

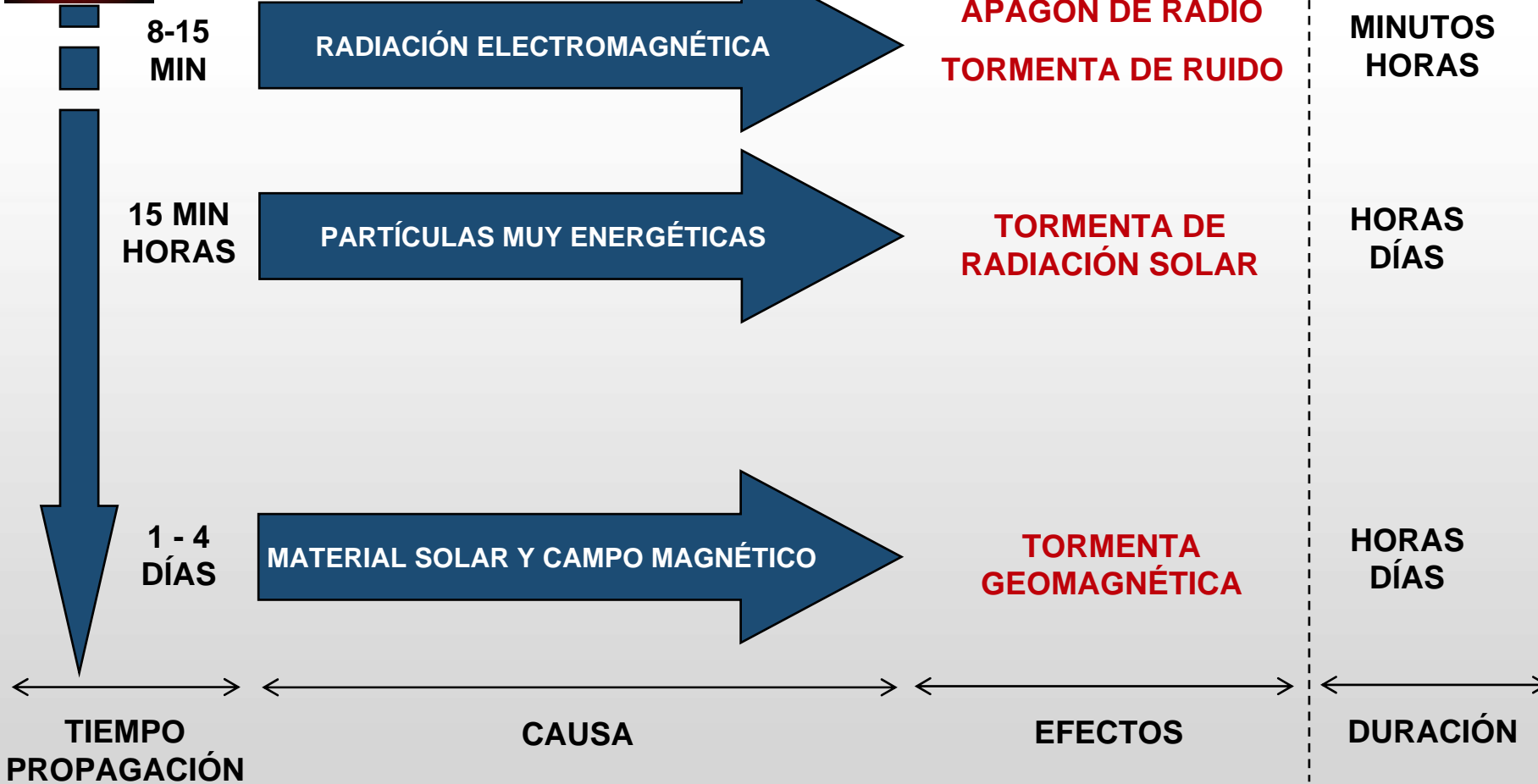
Impacto de los Eventos Severos del Clima Espacial en las Radiocomunicaciones Terrestres

Red Radio de Emergencia - REMER -



Ismael Pellejero Ibáñez
Jornadas sobre el Clima Espacial
Escuela Nacional de Protección Civil
Madrid, 23-24 de Marzo de 2011

EVENTOS DE INTERÉS





APAGONES DE RADIO

Descenso abrupto en el nivel de las señales de HF, con una duración de minutos a horas, causada por un aumento de ionización en el lado del día terrestre, tras una llamarada solar.

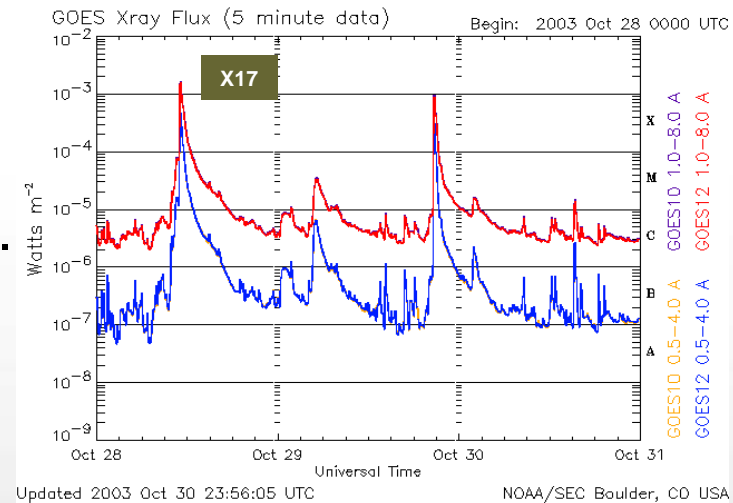


APAGONES DE RADIO

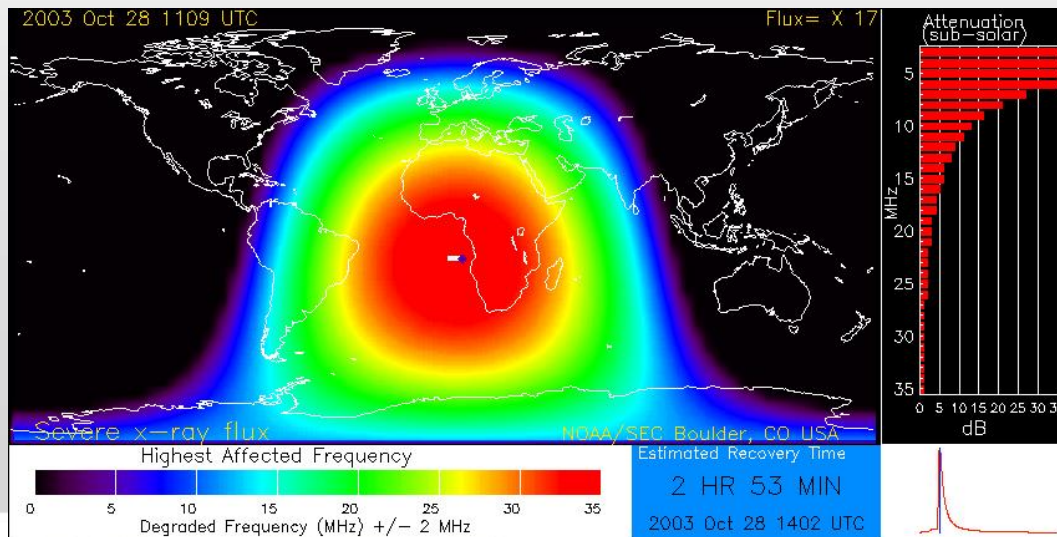


Emisión de Rayos X tras erupción solar.

