
CAPÍTULO 1

PROPAGACIÓN DE RF

1.1 Ondas Electromagnéticas.

Las ondas electromagnéticas pueden ser propagadas por el espacio libre, las ondas de radio frecuencia son ondas electromagnéticas, éstas ondas también se propagan por el espacio libre a una velocidad de 3×10^8 m/s que es la velocidad de la luz, a la atmósfera generalmente se le llama espacio libre, aunque algunas características de ésta provocan que no sea considerada como espacio libre estrictamente, la atmósfera normalmente genera pérdidas en las ondas transmitidas.



Otras formas de ondas electromagnéticas que no se utilizan para la transmisión de señales son los rayos gamma, los ultravioleta, rayos infrarrojos y los rayos X, los cuales no son objeto de estudio de este proyecto.

La siguiente ecuación muestra como calcular la longitud de onda para diferentes rangos de frecuencias.

$$\lambda = \text{Velocidad de propagación} / \text{Frecuencia} \quad (1.1)$$

Donde:

- λ es la longitud de onda expresada en metros.
- Velocidad de propagación expresada en metros/segundo.
- Frecuencia expresada en Hertz

En la Figura 1.1 se pueden ver las bandas de Frecuencias existentes en el espectro electromagnético, además las longitudes de onda y ciertas características de éstas.

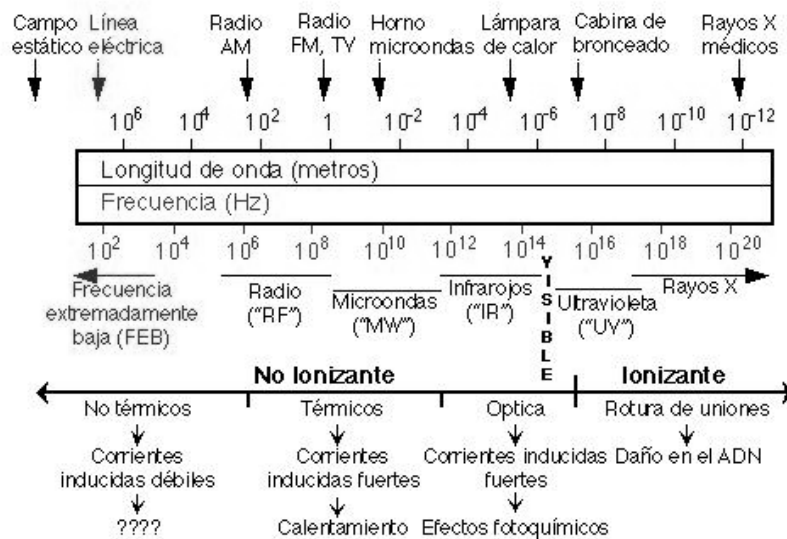


Figura 1.1 Bandas de frecuencias del espectro electromagnético.



Las ondas electromagnéticas se pueden propagar dentro y fuera de la atmósfera, cuando las ondas se propagan dentro de la atmósfera se les puede llamar ondas terrestres u ondas espaciales, este tipo de clasificación es dependiente de las bandas de frecuencias que se está utilizando. Cada banda de frecuencias tiene designada aplicaciones para la que pueden llegar a ser utilizada. A cada una de éstas bandas les corresponden tipos de transmisión distintos. Otro tipo de ondas son las llamadas ondas celestes, éstas se transmiten sobre el nivel del horizonte, con ángulos normalmente grandes con respecto a la tierra, se transmiten hacia el cielo donde son refractadas o reflejadas hacia la superficie terrestre por la ionósfera.

La tabla 2.1 muestra como están divididas las bandas de Radio Frecuencias y sus longitudes de onda.

Frecuencia	Denominación	Longitud de onda
3 – 30 Khz	VLF Frecuencia muy baja	100,000 – 10,000 m
30 – 300 Khz	LF Frecuencia baja	10,000 – 1000 m
300 – 3000 Khz	MF Frecuencia media	1000 - 100 m
3 – 30 Mhz	HF Frecuencia alta	100 – 10 m
30 – 300 Mhz	VHF Frecuencia muy alta	10 – 1 m
300 – 3000 Mhz	UHF Frecuencia Ultra elevada	1 m – 10 cm
3 – 30 Ghz	SHF Frecuencia Superelevada	10 – 1 cm
30 – 300 Ghz	EHF Frecuencia Extremadamente alta	1 cm – 1 mm

Tabla 1.1 División del espectro electromagnético y longitudes de onda [18].

