

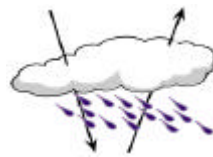
Imágenes Radar de Satélite.

Aplicación a la Cartografía y la Topografía.

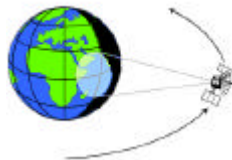
Miguel Ángel Manso Callejo

Ventajas de las imágenes Radar

- Sensor activo.
 - Capacidad de atravesar nubes y lluvia

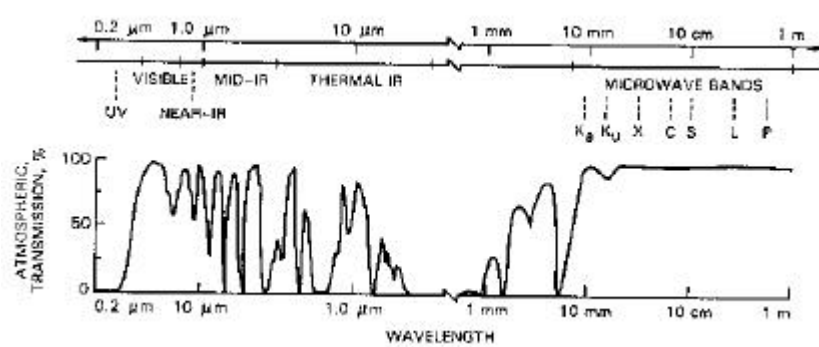


- Capacidad de registrar en la oscuridad



Miguel Ángel Manso Callejo

Capacidad de transmisión de la atmósfera



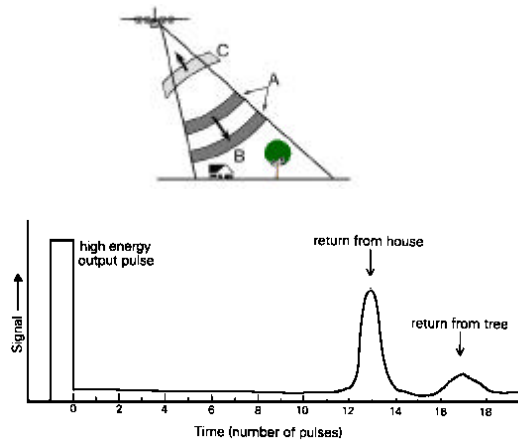
Miguel Ángel Manso Callejo

Principio de funcionamiento del Radar

- Emisión de un pequeño pulso de energía electromagnética.
- Capacidad de detectar el eco atenuado reflejado con precisión direccional.
- Capacidad para medir el tiempo entre la emisión y la recepción.
- Capacidad para registrar con haz direccional y examinar un gran área.

Miguel Ángel Manso Callejo

Principio de funcionamiento



Miguel Ángel Manso Callejo

Principios de funcionamiento RADAR

- Fuente de energía coherente
 - Fuente monocromática puntual.
- Imagen como mapa de potencias.
 - Imagen registrada como mapa de potencias y no de tensiones.
- Buen comportamiento de transformación.
 - Conocer la respuesta impulsiva y la coherencia parcial del sistema.
- Conservación de la energía.
 - Para poder establecer criterios de calibración.
- Conservación de la confusión.
 - Se debe de mantener la incertidumbre.
- Conservación de coordenadas.
 - Independencia de las coordenadas frente a las rotaciones angulares del sensor tanto en rango como en azimuth.

Miguel Ángel Manso Callejo

Ecuación de potencia del radar

$$P_R = P_T (\sigma^0 A) \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}$$

P_R = Potencia Recibida

P_T = Potencia transmitida.

σ^0 = Coeficiente de dispersión.

G = ganancia de la antena

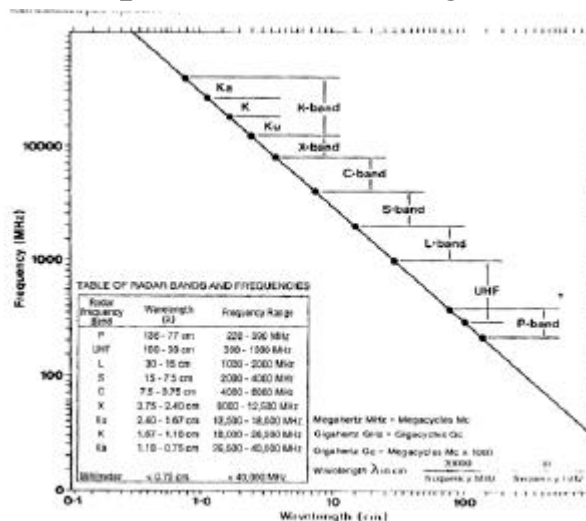
λ = Longitud de onda del pulso.

R = Altura del satélite.

A = Resolución de la celda de imagen.

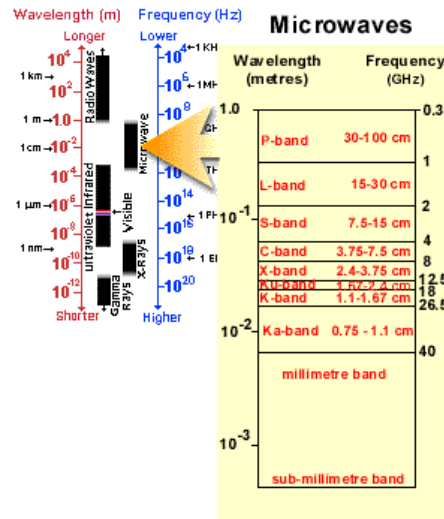
Miguel Ángel Manso Callejo

Espectro electromagnético



Miguel Ángel Manso Callejo

Zona del espectro de trabajo en radar



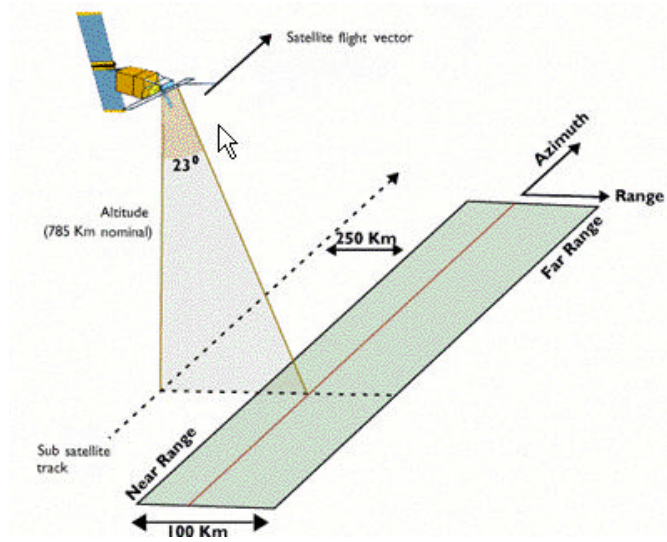
Miguel Ángel Manso Callejo

Bandas Microondas Radar

Ka, K, and Ku Bands	very short wavelengths used in early airborne radar systems but uncommon today
X-band	used extensively on airborne systems for military reconnaissance and terrain mapping.
C-band	common on many airborne research systems (CCRS Convair-580 and NASA AirSAR) and spaceborne systems (including ERS-1 and 2 and RADARSAT).
S-band	used on board the Russian ALMAZ satellite.
L-band	used onboard American SEASAT and Japanese JERS-1 satellites and NASA airborne system.
P-band	longest radar wavelengths, used on NASA experimental airborne research system

