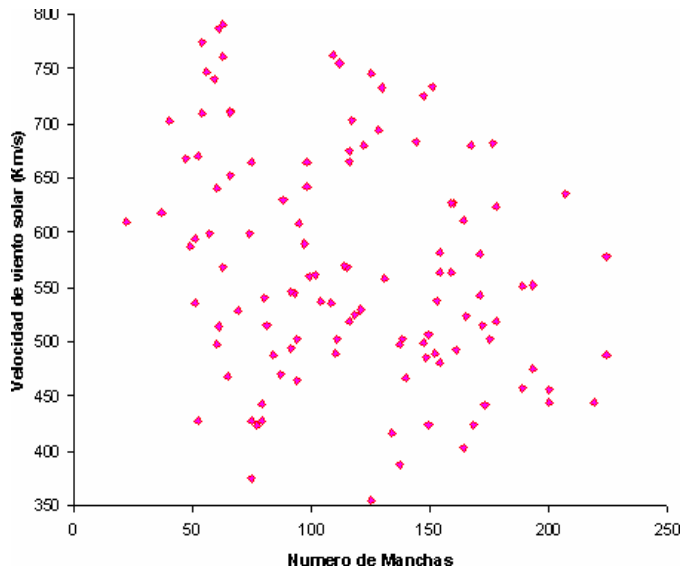


Figura 5.36 Velocidad medida en el viento solar en función del número de manchas solares, para el periodo comprendido entre el 01 de abril y 31 de Julio de 2003.

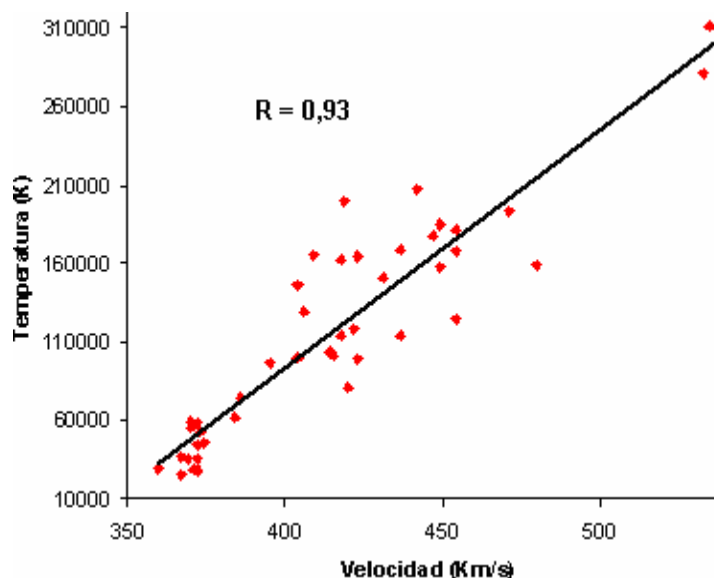


De lo anterior, se puede observar que en todos los casos el número de manchas solares no presenta dependencia alguna, este parámetro exhibe variaciones que se manifiestan gráficamente como una línea irregular. En síntesis, se puede decir que el número de manchas medidas en la superficie solar no muestra correlación con respecto a la temperatura, la densidad y la velocidad del viento solar.

Haciendo el respectivo seguimiento a los diferentes parámetros de viento solar, se observó la existencia de una relación entre estos. Para demostrar estadísticamente dicha relación, se tomó los valores de temperatura y velocidad de viento solar para el periodo de estudio con valores de densidad mayores a 10cm^{-3} y realizando el análisis estadístico en el programa Excel, se determinó una correlación lineal entre estos parámetros durante su arribo a las inmediaciones de la Tierra.

Para el mes de abril del 2003, se observa que las magnitudes de temperatura y velocidad de viento solar aumentan proporcionalmente de acuerdo a la distribución de puntos resultante, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,93.

Figura 5.37 Temperatura en función de la velocidad en las inmediaciones de la Tierra medida en el viento solar, para el mes de abril del 2003.



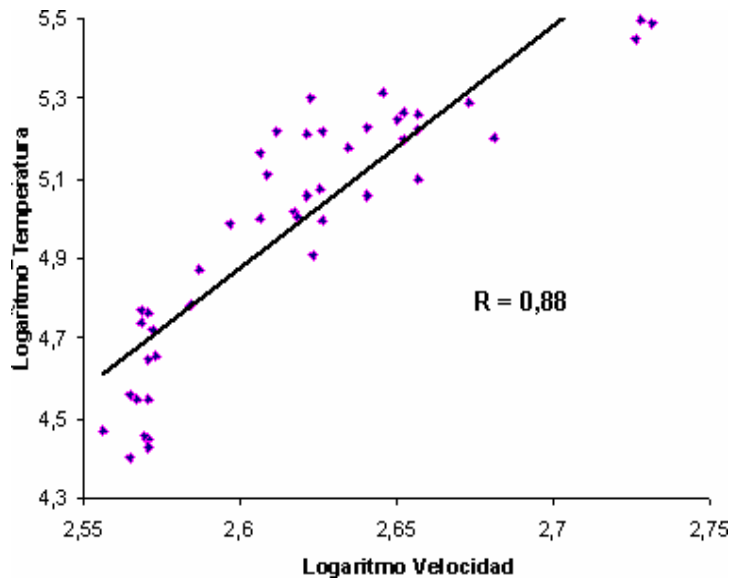
Además, la relación entre velocidad y temperatura máxima para este mes, puede ser representada al graficar logaritmo de temperatura en función del logaritmo de velocidad, calculando así una ecuación que permite determinar cualquiera de los dos parámetros.

$$\text{Log}(T) = 6,0423\text{Log}(V) - 10,836 \quad (5.1)$$

Y se puede escribir de la siguiente forma:

$$T = 1,6 \times 10^{-11} V^{6,0423} \quad (5.2)$$

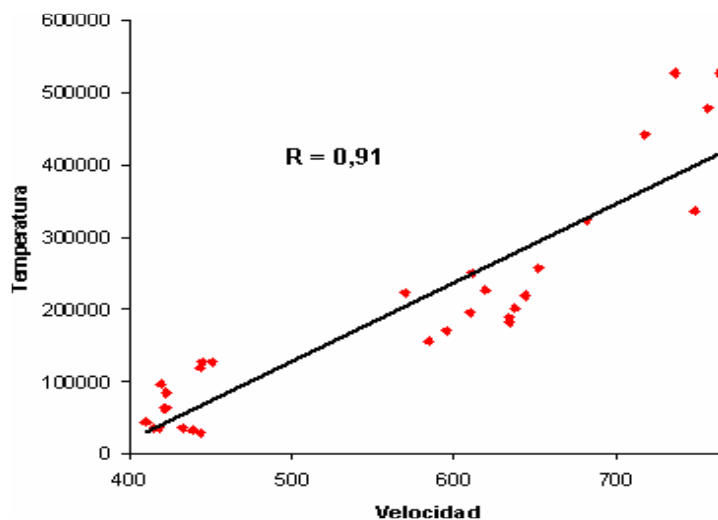
Figura 5.38 Logaritmo de temperatura en función de logaritmo de velocidad medida en el viento solar, para el mes de abril del 2003.



En la anterior gráfica se puede observar que las magnitudes aumentan proporcionalmente de acuerdo a la distribución de puntos resultante, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,88.

