



Escuela de Ciencias del Mar.

**Curso de capacitación para oficiales en
Meteorología-Oceanografía.**

**Trabajo integrador final para el curso de
capacitación en METOC.**

Meteorología espacial y comunicaciones.

Paulino Agustín LADO.

03/12/2018.

Índice:

Tema	N° de página
Resumen.	2
Introducción.	2
El sol.	6
Fenómenos meteorológicos solares.	9
Estructura terrestre.	11
La ionósfera.	14
Propagación de ondas de radio.	15
Variación ionosférica y su efecto en la propagación de ondas de radio.	21
Conclusiones.	24
Bibliografía.	27

RESUMEN:

La meteorología espacial estudia las condiciones en el espacio que pudieran impactar en el uso de diversas tecnologías que se encuentran en el espacio y en la tierra. Los fenómenos de meteorología espacial, interactúan con el campo electromagnético terrestre y partículas ionizantes. Este trabajo informa sobre la importancia que tiene para la Armada Argentina el establecimiento de una estación de observación ionosférica, las aplicaciones existentes en meteorología espacial y sobre antecedentes, actualidad y perspectivas del estudio ionosférico y pronósticos espaciales con fines tácticos. Se basa en el estudio de la actividad ionosférica y solar y sus consecuencias en el área de comunicaciones.

INTRODUCCIÓN:

La meteorología espacial pretende determinar las condiciones físicas del sol, haciendo hincapié en la interacción entre los efectos del viento solar, la magnetósfera, la ionósfera y termósfera.

El propósito de este trabajo es describir la influencia del pronóstico espacial en las prestaciones y fiabilidad de sistemas tecnológicos, en particular los de telecomunicaciones. Además se pretende interpretar las condiciones variables en el sol, el ambiente espacial y su influencia en el rendimiento de tecnologías vitales para el desarrollo de operaciones militares.

La ionización de la atmósfera afecta a los sistemas de comunicaciones de alta frecuencia, para lo cual se explica como se cuantifica y mide esa capa para establecer frecuencias indispensables para establecer enlaces entre distintas unidades y ante los distintos requerimientos acorde a la tarea que estén realizando.

Las ondas de radio son una forma de ondas electromagnéticas, su propagación depende de las condiciones ambientales, que determinan la frecuencia para establecer un buen enlace. Para ello debemos saber que la atmósfera, está compuesta por distintas capas: la tropósfera, es la capa en la que se desarrolla la vida y la mayoría de los fenómenos meteorológicos. Su espesor se relaciona íntimamente con la latitud. Se extiende en promedio hasta 12 km de altura (con un mínimo de aproximadamente 8 km en los polos y 18 km en el Ecuador). Concentra alrededor del 80% de la masa de la atmósfera. La estratósfera, se extiende hasta los 50 km de altura aproximadamente. Se encuentra la máxima concentración de ozono (denominada capa de ozono), gas que absorbe gran parte de la radiación ultravioleta del Sol. Estas dos capas tienen baja incidencia para la propagación de alta frecuencia (HF). La ionósfera, comprendida entre la mesósfera y termósfera, contiene varias capas de iones con carga eléctrica, formadas mediante el proceso de ionización, teniendo gran importancia para el establecimiento de comunicaciones a larga distancia. Las ondas de radio, que viajan por la tropósfera, de transmisor a receptor, se denominan ondas terrestres. Las ondas que viajan de transmisor a receptor a través de la ionósfera se denominan ondas espaciales.

La ionización ocurre cuando la energía ultravioleta de alta frecuencia, proveniente del sol, incide sobre los átomos, que se encuentran en la ionósfera, a los cuales se le desprende un electrón. Esto genera un área de carga positiva alrededor del átomo y un electrón libre. Mientras la radiación solar ultravioleta incide sobre los átomos, se continuará con la formación de aniones y átomos de carga positiva, constituyendo dicha capa. La ionización dependerá de la cantidad de átomos presentes y de la intensidad de la radiación solar, la cual varía de acuerdo a la intensidad de la actividad solar predominante. De acuerdo a esta variación de intensidades de radiación se forman varias capas de ionización a distintas alturas. La radiación de bajas frecuencias inciden en la capa más alta y las de mayores frecuencias inciden en

capas más bajas. En sí, la variación del espesor de la capa depende de la incidencia del sol, la hora del día y la época del año. En esta capa también se lleva a cabo un proceso denominado recombinación por la cual, el electrón libre se combina con un átomo que desprendió un electrón y que quedo con carga positiva.

Se forman, por este proceso cuatro capas D, E y F, de menor a mayor altura con respecto a la superficie de la tierra. Por la continua variación de la intensidad solar, las capas ionosféricas son difíciles de predecir, sin embargo, se puede generalizar respecto a sus alturas y duración promedio. La capa D varía de 30 a 55 millas, posee baja ionización y desaparece con la puesta del sol a causa del proceso de recombinación. En la capa E de 55 a 90 millas, la tasa de recombinación es menor que la capa D, por lo que demora más tiempo en desaparecer (aproximadamente a medianoche). La capa F abarca de 90 a 250 millas, se divide en F1 y F2, siendo F1 la más baja. Se forman durante el día y posee alta ionización siendo máxima de noche.

EL SOL.

A lo largo de los siglos se fueron realizando observaciones de la actividad solar, principalmente sobre manchas solares. Con el advenimiento de la tecnología, se fueron sistematizando estas observaciones e identificando causas y efectos. Derivado de estas observaciones surge lo que se denomina meteorología espacial.