- Alcanzan la Tierra en unos minutos.
- Afectan a la zona diurna durante horas.
- Gran absorción en la banda de HF.
- Empeoramiento SNR en HF.
- Posible mejora SNR en MF.



NOAA/GOES-12



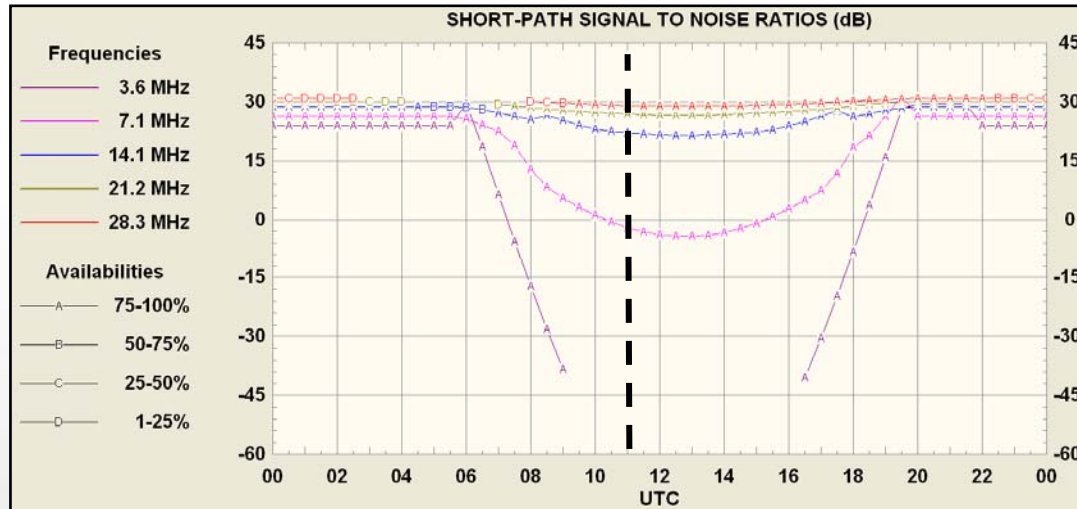
NOAA/DRAP-2

APAGONES DE RADIO

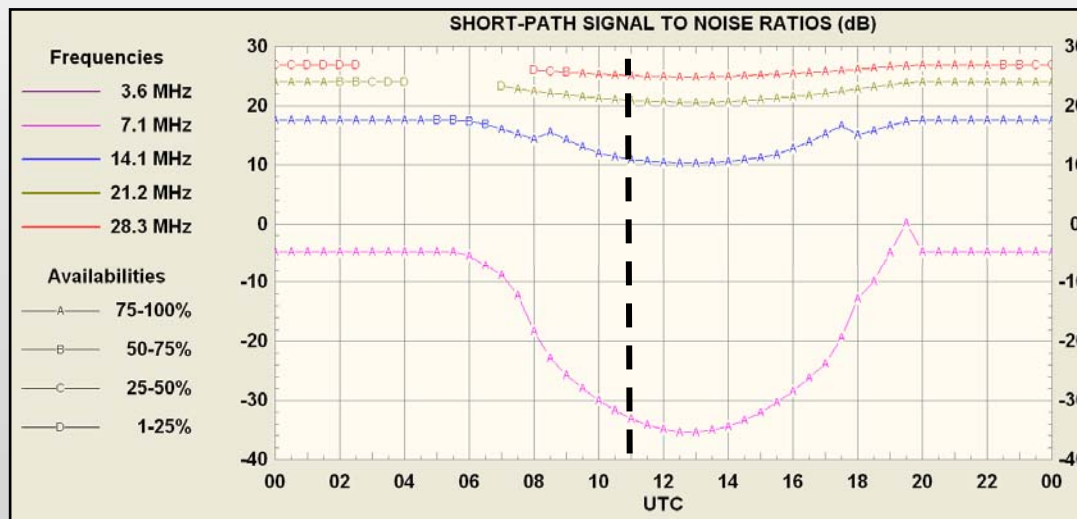


SIMULACIÓN ENLACES HF MADRID-CANARIAS

- W6ELProp
- $P_{Tx} = 100 \text{ W}$
- SSB (BW = 2400 Hz)
- SFI = 274, $K_p = 3$
- Antenas dipolo
- 1 salto en capa F



← SITUACIÓN NORMAL



← DEGRADACIÓN POR LLAMARADA SOLAR CLASE X17

Frecuencia (MHz)	Absorción Región D (dB)
3,6	86,2
7,1	31,1
14,1	11,1
21,2	6,0
28,3	3,91

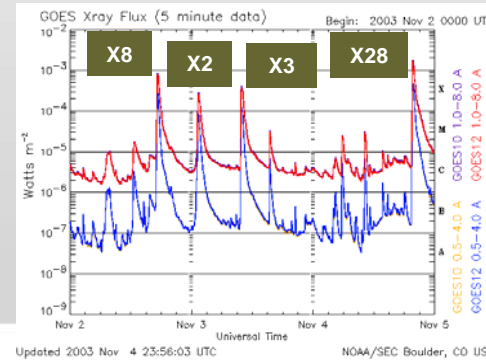
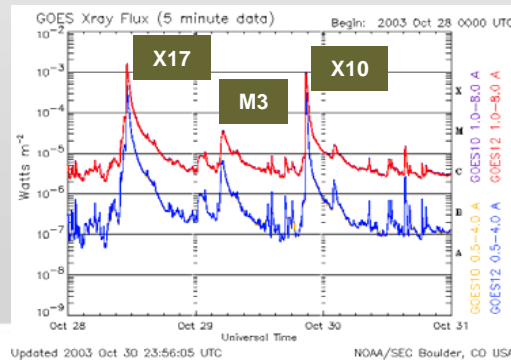
APAGONES DE RADIO