Para el mes de mayo del 2003, se observa que las magnitudes de temperatura y velocidad de viento solar aumentan proporcionalmente de acuerdo a la distribución de puntos resultante, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,91.

Figura 5.39 Temperatura en función de la velocidad en las inmediaciones de la Tierra medida en el viento solar, para el mes de mayo del 2003.



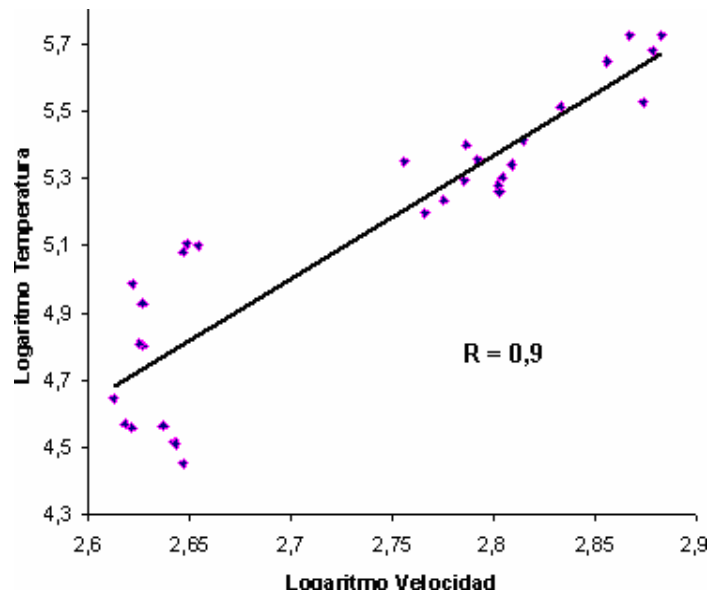
Además, la relación entre velocidad y temperatura máxima para este mes, puede ser representada al graficar logaritmo de temperatura en función del logaritmo de velocidad, calculando así una ecuación que permite determinar cualquiera de los dos parámetros.

$$\text{Log}(T) = 3,6623\text{Log}(V) - 4,8894 \quad (5.3)$$

Y se puede escribir de la siguiente forma:

$$T = 1,3V^{3,6623} \quad (5.4)$$

Figura 5.40 Logaritmo de temperatura en función de logaritmo de velocidad medida en el viento solar, para el mes de mayo del 2003.

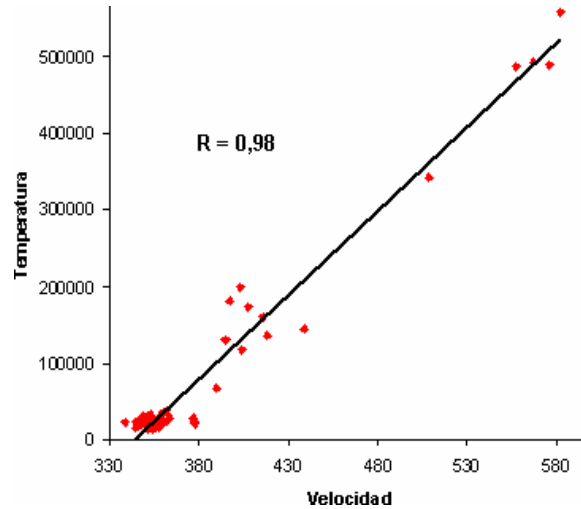


En la anterior gráfica se puede observar que las magnitudes aumentan proporcionalmente de acuerdo a la distribución de puntos resultante, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,9.

Para el mes de junio del 2003, no se calcula una correlación estadística debido a la falta de datos, la densidad en el viento solar estuvo por debajo de los 10 cm^{-3} . Aunque en las figuras 4.13 a 4.18 se observa que las magnitudes de temperatura y velocidad de viento solar tienen un comportamiento proporcional que demuestra una relación entre estas.

Para el mes de julio del 2003, se observa que las magnitudes de temperatura y velocidad de viento solar aumentan proporcionalmente de acuerdo a la distribución de puntos resultante, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,98.

Figura 5.41 Temperatura en función de la velocidad en las inmediaciones de la Tierra medida en el viento solar, para el mes de julio del 2003.



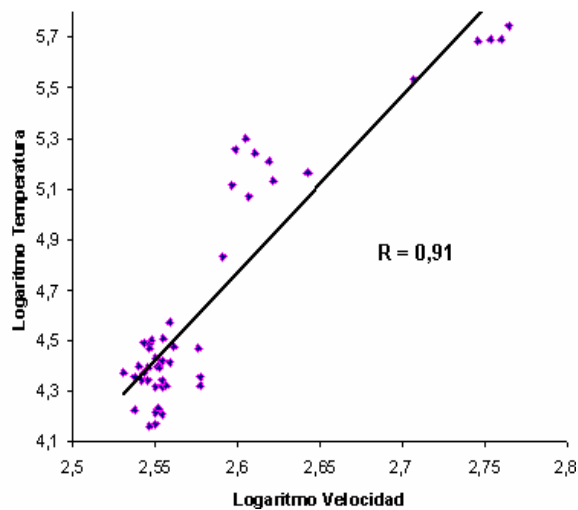
Además, la relación entre velocidad y temperatura máxima para este mes, puede ser representada al graficar logaritmo de temperatura en función del logaritmo de velocidad, calculando así una ecuación que permite determinar cualquiera de los dos parámetros.

$$\text{Log}(T) = 6,98\text{Log}(V) - 13,4 \quad (5.5)$$

Y se puede escribir de la siguiente forma:

$$T = 4 \times 10^{-14} V^{6,98} \quad (5.6)$$

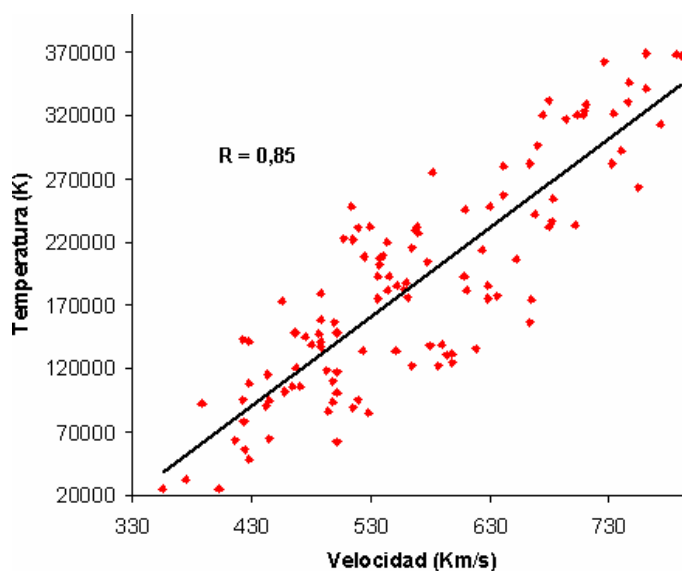
Figura 5.42 Logaritmo de temperatura en función de logaritmo de velocidad medida en el viento solar, para el mes de julio del 2003.



En la anterior gráfica se puede observar que las magnitudes aumentan proporcionalmente de acuerdo a la distribución de puntos resultante, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,91.

De igual manera con los valores promedio de temperatura, velocidad y densidad de viento solar reportados en las figuras 4.1 a 4.24, que se han deducido del trabajo estadístico de los datos registrados por el satélite SOHO, algunos de los cuales se recopilan en el Anexo I de este trabajo, se hace una correlación de manera estadística que demuestra la estrecha relación entre la temperatura y la velocidad del viento solar.