Las ondas de radiofrecuencia se desplazan en el espacio libre como una línea recta. Las ondas a través del llamado espacio libre sufren cambios en su amplitud, su fase y cambios en la polarización de éstas mismas, por aspectos entre los cuales encontramos el clima, el



lugar de la estación terrena, y en el caso más específico el efecto de *shadowing* provocado por obstáculos físicos que la señal tiene que atravesar al estar realizando una transmisión en comunicaciones satelitales móviles.

Las ondas que se propagan a través de la atmósfera hasta alcanzar el espacio exterior serán las de mayor importancia para el estudio de este trabajo. Este tipo de ondas son utilizadas para transmisiones satelitales y también para comunicaciones satelitales móviles.

1.2 Propagación en el espacio libre y el Entorno Terrestre.

Todo sistema de telecomunicación debe diseñarse para que en el receptor se obtenga una relación señal-ruido $\left(\frac{C}{N}\right)$ mínima que garantice su funcionamiento. Los servicios de telecomunicaciones, radiodifusión, radiolocalización (radar), teledetección y radioayuda a la navegación, telefonía celular y comunicaciones satelitales móviles tienen en común el empleo de ondas electromagnéticas radiadas como soporte para la transmisión de información entre el transmisor y el receptor. Para el caso de una comunicación personal móvil vía satélite algunas de éstas relaciones pueden sufrir fuertes variaciones como se verá durante esta sección.

Los llamados fenómenos o mecanismos de propagación son la refracción, reflexión, difracción y dispersión éstos dan lugar a las trayectorias adicionales de propagación que están más allá de dirección óptica de "la línea de vista" de la trayectoria entre el satélite y el receptor.

La REFLEXIÓN ocurre cuando una señal electromagnética, que se propaga, golpea sobre un objeto cuyas dimensiones son mucho más grandes que la longitud de onda (?) de la



señal electromagnética y que tiene diferentes propiedades eléctricas. Un porcentaje de la señal es transmitido dentro del objeto (para materiales que no son conductores perfectos) y otro porcentaje es reflejado. La señal se refleja con un ángulo de reflexión (θ_r), el cual es igual al de incidencia (θ_i), esto es el enunciado de la ley de reflexión de Snell:

$$\theta_i = \theta_r \quad (1.2)$$

La DIFRACCIÓN de las señales de radio es la curva que hacen las señales alrededor de un objeto, la cual provoca un cambio de dirección de la señal. La cantidad de curvatura o el cambio de dirección se incrementa cuando: el grosor de los objetos se reduce o aumenta la longitud de onda. A altas frecuencias tanto la difracción como la reflexión dependen de la geometría del objeto, al igual que: la amplitud, la fase y la polarización de la señal en el punto de difracción [31].

La DISPERSIÓN es el fenómeno que ocurre cuando una señal de radio golpea contra una superficie rugosa o áspera y la energía reflejada es difundida o reflejada en varias direcciones [31].

La REFRACCIÓN es el cambio de dirección o curvatura de una señal electromagnética cuando ésta se transmite de un medio a otro, siempre y cuando éstos tengan un índice de refracción diferente, tal y como sucede con la luz. Es decir, la señal EM incide sobre un medio distinto con un ángulo de incidencia θ_i y es transmitida dentro de éste con un ángulo de transmisión θ_t . Por lo tanto, la refracción es parecida a la difracción en cuanto a que hay un cambio de dirección, sin embargo, la segunda es ocasionada por la presencia de un obstáculo y la primera por la transición de un medio a otro. Los ángulos involucrados en la refracción están relacionados por la ley de Refracción de Snell:

$$n_1 \text{Sen} \theta_i = n_2 \text{Sen} \theta_t \quad (1.3)$$

Donde



n_1 y n_2 son los índices de refracción del medio en el que viaja la señal y el medio en el que se transmite la señal respectivamente [31].

1.2.1 Ondas de Tierra.

Este tipo de ondas son afectadas de varias formas por el medio en el cual son transmitidas. Las ondas se transmiten y viajan cercanas a la superficie terrestre de diferentes modos, algunas tienen contacto directo entre ellas y la tierra. Por lo cual cuando hablamos de ondas de tierra nos referimos a las ondas que se propagan demasiado cercanas a la tierra, transmitiéndose desde el transmisor hasta el receptor sin dejar la tropósfera que es la capa más baja de la tierra, esto es posible si la onda se mantiene propagándose en contacto con la tierra y si en conjunto con esto se tiene línea de vista entre el transmisor y el receptor para que se puedan propagar directamente [18].

