

Sensores de microondas en teledetección – II: Aspectos radiométricos

Apellidos, nombre	Ruiz Fernández, Luis Ángel (laruiz@cgf.upv.es)
Departamento	Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría
Centro	ETSI. Geodésica, Cartográfica y Topográfica



1 Introducción

De forma similar a lo que ocurre desde el punto de vista geométrico, las imágenes radar presentan ciertas peculiaridades radiométricas con respecto a las imágenes ópticas. La antena de un sistema de radar recoge la señal “retropropagada”, también llamada *retorno* de radar, la cual se amplifica y a continuación se almacena para que más tarde pueda ser visualizada en forma de imagen, donde la señal se representa mediante niveles de gris, de forma que las zonas que devuelvan más señal aparecen con más brillo.

En este tema se exponen algunos tipos de respuesta radiométrica característicos de las imágenes radar, se analiza la ecuación simplificada del radar y los parámetros que influyen en la señal de retorno que registra la antena, entre los que se encuentran aquellos que dependen del propio sistema y los dependientes del terreno.

2 Objetivos

Una vez que el estudiante lea este documento, será capaz de:

- Identificar los tipos de respuesta radiométrica característicos de las imágenes radar.
- Relacionar entre sí los parámetros que influyen en la señal de retorno de un sistema radar tanto los que dependen del sistema como los dependientes del terreno.
- Interpretar las imágenes radar y sus particularidades en relación a las imágenes obtenidas por los sistemas ópticos.

3 Características radiométricas de las imágenes radar

Para facilitar la interpretación de las imágenes radar conviene tener en cuenta varias propiedades o características derivadas de la interacción de la energía del microondas con los objetos presentes en la superficie terrestre. Algunas de estas características son las siguientes:

Dispersión difusa: Es el fenómeno dominante en las imágenes SLR (*Side Looking Radar*) y, dado que está asociada a valores intermedios de retorno, se corresponde con valores medios de nivel de gris en la imagen. Está muy relacionada con la rugosidad de la superficie. La vegetación, por ejemplo, genera este tipo de respuesta debido a la irregularidad en la distribución de las hojas, ramas, follaje, oquedades, etc. En el caso de los mares y océanos, la dispersión difusa aumentará cuando exista oleaje u ondulaciones de la superficie acuática debidas al viento, por ejemplo.

Reflectores “duros”: En ocasiones, las imágenes presentan valores de nivel de gris especialmente elevados en áreas que contienen objetos con una elevada constante dieléctrica. Esto ocurre con objetos metálicos como puentes, ferrocarriles, automóviles, barcos, etc., su respuesta es muy alta y se les conoce como reflectores “duros”.



Reflectores en ángulo recto: Este efecto lo producen objetos que forman ángulos rectos entre sí, como el conjunto pared/suelo en zonas urbanas, generando ecos en la señal que producen retornos muy elevados. Esto ocurre, por ejemplo, con edificios, barcos, canteras, paredes naturales en zonas de montaña, etc. (figura 1).

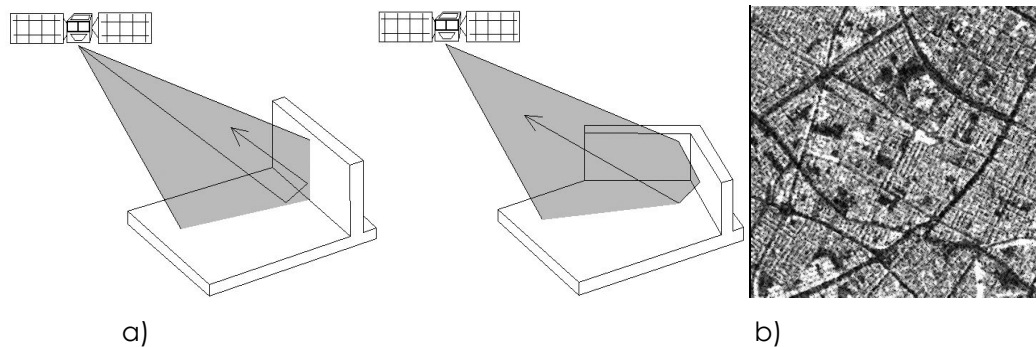


Figura 1.- Retorno de la señal radar debido a reflectores en ángulo recto: a) Esquema del efecto; b) ejemplo sobre zona urbana.