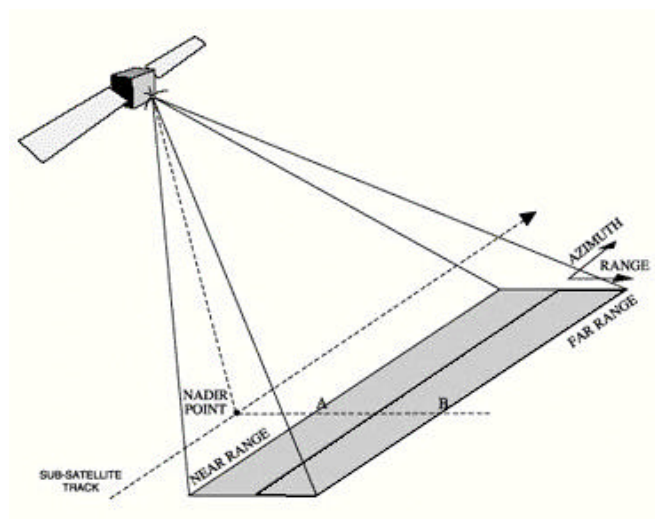
Miguel Ángel Manso Callejo

Geometría SAR ERS



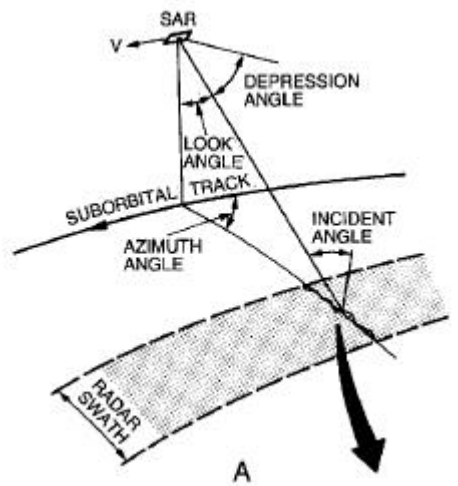
Miguel Ángel Manso Callejo

Geometría RAR



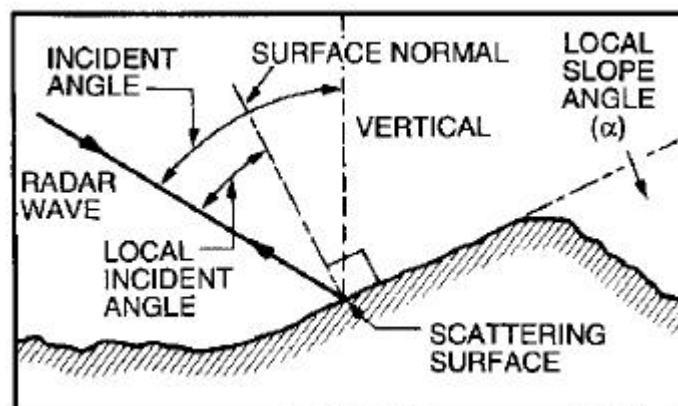
Miguel Ángel Manso Callejo

Ángulo de incidencia



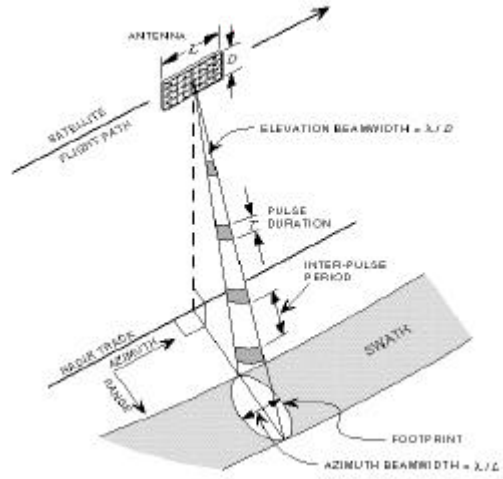
Miguel Ángel Manso Callejo

Ángulo de incidencia local



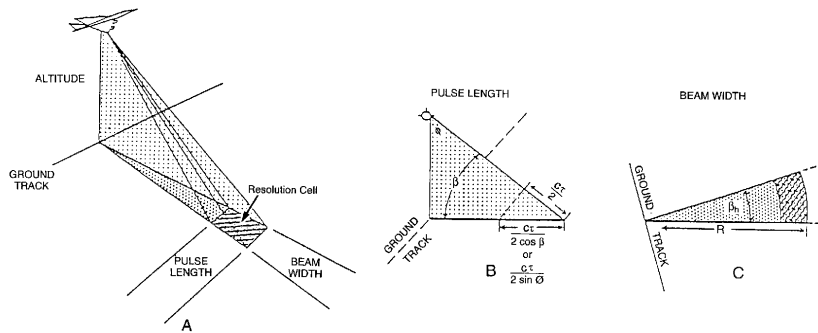
Miguel Ángel Manso Callejo

Configuración de registro



Miguel Ángel Manso Callejo

Resolución



Miguel Ángel Manso Callejo

Resoluciones RAR

- Se entiende por RAR al Sistema Radar Real.
- Resolución en Range:
 - $\delta R_g = c / (2 \sin \eta B_R)$
 - c = Velocidad de la luz
 - η = Inclinación lateral de la antena
 - B_R = Ancho banda frecuencia
- Resolución en Azimut:
 - $\delta x = R \lambda / L_a$
 - R = Altura del instrumento
 - λ = Longitud de onda
 - L_a = Longitud de la antena en la dirección del azimut

Miguel Ángel Manso Callejo

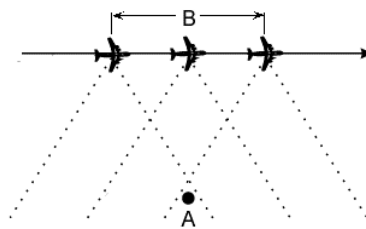
Resoluciones SAR

- SAR : Sistema Radar de Apertura Sintética
- Resolución en Azimut:
 - $\delta x = L_a / 2$
 - L_a = Longitud de la antena en la dirección del azimut
- Resolución en Range:
 - $\delta R_g = c / (2 \sin \eta B_R)$
 - c = Velocidad de la luz
 - η = Inclinación lateral de la antena
 - B_R = Ancho banda frecuencia

Miguel Ángel Manso Callejo

SLAR vs SAR

- Analizando la resolución en Azimut se puede interpretar:
 - SLAR cuanto más larga la antena mejor resolución.
 - SAR cuanto mas corta la antena mejor.
- Principio físico:
 - Efecto doppler



Miguel Ángel Manso Callejo

Parámetros que afectan a la dispersión.

- Los distintos tipos de superficies generan distintos tipos de dispersiones:
 - Áreas urbanas: dispersión muy fuerte.
 - Bosques: dispersión intermedia.
 - Agua calmada: baja dispersión.
- El coeficiente de dispersión proporciona información de la superficie y depende de:
 - Parámetros de observación (frecuencia, polarizaciones, ángulo de incidencia).
 - Parámetros de superficie (rugosidad, geometría, permeabilidad dieléctrica).

Miguel Ángel Manso Callejo

Efectos sobre la dispersión

- Frecuencia determina:
 - Profundidad de penetración.
 - Rugosidad relativa de la superficie considerada.
- Profundidad de penetración:
 - Depende de la humedad del objetivo.
 - Las Microondas no penetran mas allá de unos milímetros en el agua.
- Polarización.
 - La polarización depende de las orientaciones de los campos eléctrico y magnético
 - Permite determinar distintas capas del objetivo en función de la polarización utilizada.

Miguel Ángel Manso Callejo

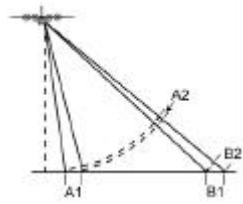
Efectos sobre la dispersión

- Rugosidad:
 - Se trata de un concepto relativo comparado con la longitud de onda.
- Angulo de incidencia:
 - La dispersión depende de la posición del objeto frente al nadir. Cuanto más próximo más sensible.
- Humedad:
 - La permeabilidad y conductividad dieléctrica dependen de la humedad. Los cambios son fuertes. La profundidad de penetración también depende de la humedad.

Miguel Ángel Manso Callejo

Distorsión de la imagen Radar

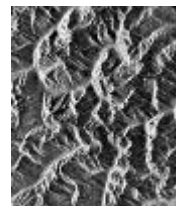
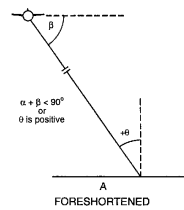
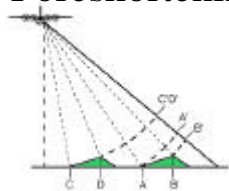
- Distorsión de escala



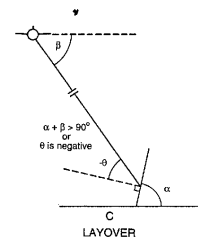
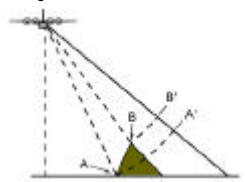
Miguel Ángel Manso Callejo