Figura 5.43 Temperatura promedio en función de la velocidad promedio diaria medida en el viento solar, para el periodo de 01 abril a 31 de julio del 2003.



Durante este periodo, se observa que las magnitudes de temperatura y velocidad de viento solar aumentan proporcionalmente de acuerdo a la distribución de puntos resultante, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,85.

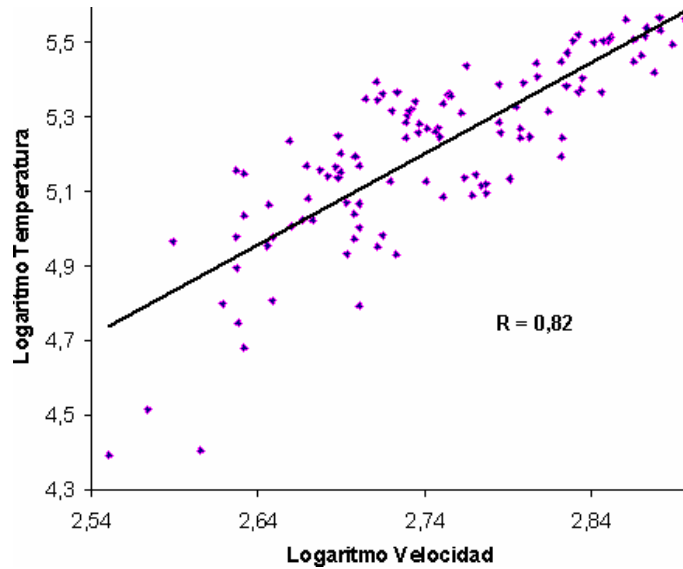
Además, la relación entre velocidad y temperatura máxima para este periodo, puede ser representada al graficar logaritmo de temperatura promedio en función del logaritmo de velocidad promedio diaria, calculando así una ecuación que permite determinar cualquiera de los dos parámetros.

$$\text{Log}(T) = 2,4462\text{Log}(V) - 1,5012 \quad (5.7)$$

Y se puede escribir de la siguiente forma:

$$T = 0,032V^{2,4462} \quad (5.8)$$

Figura 5.44 Logaritmo de temperatura promedio en función de logaritmo de velocidad promedio diaria medida en el viento solar, para el periodo de 01 abril a 31 de julio del 2003.



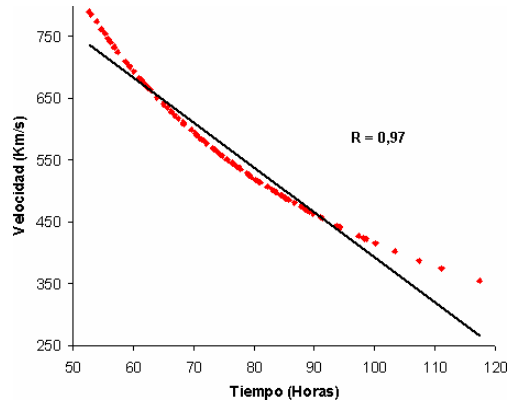
En la anterior gráfica se puede observar que las magnitudes aumentan proporcionalmente de acuerdo a la distribución de puntos resultante, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,82.

Sin embargo, en todos los casos la densidad no presenta dependencia alguna, este parámetro exhibe variaciones que se manifiestan gráficamente como una línea irregular. En síntesis, se puede decir que el parámetro de densidad de Viento Solar durante su arribo a las inmediaciones de la Tierra, no muestra correlación con respecto a la temperatura y a la velocidad.

Del análisis de la velocidad del viento solar durante su arribo a la Tierra se obtuvo que correlaciona con su tiempo de propagación con un índice de correlación $R = 0,97$.

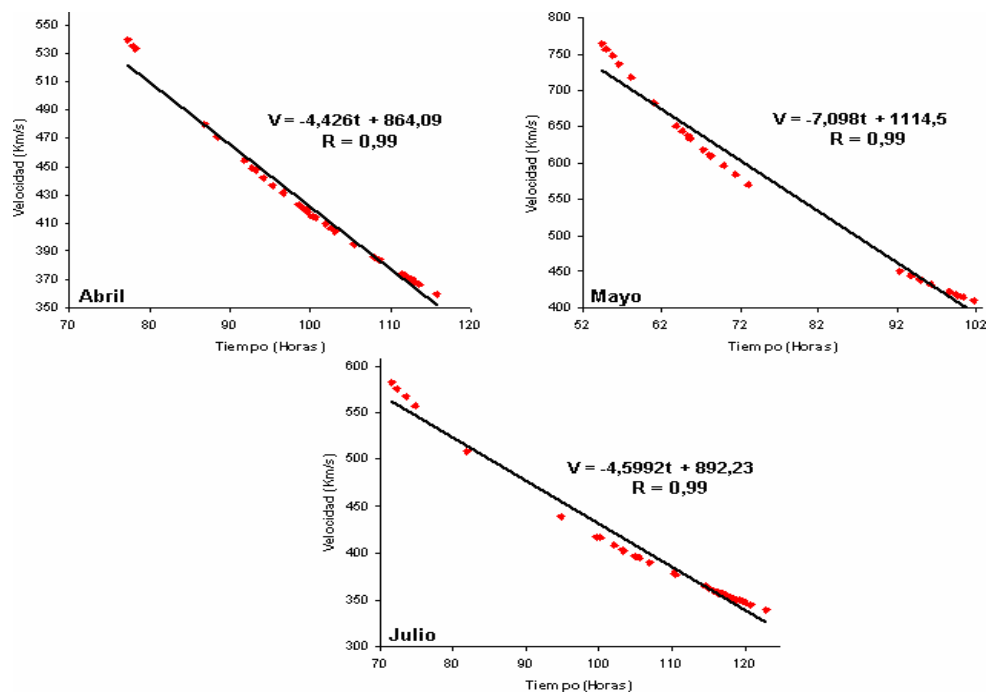
$$V = -7,2633t + 1119,3$$

Figura 5.45 Velocidad de arribo del Viento Solar en función del tiempo de propagación desde el Sol hasta las inmediaciones de la Tierra, para el periodo de 01 abril a 31 de julio del 2003.



Aumentando dicha correlación a $R = 0,99$ para densidades del Viento Solar mayores que 10 cm^{-3} para los meses de abril, mayo y julio del 2003.

Figura 5.46 Velocidad de arribo del Viento Solar en función del tiempo de propagación desde el Sol hasta las inmediaciones de la Tierra para densidades mayores a 10 cm^{-3} .



