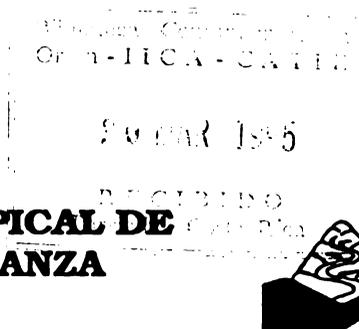




**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE
INVESTIGACION Y ENSEÑANZA**

**PROGRAMA MANEJO INTEGRADO DE
RECURSOS NATURALES**

AREA DE MANEJO DE CUENCAS



RENARM
MANEJO DE CUENCAS

PUBLICACIONES DEL PROYECTO RENARM/MANEJO DE CUENCAS

IMAGENES DE RADAR: CONCEPTOS GENERALES

**Preparado por:
Nathalie Beaulieu
Gregorio Leclerc
Sergio Velásquez**

**CATIE, TURRIALBA
1994**

ÍMAGENES DE RADAR: CONCEPTOS GENERALES

Notas de lección redactadas por
Nathalie Béaulieu

Con la colaboración de Grégoire Leclerc y Sergio Velásquez

Curso Corto

Organizado por la Asociación Boliviana de Teledetección para el
Medio Ambiente (ABTEMA)

y el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
(CATIE)

La Paz, 6-10 de junio de 1994

1 ¿QUE TIENE DE ESPECIAL LA TELEDETECCION RADAR?	6
.....	6
1.1 DEFINICION DE RADAR	7
1.2 TIPOS DE RADAR	8
1.3 SENSOR ACTIVO	9
1.4 DOMINIO DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	10
1.5 DIFERENTES BANDAS ESPECTRALES USADAS EN RADAR	11
1.6 GEOMETRIA DE ADQUISICION	14
1.7 FORMACION DE LA IMAGEN	17
2 INTERPRETACION DE LAS IMAGENES DE RADAR ..	20
2.1 FACTORES QUE INFLUYEN LA RETRODISPERSION RADAR	22
2.2 TIPOS DE REFLEXION	23
2.3 SIGNIFICADO DE LA TONALIDAD DE LA IMAGEN:	25
2.4 CRITERIOS DE RUGOSIDAD	27
2.5 COEFICIENTE DE RETRODISPERSION	31
2.6 INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DIELÉCTRICAS	32
2.7 PROFUNDIDAD DE PENETRACION	36
2.8 DISTORSIONES GEOMETRICAS DEBIDAS A LA TOPOGRAFIA	37
2.9 DISTORSIONES RADIOMETRICAS Y RUIDO ...	43
3 CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS	47
3.1 RESOLUCION ESPACIAL	47
3.2 RESOLUCION ESPACIAL Y TAMAÑO DE PIXEL	50
3.3 LA TECNOLOGIA DE LA APERTURA	

	3
SINTETICA (SAR)	51
3.4 FORMAS DE LOS DATOS DE SAR	56
3.5 POLARIZACION	57
3.6 NUMERO DE VISTAS (LOOKS)	59
4 LOS SISTEMAS SATELITARIOS ACTUALES (RADARES DE IMAGEN)	62
4.1 ERS-1	63
4.2 Productos ERS-1	65
4.3 RADARSAT	67
5 APLICACIONES DE LAS IMAGENES DE RADAR	71
6 TRABAJO DE CAMPO RELACIONADO CON LA ADQUISICION DE IMAGENES DE RADAR	74
6.1 FOTOGRAFIAS Y VIDEO	74
6.2 MEDICIONES Y OBSERVACIONES DE CAMPO .	75
6.2.1 Mediciones que se pueden realizar algun tiempo antes o después de la adquisición	76
6.2.2 Mediciones que deben realizarse simultáneamente a la adquisición	78

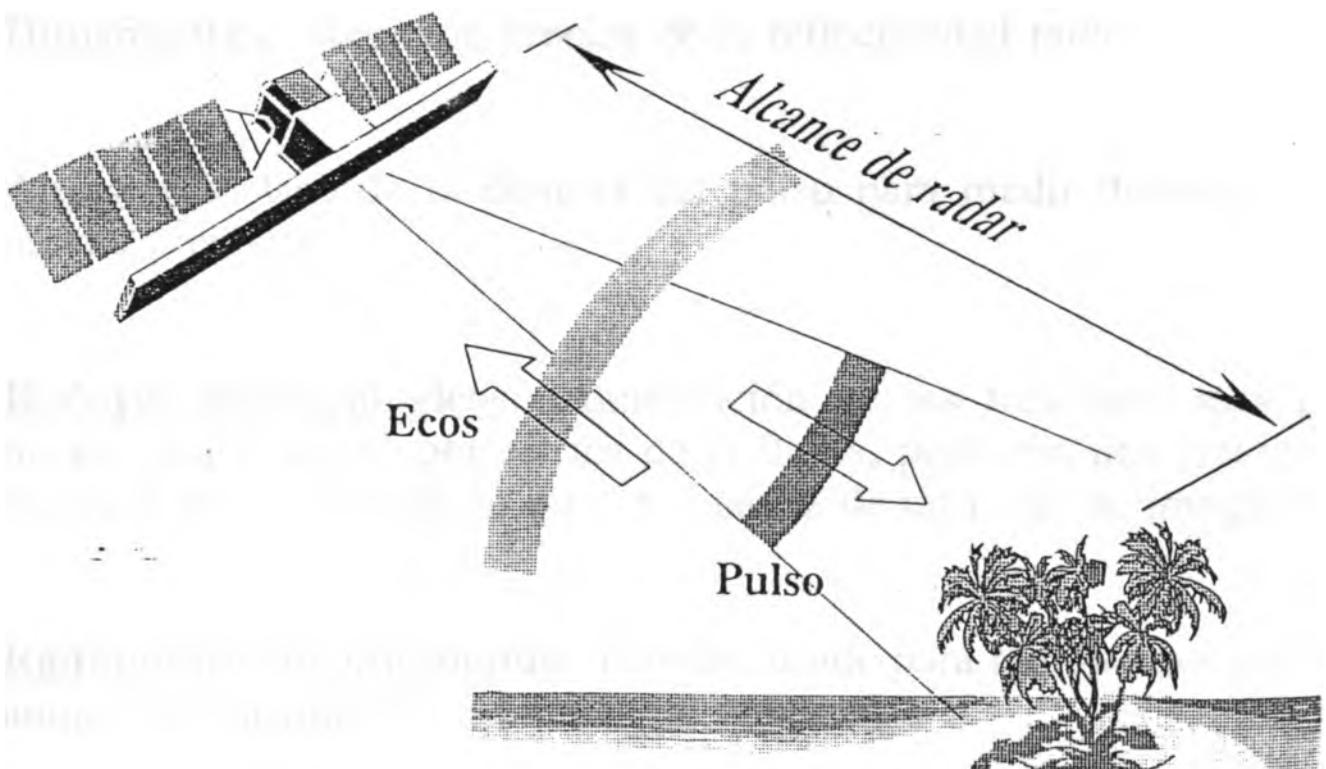
1 ¿QUE TIENE DE ESPECIAL LA TELEDETECCION RADAR?

- **Sensor Activo**
- Trabaja en el dominio de las **microondas**
 - Casi insensible a condiciones atmosféricas
 - Capacidad de penetración de las superficies terrestres, según la longitud de onda
 - Sensibilidad a características diferentes: información complementaria a la de los sensores en el visible y en el infrarrojo cercano
- Geometría de vista **lateral**
- Modo particular de **formación de la imagen**

1.1 DEFINICION DE RADAR

Término que viene del inglés Radio Detection And Ranging

RADAR - Detección y localización por radio



Fuente: Centro Canadiense de Teledetección, 1993, Proyecto Radar Costa Rica/Canadá

1.2 TIPOS DE RADAR

Radars de imagen: Usados para obtener imágenes de alta resolución (algunos metros hasta algunas decenas de metros) de la superficie de la tierra (o de Venus!)

Radar de Antena Real (Real Aperture radar o **RAR**)

Radar de Antena Sintética (Synthetic Aperture Radar o **SAR**)

Difusímetros: Medición precisa de la reflectividad radar.

Altimetros: Uso de la demora del pulso para medir distancias con mucha precisión

Radars meteorológicos: Combinación de las tres funciones para proveer una imagen volumétrica de la lluvia, pero con una resolución espacial más gruesa de lo que se necesita de un radar de imagen.

Radiometros de microonda: Término usado para radiómetros pasivos aunque el difusímetro también es un radiómetro

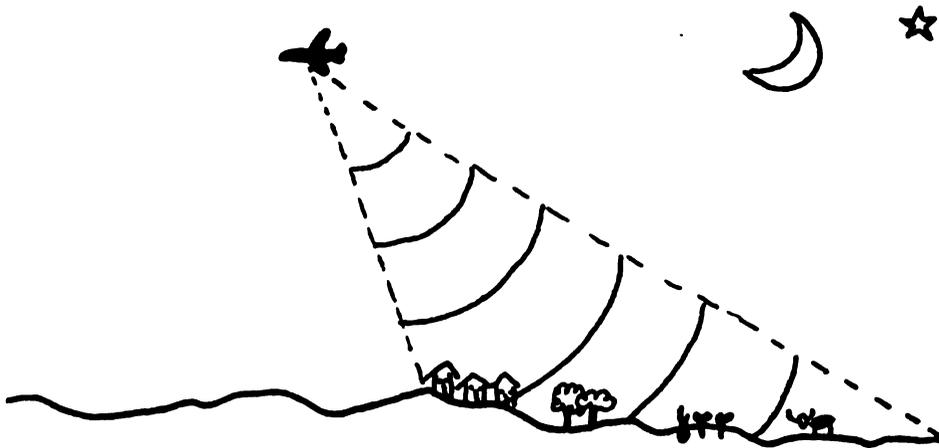
En este curso, trataremos exclusivamente del **radar de imagen**

1.3 SENSOR ACTIVO

El sensor provee su propia fuente de energía al contrario de los sensores pasivos que miden la radiación solar reflejada sobre la superficie terrestre o que miden las emisiones terrestres

Se emiten pulsos de radiación hacia la superficie terrestre y se recibe la radiación reflejada en la dirección del sensor.

Ventaja: Se pueden adquirir imágenes de noche como de día



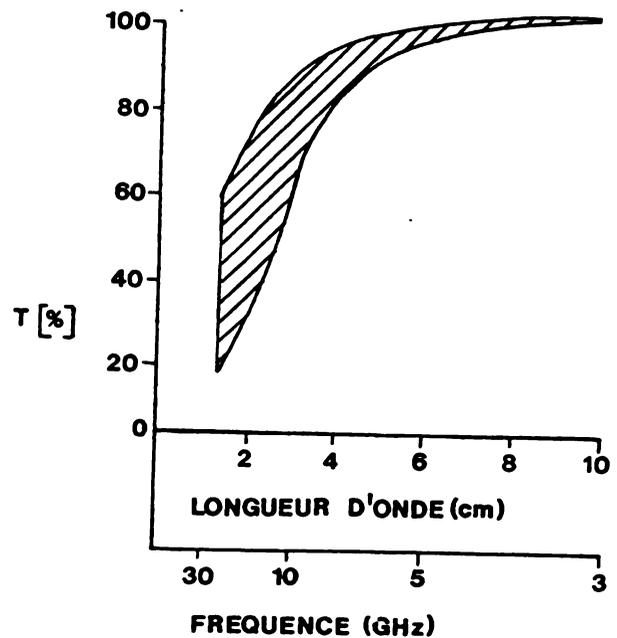
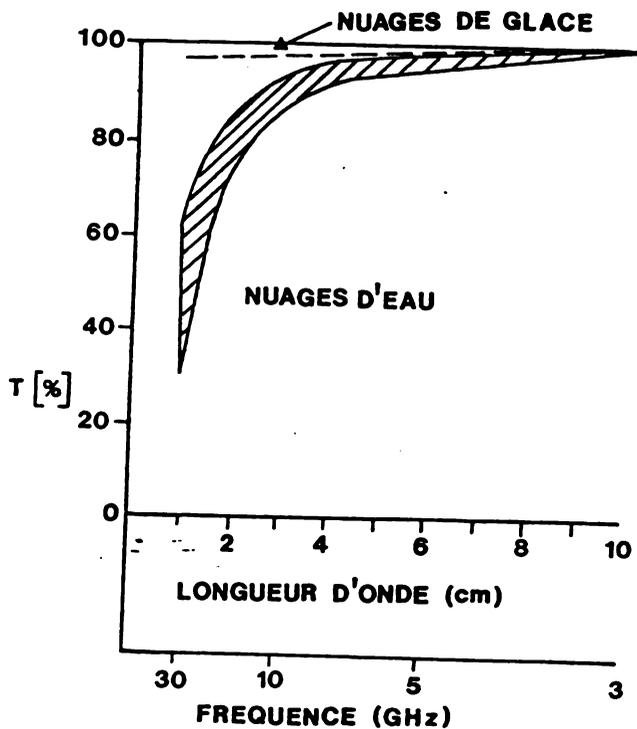
Se mide:

- La potencia relativa de la señal recibida
- El tiempo entre la emisión y la recepción
- La fase de la señal
- La diferencia entre la frecuencia de recepción y de emisión (frecuencia Doppler)

1.4 I DOMINIO DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Se usa la parte del espectro electromagnético llamada **microondas**.

Principal ventaja en regiones polares, tropicales o montañosas: Se pueden adquirir imágenes en zonas nubosas, por que la transmisión de la atmósfera, aun nublada, es muy grande en las microondas



Effet des nuages sur les transmissions radio espace/terre (d'après Ulaby, Moore, Fung, 1982)
T Transmission en %

Effet de la pluie sur les transmissions radio espace/terre (d'après Ulaby, Moore, Fung, 1982)
T Transmission en %

Fuente: FAO, 1991

1.5 DIFERENTES BANDAS ESPECTRALES USADAS EN RADAR

La notación de las bandas espectrales de radar proviene de la época en la cual esta tecnología era secreto militar.

Las bandas están caracterizadas por su frecuencia que no cambia con el medio atravesado por la radiación.

Sin embargo, en Teledetección se refiere a menudo a la longitud de onda promedio de una banda espectral

Notación de la banda	Rango de Longitudes de onda (cm)	Frecuencia (GHz)
Ka	0.8-1.1	40-26.5
K	1.1-1.7	26.5-18
Ku	1.7-2.4	18.0-12.5
X	2.4-3.8	2.5-8.0
C	3.8-7.5	8.0-4.0
S	7.5-15.0	4.0-2.0
L	15.0-30.0	2.0-1.0
P	30.0-100.0	1.0-0.3

Aunque los rangos de longitudes de onda indicados en la tabla son importantes, las bandas usadas por un sensor en particular son generalmente muy estrechas.

Longitudes de microondas

 K ~ 1 cm

 X ~ 3 cm

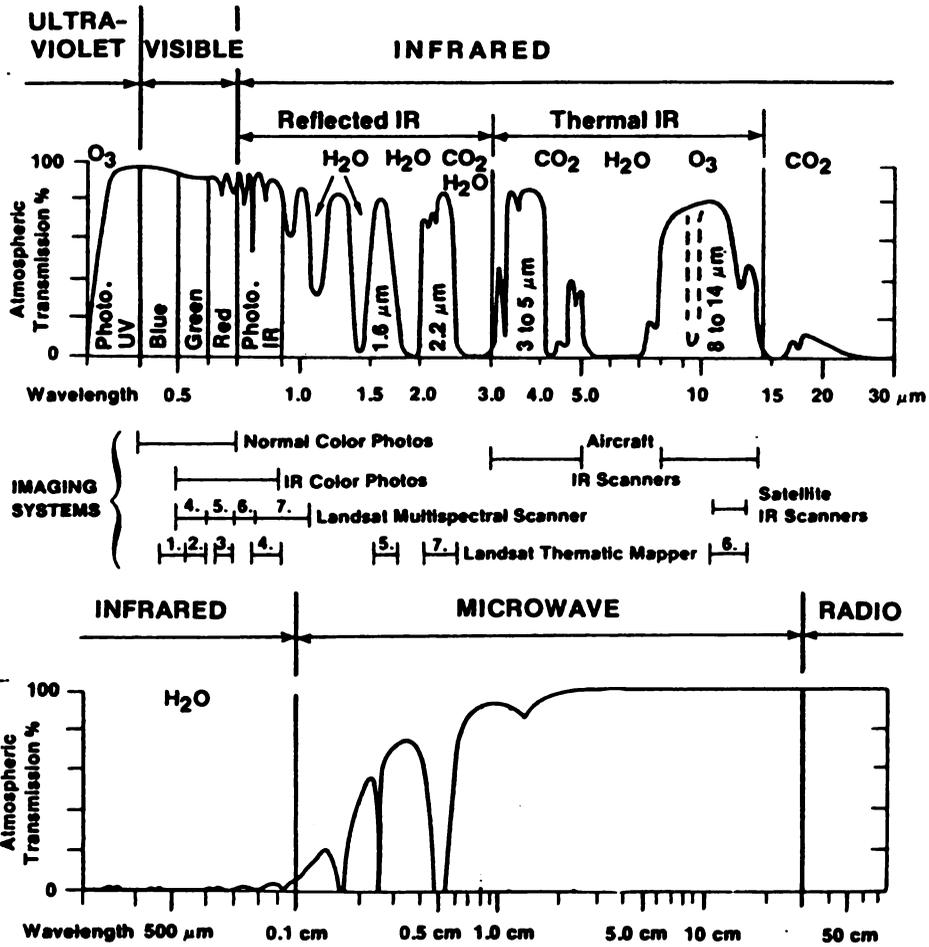
 C ~ 5.6 cm

 S ~ 10 cm

 L ~ 23 cm

 P ~ 75 cm

Ejercicio: Ubicar las bandas espectrales X (3 cm), C (5,6 cm) y L (23.5 cm) en el siguiente diagrama (adaptado de Sabins, 1987)



1.6 GEOMETRIA DE ADQUISICION

Producción de imágenes con radar: **mirada lateral** de la superficie a partir de una plataforma satelitaria o aerotransportada