Desplazamientos del relieve

- Foreshortening

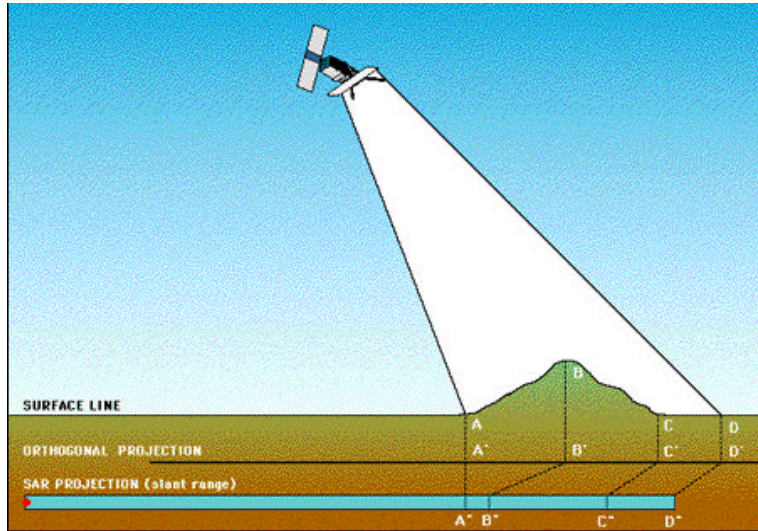


- Layover



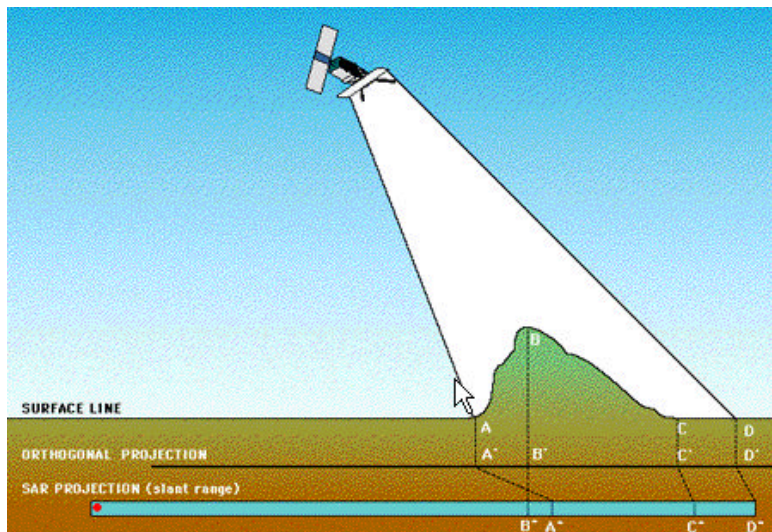
Miguel Ángel Manso Callejo

Foreshortening



Miguel Ángel Manso Callejo

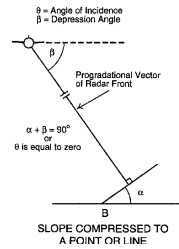
Layover



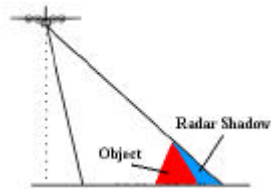
Miguel Ángel Manso Callejo

Efectos del relieve

- Compresión por pendientes

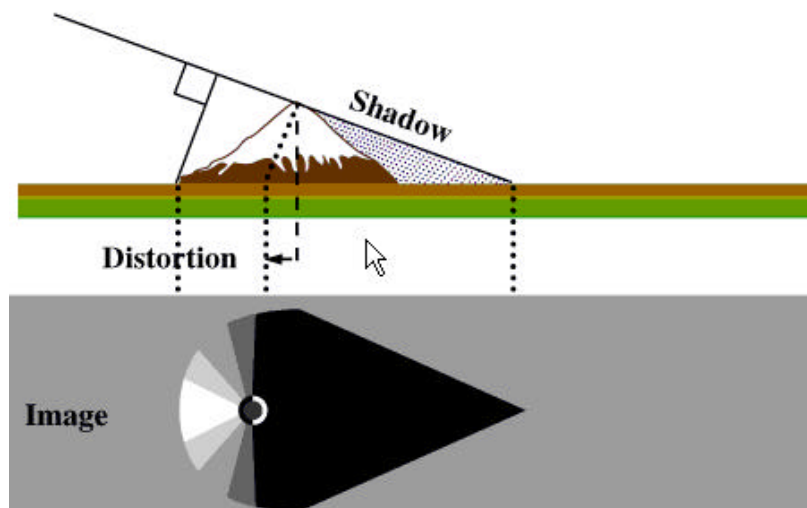


- Sombras



Miguel Ángel Manso Callejo

Shadows



Miguel Ángel Manso Callejo

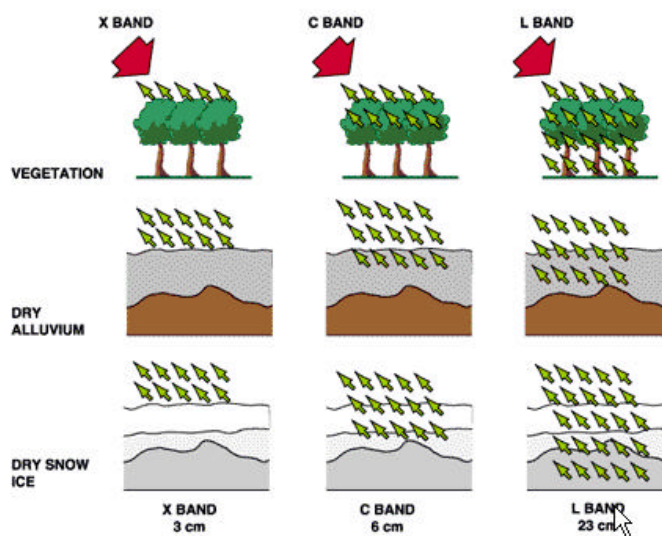
Bandas utilizadas por satélites con radar

TABLE 3-3 Selected Spacecraft Imaging Radar Systems, Operating Bands and Nominal Wavelength

Radar Band	Nominal Wavelength(cm)	Spacecraft System (Actual Wavelength in cm)
X	3	SIR-C/X-SAR (3.0)
C	5	SIR-C/X-SAR (5.3)
C	5	ERS-1 (5.3)
S	10	ALMAZ-1 (9.5)
L	25	SIR-C/X-SAR (24.0)
L	25	JERS-1 (23.0)
L	25	SIR-A and B (23.5)
L	25	SEASAT-SAR (23.5)

Miguel Ángel Manso Callejo

Capacidad de penetración Bandas Radar



Miguel Ángel Manso Callejo

Capacidad de penetración en el hielo.

$$d = (\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}) / (2\pi\epsilon'')$$

Banda	X	C	C	L
Frecuencia	10.3GHz	5.3GHz	5.2GHz	1.25GHz
ϵ' (Parte Real de ϵ)		2.95	1.87	3.23
ϵ'' (Parte Imaginaria de ϵ)	0.00021	0.571	0.0001	0.170
Profundidad penetración	8.1m	0.027m	21.7m	0.404m

Miguel Ángel Manso Callejo

Capacidad de penetración en sólidos

$$\delta_p = \frac{\ln(J) \lambda}{2\pi} \left\{ \frac{\mu\epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right] \right\}^{-1/2}$$

	wet sand	dry sand	paleosoils
1.5 GHz	3.3	6.0	0.5
1.0 GHz	4.9	9.0	0.8
500 MHz	9.8	17.9	1.6
300 MHz	16.4	29.9	2.6