Las correlaciones anteriores muestran que el viento solar que arriba con mayor velocidad es el que posee un tiempo de propagación menor, y no es precisamente aquel que tiene mayor velocidad en su inicio.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos al estudiar las manchas solares y su posible influencia en la producción de explosiones electromagnéticas, muestran la importancia de correlacionar los parámetros del viento solar (temperatura, densidad, velocidad) y las eyecciones de masa coronal, contribuyendo con más elementos en la caracterización del estado del medio interplanetario. En el presente trabajo se concluyó lo siguiente:

- Analizando las señales tipo C capturadas por el receptor JOVE, se puede concluir que no son las indicadas para realizar una correlación entre estas y los parámetros de viento solar, debido a que son relativamente pequeñas. Para ello se utilizó eyecciones de masa coronal tipo halo registradas en la página de Internet <http://www.sec.noaa.gov/ftplib/indices/SPE.txt>, con lo que se concluye que son las manchas solares las responsables de las eyecciones de masa coronal y están estrechamente relacionadas con los parámetros del viento solar, como la temperatura, densidad y velocidad; sin embargo, el número de estas no influye en nada con el comportamiento de los parámetros.
- Para los casos analizados, se determinó una alta correlación entre velocidad y temperatura del viento solar en las inmediaciones de la Tierra, en tanto que el parámetro de densidad de Viento Solar durante su arribo a las inmediaciones de la Tierra, no muestra correlación con respecto a la temperatura y a la velocidad.
- Al analizar las señales obtenidas por instituciones involucradas en el estudio del tema a nivel internacional, se puede concluir que el receptor (JOVE) utilizado para esta investigación es óptimo, debido a que las señales capturadas por este en el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Nariño, exhiben un comportamiento similar con las que provienen de otros observatorios.
- Se encontró que, las velocidades de las eyecciones de masa coronal son ajustadas por el medio interplanetario, específicamente por el parámetro de velocidad del Viento Solar, lo cual se manifiesta de forma más evidente en la eyección de masa coronal del 4 de noviembre de 2003. Esta eyección alcanzó una aceleración extremadamente alta de 434.8 Km/s^2 y asociada a ella ocurrió un gran destello en rayos X y H_{α} (X28/3B), presentándose ambos eventos como parte de un mismo proceso de liberación de gran cantidad de energía en la atmósfera solar.

Todo lo anterior puede ser de utilidad práctica ya que aporta elementos para el pronóstico ionosférico, siendo posible en algunos casos evaluar de forma aproximada la velocidad, temperatura y tiempo de arribo del viento solar y las eyecciones de masa coronal.

Finalmente se recomienda que en próximos análisis se tenga en cuenta utilizar un montaje portátil que permita un desplazamiento fácil a lugares donde la interferencia sea mínima e incluir la correlación con otros parámetros del viento solar como los campos magnéticos y parámetros de radiación global.

BIBLIOGRAFIA

ABETTI, G. El Sol. Faber y Faber. London, 1962.

ARAUJO, Gema. Manual de Observación Solar Vol. 3., Marzo 2001.

_____. _____ Vol. 4., Marzo 2001.

BABCOCK, H. W. The Topology of the Sun's Magnetic Field an the 22-Year Cycle. *Astrophys. J.*, (1961), pag. 133, 572-587.

BECK, Rainer; HILBRECHT, Heinz; REINSCH, Klaus y VÖLKER, Peter. *Solar Astronomy Handbook*, Willmann-Bell, inc. 1995, pag. 141-145

BIERMANN, L. 1951. *Zs. Astrophysics.* 29:274.

BOLEY, Forrest. *Plasmas en el Laboratorio y en el Cosmos, Plasmas Naturales.* Pág. 135.

C., Frohlich y R. W. Brusa. *Solar Radiation and its Variation in Time.* *Sol. Phys.* 74 (1981) 209-215.

CARGILL, P. J., On the aerodynamic drag force acting on interplanetary coronal mass ejections, *Solar Phys*, 221, 135, 2004.

COROAS, Ángel Alberto. Re: Las Manchas Solares. (On line). Mensaje to: Orlando ARGOTY. Julio de 2003. personal communication. Available from Internet: <angel@met.cmw.inf.cu>.

FORBES, T. G., A review on the genesis of mass ejections, *J.Geophys.Res.* 105, 23153, 2000.

GOPALSWAMY, N., S. YASHIRO, G. MICHALEK, M. L. KAISER, R. A. HOWARD, D. V. REAMES, R. LESKE, y T. von Roseninge, *Interacting Coronal Mass Ejections and Solar Energetic Particles*, *ApJ*, 572, L103, 2002.

_____ Characteristics of coronal mass ejections associated with long wavelength type II radio bursts, *J.Geophys. Res.*, 106, 29219, 2001.

GOSLING, J. T., in *Coronal mass Ejections*, Eds. N. Crooker, J.A. Joselinng y J. Feynman, *Geophysical Monograph 99*, (American Geophysical Union, Washington DC), 9, 1997.

HAMILTON, Calvin. Using the World-wide web to deliver complex Electronic Documents: The Sun. <planetscapes.com/solar/span/sun.htm> Julio 2003.

HOWARD, R. A., N. R. SHEELEY, D. J. MICHELS, y M. J. Koomen, In the Sun and the Heliosphere in three dimensions, ed. R.G. Marsden, (D.Reidel, Norwel), 107,1986.

HUNDHAUSEN, A. J., BAME, S. J y MONTGOMERY, M. D, Large-scale characteristics of flare associated solar wind disturbances, J. Geophys Res., 75, 4631, 1970.

_____ In the many faces of the Sun, eds. K. T. Strong et al. (Springer-Verlag, New York), 143, 1999.

KHALER, S. W., D. V. REAMES, y N. R. Sheeley, Jr., Coronal Mass Ejections Associated with Impulsive Solar Energetic Particle Events, ApJ, 562, 558, 2001.

KHALER, S. W., The correlation between solar energetic particle peak intensities and speeds of coronal mass ejections: Effects of ambient particle intensities and energy spectra, J. Geophys. Res., 106, 20947, 2001.

M, Iqbal. An Introduction to Solar Radiation, academic press (1983) Toronto.

MACAIZA, G. R; SINTON, W. M. Instrumentos de Astronomía, (Harvard University Press, Cambridge, Massachussets, 1961), pag. 241-243.

MANOHARAN, P. K., The Solar Wind, eds. H.M.Antia et al, (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg), 299, 2003.

MCINTOSH, P. S., "The Classification of Sunspot Groups", Sol. Phys 125, 251. (1990).

MORRISON, P. Neutrino Astronomy, Sci. Am. 207 (agosto, 1962), pag. 90-98.

P. RILEY, D. J. MCCOMAS y V. J. Pizzo, Overexpanding coronal mass ejections at high heliographic latitudes: Observations and simulations, J.Geophys. Res, 103, 1941, 1998.

PERENGUEZ LOPEZ, James. Estudio Teórico y Experimental de emisiones de radio provenientes del planeta Júpiter a la frecuencia de operación de 20,1 MHz. San Juan de Pasto, 2003. Trabajo de grado (Físico). Universidad de Nariño. Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. Área de Astrofísica.

PHILLIPS, J. L., A. BALOGH, S. J. BAME, B. E. GOLDSTEIN, J. T. GOSLING, J. T. HOEKSEMA, D. J. MCCOMAS, M. NEUGEBAUER, N. R. SHEELEY y Y.-M. Wang, Ulysses at 50o south: Constant immersion in the high-speed solar wind, Geophys. Res. Lett., 21, 1105, 1994

R. Feynman, RB. Leighton, M. Sands. Física Vol. 1. Mecánica, Radiación y Calor. Editorial Addison Wesley Longman 1987, pág. 230-231.

R., J. Bray, R., E. Loughhead. Sunspots. Chapman and Hall, London, (1964), p. 250

RODRIGUEZ, R.E., G. Gil, A. MÉNDEZ y R. PÉREZ, CME associations with quiet and active solar features, *New Astronomy*, 3, 321, 1998.