Muchas personas comenzaron a observar el sol, por ejemplo, George Graham (1674-1751), un relojero londinense, notó por primera vez que se generaban variaciones magnéticas producto de la actividad solar, cuya manifestación fue una pronunciada oscilación y rápidas fluctuaciones en la dirección en que apuntaba la aguja de la brújula. Por otra parte, George Graham junto al astrónomo y físico sueco Anders Celcius notaron, en 1741, que las desviaciones irregulares de la aguja de la brújula ocurren cuando las auroras intensas están presentes. A mediados del siglo diecinueve, el explorador y naturalista alemán Barón Alexander von Humboldt (1769-1859) midió las variaciones en el campo magnético denominándolas: "tormentas magnéticas". Edward Sabine fue el primero en reconocer que las perturbaciones solares afectan el entorno magnético de la Tierra. En 1852, anunció que el ciclo de manchas solares de 11 años del Sol era "absolutamente idéntico" al ciclo geomagnético de 11 años de la Tierra. A partir de la observación de las alteraciones que ocurrían en telégrafos, cada vez que ocurría una tormenta solar se estudió con más ímpetu y se esquematizó su ciclo, permitiéndonos acceder a datos científicos certeros. Cada tormenta magnética histórica ha estado acompañada por efectos significativos en los sistemas terrestres eléctricos y éstos han ido cambiando a medida que la tecnología evolucionó, adecuándose a estas limitaciones.

El sol, es una estrella ordinaria de la clase espectral G2 v, también llamada enana amarilla. La energía se genera en el núcleo por fusión de hidrógeno generando helio como subproducto. El sol, como la tierra,

tiene distintas capas; las más relevantes para la climatología espacial son:

Fotósfera: es la parte superior de la zona de convección, la superficie visible del Sol, dentro encontramos a la atmósfera solar, que consiste en:

- Cromósfera, se extiende aproximadamente 2000-5000 km sobre la fotósfera.
- La zona de transición, con gradientes de temperatura abruptos.
- Y la corona solar, se extiende a los medios interplanetarios como viento solar.

Las observaciones de oscilaciones mecánicas solares continuas (ondas acústicas) con períodos centrados en aproximadamente 5 minutos, proporcionan la información del interior solar. A partir del análisis de las siguientes observaciones: la velocidad del sonido, densidad, temperatura y la composición química del interior solar, se realizan los modelos solares estándar. Además, se obtienen tasas de rotación del interior solar y conduce al descubrimiento de la tacoclina, región de transición que separa áreas con diferente flujo de plasma y juega un papel importante en la generación de campo magnético del sol.

Una serie de características que se puede observar en la fotósfera incluye las manchas solares oscuras, las fáculas brillantes, gránulos, supergránulos, flujos a gran escala y un patrón de ondas y oscilaciones.

Las manchas solares tienen dos partes: la más oscura, llamada "central" o "umbra" y la "penumbra" circundante, que es más clara. Las temperaturas en los centros oscuros de las manchas solares son aproximadamente de 3700 K, siendo que la temperatura promedio de la fotósfera es de 5700 K, razón por la que se la ve oscura. Por lo general, duran varios días, aunque las manchas más grandes pueden

persistir varias semanas. Están rodeadas de granulares, áreas brillantes en la superficie solar. Los grupos de manchas solares a menudo van acompañados de pequeñas "fáculas" (del latín pequeña antorcha) blancas. Pueden aparecer y desaparecer, pero las fáculas a menudo permanecen más tiempo o incluso presagian la aparición de nuevos grupos de manchas. La granulación es un patrón visible en la superficie, causado por movimientos verticales en la zona convectiva debajo de la fotosfera. Gotas calientes de gas de varios cientos de kilómetros de diámetro se mueven hacia arriba a 10-15 km / s (más rápido que la velocidad del sonido en la fotosfera, pero mucho más lento que la velocidad del sonido en la zona convectiva), se enfrían irradiando calor y luego se hunden en el interior. Las granulaciones se forman, cambian y se reforman durante períodos del orden de diez a veinte minutos. Las manchas solares no son realmente "manchas", son regiones de fuerte campo magnético producidas cuando la rotación diferencial intensifica los campos magnéticos debajo de la fotosfera (en la tacoclina). Los campos magnéticos, se abren paso a través de la superficie, creando un grupo de manchas solares, con varios miles de grados más fríos que el resto de la fotosfera y aparecen como áreas oscuras. En el centro, el campo magnético es el más fuerte y casi vertical, mientras que en la penumbra es más débil y más inclinado.

La Cromósfera se puede ver usando la longitud de onda absorbida fuertemente por los gases en las capas sobre la superficie. Una de tales longitudes de onda es la longitud de onda más larga de la serie de absorción de hidrógeno de Balmer, conocida como H-alfa ($H\alpha$). Los filamentos pueden soportar varias rotaciones solares y cuando entran en erupción, desaparecen. El material se propaga a la corona como eyección de masa coronal, creando un evento del clima espacial y puede afectar la tecnología terrestre. La corona del Sol es la parte exterior de la atmósfera solar, es mucho más caliente (por un factor de 150 a 450 K) que la fotosfera y es 10-12 veces más densa que la esta, y produce alrededor de un millonésimo de luz visible. El mecanismo

exacto por el cual se calienta la corona sigue siendo tema de debate. El campo magnético coronal abierto transporta la materia lejos del Sol, produciendo el viento solar.

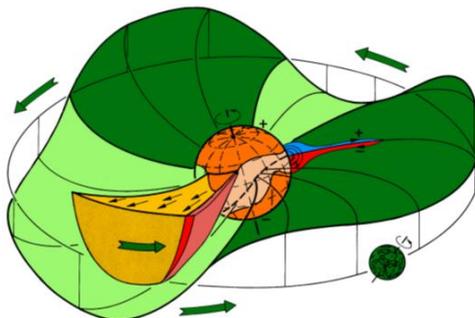
FENÓMENOS METEOROLÓGICOS SOLARES.

Los procesos solares que resultan en eventos meteorológicos espaciales son complejos y a menudo, no se entienden completamente. Sin embargo, los éxitos recientes en física solar y observaciones solares conducen a una mejor comprensión y predicciones de los eventos solares.