Ejercicio: colocar los siguientes términos sobre las figuras

Azimut,

Eje del alcance,

Alcance inclinado,

Alcance en proyección terrestre,

Nadir,

Alcance cercano,

Alcance lejano,

Angulo de incidencia, θ_i ,

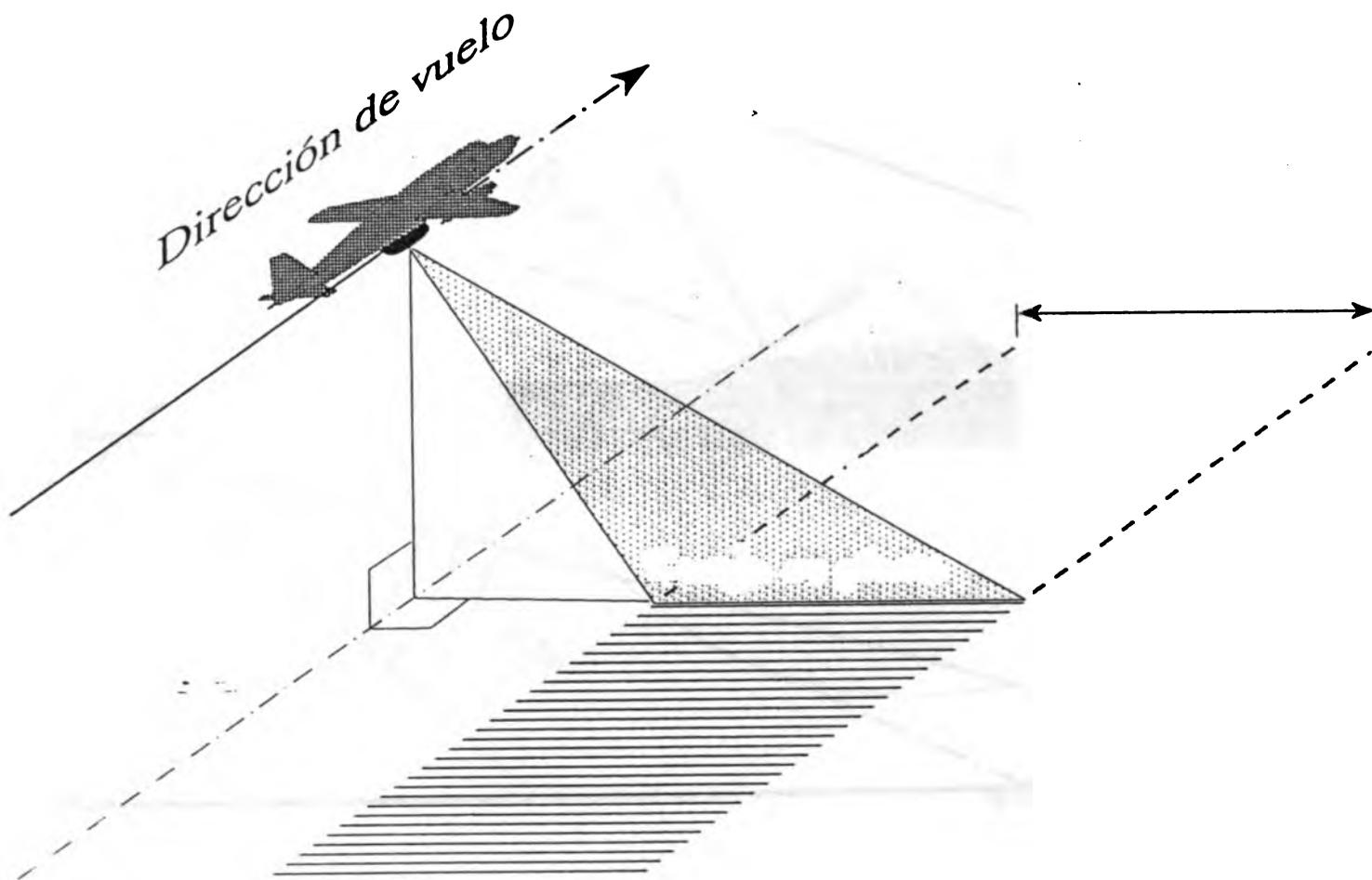
Angulo de depresión, γ ,

Angulo de incidencia local θ_{loc} ,

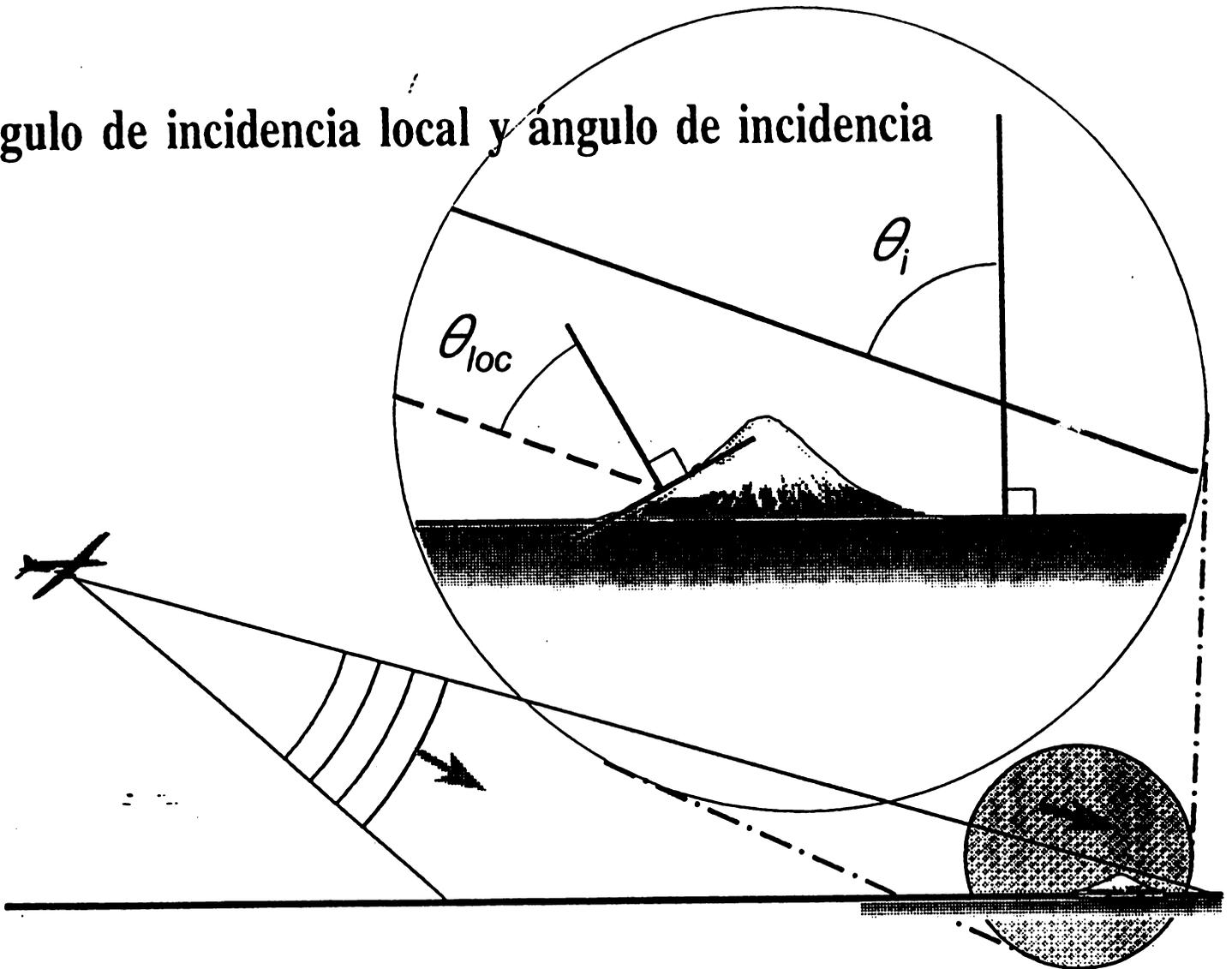
Ancho de "swath"

Fuente: Centro Canadiense de Teledetección, 1993, Proyecto Radar Costa Rica/Canadá

Geometría del radar de abertura sintética



Angulo de incidencia local y ángulo de incidencia

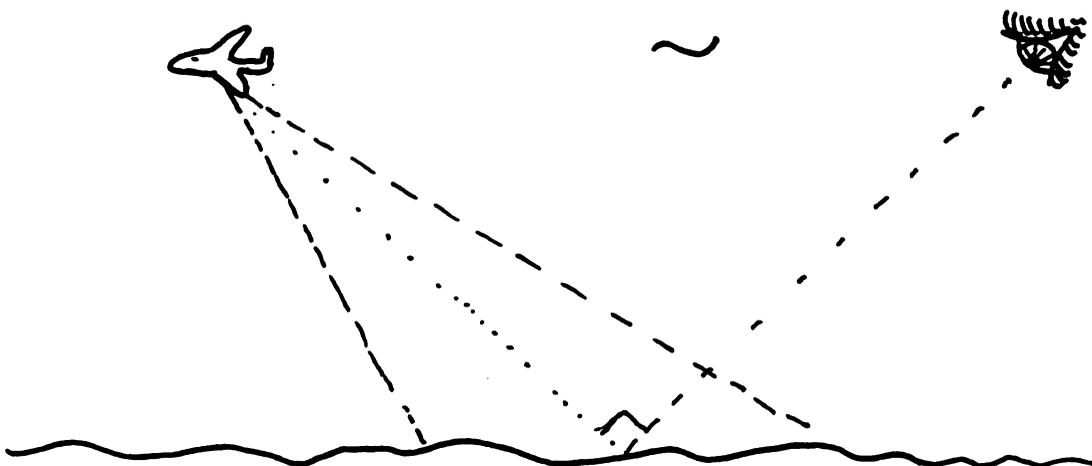


1.7 FORMACION DE LA IMAGEN

La posición de cada elemento de la imagen está determinada en función del tiempo entre la emisión y la recepción de los pulsos de radiación (tiempo de recorrido o demora radar)

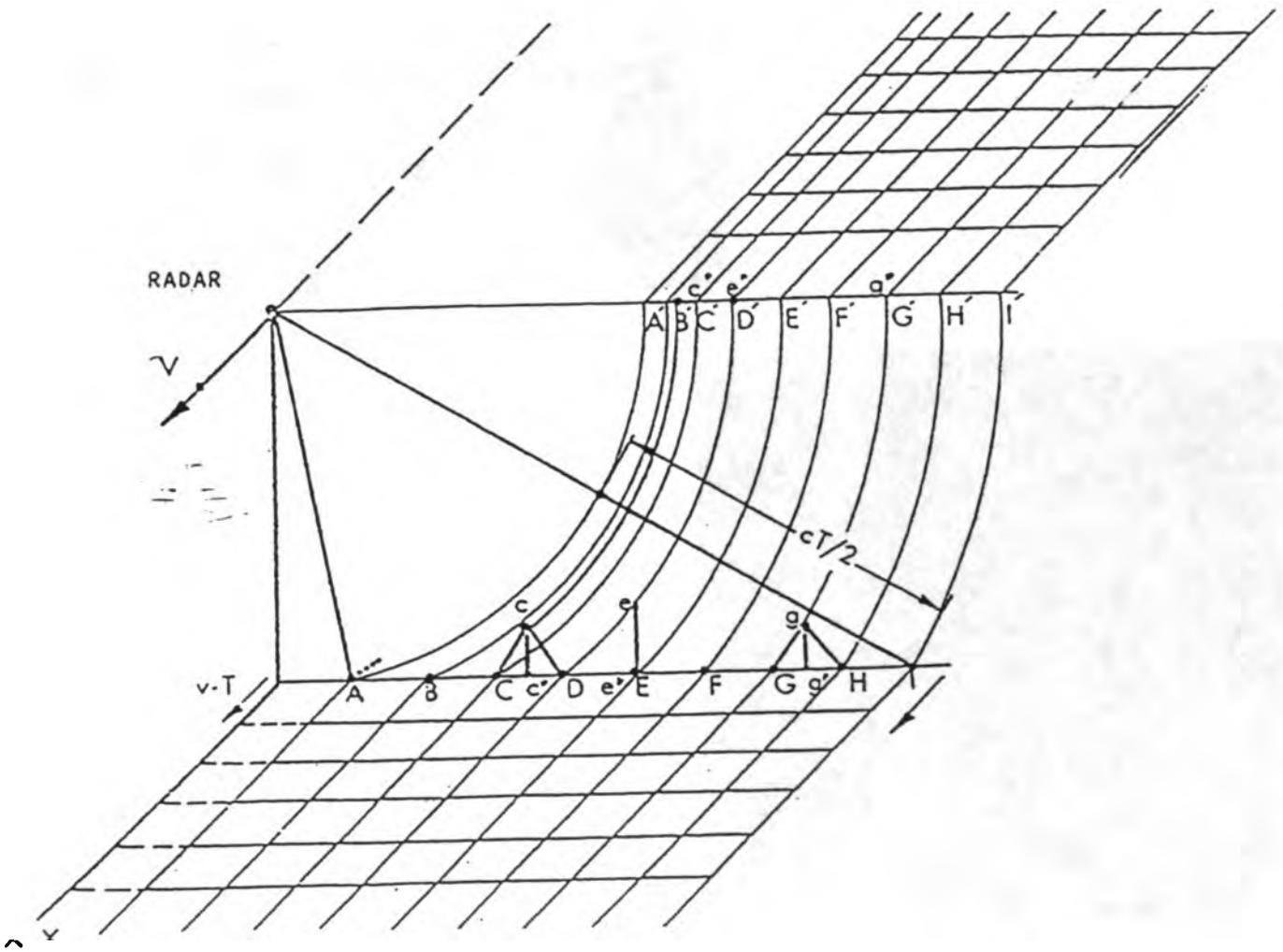
La imagen resultante tiene el eje del alcance medido en el tiempo de recorrido del pulso. El eje azimutal (dirección de vuelo) está medido en término del tiempo de vuelo del avión o del satélite. Estos tiempos están traducidos en distancias en función de la velocidad de vuelo y de la luz.

La **imagen en proyección inclinada** (slant range image) tiene el mismo aspecto que la que se vería si el ojo del observador estuviera situado en un eje perpendicular a la dirección de mira (sensor-terreno)

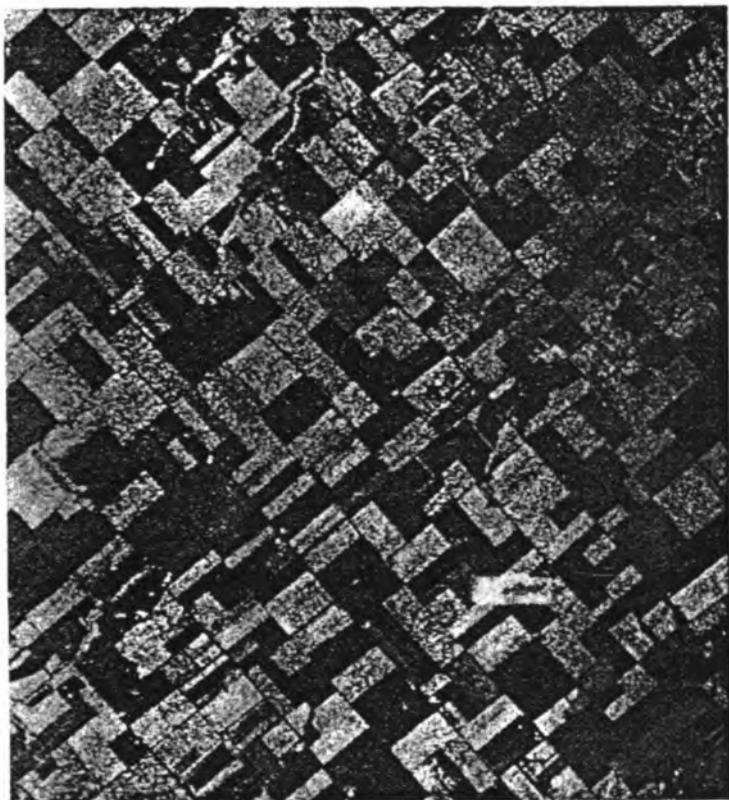


Se produce una compresión de la escala de la imagen que aumenta con el ángulo de depresión. Imágenes aerotransportadas que tienen variaciones importantes de γ tienen una escala que varía en el eje del alcance.

Se puede corregir a una imagen para obtener una **imagen en proyección terrestre (Ground Range Image)**



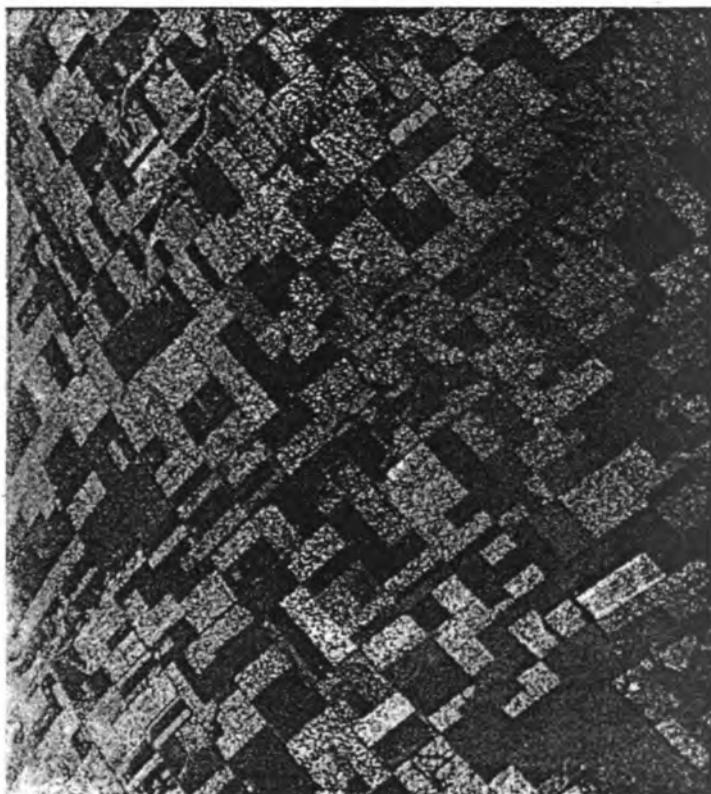
Imágen en proyección inclinada y su imágen correspondiente en proyección plana.
Fuente: Sabins, 1987.



Adivinanza:

¿Cual es cual?

¿Cual es la dirección
de mirada?



2 INTERPRETACION DE LAS IMAGENES DE RADAR

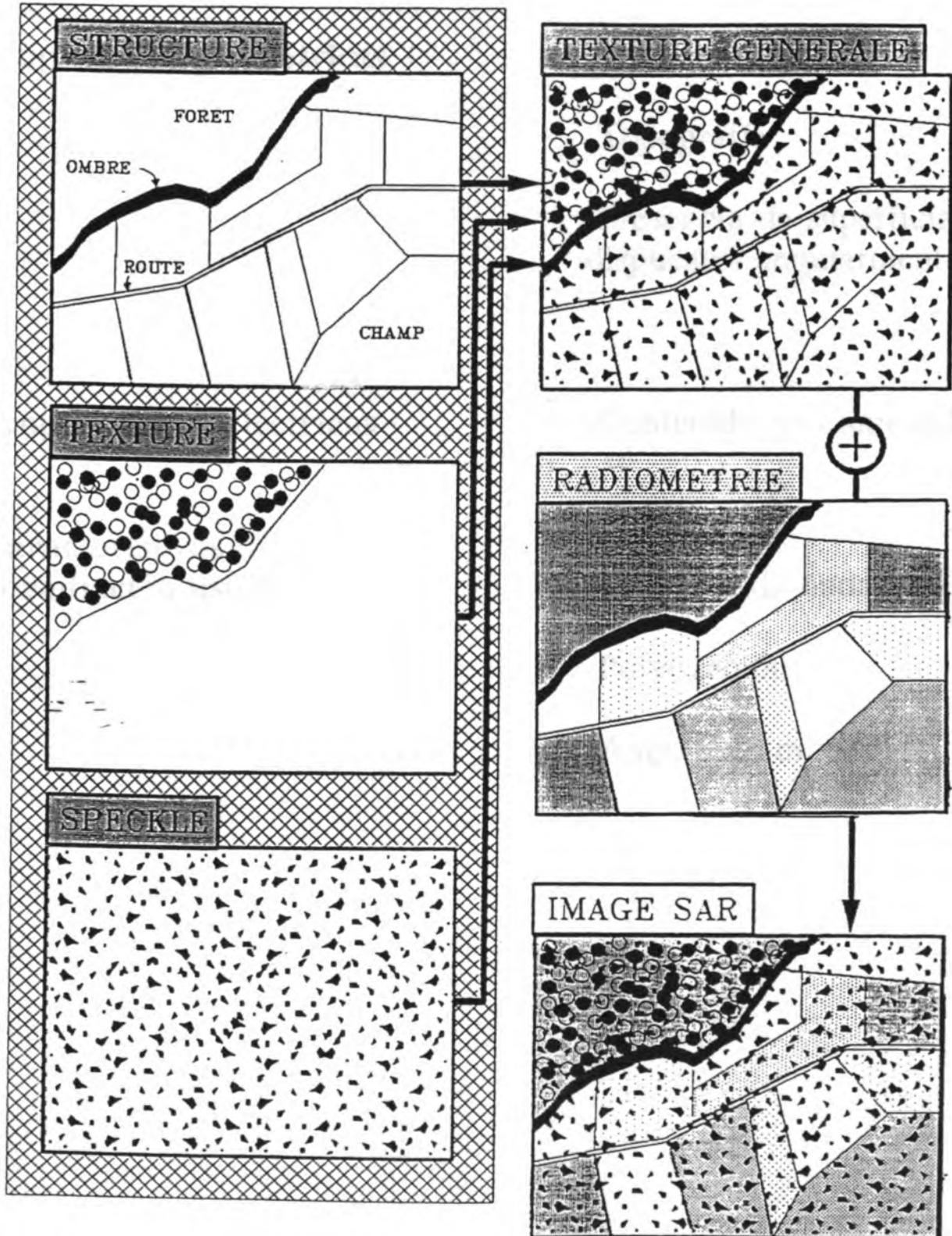
Puntos en común con las fotografías aéreas:

- Importancia de la experiencia del intérprete.
- Uso del tono, de la textura, de la estructura, de la forma y del contexto

Pero se encuentran en las imágenes de radar:

- Una más fuerte influencia de la **textura**
- Moteado** (un ruido que produce una textura granular)
- Distorsiones** radiométricas y geométricas particulares

Una imagen de radar es el resultado de una combinación de la estructura, de la textura, del moteado (speckle) y de la tonalidad (radiometría). Fuente: Laur, 1989



2.1 FACTORES QUE INFLUYEN LA RETRODISPERSION RADAR

Propiedades geométricas

-Rugosidad

-Topografía

-Presencia de superficies dispuestas angularmente

Propiedades dieléctricas

-Contenido en humedad

Características de la radiación usada

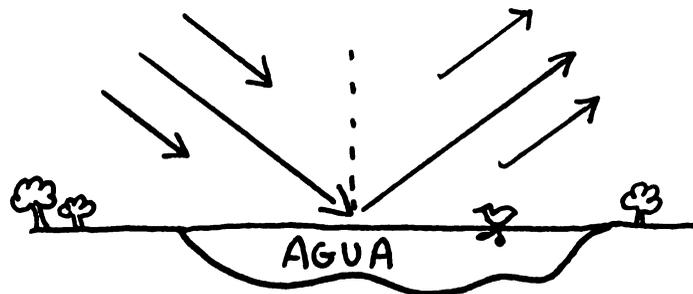
-Longitud de onda

-Polarización

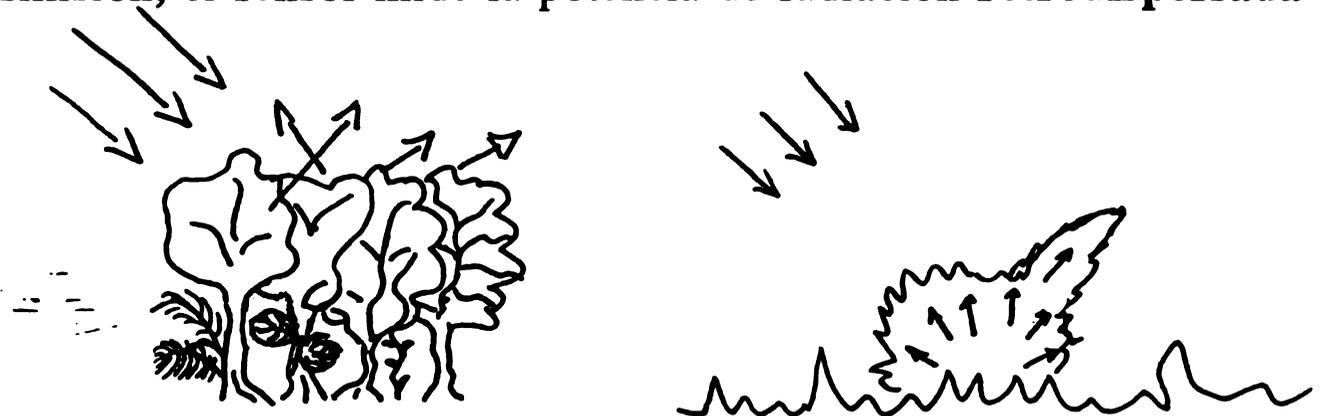
-Angulo de mirada

2.2 TIPOS DE REFLEXION

Especular: reflexión con un ángulo igual al ángulo de incidencia (Según la ley de Snell-Descartes). Esta reflexión se dirige hacia el otro lado del sensor, exceptuando en el caso del nadir. Se produce en el caso de superficies lisas.