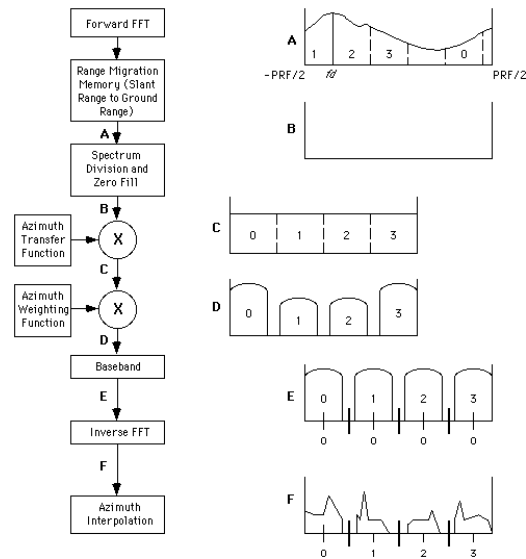
Miguel Ángel Manso Callejo

Aplicaciones del SAR

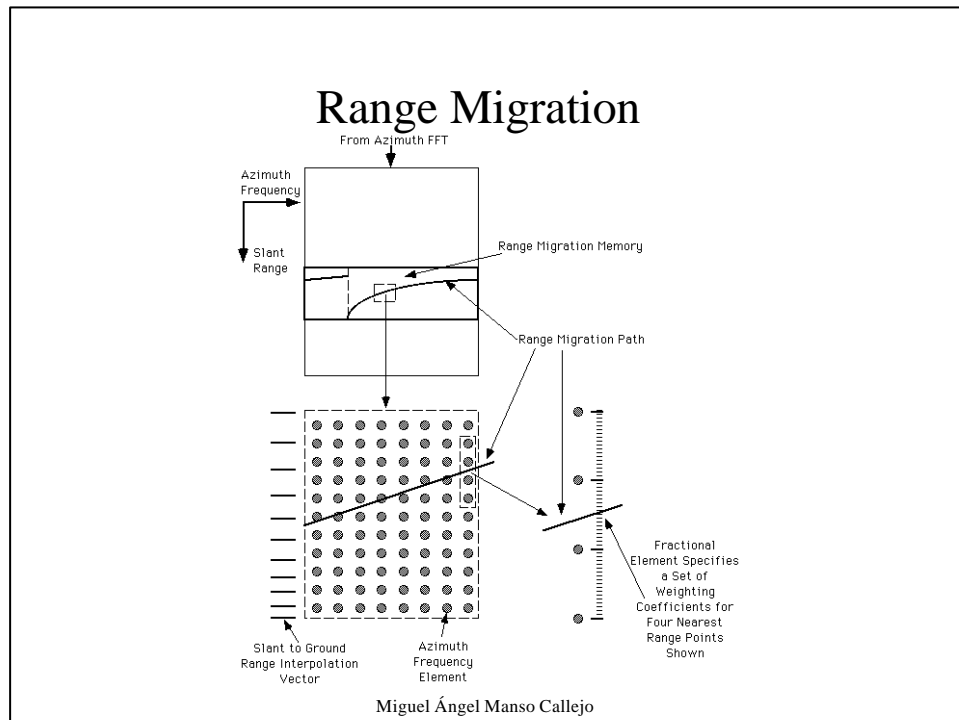
- Obtención del espectro de las olas de agua en el océano.
- Clasificación de tipos de hielos.
- Seguimiento de desplazamientos del hielo.
- Modelos digitales del terreno por “*interferometría*”
- Detección automática de vertidos de fuel.
- Altimetros radar.
- Radargrametría.
- Geodesia: Determinación del geode

Miguel Ángel Manso Callejo

Procesado en azimuth



Miguel Ángel Manso Callejo



Preproceso de imágenes SAR

- **Ruido Speckle.**
 - Se trata de ruido producido por la suma vectorial (módulo + fase) de los distintos ecos producidos por las reflexiones en la superficie ie. Dicha suma aleatoria se produce de una forma indeseada y genera pixel's claros y oscuros como ruido speckle.
 - Se recomienda eliminar dicho ruido antes de cualquier procesamiento de la imagen.
- **Métodos de eliminación:**
 - Filtros estándar: Media, Mediana, Kuan (mínimos cuadrados), Lee (también), Gamma (Maximización a posteriori), Frost (adaptativo de Wiener), Kalman (adaptativo basado en predicción), Geométricos (no lineales), Oddy (considerado de mediana) y AFS (filtro adaptativo de superficies)
 - Filtros Wavelet (ejemplo Daubechies simétrico)

Miguel Ángel Manso Callejo

Filtrado de Media (Speckle)

- Se trata de sustituir el valor de cada píxel por la media de los píxeles encerrados en la ventana del filtro.
- No elimina la aberración del ruido sino que lo suaviza.
- Tamaño de la ventana:
 - Teóricamente grande : compensar claros con oscuros.
 - Práctica: No muy grande por producir pérdida de detalles.

Miguel Ángel Manso Callejo

Filtrado de Mediana (Speckle)

- Consiste en ordenar numéricamente los valores de los píxeles encerrados en la ventana del filtro y tomar el valor que se encuentra en la mitad del rango para sustituir el punto en la imagen.
- Es útil para reducir ruido impulsivo o puntual.
- El ruido con amplitudes menores a la mitad de la ventana son eliminados.
- Mantiene las rampas.

Miguel Ángel Manso Callejo

Filtrado regiones locales (Speckle)

- Se generan en la ventana del filtro 8 ventanas de menor orden colocadas según orientaciones. Se calcula la varianza de cada ventana. Se sustituye el valor del p-píxel por la media de la ventana que menor varianza ha generado.
- Se supone que la ventana con menor varianza tiene los píxeles menos afectados por la onda que genera la interferencia.
- La imagen así generada está formada por una serie de áreas uniformes, cuyo tamaño depende del tamaño de la ventana que se usa. En la práctica se suele utilizar secuencialmente 2 o 3 veces incrementando el tamaño de la ventana. El resultado así conseguido se utiliza para realizar clasificación.

Miguel Ángel Manso Callejo

Filtrado Lee (Speckle)

- Se supone que el ruido puede ser modelado matemáticamente con media 1 y desviación estándar s ó coeficiente de variación. $S = 0.52$
- Se basa en que la media y varianza del píxel de interés es igual a la media y varianza de la ventana del filtro.
- El cálculo es el siguiente:
 - Valor final = [Media] + K [Valor inicial - Media]
 - $K = \frac{\text{Var}(x)}{[\text{Media}^2 \sigma^2 + \text{Var}(x)]}$
 - $\text{Var}(x) = \frac{\text{Varianza ventana} + \text{Media ventana}^2}{\sigma^2 + 1} - \text{Media ventana}^2$

Miguel Ángel Manso Callejo

Filtrado Sigma (Speckle)

- Se basa en que el ruido sigue una distribución Gausiana y asume que el 95.5% de las muestras aleatorias están dentro de 2 veces la desviación estándar del rango
- Se reemplaza el píxel de interés con la media de los píxeles de la ventana, Los píxeles de interés serán aquellos que caen dentro del rango designado.
- Se suele seguir un proceso repetitivo y la forma de aplicarlo es la siguiente:

Pass	Valor σ	Multiplicador σ	Window
1	0.26	0.5	3x3
2	0.26	1	5x5
3	0.26	2	7x7

Miguel Ángel Manso Callejo

Filtrado de congelado (Speckle)

- Se asume que el ruido es multiplicativo con estadísticos estacionarios.
- Se basa en un algoritmo que minimiza el error cuadrático medio que se adapta a las características de la imagen.
- Valor = $\sum_{n \times n} k \alpha e^{-\alpha |t|}$
 k = cte de normalización. I = media local, σ = varianza local.
 $\underline{\sigma}$ = coeficiente de variación de la imagen
 $|t| = |x - x_0| + |y - y_0|$
 $\alpha = (4/n \underline{\sigma}^2) (\sigma^2 / I^2)$
 n = tamaño de la ventana

Miguel Ángel Manso Callejo

Gamma-MAP (Speckle)

- Se trata de un filtro de maximización a posteriori, que estime el valor del pixel asumiendo que existe pérdida entre la media local y el valor con el ruido.
- Se maximiza a posteriori la función de densidad de probabilidad respecto a la imagen original.
- Se aplica ya que por ejemplo las áreas con vegetación natural producen ruido speckle con distribución Gamma.

- Algoritmo:

$$\underline{I}^3 - I \underline{I}^2 + \sigma (\underline{I} - \text{Valor}) = 0$$

\underline{I} = valor sugerido.

I = media local

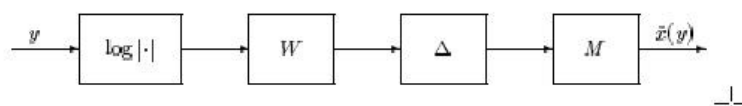
σ = Varianza original de la imagen

Miguel Ángel Manso Callejo

Reducción de Speckle con Wavelet

$$\varphi(x) = 2 \sum_k a_k \varphi(2x - k) \quad \psi(x) = 2 \sum_k b_k \varphi(2x - k)$$

$$a_k = a_{2J+1-k}; \quad b_k = (-1)^k a_{2J+1-k} \quad J = 0, 2, 4, 6, \dots \quad k = 0, \dots, 2J + 1$$



