

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Esta investigación se ha centrado en profundizar en el conocimiento del comportamiento de la estructura vertical de la región F de la ionosfera, tanto en condiciones de calma como perturbadas, y en su modelado mediante funciones analíticas simples.

La primera parte de la investigación se ha dedicado al estudio de la región ionosférica F visible desde tierra situada entre 150 km y 350 km de altura aproximadamente en condiciones de calma. La pretensión de este estudio ha sido determinar el comportamiento característico del espesor y la forma del perfil de densidad electrónica de esta región y obtener un modelo que mejore la predicción actual de estas características ionosféricas. En el modelo Internacional de Referencia de la Ionosfera (IRI), estas características ionosféricas están definidas por los parámetros $B0$ y $B1$ respectivamente. Este trabajo ha venido motivado por las significativas discrepancias existentes entre las predicciones de estos parámetros realizadas por el IRI y los valores experimentales en condiciones de calma. Las principales aportaciones de esta investigación en este sentido se resumen a continuación:

- 1) Se ha determinado el comportamiento diurno y estacional de los parámetros que determinan el espesor ($B0$) y la forma ($B1$) del perfil de densidad electrónica promedio en condiciones de calma y en latitudes medias. Se ha determinado la dependencia del comportamiento anterior en función de la actividad solar.

2) Se han identificado discrepancias significativas entre estos valores experimentales y los valores de estos parámetros predichos por el IRI. Se ha identificado que las predicciones del IRI están sesgadas con la actividad solar, de manera que este modelo proporciona una mejor predicción en alta actividad solar.

3) Se ha determinado la formulación de modelos locales que simulan las variaciones temporales de los parámetros $B0$ y $B1$ en latitudes medias con una mejora significativa respecto la predicción del IRI. Se ha comprobado la aplicabilidad de esta técnica de modelado a otras latitudes y a otras características ionosféricas.

4) Se han determinado las variaciones latitudinales y longitudinales del comportamiento temporal de estos parámetros y su dependencia con la actividad solar. Se han desarrollado sendos modelos para $B0$ y $B1$ a escala global mediante la técnica de análisis de armónicos esféricos. Estos modelos están basados en funciones analíticas simples que simulan las variaciones diurnas, estacionales y latitudinales de $B0$ y $B1$ en función de la actividad solar.

5) Los modelos globales obtenidos en este estudio mejoran la predicción de $B0$ en un 40% y la de $B1$ en un 20% respecto las predicciones del IRI por lo que se erigen como firmes candidatos a ser incluidos en futuras versiones del IRI.

Con este trabajo se ha conseguido identificar las variaciones temporales de $B0$ y $B1$ a diferentes latitudes. Se ha identificado una variación diurna y semidiurna que depende de la estación del año, actividad solar y latitud. El carácter periódico de estas variaciones permite que puedan ser modeladas utilizando funciones armónicas, de manera que para realizar el modelado de los parámetros $B0$ y $B1$ a escala global se ha utilizado el análisis de armónicos esféricos como técnica analítica. La opción estándar del IRI no tiene en cuenta las variaciones semidiurnas que se observan en invierno para ambos parámetros, no reproduce la variación estacional y con el ciclo solar del parámetro $B1$ y no tiene en cuenta las variaciones del comportamiento de estos parámetros en latitud. Éstas son las principales razones por las que la

predicción de estos parámetros a partir del modelo empírico obtenido en este estudio mejora significativamente con respecto a las predicciones realizadas por el IRI. Además, se ha observado que la precisión de las predicciones del IRI depende de la actividad solar, mientras que esta dependencia prácticamente ha desaparecido en las predicciones realizadas a partir del modelo empírico. La mejora en la predicción de estos parámetros permitirá obtener un perfil vertical de la densidad electrónica del IRI más preciso que el que se obtiene con las predicciones actuales. Hasta que estos modelos no estén disponibles en la nueva actualización del IRI, se recomienda utilizar la opción Gulyaeva para obtener una mejor predicción del parámetro $B0$ a latitudes medias y la opción estándar para obtener una mejor predicción de $B0$ a latitudes bajas. Ambas opciones se apartan significativamente del comportamiento observado de este parámetro a latitudes altas. De la misma manera se recomienda utilizar la opción estándar del IRI para una mejor predicción del parámetro $B1$ para cualquier latitud.

La segunda parte de la investigación se ha dedicado al estudio de los efectos de las tormentas geomagnéticas en la estructura vertical de la ionosfera, en especial en la reacción de la altura del máximo de ionización, $hmF2$. La pretensión de esta investigación ha sido obtener el comportamiento característico de $hmF2$ causado por condiciones geomagnéticamente perturbadas, analizar los mecanismos físicos capaces de generar dicho comportamiento y obtener un modelo que sea capaz de reproducirlo. Este trabajo ha estado motivado por la inexistencia de un modelo capaz de reproducir el comportamiento de la altura del máximo de ionización en condiciones perturbadas. A continuación se resumen las principales aportaciones de esta investigación en este sentido:

6) Se han identificado los efectos ionosféricos sobre Europa causados por la tormenta geomagnética más intensa del ciclo solar 23: expansión del óvalo auroral, generación de capas esporádicas de origen auroral a latitudes medias, aumento de la altura del máximo de ionización, aumento o disminución de la densidad electrónica en diferentes cinturones latitudinales, manifestación de gradientes latitudinales de densidad electrónica sobre el sector Euro-Asiático.

7) Se ha determinado la pauta de comportamiento de los efectos en la densidad electrónica en diferentes regiones del planeta dependiendo de la hora local en el inicio de la tormenta geomagnética. Los efectos negativos tienden a originarse en el sector de tiempo local de 3:00 a 5:00 y pueden manifestarse en cualquier sector mientras que los efectos ionosféricos positivos tienden a originarse en torno al sector de mediodía local y prácticamente no se generan en el sector de tiempo local de 16:00 a 24:00.

8) Se ha identificado el levantamiento sistemático de la altura del máximo de ionización a las pocas horas del inicio de una tormenta geomagnética precediendo indistintamente a los efectos positivos o negativos en la densidad electrónica. Se ha identificado la propagación de perturbaciones atmosféricas (TADs) desde latitudes aurorales como el mecanismo físico más probable capaz de generar este comportamiento.

9) Se ha determinado el comportamiento sistemático de $hmF2$ en condiciones perturbadas y se han identificado los mecanismos físicos responsables de este comportamiento. Se ha observado que la reacción de $hmF2$ depende de la hora local en el inicio de la tormenta geomagnética, de la estación del año y de la evolución del campo magnético interplanetario (IMF). En concreto $hmF2$ presenta dos elevaciones en forma de pulso. El primer pulso se manifiesta de 1 a 3 horas después del inicio de la fase principal de la tormenta geomagnética y muy probablemente sea resultado del paso de TADs de origen auroral. El segundo pulso se manifiesta en el sector de noche, cuando la estación deriva hacia la zona en que la perturbación de composición tiende a originarse y muy probablemente sea el resultado de un refuerzo del viento neutro termosférico hacia el ecuador en el sector de noche.

10) Se ha desarrollado un modelo empírico de perturbación de $hmF2$ sobre latitudes de la Península Ibérica mediante una formulación analítica dependiente del tiempo local, estación del año y configuración y evolución del IMF. Se ha extendido su aplicabilidad a tiempo casi-real y se ha evaluado su validez a latitudes Europeas.

11) Se ha demostrado que el modelo propuesto en este estudio proporciona, con un 86% de acierto, la perturbación de $hmF2$ en respuesta a la configuración y evolución del IMF sin generar falsas alarmas, pudiendo utilizarse como herramienta de predicción en tiempo casi-real. Además, el error cuadrático medio (RMSE) del modelo respecto a los valores experimentales (40 km) es comparable al rango de variación experimental obtenido para los cuatro días más tranquilos adyacentes al día perturbado.

La aportación de esta investigación ha permitido profundizar en el conocimiento del comportamiento ionosférico en condiciones perturbadas y a identificar los mecanismos físicos responsables de éste. Uno de los resultados que se han conseguido en este sentido ha sido obtener el patrón de comportamiento respecto al tiempo local de la manifestación de los efectos positivos y negativos a latitudes medias. Los resultados muestran que los efectos negativos se manifiestan más rápidamente (el retraso del efecto ionosférico respecto el tiempo de inicio de la tormenta es menor) en el sector de tiempo local de 3:00 a 5:00, lo que significa que la zona de perturbación de la composición responsable de estos efectos tiende a originarse en este sector. En cambio, los efectos ionosféricos positivos se manifiestan más rápidamente en torno al sector de mediodía local y no suelen observarse en el sector de noche. Estos resultados están en consonancia con el escenario actual del desarrollo de las tormentas ionosféricas en latitudes medias (Prölss, 1993) y proporcionan una evidencia experimental del modelo de tormenta basado en el papel rector de la circulación del viento neutro termosférico (Fuller-Rowell et al., 1994; Fuller-Rowell et al., 1996). Estos resultados pueden ser útiles para realizar una predicción empírica de la ocurrencia de estos efectos y contribuir a mejorar la predicción que realiza el IRI, que actualmente sólo determina con acierto las desviaciones negativas de la densidad electrónica (Miró et al., 2007). Este trabajo también ha permitido determinar el comportamiento característico de la perturbación causada en $hmF2$ ($\Delta hmF2$) durante tormentas geomagnéticas utilizando, por primera vez, medidas de $hmF2$ obtenidas del perfil vertical de la densidad electrónica en altura real. Se ha determinado que la perturbación, $\Delta hmF2$, se caracteriza por dos pulsos (dependiendo del tiempo local al inicio de la tormenta), el primero de 1 a 3 horas después del inicio de la fase principal de

la tormenta geomagnética y el segundo en el sector de noche cuando la estación entra en el sector de perturbación de la composición. Se ha observado que la morfología del comportamiento de $\Delta hmF2$ depende del campo magnético interplanetario (IMF Bz), del tiempo local, de la estación del año y latitud. La perturbación causada en $hmF2$ puede explicarse considerando el comportamiento de los vientos neutros termosféricos que se generan en latitudes aurorales como resultado del calentamiento Joule en esa zona durante las tormentas geomagnéticas. Estos resultados aportan también una evidencia experimental del modelo de tormenta a latitudes medias basado en el papel rector de la circulación del viento neutro termosférico (Prölss, 1993; Fuller-Rowell et al., 1994; Fuller-Rowell et al., 1996). Este comportamiento sistemático de la perturbación causada en $hmF2$ se ha modelado mediante funciones analíticas. Esto ha permitido desarrollar, por primera vez, un modelo empírico capaz de predecir (con una antelación entre 1 y 3 horas) la perturbación en $hmF2$ resultante durante tormentas geomagnéticas. Este modelo empírico podría utilizarse, previo ajuste a las métricas y estándares recomendados, como una herramienta de predicción en tiempo real para aplicaciones en Meteorología Espacial.

PERSPECTIVAS DE FUTURO

Los resultados obtenidos en esta investigación son de interés para modelar la climatología de la ionosfera y su variación durante tormentas geomagnéticas. En el transcurso de este estudio se han identificado nuevas líneas de investigación que se podrían emprender para mejorar y ampliar el trabajo realizado:

1) Mejora de los modelos B0 y B1 en su estructura longitudinal y latitudinal.

Un punto débil de los modelos que representan *B0* y *B1* a escala global surge de la mala distribución geográfica de los datos alrededor del planeta. Para salvar este problema en la estructura latitudinal, se han sintetizado datos a las latitudes críticas donde no se dispone de datos experimentales y para salvar el problema en la estructura longitudinal se han considerado las variaciones en tiempo local equivalentes a las variaciones en longitud. Estas aproximaciones podrían esconder algunos efectos latitudinales y/o longitudinales en la variación de los parámetros que proporciona el modelo respecto al comportamiento experimental. Por esta razón se ha limitado la validez del modelo al rango de latitudes donde se dispone de datos experimentales. Una línea de investigación que sería interesante abordar en el futuro residiría en la búsqueda de bases de datos complementarias que proporcionaran una mejor cobertura temporal y espacial de los datos. La utilización de datos de satélite (Gulyaeva, 2007), la obtención de los parámetros experimentales de ionosondas clásicas (Zhang et al., 2008) y la utilización de perfiles de densidad electrónica obtenidos de radio-

ocultaciones ayudarían en este sentido.

2) Aplicación de la formulación de los modelos globales a otras características ionosféricas.

Los resultados de este estudio han demostrado que la metodología para obtener estos modelos globales de $B0$ y $B1$ puede ser aplicable a otras características ionosféricas, como por ejemplo $hmF2$, hmE y Hm , para mejorar su actual predicción durante días tranquilos. Actualmente, el grupo ha empezado un nuevo proyecto de tesis doctoral siguiendo esta línea de investigación para determinar el comportamiento de $hmF2$ en condiciones de calma y determinar la formulación de un modelo global para esta característica ionosférica. Resultados de la aplicación de este modelo a nivel local a latitudes ecuatoriales han demostrado obtener mejores resultados que las predicciones del IRI. La obtención de estos modelos puede ser útil para determinar el comportamiento patrón de dichas características ionosféricas en días de calma y por lo tanto las desviaciones respecto este comportamiento en condiciones perturbadas.

3) Extensión del modelo empírico de perturbación de la altura del máximo de ionización a otras latitudes.

Una de las líneas de investigación prioritarias a seguir es analizar la perturbación de $hmF2$ a diferentes estaciones de latitudes medias para poder determinar una pauta del comportamiento según la latitud. Los resultados de la presente investigación han demostrado que la elevación de $hmF2$ es debida a la propagación hacia latitudes medias de la perturbación de los vientos neutros termosféricos que se genera durante una tormenta geomagnética. En el capítulo B2 de esta investigación se ha determinado la propagación de la perturbación ionosférica generada por una tormenta geomagnética, esto mismo se pretende realizar con una mayor muestra estadística para poder determinar la propagación de la perturbación de $hmF2$ y extender así el modelo a un mayor rango de latitudes. El modelo empírico resultante de esta investigación podría incluirse en futuras versiones del IRI para predecir la perturbación de $hmF2$ a latitudes medias.

4) *Creación de una herramienta de predicción a tiempo real*

Otra línea de investigación prioritaria a seguir es ajustar el modelo empírico de perturbación de $hmF2$ a tiempo real a métricas y criterios del proyecto europeo COST ES0803 (*Developing Space Weather Products and Services in Europe*) para la utilización de dicho modelo como una herramienta de predicción a tiempo real para aplicaciones de Meteorología Espacial.

5) *Determinación de la perturbación de $B0$ durante tormentas geomagnéticas.*

Una línea de investigación interesante a seguir es analizar el comportamiento del espesor de la capa F (determinado por el parámetro $B0$) en días perturbados e intentar desarrollar un modelo capaz de reproducir la perturbación en el espesor ionosférico durante tormentas geomagnéticas. Un modelo de perturbación de $B0$ ($\Delta B0$), juntamente con el modelo climatológico de $B0$ obtenido en esta investigación, permitiría obtener una predicción del semi-espesor de la ionosfera en condiciones perturbadas, lo cual es de gran interés para obtener un perfil vertical de densidad electrónica durante tormentas geomagnéticas más preciso y, como consecuencia una mejor predicción de la parte alta de la ionosfera y de valores del contenido total de electrones durante períodos de perturbación magnética.