Reflexión especular: La producen las superficies lisas, esto es, poco rugosas, y consiste en la retropropagación de la señal en una sola dirección por lo que, debido a la oblicuidad de la emisión de la señal en un sistema SLR, la dirección de emisión no coincide con la de retropropagación, y el retorno de la señal no es recogido por el sensor. Por ello, las zonas con reflexión especular aparecerán oscuras en la imagen (bajo retorno y bajo nivel de gris). Un caso característico del aprovechamiento práctico de este fenómeno es la identificación de manchas de petróleo en la superficie marina. Debido al efecto amortiguador de los hidrocarburos sobre la micro-rugosidad superficial del agua, la reflexión especular es muy superior en estas áreas que en las circundantes que no han sufrido el efecto del petróleo y aún conservan su rugosidad característica (figura 2). Mediante el análisis adecuado de las imágenes de radar se puede averiguar la longitud del vertido, la velocidad del barco y la hora en que se ha realizado. Sin embargo, el grosor de la capa es difícil definirlo mediante estas imágenes.

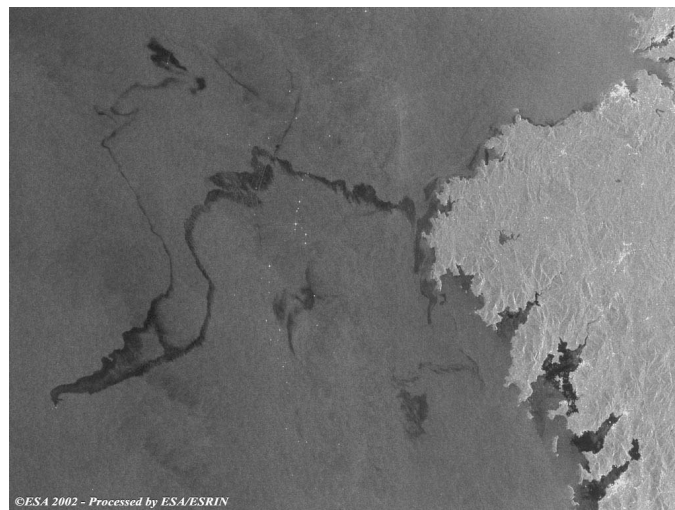


Figura 2.- Ejemplo de aprovechamiento del efecto de la reflexión especular para la detección de manchas de hidrocarburo: Hundimiento del petrolero Prestige en las costas de Galicia, noviembre, 2002. (Fuente: European Space Agency).



Otros fenómenos destacables desde el punto de vista radiométrico son: El *speckle*, o ruido característico de las imágenes SAR debido a fluctuaciones aleatorias de la señal de retorno como resultado de la interacción de la onda radar con las zonas rugosas de la superficie terrestre, que va unido, fundamentalmente, a las imágenes con mayor resolución espacial, manifestándose en una microtextura en forma de granulosidad aleatoria. Su efecto puede reducirse mediante el promediado de imágenes (figura 3) o promediando los valores de un vecindario (equivalente a la aplicación de un filtro de suavizado).



Figura 3.- Reducción del ruido (*speckle*) mediante promediado de sucesivas imágenes.

En otras ocasiones, el alineamiento de ciertos objetos paralelamente a la dirección del acimut y dispuestos formando espacios regulares entre sí, provoca un incremento del retorno de la señal de radar a ciertos ángulos incidentes, dependiendo de la longitud de onda de la señal y de la separación entre los objetos. Este incremento de la señal, conocido como dispersión de *Bragg*, genera un retorno proporcional al cuadrado del número de componentes alineados.