Difusa: Reflexión de la radiación incidente en todas las direcciones. Como la antena de recepción está ubicada en el mismo lugar que la de transmisión, el sensor mide la potencia de radiación retrodispersada



Múltiple: la radiación puede rebotar varias veces sobre superficies que están dispuestas angularmente entre sí



En un medio complejo como un bosque abierto, puede haber varios tipos de retrodispersión, proveniente de diferentes componentes

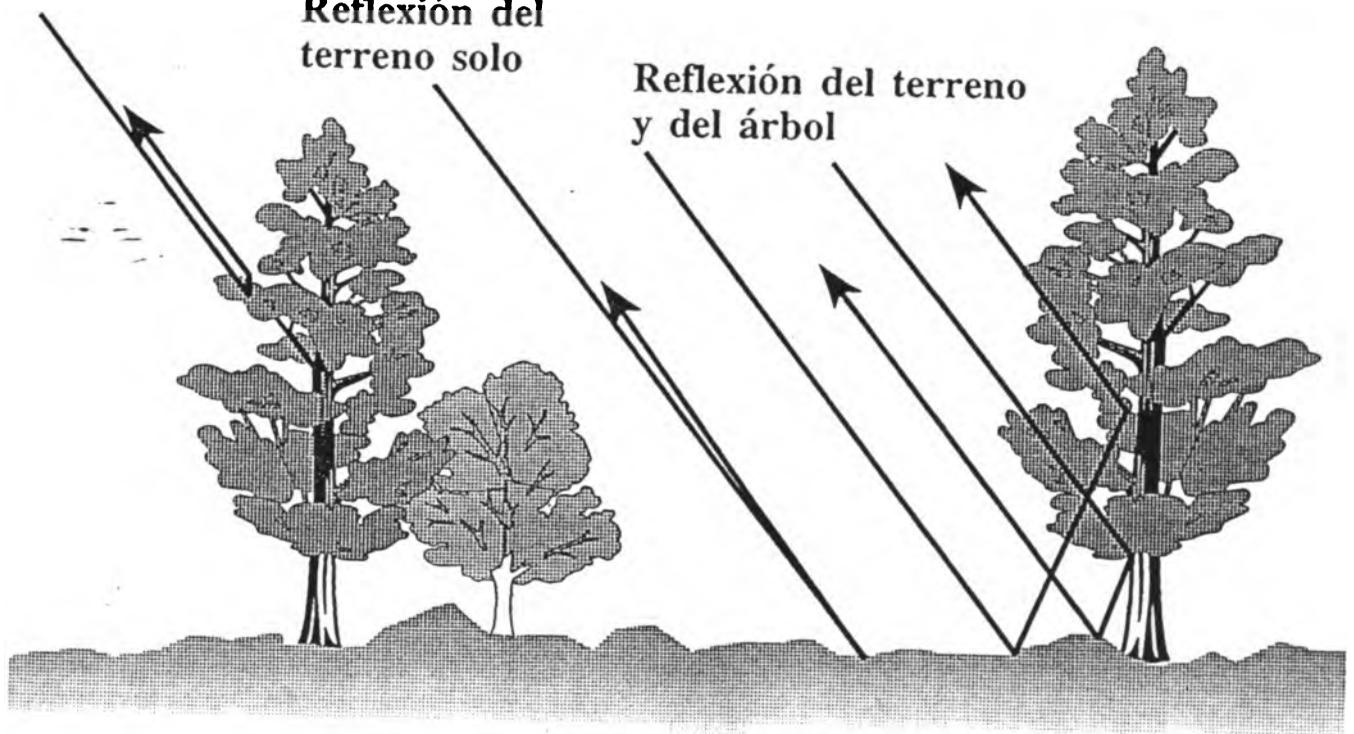
Fuente: Proyecto, Radar Costa Rica / Canadá

Retrodispersión

Reflexión
del foliaje

Reflexión del
terreno solo

Reflexión del terreno
y del árbol



2.3 SIGNIFICADO DE LA TONALIDAD DE LA IMAGEN:

Las superficies lisas (cuerpos de agua en reposo, carreteras, etc...) producen una reflexión predominantemente especular. Muy poca radiación llega al sensor, entonces estas superficies aparecen oscuras.

Las superficies rugosas producen una reflexión difusa; la radiación retrodifundida es mucho más importante que en el caso de las superficies lisas. Estas superficies aparecen brillantes.

Los edificios, puentes, cortes y árboles producen reflexiones múltiples. En algunos casos, la radiación está redirigida hacia el sensor con poca atenuación lo que produce puntos muy brillantes sobre la imagen. El fenómeno de reflexión múltiple se nota también en ríos encañonados, lo que da a superficies normalmente oscuras una tonalidad más clara.

Las pendientes que están inclinadas hacia el sensor aparecen más brillantes por el hecho que la radiación incidente les llega más directamente. El componente de reflexión especular de las pendientes que están perpendiculares a la dirección de incidencia está en dirección del sensor.

Las montañas, edificios y árboles producen una sombra que aparece muy oscura.

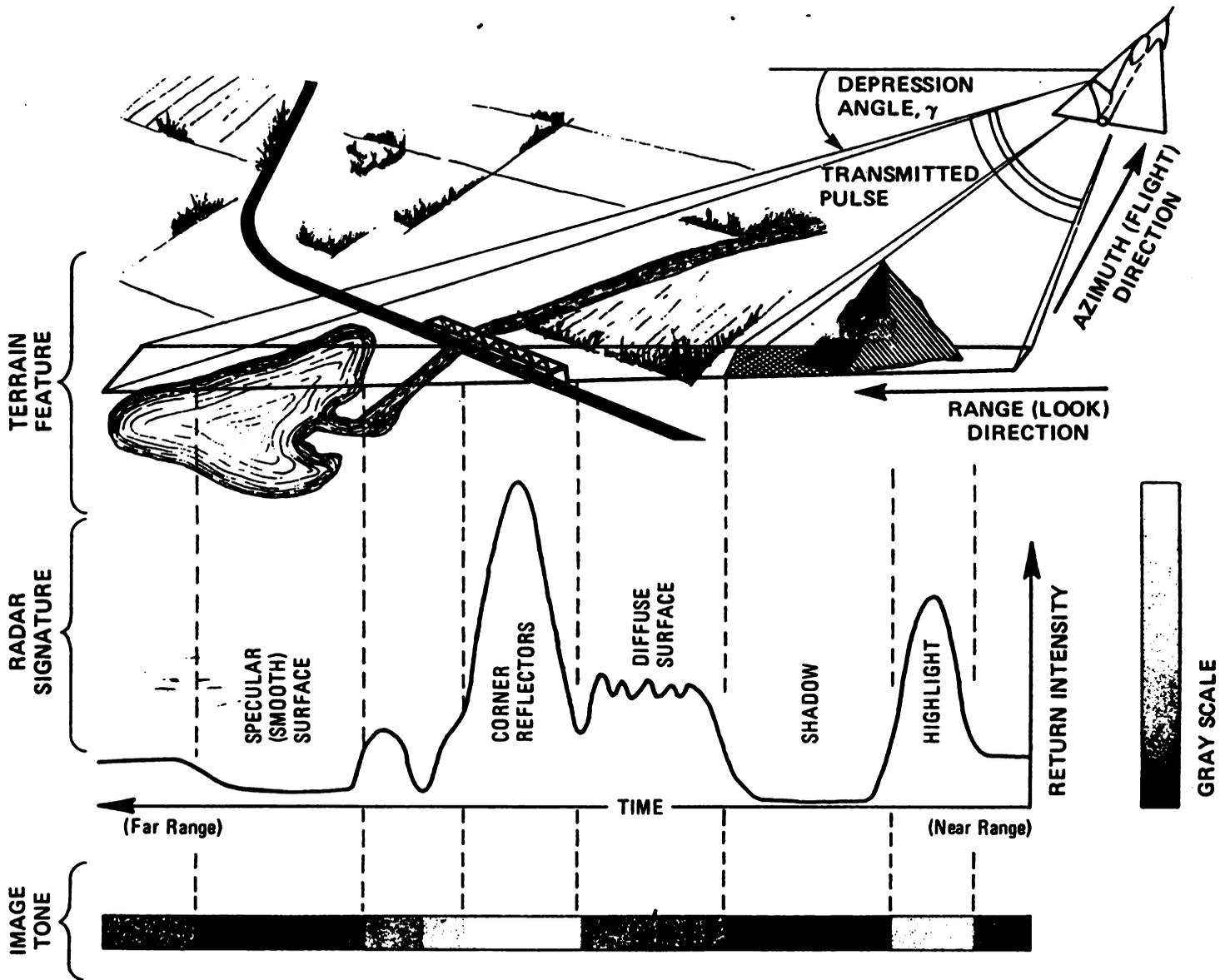


FIGURE 6.3 Radar returns from terrain and signal processing of a pulse of radar energy. From Sabins (1973, Figure 7). Depression angle is explained later in text.

2.4 CRITERIOS DE RUGOSIDAD

El hecho que una superficie parezca lisa, rugosa o intermedia depende de la **longitud de onda** usada y del **ángulo de incidencia local**.

Una misma superficie parecerá más rugosa a longitudes de onda más cortas y a ángulos de incidencia más grandes.

Los parámetros más corrientemente usados para cuantificar la rugosidad son la **altura RMS** (la desviación estandar de la altura) y la **longitud de correlación**.

La longitud de correlación es un parámetro más difícil de medir y puede fluctuar bastante para una misma superficie. Es la distancia L , a partir de la cual la altura de dos puntos, separados por L , es estadísticamente independiente. Es la distancia L a partir de la cual el valor del coeficiente de correlación pasa abajo de $1/e$.

Varios criterios de rugosidad fueron desarrollados con respecto a la altura RMS. En nuestra opinión, este concepto debe ser usado cualitativamente más que cuantitativamente.

banda C	Criterio de Rayleigh	Criterio de Franhauffer	Peake and Olivier (1971)
Angulo de Incidencia	$RMS > \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$ (Bonn, 1992) (Sabins, 1987)	$RMS > \frac{\lambda}{32 \cos \theta}$ (Ulaby et al., 1982)	$RMS > \frac{\lambda}{4.4 \cos \theta}$ rugoso sí liso sí $RMS < \frac{\lambda}{25 \cos \theta}$
0° (nadir)	liso < 7.2 mm < rugoso	liso < 1.8 < rugoso	liso < 2.3 < intermediario < 13.1 < rugoso
45°	liso < 10 mm < rugoso	liso < 2.5 < rugoso	liso < 3.2 < intermediario < 18.2 < rugoso
75° (alcance lejano)	liso < 27.2 mm < rugoso	liso < 6.8 < rugoso	liso < 8.7 < intermediario < 49.5 < rugoso

Por otra parte, Ulaby y Dobson (1988) dan un criterio aproximativo que no toma en cuenta el ángulo de incidencia:

Liso sí $RMS \cdot 2\pi/\lambda < 0,2,$

Muy rugoso sí $RMS \cdot 2\pi/\lambda > 1$

Ejercicio: Calcular los límites de rugosidad según el criterio de Peake et Olivier para la banda L (23.5 cm) y para un ángulo de depresión de 70°.

Fuente: Sabins, 1987

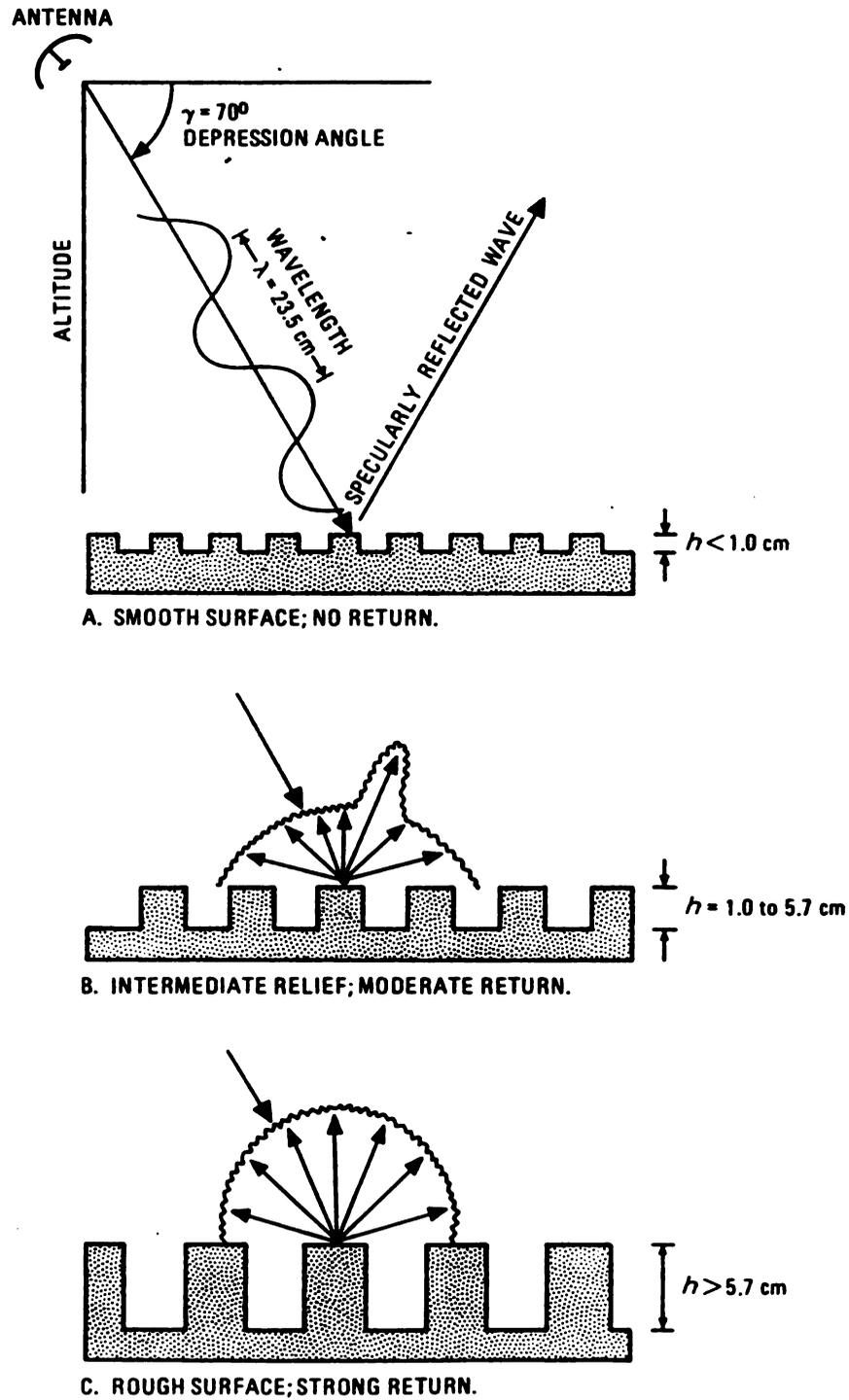
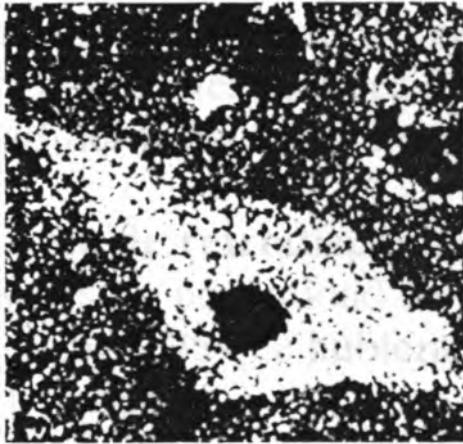


FIGURE 6.27 Models of surface roughness criteria and return intensity for Seasat images (23.5-cm wavelength).

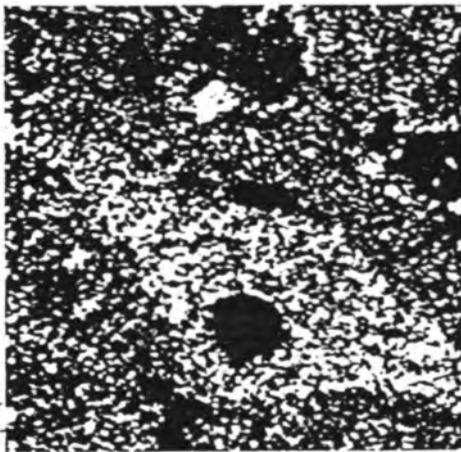
Influencia del ángulo de depresión sobre los contrastes debidos en variaciones en la rugosidad en el terreno. Fuente: Sabins, 1987



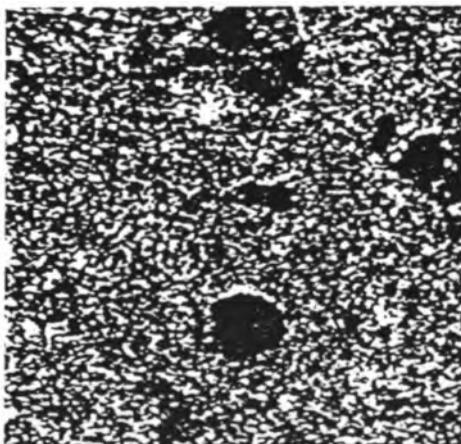
A. DEPRESSION ANGLE 62°.



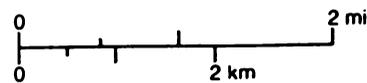
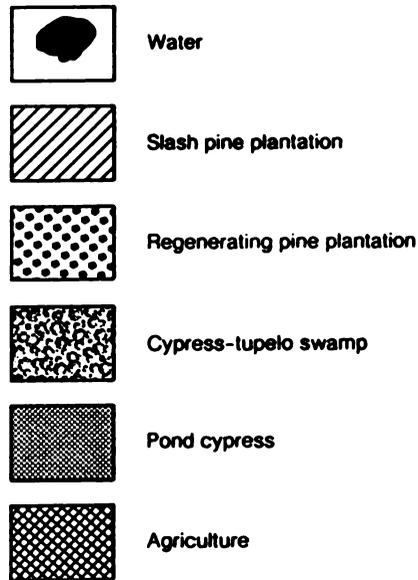
D. LAND-COVER MAP.



B. DEPRESSION ANGLE 45°.



C. DEPRESSION ANGLE 32°.



E. EXPLANATION.

FIGURE 6.22 Enlarged SIR-B images acquired at three depression angles. Fisher Lake and vicinity, northern Florida. From Hoffer, Mueller, and Lozano-Garcia (1985, Figure 4). Images courtesy R. M. Hoffer, Purdue University.

2.5 COEFICIENTE DE RETRODISPERSION

Sección eficaz de retrodispersión (σ , unidades de área): Se aplica a difusores puntuales. Expresión, en forma de un área equivalente, de la habilidad del reflector a dispersar en dirección del sensor.

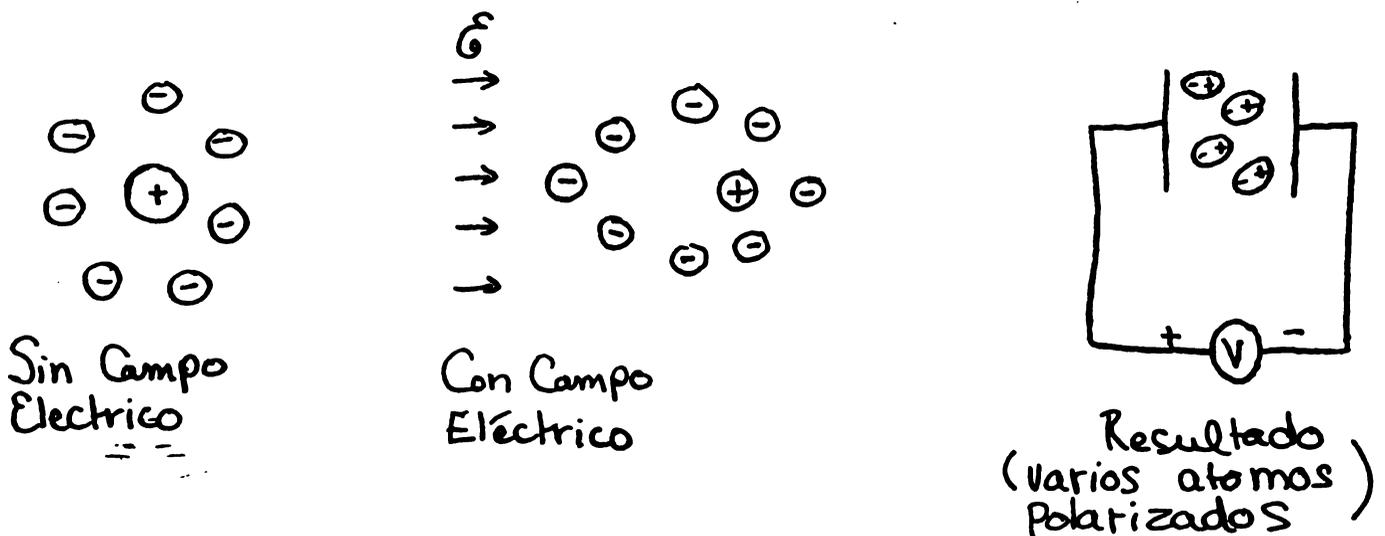
Coefficiente de retrodispersión (σ° , adimensional): sección eficaz de retrodispersión por unidad de área, porción de la potencia recibida con respecto a aquella que hubiera sido recibida si la dispersión hubiera sido total e isotrope.