Escala R de NOAA



Bloqueos de Radio			Brillo pico de rayos X de GOES por clases (y por flujo*)	Número de eventos para el nivel de flujo señalado ; (tormentas días)
R 5	Extremo	<u>Radio HF:</u> Bloqueo completo por varias horas de HF (altas frecuencias**) en todo el lado diurno terrestre. Esto resulta en que no hay comunicación HF con marineros o aviadores en este sector. <u>Navegación:</u> Se interrumpen por varias horas las señales de baja frecuencia utilizadas por los sistemas de navegación en el lado diurno del planeta, provocando pérdidas en los sistemas de posicionamiento. Durante un periodo similar, se incrementan los errores de los sistemas de navegación por satélites en el lado diurno, lo que puede extenderse al lado nocturno de la Tierra.	X20 (2×10^{-3})	Menos de 1 por ciclo
R 4	Severo	<u>Radio HF:</u> Bloqueo de HF por una a dos horas, durante este tiempo se pierde el contacto por radio HF. <u>Navegación:</u> Las interrupciones por una a dos horas de las señales de navegación de baja frecuencia incrementan el error en los posicionamientos. Posibilidad de interrupciones menores en los sistemas de navegación por satélites en el lado diurno.	X10 (10^{-3})	8 por ciclo (8 días por ciclo)
R 3	Fuerte	<u>Radio HF:</u> Bloqueo de las señales HF en amplias áreas, pérdida durante cerca de una hora del contacto por radio en el lado diurno de la Tierra. <u>Navegación:</u> Disminución de la calidad de las señales de baja frecuencia durante aproximadamente una hora.	X1 (10^{-4})	175 por ciclo (140 días por ciclo)
R 2	Moderado	<u>Radio HF:</u> Bloqueo limitado de las señales HF en el lado diurno, pérdida de radio contacto por decenas de minutos. <u>Navegación:</u> Alteración de las señales de navegación de baja frecuencia por decenas de minutos.	M5 (5×10^{-5})	350 por ciclo (300 días por ciclo)
R 1	Menor	<u>Radio HF:</u> Afectaciones débiles o menores de las señales de HF en el lado diurno, pérdida ocasional de radio comunicación. <u>Navegación:</u> Alteraciones de corta duración de las señales de navegación de baja frecuencia.	M1 (10^{-5})	2000 por ciclo (950 días por ciclo)

* Flujo, medido en el rango de 0.1-0.8 nm, en $W \cdot m^{-2}$. Basado en esta medida, pero otras medidas físicas pueden también ser consideradas ** Otras frecuencias también pueden ser afectadas por estas condiciones.



NOAA/GOES-12



TORMENTAS DE RUIDO

Incremento transitorio en las emisiones de radio procedentes del Sol, particularmente en torno a 250 MHz, con una duración comprendida entre horas y días



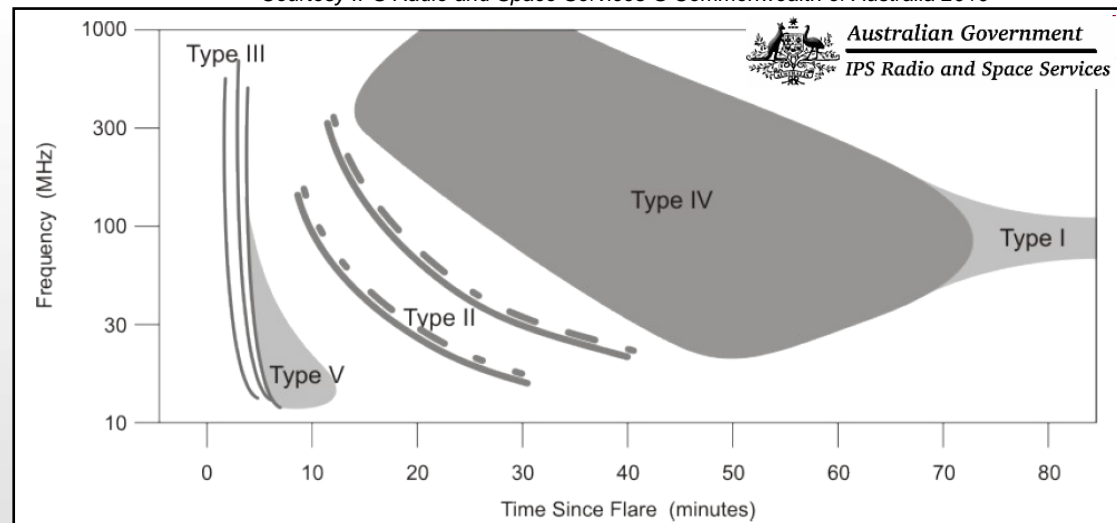
TORMENTAS DE RUIDO



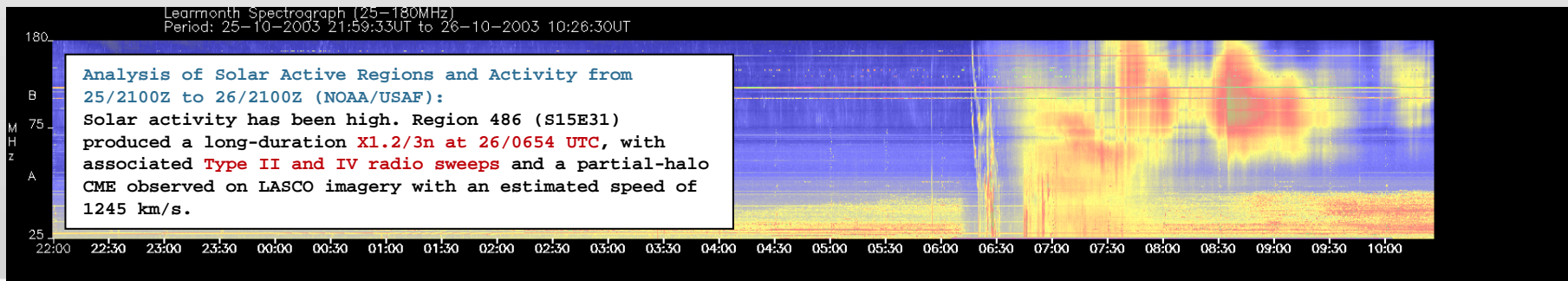
Radiación electromagnética emitida por el Sol en bandas de radio tras una erupción, afectando a la zona diurna de la Tierra en unos 5-15 minutos.

- Corta duración (minutos), posibles concatenaciones.
- RFI en las bandas de HF/VHF/UHF.