4 La ecuación del radar

Los parámetros del sistema de radar, la geometría de la propagación del pulso y las propiedades del terreno que determinan el retorno de la señal de radar pueden explicarse mediante la ecuación del radar. La ecuación que se indica a continuación, si bien es una versión simplificada que no toma en consideración los efectos de la polarización y está limitada a la respuesta en la superficie del terreno, proporciona las bases para la comprensión e interpretación de las variaciones de intensidad en una imagen radar, relacionando la señal de retorno con un conjunto



de parámetros. El retorno de la señal o energía recibida por la antena (P_r) puede escribirse como una función de los siguientes parámetros:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R_s^4} \cdot \sigma \quad (1)$$

donde:

P_t = energía transmitida

G = ganancia de la antena

λ = longitud de onda de la radiación

R_s = distancia, según la dirección del pulso, entre la antena y el objeto

σ = coeficiente de retropropagación

La energía transmitida influye de forma directa sobre la energía recibida. En general, a mayor altitud mayores serán las necesidades de energía que hay que transmitir, lo que ocurrirá cuando la distancia entre el sensor y la superficie sea elevada (caso de los sensores a bordo de satélites). La ganancia del sistema y la longitud de onda de la radiación afectan de forma directa sobre la energía recibida. El coeficiente de retropropagación depende del ángulo incidente, la rugosidad de la superficie, la constante dieléctrica compleja, la longitud de onda y el tipo de polarización empleada. Estos factores están, a su vez, interrelacionados. Así, el ángulo incidente local depende del ángulo de depresión y de la pendiente, y la rugosidad de la superficie de la longitud de onda y del relieve.

A continuación analizaremos los parámetros que influyen en la energía recibida, que pueden ser propios del sistema o debidos a las características del terreno.

5 Parámetros que influyen en la señal de retorno

La señal de retorno radar (P_r) depende de varios factores relacionados entre sí, los cuales pueden agruparse en dos categorías (Sabins, 1997) (tabla 1).

Tabla 1.- Parámetros que influyen en la señal de retorno de radar.

PARÁMETROS DEPENDIENTES DEL SISTEMA	PARÁMETROS DEPENDIENTES DEL TERRENO
Longitud de onda o frecuencia del pulso (λ , ν)	Ángulo incidente local
Polarización de la señal	Rugosidad de la superficie/terreno
Ángulo de depresión (θ_t)	Constante dieléctrica compleja
Dirección de observación	Dispersión volumétrica
Distancia en la dirección del pulso (<i>slant range</i>)	



5.1 Parámetros dependientes del sistema

Longitud de onda (λ)

La tabla 2 muestra los intervalos de longitud de onda y frecuencia de las principales bandas espectrales empleadas en la transmisión del pulso en los sistemas de radar.

Tabla 2.- Principales bandas espectrales de los sistemas de radar (De Lillesand y Kiefer, 2000).

Nombre de la banda	Longitud de onda (λ) (cm.)	Frecuencia ($\nu = c.\lambda^{-1}$) (MHz.)
K _a	0,75 – 1,1	40.000 – 26.500
K	1,1 – 1,67	26.500 – 18.000
K _u	1,67 – 2,4	18.000 – 12.500
X	2,4 – 3,75	12.500 – 8.000
C	3,75 – 7,5	8.000 – 4.000
S	7,5 – 15	4.000 – 2.000
L	15 – 30	2.000 – 1.000
P	30 – 100	1.000 – 300

El retorno de radar está directamente relacionado con la longitud de onda del pulso, ya que ésta determina la **atenuación** que la energía sufre en la atmósfera. La mayor atenuación se produce en longitudes de onda inferiores a 4 cm, aunque incluso a estas longitudes de onda su efecto no es importante. Por otra parte, si bien la señal de radar no se ve afectada por la presencia de nubes, las lluvias intensas producen ecos que pueden atenuar o dispersar considerablemente la señal, tanto más cuanto menor sea su longitud de onda. En general, la lluvia puede atenuar de forma significativa la energía emitida por sistemas radar que actúan en las bandas K y X (ver tabla 2). Un efecto contrario de las lluvias sobre las imágenes se produce cuando aquéllas se dan en el momento de la adquisición, cambiando las propiedades dieléctricas de la superficie del suelo y de la vegetación y aumentando la señal devuelta hacia el sensor.