Expresión en decibels:

$$\sigma^\circ = 10 \log_{10}(\text{cociente de las potencias})$$

2.6 INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS

Un dieléctrico es caracterizado por el hecho que no tiene cargas eléctricas libres. Los electrones están firmemente amarrados a sus núcleos. Las cargas no se distribuyen en el medio para anular al campo eléctrico como se produce en los conductores. Los dieléctricos colocados en un campo eléctrico exhiben cargas superficiales debido al hecho que las cargas positivas y negativas de un mismo átomo se alargan ligeramente de unas a otras. Este fenómeno se llama polarización inducida.



La constante dieléctrica ϵ es una cantidad sin dimensiones y compleja, i.e. tiene un componente real ϵ' y uno imaginario ϵ'' .

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'',$$

$$\text{donde } i = \sqrt{-1}$$

ϵ' es una medida de hasta que punto puede ser polarizado un dieléctrico, y es igual a la permitividad del medio sobre la permitividad del vacío.

ϵ'' corresponde a la habilidad del medio de absorber la onda electromagnética y transformar su energía en otro tipo de energía (térmica, química, etc...).

Se refiere a los componentes de permitividad y de conductividad, respectivamente, para nombrar las cantidades real e imaginaria.

La retrodifusión aumenta con el componente real de la constante dieléctrica.

El índice de refracción $n = \sqrt{\epsilon'}$

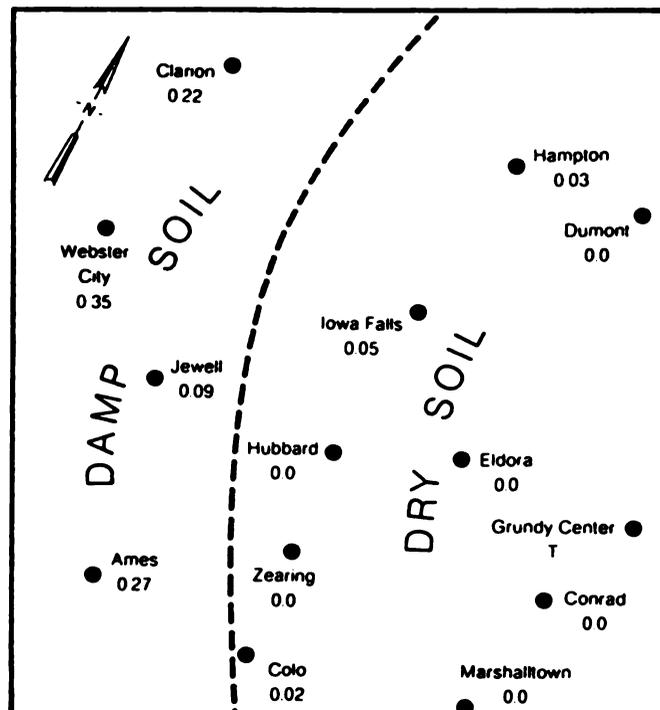
Las variaciones más significativas de las propiedades dieléctricas en la superficie terrestre están debidas a variaciones en el **contenido de humedad** del suelo, de la nieve o de la vegetación.

La **presencia** de humedad tiene por efecto aumentar el coeficiente de retrodifusión y disminuir la profundidad de penetración, ambos de manera significativa.

Fuente: Sabins, 1987



A. SEASAT IMAGE.



B. MAP OF RAIN-GAUGE DATA.

FIGURE 6.25 Seasat image and map of rain-gauge data for Ames, Iowa, and vicinity acquired August 16, 1978, 12 hours after a rainfall. From Ulaby, Brisco, and Dobson (1983, Figure 2). Image courtesy J. P. Ford, Jet Propulsion Laboratory.

Ejemplos de valores de constante dieléctrica (parte real, ϵ') ref: Ference et al., sin referencia a la temperatura y a la frecuencia.

Vacío:	1
Aire:	1.0006
Papel seco	2.0-2.4
Mica	5.7-7.0
Agua destilada	81.07

Otros ejemplos, tomando en cuenta la dependencia de ϵ con respecto a la temperatura y a la frecuencia (Fuente: Bonn y Rochon, 1992 resultados de Jackson y Schmutge, 1988)

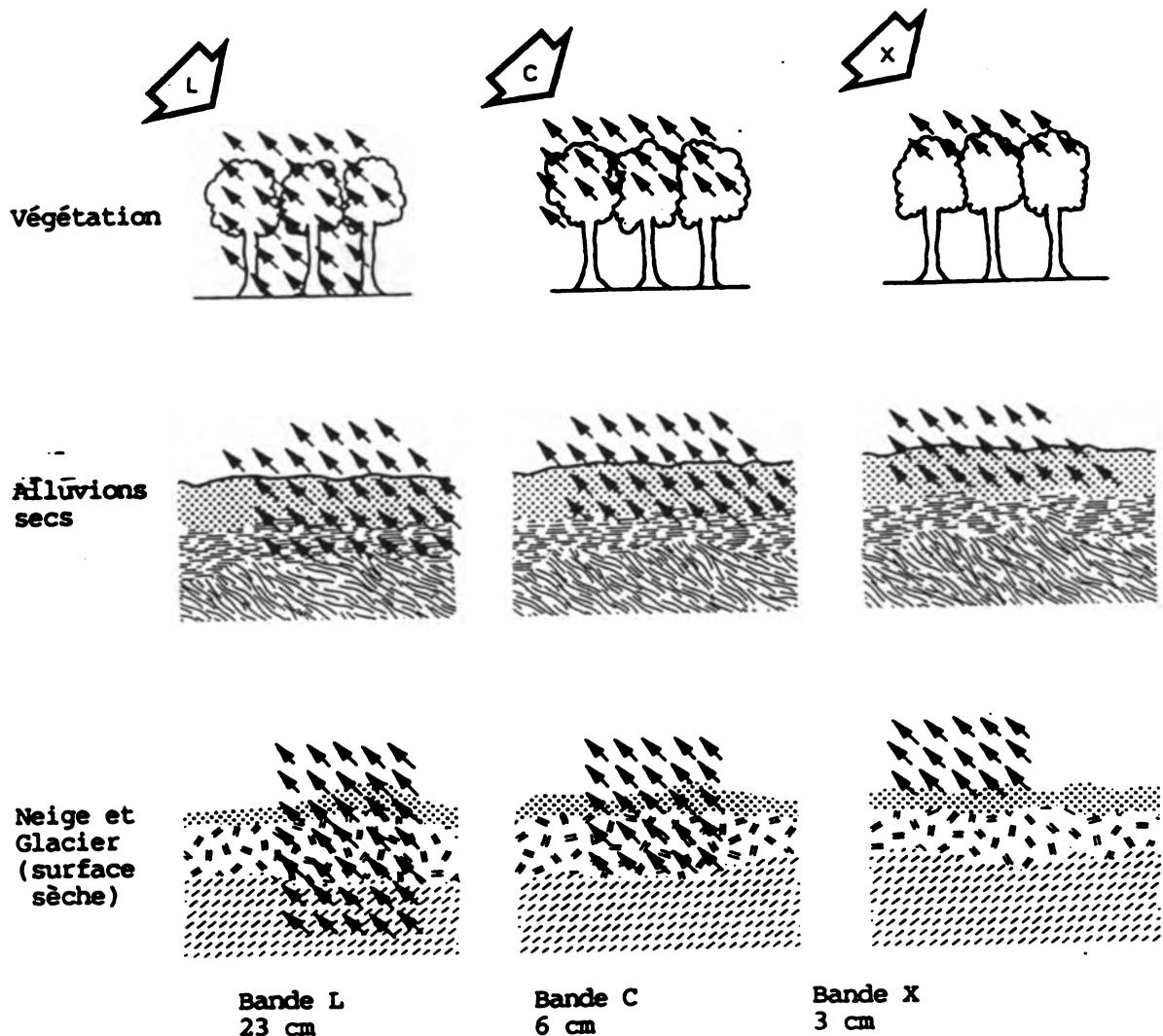
material	frecuencia (GHz)	ϵ'	ϵ''
Agua (20°C)	1	80	4,5
Agua (20°C)	20	35	40
Suelo seco	1,4	2.8	0
Suelo húmedo	1,4	19,6	4,8

2.7 PROFUNDIDAD DE PENETRACION

La profundidad de penetración L_p es la profundidad a la cual la potencia de la radiación incidente decrece de un factor e^{-1} (una pérdida de 4.3 dB)

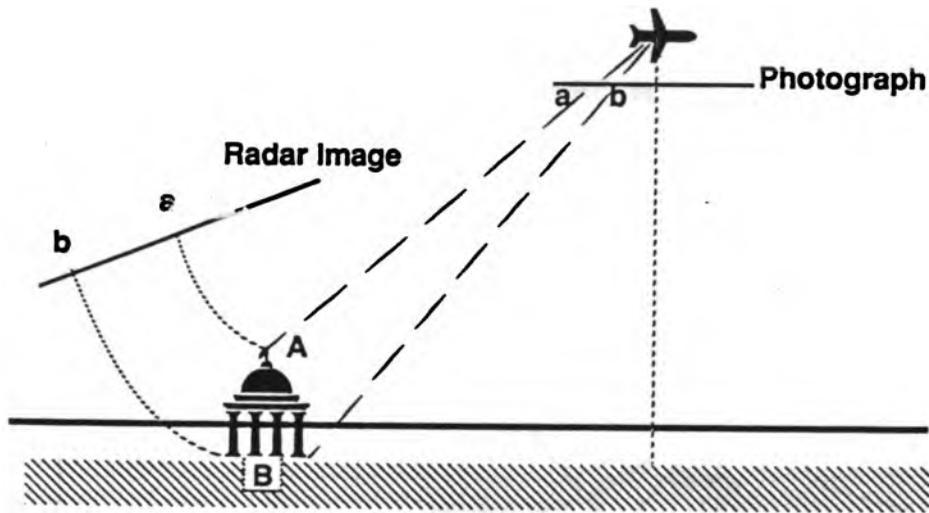
$$L_p = \lambda \sqrt{\epsilon'' / 2\pi\epsilon'}$$

Fuente: NASA, 1988: Retrodispersión de objetos naturales en bandas L, C y X (tomado de FAO, 1991)



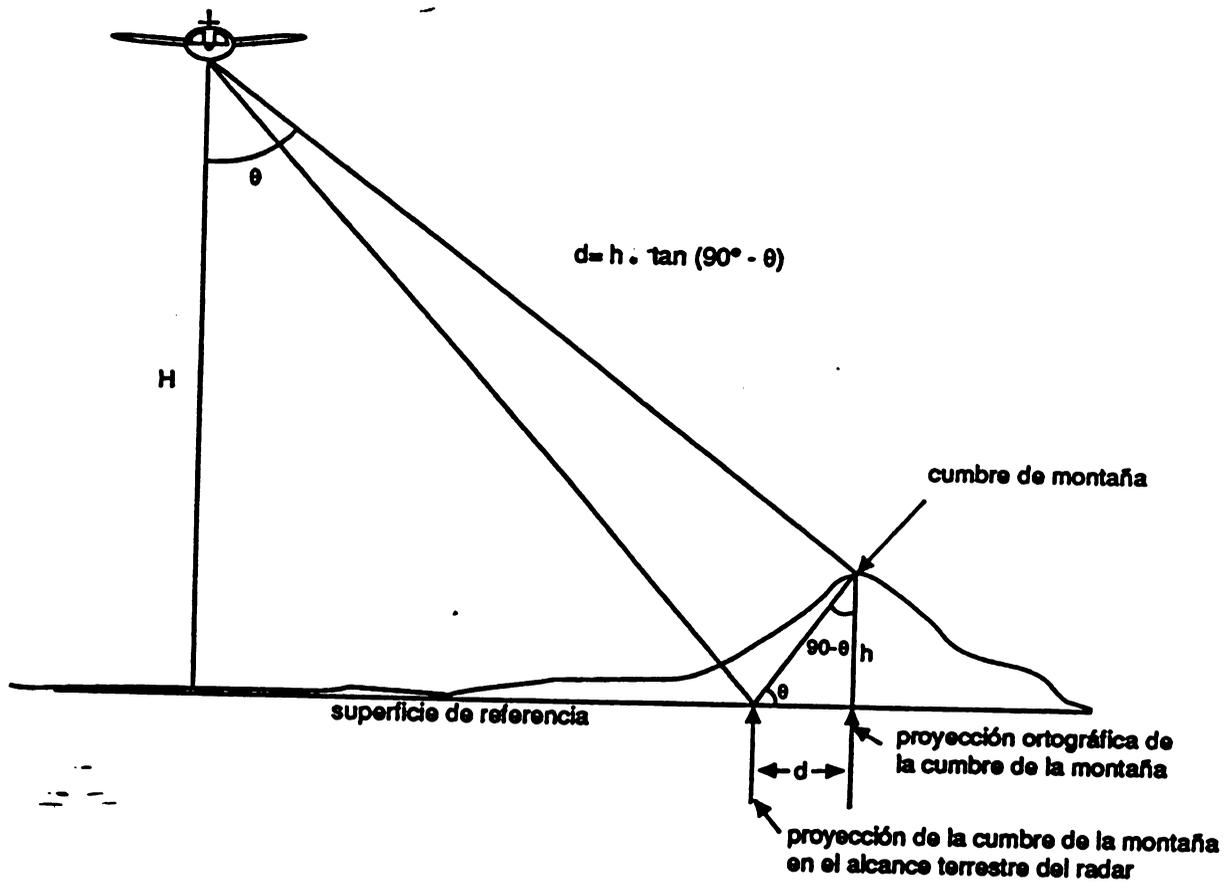
2.8 DISTORSIONES GEOMETRICAS DEBIDAS A LA TOPOGRAFIA

En el caso de las fotografías aéreas, se produce una distorsión radial, la cumbre de una montaña parece más lejos del centro de la imagen de lo que es en realidad. Esta distorsión se puede corregir sin ninguna pérdida de detalle en la imagen.



En las imágenes de radar, los objetos más altos parecen como si estuvieran más cerca del radar de lo que están en realidad.

Fuente: Centro Canadiense de Teledetección, 1993, Proyecto Radar Costa Rica/Canadá



Desplazamiento topográfico del sensor de radar

Se denomina escorzo de la imágen a la compresión aparente de aquellos elementos en la escena que están inclinados hacia el radar

El escorzo es un máximo cuando la pendiente es ortogonal al haz del radar. El ángulo de incidencia es entonces igual a cero, las imágenes de la base, la pendiente y la cumbre se forman simultáneamente y ocupan la misma posición en la imagen. Se produce una pila de píxeles que no se pueden separar de ninguna manera.

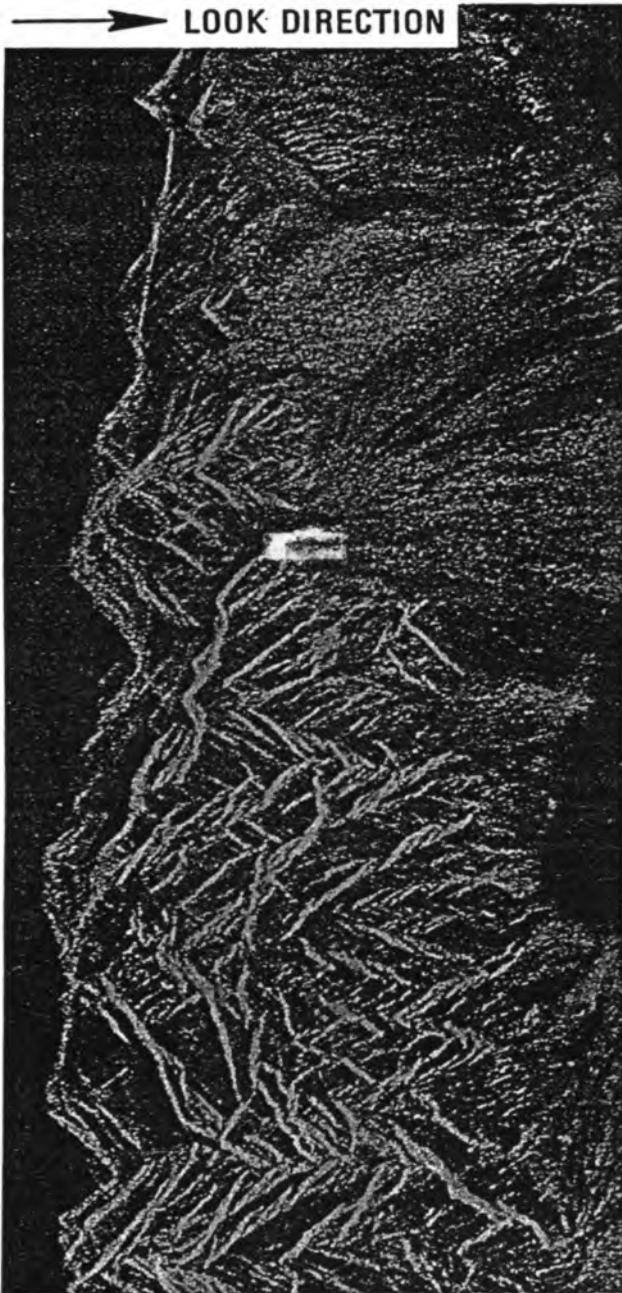
La **inversión por relieve** es una forma extrema de escorzo, que se produce cuando los ángulos de incidencia son muy pequeños, en cuyo caso las cumbres están en efecto más cerca del sensor que las bases.

El escorzo extremo y la inversión por relieve se traducen como arcos muy brillantes en las cumbres de las montañas. Si el desplazamiento horizontal aparente 2.5 veces mayor que la elevación del relieve vertical, se considera que la distorsión es demasiado severa para una interpretación temática.

Fuente: Sabins, 1987

NEAR RANGE FAR RANGE
 → LOOK DIRECTION

0 4 mi
 0 4 km

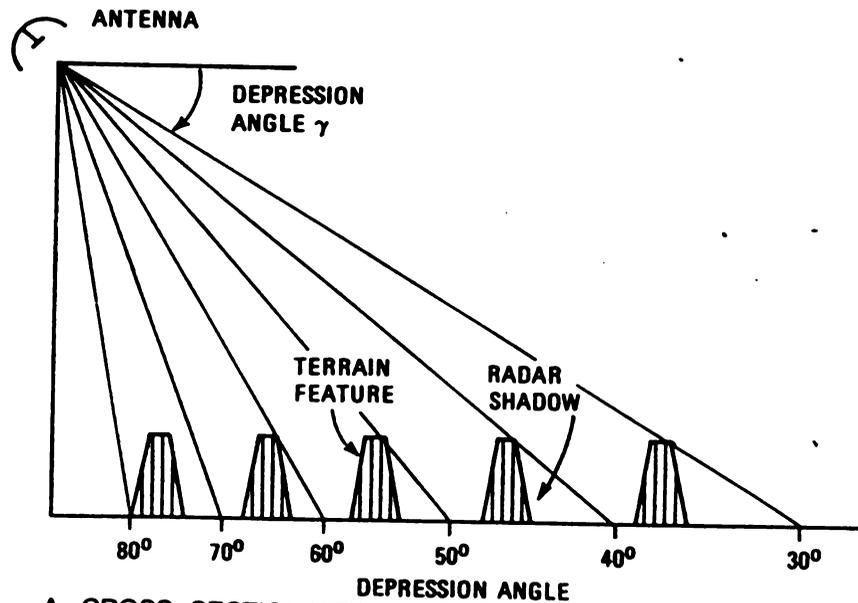


A. L-BAND RADAR IMAGE ACQUIRED BY NASA AND JET PROPULSION LABORATORY.

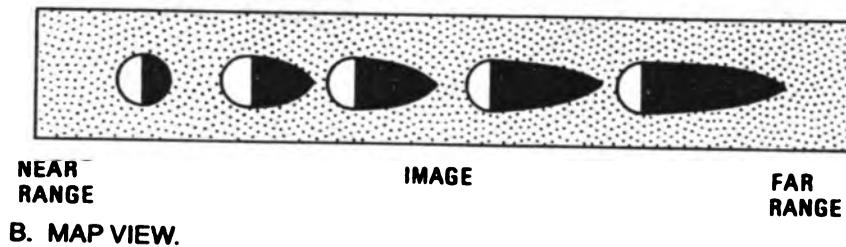
B. ENLARGED SKYLAB-4 PHOTOGRAPH.

FIGURE 6.15 Layover of topographic features on a radar image of the Grapevine Mountains on the east side of Death Valley, California. Images courtesy G. C. Schaber, U.S. Geological Survey.