6) *Posible aplicación a los sistemas de navegación y comunicación HF.*

De acuerdo con la filosofía anterior, se podrían abordar nuevas líneas de investigación basadas en la predicción de parámetros útiles para comunicaciones HF, por ejemplo evaluar la climatología y la perturbación asociada a tormentas geomagnéticas de la característica $MUF3000(F2)$, la máxima frecuencia utilizable en un radio-enlace con rebote ionosférico a una distancia de 3000 km. También podría analizarse el impacto en los sistemas de radio-navegación causados por las perturbaciones en la altura de la ionosfera como consecuencia de las TADs de origen auroral y su potencial predicción.

APÉNDICES

APÉNDICE A. Sondeos de incidencia vertical, parámetros característicos e ionogramas.

La ionosonda es el instrumento más convencional para medir la estructura vertical de la ionosfera ya que proporciona perfiles verticales de densidad electrónica precisos en función del tiempo. Una ionosonda emite ondas electromagnéticas a diferentes frecuencias, normalmente de 1 a 30 MHz, mide el tiempo que tarda el pulso en reflejarse en la ionosfera y volver y calcula la altura a la que el pulso se ha reflejado.

El índice de refracción (n) para un medio ionizado sin campo magnético es:

$$n^2 = 1 - \frac{f_N^2}{f^2} \quad (\text{ApA.1})$$

donde f es la frecuencia de la onda electromagnética emitida y f_N es la frecuencia del plasma que depende de la densidad electrónica como:

$$N = \left(\frac{f_N^2 (\text{MHz})}{80.6} \right) \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3} \quad (\text{ApA.2})$$

f_N aumenta a medida que la densidad electrónica crece con la altura, y, por lo tanto, el índice de refracción disminuye. El índice de refracción se vuelve imaginario cuando $f_N > f$ y por lo tanto la onda electromagnética no puede propagarse. Entonces, la onda es reflejada a la altura donde $f_N = f$; donde la frecuencia del plasma iguala la frecuencia de la onda electromagnética. A medida que se aumenta la frecuencia de la onda electromagnética durante el sondeo, el pulso puede penetrar a alturas más elevadas en la ionosfera hasta que la frecuencia de la onda iguala la frecuencia crítica del plasma f_o . Esta frecuencia está relacionada con la densidad electrónica máxima de cada capa a partir de la Ecuación ApA.2. Midiendo el tiempo que tarda el eco en recibirse de nuevo por la ionosonda y asumiendo que la onda electromagnética viaja a la velocidad de la luz, se puede calcular la altura a la que el pulso se ha reflejado.

Esta altura se conoce como “altura virtual” ya que la onda no se propaga exactamente a la velocidad de la luz c , sino a la velocidad $u=c/n$ dependiendo del índice de refracción (Hargreaves, 1992). Esta velocidad se calcula a posteriori para obtener la altura real del perfil vertical de la densidad electrónica $N(h)$. Los principales parámetros ionosféricos que caracterizan el perfil vertical de la densidad electrónica obtenido por sondeo vertical se encuentran en la Tabla ApA.1.

Tabla ApA.1. Principales parámetros ionosféricos

fmin	Frecuencia mínima de la onda electromagnética reflejada
h'E	Altura virtual mínima de la capa E
foE	Frecuencia crítica de la capa E
hmE	Altura del máximo de ionización de la capa E
h'Es	Altura virtual mínima de la capa esporádica E
foEs	Frecuencia crítica de la capa esporádica E
hmEs	Altura del máximo de ionización de la capa esporádica E
fbEs	Frecuencia de ocultamiento de la capa esporádica E: Frecuencia a la que la capa esporádica E permite la primera reflexión en capa superiores
h'F	Altura virtual mínima de la región F. $h'F=h'F1$ durante el día.
h'F2	Altura virtual mínima de la capa F2. $h'F2=h'F$ durante la noche
foF1	Frecuencia crítica de la capa F1
foF2	Frecuencia crítica de la capa F2
hmF1	Altura del máximo de ionización de la capa F1
hmF2	Altura del máximo de ionización de la capa F2
TEC	Contenido Total de Electrones. La integral con la altura del perfil de densidad electrónica
MUF(D)	Frecuencia Máxima Utilizable para una distancia D

El gráfico de la altura virtual a la que se refleja el pulso respecto a la frecuencia del pulso se conoce como ionograma. La Figura ApA.1 muestra un ejemplo de un ionograma obtenido por la noche y un ionograma obtenido durante el día en

una estación típica de latitudes medias para un día de primavera. Las trazas rojas y verdes representan la altura virtual a la que se ha reflejado respectivamente el rayo ordinario y extraordinario a cada una de las frecuencias a la que se ha enviado el pulso. Se observan los dos rayos, el ordinario y el extraordinario, ya que la existencia del campo geomagnético da dos soluciones para la velocidad de propagación de una onda electromagnética en un medio donde hay un campo magnético (Hargreaves, 1992). Los ecos recibidos que nos interesan son los ecos del rayo ordinario, ya que tiene las mismas características que una onda que se propaga en un medio sin campo magnético. La línea negra en los ionogramas de la Figura ApA.1 es el perfil de densidad electrónica calculado una vez se ha estimado la altura real a la que se produce la reflexión.

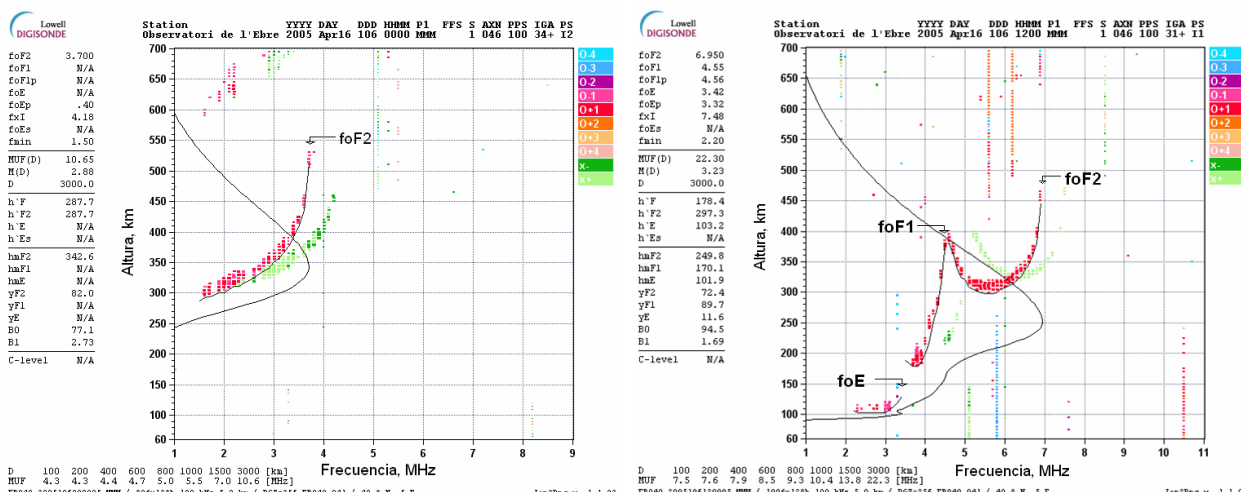


Figura ApA.1. Izquierda: ionograma típico de noche (0:00 UT). Derecha: ionograma típico de día (12:00 UT). El eje X corresponde a la frecuencia y el eje Y a la altura (corresponde a la altura virtual para las trazas y a la altura real para el perfil de densidad electrónica). En los ionogramas se han identificado las frecuencias críticas de cada capa. Ionogramas obtenidos de la digisonda UMLCAR DGS256 del Observatorio del Ebro (www.obsebre.es).

APÉNDICE B. Tormentas geomagnéticas.

En periodos de calma solar se produce una salida constante de plasma de la corona solar formando básicamente por protones y electrones y una pequeña cantidad de partículas α . Es lo que se conoce como viento solar y viaja a una velocidad media de 470 km/s aunque su velocidad puede variar significativamente según su origen. El viento solar arrastra consigo las líneas de campo magnético solar y se extiende hacia más allá del sistema solar. Este campo magnético se conoce como campo magnético interplanetario (IMF, *Interplanetary Magnetic Field*) (Prolss, 2004). Aunque el viento solar (y el campo magnético interplanetario) es expulsado en dirección radial respecto al Sol, la rotación solar provoca una trayectoria espiral, la curvatura de la cual está determinada por la velocidad del viento solar. A distancias de la órbita de la Tierra, las líneas de campo forman un ángulo de 45° con respecto a la dirección radial inicial (Prolss, 2004). La Tabla ApB.1 muestra algunas propiedades del viento solar en la órbita de la Tierra.

Tabla ApB.1. Propiedades del viento solar a la órbita de la Tierra (Prolss, 2004)

Parámetro	Valor promedio
Composición	96% H^+ , 4% (0-20%) α , e^-
Densidad, $n_p \sim n_e$	6 (0.1 - 100) cm^{-3}
Velocidad, $v_p \sim v_e$	470 (170 - 2000) km/s
Flujo protones, $n_p v_p$	$3 \cdot 10^{12} m^{-2} s^{-1}$
Flujo de energía	0.5 mW/m ²
Temperatura	10^5 (3500 - $5 \cdot 10^5$) K

Cuando el viento solar llega a la Tierra, éste interactúa con el campo magnético terrestre, comprimiendo las líneas de campo del hemisferio de día y creando una larga cola magnética en el hemisferio de noche que se extiende más allá de la órbita de la Luna en la dirección en la que viaja el viento solar (Figura ApB.1). La cavidad donde queda confinado el campo magnético terrestre se conoce como magnetosfera y actúa como un escudo que fuerza a las partículas cargadas del viento solar a disminuir su velocidad y a fluir alrededor de la Tierra

(Prolss, 2004). Muchas de estas partículas cargadas quedan atrapadas en la magnetosfera que, juntamente con la población de partículas cargadas ya existente en la magnetosfera, producen una gran influencia sobre el campo magnético terrestre. El movimiento de estas partículas cargadas crea una corriente eléctrica que a su vez genera un campo magnético que se superpone al campo magnético terrestre (Figura ApB.1). Así pues, en condiciones de calma solar, se establece un estado de corrientes estacionario que, superpuesto al campo magnético principal, confiere un valor fijo del campo magnético terrestre total.

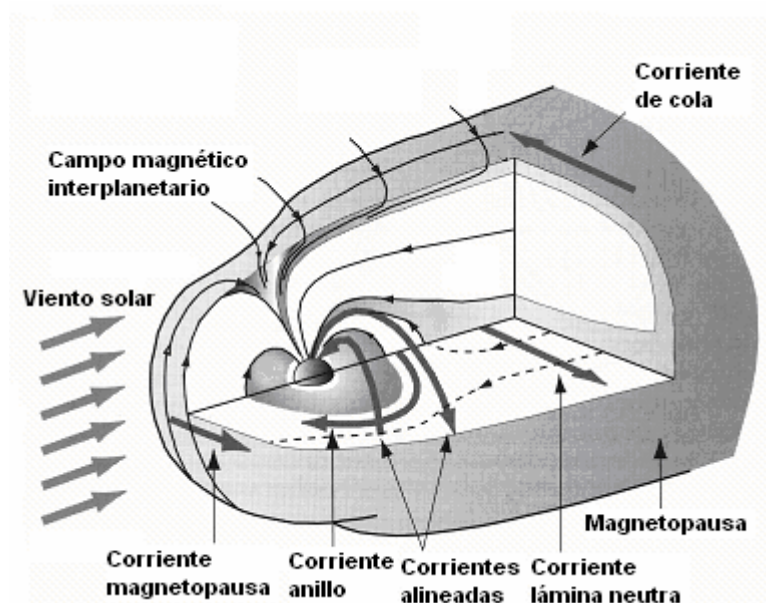


Figura ApB.1. Vista esquemática de la magnetosfera terrestre.
Figura adaptada de Gombosi, 1998.

Durante los períodos de actividad solar, la intensidad del campo magnético solar puede desencadenar en procesos eruptivos de liberación de grandes cantidades de energía (radiación y partículas energéticas). La eyección de masa coronal (CME, *Coronal Mass Ejection*), es un proceso eruptivo de grandes cantidades de material de la corona solar al espacio interplanetario por donde viaja a una velocidad media superior a la del viento solar calma. Cuando esta perturbación del viento solar llega a la magnetosfera terrestre, esta se ve obligada a cambiar su estado de equilibrio, comprimiendo aún más las líneas de campo magnético en el hemisferio de día entre otros efectos. Si además, la configuración del campo magnético interplanetario es favorable (orientado hacia el sur), se produce una reconexión con el campo magnético terrestre que

favorece la entrada de partículas a la magnetosfera (Dungey, 1961). Uno de los efectos principales es el aumento de la población del anillo externo de Van Allen, que por consiguiente produce un aumento de la intensidad de la corriente de anillo. Esta corriente de anillo crea un campo magnético en el sentido opuesto al campo magnético terrestre principal que, al verse intensificado, provoca una disminución del campo magnético total con respecto a un día de calma. Una variación del campo magnético de este tipo se conoce como tormenta geomagnética (Prolss, 2004). Aunque no hay dos tormentas geomagnéticas iguales, se pueden distinguir tres fases diferentes en las variaciones de la componente horizontal del campo geomagnético que se observan en los magnetogramas: la fase inicial, la fase principal y la fase de recuperación (Parkinson, 1983) (Figura ApB.2). La fase inicial (SC, *Storm Commencement*) no siempre se observa y está relacionada con la compresión de la magnetosfera debida al aumento de la presión dinámica del viento solar. La fase principal empieza cuando se produce una disminución significativa de la componente horizontal del campo geomagnético debido a la intensificación de la corriente de anillo. Esta fase está relacionada con la entrada de partículas energéticas a la magnetosfera. La fase de recuperación se produce a partir del momento en que el campo geomagnético empieza a recuperar su estado original. Esta fase está relacionada con el decaimiento del corriente de anillo y puede durar varios días.

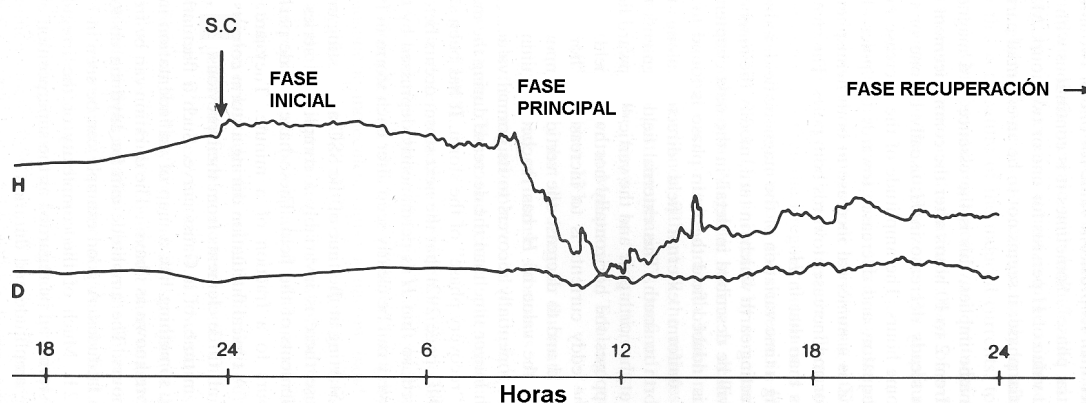


Figura ApB.2. Fases de una tormenta geomagnética. Figura modificada de Parkinson, 1983.