Otro tipo de ondas de tierra que se incluyen son las ondas que se propagan siguiendo la curvatura del planeta. Esta propagación es provocada por las flexiones con la tropósfera, este tipo de transmisión sólo es posible para un poco más de 100 kilómetros sobre la superficie de la tierra [18].

1.2.2 Onda Superficial.

Este tipo de ondas se propagan en contacto con las superficie de la tierra, una de las diferencias con las ondas de tierra radica en que éstas pueden propagarse a distancias mayores a los 160 Km durante el día, ya que es durante el día que la atenuación es más grande y junto con esto la atenuación tiende a elevarse conforme la frecuencia a la que se transmite aumenta.



Las ondas superficiales se propagan a través del planeta sobre la superficie de la tierra siguiendo su curvatura y si la tierra fuera un conductor perfecto la transmisión alcanzaría distancias enormes, pero como es de esperarse esto no ocurre, debido a que se producen tensiones entre el suelo y las ondas propagadas teniendo pérdida de energía, provocando en la onda una atenuación y como resultado de esto, una menor distancia de propagación [18].

Cuando una onda llega a tierra, su frente de onda se refleja y su fase se llega a invertir y sufre un desfase de 180 grados en comparación con la onda que salió del transmisor. Cuando la distancia entre las antenas es corta y queda casi a la misma altura que el suelo, se considera que la distancia recorrida por las dos ondas es la misma [5].

1.2.3 Ondas de Espacio.

Este tipo de ondas constituyen la superposición de todos los tipos de señales que pueden llegar a un receptor, es por esto que las señales reflejadas en la tierra y las que tienen línea de vista se incluyen como ondas de espacio.

Las ondas de espacio soportan un gran ancho de banda para aplicaciones en comunicaciones, éstas son una mezcla entre las ondas con línea de vista y las ondas de cielo para la propagación ionosférica [5].

Las ondas espaciales pueden clasificarse en otros dos tipos de ondas que son las ondas troposféricas y las ondas ionosféricas, las ondas troposféricas se propagan en zonas cercanas a la superficie de la tierra, hasta cerca de 10 Km aproximadamente, mientras que las ondas ionosféricas se propagan por arriba de los 10 Km hasta los 500 Km en la zona llamada ionósfera [18].



1.3 Superficie, difracción y formación de la onda de espacio.

Como parte de las características del medio que se deben de tomar en cuenta para la propagación de señales en el espacio libre y en particular para una buena conexión entre el satélite y la unidad móvil, se tomarán en cuenta las capas de la atmósfera terrestre.

Las características de cada una de estas capas provocan una buena o mala transmisión de las ondas electromagnéticas y podrían provocar retrasos en la señal, o en el peor de los casos la total distorsión de ésta, con lo que se perdería la información enviada. Siempre es importante tomar en cuenta las características del medio y las consecuencias de este sobre las ondas electromagnéticas. A continuación se describe brevemente cada una de las capas de la atmósfera éstas se pueden ver en la Figura 1.2 [27].

- *Tropósfera*: Capa más cercana a la tierra, en ella se producen todos los cambios climáticos y se extiende hasta cerca de los 10 Km.

- *Estratósfera*: En ella se encuentra ubicada la capa de ozono. Ideal para el transporte aéreo. Se tiene su existencia desde unos 11 Km. hasta los 50 Km.

- *Mesósfera*: Compreendida en la parte superior de la Estratósfera y hasta cercanos los 80 Km.

- *Termósfera*: Las partículas que la forman son ionizadas, dentro de ella se encuentran algunas capas ionosféricas. Su límite superior está por encima de los 400 Km.

- *Exósfera*: Capa más lejana y extensa de la atmósfera.

Partiendo desde un punto de vista que se enfoque a la conducción eléctrica hay dos capas que es importante mencionar:



Ozonósfera se encuentra entre los 25 y 70 Km. de altura (coincide aproximadamente con la mesósfera).

Ionósfera. Estrato fuertemente ionizado, su estructura vertical no es uniforme. Se extiende desde los 70 Km. hasta el final de la atmósfera.