Otro aspecto importante acerca de la longitud de onda es que de ella depende que una superficie se comporte como **lisa o rugosa**. Así, un campo de cereal puede considerarse como superficie rugosa para un radar que opera en la banda K, pero lisa para otro que opera en la banda L.

Por último, la radiación de longitud de onda menor interactúa más en superficie (capa superficial del suelo, hojas, follaje,...), mientras que la radiación de mayor longitud de onda tiene más capacidad de **penetración** y, por lo tanto, comporta información sobre capas interiores del suelo y de la vegetación.

Polarización

La energía electromagnética se propaga en una dirección ortogonal a los campos eléctrico y magnético de los que se compone (figura 4). La energía de microondas tiene un componente de polarización definido por el vector del campo eléctrico de la radiación. El plano que forma el campo eléctrico define el plano de polarización de la energía, que puede ser horizontal (H) o vertical (V). En un sistema activo, la

energía se emite y se recibe. La dirección de polarización puede combinarse de cuatro formas diferentes, las obtenidas de combinar la polarización horizontal o vertical en la emisión con la polarización horizontal o vertical en la recepción (una antena de radar tiene capacidad para registrar energía recibida en una dirección). De esta forma, puede darse **igual** polarización en la emisión que en la recepción (HH ó VV), o polarización **cruzada** (HV ó VH).

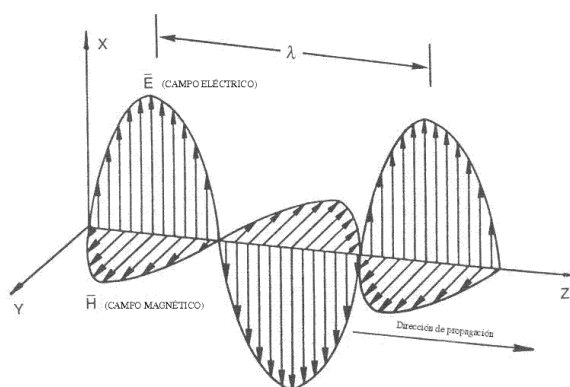


Figura 4.- Propagación de la energía electromagnética ortogonalmente a los campos magnético y eléctrico. Este último define la polarización. (Adaptado de Henderson & Lewis, 1998)

Respecto a la influencia de la polarización de la energía en las imágenes hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Cuando el **plano de polarización** de la radiación de microondas emitida sea paralelo al plano dominante de las características lineales que existan en el terreno, el retorno del radar de igual polarización será mayor que el de polarización cruzada. Por ejemplo, consideremos un campo de trigo con un marcado componente vertical con respecto a la línea de vuelo. En tal caso, cabe esperar un mayor retorno de una polarización VV que de una HH. Además, la señal será también mayor en los dos casos anteriores que cuando se emplee polarización cruzada, HV o VH.
- Tan sólo la parte de la señal emitida que es depolarizada tras su contacto con la superficie puede ser registrada por un sistema de polarización cruzada. Esto implica que las imágenes obtenidas mediante un sistema de igual polarización se generan con una relación señal/ruido mayor, por lo que tendrán una mayor nitidez y menor ruido que las generadas mediante polarización cruzada.
- La **depolarización** de la señal emitida se da como resultado de:
 - la reflexión especular causada por los reflectores en ángulo recto
 - la dispersión múltiple de las superficies rugosas
 - la dispersión volumétrica múltiple debida a heterogeneidades en la cubierta o superficie terrestre. (Fung y Ulaby, 1983).