Para el clima espacial, la principal importancia es comprender el inicio de la eyección de masa coronal. Se cree que se debe a dos procesos: uno es el proceso eruptivo en regiones activas con estructuras magnéticas complejas y está asociado con la erupción del destello solar. El segundo se debe a la erupción del filamento, que no está asociado con la llama solar. Las erupciones solares, las partículas energéticas solares y los filamentos y los agujeros coronales desempeñan un papel activo en el cambio del clima espacial.

El viento solar es el responsable de la creación de un campo magnético de escala planetaria. Hay un número bastante limitado de observaciones de viento solar que proporcionan datos in situ sobre las propiedades del viento solar, por lo tanto, el modelado del viento solar y la propagación de la perturbación solar a través de este medio variable es de primordial importancia para llenar las lagunas observacionales y mejorar la comprensión de la dinámica del clima espacial. Los modelos también se utilizan ampliamente para pronosticar los eventos del clima espacial en el viento solar y el espacio interplanetario. El viento solar en expansión arrastra el campo magnético solar hacia afuera,

formando lo que se llama el campo magnético interplanetario (IMF). La región del espacio en el que este campo magnético solar es dominante se llama heliósfera. El modelo de superficie solar de campo potencial (PFSS) comúnmente utilizado del IMF consta de varias regiones: campo magnético interno potencial con líneas de campo magnético cerrado y campo magnético externo con líneas de campo abierto. Estas dos regiones tienen un límite que lleva una corriente eléctrica y se denomina lámina de corriente heliosférica. La lámina de corriente heliosférica separa las regiones del viento solar donde el campo magnético del IMF señala hacia o desde el Sol. Aunque el viento solar se mueve casi radialmente desde el Sol, la rotación del Sol le da al campo magnético una forma de espiral. Se pueden identificar sectores con campos magnéticos alternos dirigidos hacia adentro y hacia afuera.



Viento solar y campo electromagnético interplanetario, Geomagnetic Laboratory Canadian Space Weather Forecast Centre Natural Resources Canada.

El viento solar existe en dos estados, el viento solar lento y el viento solar rápido, y sus diferencias se extienden mucho más allá de sus velocidades. En el espacio cercano a la Tierra, el viento solar lento tiene una velocidad de 300-500 km / s, una temperatura de $1.4-1.6 \times 10^6$ K y una composición que se asemeja mucho a la de la corona. El viento solar rápido tiene una velocidad típica de 750 km / s, una temperatura de 8×10^5 K y casi coincide con la composición de la fotosfera del Sol. El viento solar lento es dos veces más denso y más variable en naturaleza que el viento solar rápido. El viento solar lento se origina en una región alrededor del cinturón ecuatorial del Sol que

se conoce como el "cinturón de serpentina", donde los serpentinos coronales se producen por flujo magnético abierto a la heliósfera que se extiende sobre bucles magnéticos cerrados. Las estructuras coronales exactas implicadas en la lenta formación de viento solar y el método por el cual se libera el material aún están en debate. El viento solar rápido se origina en los agujeros negros coronales, que son regiones en forma de embudo de líneas de campo abierto en el campo magnético del Sol. Tales líneas abiertas son particularmente frecuentes alrededor de los polos magnéticos del Sol. El viento solar tarda de uno a cinco días en alcanzar la superficie de la tierra. Durante su propagación, las eyecciones de masa coronal (CME) interactúan con el viento solar y el campo magnético interplanetario (IMF) y forman un fenómeno CME interplanetario compuesto (ICME).

El campo magnético de la Tierra se asemeja al campo producido por un imán de barra. Tal campo se llama campo dipolo porque tiene dos polos, ubicados en cualquier extremo del imán, donde la fuerza del campo es máxima. Matemáticamente, el campo magnético de la Tierra se describe normalmente mediante una expansión armónica esférica, una serie de funciones esféricas especiales de latitud / longitud y sus coeficientes asociados. Tales descripciones matemáticas del campo magnético se llaman modelos de campo de referencia magnético. Aunque el campo magnético de la Tierra se asemeja al de un imán de barra, no puede ser el origen del campo. Los imanes permanentes no pueden existir a las temperaturas que se encuentran en el núcleo de la Tierra. Además, debido a que los campos magnéticos se descomponen, el campo geomagnético existente desaparecería en aproximadamente 15,000 años a menos que haya un mecanismo para regenerarlo continuamente. El mecanismo de generación es similar a uno del campo magnético solar y se llama dínamo, debido al núcleo líquido de la tierra.

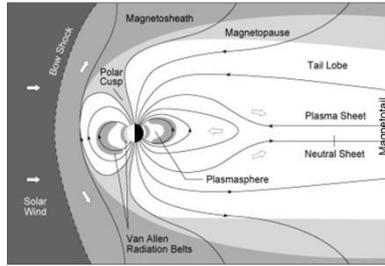
ESTRUCTURA TERRESTRE.

La Tierra está compuesta de capas: una delgada corteza externa, un manto de silicato, un núcleo externo y un núcleo interno. La temperatura y la presión aumentan con la profundidad, en el límite núcleo-manto es aproximadamente $4800\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo suficientemente caliente como para que el núcleo externo exista en estado líquido. El núcleo interno, sin embargo, es sólido debido al aumento de la presión. El núcleo está compuesto principalmente de hierro, con un pequeño porcentaje de elementos más ligeros. El núcleo interno está en constante movimiento, debido tanto a la rotación de la Tierra como a la convección. La convección es impulsada por el movimiento ascendente de los elementos ligeros. El proceso real mediante el cual se produce el campo magnético en este entorno es extremadamente complejo, solo se explican los conceptos básicos. Un campo poloidal es uno que tiene un componente radial. Los campos dipolos son poloides. Un campo toroidal, tiene forma de anillo o rosquilla, sin componente radial. En la Tierra, los campos toroidales están confinados al núcleo y no son detectables en la superficie de la Tierra.