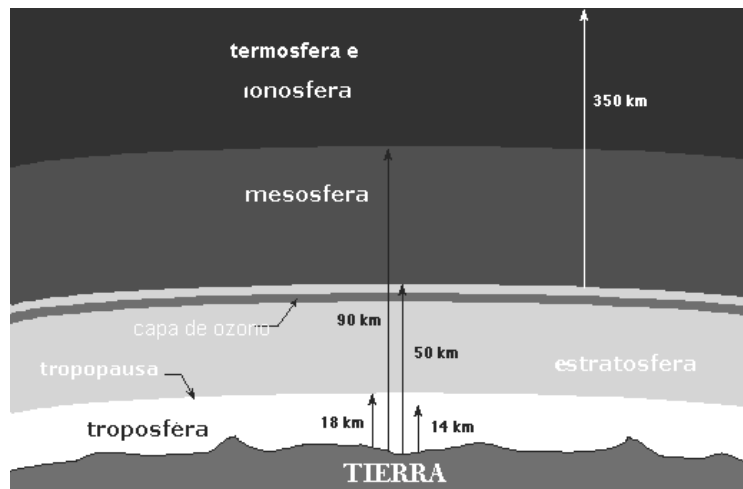


Figura 1.2 Representación de las Capas de la Tierra [27].

1.3.1 Efecto de la Troposfera.

La absorción molecular de los gases contenidos en la atmósfera y la atenuación producida por los hidrometeoros que no son otra cosa que un fenómeno formado por un conjunto de partículas acuosas, líquidas o sólidas que caen a través de la atmósfera que principalmente son la lluvia, llovizna, nieve, granizo, niebla, neblina, rocío y tromba. Éstas son las principales causas de la Atenuación Atmosférica[27].

La atenuación por absorción molecular se debe principalmente a las moléculas de oxígeno y vapor de agua. Para frecuencias inferiores a 10Ghz es prácticamente despreciable, mientras que a frecuencias superiores presenta un comportamiento creciente con la frecuencia y la aparición de atenuación asociada a las frecuencias de resonancias de las

moléculas. El índice de refracción de la atmósfera varía en función de la concentración de gases. Es por este motivo que para una atmósfera normal, el índice de refracción disminuye con la altura. El índice de refracción del aire es muy próximo a la unidad [5].

1.3.2 Difusión troposférica.

La difusión troposférica es importante en las bandas de VHF y UHF en las que el tamaño de las heterogeneidades es comparable a la longitud de onda, y la atenuación atmosférica es despreciable. Permite alcances de centenares de kilómetros, sin embargo, está sujeta a desvanecimientos debido a variaciones locales y rápidas de las condiciones atmosféricas. Este último inconveniente puede llegar a superarse aumentando la potencia de transmisión, aunque no en la mayoría de los casos [19].

1.3.3 Propagación en un medio ionizado y efecto de la ionósfera.

La propagación de ondas electromagnéticas en la ionósfera se puede modelar a partir de la propagación en plasmas. Un plasma es una región del espacio, con la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética del vacío, que también contiene electrones libres. Un análisis más acorde con la realidad debe considerar la presencia de un campo magnético estático, ya que en la ionósfera también existe el campo magnético terrestre[25].

La densidad de la ionósfera cambia con respecto a la cantidad de radiación solar que recibe, por lo cual está radiación no es constante. La razón por la que la radiación no es constante es porque depende de la rotación del sol sobre su propio eje junto con una variable de tiempo que depende de un periodo de 11 años de actividad ya que cada 11 años el promedio de las manchas solares alcanza sus picos máximos [25].



El principal motivo para darle importancia a las manchas solares es el hecho de que éstas son disturbios magnéticos sobre la superficie de la estrella solar y debido a esto existen altísimas emisiones de ondas electromagnéticas que abarcan un amplio rango de frecuencias que van desde la banda de HF hasta los rayos X, haciendo de esto una manifestación de alto ruido en la banda VHF, y aun más cuando las emisiones aumentan, cada 11 años.

1.4 Comunicaciones Ionosféricas.

La existencia de la ionósfera permite, tal como comprobó Marconi, las comunicaciones a grandes distancias. El efecto de la ionósfera es distinto para las diferentes bandas de frecuencias. A frecuencias bajas y muy bajas (bandas de LF y VLF) la ionósfera supone un cambio brusco en términos del índice de refracción atmosférico. Esta variación abrupta produce una reflexión de la onda incidente en la parte baja de la ionósfera.