Courtesy IPS Radio and Space Services © Commonwealth of Australia 2010



IPS LEARMONTH SPECTROGRAPH





TORMENTAS RADIACIÓN SOLAR

Incremento en el número de protones con energía superior a 10 MeV en las proximidades de la Tierra, tras una llamarada solar acompañada de CME, con una duración de varios días

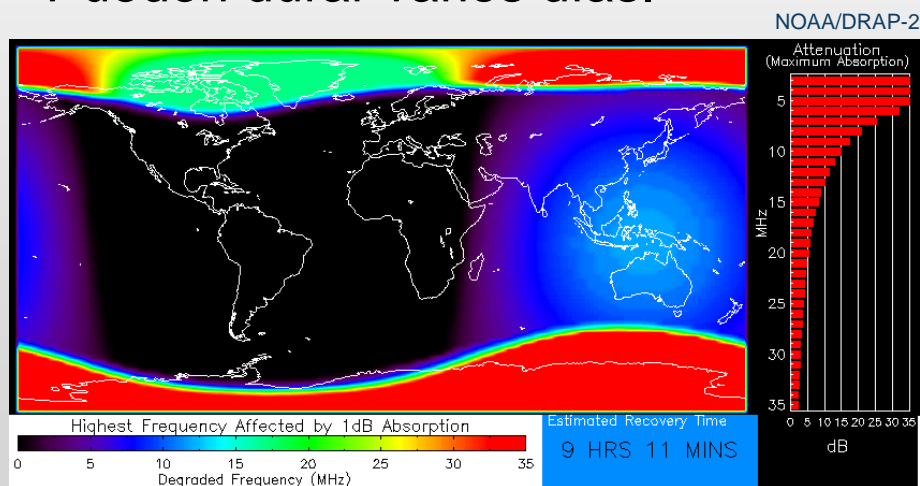


TORMENTAS DE RADIACIÓN SOLAR



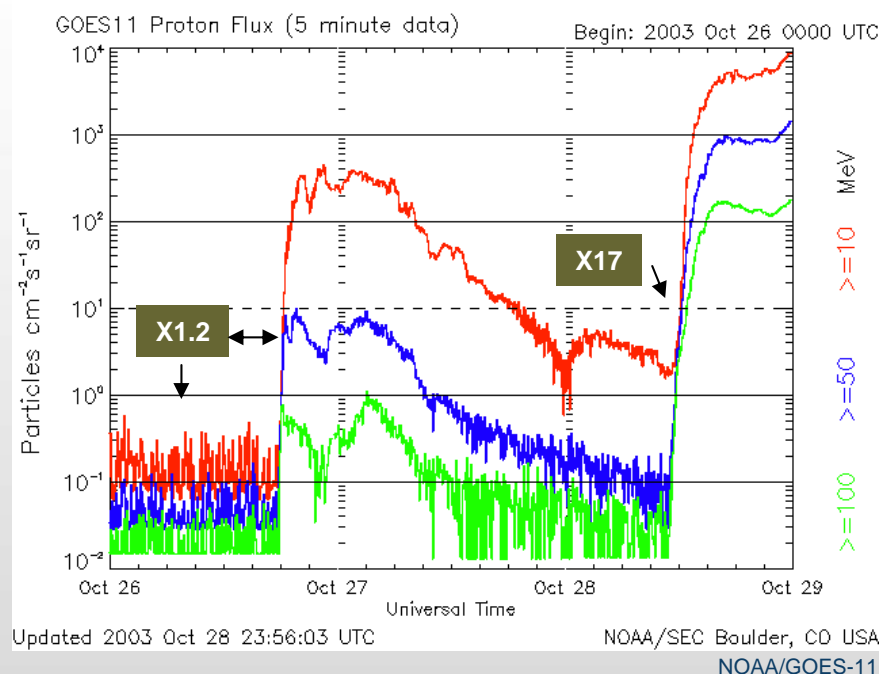
Partículas de alto valor energético incorporadas al viento solar, que alcanzan a la Tierra entre 15 minutos y algunas horas tras la erupción.

- Absorción en la banda de HF.
- Eventos PCA: gran absorción en trayectos de HF a través de zonas polares. Aumento de la LUF.
- Pueden durar varios días.



Normal X-ray Background
Product Valid At : 2011-03-08 03:24 UTC

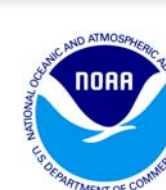
Minor Proton Flux
NOAA/SWPC Boulder, CO USA



28 Oct 88 Fair-normal (IPS)
MUFS:
Antarctic Region (Casey/Scott Base):
Proton event in progress, increased absorption observed.
IPS

TORMENTAS DE RADIACIÓN SOLAR

Escala S de NOAA



Tormentas de Radiación Solar			Nivel de flujo ≥ 10 MeV partículas (iones)*	Número de eventos para el nivel de flujo señalado; tormentas días**
S 5	Extremo	<p>Biológicos: Peligro inevitable de alta radiación para astronautas en AEV (actividades extra-vehiculares); son posibles altos niveles de radiación para pasajeros y tripulación de naves aéreas comerciales a altas latitudes (equivalente a unas 100 radiografías del torso).</p> <p>Operaciones de satélites: Pérdida de algunos satélites, daños en memoria provocan pérdida de control, intenso ruido en datos de imágenes, los seguidores de estrellas no pueden localizar las fuentes, daño permanente a paneles solares.</p> <p>Otros sistemas: No se pueden establecer comunicaciones HF (alta frecuencia) en las regiones polares, los errores en los sistemas de posicionamiento hacen la navegación extremadamente difícil.</p>	10^5	Menos que 1 por ciclo
S 4	Severo	<p>Biológicos: Peligro inevitable de alta radiación para astronautas en AEV; son posibles altos niveles de radiación para pasajeros y tripulación de naves aéreas comerciales a altas latitudes (equivalente a unas 10 radiografías del torso).</p> <p>Operaciones de satélites: Dificultades con los dispositivos de memoria, ruidos en sistemas de imágenes, malfuncionamiento en los localizadores de estrellas causan problemas de orientación, los paneles solares son afectados.</p> <p>Otros sistemas: Bloqueo de las comunicaciones HF a través de las regiones polares, incremento en los errores de navegación durante varios días.</p>	10^4	3 por ciclo
S 3	Fuerte	<p>Biológicos: Se recomienda que los astronautas en AEV eviten los peligros de radiación; son posibles bajos niveles de radiación para pasajeros y tripulación de naves aéreas comerciales a altas latitudes (equivalente a 1 radiografía del torso).</p> <p>Operaciones de satélites: Ocurrencia de eventos simples, ruido en las señales de imágenes, es posible ligera disminución de la eficiencia de los paneles solares.</p> <p>Otros sistemas: Se deteriora la radio comunicación HF a través de las regiones polares, posibilidad de algunos errores en los sistemas de navegación.</p>	10^3	10 por ciclo
S 2	Moderado	<p>Biológicos: Ningún efecto.</p> <p>Operaciones de satélites: Baja probabilidad de ocurrencia de eventos simples.</p> <p>Otros sistemas: Efectos no importantes en la propagación HF y en los sistemas de navegación a través de las regiones polares.</p>	10^2	25 por ciclo
S 1	Menor	<p>Biológicos: Ningún efecto.</p> <p>Operaciones de satélites: Ningún efecto.</p> <p>Otros sistemas: Afectaciones menores a las señales HF en las regiones polares.</p>	10	50 por ciclo

* Los niveles de flujo son promedios sobre 5 minutos, en partículas $\text{s}^{-1}\text{ster}^{-1}\text{cm}^{-2}$ Basado en esta medida, pero otras medidas físicas pueden también ser consideradas. ** Estos eventos pueden permanecer por más de un día.



TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS

Perturbación global del campo geomagnético, distinta de las variaciones diarias normales, causada por una nube de material solar y su campo magnético asociado que alcanzan a la Tierra entre 1 y 4 días tras una llamarada solar.



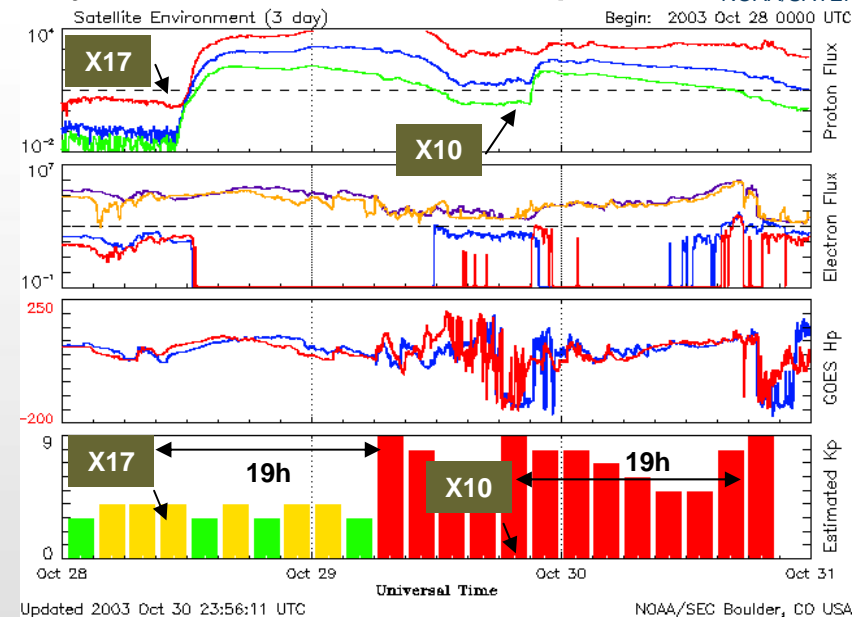
TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS



Causadas por una nube de material solar y su campo magnético asociado que alcanzan a la Tierra entre 1 y 4 días tras una erupción.

NOAA/SATENV

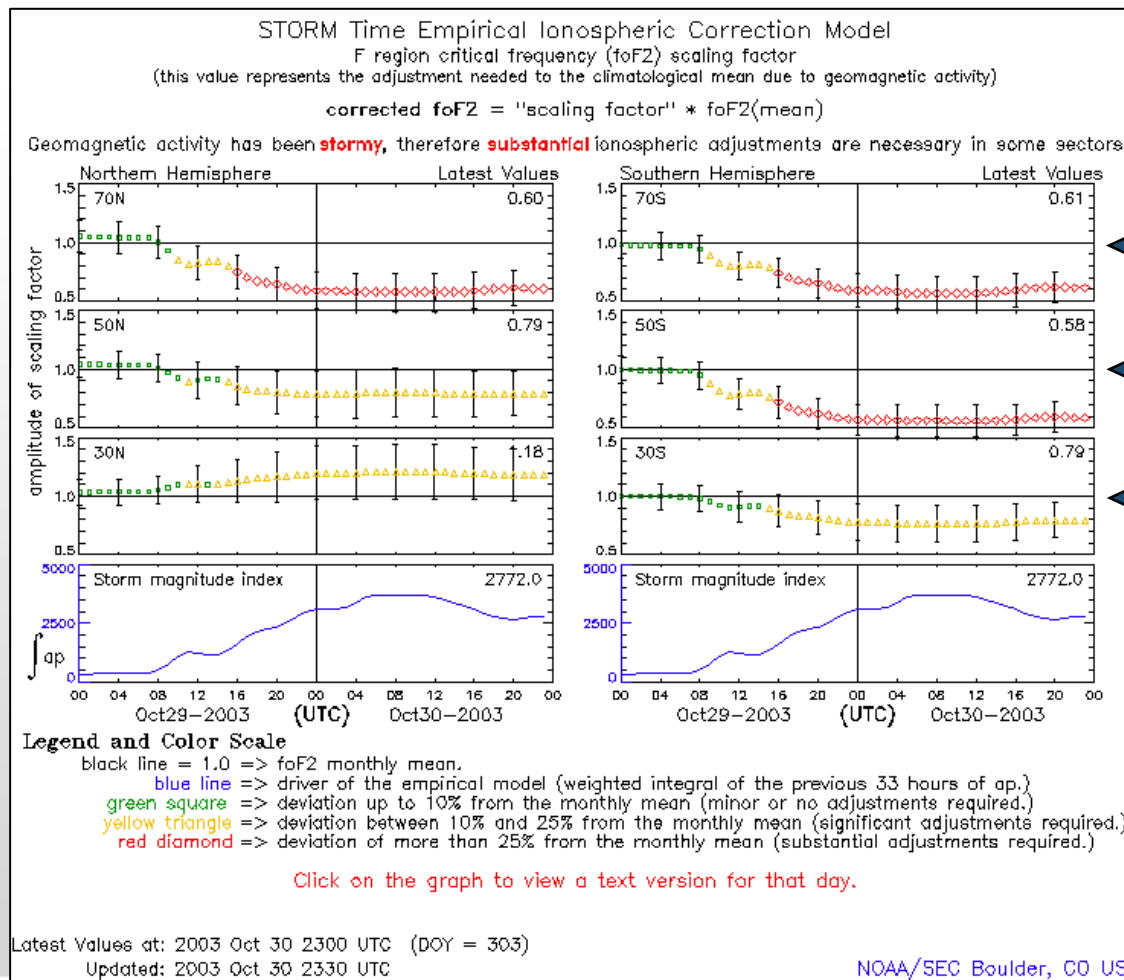
- **HF:** absorción y dispersión.
- **HF:** variaciones de la MUF:
 - Negativas: cierre bandas HF.
 - Positivas: apertura de bandas HF.
- **VHF/UHF:** trayectos anómalos en latitudes altas (propagación auroral).
- **Duración estimada:**
 - Horas (latitudes medias).
 - Entre 10-20 días (latitudes altas).



30 Oct -16 Poor IPS
MUFs:
Equatorial PNG Region:
Depressed by 35% during local day,
Depressed by 50% during local night.
Northern Australian Region:
Depressed by 55% during local day,
Depressed by 35% during local night.
Southern Australian and New Zealand Region:
Depressed by 35% during local day,
Near predicted monthly values during local night.
Depressed by 35% after local dawn.
Antarctic Region (Casey/Scott Base):
Proton event in progress, increased absorption observed.

TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS

Variaciones de foF2 durante la Tormenta de Halloween (10/2003)



LATITUD 70° N/S

LATITUD 50° N/S

LATITUD 30° N/S

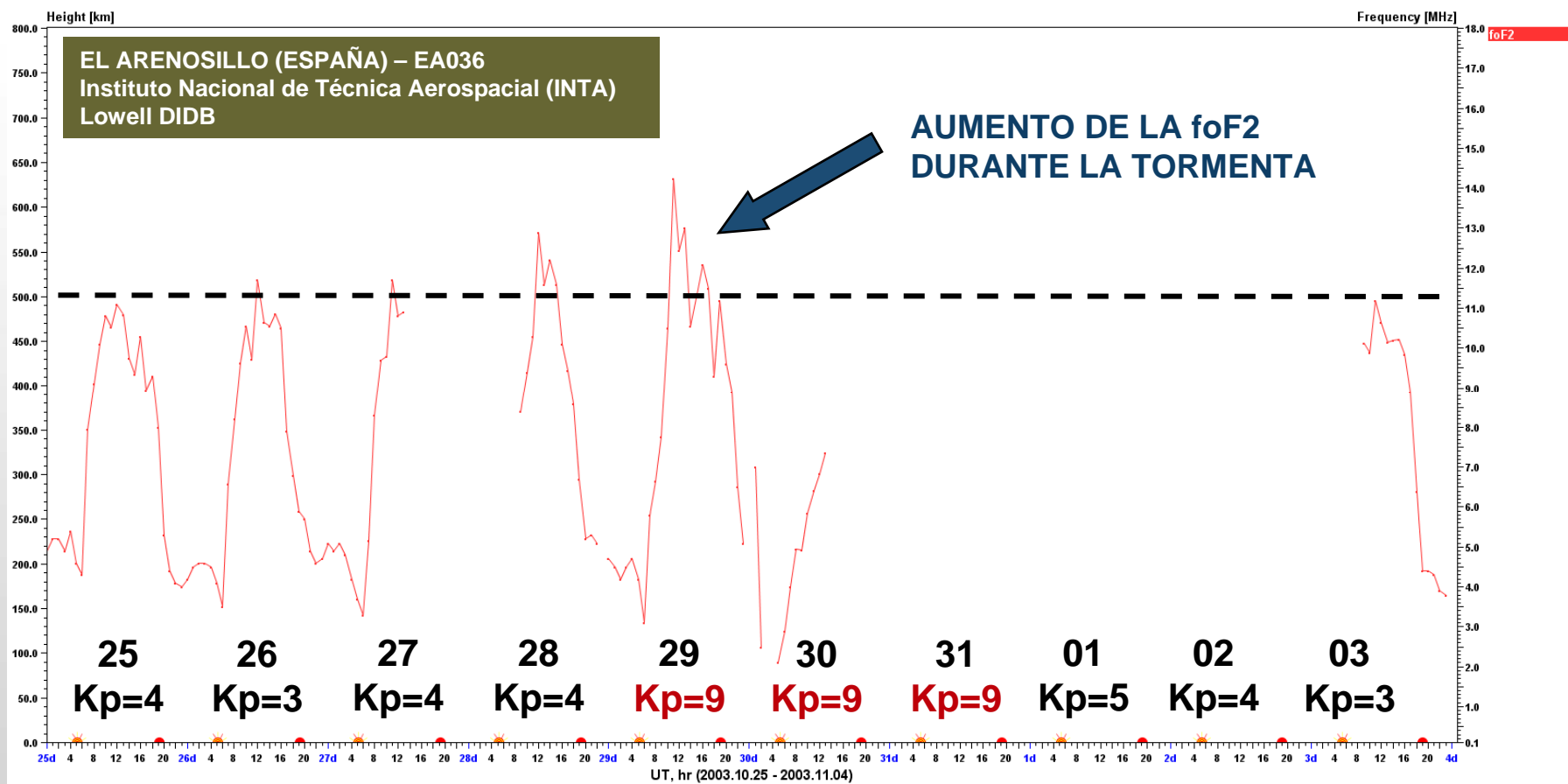
**LAS VARIACIONES DE foF2
 DEPENDEN DEL HEMISFERIO
 TERRESTRE Y DE LA LATITUD**

TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS

Mediciones de foF2 durante la Tormenta de Halloween (10/2003)