Mecanismo de formación del campo magnético terrestre: El núcleo gira con una velocidad angular que depende de su radio. El campo poloidal, se mueve con el fluido. Debido a la rotación diferencial, el fluido se mueve más lentamente en la parte superior del núcleo externo, esas líneas de campo se dejarán atrás en comparación con las líneas de campo al centro. Eventualmente, después de un circuito completo, se formarán dos bucles toroidales. Esto se denomina efecto ω , un mecanismo por el cual los campos poloidales se convierten en campos toroidales.

Considerando el movimiento convectivo y una línea de campo desde un campo toroidal, en una célula convectiva ascendente. La línea de campo se arrastrará junto con la celda. Dado que la Tierra está girando, la fuerza de Coriolis hará que el fluido de afloramiento gire en

sentido antihorario (en el hemisferio norte). La línea de campo se retorcerá junto con el fluido, y después de un cuarto de vuelta, se produce un lazo magnético poloidal. Este proceso se denomina efecto α , un mecanismo por el cual los campos toroidales se convierten en campos poloidales. Los bucles poloidales pueden fusionarse para producir un gran campo poloidal. Varios métodos propuestos por los cuales el efecto α y el efecto ω pueden generar el campo magnético de la Tierra. En la dinamo $\alpha\omega$, el movimiento del fluido, asociado con la rotación diferencial del núcleo externo, a través de las líneas de campo poloidal da lugar a un campo toroidal en el núcleo externo. La torsión de las líneas de campo toroidales congeladas en el fluido ascendente da lugar, a su vez, a campos poloidales que pueden reforzar el campo poloidal original. Para mantener un campo magnético de estado estacionario, la velocidad a la que el campo se genera mediante el efecto $\alpha\omega$ debe ser igual a la velocidad de difusión. Si no son iguales, el campo crecerá o decaerá, que probablemente sea la situación normal. El campo magnético de la Tierra está comprimido desde el lado subsolar por el viento solar y se extiende en el lado opuesto, formando la magnetósfera. Esta tiene una estructura compleja, definida por los diferentes regímenes de plasma y campo magnético. El límite externo de la magnetosfera es la magnetopausa, dentro de la magnetosfera el campo magnético está dominado por la Tierra, por fuera, por el campo magnético interplanetario, es decir, donde el viento solar toma el control de los movimientos de las partículas cargadas. El viento solar se desvía alrededor de la Tierra, tirando del campo magnético terrestre en una magnetocola larga en el lado nocturno. Las cúspides polares son dos singularidades en las que las líneas del campo magnético se separan entre las cerradas en el lado del día y se abren hacia la magnetocola.



Interacción entre viento solar y campo geomagnético, Geomagnetic Laboratory /Canadian Space Weather Forecast Centre Natural Resources Canada.

El plasma en el viento solar se desvía en el choque de proa, fluye a lo largo de la magnetopausa hacia la cola magnética y luego se inyecta nuevamente hacia la Tierra y el Sol dentro de la lámina neutra. Dentro de la magnetosfera hay otros dominios importantes, como los cinturones de radiación de Van Allen y la ionósfera.

LA IONÓSFERA.

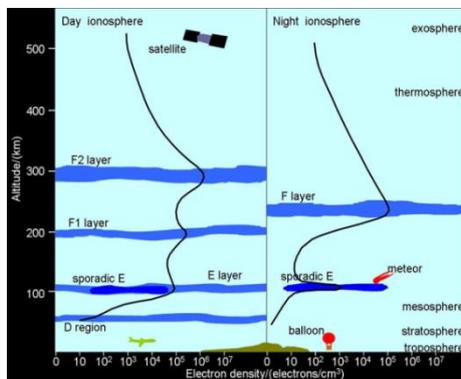
La ionósfera es una región de la atmósfera superior de la Tierra, desde aproximadamente 60 km hasta 1,000 km de altitud e incluye la termosfera y partes de la mesósfera y la exósfera. Es ionizada por la radiación solar a través del proceso de foto-ionización y forma el límite interno del sistema de corrientes magnetósfera-ionósfera. Las corrientes en la ionósfera influyen en el campo geomagnético que causa sus variaciones y la variabilidad de la densidad electrónica en la ionosfera influye en la propagación de las ondas de radio.

La capa D es la capa más interna, (de 60 a 90 km). En esta capa hay más moléculas de aire neutro que iones. Durante los eventos de protones solares (rayos x), la ionización puede alcanzar niveles inusualmente altos en la región D en latitudes altas y polares.

La capa E es la capa intermedia, (90 a 150 km). Por la noche, la capa E se debilita porque la principal fuente de ionización ya no está presente. La capa E (capa E esporádica) se caracteriza por nubes

pequeñas y delgadas de ionización intensa, que pueden durar de unos pocos minutos a varias horas.

La capa F o región se extiende desde aproximadamente 150 km (93 mi) hasta más de 500 km sobre la superficie de la Tierra. Es la capa más densa de la ionosfera. La capa F consta de una capa por la noche, pero durante el día, a menudo se forma una deformación en el perfil etiquetado como F1. La capa F2 permanece durante el día y la noche, lo que facilita las comunicaciones de radio de alta frecuencia (HF o de onda corta) a largas distancias.



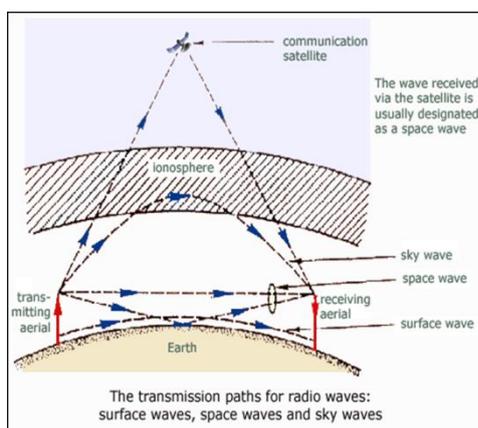
Estructura de la ionósfera, geomagnetic Laboratory /Canadian Space Weather Forecast Centre Natural Resources Canada.