La reducción de la componente horizontal del campo geomagnético debido al efecto de la corriente de anillo se expresa a partir del índice Dst (*Disturbance*

storm). Este índice se deriva de la componente horizontal del campo geomagnético de 4 estaciones de latitudes bajas (pero no ecuatoriales): se eliminan las variaciones regulares, se calcula el valor medio horario centrado a la media hora y se combinan las medias horarias de cada estación según su posición relativa con respecto al ecuador magnético para obtener un valor medio global de la perturbación (Prolss, 2004). Es un indicador muy utilizado para determinar la intensidad de la tormenta geomagnética.

Durante tormentas geomagnéticas, las corrientes ionosféricas y sus asociadas variaciones magnéticas también se intensifican. A latitudes altas, las corrientes alineadas con el campo magnético se intensifican y como consecuencia se intensifican las corrientes aurorales en la ionosfera, formando el electrojet hacia el este y el electrojet hacia el oeste (Figura ApB.3).

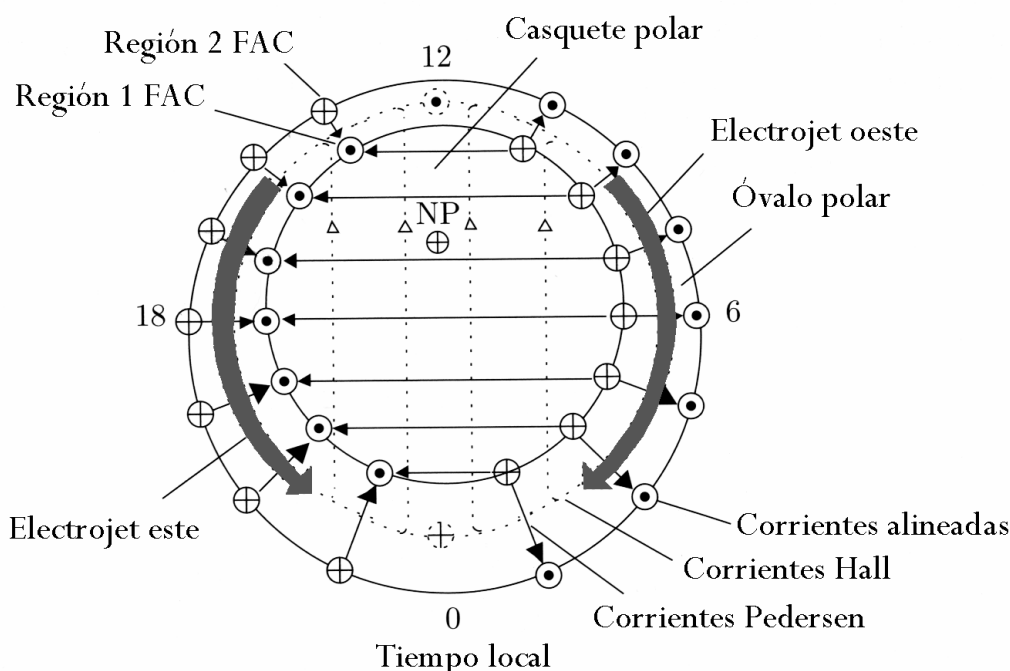


Figura ApB.3. Distribución horizontal de las corrientes eléctricas en la ionosfera polar. FAC (*Field Aligned Currents*) hace referencia a las corrientes alineadas. Figura adaptada de Prolss, 2004.

Los efectos de los electrojets aurorales en la componente horizontal del campo geomagnético se observan básicamente a latitudes altas y son más intensos que los efectos producidos por la corriente de anillo observado a latitudes bajas porque los electrojets aurorales ocurren en la capa E de la ionosfera que está más cerca de la Tierra que el anillo de partículas cargadas que produce la

corriente de anillo. Los electrojets aurorales producen perturbaciones positivas o negativas. Las desviaciones en el sector de tarde producidas por el electrojet hacia el este son positivas y las desviaciones en el sector de noche y mañana producidas por el electrojet hacia el oeste son negativas. El índice auroral, AE (*Auroral Electrojet*), da una medida global de la actividad magnética en la zona auroral producida por un aumento de las corrientes ionosféricas (Davis and Sugiura, 1966). Este índice se obtiene de la componente horizontal del campo geomagnético de 12 estaciones situadas a latitudes altas del hemisferio norte. Pero en este caso no se puede obtener directamente promediando los datos de todas las estaciones ya que las variaciones positivas y negativas se cancelarían unas a otras. Para evitar esto, una vez se han eliminado las variaciones regulares, se superponen los valores restantes en un gráfico en función del tiempo universal y se determina el envolvente superior y el inferior de esta superposición de curvas. El valor del envolvente superior, AU (*Upper Auroral electrojet index*), es el índice magnético que describe la intensidad del electrojet hacia el este y el valor del envolvente inferior, AL (*Lower Auroral electrojet index*), caracteriza el efecto del electrojet hacia el oeste. El índice auroral AE se obtiene a partir de los índices anteriores: $AE = AU - AL$ (Prolss, 2004). Este índice se ha utilizado como índice de correlación en muchos estudios de la morfología de las tormentas geomagnéticas y del acoplamiento entre el campo magnético interplanetario y la magnetosfera terrestre (Prolss, 1993).

Otro indicador de la actividad geomagnética es el índice Kp (Bartels, 1949), que da una medida de la perturbación geomagnética global producida por el corriente de anillo y por los electrojets aurorales en un intervalo de 3 horas en una escala casi-logarítmica. Este índice se obtiene a partir de la media estandarizada del índice K^{11} de 13 observatorios magnéticos situados entre 44° y 60° de latitud, 11 en el Hemisferio Norte y 2 en el Hemisferio Sur. La escala varía entre 0 y 9 siendo $K_p=5$ el nivel a partir del que se considera que la perturbación magnética es una tormenta geomagnética. El índice Ap se deriva

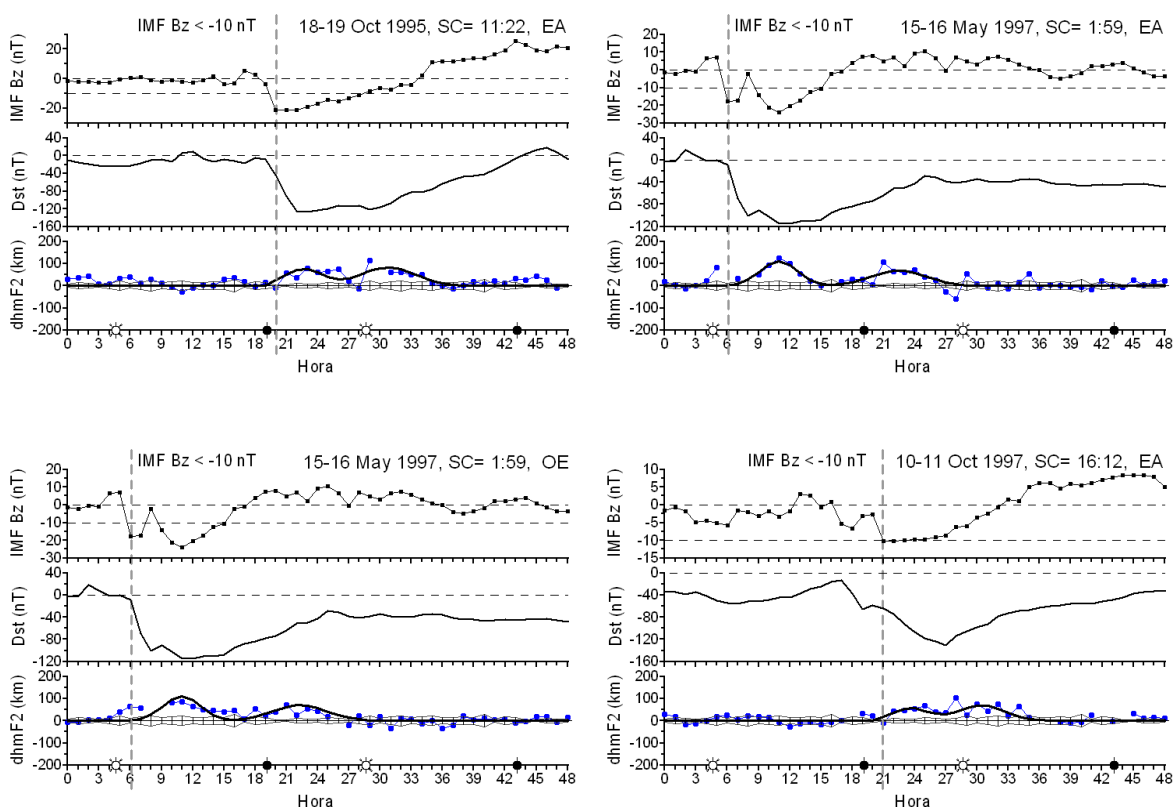
¹¹ El índice K fue introducido por Bartels et al., 1939 para cuantificar las variaciones magnéticas irregulares observadas en una estación dada. Se basa en la amplitud de las variaciones observadas en la componente horizontal del campo magnético después de eliminar la variación regular diurna.

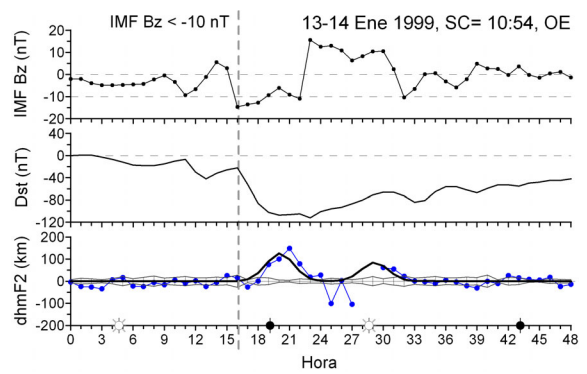
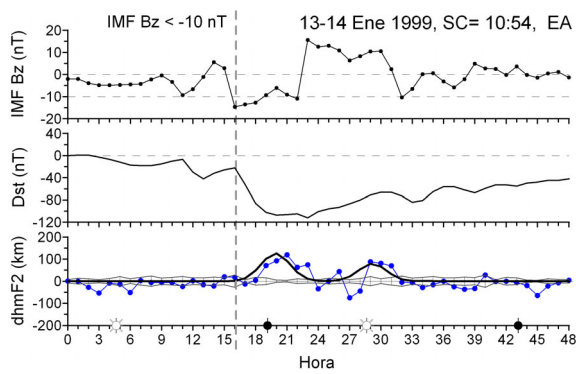
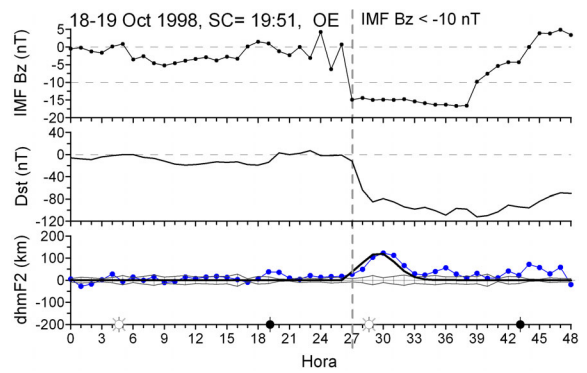
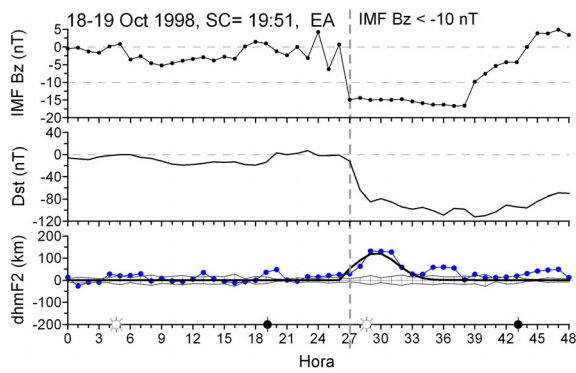
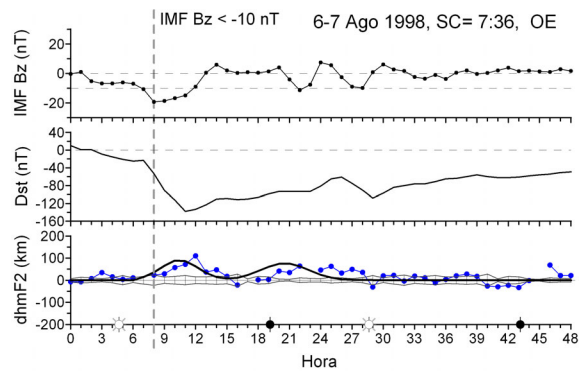
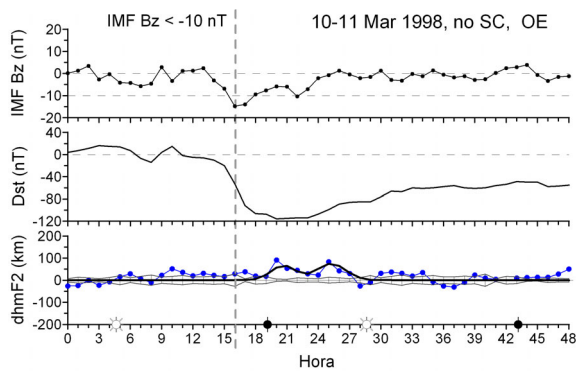
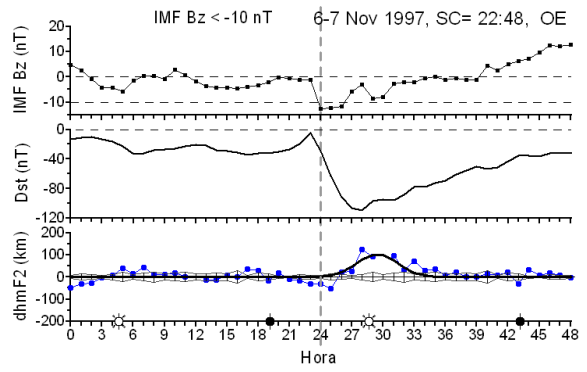
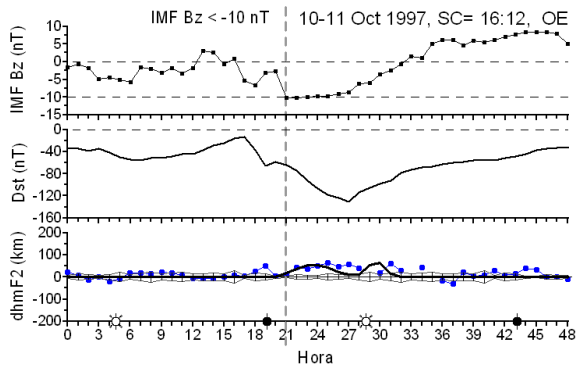
directamente del índice Kp para obtener una escala lineal de la perturbación (http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ap.html). Utilizando el índice Ap, el nivel que define una tormenta geomagnética es $A_p=30$ nT