Los efectos de escorzo y de inversión por relieve se reducen con el aumento del ángulo de incidencia, lo que aumenta también efectos de sombra. Fuente: Sabins, 1987



A. CROSS-SECTION VIEW.



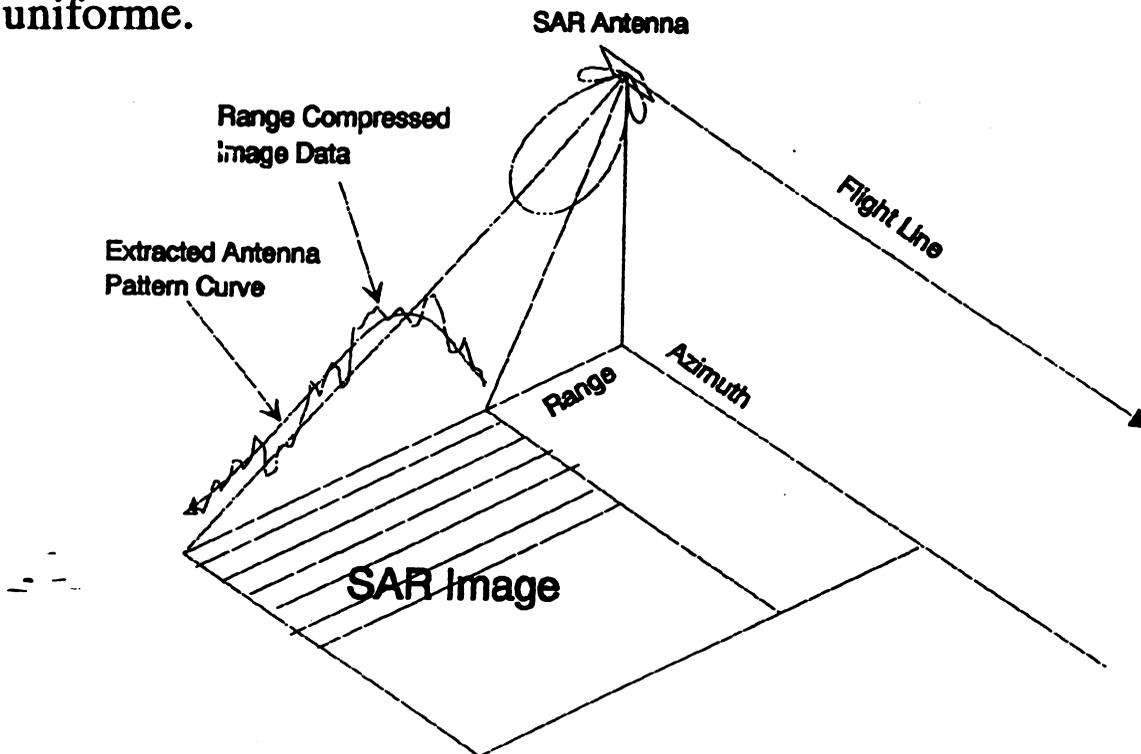
B. MAP VIEW.

2.9 DISTORCIONES RADIOMETRICAS Y RUIDO

Topografía: Brillantez mayor de las pendientes que están orientadas hacia el sensor.

Variaciones en el eje del alcance:

-Patrón de antena: Causado por el hecho que el haz transmitido no esté uniforme.



-Atenuación según el alcance: atenuación de la señal recibida en función de S^4 en el caso del RAR y en S^3 en el caso del SAR, donde S es el alcance inclinado.

Efecto del ángulo de incidencia local θ_{loc} sobre el coeficiente de retrodifusión: θ_{loc} , que varía a lo largo del ancho de la imagen aun para una superficie plana, influencia la manera con la cual la rugosidad de una superficie es percibida por el sensor. Además, las superficies lisas y rugosas tienen diferentes dependencias de σ° en función de θ_{loc} .

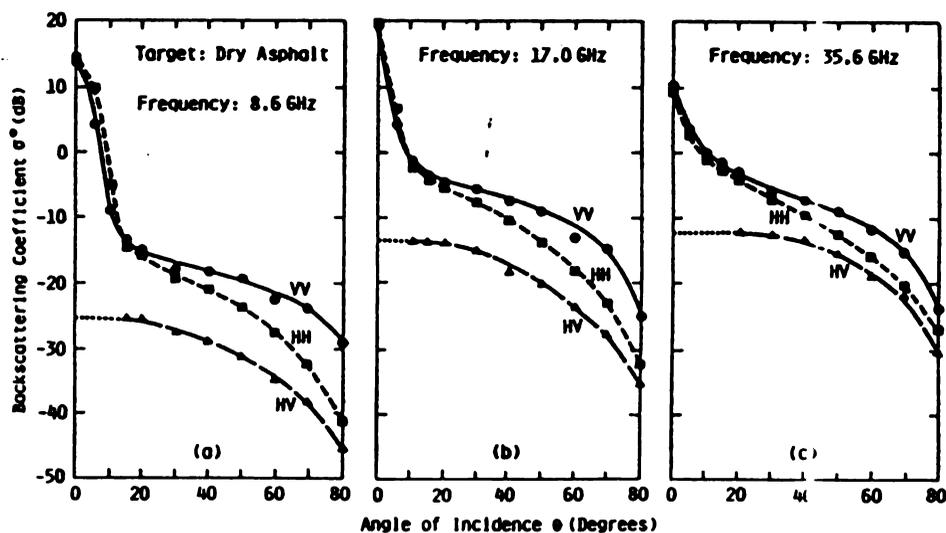
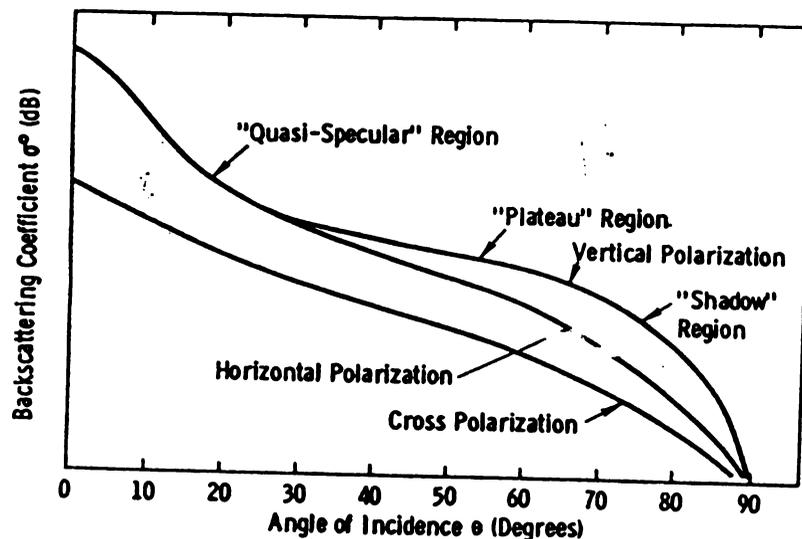
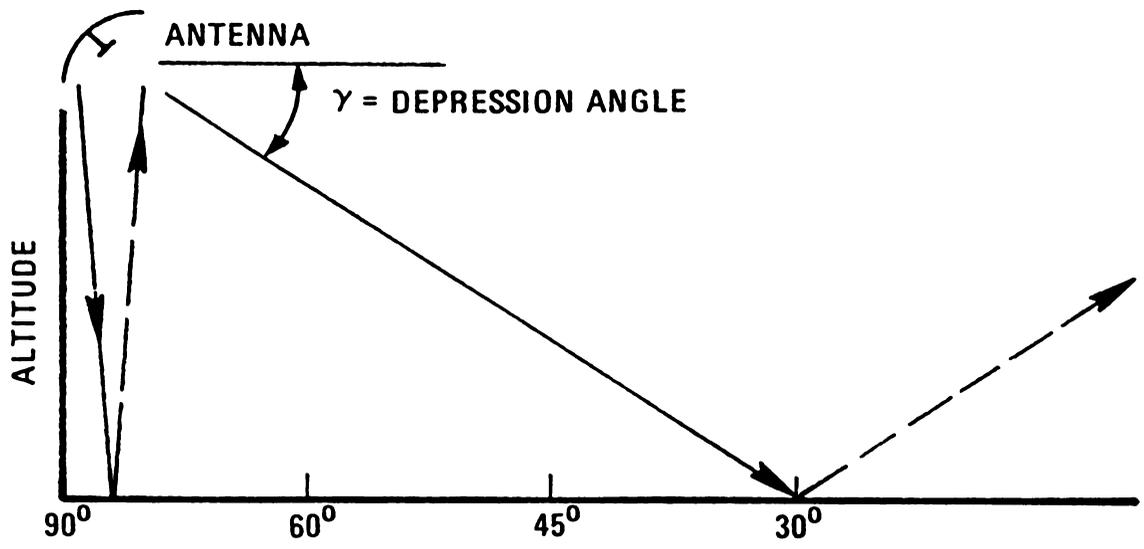
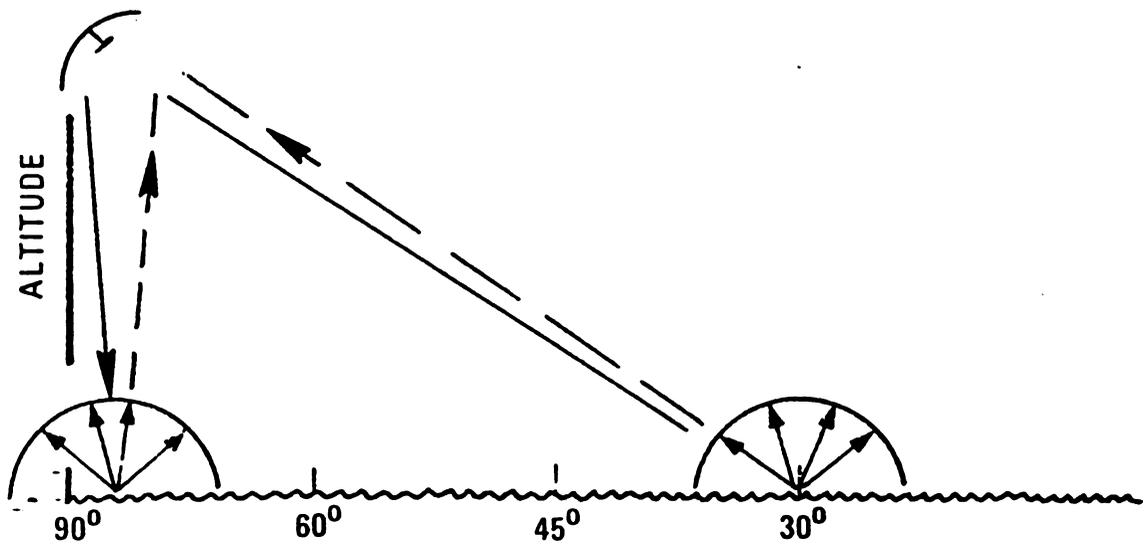


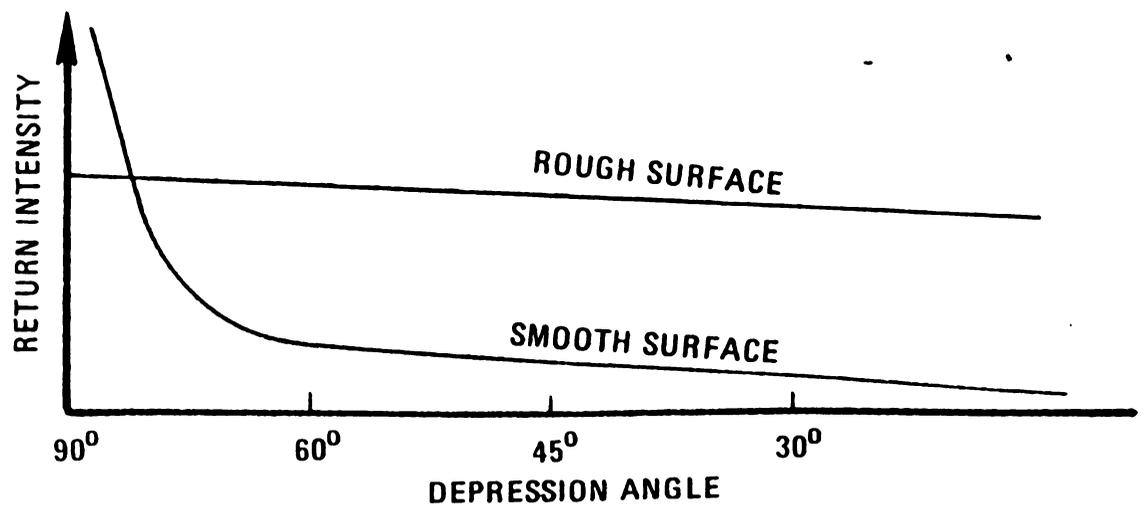
Figure 2.11 Angular response of the scattering coefficient of dry asphalt at (a) 8.6 GHz, (b) 17.0 GHz, and (c) 35.6 GHz. (From [138].)



A. SMOOTH SURFACE WITH SPECULAR REFLECTION.



B. ROUGH SURFACE WITH DIFFUSE SCATTERING.



-Ruido térmico: La emisión de las componentes del sistema de adquisición no es negligible en el dominio de las microondas y constituye un ruido.

-Moteado (speckle): Aspecto granular (sal y pimienta) que proviene de la pequeña anchura de las bandas espectrales usadas y del hecho que la radiación usada esté coherente, se produzcan interferencias aleatorias a tanto constructivas como destructivas entre la señal proveniente de varias partes del terreno constituyendo una misma celda de resolución.

3 CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS

3.1 RESOLUCION ESPACIAL

En el eje del alcance, la resolución espacial depende del ángulo de depresión γ y de la duración τ de los pulsos transmitidos, en microsegundos.

$$R_{\text{alcance}} = \frac{c}{2\cos \gamma},$$

En el caso de un Radar a Apertura Real (RAR), en el eje del azimut, la resolución corresponde a la anchura de terreno iluminado por el haz del radar. Esta anchura es más pequeña en alcance cercano que en alcance lejano, por la distancia más corta entre el sensor y el terreno. La anchura angular del haz es directamente proporcional a la longitud de onda λ , e inversamente proporcional a la longitud D de la antena. La anchura al suelo depende de la distancia S sensor-terreno, en la proyección inclinada.

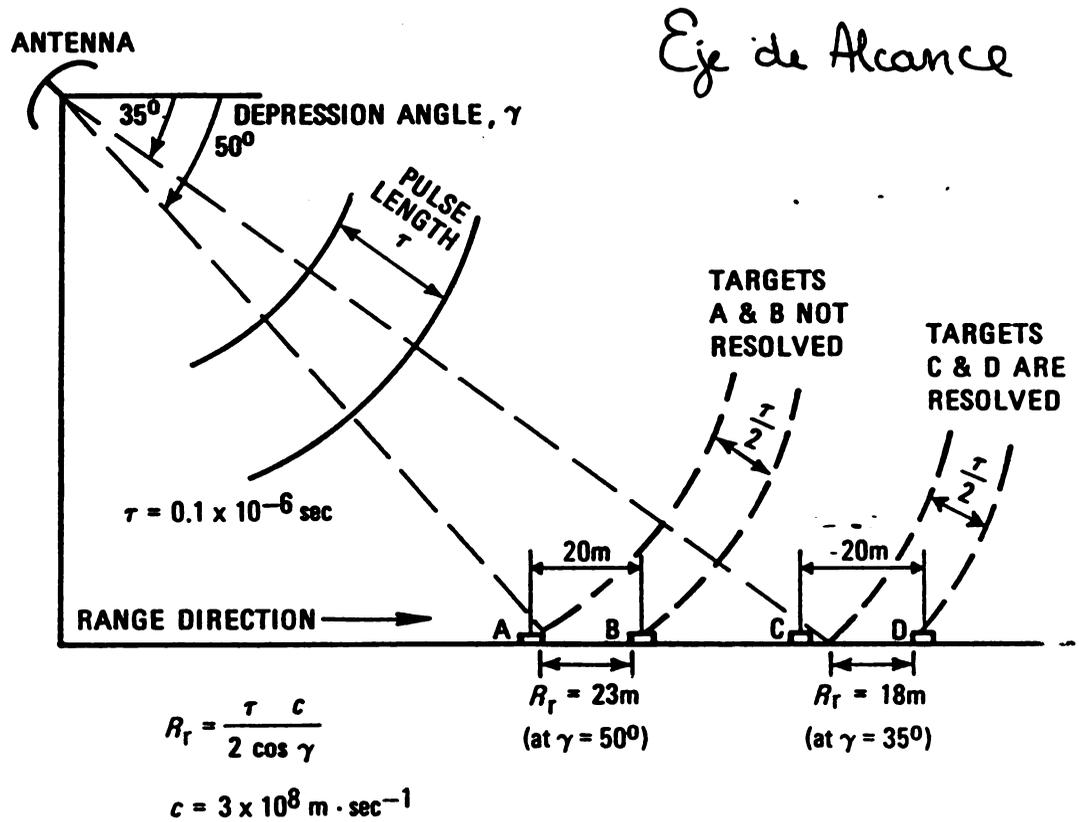
$$R_{\text{azimut}} = 0,7 S \lambda / D$$

Ejercicio: Una antena radar tiene una longitud $D=500$ cm, trabajando en banda X ($\lambda= 3$ cm), a una altitud de 6 km con ángulos de depresión variando entre 35° y 50° :

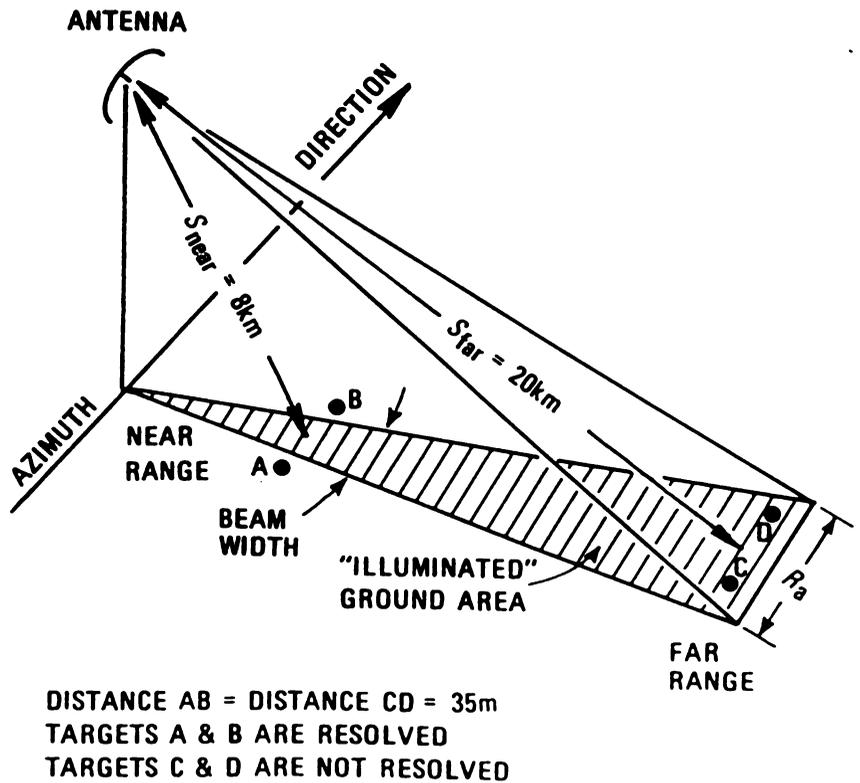
a) Calcular las resoluciones espaciales en los ejes del Azimut y del alcance, en alcance cercano y en alcance lejano.

b) Calcular las mismas resoluciones si la antena esta a borde de un satélite a 800km de altitud

Fuente: Sabins, 1987



Eje de Azimut



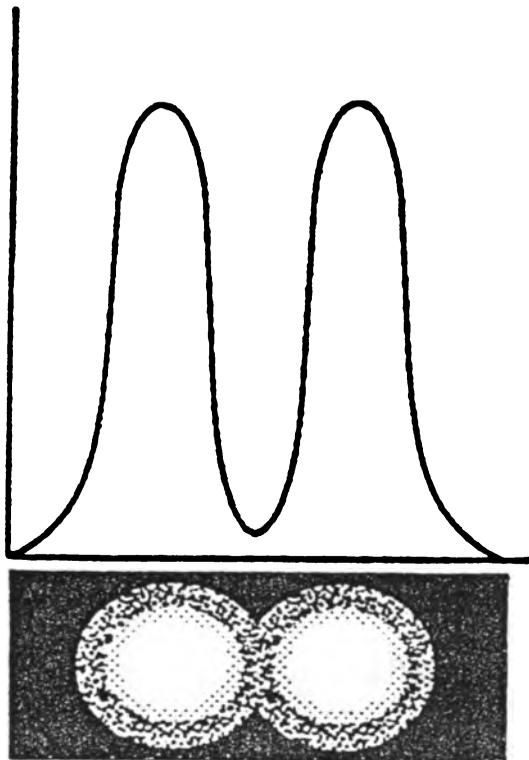
3.2 RESOLUCION ESPACIAL Y TAMAÑO DE PIXEL

¡Cuidado! ¡El tamaño del pixel en una imagen y la resolución espacial no son sinonimos!

La resolución espacial es algo que es determinado por las características físicas de los sensores y la geometría de vistada.

El tamaño del pixel corresponde al intervalo de **muestreo** que se escogio por los diseñadores del sistema.

Según el teórema de muestreo de Nyquist, es recomendable tener un intervalo de muestra que es por lo menos dos veces más fino que la celda de resolución, para poder apreciar cada uno de dos objetos separados de una distancia igual a la resolución, además del espacio entre ellos.