Los vientos de las mareas atmosféricas debido al calentamiento solar diferencial o debido al forzamiento lunar gravitatorio mueven el plasma ionosférico contra las líneas del campo geomagnético, generando así campos eléctricos y corrientes en la región E de la ionosfera de la Tierra. La manifestación magnética de estas corrientes eléctricas en el suelo se puede observar durante condiciones de silencio magnetosféricas.

PROPAGACIÓN DE ONDAS DE RADIO.

Una onda terrestre es la que se propaga sobre la superficie terrestre. La línea de vista es la distancia antena-antena, estas ondas no pueden viajar sobre el horizonte o detrás de los obstáculos. La onda directa más común son los modos VHF y las frecuencias más altas cuando cualquier obstrucción bloqueará la señal. Las ondas espaciales viajan directamente del transmisor al receptor sin reflejarse desde el suelo. Viaja a distancias más largas que la línea de visión porque la mayoría de las ondas espaciales se doblan cerca del suelo y siguen un camino curvado. Se necesitan antenas especiales (alta ganancia polarizadas horizontalmente) con un ángulo de emisión muy bajo para que la mayor parte de la potencia transmitida se irradie cerca de la tierra en lugar de escapar hacia el cielo.

Las ondas celestes, son la propagación de ondas de radio dobladas (refractadas) de vuelta a la superficie de la Tierra por la ionósfera. La comunicación por radio HF (3-30MHz) es el resultado de la propagación de las ondas ionosféricas.



*Propagación de ondas de radio,
Geomagnetic Laboratory /Canadian
Space Weather Forecast Centre
Natural Resources Canada.*

El rango de frecuencias utilizables depende de los parámetros de la ionósfera. Frecuencia máxima observada (MOF): frecuencia máxima que se refracta desde la ionósfera hacia la Tierra; determinado por la densidad de electrones de la región F. Las frecuencias más altas que el MOF penetran a través de la ionósfera (que no llega al receptor de

tierra). A frecuencias más bajas, la señal se atenúa por la capa D. La frecuencia más baja que se puede propagar en una onda celeste durante el día depende de la ionización en la capa D. Las trayectorias de las ondas del cielo que se encuentran completamente en el hemisferio nocturno no se ven afectadas por la región D.

Ionosonda: La característica más importante de la ionósfera para las comunicaciones de ondas decamétricas es su capacidad para refractar las ondas de radio. En determinada ubicación en un momento determinado, algunas de las frecuencias más altas de HF penetrarán en la ionósfera, mientras que algunas de las frecuencias de HF más bajas serán absorbidas por la región D durante el día. El rango de frecuencias de HF que pueden ser refractadas por la ionosfera (rango de frecuencia utilizable) depende de la variabilidad de la ionósfera. El instrumento tradicional para medir el rango de frecuencia utilizable es la ionosonda de incidencia vertical. Consiste en un radar de alta frecuencia que transmite impulsos cortos de señales de HF a frecuencias variables, en forma vertical hacia la ionósfera. Si la frecuencia de un pulso está dentro del rango de frecuencias que pueden ser refractadas de vuelta al suelo, el pulso refractado será detectado por la ionosonda. El tiempo de demora entre la transmisión y la recepción de pulsos da las alturas aproximadas a las que se refractan. En el ionograma regular hay: una frecuencia crítica, la frecuencia más alta a la que se puede usar la propagación. La frecuencia de absorción de la capa D o la frecuencia utilizable más baja (LUF) se muestran como el límite de frecuencia más bajo de la primera curva.

Un riómetro (Medidor de Opacidad Ionosférica Relativa) es un instrumento utilizado para cuantificar la cantidad de absorción ionosférica de ondas electromagnéticas en la atmósfera. Como su nombre lo indica, un riómetro mide la "opacidad" de la ionósfera al ruido de radio que emana del origen cósmico galáctico. La ausencia de

absorción ionosférica, es un ruido de radio que se promedia durante un período de tiempo suficientemente largo para formar una curva denominada de “día tranquilo”. El aumento de la ionización en la ionósfera causará la absorción de señales de radio (tanto terrestre como extraterrestre), y una desviación de la curva de día tranquilo. La diferencia entre la curva de día tranquilo y la señal del riómetro es un indicador de la cantidad de absorción, y se mide en decibelios. Los riómetros son generalmente antenas de radio pasivas que funcionan en el rango de frecuencia de radio VHF (aproximadamente 30-40 MHz).

La ionósfera es una capa variable. Al amanecer (a alturas ionosféricas), la radiación ultravioleta extrema (EUV) produce electrones, la concentración de electrones aumenta lo suficiente como para permitir que las regiones E y F1 refracten las ondas del cielo y las frecuencias más altas para que sean compatibles con la región F2. Desde la salida del sol hasta el mediodía, el flujo de EUV aumenta incrementando la producción de electrones y permitiendo que las frecuencias más altas sean refractadas por todas las regiones. El flujo de EUV alcanza un máximo alrededor del mediodía, lo que lleva a la concentración máxima de electrones en la ionósfera que ocurre entonces o un poco más tarde. A medida que avanza la tarde, el flujo de EUV disminuye y la densidad de electrones y las frecuencias disminuyen lentamente. Al atardecer, sin radiación EUV para producir electrones, las regiones E y F1 se vuelven esencialmente transparentes para las ondas de radio de HF, ya que los electrones se disipan rápidamente. La región F2 se mantiene durante toda la noche, aunque con una densidad decreciente de electrones, debido a la mayor vida útil de los electrones y los vientos atmosféricos. La densidad de electrones de la región F2 y las frecuencias alcanzan un mínimo justo antes del amanecer.

Las frecuencias refractadas de las regiones E y F1 suelen ser más altas en verano que en invierno. Sin embargo, la variación en las frecuencias de la región F2 es más complicada ya que las frecuencias

son mayores cerca de los equinoccios (marzo y septiembre). Alrededor del mínimo solar, las frecuencias del mediodía de verano son, como se esperaba, generalmente mayores que las del invierno, pero durante el máximo solar, las frecuencias de invierno tienden a ser más altas que las frecuencias de verano (la "anomalía estacional").