_____ CME PHENOMENOLOGY IN DIFFERENT SOLAR MAGNETIC SCENARIOS, *Astrophysics and Space Science*, 256, 373, 1998.

SMITH, Alex G. Radio Exploration of the Sun. Van Nostrand Company, Inc., 120 Alexander Street Princeton, New. Jersey. (1967) 15-17.

St. Cyr, O. C., J. T. BURKEPILE., A. J. HUNDAUSEN., y A. R. Lecinski, A comparison of ground-based and spacecraft observations of coronal mass ejection from 1980 - 1989, *J.Geophys.Res.*, 104, 12493, 1999.

WALDMEIER, M. The Classification of Sunspot Groups. *Astr. Mitt. Eidgen. Sternw. Zurich* no. 358 (1978a).

WEBB, D. F., *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, eds., (Nature Publishing Group), 3866, 2001

YASHIRO, S., N. GOPALSWAMY, E. W. CLIVER, D. V. REAMES, M. L. KAISER y R. A. Howard, Association of Coronal Mass Ejections and Type II Radio Bursts with impulsive Solar Energetic Particle Events, *ASP Conference series*, Vol. 325, 2004.

El Sol. [On Line]. Available from World Wide Web: <<http://www.planetscapes.com/span/sun.htm#stats>>.

Omniweb. [Base de datos en línea de parámetros de viento solar]. Available from World Wide Web: <<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/>>.

Radio Jove [Base de datos en línea de señales capturadas a través del receptor JOVE en diferentes observatorios a nivel mundial] Available from World Wide Web: <<http://jovearchive.gsfc.nasa.gov/rjdataclean/#señals/>>

Spaceweather. [El Clima Espacial]. [On Line]. Available from World Wide Web: <<http://www.spaceweather.com>>.

SEC.NOAA [Centro del Ambiente Espacial del Departamento de Administración y Comercio del Océano y la Atmósfera] [On Line] Available from World Wide Web: <<http://www.sec.noaa.gov/ftplib/indices/SPE.txt>>.

Space Environment Center of National Oceanic and Atmospheric Administration. [Centro del Ambiente Espacial del Departamento de Administración y Comercio del Océano y la Atmósfera] [On Line] Available from World Wide Web: <http://www.sec.noaa.gov/ftplib/indices/warehouse/2003/2003_events.tar.gz>.

ANEXOS

Anexo A. Parámetros de viento solar promedios diarios para el mes de abril de 2003.

Fecha	T° (K)	Dens. (cm ⁻³)	Vel. (Km/s)	Log T°	Log Vel
01/04/2003	133967	2,7	524	5,12699783	2,71933129
02/04/2003	118206	3,7	493	5,07263952	2,69284692
03/04/2003	101852	5,7	458	5,00796956	2,66086548
04/04/2003	138707	5,6	481	5,14209838	2,68214508
05/04/2003	147340	5,7	486	5,16832067	2,68663627
06/04/2003	105717	3,7	464	5,02414483	2,66651798
07/04/2003	32824	9,2	375	4,5161915	2,57403127
08/04/2003	142727	15,4	423	5,15450614	2,62634037
09/04/2003	140829	10,6	428	5,1486921	2,63144377
10/04/2003	333256	6,3	615	5,52277798	2,78887512
11/04/2003	206167	2,4	652	5,31421915	2,8142476
12/04/2003	122916	2,9	587	5,08960842	2,7686381
13/04/2003	93921	3,2	498	4,97276271	2,69722934
14/04/2003	247706	5,1	514	5,39393653	2,71096312
15/04/2003	229639	4,9	568	5,36104565	2,75434834
16/04/2003	320570	2,5	709	5,50592288	2,85064624
17/04/2003	233159	2	702	5,36765218	2,84633711
18/04/2003	136480	3,3	618	5,13506901	2,79098848
19/04/2003	130863	2,7	594	5,11681687	2,77378644
20/04/2003	85039	7,2	528	4,92961814	2,72263392
21/04/2003	181144	3,9	545	5,25802395	2,7363965
22/04/2003	215825	3,1	564	5,33410175	2,7512791
23/04/2003	156371	4	499	5,19415621	2,69810055
24/04/2003	158972	4,9	489	5,20132064	2,68930886
25/04/2003	220162	3,2	543	5,34274236	2,73479983
26/04/2003	90070	4,8	442	4,95458016	2,64542227
27/04/2003	144863	4,8	475	5,16095747	2,67669361
28/04/2003	172760	2,4	456	5,2374432	2,65896484
29/04/2003	310501	2,4	482	5,492063	2,68304704
30/04/2003	204750	5	578	5,31122391	2,76192784

Anexo B. Parámetros de viento solar promedios diarios para el mes de mayo de 2003.

Fecha	T° (K)	Dens. (cm ⁻³)	Vel. (Km/s)	Log T°	Log Vel
01/05/2003	185500	3,4	628	5,26834391	2,79795964
02/05/2003	138059	3,7	580	5,14006472	2,76342799
03/05/2003	100688	4,3	502	5,00297771	2,70070372
04/05/2003	63039	5,7	416	4,79960932	2,61909333

05/05/2003	221580	8,5	515	5,34553056	2,71180723
06/05/2003	254445	3,8	683	5,40559392	2,8344207
07/05/2003	320491	2,8	703	5,50581584	2,84695533
08/05/2003	340886	2	762	5,53260917	2,88195497
09/05/2003	213084	2,6	785	5,32855084	2,89486966
10/05/2003	90951	2,7	626	4,95880748	2,79657433
11/05/2003	245285	3,8	610	5,38967099	2,78532984
12/05/2003	242005	2,5	668	5,38382434	2,82477646
13/05/2003	328467	2,7	711	5,51649174	2,8518696
14/05/2003	291986	1,9	741	5,46536203	2,86981821
15/05/2003	156361	2,4	664	5,19412844	2,82216808
16/05/2003	139552	2,6	590	5,14473606	2,77085201
17/05/2003	89543	3,2	515	4,95203164	2,71180723
18/05/2003	47890	8,4	428	4,68024484	2,63144377
19/05/2003	108312	6,3	428	5,03467658	2,63144377
20/05/2003	95389	6,5	423	4,9794983	2,62634037
21/05/2003	115567	7,9	443	5,06283384	2,64640373
22/05/2003	141594	4,7	489	5,15104485	2,68930886
23/05/2003	105601	4,1	471	5,02366803	2,67302091
24/05/2003	179011	5	488	5,25287972	2,68841982
25/05/2003	175333	2,6	536	5,24386366	2,72916479
26/05/2003	120942	3,6	468	5,08257715	2,67024585
27/05/2003	230814	4,7	519	5,36326215	2,71516736
28/05/2003	320255	3,4	675	5,50549592	2,82930377
29/05/2003	174782	9,1	665	5,2424967	2,82282165
30/05/2003	282004	12,1	664	5,45025527	2,82216808
31/05/2003	99924	2,2	692	4,99966981	2,84010609

Anexo C. Parámetros de viento solar promedios diarios para el mes de junio de 2003.