La ionósfera es un medio cuyo índice de refracción varía con la altura. La densidad de ionización aumenta con la altura hasta alcanzar el máximo entre los 300 y 500 Km

La relación C/N mínima útil depende del tipo de información, su acondicionamiento, su modulación de está codificada o no.

1.5 Propagación en la Banda UHF.

Las Frecuencias de está banda son usadas comúnmente en comunicaciones vía satélite, que son las que nos interesan Normalmente es necesario tener línea de vista para este tipo de comunicaciones. En sistemas satelitales las ondas que se propagan por la ionósfera sufren



cambios, además de que la señal se polariza a razón del efecto conjunto del campo magnético de la tierra y la concentración de iones libres [4].

La propagación de este tipo de ondas se hace vía directa o por componentes de las ondas reflejadas de tierra de las ondas del espacio. Una de las características que hace deseable el uso de esta banda de frecuencias para comunicaciones personales móviles satelitales es su longitud de onda, la cual hace que las antenas sean de tamaño reducido.

Este tipo de banda también tiene otro tipo de aplicaciones, como televisión vía satélite, telefonía celular, radares, enlaces de microondas.

1.6 Características y efectos del medio espacial.

El espacio exterior no es un lugar amigable para los satélites que todo el tiempo se ven afectados por distintos factores, es importante conocer los factores que afectan directamente al satélite y a la propagación de las señales que pueden llegar a un ambiente interior.

En el espacio encontramos temperaturas extremas, intensas radiaciones, vacío y partículas que se mueven a velocidades enormes que pueden provocar daños y en algunos casos extremos la destrucción de un satélite.

La temperatura es uno de los factores que afectan al satélite en mayor proporción y es una de las características que en la mayor parte de los casos se toma en cuenta para los cálculos de los enlaces [5].

Las tormentas geomagnéticas y el aumento en la emisión solar ultravioleta calientan la atmósfera alta de la Tierra provocando su expansión. El aire caliente sube y la densidad del aire en la órbita de los satélites que se encuentran hasta casi 1000 Km se incrementa



considerablemente. Esto provoca un aumento en la fricción de los satélites en el espacio haciendo que reduzcan su velocidad y que cambien ligeramente su órbita. Si los satélites en órbitas bajas no son elevados rutinariamente, caerían y se quemarían en la atmósfera de la Tierra [25].

A medida que la tecnología ha permitido que los componentes de las naves sean más pequeños, sus sistemas miniaturizados son mucho más vulnerables a las partículas solares que son más energéticas. Estas partículas pueden provocar daños físicos a los circuitos integrados y pueden cambiar los comandos de los programas en las computadoras de los satélites [25].

1.7 Problemas de Polarización

Como se había mencionando anteriormente, se pueden tener problemas de polarización en un enlace satelital móvil, la atmósfera de la tierra tiene una tendencia a reorientar o a repolarizar una onda electromagnética conforme ésta la atraviesa: a este fenómeno se le llama Efecto Faraday, esto es debido a las características de las capas de la atmósfera, ya mencionadas, esto provoca variaciones en la señal que afectan la eficiencia del enlace del satélite a el móvil. El Efecto Faraday y el Efecto Doppler tienen una gran importancia en las comunicaciones móviles vía satélite por lo que se describirán a continuación [5].

1.7.1 El Efecto Faraday

Consiste en la desviación indeseable de la dirección del campo eléctrico de una señal de microondas cuya polarización es lineal. El giro del vector de campo eléctrico, conocido como Rotación de Faraday, ocurre cuando la señal atraviesa las capas de la ionósfera, las cuales están cargadas eléctricamente debido a la radiación solar. Este giro puede ser muy grande y puede alcanzar los 150° [4].



Este efecto es muy importante en las bandas L y C (UHF), sin embargo, arriba de los 10Ghz deja de ser un problema (Bandas Ku y Ka).

El efecto Faraday consiste en el giro del plano de polarización de la luz, al atravesar ésta un material cualquiera en presencia de un campo magnético. El ángulo de giro del plano de polarización de la luz incidente es directamente proporcional al campo magnético en la dirección de propagación del haz, a la longitud de la muestra de material, y a una constante que depende del material. El fenómeno del giro magnético del plano de polarización fue descubierto en el año 1846 por Faraday [29].