Ángulo de depresión (θ)

En el radar de apertura sintética (SAR) el ángulo de depresión suele variar entre 5° y 30° para sistemas aerotransportados. En los sistemas espaciales, debido a que la altura es muy elevada, el intervalo de variación angular es muy pequeño y los ángulos de depresión mayores.

Este parámetro angular influye en el retorno de la señal (P_r) de dos maneras:

- Junto con la pendiente del terreno, define el ángulo incidente local.
- El concepto de superficie rugosa o lisa, con respecto a una longitud de onda dada, depende también del ángulo de depresión en la zona.

Dirección de observación

Se refiere a la dirección de observación con respecto a la orientación dominante de las características del terreno. Así, por ejemplo, si la dirección de observación sobre una parcela de un cultivo que sigue un marcado patrón lineal es perpendicular a las líneas, el retorno de la señal será superior que si la dirección de observación es paralela a las mismas (figura 5).

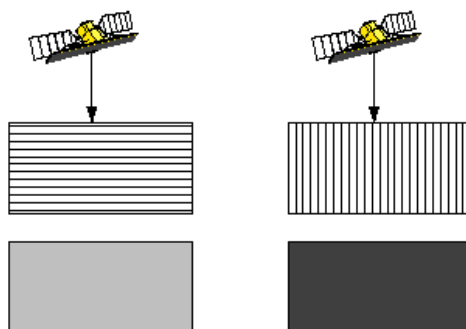


Figura 5.- Cuando la dirección de observación sea perpendicular a un cierto patrón lineal (líneas de cultivo etc.) la respuesta será mayor. (RDLP, Geo. Intl., 1998)

Distancia en la dirección del pulso (slant range)

La distancia en la dirección del pulso depende a su vez de la altitud del sistema de radar y del ángulo de depresión. Los sistemas aerotransportados suelen trabajar a distancias comprendidas entre los 5 y 20 km, mientras que los sistemas espaciales los hacen entre 250 y 800 km.

El tamaño del pixel disminuye (aumenta la resolución) al aumentar la distancia en la dirección del pulso, por lo que se reduce la energía unitaria que llega al sensor. Por otra parte, la señal está inversamente relacionada con el ángulo incidente local, el cual depende de la distancia en la dirección del pulso. Como resultado de ello, a igualdad de otros parámetros, las imágenes tenderán a hacerse más oscuras a medida que nos alejamos del nadir. Este fenómeno se acentúa en las imágenes obtenidas por radares aerotransportados.

5.2 Parámetros dependientes del terreno

El conocimiento de los parámetros de la superficie terrestre que influyen en los procesos de identificación y análisis de las imágenes son cruciales para la utilización y la extracción de información de las mismas. A continuación se analizan los más importantes.

Ángulo incidente local

La intensidad de la señal de retorno depende del ángulo entre la normal a la superficie del terreno y la dirección del rayo incidente. En general, ángulos incidentes pequeños generan un elevado retorno, y a medida que aumenta el ángulo disminuye la señal que llega a la antena (figura 6). Este comportamiento se debe principalmente a la pérdida del componente de reflexión especular de la radiación, por lo que será más acusado en superficies lisas (elevada reflexión especular) que en superficies rugosas.