Miguel Ángel Manso Callejo

Ejemplos usando filtros Wavelet



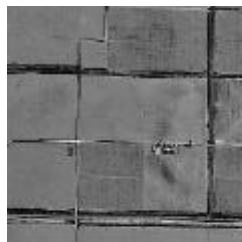
Imagen con ruido Speckle

Filtrada Otros

Filtrada Wavelet

Miguel Ángel Manso Callejo

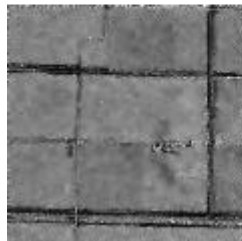
Otros Ejemplos Speckle Wavelet



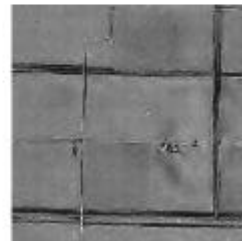
Sin ruido



Con ruido



Otro Filtro



Filtrada Wavelet

Miguel Ángel Manso Callejo

Comparativas simuladas de filtros

	$L = 2.7$			$L = 9.4$			$L = 50$		
	S/MSE (dB)	ENL	Notes	S/MSE (dB)	ENL	Notes	S/MSE (dB)	ENL	Notes
Noisy	4.4			9.8			17.0		
Lee	9.0	144	5×5	12.8	97	3×3	18.5	446	3×3
Kuan	9.4	144	5×5	13.0	97	3×3	18.5	448	3×3
Gamma	9.6	140	5×5	13.1	96	3×3	18.6	448	3×3
Frost	10.2	127	$7 \times 7; K_{1.9}$	13.4	84	$3 \times 3; K_{2.9}$	18.7	386	$3 \times 3; K_{7.9}$
Kalman	-	-		11.7	39		-	-	
Geometric	7.9	144	3 iter.	11.6	93	2 iter.	17.5	206	1 iter.
Oddly	10.0	47	$5 \times 5; \sigma_{0.7}$	12.9	110	$3 \times 3; \sigma_{0.5}$	16.6	367	$3 \times 3; \sigma_{0.2}$
AFS	8.3	37		9.4	86		10.7	433	
Wavelet	10.9	151	$N_6; \delta_{1.4}$	13.6	172	$N_6; \delta_{0.8}$	18.6	340	$N_6; \delta_{0.3}$

Table 2: Quantitative enhancement measures performed on the urban test image (Figure 6)

Miguel Ángel Manso Callejo

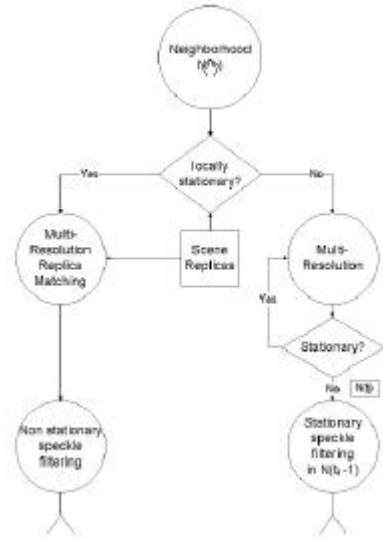
Comparativas resultados Filtros Speckle

	$L = 2.7$			$L = 9.4$			$L = 50$		
	S/MSE (dB)	ENL	Notes	S/MSE (dB)	ENL	Notes	S/MSE (dB)	ENL	Notes
Noisy	4.3			9.7			17.0		
Lee	13.6	68	7×7	17.3	129	7×7	21.9	310	7×7
Kuan	14.0	74	7×7	17.4	140	7×7	21.9	319	7×7
Gamma	14.1	80	7×7	17.5	146	7×7	22.0	373	7×7
Frost	14.6	156	$7 \times 7; K_{1.9}$	17.4	155	$7 \times 7; K_{2.9}$	22.1	313	$7 \times 7; K_{7.9}$
Kalman	-	-		15.8	63		-	-	
Geometric	13.8	471	4 iter.	16.1	555	3 iter.	20.8	218	1 iter.
Oddly	14.3	89	$7 \times 7; \sigma_{0.9}$	16.9	146	$7 \times 7; \sigma_{0.5}$	20.6	370	$3 \times 3; \sigma_{0.2}$
AFS	12.2	29		14.8	90		17.2	270	
Wavelet	16.3	241	$N_6; \delta_{2.0}$	18.6	345	$N_6; \delta_{1.3}$	22.1	427	$N_6; \delta_{0.8}$

Table 3: Quantitative enhancement measures performed on the agricultural test image (Figure 7)

Miguel Ángel Manso Callejo

Protocolo propuesto para eliminar Speckle



Miguel Ángel Manso Callejo

Protocolo propuesto para eliminar Speckle

- 1º Cálculo de los estadísticos para la reducción de áreas localmente estacionarias.
- 2º Detección de vecinos que no son localmente estacionarios.
- 3º Replicar para comparar áreas no localmente estacionarios.
- 4º Filtrado de Speckle de las áreas no localmente estacionarias.
- 5º Algoritmo multiresolución para encajar el tamaño y forma del vecino a la señal estacionaria.

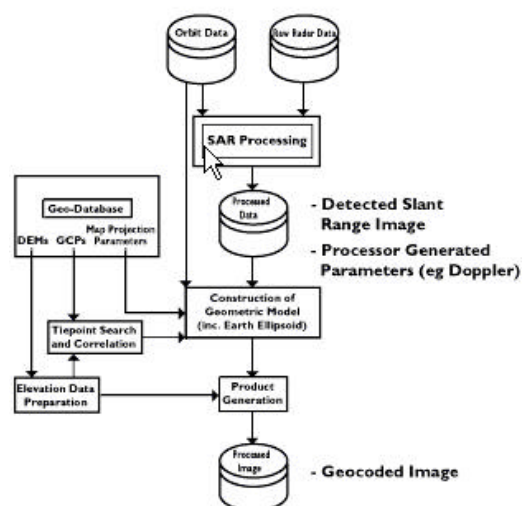
Miguel Ángel Manso Callejo

Detección de bordes (Realce)

- Se trata de detectar bordes, líneas o puntos. Estos pueden detectar rampas, escalones, dobles rampas y sierras.
- Los algoritmos de detección de bordes o esquinas se basan en la 1ª y 2ª derivada.
- 1ª derivada Filtros Prewitt
- 2ª derivada Filtros Laplacianos.

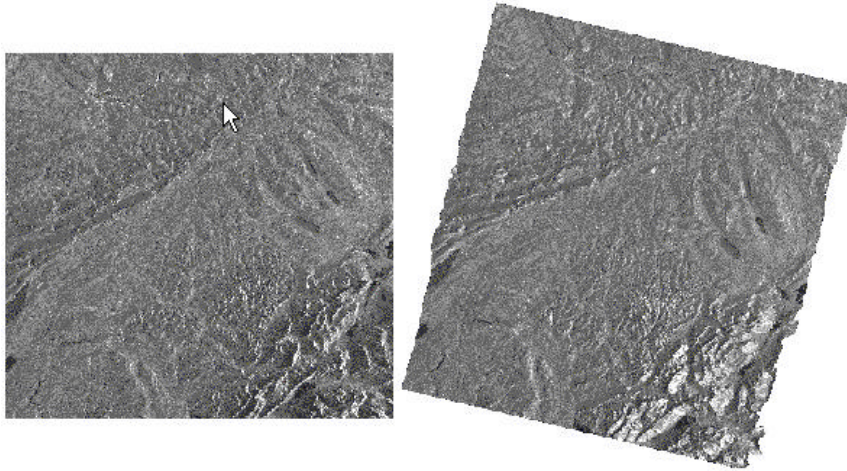
Miguel Ángel Manso Callejo

Procesamiento SAR



Miguel Ángel Manso Callejo

Imagen geocodificada



Miguel Ángel Manso Callejo

Interpretación de imágenes radar

- Existen una gran diferencia entre la imagen del visible y la imagen radar en cuanto a la interpretación. Las características mas relevantes están relacionadas con la radiometría: Speckle, texturas y geometría.
- Las sombras en radar son consecuencia del ángulo de incidencia y no de la geometría de la iluminación solar.
- Los niveles de gris están relacionados con propiedad de dispersión de la superficie
- La dispersión es proporcional a: la rugosidad, las propiedades dieléctricas y las pendientes locales

Miguel Ángel Manso Callejo

Interpretación de imágenes radar

- **Parámetros utilizados :**
 - Tono, texturas, formas, estructuras y tamaños.
- **Fases de la fotointerpretación:**
 - Lectura : reconocimiento.
 - Análisis: reconocer las capacidades
 - Interpretación deductiva: usa la experiencia y su conocimiento temático de los datos.

Miguel Ángel Manso Callejo

Tono, Formas, estructura y tamaño

- **Tono:**
 - Valor medio de la intensidad de la dispersión. Mayor intensidad de dispersión tonos más claros.
- **Formas:**
 - Contornos de los objetos (carreteras, puentes, aeropuertos).
- **Estructuras:**
 - Agrupaciones espaciales con configuraciones recursivas.
- **Tamaño:**
 - Usado como parámetro cuantitativo para evaluar la escala y dimensión de los objetos en el terreno.

Miguel Ángel Manso Callejo

Texturas

- Definición:
 - Se define elemento de textura como el mas pequeño elemento homogéneo en cuanto a radiometría.
- Se pueden diferenciar tres tipos de texturas:
 - Micro-texturas: Similar al ruido Speckle.
 - Meso-texturas: o textura de escena. Se trata de la variación natural media de la dispersión en un conjunto de píxeles.
 - Macro-texturas: variaciones en brillo que afectan a muchos píxeles: carreteras, alineamientos geológicos, sobras forestales, etc..