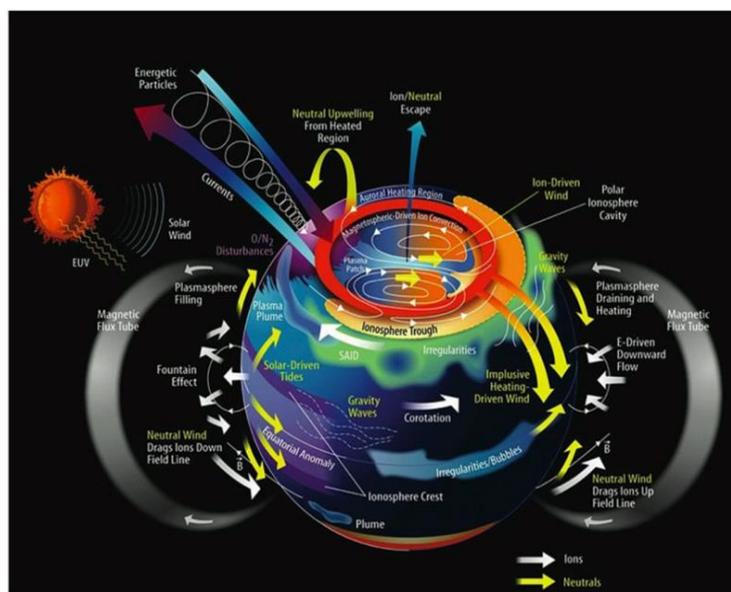
Variación ionosférica de origen solar: Se pueden identificar una variedad de "fenómenos meteorológicos ionosféricos" o perturbaciones, que son evidentes por sus efectos en las comunicaciones por radio, por exhibiciones aurorales inusuales y / o por el inicio de fluctuaciones del campo geomagnético. A veces, se pueden usar diferentes nombres para eventos estrechamente asociados pero puede tener causas bastante diferentes. A continuación se los detallara escuetamente y luego se los desarrollará más detenidamente:

Tormenta ionosférica: los eventos solares como los agujeros coronales y las eyecciones de masa coronal cambian el carácter del viento solar, aumentando su velocidad y alterando su densidad y estructura magnética. Cuando el viento solar perturbado impacta la magnetósfera de la Tierra, el campo geomagnético y los campos eléctricos y las corrientes a las altitudes ionosféricas cambian. La respuesta de la ionósfera, consiste en un cambio en la densidad de electrones en la región F y se denomina "tormenta ionosférica".

La perturbación ionosférica itinerante (TID) es una onda u ondulación en la estructura de densidad de electrones que se propaga horizontalmente, lo que afecta la refracción de las ondas de radio. Hay dos tipos principales: TID a gran escala con 1000 km o más entre crestas de onda que usualmente se mueven del polo al ecuador y se generan por actividad auroral; TID de escala media con cientos de kilómetros de longitudes de onda que se cree que son generadas por la actividad de la tormenta eléctrica.

Los rayos X emitidos durante el evento de destello solar penetran en la región D liberando electrones que aumentarán rápidamente la tasa de absorción, causando un apagón de radio de alta frecuencia (3-30 MHz). Durante este tiempo, las señales de muy baja frecuencia (3-30 kHz) se reflejarán en la capa D en lugar de en la capa E, donde la mayor densidad generalmente aumentará la absorción de la onda y la amortiguará, disminuyendo la distancia a la cual se podría establecer un enlace de radio. Tan pronto como finaliza el evento de rayos X, la perturbación ionosférica repentina (SID) o el apagón de la radio culmina cuando los electrones en la región D se recombinan rápidamente y la intensidad de la señal vuelve a la normalidad.

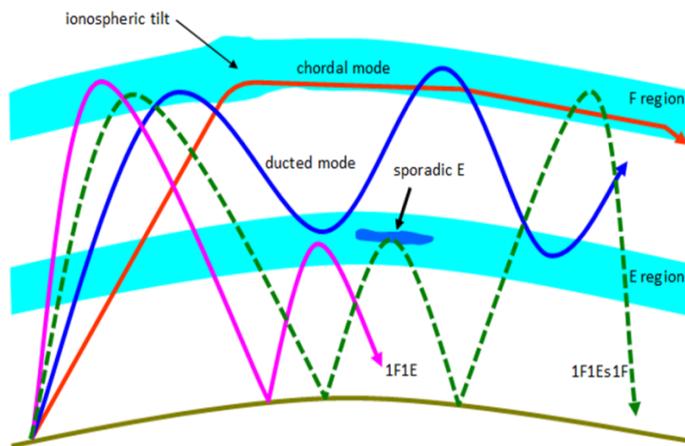
Liberación de partículas energéticas solares (protones). Estos protones descienden en espiral por las líneas de campo magnético verticales de la Tierra y penetran en la ionósfera cerca de los polos magnéticos, aumentando la ionización de las capas D y E. este fenómeno pueden durar hasta varios días, con un promedio de alrededor de 24 a 36 horas.



Dinámica de las interacciones solar-magnético-ionosférica-atmosférica, Geomagnetic Laboratory/Canadian Space Weather Forecast Centre Natural Resources Canada.

VARIACIÓN IONOSFÉRICA Y SU EFECTO EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS DE RADIO.