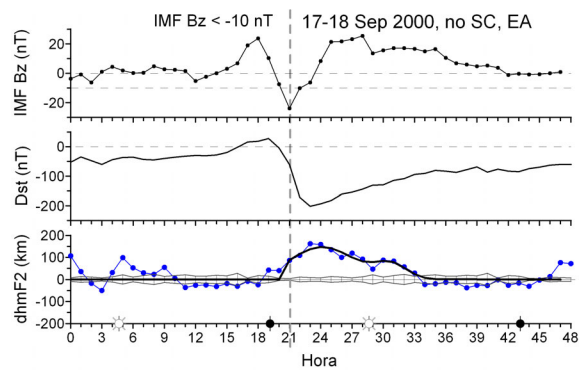
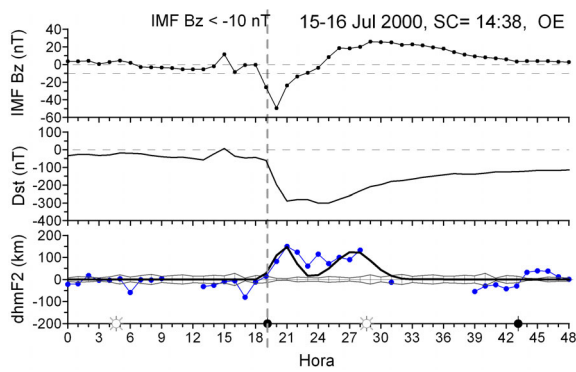
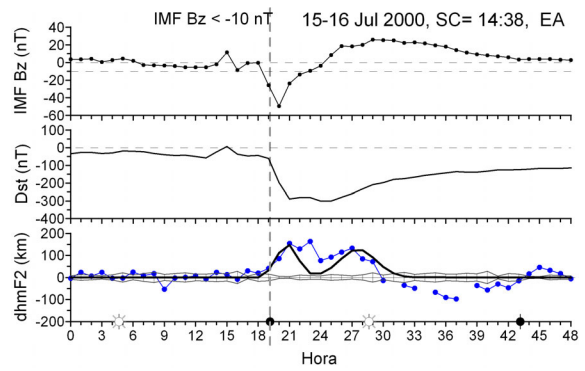
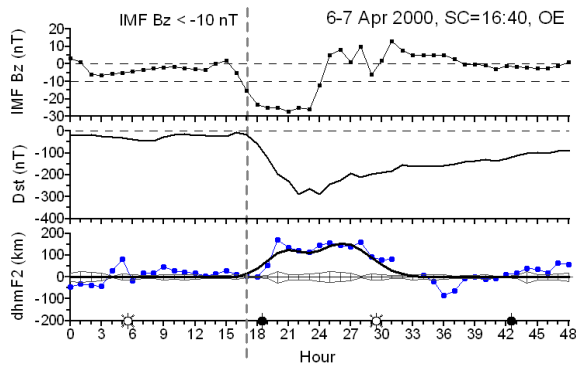
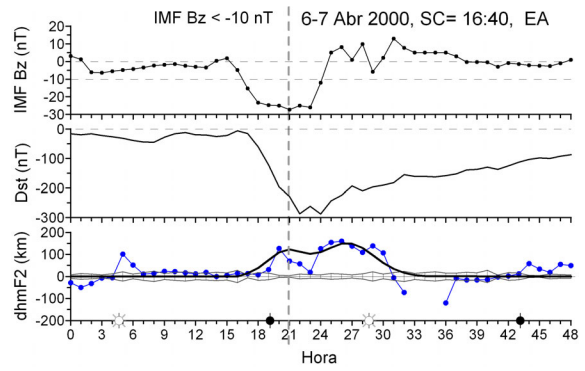
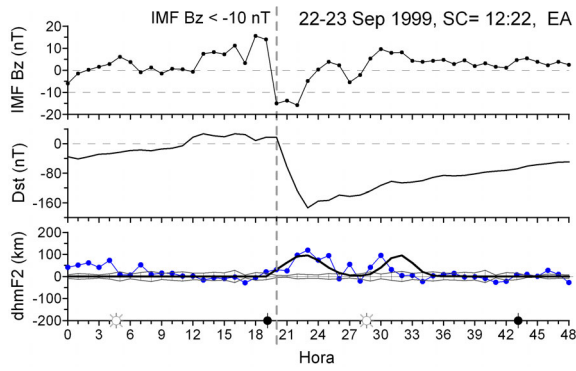
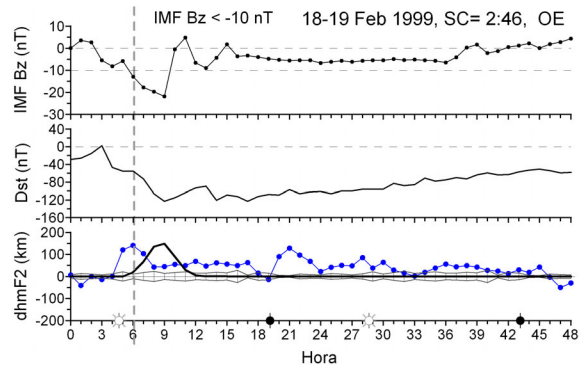
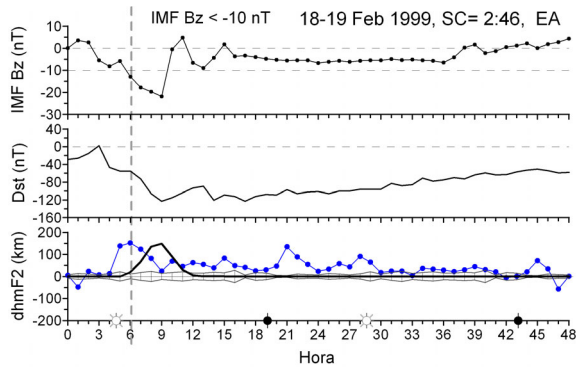
Existen otros muchos índices que definen la actividad geomagnética a diferentes latitudes. Para más información sobre los índices geomagnéticos se aconseja consultar el servicio internacional de índices geomagnéticos (ISGI, *International Service of Geomagnetic Indices*) en <http://isgi.cetp.ipsl.fr>.

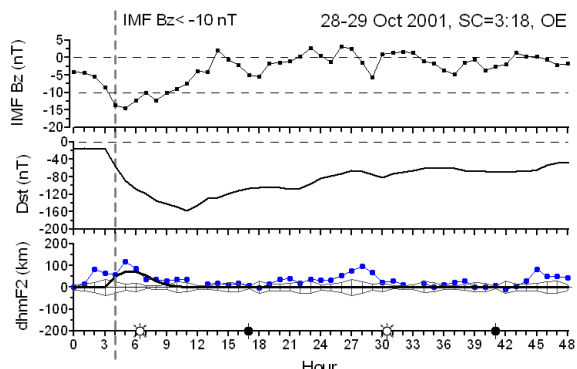
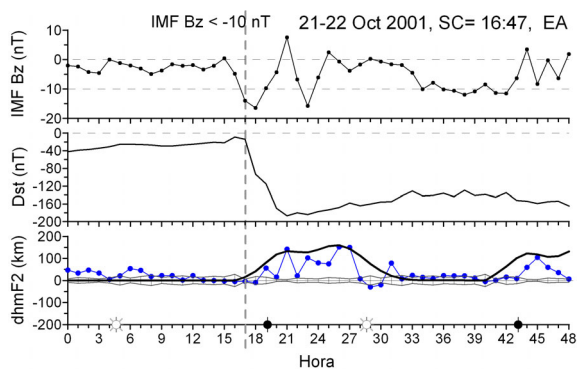
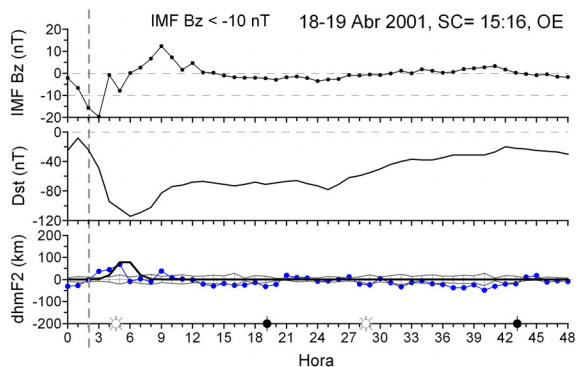
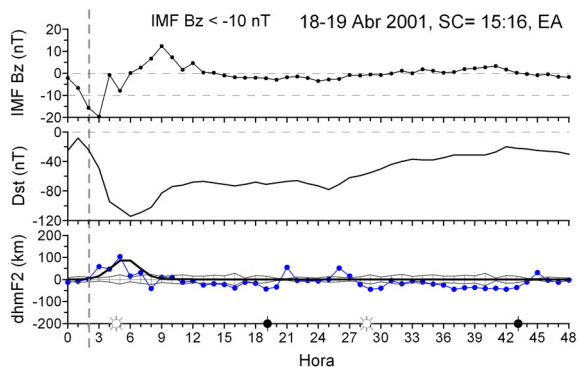
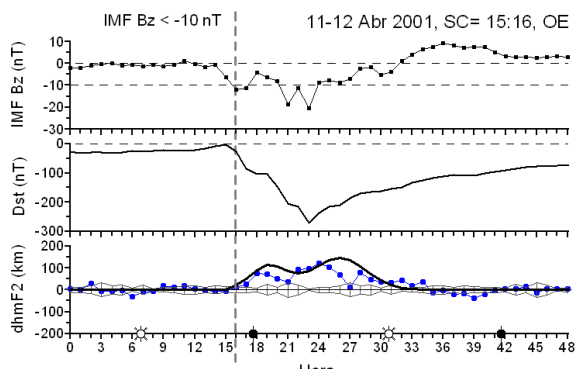
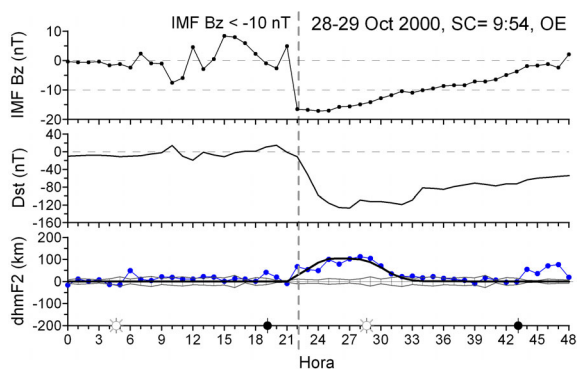
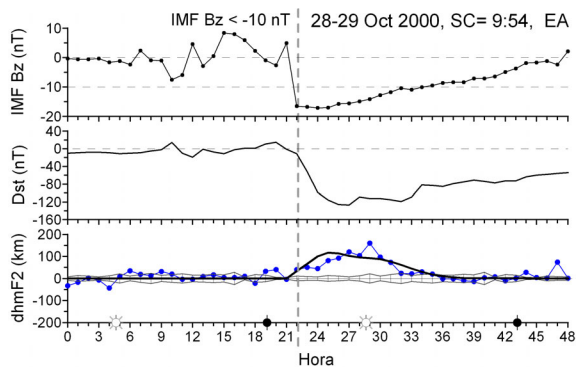
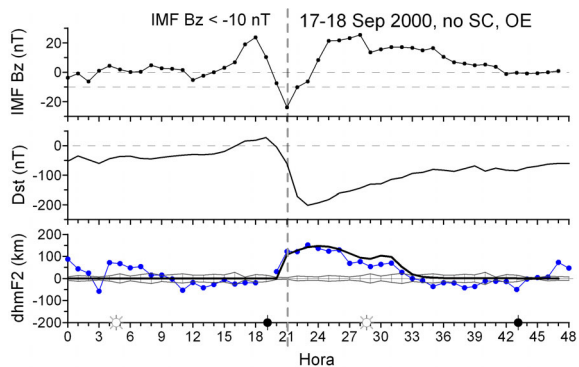
APÉNDICE C. Resultados de la simulación del modelo empírico para los 45 casos analizados en la estadística.

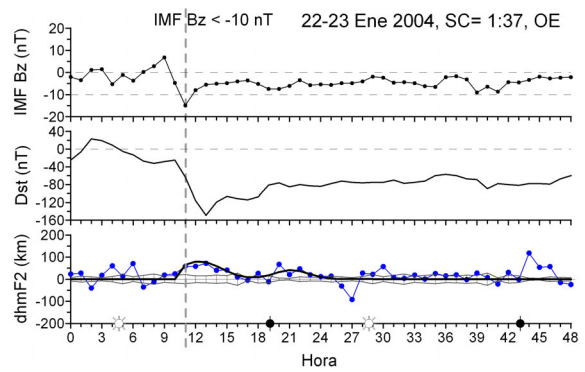
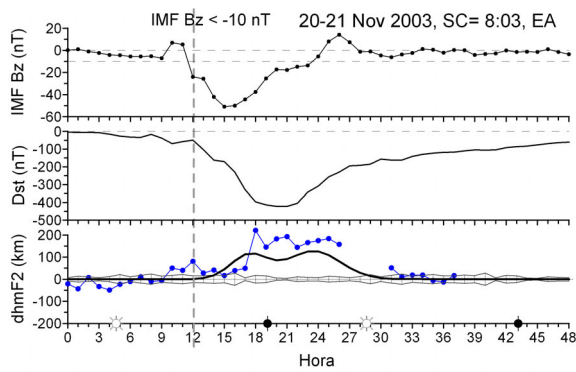
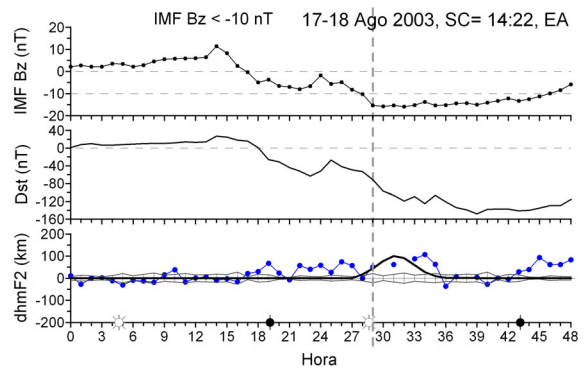
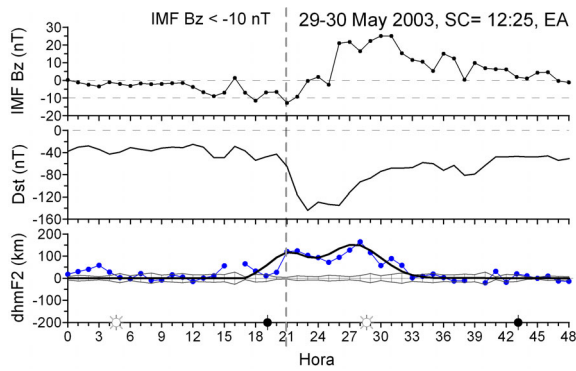
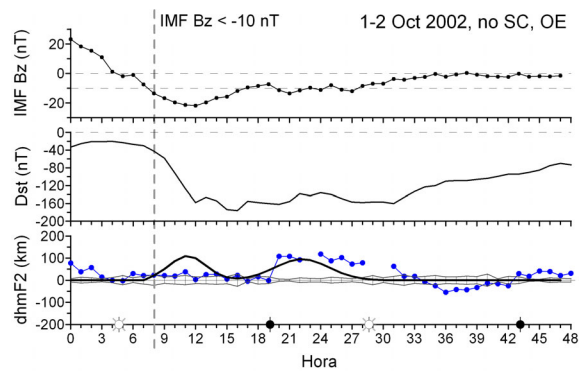
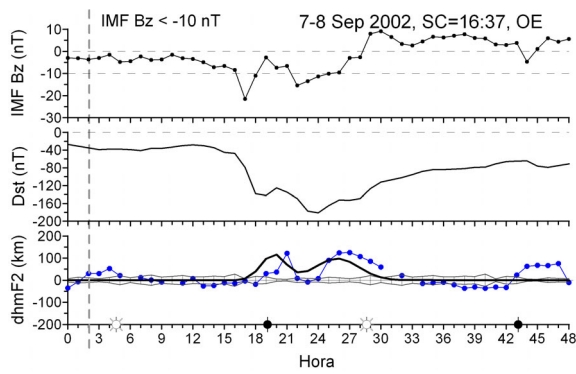
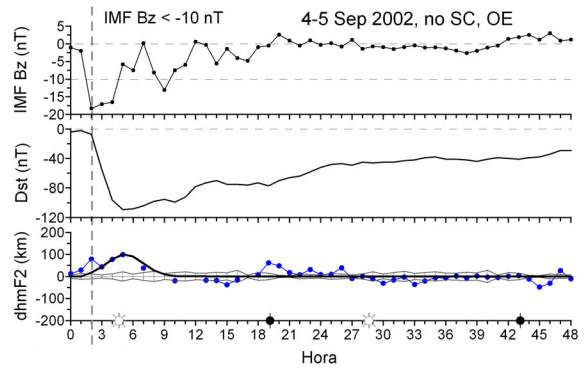
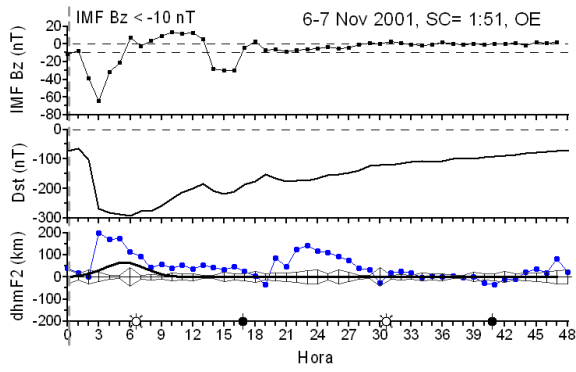
Resultados de la simulación de $\Delta hmF2$ según el modelo empírico definido en la Tabla B3.2 para los días indicados en cada gráfico. De arriba abajo: componente Bz del campo magnético interplanetario, índice de actividad magnética Dst y variación de la altura ionosférica, en azul el comportamiento observado y en negro el comportamiento simulado por el modelo. Las barras de error muestran el rango de variación esperado para un día tranquilo. Los soles blancos y negros indican la salida y puesta de sol a nivel de tierra respectivamente. La línea vertical discontinua indica el momento en que $IMF\ Bz \leq -10\ nT$ en cada caso. OE corresponde a la estación del Observatorio del Ebro y EA corresponde a la estación ionosférica de El Arenosillo. SC hace referencia al *Storm Comencement* y está indicado en Tiempo Universal.