Fecha	T° (K)	Dens. (cm ⁻³)	Vel. (Km/s)	Log T°	Log Vel
01/06/2003	124454	3,6	599	5,09500886	2,77742682
02/06/2003	323808	3,9	710	5,51028757	2,85125835
03/06/2003	367659	2,2	787	5,5654452	2,89597473
04/06/2003	313004	1,7	774	5,49554989	2,88874096
05/06/2003	132269	2,5	599	5,12145807	2,77742682
06/06/2003	193096	3,5	609	5,28577328	2,78461729
07/06/2003	257054	4	642	5,41002437	2,80753503
08/06/2003	330814	2,9	746	5,51958388	2,87273883
09/06/2003	232741	2,4	680	5,3668729	2,83250891
10/06/2003	236640	2,4	682	5,37408816	2,83378437
11/06/2003	177482	2,1	636	5,24915431	2,80345712
12/06/2003	95977	2,8	519	4,98216717	2,71516736
13/06/2003	55760	6,3	425	4,74632277	2,62838893
14/06/2003	223276	6,5	507	5,34884204	2,70500796
15/06/2003	192546	6,4	546	5,2845345	2,73719264

16/06/2003	62044	5,2	502	4,79269979	2,70070372
17/06/2003	86142	4,9	494	4,93521495	2,69372695
18/06/2003	209996	6,2	540	5,32221102	2,73239376
19/06/2003	187358	3,4	560	5,27267224	2,74818803
20/06/2003	193151	3,5	536	5,28589696	2,72916479
21/06/2003	232550	3,1	529	5,36651634	2,72345567
22/06/2003	208533	3,4	525	5,31917479	2,7201593
23/06/2003	147963	3,6	502	5,17015313	2,70070372
24/06/2003	202034	3,6	537	5,30542446	2,72997429
25/06/2003	182741	3,3	558	5,261836	2,7466342
26/06/2003	231775	4,7	569	5,36506659	2,75511227
27/06/2003	332087	3,9	680	5,52125187	2,83250891
28/06/2003	317648	3,7	694	5,50194613	2,84135947
29/06/2003	321126	2	734	5,50667547	2,86569606
30/06/2003	263248	1,7	755	5,42036508	2,87794695

Anexo D. Parámetros de viento solar promedios diarios para el mes de julio de 2003.

Fecha	T° (K)	Dens. (cm ⁻³)	Vel. (Km/s)	Log T°	Log Vel
01/07/2003	174854	1,7	628	5,24267557	2,79795964
02/07/2003	117168	2,8	502	5,06880902	2,70070372
03/07/2003	207496	3,8	538	5,31700973	2,73078228
04/07/2003	363175	2,1	726	5,56011595	2,86093662
05/07/2003	281701	1,5	733	5,44978839	2,86510397
06/07/2003	247416	2	630	5,39342778	2,79934055
07/07/2003	226853	1,1	570	5,35574453	2,75587486
08/07/2003	147987	0,9	467	5,17022357	2,66931688
09/07/2003	78473	2,7	424	4,89472026	2,62736586
10/07/2003	24689	12,6	355	4,3925035	2,55022835
11/07/2003	92493	12,1	388	4,96610887	2,58883173
12/07/2003	334330	3,8	609	5,52417535	2,78461729
13/07/2003	176229	3,7	561	5,24607738	2,74896286
14/07/2003	110042	5,4	498	5,04155848	2,69722934
15/07/2003	122078	3,5	564	5,08663741	2,7512791
16/07/2003	274343	7,4	582	5,43829388	2,76492298
17/07/2003	181329	3,1	611	5,25846727	2,78604121
18/07/2003	134158	3,4	551	5,12761658	2,7411516
19/07/2003	185907	5,1	552	5,26929574	2,74193908
20/07/2003	213413	2,4	624	5,32922087	2,79518459
21/07/2003	137172	1,5	488	5,13726547	2,68841982
22/07/2003	64214	2,3	445	4,80762972	2,64836001
23/07/2003	94735	3,8	445	4,97651046	2,64836001
24/07/2003	25540	6,4	403	4,40722089	2,60530505
25/07/2003	9999999	999,9	323	6,99999996	2,50920252
26/07/2003	280107	25	392	5,44732396	2,59328607
27/07/2003	296323	3,2	670	5,47176536	2,8260748

28/07/2003	279591	3,6	641	5,44652319	2,80685803
29/07/2003	345959	2,4	747	5,53902463	2,8733206
30/07/2003	369225	2	761	5,5672911	2,88138466
31/07/2003	366784	1,8	791	5,56441038	2,89817648

Anexo E. Parámetros del viento solar para la eyección de masa coronal tipo halo del 28 de mayo de 2003.

Fecha	Hora	T° (K)	Dens. (cm ⁻³)	Vel (Km/s)
28/05/2003	0:00	340111	5,7	612
28/05/2003	1:00	457529	5,6	649
28/05/2003	2:00	354660	6	621
28/05/2003	3:00	441847	5,4	643
28/05/2003	4:00	489588	4,6	676
28/05/2003	5:00	523400	4,2	686
28/05/2003	6:00	563012	3,6	716
28/05/2003	7:00	373158	3,1	699
28/05/2003	8:00	301665	3,1	689
28/05/2003	9:00	437661	2,9	726
28/05/2003	10:00	435837	2,7	726
28/05/2003	11:00	420637	2,5	723
28/05/2003	12:00	310619	2,5	744
28/05/2003	13:00	332536	2,4	711
28/05/2003	14:00	251965	2,1	693
28/05/2003	15:00	169410	2,6	654
28/05/2003	16:00	169128	3	662
28/05/2003	17:00	177256	2,8	668
28/05/2003	18:00	146378	2,9	644
28/05/2003	19:00	177953	2,8	651
28/05/2003	20:00	253264	2,9	654
28/05/2003	21:00	210205	2,9	654
28/05/2003	22:00	178086	3	647
28/05/2003	23:00	170220	2,5	660
29/05/2003	0:00	142737	2,8	647
29/05/2003	1:00	132464	2,6	654
29/05/2003	2:00	135631	2,2	662
29/05/2003	3:00	124055	2,2	646
29/05/2003	4:00	106768	2,2	626
29/05/2003	5:00	107230	2,2	618
29/05/2003	6:00	108449	2,1	636
29/05/2003	7:00	104952	2,1	620
29/05/2003	8:00	85839	2,1	622
29/05/2003	9:00	73310	2,2	631
29/05/2003	10:00	72744	2,5	635
29/05/2003	11:00	55381	3,3	628
29/05/2003	12:00	101365	4,1	648
29/05/2003	13:00	67895	4,8	675

29/05/2003	14:00	37185	3,8	661
29/05/2003	15:00	49951	5,8	653
29/05/2003	16:00	83761	14,8	650
29/05/2003	17:00	75058	8,9	646
29/05/2003	18:00	55436	4,8	661
29/05/2003	19:00	337256	18,5	748
29/05/2003	20:00	526288	28	764
29/05/2003	21:00	478646	29,7	757
29/05/2003	22:00	526438	31,7	736
29/05/2003	23:00	605923	36	737
30/05/2003	0:00	441764	35,5	718
30/05/2003	1:00	323788	34,4	682
30/05/2003	2:00	256885	18,9	652
30/05/2003	3:00	201006	20,9	638
30/05/2003	4:00	218483	20	644
30/05/2003	5:00	181994	13,7	635
30/05/2003	6:00	188728	14,9	634
30/05/2003	7:00	226920	17,8	619
30/05/2003	8:00	195664	15,3	610
30/05/2003	9:00	171734	12,2	596
30/05/2003	10:00	156275	12,8	584
30/05/2003	11:00	222493	14,7	570
30/05/2003	12:00	145524	6,1	562
30/05/2003	13:00	67906	7,3	559
30/05/2003	14:00	92389	4,3	564
30/05/2003	15:00	98443	4,8	567
30/05/2003	16:00	112898	4,1	668
30/05/2003	17:00	1010322	6,5	780
30/05/2003	18:00	900419	4,5	803
30/05/2003	19:00	579951	5,2	806
30/05/2003	20:00	225587	5,6	787
30/05/2003	21:00	174165	4,5	751
30/05/2003	22:00	219261	3,1	751
30/05/2003	23:00	355505	2,2	763

Anexo F. Parámetros del viento solar para la eyección de masa coronal tipo halo del 17 de junio de 2003.