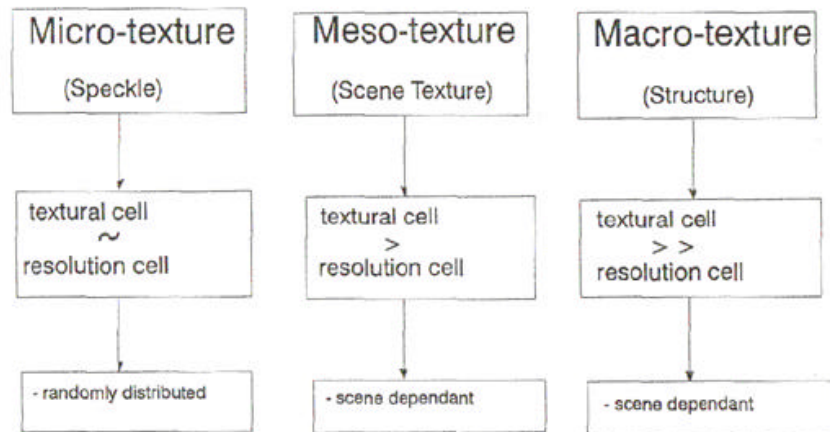
Miguel Ángel Manso Callejo

Texturas.

- El análisis de texturas se utiliza en zonas sin pendientes ni esquinas con el objetivo de segmentar la imagen e interpretarla.
- Se utiliza en la zona del visible aunque tiene mayor interés en radar para la clasificación.
- Algoritmos de análisis de texturas:
 - 1 Orden Media
 - 2º Orden Varianza
 - 3 Orden Skewness
 - 4º Orden Kurtosis

Miguel Ángel Manso Callejo

Análisis de texturas Radar image texture



Miguel Ángel Manso Callejo

Consideraciones sobre texturas

- El ruido Speckle se superpone con carácter multiplicativo creando problemas en el análisis de texturas o detección de bordes.
- El tono es un concepto local. La variación local del tono es la que proporciona la textura.
- Textura depende de la distribución espacial de los píxeles y por tanto de la escena no del sistema.
- La textura y la estructura está limitada por la resolución espacial.
- El filtrado y el análisis de texturas se deben de realizar sobre la imagen original (Slant range). La imagen ground range está radiométricamente distorsionada.

Miguel Ángel Manso Callejo

Corrección radiométrica

- Se pueden producir errores en radiometría por:
 - Imperfecciones en las antenas de Tx y Rx
 - Ruido Speckle
 - Señales fuertes de ámbito cercano.
- Solución:
 - Promediar el brillo de cada línea con una constante, el valor de la constante suele ser el brillo medio de toda la imagen

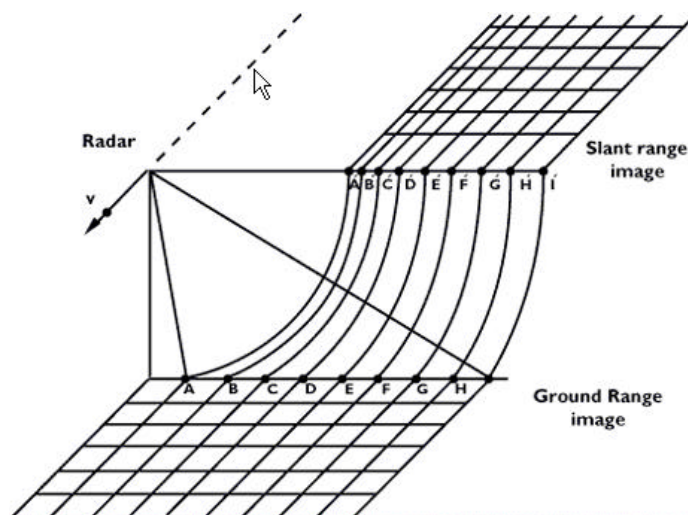
a_i = valor medio de cada fila.

Valor medio total = $(\sum a_i) / x$

Coefficiente de calibración c_i = valor medio total / a_i

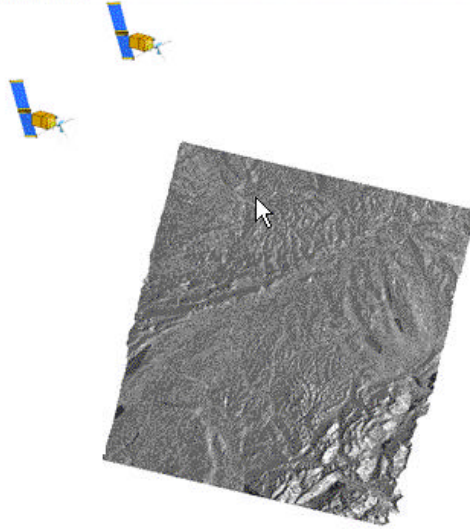
Miguel Ángel Manso Callejo

Slant to Ground Range Conversion



Miguel Ángel Manso Callejo

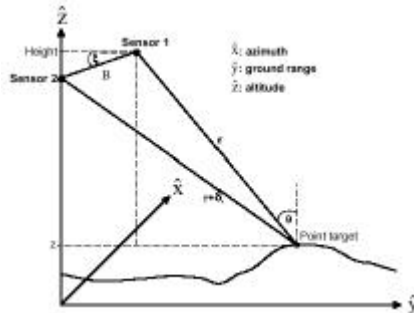
Interferometría SAR



Miguel Ángel Manso Callejo

Interferometría SAR

- Objetivo:
 - Obtención de la altura del suelo a partir de dos imágenes SAR obtenidas desde puntos próximos.
- Geometría del modelo



Miguel Ángel Manso Callejo

Ecuaciones del modelo

$$z = \text{Height} - r \cdot [\sqrt{1 - a^2} \cdot \cos(\xi) - a \cdot \sin(\xi)]$$

$$a = \frac{\left(r + \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \delta_\phi\right)^2 - r^2 - B^2}{2 \cdot B \cdot r}$$

Se ha aplicado:

Teorema del coseno: $c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\theta)$

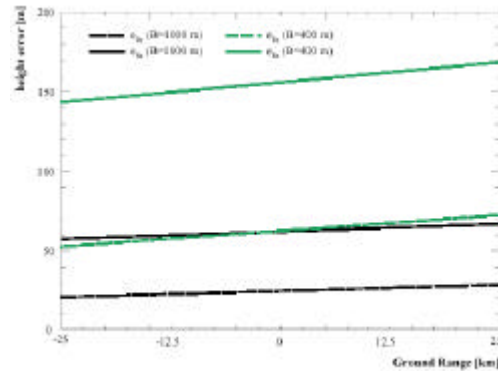
Coseno de la suma.

Y propiedad : $\text{seno}^2(\theta) + \text{coseno}^2(\theta) = 1$

Miguel Ángel Manso Callejo

Dependencias encontradas

- Las dependencias de la altura son:
 - B = Longitud de la línea base.
 - ξ = Orientación de la línea base.
- Precisión de la z será función del conocimiento de la línea base.



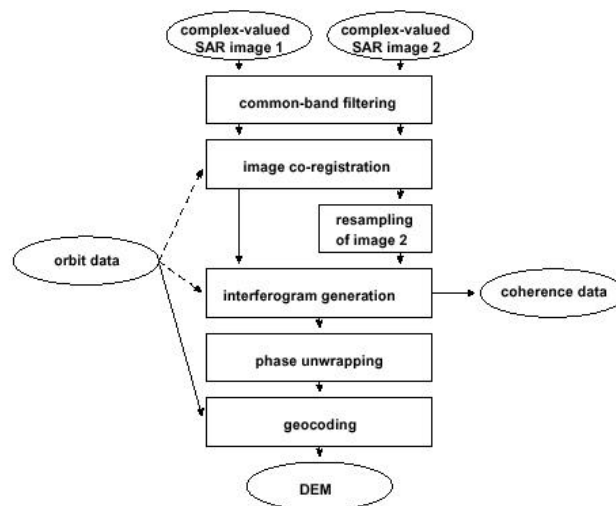
Miguel Ángel Manso Callejo

Estimación de la línea base

- Se basan en datos precisos de las órbitas.
- En la existencia de un modelo digital de elevación.
- Reflectores en las esquinas.
- Se aprovecha la tierra plana en la escena.
- Modelo propuesto por ZESS:
 - No se necesitan reflectores en las esquinas.
 - No se impone la restricción de tierra plana en la escena.
 - Independencia de los datos de la órbita.
 - Se pueden estimar las variaciones de la línea base con el tiempo.
 - Independencia de la precisión de las cotas de los puntos de control.
- Técnica utilizada (Basada en filtros de Kalman)
 - Requiere un conocimiento muy pobre de la altura del terreno.
 - Proporciona en muy poco tiempo una estimación de la línea base. Se recomienda usar una estimación coarsa en cualquier caso.