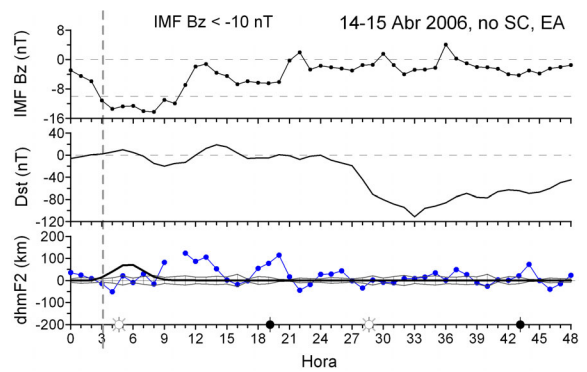
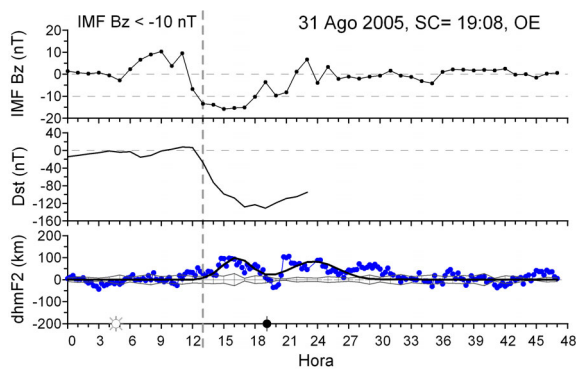
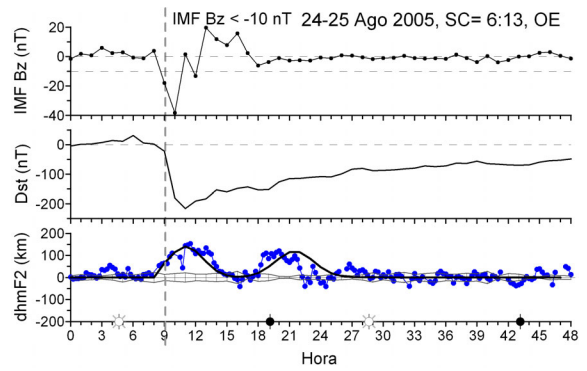
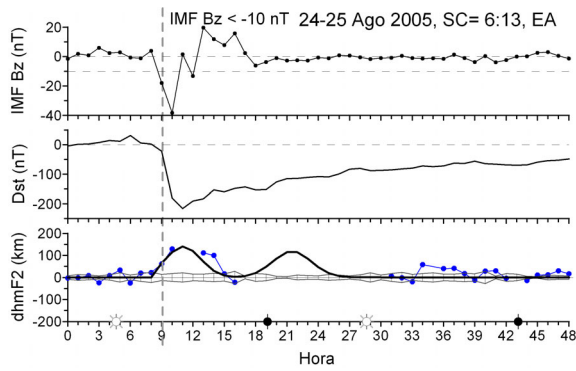
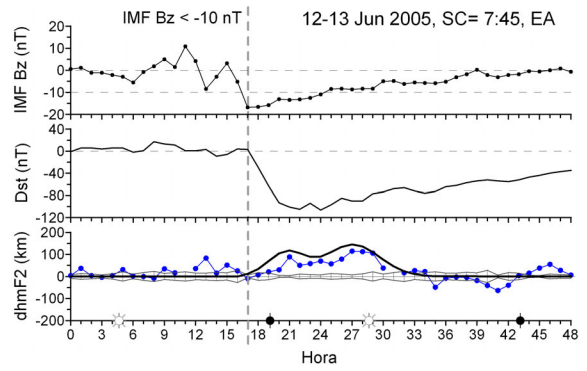
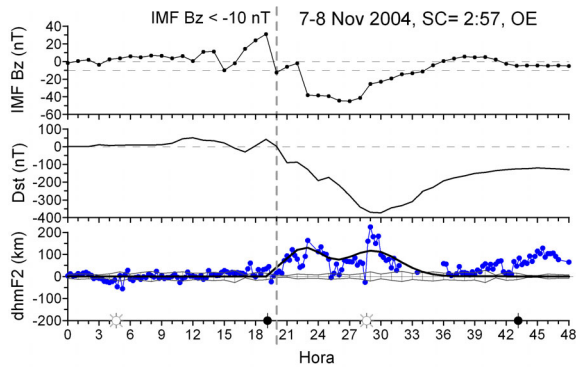
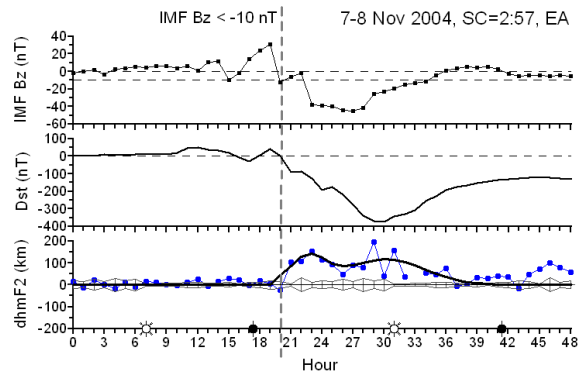
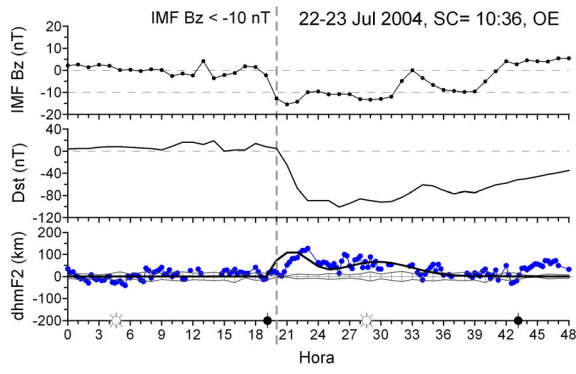