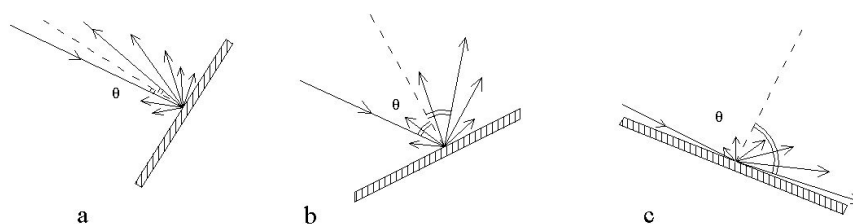


Figura 6.- Variación del ángulo de incidencia local debido a diferencias del relieve: a) bajo, b) moderado y c) alto. Estas variaciones implican diferencias en el retorno de la señal de radar. (Adaptado de Sabins, 1997)

Rugosidad de la superficie

La rugosidad puede entenderse como las variaciones del componente aleatorio de la altura del terreno con relación a una superficie de referencia. La superficie de referencia puede ser una superficie media o una onda periódica de menor frecuencia (Sabins, 1997). Si una superficie es lisa, la energía se refleja de forma especular hacia una pequeña región angular, mientras que cuando la superficie es rugosa, la energía se redirige en varias direcciones, siendo parte de ella devuelta hacia la antena.

El concepto de superficie lisa o rugosa es relativo. Uno de los primeros intentos de cuantificar la rugosidad es el criterio de *Raleigh*, que clasifica una superficie como rugosa si las irregularidades superficiales, o variaciones de la altura media, expresadas como su raíz cuadrada media (h) sobrepasan un determinado valor en función de la longitud de onda (λ) y del ángulo incidente (θ):

$$h > \frac{\lambda}{8 \cdot \sin \theta} \quad (2)$$

Posteriormente han surgido criterios similares, todos ellos en función de los mismos parámetros, para describir de forma objetiva la rugosidad. En definitiva, a la hora de interpretar la influencia de la rugosidad sobre la cantidad de energía recibida por la antena se tendrán en cuenta la longitud de onda de la radiación emitida y el ángulo de depresión del sistema de radar.

En el caso de superficies rugosas, el retorno de radar es prácticamente independiente del ángulo de depresión. Si se trata de superficies lisas, el retorno es elevado con ángulo de depresión elevado, pero disminuye rápidamente al reducir dicho ángulo (figura 7).

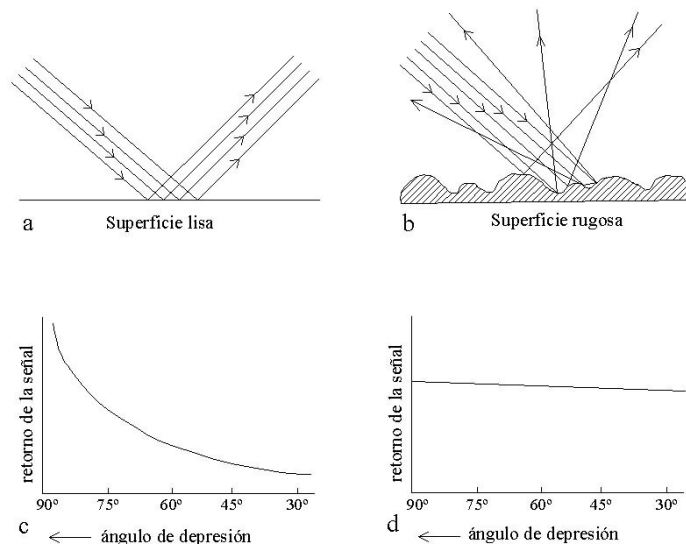


Figura 7.- Relación entre el retorno de la señal y el ángulo de depresión para superficies lisas (a y c) y rugosas (b y d). (Adaptado de Henderson & Lewis, 1998).

Constante dieléctrica compleja (δ)

Es una medida de las propiedades eléctricas de los objetos, indicando la reflectividad y conductividad de los materiales. A menor constante dieléctrica, menor es también la reflectancia de un objeto. Influye de forma notoria en la interacción de la radiación electromagnética con la superficie del terreno. La constante dieléctrica de la mayoría de los materiales presentes de forma natural oscila entre 3 y 8 cuando estos se encuentran secos. Por el contrario, el agua posee una constante dieléctrica de aproximadamente 80. Por ello, el retorno de la señal de radar depende en gran medida de la cantidad de humedad presente en el suelo y en la vegetación.