Fecha	Hora	T ^o	Dens. (cm ⁻³)	Vel. (Km/s)
18/06/2003	0:00	17196	3,3	468
18/06/2003	1:00	53323	3,3	455
18/06/2003	2:00	79818	4,1	455
18/06/2003	3:00	102531	4,1	453
18/06/2003	4:00	94673	4,3	455
18/06/2003	5:00	128419	5,5	490
18/06/2003	6:00	94585	5,2	511
18/06/2003	7:00	62146	5,8	508
18/06/2003	8:00	57971	6,7	497

18/06/2003	9:00	171956	8,2	524
18/06/2003	10:00	336245	10,4	548
18/06/2003	11:00	296340	10,8	551
18/06/2003	12:00	308187	10,8	547
18/06/2003	13:00	321023	9,9	537
18/06/2003	14:00	269806	7,7	560
18/06/2003	15:00	361248	5,7	611
18/06/2003	16:00	355497	4,7	625
18/06/2003	17:00	338716	4,7	626
18/06/2003	18:00	295566	5	613
18/06/2003	19:00	268341	5,1	598
18/06/2003	20:00	247912	5	591
18/06/2003	21:00	211435	5,1	577
18/06/2003	22:00	261596	5,5	581
18/06/2003	23:00	305379	7,1	573
19/06/2003	0:00	254273	5,5	591
19/06/2003	1:00	229623	4,9	597
19/06/2003	2:00	222361	4,6	586
19/06/2003	3:00	207214	4,2	603
19/06/2003	4:00	251032	4,1	581
19/06/2003	5:00	231566	3,9	584
19/06/2003	6:00	227700	3,6	582
19/06/2003	7:00	225369	3,5	585
19/06/2003	8:00	196734	3	553
19/06/2003	9:00	191203	3,1	529
19/06/2003	10:00	168975	3,1	526
19/06/2003	11:00	167385	3,2	527
19/06/2003	12:00	171821	3,3	533
19/06/2003	13:00	156850	3,4	550
19/06/2003	14:00	158181	2,9	563
19/06/2003	15:00	153112	2,6	553
19/06/2003	16:00	156903	2,6	552
19/06/2003	17:00	153282	2,6	562
19/06/2003	18:00	160087	2,6	549
19/06/2003	19:00	175565	2,7	545
19/06/2003	20:00	193086	2,8	541
19/06/2003	21:00	159120	2,9	548
19/06/2003	22:00	145702	3,1	558
19/06/2003	23:00	139440	3,2	542
20/06/2003	0:00	142812	3,5	547
20/06/2003	1:00	159685	3,1	545
20/06/2003	2:00	151584	3,2	536
20/06/2003	3:00	135145	2,8	533
20/06/2003	4:00	168157	3,1	529
20/06/2003	5:00	178945	3,1	532
20/06/2003	6:00	168439	3,1	517
20/06/2003	7:00	162347	3	517

20/06/2003	8:00	188667	4,2	524
20/06/2003	9:00	254686	6,2	562
20/06/2003	10:00	233248	6,1	543
20/06/2003	11:00	183828	4,9	537
20/06/2003	12:00	205075	3,8	547
20/06/2003	13:00	224806	3,1	564
20/06/2003	14:00	228140	3,4	569
20/06/2003	15:00	191653	3,1	547
20/06/2003	16:00	136646	2,9	528
20/06/2003	17:00	214394	3,1	529
20/06/2003	18:00	236591	3,1	523
20/06/2003	19:00	238873	3,2	524
20/06/2003	20:00	199326	3,2	527
20/06/2003	21:00	210669	3,3	527
20/06/2003	22:00	200721	3,2	525
20/06/2003	23:00	221194	3,1	523

Anexo G. Parámetros del viento solar para la eyección de masa coronal tipo halo del 28 de octubre de 2003.

Fecha	Hora	T° (K)	Dens. (cm ⁻³)	Vel. (Km/s)
28/10/2003	0:00	139208	0,8	476
28/10/2003	1:00	206537	0,8	475
28/10/2003	2:00	290921	1,7	535
28/10/2003	3:00	141645	2,1	597
28/10/2003	4:00	120462	4,3	606
28/10/2003	5:00	79589	4,8	607
28/10/2003	6:00	78616	5,1	620
28/10/2003	7:00	74929	5,7	622
28/10/2003	8:00	64756	7	612
28/10/2003	9:00	335011	4	653
28/10/2003	10:00	745288	1,3	759
28/10/2003	11:00	1044292	1,6	767
28/10/2003	12:00	819560	1,5	800
28/10/2003	13:00	784317	1,7	809
28/10/2003	14:00	9999999	999,9	9999
28/10/2003	15:00	9999999	999,9	9999
28/10/2003	16:00	9999999	999,9	9999
28/10/2003	17:00	9999999	999,9	9999
28/10/2003	18:00	9999999	999,9	9999
28/10/2003	19:00	9999999	999,9	9999
28/10/2003	20:00	9999999	999,9	9999
28/10/2003	21:00	9999999	999,9	9999
28/10/2003	22:00	9999999	999,9	9999
28/10/2003	23:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	0:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	1:00	9999999	999,9	9999

29/10/2003	2:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	3:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	4:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	5:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	6:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	7:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	8:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	9:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	10:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	11:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	12:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	13:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	14:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	15:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	16:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	17:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	18:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	19:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	20:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	21:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	22:00	9999999	999,9	9999
29/10/2003	23:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	0:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	1:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	2:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	3:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	4:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	5:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	6:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	7:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	8:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	9:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	10:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	11:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	12:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	13:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	14:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	15:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	16:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	17:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	18:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	19:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	20:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	21:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	22:00	9999999	999,9	9999
30/10/2003	23:00	9999999	999,9	9999
31/10/2003	0:00	9999999	2,1	9999
31/10/2003	1:00	1445081	1,2	1161