Characteristics, EA036, DGS-256, SAO Explorer, v 3.4.14b5

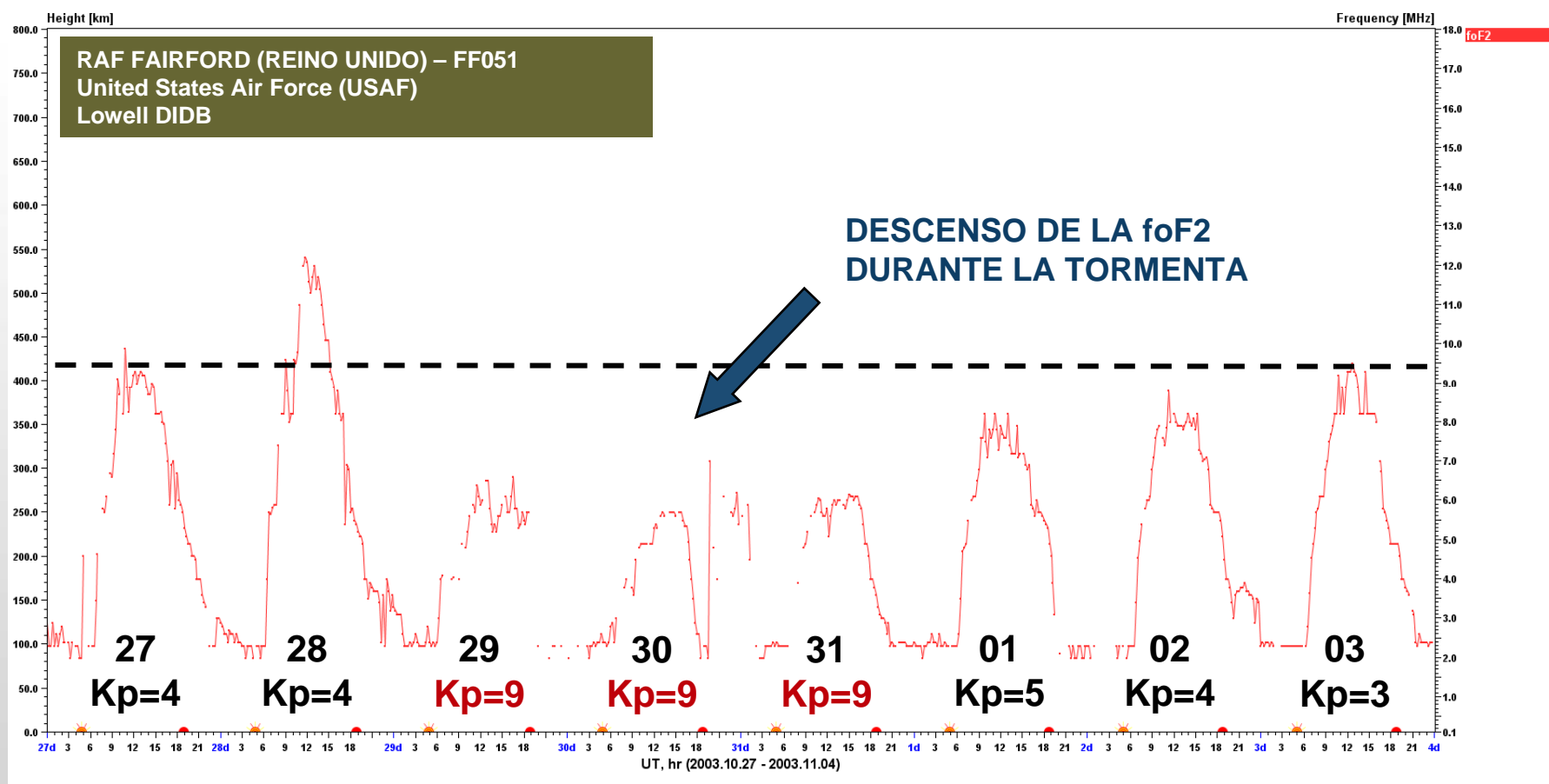


TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS



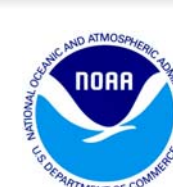
Mediciones de foF2 durante la Tormenta de Halloween (10/2003)

Characteristics, FF051, DGS-256, SAO Explorer, v 3.4.14b5



TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS

Escala G de NOAA



Tormentas Geomagnéticas			Valores de Kp* determinados cada 3 horas	Número de tormentas para el valor de Kp señalado; (tormentas días)
G 5	Extremo	<p><u>Sistemas Eléctricos de Trasmisión:</u> Amplios problemas de control del voltaje y de los sistemas de protección. Algunas redes de transmisión pueden colapsar, y los transformadores pueden llegar a sufrir daños.</p> <p><u>Operaciones de sistemas espaciales:</u> Inducción de carga eléctrica superficial extensiva, dificultades con la orientación, problemas con los enlaces y el seguimiento de satélites.</p> <p><u>Otros sistemas:</u> La corriente inducida en las redes de combustibles es de cientos de amperes, en extensas áreas se bloquean las ondas de radio de alta frecuencia (HF) por varios días, se afecta la navegación por satélites durante un intervalo similar, se bloquea por horas la navegación por señales de baja frecuencia, y pueden verse auroras en zonas como Florida y el sur de Texas (típicamente 40° de latitud geomagnética)**.</p>	Kp = 9	4 por ciclo (4 días por ciclo)
G 4	Severo	<p><u>Sistemas Eléctricos de Trasmisión:</u> Posibilidad de amplios problemas de control del voltaje y de los sistemas de protección, irregular funcionamiento de la red de trasmisión.</p> <p><u>Operaciones de sistemas espaciales:</u> Posibilidad de inducción de carga eléctrica superficial y de dificultades con el seguimiento, se podrían requerir correcciones a los problemas de orientación.</p> <p><u>Otros sistemas:</u> La inducción eléctrica en las redes de distribución de combustibles afecta las medidas preventivas, hay bloqueos esporádicos de señales de radio de HF, se afecta durante varias horas la navegación por satélites, se afecta la navegación por baja frecuencia, la aurora ha sido observada hasta en Alabama y el norte de California (típicamente 45° de latitud geomagnética)**.</p>	Kp = 8, incluyendo a 9-	100 por ciclo (60 días por ciclo)
G 3	Fuerte	<p><u>Sistemas Eléctricos de Trasmisión:</u> Se podrían requerir acciones de control del voltaje, se disparan en falso las alarmas de protección.</p> <p><u>Operaciones de sistemas espaciales:</u> Posibilidad de inducción de carga eléctrica en los componentes, puede ocurrir un incremento de la razón de decaimiento de satélites de órbitas bajas, podrían requerirse correcciones de la orientación.</p> <p><u>Otros sistemas:</u> Intermitencia en la navegación por satélites y por señales de baja frecuencia, señales de radio de HF intermitentes, la aurora ha sido observada hasta en Illinois y Oregon (típicamente 50° de latitud geomagnética)**.</p>	Kp = 7	200 por ciclo (130 días por ciclo)
G 2	Moderado	<p><u>Sistemas Eléctricos de Trasmisión:</u> Pueden producirse alarmas de voltaje en los sistemas de distribución de altas latitudes. Tormentas de larga duración pueden producir daño en transformadores.</p> <p><u>Operaciones de sistemas espaciales:</u> Se requieren acciones correctivas por el centro de control, los cambios en el decaimiento de los satélites afectan los cálculos de órbitas.</p> <p><u>Otros sistemas:</u> La propagación de señales de HF se desvanece a altas latitudes, la aurora se ha visto hasta en New York e Idaho (típicamente 55° de latitud geomagnética)**.</p>	Kp = 6	600 por ciclo (360 días por ciclo)
G 1	Menor	<p><u>Sistemas Eléctricos de Trasmisión:</u> Débiles fluctuaciones de potencia.</p> <p><u>Operaciones de sistemas espaciales:</u> Afectaciones menores a la operación de satélites.</p> <p><u>Otros sistemas:</u> Los animales migratorios se ven afectados a este y a niveles superiores. La aurora se ve comúnmente a altas latitudes (Norte de Michigan y Maine)**.</p>	Kp = 5	1700 por ciclo (900 días por ciclo)

* puede ser substituido por otras medidas, como el DST. ** Para determinar la posibilidad de observar la aurora en lugares específicos, utilice el valor local de la latitud geomagnética (vea www.sec.noaa.gov/Aurora)



CLIMA ESPACIAL

USUARIOS DE SERVICIOS DE
RADIOCOMUNICACIONES TERRESTRES
POTENCIALMENTE AFECTADOS



USUARIOS POSIBLEMENTE AFECTADOS

RR UIT / CNAF 2010



Banda	Frecuencias	Servicios	Efectos
VLF	3 kHz a 30 kHz	<ul style="list-style-type: none">▪ Usos del Estado▪ Fijo▪ Móvil marítimo▪ Frecuencias patrón/horarias▪ Radionavegación (aplicaciones de bucle inductivo)	<ul style="list-style-type: none">▪ Erupción solar: Anomalías repentinas de fase y amplitud. Mejora ocasional en niveles de señal (>16 kHz). Perturbaciones ionosféricas (SID) que provocan reflexiones ionosféricas anómalas, incluso en la capa D.▪ Tormenta de radiación solar: Distorsión de fase y atenuación.▪ Tormenta geomagnética: Variaciones irregulares de fase y amplitud, con periodos de 10 segundos a minutos, especialmente de noche y en circuitos largos.