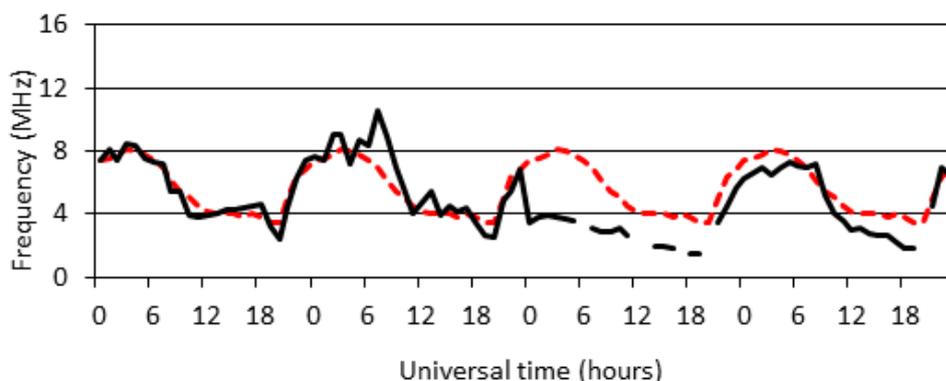
Debido a que la ionósfera real no es homogénea, cambia la altura y el ángulo de refracción de las señales. Su variación depende de que la emisión sea cerca de las anomalías ecuatoriales, el valle de latitudes medias, la hora del día y cuando la ionósfera se vea perturbada debido a la actividad solar. Todo esto podría implicar una serie de refracciones de la ionósfera (incluida E esporádica). Cuando ocurre, las señales pueden ser fuertes, ya que la onda pasa menos tiempo atravesando la región absorbente durante el día D y / o siendo atenuada por las reflexiones del suelo (modo canalizado).



Variación ionosférica y propagación de ondas de radio. Geomagnetic Laboratory/Canadian Space Weather Forecast Centre Natural Resources Canada.

Tormentas ionosféricas: Las tormentas ionosféricas se caracterizan por variaciones mayores que las normales en la frecuencia más alta que la región F puede refractar (MOF). Para algunas trayectorias de ondas ionosféricas en ondas decamétricas, el MOF de la región F aumenta durante unas pocas horas antes de disminuir por debajo de los valores inalterados. En otras rutas, el MOF simplemente disminuye. El comportamiento de los MOF verticales de la región F durante un período de cuatro días se muestra a continuación. La tormenta ionosférica comienza en la primera mitad del día 2 con los MOF aumentando muy por encima de los valores predichos. La disminución

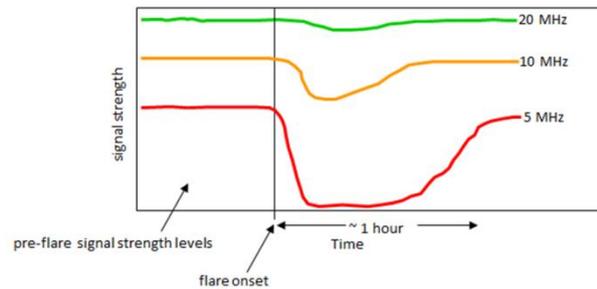
dramática en la densidad de electrones y los MOF ocurre el día 3. Los MOF siguen deprimidos (por debajo de los valores predichos) el día 4.



Perturbaciones ionosféricas y propagación HF, Geomagnetic Laboratory /Canadian Space Weather Forecast Centre Natural Resources Canada.

Las tormentas ionosféricas pueden durar varios días con latitudes altas que generalmente experimentan disminuciones más grandes en la densidad de electrones de la región F que otras latitudes. Los efectos de las tormentas ionosféricas comienzan lentamente y tienen una duración prolongada, de uno a varios días, y pueden requerir el uso de frecuencias operativas más bajas. La región E no se verá afectada por las tormentas ionosféricas. Las perturbaciones ionosféricas viajeras (TID) pueden cambiar la altitud y el ángulo de refracción, enfocando o extendiendo la señal, generando períodos de desvanecimiento del orden de más de 10 minutos. Los TID viajan horizontalmente de 5 a 10 km / minuto con una trayectoria bien definida. Algunos TID se originan en zonas aurales después de eventos en el Sol y pueden viajar grandes distancias. Otros son más localizados y se originan en perturbaciones climáticas. Las TID pueden variar la fase, la amplitud y el ángulo de llegada de las ondas celestes. La radiación de rayos X del sol durante las grandes erupciones solares aumenta exponencialmente, lo que mejora la ionización en la región D y da como resultado una mayor absorción de las ondas celestes de alta

frecuencia. Si erupción es lo suficientemente grande, todo el espectro de HF puede sufrir atenuación severa por un período de tiempo variable.



Frecuencias más bajas son más absorbidas que las altas, Australian Government, Bureau of Meteorology

Los científicos están explorando la estructura de la ionósfera mediante una amplia variedad de métodos, que incluyen observaciones pasivas de emisiones ópticas y de radio generadas en la ionósfera y experimentos activos que emiten ondas de radio de diferentes frecuencias.

Un modelo ionosférico es una descripción matemática de la ionósfera en función de la ubicación, la altitud, el día del año, la fase del ciclo de la mancha solar y la actividad geomagnética. El estado del plasma ionosférico se describe mediante cuatro parámetros: densidad de electrones, temperatura de iones y composición iónica. La propagación de radio HF depende únicamente de la densidad de electrones. Uno de los modelos más utilizados es el de la ionósfera de referencia internacional (IRI), que se basa en la descripción estadística de datos observacionales y especifica los cuatro parámetros del estado de la ionósfera.

CONCLUSIONES.

Todos estos parámetros son un apoyo de gran importancia para las comunicaciones. En el ámbito militar, no se puede dar menor interés al hecho de conocer todos los factores que pueden interferir en las comunicaciones y un fracaso o falla de las operaciones militares. El factor naturaleza debe ser tenido en cuenta y desarrollar una infraestructura para el estudio de todos los factores mencionados con anterioridad, y así poder elegir las mejores frecuencias para el establecimiento de comunicaciones confiables y determinar del mismo modo la certeza de los métodos de posicionamiento y de armas que pueden hacer fracasar una operación. Se debe estar adelantado a este hecho para tomar medidas pertinentes.

Resulta sumamente importante tener presente estos conceptos teóricos para establecer el rol fundamental que cumple la climatología espacial en la ionización atmosférica y esta a su vez en las comunicaciones. Por comunicaciones me refiero a toda señal que se propague a través de la ionósfera, lo cual incluye señales satelitales y de comunicación HF.