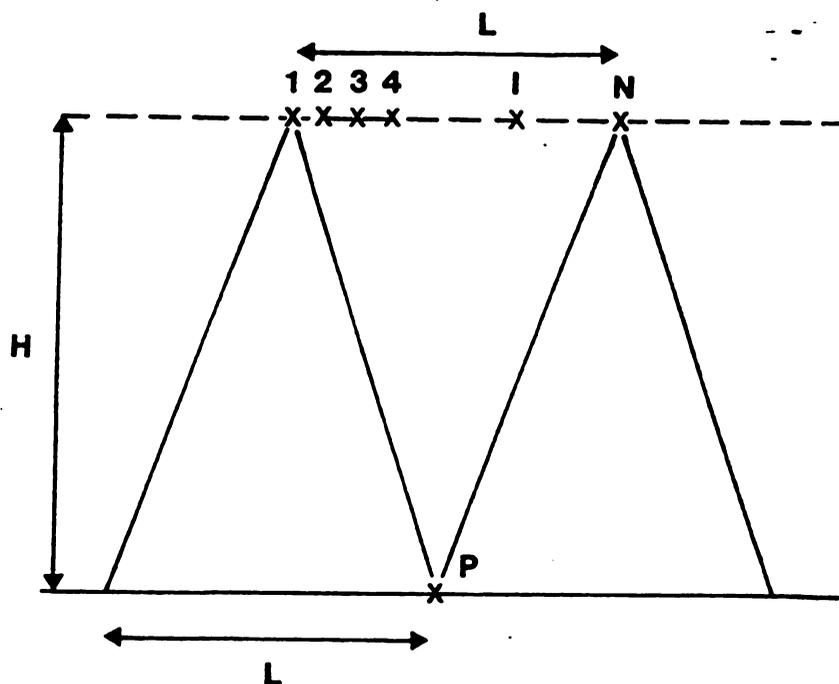


Ejercicio: ¿Cual sería el tamaño de pixel dadas las resoluciones obtenidas en el ejercicio anterior?

3.3 LA TECNOLOGIA DE LA APERTURA SINTETICA (SAR)

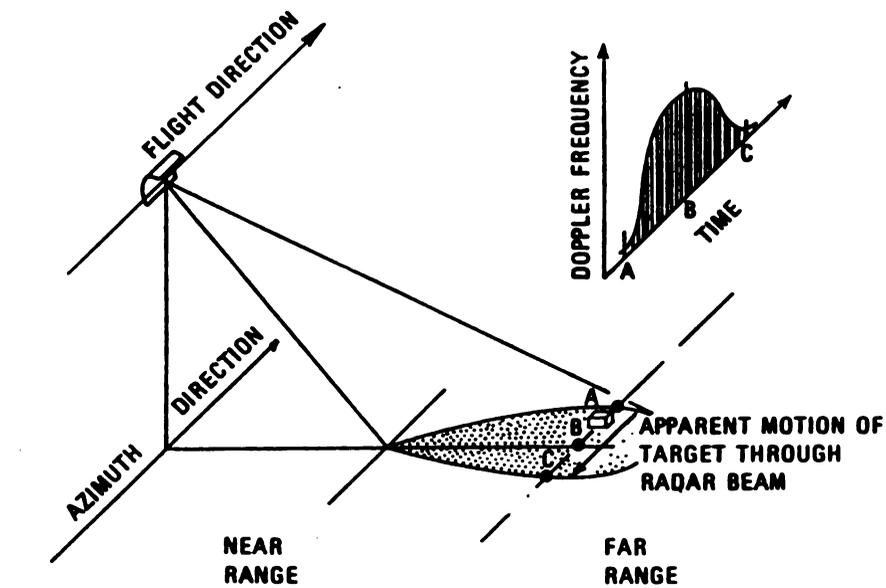
Estrategia para obtener una resolución azimutal más fina, independiente de la altitud de vuelo.

Se usa una antena relativamente pequeña produciendo un haz ancho de radiación coherente, y se procesa la señal grabada a lo largo de la trayectoria para simular una antena mucho más larga.

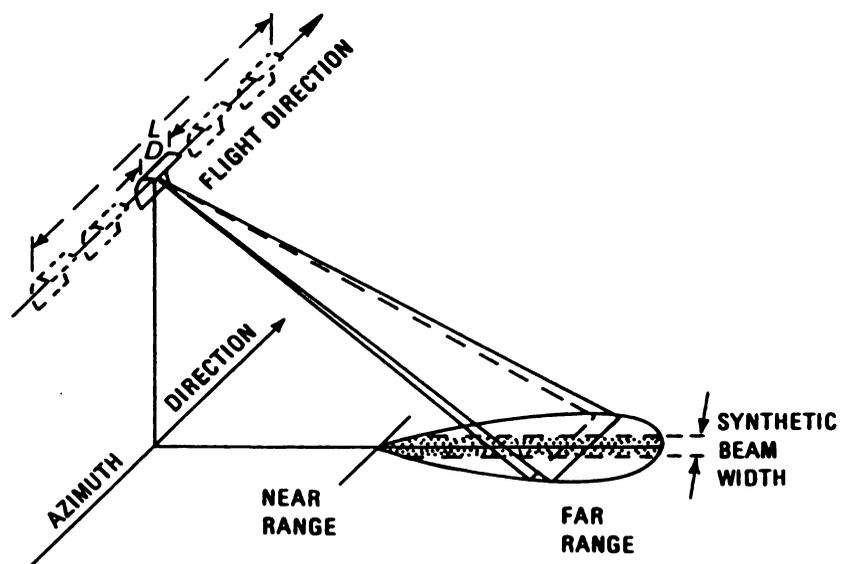


Como el haz está ancho, la señal que regresa de cada pulso enviado proviene de varios lugares y esta compuesta de varios ecos. Esta señal puede ser descompuesta en diferentes componentes según su tiempo de llegada, su frecuencia y su fase.

Resolución la más fina que se puede obtener (en azimutal)
 $R_a = \frac{D}{2}$ donde $D =$ longitud de la antena (real)



A. DOPPLER FREQUENCY SHIFT DUE TO RELATIVE MOTION OF TARGET THROUGH RADAR BEAM.



B. RESOLUTION OF SYNTHETIC-APERTURE RADAR IN THE AZIMUTH DIRECTION. NOTE THAT THE PHYSICAL ANTENNA LENGTH D IS SYNTHETICALLY LENGTHENED TO L .

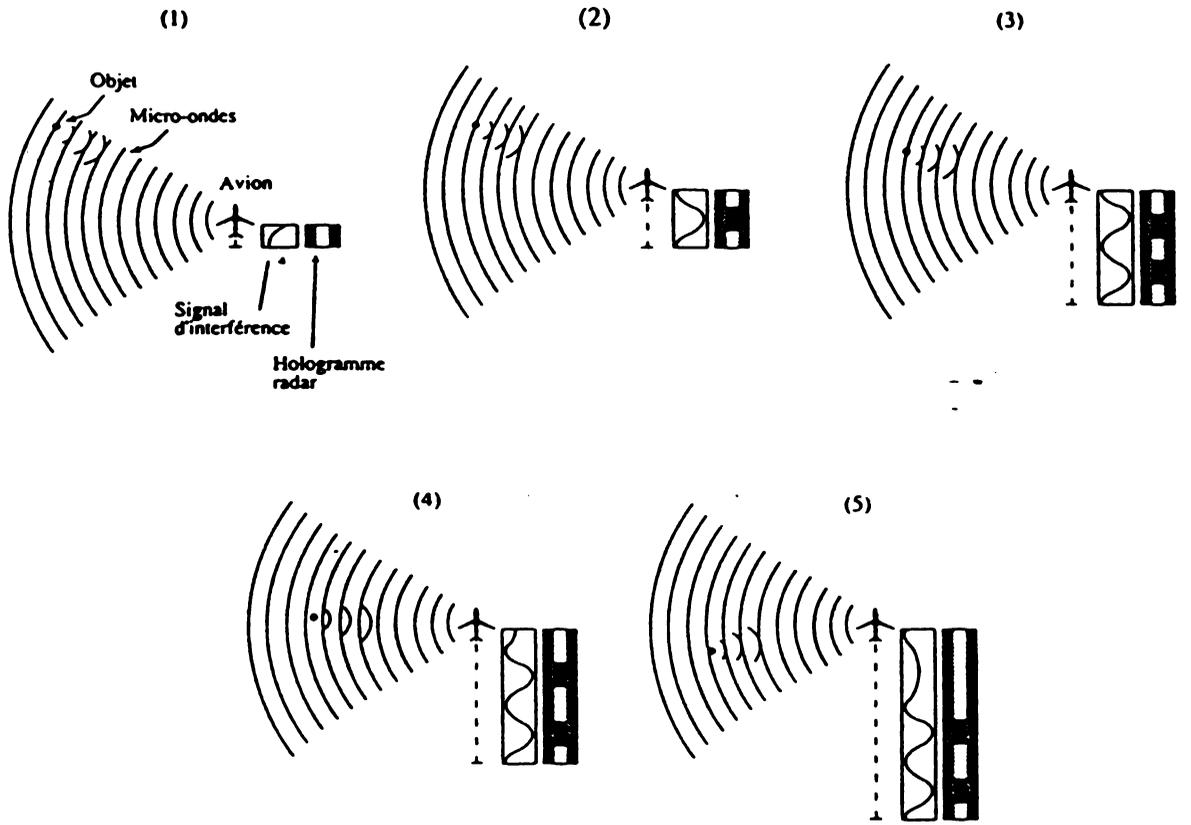
FIGURE 6.8 Synthetic-aperture radar system. From Craib (1972, Figures 3 and 5).

Las imágenes de SAR pueden ser procesadas ópticamente o digitalmente.

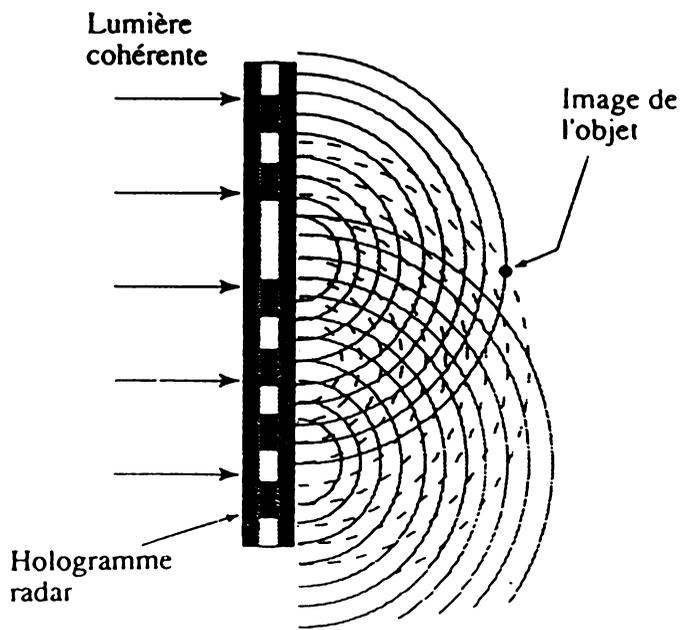
Entre los varios métodos de proceso óptico se encuentra la formación de un holograma.

Según la distancia de un reflector puntual hasta el sensor, se producen patrones de interferencia constructiva o destructiva en comparación con una señal producida en el procesador. Se graba sobre una película una serie de líneas negras y blancas correspondiendo respectivamente a estos tipos de interferencia, resultado de la multitud de reflectores puntuales registrados a lo largo de la trayectoria. Cuando se iluminan estas rayas con una luz coherente, se produce del otro lado unas interferencias que permiten focalizar las imágenes de los puntos individuales.

formación del holograma:

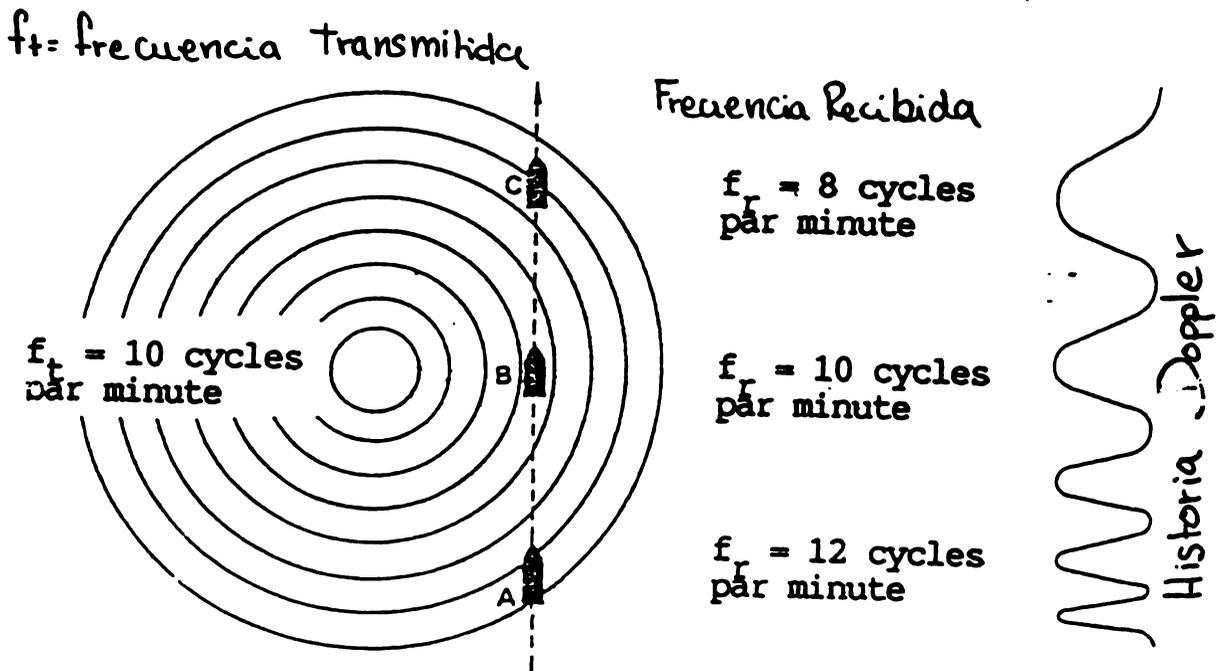


Restitución de la imagen



Método Doppler

Se puede hacer la analogía con el ejemplo de un barco que se está acercando de una fuente de olas para entender que cada reflector tendrá su historia Doppler, que está usada en la formación de la imagen.



En el proceso digital, los ecos recibidos están guardados en categorías de distancia (range gate). Dentro de cada categoría de distancia, las señales están clasificadas según su frecuencia Doppler. Los reflectores hacia los cuales el sensor se está desplazando tienen un cambio positivo de frecuencia Doppler, los que están justo abajo tienen un cambio nulo, y las de las cual el sensor se está alejando un cambio negativo. El muestreo final consiste en correlacionar y focalizar los ecos resultantes del mismo objetivo. Es un tratamiento largo y complejo.

3.4 FORMAS DE LOS DATOS DE SAR

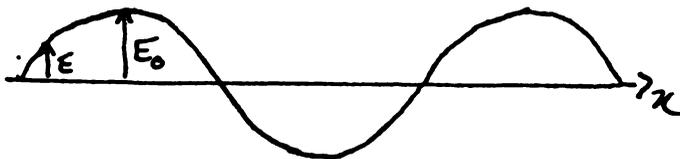
Datos complejos: Registro secuencial de los pulsos enviados y de los ecos recibidos. Estos datos incluyen información sobre la fase de la señal y están en forma compleja.

El componente real contiene la información relativa a la amplitud de la señal

El componente imaginario contiene la información relativa a la fase de la señal

Función de onda plana

Se puede expresar en forma compleja para poder usar exponenciales



$$E = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi)$$

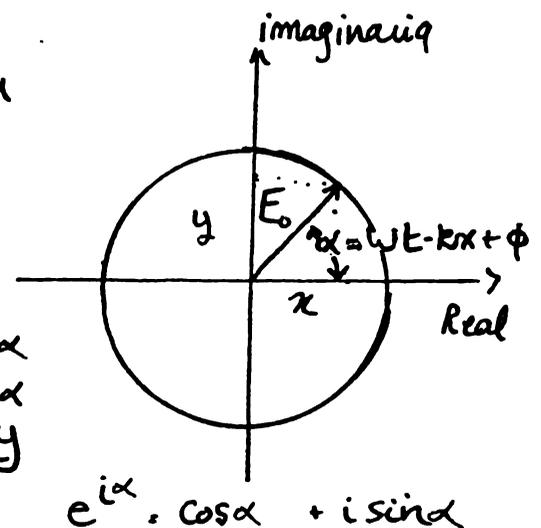
$$\omega = 2\pi \nu \quad \nu = \text{frecuencia} \quad \phi = \text{fase}$$

$$k = 2\pi/\lambda$$

$$y = E_0 \sin \alpha$$

$$x = E_0 \cos \alpha$$

$$z = x + iy$$



Datos procesados: Los datos complejos están traducidos en una serie de escenas o líneas de vuelo. En los datos pre-procesados, la información sobre la fase queda inaccesible. Las características radiométricas de una misma imagen pueden variar significativamente según la institución que la procesa.

Los datos de SAR se presentan a menudo en 16 bits sin signo, mientras que los datos de SPOT y Landsat se presentan en formato 8 bits.

3.5 POLARIZACION

La dirección de polarización se refiere a la dirección de vibración del vector E del campo eléctrico.

La polarización de la luz solar es aleatoria, entonces decimos que no es polarizada. La radiación usada por radar es polarizada.

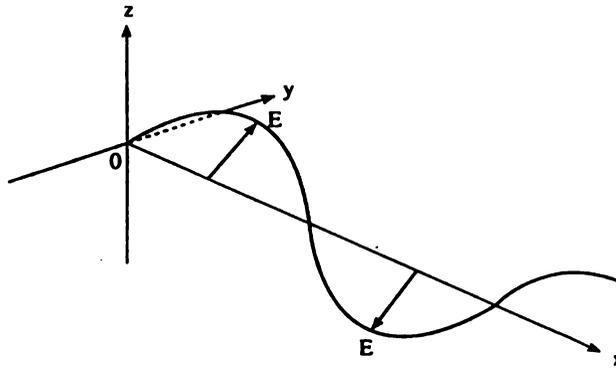
Se habla de **polarización horizontal** cuándo el vector E es ortogonal al plano de incidencia, formado por la dirección de incidencia y el vector normal a la superficie terrestre. Se habla de **polarización vertical** cuándo el vector E está contenido en el plano de incidencia.

En teoría, las coberturas que tienen muchos componentes verticales reflejan mejor la radiación de polarización vertical, y los que tienen muchos componentes horizontales, la horizontal. Se puede también producir un cambio de polarización de una parte de la radiación dispersada, lo que se llama depolarización.

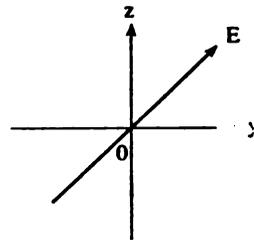
Cuando la radiación transmitida y recibida tienen la misma polarización, se habla de **polarización igual** (HH o VV). Cuando se transmite la radiación en una polarización y se recibe en otra, se habla de **polarización cruzada** (HV o VH).