USUARIOS POSIBLEMENTE AFECTADOS

RR UIT / CNAF 2010



Banda	Frecuencias	Servicios	Efectos
LF	30 kHz a 300 kHz	<ul style="list-style-type: none">▪ Usos del Estado▪ Fijo▪ Móvil marítimo▪ Radioaficionados▪ Radiodifusión▪ Radionavegación (Loran, Chayka)	<ul style="list-style-type: none">▪ Erupción solar: Anomalías repentinas de fase y amplitud. Mejora ocasional en niveles de señal. Errores en sistemas de radionavegación de hasta 10 millas náuticas.▪ Tormenta de radiación solar / geomagnética: Distorsión en fase y amplitud (atenuación) en trayectos que atraviesan los polos.
MF	300 kHz a 3 MHz	<ul style="list-style-type: none">▪ Radionavegación aeronáutica y marítima▪ Móvil marítimo▪ Móvil aeronáutico▪ Radiodifusión▪ Radiolocalización▪ Radioaficionados▪ Frecuencias patrón/horarias	<ul style="list-style-type: none">▪ Erupción solar: Anomalías repentinas de fase y amplitud. Mejora de la SNR en enlaces por onda de tierra, al disminuir el nivel de ruido por onda aérea, debido al incremento en la absorción▪ Tormenta de radiación solar / geomagnética : Distorsión en fase y amplitud (atenuación) en trayectos que atraviesan los polos.

USUARIOS POSIBLEMENTE AFECTADOS

RR UIT / CNAF 2010



Banda	Frecuencias	Servicios	Efectos
HF	3 MHz a 30 MHz	<ul style="list-style-type: none">▪ Usos del Estado▪ Fijo▪ Móvil terrestre▪ Móvil marítimo▪ Móvil aeronáutico▪ Radiodifusión▪ Radioaficionados▪ Frecuencias patrón/horarias▪ Investigación espacial▪ Radioastronomía▪ Ayudas a la meteorología	<ul style="list-style-type: none">▪ Apagón de HF: emisiones de rayos X solares provocan aumento de la absorción en la capa D (<i>fading</i>) durante unas horas, en el lado diurno. Mejora de la SNR en enlaces por onda de tierra, al disminuir el nivel de ruido por onda aérea, debido al incremento en la absorción▪ Tormentas de ruido: incremento en el nivel de ruido, empeoramiento de la SNR. Duración desde decenas de minutos hasta una hora.▪ Tormenta de radiación solar: aumento de la absorción en trayectos que atraviesan los polos (PCA).▪ Tormenta geomagnética: variaciones en la foF2 y en la MUF, dependientes de la latitud y el Hemisferio (hasta un 50%).

USUARIOS POSIBLEMENTE AFECTADOS

RR UIT / CNAF 2010



Banda	Frecuencias	Servicios	Efectos
VHF	30 MHz a 300 MHz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Usos del Estado ▪ Fijo ▪ Móvil terrestre ▪ Móvil aeronáutico ▪ Móvil marítimo ▪ Móvil por satélite ▪ Radiodifusión ▪ Radiodifusión por satélite ▪ Radionavegación aeronáutica ▪ Radionavegación por satélite ▪ Radioaficionados ▪ Radiolocalización ▪ Meteorología ▪ Radioastronomía ▪ Operaciones espaciales ▪ Investigación espacial ▪ Exploración de la Tierra por satélite 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En general, poca afectación, ya que en radiocomunicaciones terrestres no se emplea a la ionosfera como reflector. ▪ Tormentas de ruido: incremento en el nivel de ruido en zona diurna, empeoramiento de la SNR. Duración desde decenas de minutos hasta una hora. ▪ Tormentas geomagnéticas: en las zonas próximas a la aurora oval, sobrealcances en la banda de VHF e incluso en la parte muy baja de UHF, debidos a propagación auroral.
UHF	300 MHz a 3 GHz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Usos del Estado ▪ Fijo ▪ Móvil terrestre ▪ Móvil aeronáutico ▪ Móvil marítimo ▪ Móvil por satélite ▪ Radiodifusión ▪ Radiodifusión por satélite ▪ Radionavegación aeronáutica ▪ Radionavegación por satélite ▪ Radioaficionados ▪ Radiolocalización ▪ Meteorología ▪ Radioastronomía ▪ Operaciones espaciales ▪ Investigación espacial ▪ Exploración de la Tierra por satélite 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En general, poca afectación, ya que en radiocomunicaciones terrestres no se emplea a la ionosfera como reflector. ▪ Tormentas de ruido: incremento en el nivel de ruido en zona diurna, empeoramiento de la SNR. Duración desde decenas de minutos hasta una hora. ▪ Tormentas geomagnéticas: en las zonas próximas a la aurora oval, sobrealcances en la banda de VHF e incluso en la parte muy baja de UHF, debidos a propagación auroral.



CLIMA ESPACIAL

IMPACTO EN LOS SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES TERRESTRES

CONCLUSIONES



CONCLUSIONES

Afectación a radiocomunicaciones terrestres



Matriz de riesgos posibles más significativos

Banda	Anomalías			RFI	Apagón Radio	SNR		Variac. MUF
	Fase	Amplitud	Trayecto			Mejora	Empeora	
VLF	ERG	ERG	E			E		
LF	ERG	ERG				E		
MF	ERG	ERG				E		
HF		ER		E	ER	E	ER	G
V/UHF			G	E			E	

E = Erupción solar (llamarada)
R = Tormenta de radiación solar (SPE)
G = Tormenta geomagnética

CONCLUSIONES

Afectación a radiocomunicaciones terrestres



Otros aspectos a considerar

- El grado de afectación depende de la **intensidad** de los eventos.
- La concatenación de eventos puede aumentar la **duración** de los periodos de degradación o corte del servicio.
- La utilización de determinadas tecnologías digitales de radiocomunicaciones puede ayudar a **minimizar** algunos efectos.
- **Interdependencias:**
 - Dependencia de sistemas de suministro eléctrico (posible afectación).
 - Multitud de sistemas dependen a su vez de las radiocomunicaciones terrestres.



**GRACIAS POR SU
ATENCIÓN.**

Ismael Pellejero Ibáñez
Ingeniero de Telecomunicación
Red Radio de Emergencia – REMER –

www.proteccioncivil.org

REMER – Red Radio de Emergencia.

Dirección General de Protección Civil y Emergencias.

Calle Quintiliano, 21

E-28002. Madrid (España).

Tel: +34 91 537 31 00

Fax: +34 91 562 89 41

Email: remer@procivil.mir.es

ismael.pellejero@gmail.com