Miguel Ángel Manso Callejo

Flujo de procesamiento para InSAR



Miguel Ángel Manso Callejo

Imagen Co-Registration

- **Objetivo:**
 - Disponer de dos imágenes (par) correladas (casadas) de la misma superficie.
- **Mecanismos:**
 - Correlación en el dominio original (módulo).
 - Correlación en el dominio de Fourier (fft).
- **Fases:**
 - Búsqueda de desplazamiento.
 - Remuestreo de una de ellas.

Miguel Ángel Manso Callejo

Generación del interferograma

- Se define como la diferencia de fases entre las dos imágenes.
- Las expresiones que rigen el proceso son:

$$\Phi = \arctan \left[\frac{\text{Im}(u_1(\cdot)u_2^*(\cdot))}{\text{Re}(u_1(\cdot)u_2^*(\cdot))} \right] = \varphi + 2\pi \cdot w, \quad w \in \mathbb{Z}_s$$

$$u_{\text{int}}(\cdot) = u_1 \cdot u_2^* = |u_1(\cdot)|e^{i\Phi_1} \cdot |u_2(\cdot)|e^{-i\Phi_2} = |u_1(\cdot)||u_2(\cdot)|e^{i(\Phi_1 - \Phi_2)}$$

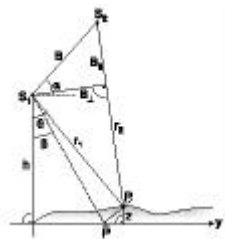
$$\varphi := W\{\Phi\} = \text{mod}(\Phi, 2\pi) - \pi \in [-\pi, \pi)$$

Interferograma en módulo 2π

Miguel Ángel Manso Callejo

Fase Unwrapping

- La idea fundamental es la estimación del número de ciclos completos de longitud de onda para a partir de ella y el interferograma poder determinar la elevación del terreno.
- Se trata de un proceso complejo, y existen varios algoritmos con estimaciones que pretenden obtener la máxima precisión y bondad del método.
- Fundamentos matemáticos:



$$\Phi(z) = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(B_{\parallel} + \frac{B_{\perp}}{r \cdot \sin \theta} \cdot z + \Delta r \right)$$

$$\Delta r$$

$$B_{\perp} = B \cos(\bar{\theta} - \alpha)$$

$$B_{\parallel} = B \sin(\bar{\theta} - \alpha)$$

Miguel Ángel Manso Callejo

Soluciones al fase unwrapping

- Problemas prácticos de la determinación de la fase desde el interferograma:
 - Se suele realizar una integración de las fases suponiendo que la diferencia de fases entre dos puntos adyacentes es inferior a π .
 - El problema que puede aparecer es que los caminos de integración no generen el mismo resultado.
 - Ejemplo:

0.2	0.0	0.8	0.0	0.2	0.0	-0.2	0.0	0.2	0.0	-0.2	0.0
0.4	0.2	0.2	0.4	0.4	0.2	0.2	0.4	0.4	0.2	0.2	0.4
0.6	0.8	0.8	0.6	0.6	-0.2	-0.2	0.6	0.6	0.8	0.8	0.6
0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	-0.2	-0.2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	Original				1ª fila -	columnas			1ª columna -	filas	

Miguel Ángel Manso Callejo

Algoritmos de unwrapping

- Recorte de residuos (Branch-cut) (tree) Goldstein
- Mínimos cuadrados.
- Mínimos cuadrados ponderados.
- Síntesis de los anteriores.
- Estimación de pendientes locales del suelo.
- Suavizados adaptados recursivos.
- Filtro de kalman.
- Minimización de diferencias ponderadas.

Miguel Ángel Manso Callejo

Recorte de residuos

- Se basa en la localización de circulaciones entre las fases de los píxeles vecinos para determinar si hay saltos de fase, y en su caso marcarlos generando árboles. Estos árboles según crecen pueden llegar a cerrarse y dejar aisladas zonas en las que sea imposible recuperar la fase.

$$\begin{array}{ccc} 0.4 & \curvearrowright & 0.2 \\ 0.6 & 0.8 & + \end{array}$$

Miguel Ángel Manso Callejo

Mínimos cuadrados

- Ghiglia and Romano aprovecharon teoría de Hunt.
 - Sea ϕ_{ij} la fase del interferograma
 - Sea $\hat{\phi}_{ij}$ la estimación de la fase que minimiza la diferencia entre el gradiente calculado entre la fase del interferograma y el presunto suavizado unwrapped.
$$s = P \phi + n$$
 - Sea s la medida de diferencia de fase entre filas y columnas de ϕ .
 - Sea P la matriz conteniendo (1, -1 y 0) que describen las operaciones de diferenciación entre filas y columnas.
 - Sea ϕ la fase.
 - Sea n el ruido
 - La solución mínimo cuadrática es $\hat{\phi} = (P^T P)^{-1} P^T s$

Miguel Ángel Manso Callejo

Mínimos cuadrados cont.

- Solución:

$$\sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} (\hat{\phi}_{i+1,j} - \hat{\phi}_{i,j} - \Delta_{i,j}^x)^2 + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} (\hat{\phi}_{i,j+1} - \hat{\phi}_{i,j} - \Delta_{i,j}^y)^2$$

$\Delta_{i,j}^x$ and $\Delta_{i,j}^y$ Diferencias en filas y columnas

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{i,j}^x &= \hat{\phi}_{i+1,j} - \hat{\phi}_{i,j} \\ \Delta_{i,j}^y &= \hat{\phi}_{i,j+1} - \hat{\phi}_{i,j} \end{aligned} \right| \quad -\pi \leq \Delta_{i,j}^x, \Delta_{i,j}^y \leq \pi$$

$$\left\{ \hat{\phi}_{i+1,j} - 2\hat{\phi}_{i,j} + \hat{\phi}_{i-1,j} \right\} + \left\{ \hat{\phi}_{i,j+1} - 2\hat{\phi}_{i,j} + \hat{\phi}_{i,j-1} \right\} = \left\{ \Delta_{i,j}^x - \Delta_{i-1,j}^x \right\} + \left\{ \Delta_{i,j}^y - \Delta_{i,j-1}^y \right\}$$

Se trata de la versión discreta de la ecuación de Poisson y puede ser calculada eficientemente por la transformada discreta del coseno

Miguel Ángel Manso Callejo

Mínimos cuadrados ponderados

- Se pondera la diferencia del gradiente.

$$\mathbf{W}s = \mathbf{W} \mathbf{P} \phi + \mathbf{n}$$

$$\phi = (\mathbf{P}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} s$$

- Método iterativo propuesto por Ghiglia y Romero con criterio de convergencia ϵ

$$\frac{\|\phi_{i,j}^{(k+1)} - \phi_{i,j}^{(k)}\|}{\|\phi_{i,j}^{(k+1)}\|} \leq \epsilon$$

Miguel Ángel Manso Callejo

Síntesis de los tres anteriores

- Se trata de aplicar de forma ordenada y óptima los tres anteriores algoritmos para obtener el interferograma en fase completa.
- Método:
 - Usar método de mínimos cuadrados.
 - Usar método de recorte de residuos.
 - Calcular la diferencia entre los anteriores.
 - Aplicar mínimos cuadrados ponderados.

Miguel Ángel Manso Callejo

Estimación de las pendientes del suelo.

- Se basa en un preprocesamiento del interferograma para originar los datos y mejorar la estimación. Se sucede con la estimación de las pendientes del interferograma con fase completa a partir de los gradientes de las fases del interferograma. Por último se integra generando la imagen con fases completas.

Miguel Ángel Manso Callejo

Uso de suavizados adaptativos recursivos

- Se basa en que un interferograma puede ser suavizado hasta convertirlo en un plano sin la existencia de ruido o de residuos, de tal forma que se garantiza la existencia de un interferograma suavizado cuya diferencia con el original no tiene residuos.
- Filosofía de funcionamiento:

Suavizar interferograma

Restarlo del anterior.

Nuevo interferograma.

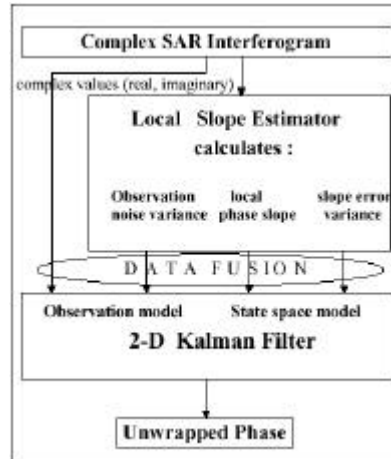
Se intenta integración si hay residuos



Miguel Ángel Manso Callejo

Filtrado de kalman

- Se utiliza para estimar y fundir con el estimador de pendientes locales del suelo.