La variabilidad de las distintas capas es medida y predicha, con sustanciales dificultades. Las predicciones de frecuencias, tienen principalmente una base estadística. Los ionosondeos, son observaciones in situ, que reflejan el comportamiento de la ionósfera en un lugar y momento dado. La validez de los datos obtenidos por ionosondeos están en el orden de los 500 km. Su variación depende de la hora del día, la época del año y el ciclo solar, que dura aproximadamente 11 años.

La meteorología espacial actualmente se basa en observaciones que realizan sondas, de origen estadounidense y de predicciones con base estadística. Nuestro país depende de esta información por lo publicado por este tipo de agencias, de renombre internacional, siendo las

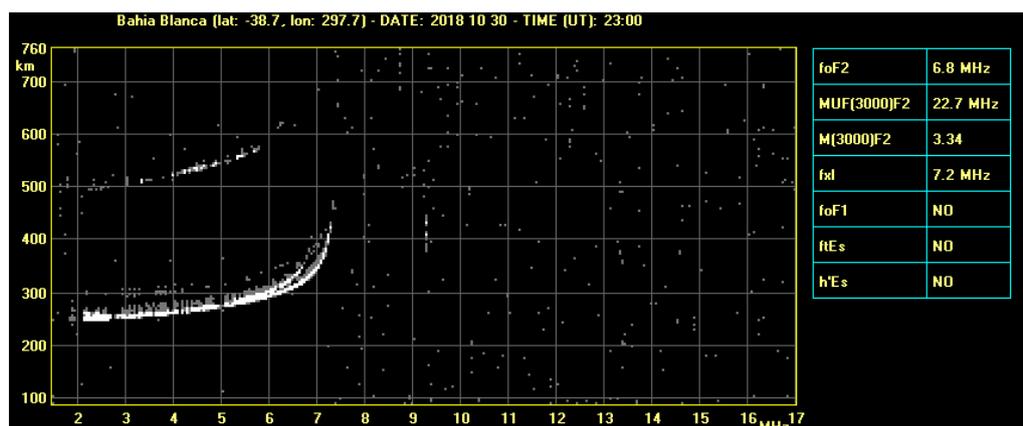
principales la NOAA y el Bureo de Meteorología del Gobierno de Australia.

Las predicciones tienen asociado un alto grado de dificultad que está asociado a la velocidad con que los distintos fenómenos de la actividad solar se desplazan. Se sabe que una emisión solar de rayos x y rayos ultravioletas, tarde en el orden de los minutos en alcanzar e ionizar la ionósfera y sus efectos puede alcanzar, cualquier parte del globo terrestre y durar en el orden de 30 minutos. Estas emisiones son acompañadas por una posterior eyección de masa coronaria, que alcanzará la ionósfera entre 24 a 32 hs después.

A modo de ejemplo imaginemos una situación. Una unidad naval que se encuentra haciendo una navegación de altura en nuestro mar argentinos, sabe que en 24 hs tendrá que estar capeando un temporal, para lo cual debe estar comunicada con una estación en tierra, para actualizar al comando en tierra sobre su situación, respondiendo a los requisitos de seguridad. ¿Qué sucedería si en ese momento no puede comunicarse, debido a una alta ionización de la atmósfera? Considere la importancia que tendría un correcto asesoramiento si se contara con la información de la alta ionización de la atmósfera por efecto de un bombardeo de rayos x y que en 24 hs una tormenta solar, los dejara aislados sin comunicaciones. Contar con esta información es vital para evitar situaciones riesgosas. Otro ejemplo, puede ser una unidad realizando relevamientos hidrográficos y/o realizando alguna tarea que requiera de un posicionamiento satelital con un alto grado de certeza acerca de su posición. Una alta ionización, generaría un mayor retardo en las señales lo que modificaría la posición obtenida. Planes de contingencia debe proveerse para estos casos, así sea esto cambiar de rumbo, suspender actividades previstas o emplear frecuencias más altas para intentar comunicarse.

Al resultar muy compleja la predicción de ionización atmosférica por rayos x, nos quedan dos caminos a tomar. Uno de ellos en confiar en la

información que brindan las agencias internacionales que fueron nombradas, para conocer dónde y con que intensidad está ocurriendo un evento de rayos x a partir de allí cuantificar en cuanto tiempo nos alcanzaría la eyección de masa coronaria y con esta información alertar a las estaciones y unidades. La otra alternativa, que es complementaria, consiste en establecer una red de sondeos ionosféricos, a lo largo de la costa argentina, separadas entre sí a una distancia de 500 km y realizar constantemente sondeos que no sólo nos indiquen si una alta ionización se está debiendo a la ionización por rayos x y debemos prepararnos para una futura ionización por efecto del impacto de la masa coronaria, sino que además permita obtener las mejores frecuencias a emplear para los planes de comunicaciones en vigor.



Ejemplo de ionosondeo, UTN Bahía Blanca,
<http://ionos.ingv.it/bahiablanca/latest.html>

BIBLIOGRAFÍA.

<http://www.spaceweather.gc.ca/forecast-previous/sf-en.php>

<http://www.sws.bom.gov.au/Educational/5/2/2>

<http://ionos.ingv.it/>

<http://ionos.ingv.it/bahiablanca/latest.html>

<https://science.nasa.gov/heliophysics/focus-areas/space-weather>

https://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ap.html

<http://www.ipellejero.es/hf/propagacion/ionosfera/index.php>

<http://www.inta.es/opencms/export/sites/default/ATMOSFERA/es/observatorios/estacion-de-sondeos-atmosfericos-esat-37n-7w/ionosfera/>

<http://www.spaceweather.com/>

<https://region6armymars.org/>

<http://www.solarham.net/>

<http://www.solen.info/solar/index.html>

http://www.sws.bom.gov.au/HF_Systems/6/5

<http://www.voacap.com/>

https://www.meted.ucar.edu/oceans/radio_waves/