1.7.2 El efecto Doppler.

El efecto recibe el nombre en honor al físico austriaco Christian Doppler, quien explicó y cuantificó el fenómeno de porqué la frecuencia de las ondas sonoras cambiaba de un punto receptor fijo cuando la fuente que originaba dichos sonidos se movía con relación al receptor. Este tiene numerosas aplicaciones a altas frecuencias, en la electrónica su conocimiento es importante para compensar desviaciones de frecuencias en las señales detectadas por los equipos receptores de telefonía celular móvil. En los enlaces satelitales móviles, es importante también sobre todo en los satélites con alturas orbitales bajas ó LEO. Por otro lado, dicho efecto Doppler es explotado técnicamente por los sistemas satelitales de navegación y localización, como el GPS (*Global Position System*), que es una constelación de 24 satélites distribuidos en 6 orbitas intermedias.

El efecto principal que afecta las comunicaciones móviles es llamado corrimiento Doppler, y es definido como el ancho espectral de la portadora recibida cuando una simple portadora sinusoidal es transmitida dentro de un canal de múltiples trayectorias. Es decir, cuando un transmisor o un receptor están en movimiento, la frecuencia de la portadora recibida



presenta variaciones con respecto a la frecuencia de la portadora que se transmitió, produciendo de esta manera la pérdida parcial por instantes de tiempo o la pérdida completa de la señal que fue transmitida. Si la distancia entre el transmisor y el receptor aumenta, la frecuencia disminuye, cuando la frecuencia aumenta la distancia entre el transmisor y el receptor disminuye.

El máximo Corrimiento Doppler ocurre para una onda que viene desde de una dirección opuesta a la dirección de la antena en movimiento. Es decir, el Corrimiento Doppler está determinado por [29]:

$$f_m = \pm \left(\frac{V}{C} \right) * f_c \quad (1.4)$$

Donde

f_m : Frecuencia de Corrimiento Doppler

f_c : Es la frecuencia de la portadora.

C : es la velocidad de la luz.

V : es la velocidad del objeto en movimiento.

El signo de la expresión indica si el desplazamiento se acerca o aleja del transmisor fijo. Tales movimientos en dirección a la antena producen ondas reflejadas individualmente con desplazamientos de fase (variaciones de tiempo). Esto origina dificultad en la recepción, que se debe de compensar. Para poder lograr esto, lo ideal sería recibir distintas ondas con diferentes desplazamientos, de manera tal que los cambios relativos de fase se produzcan constantemente, afectando la amplitud de la señal resultante. El Corrimiento Doppler determina las variaciones de amplitudes de la señal resultante [28].



El corrimiento Doppler en los sistemas inalámbricos, al igual que en las comunicaciones satelitales móviles, no es más que la pérdida parcial o completa de la señal que ha sido transmitida, debido al movimiento de uno de los puntos involucrados en la transmisión. Esto implica un cambio de frecuencia en la portadora que fue recibida con respecto a la frecuencia de la portadora que fue transmitida [29].

El Corrimiento Doppler no afecta a todos los sistemas por igual puesto que, los sistemas que trabajan en las bandas de frecuencias altas son más susceptibles a estos cambios de frecuencias que ocurren en la señal transmitida, al igual que las transmisiones que se llevan a cabo a altas velocidades, es decir, el Corrimiento Doppler es directamente proporcional a las frecuencias y las velocidades con las cuales se realiza la comunicación. Sin embargo, no en todos los sistemas inalámbricos se puede decir que el Corrimiento Doppler es perjudicial, ya que existen sistemas que se ven beneficiados por dicho corrimiento de frecuencias, como los sistemas de radioastronomía.

1.8 Conclusión

Se han podido observar los problemas a los que se ve sometida una señal al propagarse en el espacio libre cuando se desea realizar una transmisión y también cuando se desea tener una conexión satelital. Se dio una noción de las bandas de frecuencia en las que se puede tener una conexión satelital y los problemas que se tienen para éstas frecuencias y se particularizó en los efectos que pueden afectar tanto a los satélites como a las terminales móviles, así como las variaciones en las señales. En el siguiente capítulo se explicarán las características de un canal móvil satelital, así como algunos de los sistemas satelitales para comunicaciones móviles para realizar comparaciones entre éstos.