FIGURE 2.4
Les trois principaux types de polarisation

fuente: Born y Reichen 1992

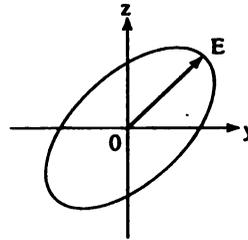


Profil de polarisation



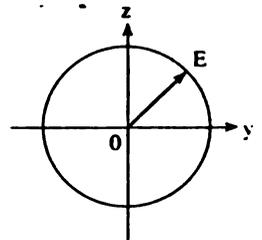
$\phi = 0$

Polarisation rectiligne



$0 < \phi < \frac{\pi}{2}$

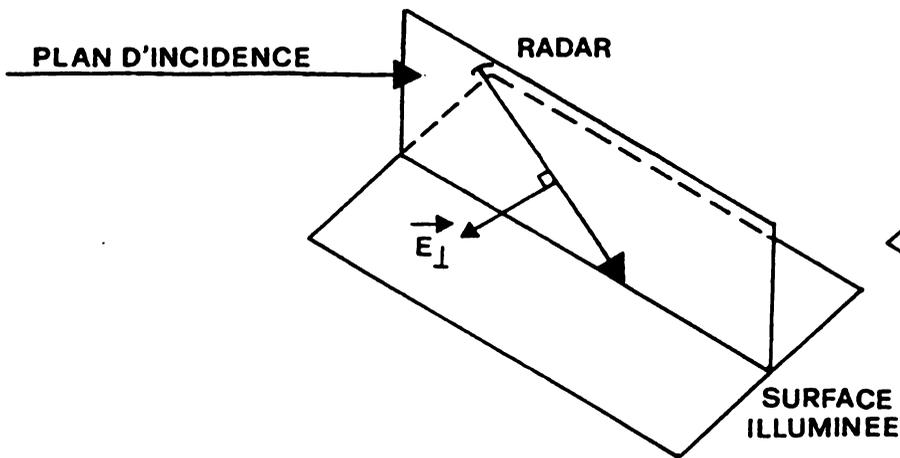
Polarisation elliptique



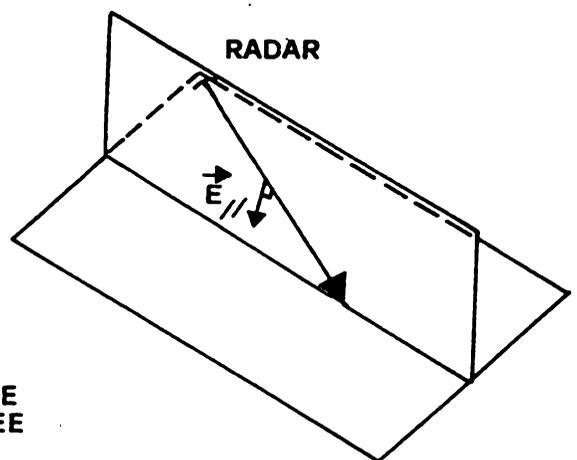
$\phi = \frac{\pi}{2}$ et $E_{0z} = E_{0y}$

Polarisation circulaire

Fuente: FAO, 1991



POLARISATION PERPENDICULAIRE
OU HORIZONTALE

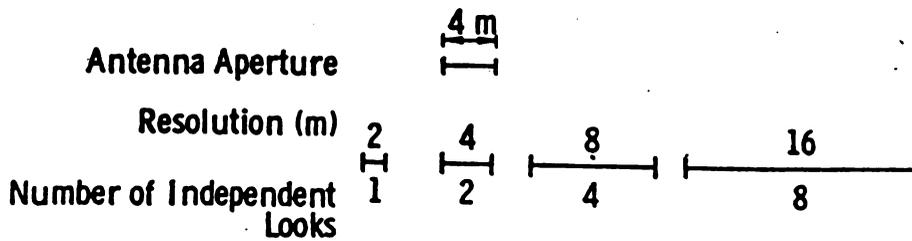


POLARISATION PARALLELE
OU VERTICALE

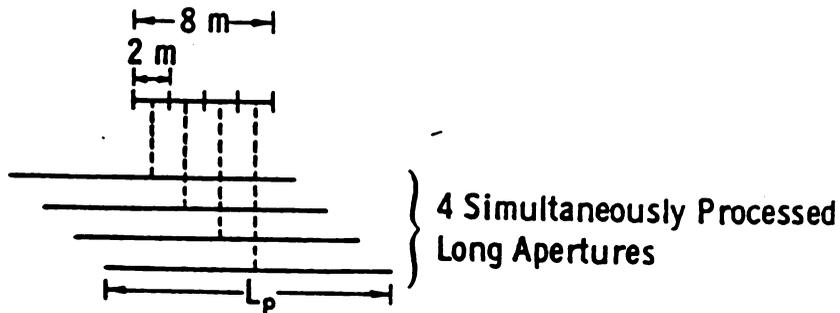
3.6 NUMERO DE VISTAS (LOOKS)

Imágenes multivista: Técnica para reducir el moteado. Se engruesa la resolución espacial para tomar, en cada pixel, varias muestras independientes.

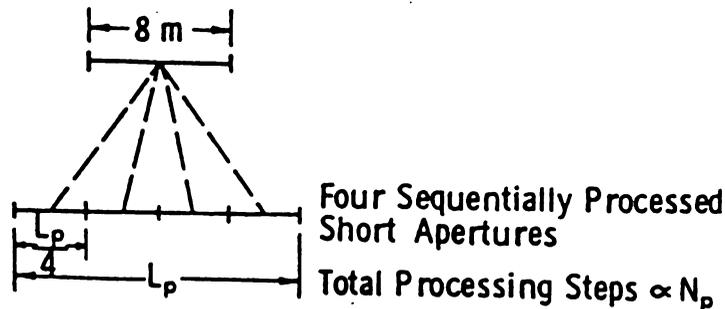
Se puede dividir el haz en sectores para tomar muestras secuenciales, o procesar las muestras simultáneamente. El número de muestras procesadas es el número de vistas.



(a) Example of 4-m Antenna Showing Potential Number of Independent Looks



(b) Obtaining 4 Samples by Processing to Finest Possible Resolution Pulses Used Per Aperture. N_p . Total Processing Steps Proportional to $4N_p$.



(c) Obtaining 4 Samples by Processing to Final Resolution—Pulses Used Per Aperture $N_p/4$

Fig. 10-45. Obtaining independent looks with SAR (Ulaby et al., 1982).

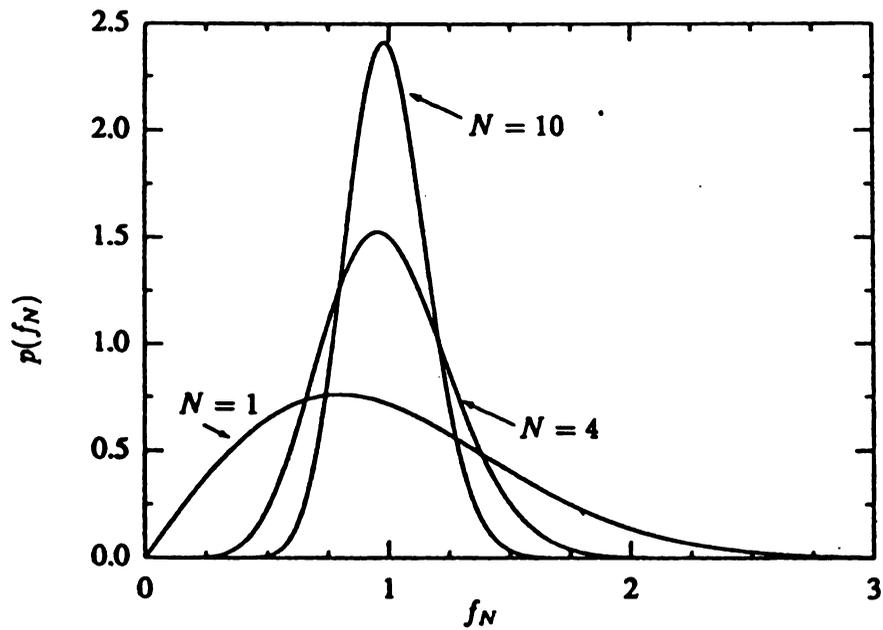
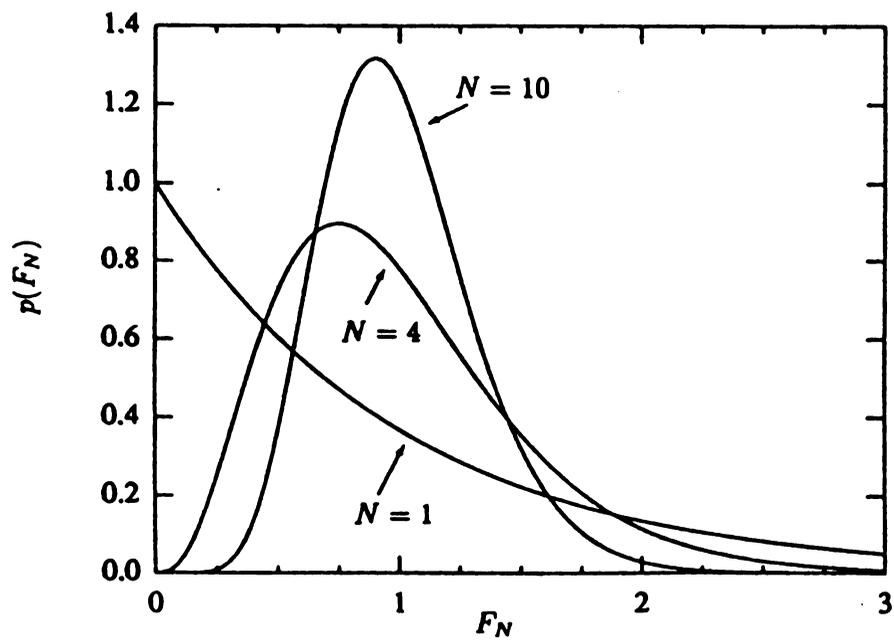
(a) PDF of f_N (b) PDF of F_N

Figure 3.7 Probability density functions for $N = 1, 4,$ and 10 for (a) f_N (linear deduction) and (b) F_N (square-law detection).

4 LOS SISTEMAS SATELITARIOS ACTUALES (RADARES DE IMAGEN)

Selected Parameters of All Civilian SAR Satellites

	Seasat USA	ALMAZ USSR	ERS-1 ESA	J-ERS-1 Japan	(SIR-C) ³ USA	ERS-2 ¹ ESA	RADARSAT Canada	EOS ² USA
Operation	1978	90-93	91-93	92-94	93,4,5	94-96	94-99	99(?)-
Radar Bands	L	S	C	L	C,L,X	C	C	C,L (X)
Polarimetry					yes			yes
swath width (km)	100	30-300	80	75	15-90	80	50-500	50-500
Resolution (m)	25	15-300	30	18	~30	30	10-100	10-100
Incidence angle (°)	22	40-60	23	39	15-55	23	20-59	15-55
Max. N. Latitude (°)	72	73	80	80	53	80	90	
W/b recorder		yes		yes	(yes)		yes	(yes)

¹For purposes of this discussion, ERS-2 parameters are assumed similar to those of ERS-1.

²Current NASA planning has deleted the SAR as a facility instrument on EOS, and is seeking approval for a separate but related SAR satellite. System parameters of the proposed SAR are not established, but are likely to be rather close to those listed above.

³Shuttle radar flights (SIR) each last about one week, as did SIR-A (1981) and SIR-B (1984).

FAO/ESA Microwave Workshop INPE, Brazil 19-23/11/90

Fuente: Raney et al. 1990

Esta tabla es un poquito vieja pero da una idea!

4.1 ERS-1

Lanzado el 17 de julio de 1991 en un órbita heliosincronizada aproximadamente circular a una altitud de 780 km. Tiene una anchura de "swath" de aproximadamente 100 km en proyección terrestre.

Usa la banda C y la polarización VV.

La misión ERS-1 está dividida en varias fases distinguidas por alteraciones en las características orbitales, lo que influencia el período del ciclo de repetitividad (el número de días separando dos repeticiones de la misma cobertura terrestre)

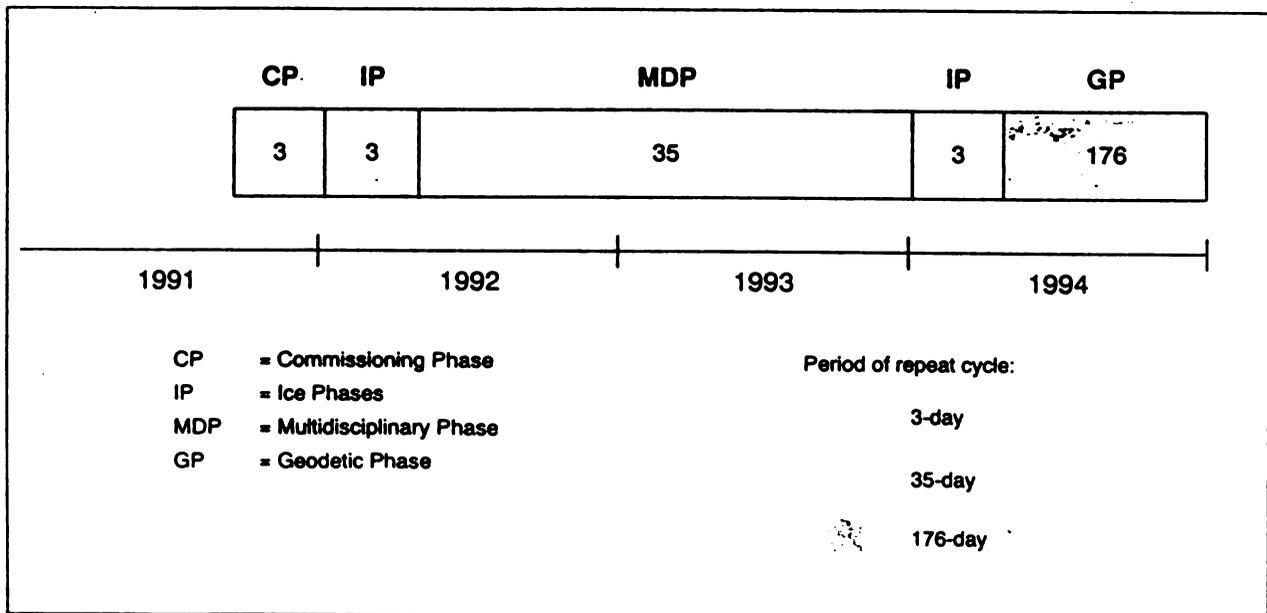


Fig. 1: ERS-1 data collection plan

Hay que tomar en cuenta que:

-Por su alto consumo de Energía, el instrumento SAR puede operar solamente durante 14 minutos en cada órbita de 100 minutos

-Las imágenes solo pueden ser adquiridas en zonas donde los datos pueden ser transmitidos en tiempo real a una estación de recepción.

Bolivia está en el área de recepción de dos estaciones de recepción, la de Cuiaba en Brazil y la de Cotopaxi en Ecuador. Ambas estaciones son manejadas por organizaciones nacionales.



4.2 Productos ERS-1

-Datos crudos anotados (RAW): Producidos por el sistema AMI de ERS-1 y disponible en las instalaciones de procesamiento y archivo (PAF) algunos días después de la adquisición

-Productos de delivramiento rápido: Generados y distribuidos por las estaciones de recepción a dentro de tres horas después de la adquisición.

-Productos "off line" (OL): Generados por las instalaciones de procesamiento y archivo. Productos vendidos por ESA o por instituciones nacionales, a diferentes niveles de precisión.

Table 2: ERS-1 AMI SAR products

name	looks	ground area (km)	pixel spacing (m)		data type	size			absolute calibration	product	geometry
			range	azimuth		range	azimuth	volume (Mb)			
RAW		100x100	7.9	- 3.9	complex 16x16 bit	5616	26800	190	no	OL	SR
UI16		100x100	15.8	20	magnitude 16 bit	5000	6300	63	no	FD	GR
SLC	1	50x50	7.9	-3.9	complex 16x16 bit	2500	15000	-150.2	no	OL	SR
PRI	3	100x100	12.5	12.5	magnitude 16 bit	8000	8200	131.3	yes	OL	GR
GEC	3	-99 x 140 x	12.5	12.5	magnitude	9100 12000	9100 12000	-165.62 288	yes	OL	Map.
GTC	3	-99 x 140 x	12.5	12.5	magnitude	9100 12000	9100 12000	-165.62 288	yes	OL	Map.

RAW: ERS-1 Raw Data

PRI: Precision Image

UI16: Fast Delivery Image

SLC: Single Look Complex Image (in slant-range geometry)

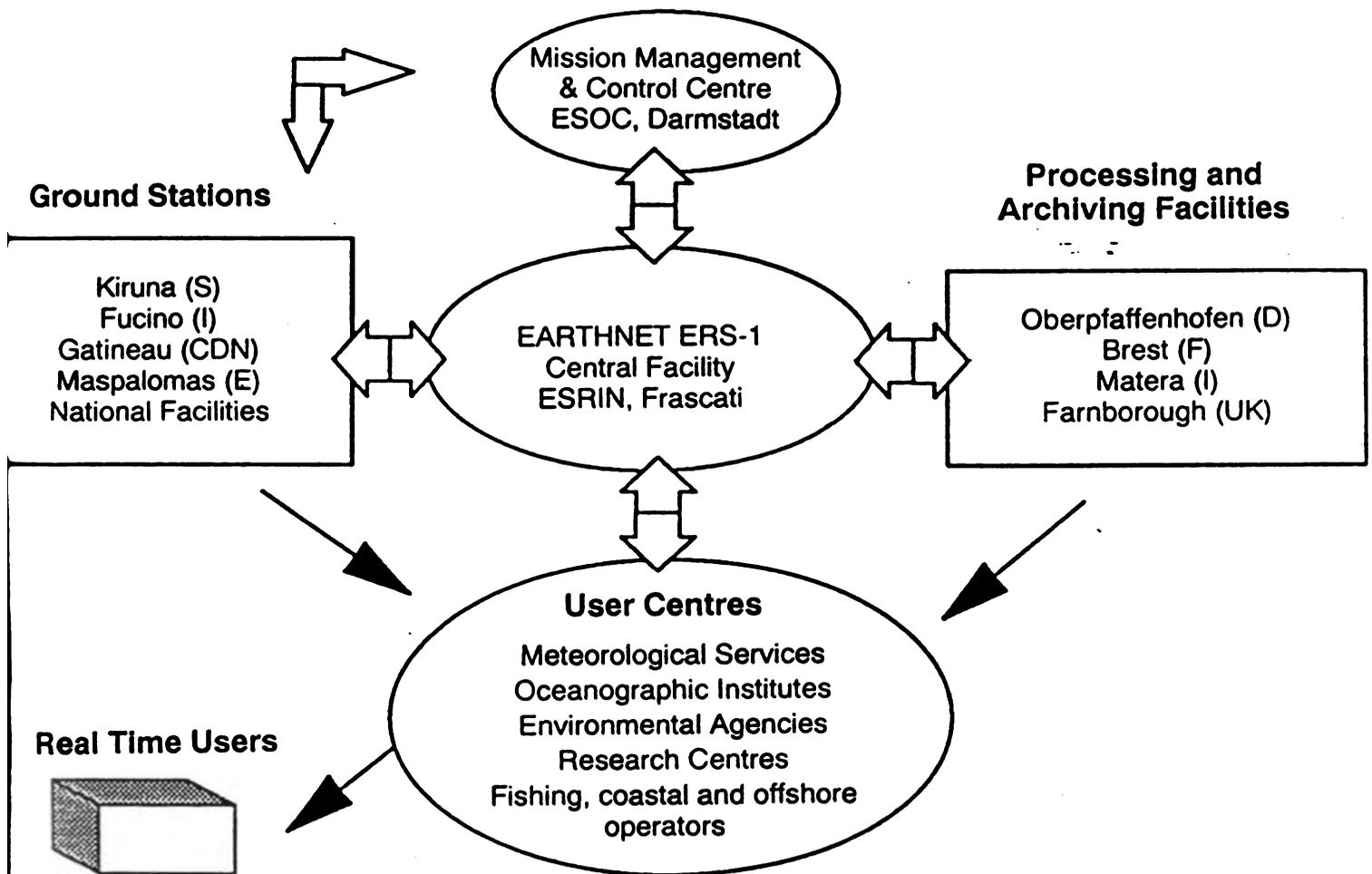
GEC: Geocoded Ellipsoid Corrected Image

GTC: Geocoded Terrain Corrected Image

SR: Slant range representation

OR: Ground range representation

Intervenientes en el uso de imágenes ERS-1. Fuente: TREES, 1992

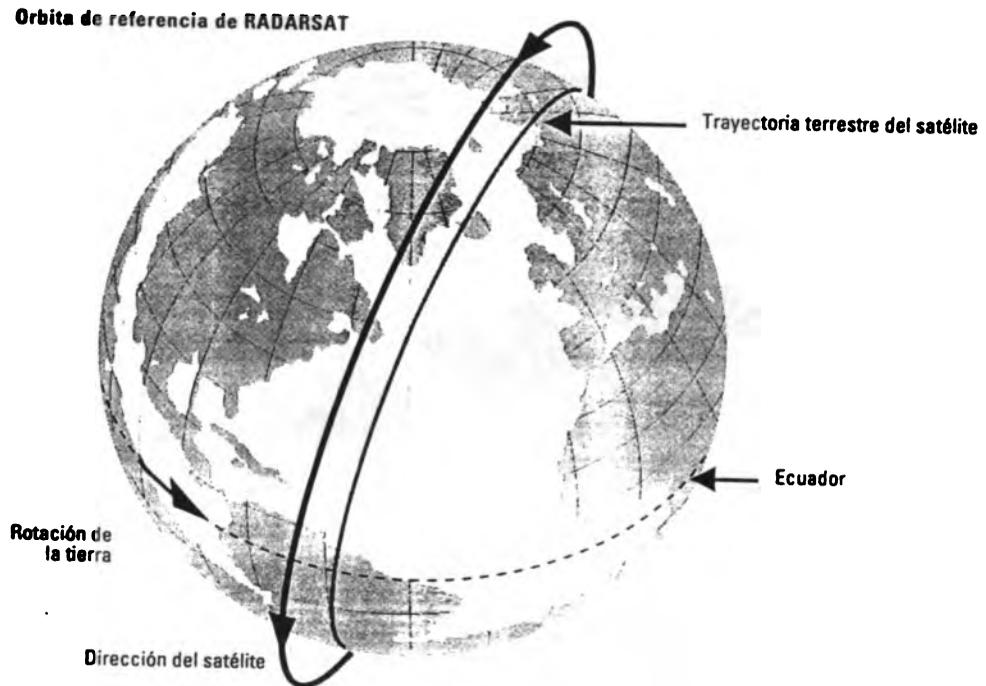


Ground Segment Configuration (Ref. to ESA)

4.3 RADARSAT

Producto "orientado al cliente": Se podrá pedir imágenes en adelanto con especificaciones.