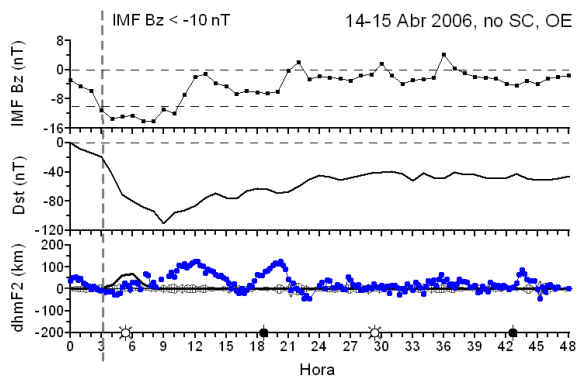






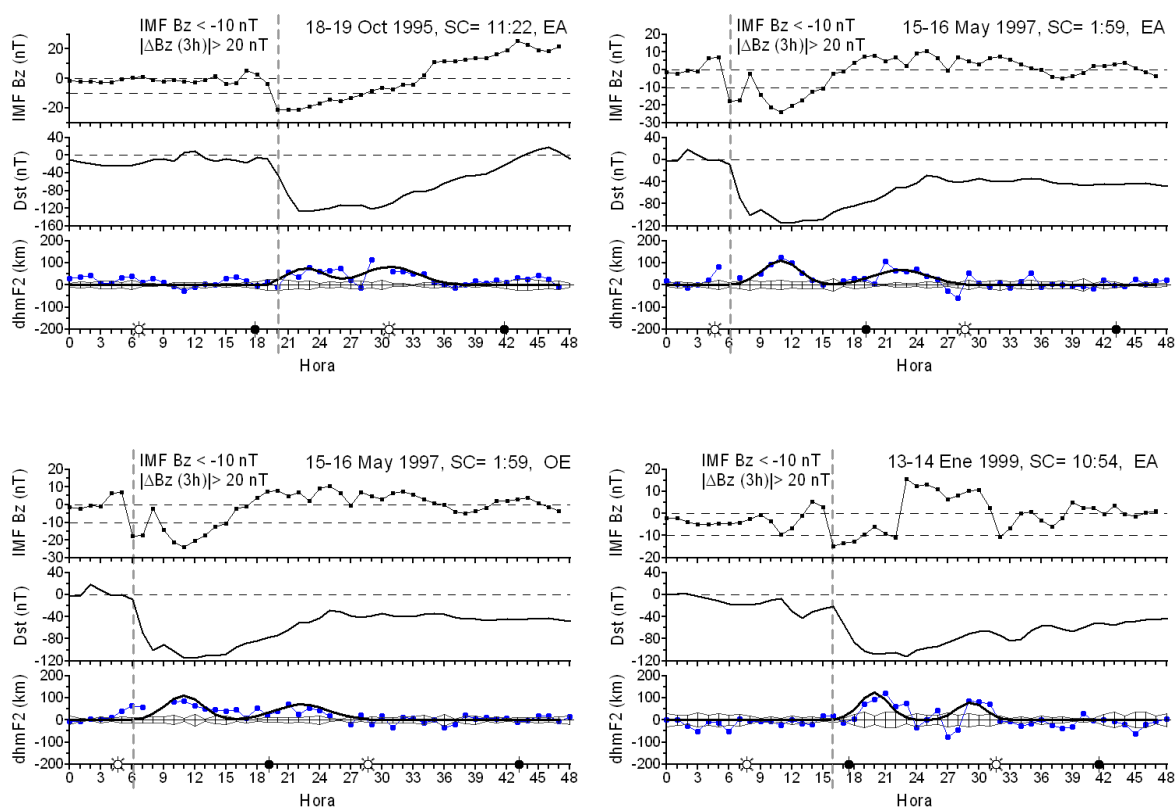


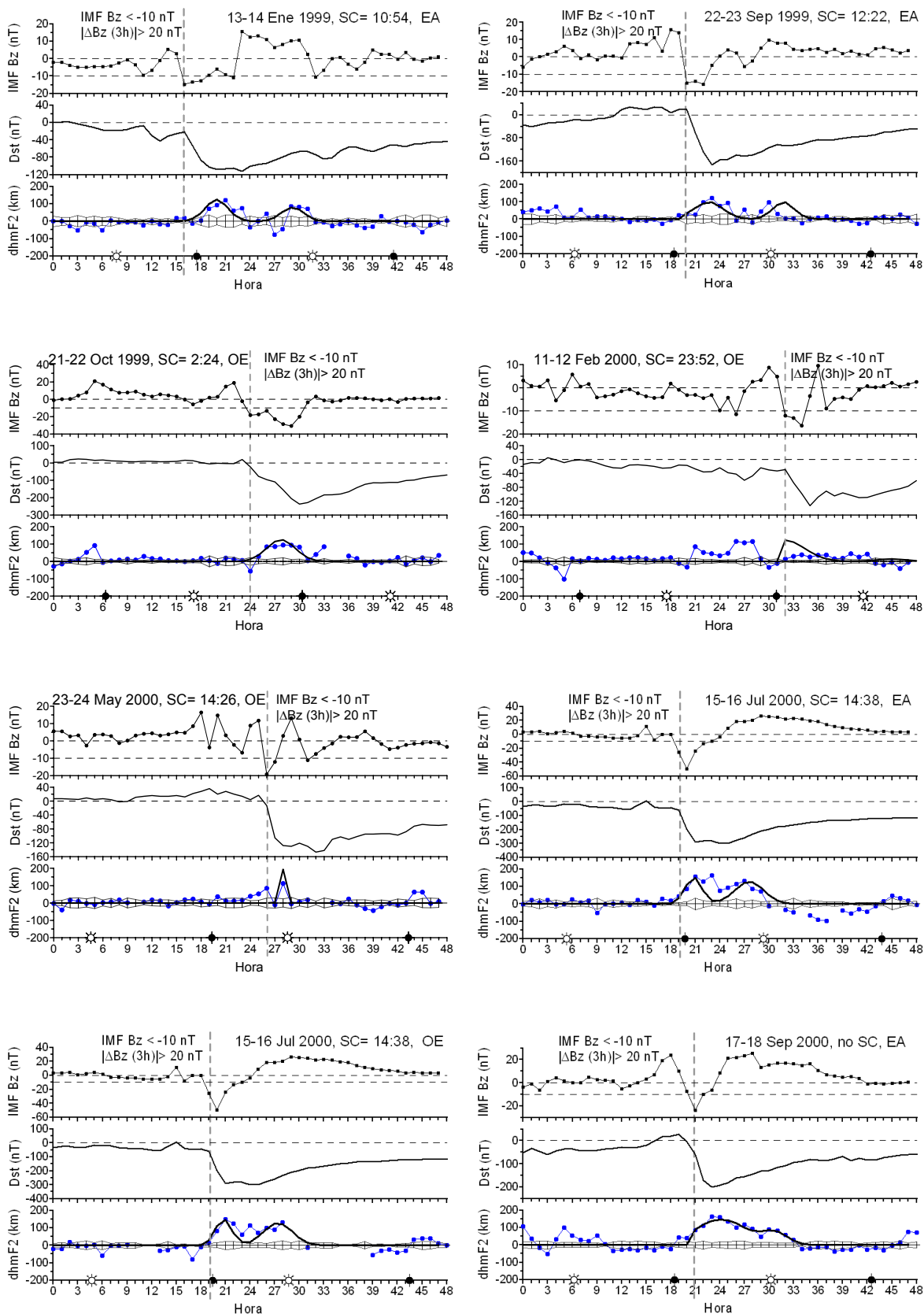


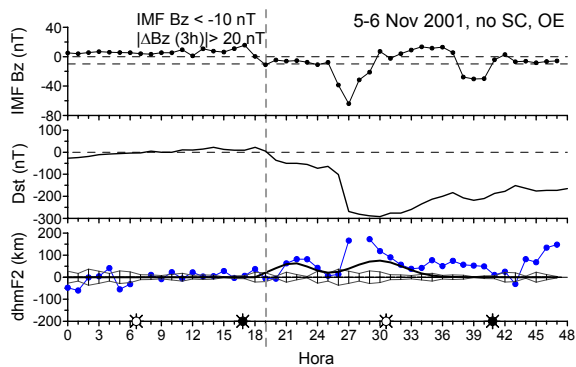
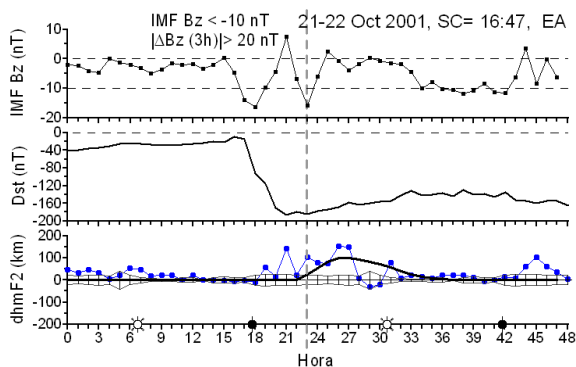
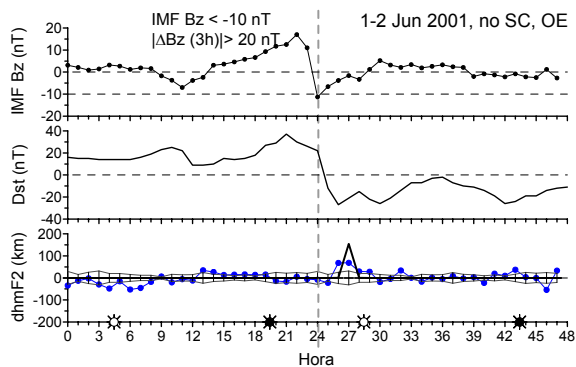
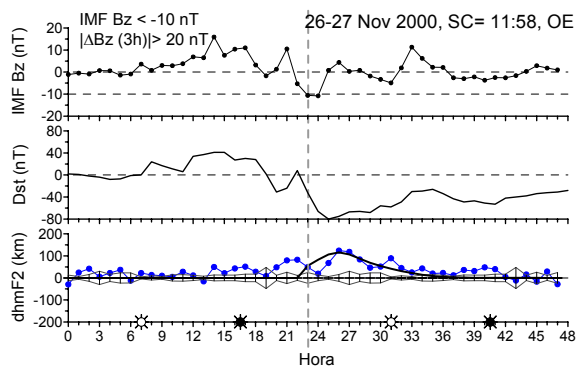
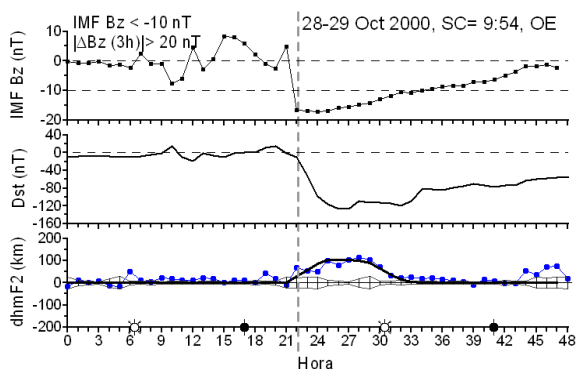
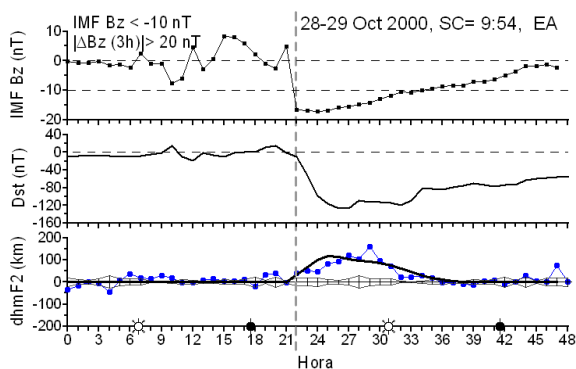
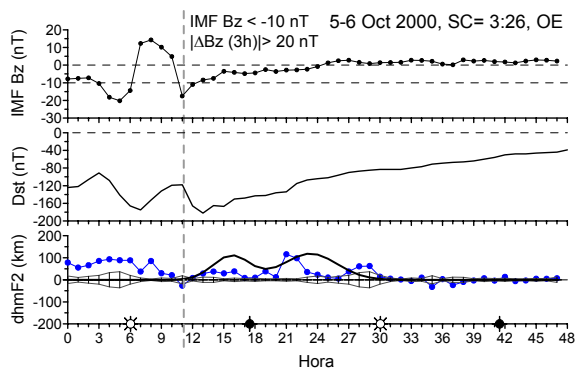
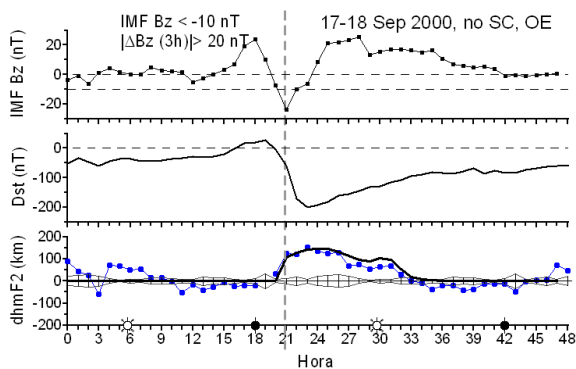


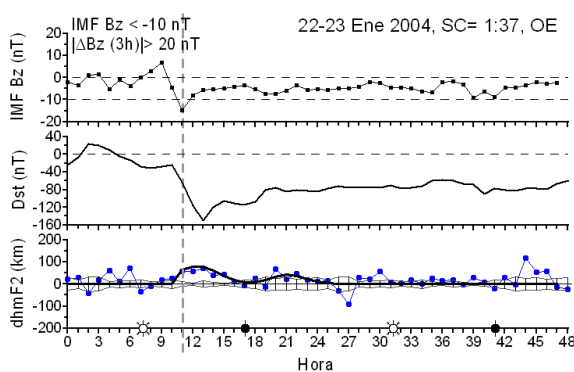
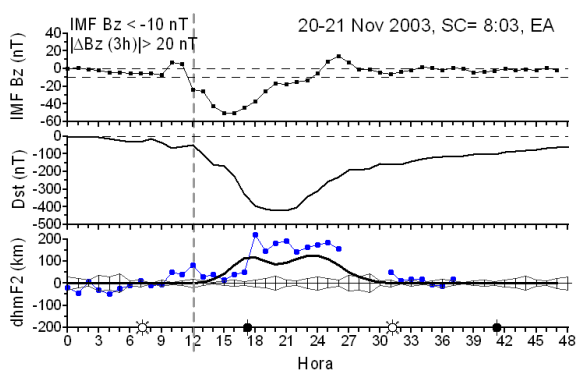
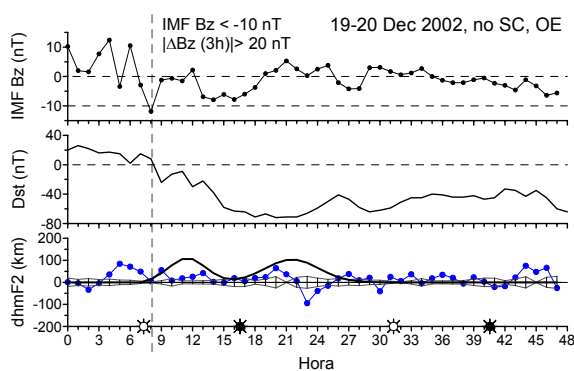
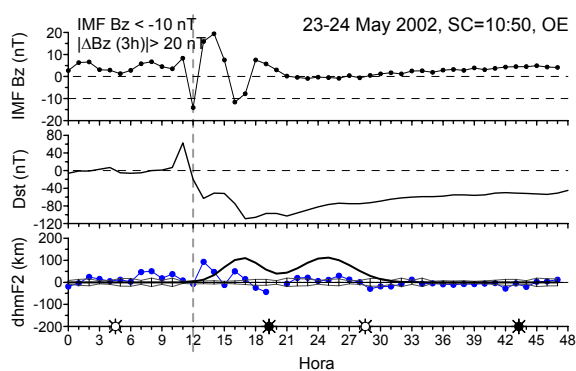
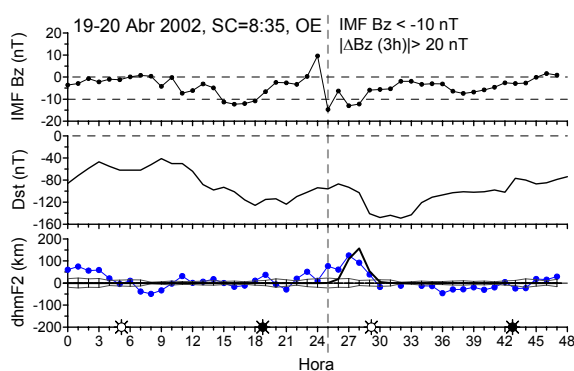
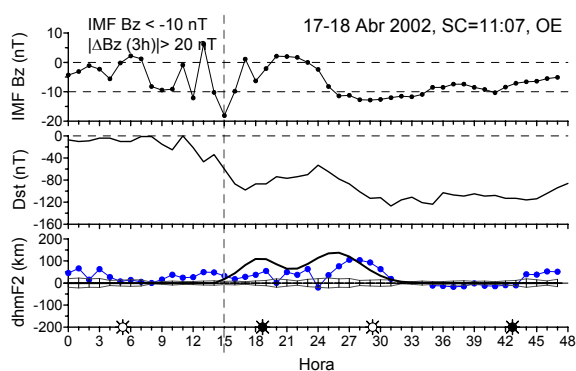
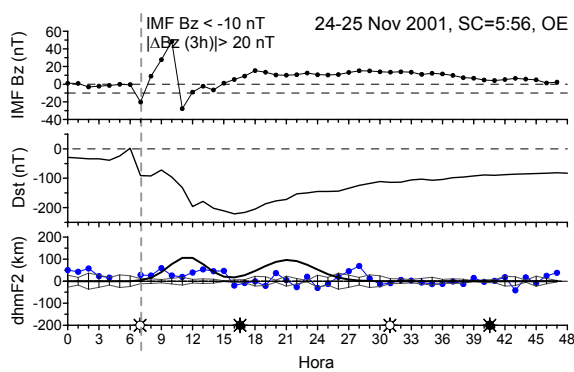
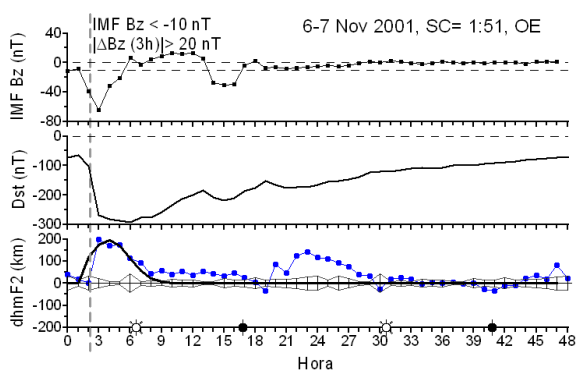
APÉNDICE D. Resultados de la predicción del modelo empírico aplicado en tiempo real.

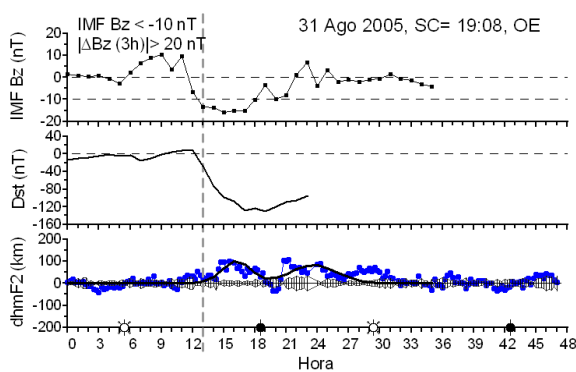
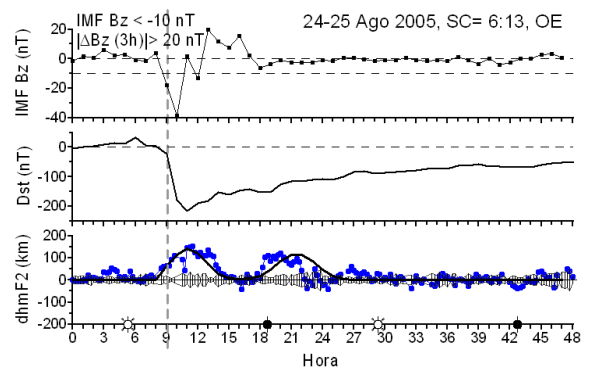
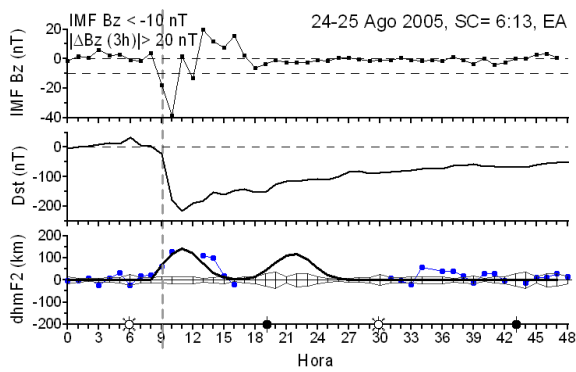
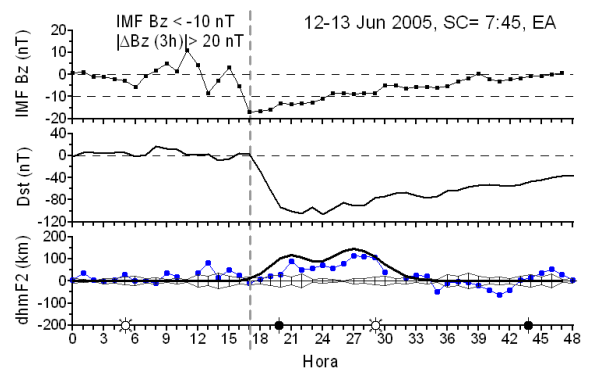
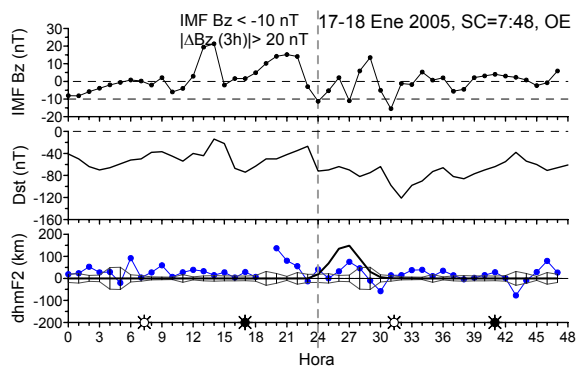
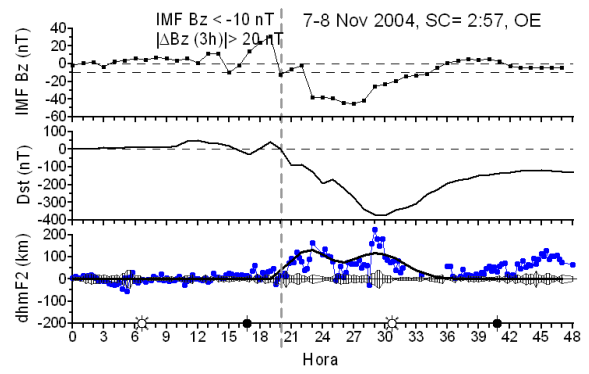
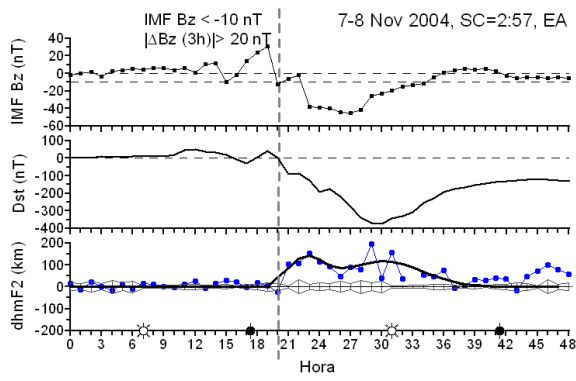
Resultados de la predicción de $\Delta hmF2$ según el modelo empírico aplicado en tiempo real definido en la Tabla B3.2 (y la ecuación B3.6 para los casos de equinoccio pasada la media noche) para los días indicados en cada gráfico. De arriba abajo: componente Bz del campo magnético interplanetario, índice de actividad magnética Dst y variación de la altura ionosférica, en azul el comportamiento observado y en negro el comportamiento simulado por el modelo. Las barras de error muestran el rango de variación esperado para un día tranquilo. Los soles blancos y negros indican la salida y puesta de sol a nivel de tierra respectivamente. La línea vertical discontinua indica el momento en que $|\Delta Bz(3 \text{ horas})| \geq 20 \text{ nT}$ y $IMF Bz \leq -10 \text{ nT}$ en cada caso. OE corresponde a la estación del Observatorio del Ebro y EA corresponde a la estación ionosférica de El Arenosillo. SC hace referencia al *Storm Comencement* y está indicado en Tiempo Universal.