Miguel Ángel Manso Callejo

Minimización de diferencias ponderadas

- Método propuesto por Constantini en 1996 que trata de minimizar diferencias entre vecinos de forma ponderada. Para ello aprovecha algunas técnicas de búsqueda del camino más corto en una red.

Miguel Ángel Manso Callejo

Coherencia

- Se trata de un producto derivado del interferograma.
- Su definición matemática es:

$$\gamma_c = \frac{E\{M \cdot S^*\}}{\sqrt{E\{M \cdot M^*\} \cdot E\{S \cdot S^*\}}}$$

$$\hat{\gamma} = \left| \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N M_i S_i^*}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N M_i M_i^* \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N S_i S_i^*}} \right|$$

Miguel Ángel Manso Callejo

Corrección geométrica del DEM.

- **Métodos:**
 - 2 Pasos: Cálculo de alturas previo a la transformación a un sistema de coordenadas.
 - 1 Paso: Cálculo del sistema de coordenadas a partir de la posición del sensor, señal de rango, frecuencia central doppler y la fase del interferograma.
- **Refinado:**
 - Consiste en utilizar puntos de control para corregir las desviaciones y movimientos en las direcciones cross-track y nadir. Se calcula una constante de fase que posteriormente permite calcular la fase absoluta desde el interferograma..

Miguel Ángel Manso Callejo

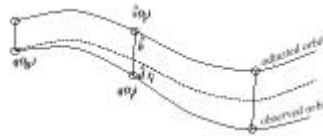
Corrección geométrica del DEM.

- Otro método:
 - Consisten en el cálculo de vectores tridimensionales . Hace la aproximación de que los dos vectores desde los sensores al punto son paralelos. Apoyado en la utilización de una base ortogonal que se calcula a partir del rango, doppler central y la ecuación de fase del interferograma.
- Método de refinado de la línea base por mínimos cuadrados:
 - Se basa en que el vector de estado del momento puede ser refinado ya que el otro parámetro (modelo de la órbita) garantiza la precisión.
 - Para este modelo se conocen las distintas fases del algoritmo de implementación:

Miguel Ángel Manso Callejo

Fases refinado línea base por Mínimos Cuadrados

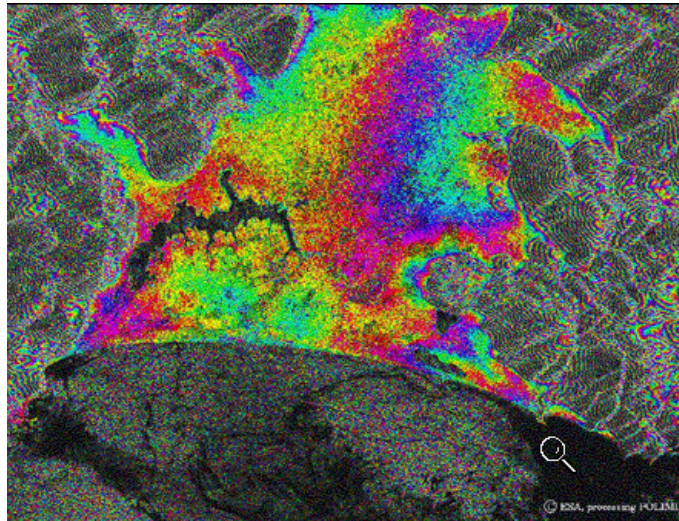
- 1º Refinado de la geometría de la imagen
- 2º Refinado por mínimos cuadrados del conocimiento de la línea base.



- 3º Cálculo de las coordenadas en el espacio para cada pixel del interferograma por el método de Newton-Raphson.
- 4º Transformación al sistema de coordenadas de la proyección cartográfica.
- 5º Generación del modelo digital de elevación

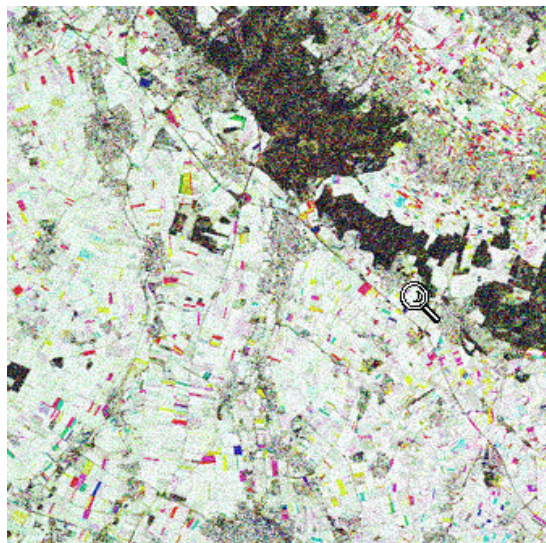
Miguel Ángel Manso Callejo

Interferograma



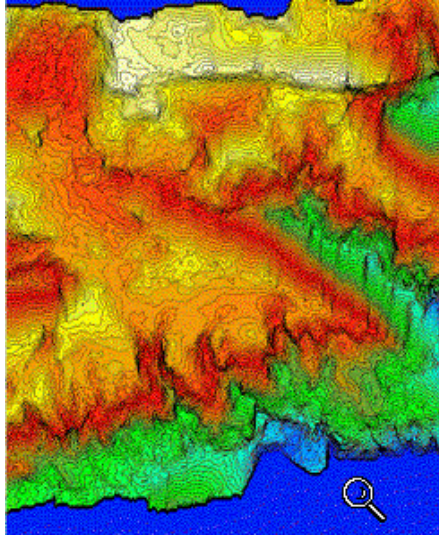
Miguel Ángel Manso Callejo

Imagen de coherencia



Miguel Ángel Manso Callejo

Modelo Digital de Elevación



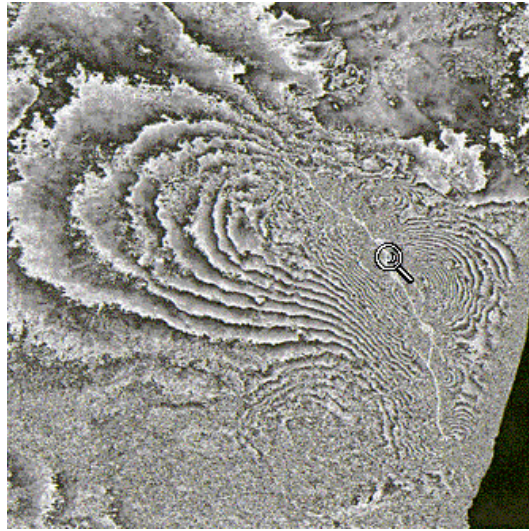
Miguel Ángel Manso Callejo

Fuentes de error y precisiones InSAR

- Las fuentes de error en la generación de los modelos digitales de elevación por interferometría son:
 - Estimación de la fase genera errores en la estimación de la altura.
 - Errores en el conocimiento de la línea base genera errores en el modelo.
- Precisión de los DEM en ERS1
 - $< 5\text{m}$ (error cuadrático medio)

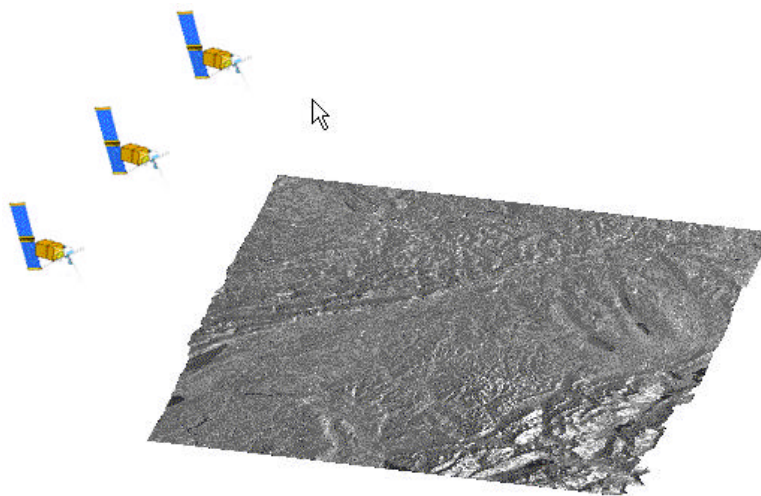
Miguel Ángel Manso Callejo

Detección de movimientos InSAR



Miguel Ángel Manso Callejo

Interferogrametría SAR Diferencial



Miguel Ángel Manso Callejo