Cuanto menor sea la constante dieléctrica, la energía puede penetrar más en profundidad a través del medio en cuestión, por lo que también se ve reducida su reflectancia en superficie. Por el contrario, cuando un medio posee una elevada constante dieléctrica, la interacción de la energía queda limitada a la superficie, siendo menor la penetración y mayor la respuesta global recogida por la antena. A partir de ello podemos deducir que la penetración de la señal es inversamente proporcional al contenido de humedad de un suelo. Sin embargo, la rugosidad de la superficie es un factor que predomina sobre la influencia de la constante dieléctrica. Si una superficie es lisa, su respuesta será menor incluso aunque presente una constante elevada. Un cambio en el retorno de la señal entre dos objetos del terreno es más probable que se deba a un cambio en el contenido de humedad (y con ello de sus propiedades dieléctricas) antes que a una variación en su composición.

La constante dieléctrica de la vegetación cambia con las condiciones atmosféricas. Así, las nubes limitan la energía incidente en la superficie terrestre,



modificando el balance de agua de la vegetación. Concretamente, las nubes reducen la transpiración de la vegetación, variando así el potencial de humedad, la constante dieléctrica y el retorno de la señal de radar de la vegetación.

Por último, los objetos metálicos poseen una elevada constante dieléctrica, causando retornos elevados. Esto ocurre con objetos tales como puentes metálicos, vías de ferrocarril, etc.

Dispersión volumétrica

Cuando la radiación electromagnética incide sobre un medio, parte de ella se refleja y parte se transmite a través de él. Si el material es homogéneo, tiene lugar una transmisión simple de la energía, pero si es heterogéneo, bien sea en forma, composición o en contenido de humedad, la energía transmitida se dispersa o redirige en múltiples direcciones, produciéndose lo que se conoce como *dispersión volumétrica múltiple*.

La interacción de la energía electromagnética sobre zonas acuáticas está marcada fundamentalmente por la dispersión en superficie, debido a la elevada constante dieléctrica del medio, la cual conlleva una baja penetración. Sin embargo, en las zonas con vegetación predominan los fenómenos de dispersión volumétrica (figura 23). Este redireccionamiento múltiple de la radiación en las capas internas de la vegetación no sólo afecta a la intensidad de retorno, sino que también genera una depolarización de la señal, lo que implica mayor respuesta o señal en imágenes obtenidas con polarización cruzada. Así pues, la dispersión volumétrica depende de varios factores como son: longitud de onda, polarización, constante dieléctrica y propiedades físicas de los objetos.

6 Conclusiones

La interpretación de las imágenes radar está relacionada con ciertas características radiométricas específicas presentes en este tipo de imágenes, las cuales son fruto de la interacción de la energía electromagnética de la región del microondas con los objetos de la superficie terrestre. Además, es preciso considerar la influencia e interacción de los principales factores que afectan al retorno de la señal en un sistema radar, tanto de aquellos dependientes del propio sistema como de los que dependen de las características del terreno.

7 Bibliografía

- Fung A.K. and Ulaby F.T., 1983. Matter-Energy Interactions in the Microwave Region. Manual of Remote Sensing (2ª Ed.), Vol. 1, Colwell R.N. (editor, ASAE).
- Geomatics International, 1998. Radar Distance Learning Program (CD-ROM, RDLP ed. 1.1)
- Henderson F.M. and Lewis A.J., 1998. Manual of Remote Sensing (3ª Ed.) Vol 2: Principles and Applications of Imaging Radar. John Wiley & Sons, Am. Soc. Phot. and Rem. Sens. (ASAE).
- Lillesand T.M. and Kiefer R.W., 2000. Remote Sensing and Image Interpretation (4ª Ed.). John Wiley & Sons.
- Sabins F.F., 1997. Remote Sensing Principles and Interpretation (3ª Ed.). W.H. Freeman and Co.