APÉNDICE E. Publicaciones científicas

El contenido de esta tesis doctoral ha dado lugar a diferentes publicaciones científicas:

Parte A. Condiciones de calma:

- Blanch, E., D. Arrazola, D. Altadill, D. Burešová and M. Mosert, Improvement of IRI B0, B1 and D1 at mid-latitude using MARP. *Advances in Space Research*, 39 (5), 701-710, 2007.
- Altadill, D., D. Arrazola, E. Blanch and D. Burešová, Solar activity variations of ionosonde measurements and modelling results. *Advances in Space Research*, 42 (4), 610-616, 2008.
- Altadill, D., J.M. Torta and E. Blanch, Proposal of new models of the bottom-side B0 and B1 parameters for IRI, *Advances and Space Research*, 43 (11), 1825-1834, 2009.

Parte B. Condiciones perturbadas:

- Blanch, E., D. Altadill, J. Boška, D. Burešová and M. Hernández-Parjares, November 2003 event: effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data. *Annales Geophysicae*, 23, 3027-3034, 2005.
- Altadill, D., E. Blanch and V. Paznukhov, Respuesta de la ionosfera en latitudes medias a tempestades geomagnéticas intensas, *Física de la Tierra*, 20, 115-132, ISSN: 02140-4557, Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense de Madrid, 2008.

En el momento de deposición de esta tesis doctoral, se está preparando un artículo con los resultados obtenidos del capítulo B3.

Otros trabajos que se han publicado paralelamente a esta tesis doctoral pero

que no se han incluido en ella son:

- Altadill, D., D. Arrazola and E. Blanch, F-region vertical drift measurements at Ebro, Spain, *Advances in Space Research* 39 (5), 691–698, 2007.
- Curto, J.J., J.O. Cardús, L.F. Alberca and E. Blanch, Milestones of the IAGA International Service of Rapid Magnetic Variations and its contribution to geomagnetic field knowledge. *Earth Planets Space*, 59 (5), 463–471, 2007.
- Torta, J.M., S. Marsal, J.C. Riddick, C. Vilella, D. Altadill, E. Blanch, O. Cid, J.J. Curto, A. De Santis, L.R. Gaya-Piqué, J. Mauricio, J.L. Pijoan, J.G. Solé, A. Ugalde, An example of operation for a partly manned Antarctic geomagnetic observatory and the development of a radio link for data transmission, *Annals of Geophysics*, 52 (1), 45-56, 2009.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- Adeniyi, J.O. and S.M. Radicella, Variation of bottomside profile parameters B0 and B1 at high solar activity for an equatorial station, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60 (11), 1123-1127, 1998.
- Altadill, D., D. Arrazola, E. Blanch and D. Buresova, Solar activity variations of ionosonde measurements and modeling results, *Advances in Space Research*, 42 (4), 610-616, 2008a.
- Altadill, D., E. Blanch and V. Paznukhov, Respuesta de la ionosfera en latitudes medias a tempestades geomagnéticas intensas. *Física de la Tierra*, 20, 115-132, ISSN: 0214-4557, Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense de Madrid, 2008b.
- Altadill, D., J.M. Torta and E. Blanch, Proposal of new models of the bottom-side B0 and B1 parameters for IRI, *Advances in Space Research*, 43 (11), 1825-1834, 2009.
- Araujo-Pradere, E.A., T.J. Fuller-Rowell and M.V. Codrescu, STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model. 1. Model description, *Radio Science*, 37, 10.1029/2001RS002467, 2002.
- Araujo-Pradere, E.A. and T.J. Fuller-Rowell, STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model. 2. Validation, *Radio Science*, 37, 10.1029/2002RS002620, 2002.
- Araujo-Pradere, E.A., T.J. Fuller-Rowell, M.V., Codrescu and A. Anghel, Evaluation and prospects for storm-time corrections in the International Reference Ionosphere, *Advances in Space Research*, 33 (6), 902-909, 2004a.
- Araujo-Pradere, E. A., T.J. Fuller-Rowell and D. Bilitza, Ionospheric variability for

- quiet and perturbed conditions, *Advances in Space Research*, 34 (9), 1914-1921, 2004b.
- Bartels, J., The standardized index, Ks, and the planetary index, Kp, *IATME Bulletin*, 12b, 97, IUGG Publication Office, Paris, 1949.
- Bartels, J., N.H. Heck and H.F. Johnston, The three-hour range index measuring magnetic activity, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 44, 411-454, 1939.
- Bauske, R. and G.W. Pröls, Modeling the ionospheric response to traveling atmospheric disturbances, *Journal of Geophysical Research*, 102 (A7), 14555-14562, 1997.
- Belehaki, A. and I. Tsagouri, On the occurrence of storm-induced nighttime ionization enhancements at ionospheric middle latitudes, *Journal of Geophysical Research*, 107 (A8), 1209-1227, 2002.
- Bent, R., S. Llewellyn and M. Walloch, Description and evaluation of the Bent ionospheric model, AD 753081, National Technical Information Service, Springfield, Va., 1972.
- Bilitza, D., N.M. Sheikh and R. Eyfrig, A Global Model for the Height of the F2-Peak Using M(3000)F2 Values from the CCIR Numerical Map, *Telecommunication Journal*, 46, 549-553, 1979.
- Bilitza, D., Electron density in the equatorial topside, *Advances in Space Research*, 5 (10), 15-19, 1985.
- Bilitza, D., The International Reference Ionosphere 1990, National Space Science Data Center, NSSDC/WCA-A-R& S Report 90-22, Greenbelt, Maryland, 1990.
- Bilitza, D., International Reference Ionosphere—Status 1995/96, *Advances in*

- Space Research, 20 (9), 1751-1754, 1997.
- Bilitza, D., Improving the standard IRI B0 model, in: S.M. Radicella (Ed.), Proceedings of the IRI Task Force Activity 1997, pp. 6–14, International Center for Theoretical Physics, Report IC/IR/98/9, Trieste, Italy, 1998.
- Bilitza, D., C. Koblinsky, R. Williamson and S. Bhardwaj, Improving the topside electron density model for IRI, *Advances in Space Research*, 22 (6), 777-792, 1998.
- Bilitza, D. and R. Williamson, Towards a better representation of the IRI topside based on ISIS and Alouette data, *Advances in Space Research*, 25 (1), 149-152, 2000.
- Bilitza, D., S. Radicella, B.W. Reinisch, J. Adeniyi, M. Mosert de Gonzales, S. Zhang and O. Obrou, New B0 and B1 models for IRI, *Advances in Space Research*, 25 (1), 89–96, 2000.
- Bilitza, D., International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, 36 (2), 261–275, 2001.
- Bilitza, D., B.W. Reinisch, R.F. Benson, J. Grebowsky, N. Papistashvili, X. Huang, W. Schar and K. Hills, Online database of satellite sounder and insitu measurements covering two solar cycles, *Advances in Space Research*, 31 (3), 769–774, 2003.
- Bilitza, D., A correction for the IRI topside electron density model based on Alouette/ISIS topside sounder data, *Advances in Space Research*, 33 (6), 838-843, 2004.
- Bilitza, D. and B.W. Reinisch, International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters, *Advances in Space Research*, 42 (4), 599-609, 2008.

- Blanch, E., D. Altadill, J. Boska, D. Buresova and M. Hernández-Pajares, November 2003 event: effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data, *Annales Geophysicae*, 23, 3027-3034, 2005.
- Blanch, E., D. Arrazola, D. Altadill, D. Buresova and M. Mosert, Improvement of IRI B0, B1 and D1 at mid-latitudes using MARP, *Advances in Space Research*, 39(5), 701-710, 2007.
- Bowman, G.G., A review of some recent work on mid-latitude spread-F occurrence as detected by ionosondes. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 42 (2), 109-138, 1990.
- Bradley, P.A., Mapping the critical frequency of the F2 layer: Part 1 – Requerimientos and Developments to around 1980, *Advances in Space Research*, 10 (8), 47-56, 1990.
- Brown, G.M. and R. Wynne, Solar daily disturbance variations in the lower ionosphere, *Planetary and Space Science*, 15, 1677–1686, 1967.
- Buresova, D., D. Altadill, M. Mosert and G. Miró, Predicted and measured bottomside F-region electron density and variability of the D1 parameter under quiet and disturbed conditions over Europe, *Advances in Space Research*, 34 (9), 1973–1981, 2004.
- Buresova, D., Effects of geomagnetic storms on the bottomside ionospheric F region, *Advances in Space Research*, 35 (3), 429-439, 2005.
- Burns, A.G., T.L. Killeen and G.R. Carignan, Large enhancements in the O/N2 ratio in the evening sector of the winter hemisphere during geomagnetic storms, *Journal of Geophysical Research*, 100, 14 661–14 671, 1995.
- Campbell, W.H., Differences in Geomagnetic Sq Field Representations Due to Variations in Spherical Harmonic Analysis Techniques, *Journal of*

- Geophysical Research, 95 (A12), 20923-20936, 1990.
- Chapman, M.A., The absorption and dissociation ionisation effect of monochromatic radiation in a rotating Earth, Proceedings of the Royal Society of London, 43 (1), 26, 1931.
- Chapman, S. and J. Bartels, Geomagnetism, Oxford, Clarendon Press, 1940.
- Coisson, P., S.M. Radicella, R. Leitinger, R. and B. Nava, Topside electron density in IRI and NeQuick: Features and limitations, Advances in Space Research, 37(5), 937–942, 2006.
- Cole, K.D., Joule heating of the Upper Atmosphere, Australian Journal of Physics, 15, p.223-235, 1962.
- Crowley, G., C.L. Hackert, R.R. Meier, D.J. Strickland, L.J. Paxton, X. Pi, A. Mannucci, A.B. Christensen, D. Morrison, G.S. Bust, R.G. Roble, N. Curtis and G. Wene, Global thermosphere-ionosphere response to onset of 20 November 2003 magnetic storm. Journal of Geophysical research, 111, A10S18, doi: 10.1029/2005JA011518, 2006
- Davis, C.J., M.N. Wild, M. Lockwood and Y.K. Tulunay, Ionospheric and geomagnetic responses to changes in IMF Bz: a superposed epoch study, Annales Geophysicae, 15, 217–230, 1997.
- Davis, T.N. and M. Sugiura, Auroral Electrojet Activity Index AE and Its Universal Time Variations, Journal of Geophysical Research, 71, 785-801, 1966.
- Di Giovanni, G. and S.M. Radicella, An analytical model of the electron density profile in the ionosphere, Advances in Space Research, 10 (11), 27-30, 1990.
- Deminova, G.F., V.M. Shashunkina and E.E. Goncharova, A global empirical model of effects of large-scale internal gravity waves in the night-time

- ionosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60 (2), 227-245, 1998.
- Denton M.H., T. Ulich and E. Turunen, Modification of midlatitude ionospheric parameters in the F2 layer by persistent high-speed solar wind streams, *Space Weather*, 7, S04006, doi:10.1029/2008SW000443, 2009.
- Dudeney, J.R., A simple empirical method for estimating the height and semi-thickness of the F2-layer at the Argentine Islands, Graham Land, *Scientific Reports 88*, British Antarctic Survey, Cambridge, U.K., 1974.
- Duncan, R.A., F-region seasonal and magnetic storm behavior, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 31, 59-70, 1969.
- Dungey, J.W., Interplanetary magnetic field and the auroral zones, *Physical Review Letters*, 6, 47–48, 1961.
- Ebihara, Y., M.-C. Fok, S. Sazykin, M.F. Thomsen, M.R. Hairston, D.S. Evans, F.J. Rich and M. Ejiri, Ring current and the magnetosphere-ionosphere coupling during the superstorm of 20 November 2003, *Journal of Geophysical Research*, 110, A09S22, doi: 10.1029/2004JA010924, 2005.
- Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, Edited by David Gubbins and Emilio Herrero-Bervera, ISBN 1402039921, 9781402039928, Springer, 2007.
- Foster, J.C. and F.J. Rich, Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms, *Journal of Geophysical Research*, 103 (A11), 26367–26372, 1998.
- Fox, M.W. and L.F. McNamara, Improved World-Wide Maps of Monthly Median foF2, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 50 (12), 1077-1086, 1988.