Características especiales:



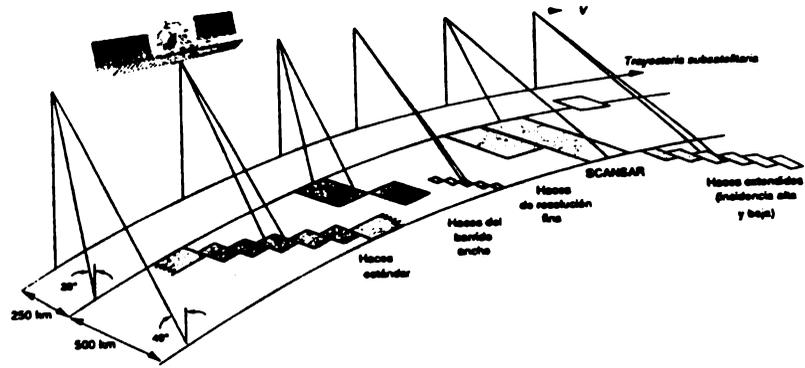
Características de la órbita de RADARSAT

Geometría	Circular, sincrónica al sol (amanecer-atardecer)
Altitud	798 km
Inclinación	98,6°
Período	100,7 minutos
Ciclo de repetición	24 días

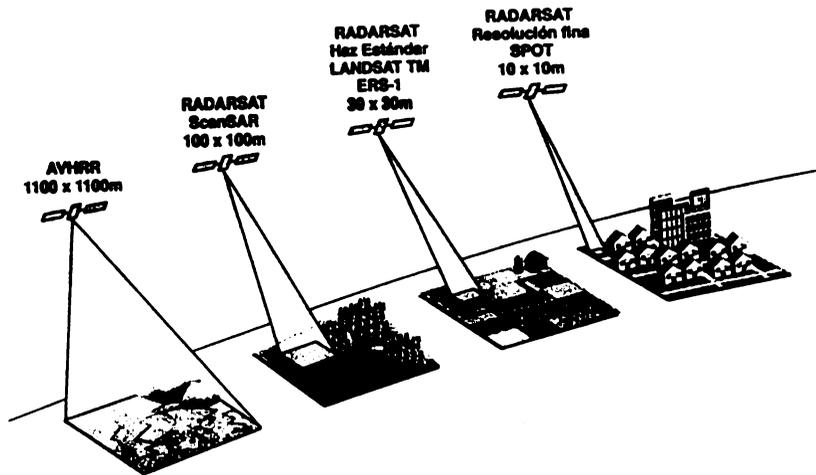
Características del SAR de RADARSAT

Frecuencia	Banda-C (5,3 Ghz)
Longitud de onda	5,6 cm
Polarización	HH
Aspecto	SAR con visión a la derecha
Tiempo operativo del SAR	28 minutos por órbita

Modos de Operación del SAR



Resoluciones Seleccionables



Modos de Producir Imágenes del RADARSAT

Modo del haz	Ancho del barrido (km)	Resolución alcance x azimut (m)	Angulos de incidencia grados (°)	Visadas (Looks)
Haces estándar 7 posiciones > 10% traslape	100	25 x 28	20 - 50	4
Haces de barrido ancho 3 posiciones 3% de traslape	150	25 x 28	20 - 40	4
Haces de resolución fina 5 posiciones 10% de traslape	50	11 x 9	37 - 48	1
ScanSAR angosto	300	50 x 50	20 - 40	2
ScanSAR ancho	500	100 x 100	20 - 50	2
Haces de alta incidencia 6 positions 3% overlap	75	25 x 28	50 - 60	4
Haces de baja incidencia	75	25 x 38	10 - 20	4

Ventajas de Radarsat con respecto a ERS-1 y ERS-2:

-Posibilidad de escoger ángulos de incidencia elevados, disminuyendo las distorsiones geométricas debidas a la topografía en regiones montañosas (las miradas opuestas tomadas en trayectorias ascendente y descentente se pueden complementar para las áreas de sombra)

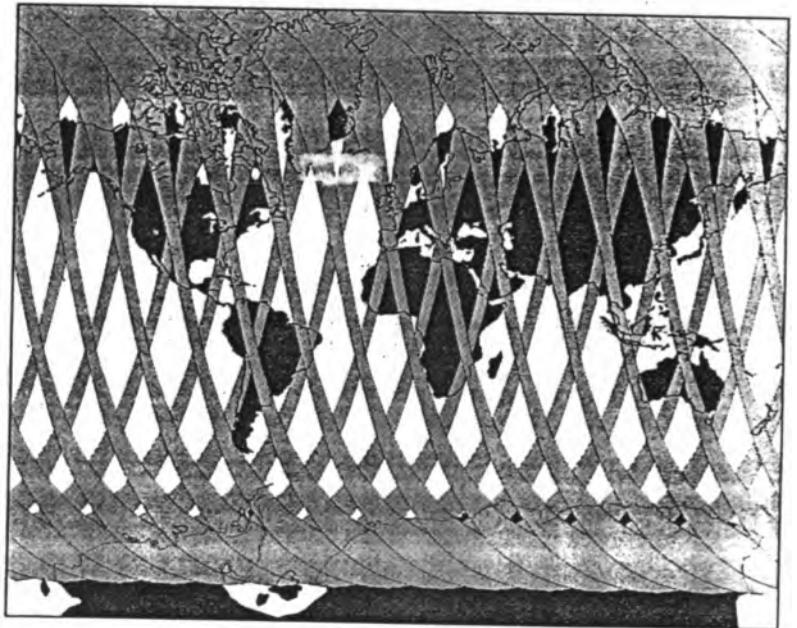
-Posibilidad de escoger ángulos de incidencia y resoluciones adaptados a la aplicación buscada.

-Mejores posibilidades de obtener imágenes relacionadas a un evento específico (una inundación, por ejemplo) por la variedad de ángulos de mirada posibles, un menor período de repetitividad y un mayor tiempo posible de registro por cada órbita.

Porcentaje de Accesibilidad para RADARSAT (excluyendo la opción de haces extendidos)

Latitud grados (°)	Porcentaje de cobertura (%)	
	1 día	3 días
0 - 30	35 - 40	80 - 85
30 - 48	40	85 - 90
49 - 79	50 - 80	100
80 - 90	100	100

Cobertura Global de RADARSAT on un día (barrido de 500 km)



Todas las coberturas por cortesía de la Oficina del Proyecto RADARSAT/
Agencia Espacial Canadiense.

S-APLICACIONES DE LAS IMAGENES DE RADAR

Geología: La geometría de vista radar acentua los rasgos topográficos aunque muy pequeños, que reflejan la estructura geológica. Por ejemplo, en el desierto del oeste de Egipto, SIR-B ha puesto en evidencia la configuración de la roca madre debajo de la arena, revelando un patrón de drenaje dendrítico complejo. La banda L tiene una gran profundidad de penetración en la arena seca. Las imágenes de radar pueden ayudar a distinguir formaciones geológicas que exhiben distintas rugosidades de superficie.

Velocidad del viento: hay una relación entre el coeficiente de retrodifusión σ° y la velocidad del viento, en mar abierta. La relación proviene del hecho que la rugosidad de la superficie depende de la altura de las olas, la cual depende de la velocidad del viento.

Oceanografía: Sensibilidad a la olas capilares pequeñas causadas por "vendabales", y a las grandes olas de gravedad causadas por la acción sostenida del viento. Patrones de onda resultante de ondas internas. Detección de la presencia de islas, fondos altos, tormentas.

Estudio de las capas de hielo: La delimitación de hielos flotantes es la única aplicación realmente operacional de manera rutinaria. Se puede también lograr una clasificación de los tipos de hielo en el artida y la antartida para ayudar a la navegación. Monitoreo de hielos para riesgos a la plataformas petroleras.

Geomorfología: Identificación de planicies de inundación, terrazas aluviales, formas de terreno post glaciales, abánicos fluviales, red hidrográfica, etc... Por las mismas razones que facilitan la interpretación geológica, las imágenes de radar ponen en evidencia varias formas de terreno y paisajes.

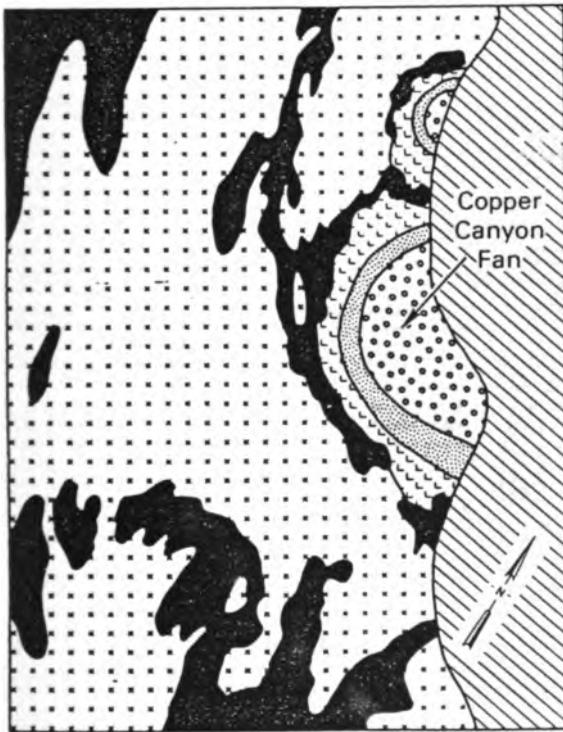
Estudio de zonas costeras: Los manglares aparecen muy brillantes en las imágenes de radar en razón de las reflexiones múltiples que se producen entre los troncos de los árboles y el agua, que actuan como reflectores de esquina. Este fenómeno facilita la distinción entre manglares y bosques no inundados. Las imágenes de radar multitemporales pueden ser usadas para detectar zonas de erosión y de acumulación costeras. Estudio de patrones de olas cerca de las costa, geomorfología costera.



A. X-BAND AIRCRAFT IMAGE.



B. L-BAND SEASAT IMAGE.



C. INTERPRETATION MAP.

MATERIAL	SYMBOL	RADAR SIGNATURES	
		X-BAND	L-BAND
Bedrock and Shadows		Bright and Dark	Bright and Dark
Rough Halite		Very Bright	Very Bright
Coarse Gravel		Bright	Intermediate
Carbonate and Sulfate		Bright	Intermediate
Sand and Fine Gravel		Intermediate	Dark
Flood Plain Deposits		Dark	Dark

D. MAP EXPLANATION.

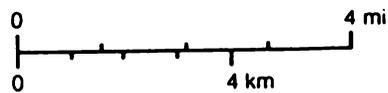


FIGURE 6.32 X-band and L-band images of the Copper Canyon alluvial fan and vicinity, Death Valley. From Sabins (1984, Figures 9 and 10).

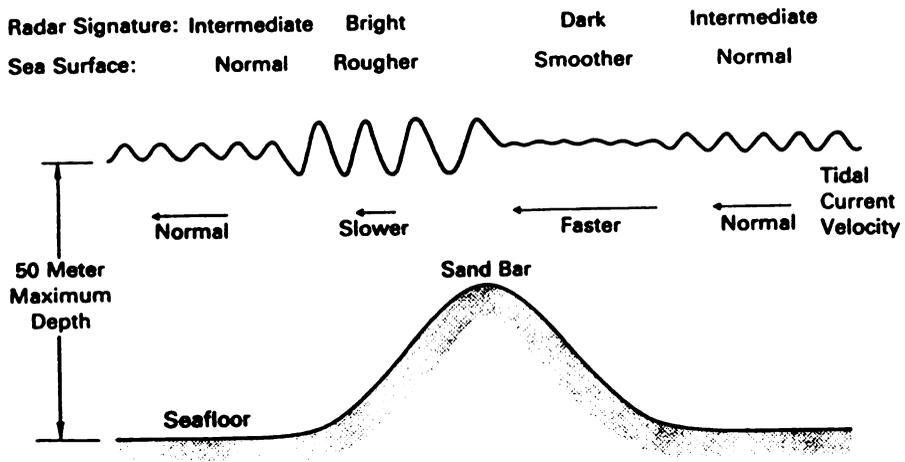


FIGURE 9.15 Cross-section model showing relationship of sandbar, tidal current, sea-surface roughness, and radar signatures. Modified from Kasischke and others (1983, Figure 4).

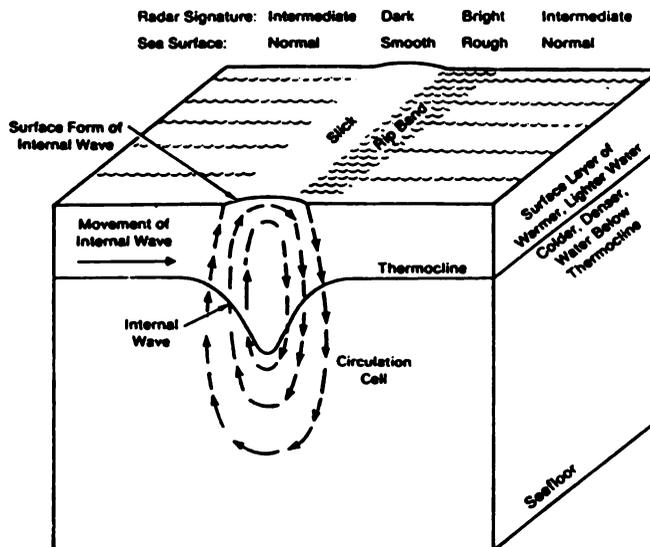


FIGURE 9.18 Model of an internal wave showing the relationships among circulation pattern, surface expression, and radar signatures. Modified from Osborne and Burch (1980, Figure 3).

Forestería: En zonas relativamente planas o de relieve moderado, delimitación de áreas de corte. Según la textura, con imágenes de alta resolución (<20m) se puede distinguir varios tipos de bosque. Los ángulos de incidencia elevados enfatizan la textura en imágenes de los bosques.

Agricultura y uso de la tierra: Delimitación de campos, en algunos casos clasificación del tipo de cultivo y del estado de madurez. En las zonas templadas donde hay períodos específicos de siembra, la adquisición de imágenes de varias fechas ayuda mucho en la clasificación de los cultivos.

Delimitación de zonas inundadas: En ausencia de viento, las zonas inundadas aparecen muy oscuras. La vegetación inundada tiene generalmente una firma muy brillante.

Hidrología: Humedad del suelo, extensiones de zonas nevadas, condiciones de la nieve y su equivalente en agua. Se necesita más investigación en estos campos. Delimitación sin equivocación de las fronteras tierra/agua en zonas de relieve moderado o plano.

Elaboración y/o actualización de mapas topográficos: El SAR aerotransportado fue usado para desarrollar mapas topográficos en varias zonas con nubosidad persistente donde no habría sido posible adquirir fotos aéreas. Con GPS en el avión y en el trabajo de campo, la actualización de estos mapas es tarea más fácil, pero la geocodificación es necesaria para sobreponer nuevos datos SAR con bases topográficas más antiguas antes de delimitar rasgos nuevos. Hubo progresos recientes en interferometría, usando imágenes de la misma área a partir de localidades casi iguales pero ligeramente diferentes. Esta técnica tiene el potencial de ayudar en la producción de MNA con buena precisión.

6 TRABAJO DE CAMPO RELACIONADO CON LA ADQUISICION DE IMAGENES DE RADAR

6.1 FOTOGRAFIAS Y VIDEO

Las fotografías tomadas en el campo constituyen la fuente de datos más útil

En zonas montañosas, se puede tomar **fotografías panorámicas** a partir de puntos altos

Se puede alquilar los servicios de un piloto de avioneta y de su nave para tomar **fotografías aéreas oblicuas** de la misma época de la adquisición de las imágenes de radar.

En todas estas actividades, el uso de una cámara de **video** puede permitirles cubrir más territorio sin gastar demasiado en película fotográfica y revelado.

Sin embargo, la toma de fotografías y diapositivas es necesaria para comunicar sus resultados en publicaciones y conferencias, y no debe ser sustituida completamente por el video.

6.2 MEDICIONES Y OBSERVACIONES DE CAMPO

Verificación general del uso de la tierra: Para puntos que son visibles en las imágenes o con la ayuda de un receptor de Sistema de Posicionamiento Global (GPS), se identifica el uso de la tierra para una serie de localidades precisas.

Se anota la extensión aproximada que tiene el uso en cuestión.

Se toma nota de los diferentes usos, características o rasgos que se pueden ver a partir de este punto, con sus orientaciones relativas, con la ayuda de una brújula.

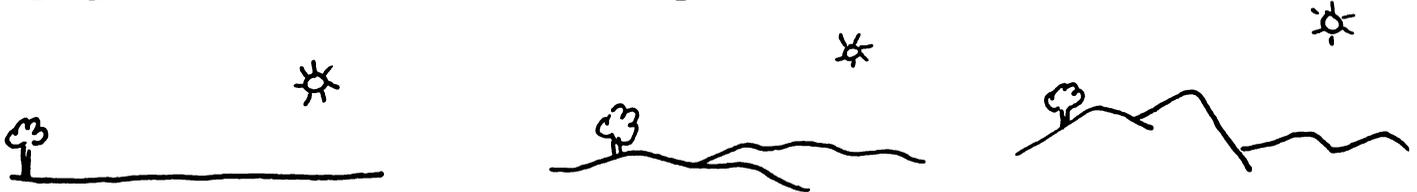
Establecimiento de sitios o parcelas de control: Para un estudio más detallado, se pueden establecer sitios o parcelas de control, sobre las cuales las mediciones y observaciones serán concentradas.

Para minimizar el transporte y facilitar la logística, sugerimos un patrón de muestra "agrupado", constituido de grupos de sitios o parcelas, dispuestos aleatoriamente dentro de la zona de estudio o según un criterio en particular.

Debe de seleccionar los sitios o parcelas de control de tal manera que cubran la gama de coberturas, topografía, orientación, humedad, geología, etc... que es de interés para el estudio en particular.

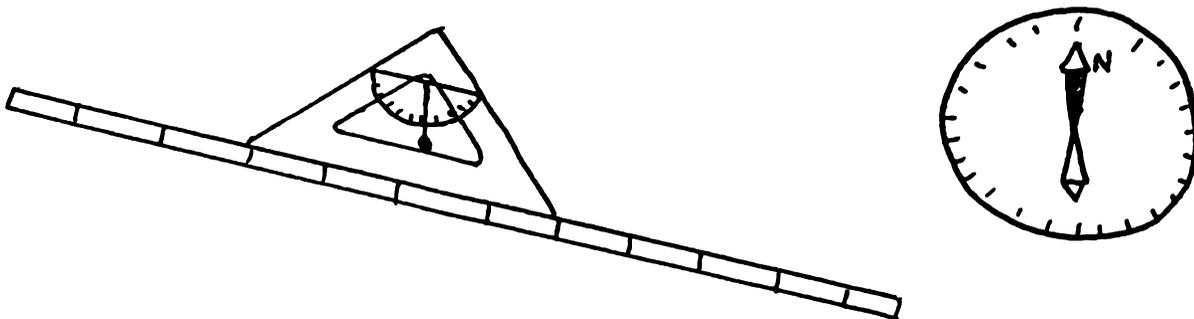
-6.2.1 Mediciones que se pueden realizar algun tiempo antes o después de la adquisición

Topografía: Plana, ondulada, escarpada, etc...



Observaciones geomorfológicas: Sitio ubicado en una planicie de inundación, en un valle, en una colada de lava, i.e. todo lo que el observador sabe o puede observar en el campo y que puede ayudar en la interpretación de las imágenes.

Pendiente y orientación del terreno: Influye la radiometría. Necesario conocerlas si las imágenes no serán corregidas por los efectos de la topografía



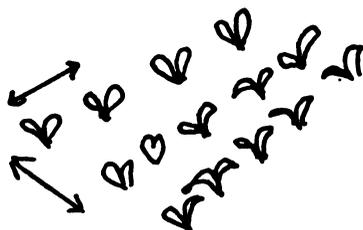
Macrorugosidad: Terreno encharcado, presencia de piedras grandes, etc...



Mesorugosidad: Se puede evaluar calitativamente (liso, intermedio, muy rugoso, extremadamente rugoso) según criterios desarrollados por usted, según la longitud de onda estudiada. Se puede medir precisamente con aparatos (por ejemplo con un rugosímetro de pajillas, Beaulieu, Leclerc y Moisan 1994)

Capacidad de drenaje: En la eventualidad de lluvia antes de la adquisición de las imágenes, esta característica puede ayudar en la evaluación del ritmo con el cual un suelo se secó.

Mediciones orientadas a la agricultura: Orientación de las hileras de cultivos, espaciamiento entre las hileras, altura de los cúmulos, presencia de residuos agrícolas, prácticas culturales, etc...



Los estudios de glaciología, de forestería, de geología y en otros campos de estudio tendran sus medidas y observaciones particulares.

-6.2.2 Mediciones que deben realizarse simultáneamente a la adquisición

Estas mediciones se pueden realizar sobre un número más limitado de parcelas o sitios de control que las mediciones descritas precedentemente, según la mano de obra disponible.

Humedad del suelo, observación calitativa: seco, seco en superficie pero húmedo a una cierta profundidad, húmedo mojado, saturado, parcialmente inundado.

Contenido en humedad del suelo, medición cuantitativa: la humedad volumétrica siendo la que influye en la retrodispersión, se deben tomar muestras de volúmen conocido, y guardarlas en bolsas plásticas tipo "ziploc" pre-pesadas. Se pesa el suelo húmedo en la bolsa, se determina el contenido en humedad gravimétrica de la muestra, y se determina la humedad volumétrica en función de la masa volumétrica calculada para el suelo húmedo. Se debe anotar la hora en que cada muestra se ha tomado. Se sugiere un período de medición de 3 horas en total.

Presencia de **condensación** sobre las hojas de la vegetación.

Observaciones **meteorológicas**: Lluvia intensa o moderada, llovisna, neblina, nublado, parcialmente despejado, pleno sol

Particular a la **agricultura**: Altura de la vegetación, estado de crecimiento, porcentaje de recubrimiento del suelo, contenido en humedad de las hojas (en estudios sobre estrés hídrico, únicamente).