31/10/2003	2:00	867839	0,5	1183
31/10/2003	3:00	45658	0,5	1189
31/10/2003	4:00	62490	1,7	1159
31/10/2003	5:00	254054	2,9	1157
31/10/2003	6:00	162865	2,2	1157
31/10/2003	7:00	99502	1,1	1110
31/10/2003	8:00	68001	0,8	1074
31/10/2003	9:00	52198	0,5	1062
31/10/2003	10:00	45225	6	1044
31/10/2003	11:00	82652	6	1003
31/10/2003	12:00	71339	4,6	994
31/10/2003	13:00	43084	4,9	968
31/10/2003	14:00	47063	5,1	941
31/10/2003	15:00	37275	4,8	920
31/10/2003	16:00	37692	4	900
31/10/2003	17:00	26861	3,5	885
31/10/2003	18:00	29415	3,1	881
31/10/2003	19:00	27638	2	877
31/10/2003	20:00	23200	2,4	869
31/10/2003	21:00	17274	2,6	858
31/10/2003	22:00	17203	2	848
31/10/2003	23:00	13893	1,6	835
01/11/2003	0:00	15605	1,4	804
01/11/2003	1:00	13241	1,8	801
01/11/2003	2:00	10686	1,5	789
01/11/2003	3:00	14682	1,5	770
01/11/2003	4:00	7957	1,4	757
01/11/2003	5:00	10294	1,4	742
01/11/2003	6:00	10947	1,3	730
01/11/2003	7:00	9401	1,4	710
01/11/2003	8:00	7845	1,3	699
01/11/2003	9:00	8822	1,3	690
01/11/2003	10:00	8543	1,2	680
01/11/2003	11:00	10496	1,4	667
01/11/2003	12:00	10840	1,6	657
01/11/2003	13:00	9991	1,7	645
01/11/2003	14:00	10144	1,7	634
01/11/2003	15:00	9371	1,6	631
01/11/2003	16:00	11565	2,2	627
01/11/2003	17:00	10804	2,1	615
01/11/2003	18:00	11371	2,2	638
01/11/2003	19:00	10170	2,4	610
01/11/2003	20:00	11496	2,2	610
01/11/2003	21:00	12289	2,1	596
01/11/2003	22:00	13179	2,3	595
01/11/2003	23:00	17259	2,2	591

Anexo H. Parámetros del viento solar para la eyección de masa coronal tipo halo del 04 de noviembre de 2003.

Fecha	Hora	T° (K)	Dens. (cm ⁻³)	Vel. (Km/s)
05/11/2003	0:00	311866	3,6	596
05/11/2003	1:00	289195	4,3	592
05/11/2003	2:00	209386	3,9	591
05/11/2003	3:00	184481	4,1	591
05/11/2003	4:00	183153	4,1	585
05/11/2003	5:00	180541	3,8	586
05/11/2003	6:00	165513	3,7	582
05/11/2003	7:00	150669	3,3	577
05/11/2003	8:00	169259	2,6	571
05/11/2003	9:00	181807	2,6	566
05/11/2003	10:00	169951	3	558
05/11/2003	11:00	138257	2,6	547
05/11/2003	12:00	124812	2,8	547
05/11/2003	13:00	106134	3,1	542
05/11/2003	14:00	91253	3,1	535
05/11/2003	15:00	85386	3	527
05/11/2003	16:00	83945	3,4	531
05/11/2003	17:00	78530	3,1	522
05/11/2003	18:00	92610	4,4	509
05/11/2003	19:00	112603	4,6	522
05/11/2003	20:00	152299	4,1	529
05/11/2003	21:00	118138	3,6	525
05/11/2003	22:00	92020	3,4	524
05/11/2003	23:00	93956		504
06/11/2003	0:00	99134	3,6	500
06/11/2003	1:00	74520	3,2	502
06/11/2003	2:00	87774	3,4	487
06/11/2003	3:00	63146	3,1	493
06/11/2003	4:00	65698	3	484
06/11/2003	5:00	51800	2,8	508
06/11/2003	6:00	55402	2,9	510
06/11/2003	7:00	45316	2,4	479
06/11/2003	8:00	57987	2,2	479
06/11/2003	9:00	54869	2,4	471
06/11/2003	10:00	54423	2,3	460
06/11/2003	11:00	54217	2,5	478
06/11/2003	12:00	63303	2,5	451
06/11/2003	13:00	65380	2,6	450
06/11/2003	14:00	49786	2,5	449
06/11/2003	15:00	47151	2,7	453
06/11/2003	16:00	60577	2,6	455
06/11/2003	17:00	50436	2,5	466
06/11/2003	18:00	69798	2,6	456

06/11/2003	19:00	62190	2,4	480
06/11/2003	20:00	289899	6,8	539
06/11/2003	21:00	504388	6,9	563
06/11/2003	22:00	476353	6,5	572
06/11/2003	23:00	497007	7	568
07/11/2003	0:00	500981	7,3	568
07/11/2003	1:00	500912	6,4	556
07/11/2003	2:00	445847	6	565
07/11/2003	3:00	447789	5,4	558
07/11/2003	4:00	436098	5	551
07/11/2003	5:00	405334	5,3	546
07/11/2003	6:00	404489	4,5	553
07/11/2003	7:00	415282	4,4	551
07/11/2003	8:00	382177	4,6	549
07/11/2003	9:00	347784	4,3	550
07/11/2003	10:00	362205	4,4	534
07/11/2003	11:00	355308	4,9	494
07/11/2003	12:00	287423	4,5	519
07/11/2003	13:00	252556	5	505
07/11/2003	14:00	238727	4,8	509
07/11/2003	15:00	159967	5,9	506
07/11/2003	16:00	138652	6,5	493
07/11/2003	17:00	126601	7	485
07/11/2003	18:00	141293	6,5	471
07/11/2003	19:00	125350	5,8	451
07/11/2003	20:00	101482	5,9	444
07/11/2003	21:00	97666	5,9	430
07/11/2003	22:00	49378	8,2	415
07/11/2003	23:00	58511	8	417
08/11/2003	0:00	71154	5,7	424
08/11/2003	1:00	76600	4,4	431
08/11/2003	2:00	72893	5	432
08/11/2003	3:00	84348	5,5	429
08/11/2003	4:00	138987	5,5	431
08/11/2003	5:00	134450	6,2	427
08/11/2003	6:00	124525	6,3	430
08/11/2003	7:00	97534	8,4	422
08/11/2003	8:00	99256	9,8	417
08/11/2003	9:00	86392	10,1	415
08/11/2003	10:00	78419	11,9	421
08/11/2003	11:00	96151	12,7	425
08/11/2003	12:00	89051	16,4	429
08/11/2003	13:00	94429	19,4	424
08/11/2003	14:00	81206	26,2	432
08/11/2003	15:00	98388	26	428
08/11/2003	16:00	98942	15,4	443
08/11/2003	17:00	107415	4,9	439
08/11/2003	18:00	111926	5,6	443

08/11/2003	19:00	92248	4,7	442
08/11/2003	20:00	146476	4,5	444
08/11/2003	21:00	187373	5,3	488
08/11/2003	22:00	184192	5,5	481
08/11/2003	23:00	221190	5,5	479
09/11/2003	0:00	162734	5	488
09/11/2003	1:00	152648	4,6	497
09/11/2003	2:00	144938	4,6	494
09/11/2003	3:00	144232	4,5	511
09/11/2003	4:00	159675	4,4	511
09/11/2003	5:00	145278	4,1	504
09/11/2003	6:00	132278	3,6	507
09/11/2003	7:00	130714	4,1	524
09/11/2003	8:00	139543	4,6	553
09/11/2003	9:00	167221	4,6	538
09/11/2003	10:00	184624	4,8	551
09/11/2003	11:00	170788	6,5	571
09/11/2003	12:00	176540	6,6	542
09/11/2003	13:00	148616	6,4	558
09/11/2003	14:00	173797	4	556
09/11/2003	15:00	233839	4,6	568
09/11/2003	16:00	224943	4,8	557
09/11/2003	17:00	218866	4,5	566
09/11/2003	18:00	191980	4	582
09/11/2003	19:00	224676	4,1	565
09/11/2003	20:00	202423	4,2	564
09/11/2003	21:00	194560	4,2	569
09/11/2003	22:00	170520	4,6	563
09/11/2003	23:00	185872	4,6	556