- Fuller-Rowell, T.J., D. Rees, H. Risbeth, A.G. Burns, T.L. Killeen and R.G. Roble, The composition change theory of F-region storms, *Journal Atmospheric Terrestrial Physics*, 53, 797–815, 1991.
- Fuller-Rowell, T.J., M.V. Codrescu, R.J. Moffett and S. Quegan, Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *Journal of Geophysical Research*, 99 (A3), 3893-3914, 1994.
- Fuller-Rowell, T.J., M.V. Codrescu, H. Rishbeth, R.J. Moffett and S. Quegan, On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *Journal of Geophysical Research*, 101 (A2), 2343-2353, 1996.
- Gauss. C.F., *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus. Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1838* (English translation: *General theory of terrestrial magnetism*). In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs Selected from the Transactions of Foreign Academies of Science and Learned Societies and from Foreign Journals*, volume 2, pages 184–251, 1841.
- Gombosi, T.I., *Physics of the Space Environment*, Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1998.
- Gonzalez, W.D. and B.T. Tsurutani, Criteria of Interplanetary Parameters Causing Intense Magnetic Storms ($Dst < -100$ nT), *Planetary and Space Science*, 35, 1101-1109, 1987.
- Gopalswamy, N., L. Barbieri, E.W. Cliver, G. Lu, S.P. Plunkett and R.M. Skoug, Introduction to violent Sun-Earth connection events of October-November 2003. *Journal of Geophysical Research*, 110, doi:10.1029/2005JA011268, 2005.
- Gulyaeva, T.L., *Progress in ionospheric informatics based on electron density*

- profile analysis of ionograms. *Advances in Space Research*, 7(6), 39-48, 1987.
- Gulyaeva, T. L. Variable coupling between the bottomside and topside thickness of the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69 (4-5), 528-536, 2007.
- Haines, G.V., and J.M. Torta, Determination of equivalent current sources from spherical cap harmonic models of geomagnetic field variations, *Geophysical Journal International*, 118, 499-514, 1994.
- Hargreaves, J.K., *The solar-terrestrial environment*, Cambridge atmospheric and space science series, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1992.
- Hernandez-Pajares, M., J.M. Juan and J. Sanz, New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 61, 1237–1247, 1999
- Hochegger, G., B. Nava, S.M. Radicella and R. Leitinger, A family of ionospheric models for different uses, *Physics and Chemistry of the Earth*, 25 (4), 307-310, 2000.
- Hocke, K. and K. Schlegel, A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995, *Annales Geophysicae*, 14 (9), 917-940, 1996.
- Huang, C.-S., J.C. Foster and P.J. Erickson, Effects of solar wind variations on the midlatitude ionosphere, *Journal of Geophysical Research*, 107 (A8), 1192-1203, 2002.
- Huang, C.-S., J.C. Foster and M.C. Kelley, Long-duration penetration of the interplanetary electric field to the low-latitude ionosphere during the main phase of magnetic storms, *Journal of Geophysical Research*, 110,

A11309, doi:10.1029/2005JA011202, 2005

- Huang, X. and B.W. Reinisch, Vertical electron density profiles from digisonde ionograms. The average representative profile, *Annali di Geofisica*, 39 (4), 751–756, 1996a.
- Huang, X. and B.W. Reinisch, Vertical electron density profiles from the Digisonde network. *Advances in Space Research*, 18(6), 21-29, 1996b.
- Jones, K.L. and H. Rishbeth, The origin of storm increases of mid-latitude F-layer electron concentration, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 33, 391-401, 1971.
- Jones, W.B. and R.M. Gallet, The Representation of Diurnal and Geographic Variations of Ionospheric Data by Numerical Methods, *Telecommunication Journal*, 29, 129-147, 1962.
- Jones, W.B. and R.M. Gallet, The Representation of Diurnal and Geographic Variations of Ionospheric Data by Numerical Methods, *Telecommunication. Journal*, 32, 18-28, 1965.
- Kamide, Y., N. Yokoyama, W. Gonzalez, B. T. Tsurutani, I. A. Daglis, A. Brekke and S. Masuda, Two-step development of geomagnetic storms, *Journal of Geophysical Research*, 103 (4), 6917–6921, 1998.
- Kan, J.R. and L.C. Lee, Energy coupling functions and solar wind-magnetosphere dynamo, *Geophysical Research Letters*, 6, 577-580, 1979.
- Kelley, M., *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, Academic, San Diego, California. United States, 1989.
- Kelley, M.C. and S. Fukao, Turbulent upwelling of the mid-latitude ionosphere: 2. Theoretical framework, *Journal of Geophysical Research*, 96, 3747-3753,

- 1991.
- King, G.A.M., The night E-layer, in: "Ionospheric Sporadic E", edited by: Smith, E. K. and Matsushita, S., 219–231, Pergamon Press, Oxford, UK, 1962.
- Khorosheva, O.V., Relation of the magnetospheric disturbances to the parameters of the interplanetary medium, *Geomagnetism and Aeronomy*, 26, 447-453, 1986.
- Lazo, B., A. Calzadilla, K. Alazo, M. Rodríguez and J.S. González, Regional mapping of F2 peak plasma frequency by spherical harmonic expansion, *Advances in Space Research*, 33 (6), 880-883, 2004.
- Lei, J., L. Liu, W. Wan, W., S.R. Zhang and J.M. Holt, A statistical study of ionospheric profile parameters derived from Millstone Hill incoherent scatter radar measurements. *Geophysical Research Letters*, 31, L14804, doi:10.1029/2004GL020578, 2004.
- Lomb, N.R., Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and Space Science*, 39 (2), 447–462, 1976.
- Ma, S.Y., L. Xu and K.C. Yeh, A study of ionospheric electron density deviations during two great storms, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 57, 1037-1043, 1995.
- Martyn, D.F., Electric currents in the ionosphere. III. Ionization drift due to winds and electric fields, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 246(913), 306-320, 1953.
- Meier, R.R., G. Crowley, D.J. Strickland, A.B. Christensen, L.J. Paxton, D. Morrison and G.L. Hackert, First look at the 20 November 2003 superstorm with TIMED/GUVI: Comparisons with a thermospheric global circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 110, A09S41, doi: 10.1029/2004JA010990, 2005.

- Meng, C.I., Dynamic Variation of the Auroral Oval during intense magnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 89 (1), 227-235, 1984.
- Mikhailov, A.V., M.G. Skoblin and M. Föster, Daytime F2-layer positive storm effect at middle and lower latitudes, *Annales Geophysicae*, 13, 532-540, 1995.
- Miller, C.A., W.E. Swartz, M.C. Kelley, M. Mendillo, D. Nottingham, J. Scali and B. Reinisch, Electrodynamics of midlatitude spread F: 1. Observations of unstable, gravity wave-induced ionospheric electric fields at tropical latitudes, *Journal of Geophysical Research*, 102 (6), 11521-11532, 1997.
- Miró, G., M. Cueto, K. Alazoc and S.M. Radicella, Validation of the STORM model used in IRI with ionosonde data, *Advances in Space Research*, 39 (5), 681-686, 2007.
- Mosert, M. and S.M. Radicella, Seasonal behaviour of B0 and B1, in: *Proceedings of the IRI Task Force Activity 1996*, pp. 42–49, International Centre for Theoretical Physics, Report IC/IR/97/11, Trieste, Italy, 1997.
- Mosert, M., D. Buresova, R. Ezquer, G. Mansilla, Behavior of the bottomside electron density profile over Pruhonice. *Advances in Space Research*, 34 (9), 1982–1989, 2004.
- Pallochia, G., Amata, E., Consolini, G., Marcucci, M. F., and Bertello, I.: Geomagnetic Dst index forecast based on IMF data only, *Annales Geophysicae*, 24, 989–999, 2006.
- Parkinson, W.D., *Introduction to Geomagnetism*, Scottish Academic Press, Edinburgh, 1983.
- Perreault, P. and S.I. Akasofu, A study of geomagnetic storms. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 54 (3), 547 – 573, 1978.

- Prölss, G.W., Storm-induced changes in the thermospheric composition at middle latitudes, *Planetary and Space Science*, 35, 807-811, 1987.
- Prölss, G.W., On explaining the local time variation of ionospheric storm effects, *Annales Geophysicae*, 11 (1), 1-9, 1993.
- Prölss, G.W., Ionospheric F-Region Storms, *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, vol. 2 (ed. Volland), CRC Press/Boca Rato, 195-248, 1995.
- Prölss, G.W. and M. Očko, Propagation of upper atmospheric storm effects towards lower latitudes, *Advances in Space Research*, 26 (1), 131-135, 2000.
- Prölss, G.W., *Physics of the Earth's Space Environment*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2004.
- Radicella, S.M., D. Bilitza, B.W. Reinisch, J.O. Adeniyi, M. Mosert Gonzalez, B. Zolesi, M.L. Zhang and S.R. Zhang, IRI task force activity at ICTP: Proposed improvements for the IRI region below the peak, *Advances in Space Research*, 22 (6), 731–739, 1998.
- Radicella, S.M. and R. Leitinger, The evolution of the DGR approach to model electron density profiles, *Advances in Space Research*, 27 (1), 35-40, 2001.
- Ramakrishnan, S. and K. Rawer, Model electron density profiles obtained by empirical procedures, *Space Research XII*, 1253–1261, Akademie-Verlag, Berlin, 1972.
- Rawer, K., Propagation of decameter waves (HF Band), in *Meteorological and Astronomical Influences on Radio Wave Propagation*, ed. B. Landmark, pp. 221-250, academic Press, New York, 1963.

- Rawer, K., D. Bilitza, S. Ramakrishnan and M. Sheikh, Intentions and buildup of the International Reference Ionosphere, in Operational Modeling of the Aerospace Propagation Environment, AGARD Conference Proceedings 238, 6.1-6.10, 1978.
- Reinisch, B.W. and X. Huang, Finding better B0 and B1 parameters for the IRI F2-profile function, *Advances in Space Research*, 22 (6), 741-747, 1998.
- Reinisch, B.W. and X. Huang, Deducing topside profiles and total electron content from bottomside ionograms. *Advances in Space Research*, 27 (1), 23-30, 2001.
- Reinisch, B.W., I.A. Galkin, G. Khmyrov, A. Kozlov and D. F. Kitrosser, Automated collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network, *Advances in Radio Science*, 2, 241-247, 2004.
- Reinisch, B.W., X. Huang, I.A. Galkin, V. Paznukhov and A. Kozlov, Recent advances in real-time analysis of ionograms and ionospheric drift measurements with digisondes, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67 (12), 1054-1062, 2005.
- Richmond, A.D., Ionospheric electrodynamics using Magnetic Apex Coordinates, *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 47 (2), 191-212, 1995.
- Rishbeth, H. and D.W. Barron, Equilibrium electron distributions in the ionospheric F2-layer, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 18, 234-252, 1960.
- Rishbeth, H. and O.K. Garriott, Introduction to ionospheric physics, Academic Press, New York and London, 1969.
- Rishbeth, H. and M. Mendillo, Patterns of the F2-layer variability, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63(15), 1661-1680, 2001.

- Rostoker, G., L. Lam and W.D. Hume, Response time of the magnetosphere to the interplanetary electric field. *Canada Journal of Physics*, 50 (6), 544-547, 1972.
- Rush, C.M., M. PoKempner, D.N. Anderson, F.G. Stewart and J. Perry, Improving Ionospheric Maps Using Theoretically Derived Values of foF2, *Radio Science*, 18, 95, 1983.
- Rush, C.M., M. PoKempner, D.N. Anderson, J. Perry, F.G. Stewart and R. Reasoner, Maps of foF2 Derived from Observations and Theoretical Data, *Radio Science*, 19, 1083, 1984.
- Sabaka T.J., N. Olsen and R.A Langel, A comprehensive model of the quiet-time, near Earth magnetic field: phase 3, *Geophysical Journal International*, 151, 32-68, 2002.
- Saiz, E., C. Cid and Y. Cerrato, Forecasting intense geomagnetic activity using interplanetary magnetic field data. *Annales Geophysicae*, 26, 3989–3998, 2008.
- Scargle, J.D., Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal*, Part 1, 263, 835-853, 1982.
- Sethi, N.K. and K.K. Mahajan, The bottomside parameters B0, B1 obtained from incoherent scatter measurements during a solar maximum and their comparisons with the IRI-2001 model, *Annales Geophysicae*, 20 (6), 817-822, 2002.
- Shimazaki, T., World wide daily variations in the height of the maximum electron density in the ionospheric F2 layer, *Journal of the Radio Research Laboratories*, Japan, 2, 85-97, 1955.
- Sugiura, M. and S. Chapman, The average morphology of geomagnetic storms

- with sudden commencement. *Abhandl. Akad. Wiss. Gottingen. Math-Physik. K.I. Sonderh.*, 4, 53 pp, 1960.
- Thomas, L, The distribution of dense Es ionisation at high latitudes, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 24 (7), 643-657, 1962.
- Torta, J.M, J.J Curto and P. Bencze, Behavior of the quiet day ionospheric current system in the European region, *Journal of Geophysical Research*, 102 (A2), 2483-2494, 1997.
- Tsagouri, I., A. Belehaki, G. Moraitis and H. Mavromichalaki, Positive and negative ionospheric disturbances at middle latitudes during geomagnetic storms, *Geophysical Research Letters*, 27 (21), 3579-3582, 2000.
- Tsagouri, I. and A. Belehaki, A new empirical model of middle latitude ionospheric response for space weather applications, *Advances in Space Research*, 37 (2), 420–425, 2006.
- UAG23A: URSI Handbook of ionogram interpretation and reduction, edited by: Piggott, W.R. and K. Rawer, WDC A, National Academy of Sciences, Washington, D.C., USA, Second edition, 1978.
- UAG23A: URSI Manual of ionogram scaling, Revised Edition, edited by: Wakai, N., H. Ohyaama and T. Koizumi, Radio Research Laboratory, Japan 1986.
- Wang, H., H. Lühr, S.Y. Ma, J. Weygand, R.M. Skoug and F. Yin, Field-aligned currents observed by CHAMP during the intense 2003 geomagnetic storm events, *Annales Geophysicae*, 24, 311-324, 2006.
- Wang, H., Lühr, H., Ridley, A., Ritter, P. and Y. Yu. Storm time dynamics of auroral electrojets: CHAMP observation and the Space Weather Modelling Framework comparison. *Annales Geophysicae*, 26, 555-570, 2008.

- Wright, J.W., Dependence of the Ionospheric *F* Region on the Solar Cycle, *Nature*, 194, 461-462, 1962.
- Zhang J., M.W. Liemohn, J.U. Kozyra, M.F. Thomsen, H.A. Elliott and J.M. Weygand, A statistical comparison of solar wind sources of moderate and intense geomagnetic storms at solar minimum and maximum, *Journal of Geophysical Research.*, 111, A01104, doi:10.1029/2005JA011065, 2006.
- Zhang, M.L., J.K. Shi, X. Wang, S.Z. Wu and S.R. Zhang, Comparative study of ionospheric characteristic parameters obtained by DPS-4 digisonde with IRI2000 for low latitude station in China, *Advances in Space Research*, 33 (6), 869–873, 2004.
- Zhang, M.L., W. Wan, L. Liu and J.K. Shi, Variability of the behavior of the bottomside (B0, B1) parameters obtained from the ground-based ionograms at China's low latitude station. *Advances in Space Research*, 42 (4), 695-702, 2008.

Esta Tesis Doctoral ha sido defendida el día ____ de _____ de 200_ en el
Centro _____

de la Universitat Ramon Llull

delante del Tribunal formado por los Doctores abajo firmantes, habiendo obtenido la
calificación:

Presidente/a

Vocal

Secretario/aria

Doctorando/a
