

**ESTUDIO COMPARATIVO DE FILTROS
PARA EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES SAR**

**ALEJANDRO BAUTISTA RODRÍGUEZ
ALEJANDRO AMADO PIÑEROS**

**ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ, D.C.**

2014

**ESTUDIO COMPARATIVO DE FILTROS
PARA EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES SAR**

ALEJANDRO BAUTISTA RODRÍGUEZ

ALEJANDRO AMADO PIÑEROS

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN COMO OPCIÓN DE GRADO POR EL TÍTULO
DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

DIRECTOR(ES) TESIS:

JOHNATAN AVENDAÑO

INGENIERO ELECTRÓNICO

JAIME ALBERTO PARRA PLAZAS

INGENIERO MECÁNICO., MSc.

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Bogotá, D.C.

2014

Nota de Aceptación:

Firma presidente Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, junio de 2014

DEDICATORIA

Con todo mi amor para mi esposa, tu bondad, sacrificio y amor me han inspirado dándome el aliento para alcanzar mi sueño. Gracias por estar a mi lado...

Alejandro Bautista.

A mi esposa e hija, juntos seguiremos cosechando logros en familia, gracias por el apoyo y comprensión. Y a todos aquellos que permitieron que lograra esta meta personal.

Alejandro Amado.

1.1. RESUMEN

Aunque la tecnología de captura de imágenes satelitales avanza, el ruido como fenómeno físico siempre es una limitante para analizar adecuadamente las imágenes capturadas. En nuestro caso el ruido *Speckle*, cuyo estudio y análisis se viene realizando durante 20 años en el mundo, ha motivado investigaciones para reducirlo sin perder información en ese proceso.

Nuestro trabajo muestra una variedad de procesos de filtraje más relevantes en el análisis de imágenes satelitales SAR y los comparamos con el fin de determinar el más adecuado. Este análisis es particularmente importante en nuestro país debido a que los estudios en el tema son bastante recientes y la geografía de Colombia muy variada.

El Primer Capítulo abarca los preliminares del proyecto. El Segundo Capítulo es una introducción teórica a la Teledetección: todo lo referente al Radar de Apertura Sintética y los fenómenos físicos que se presentan cuando interactúan las microondas con el ambiente y con algunos terrenos en concreto. También se muestra lo relacionado a la teoría de imágenes, su proceso de digitalización desde su *formación matemática*. Por último se presenta los filtros y criterios de calidad a experimentar explicando su sentido estadístico.

El Tercer Capítulo muestra los estudios comparativos que ya se han desarrollado y que han servido de justificación para realizar nuestro proyecto de investigación. Por último, en un Cuarto Capítulo, se encuentra la metodología de la investigación partiendo de la herramienta suministrada y comprobada en otros trabajos de procesamiento de imágenes y material obtenido del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) sobre el municipio del Repelón en el departamento del Atlántico – Colombia y sobre la Ciudad de Cartagena.

1.2. CONTENIDO

RESUMEN	5
CONTENIDO	6
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.1. Contexto	21
1.2. Definición del problema	21
1.3. Formulación del problema	22
1.4. Justificación	22
1.5. Delimitación	23
1.6. Objetivo general.....	23
2. INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN	25
2.1. El Radar SAR y el Espectro Electromagnético.	25
2.2. Radar de Apertura Sintética (SAR).....	36
2.3. Las Microondas con el Ambiente	43
2.4. Espectro de los materiales en la superficie terrestre	44
2.5. Las microondas con la atmosfera y el suelo	55
2.6. Teoría de imágenes.	62
2.7. Filtros.....	84
2.8. Medidas de calidad	90
3. ESTADO DEL ARTE.....	95
4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	100
4.1. Experimento 1: Análisis Estadístico imágenes sintéticas	102
4.2. Experimento 2: Comparación de imágenes filtradas imagen del Municipio del Repelón polarización HV con zoom.	123
4.3. Experimento 3: Comparación estadística de filtros imagen de Cartagena con polarización HH	133
4.4. CONCLUSIONES.....	144
4.5. TRABAJOS FUTUROS	146
BIBLIOGRAFÍA.....	147
Anexo 1: Código Criterios de comparación GUI MatLab	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético – Microondas.....	26
Figura 38. Composición del espectro electromagnético	26
Figura 2. Bandas utilizadas por algunos sistemas SAR	28
Figura 3. Banda C, Banda L, Banda P, Color por Multipolarización	28
Figura 4. Polarización de una onda electromagnética que se propaga.....	29
Figura 5. Polarización de una onda electromagnética.....	30
Figura 6. Polarización lineal	31
Figura 7. Polarización circular.....	32
Figura 8. Polarización elíptica.....	33
Figura 9. Componentes de una onda plana	33
Figura 10. Polarización vertical y horizontal	35
Figura 11. Imágenes con diferente polarización	36
Figura 12. RADAR	37
Figura 13. Radar emitiendo Ondas sobre una superficie	38
Figura 14. Sistema de teledetección Activo (Izquierda) y Pasivo (Derecha)	38
Figura 15. Detección y localización por Radio (RADAR)	39
Figura 16. Geometría Básica SAR	40
Figura 17. Geometría de un SAR	41
Figura 18. Satélite ERS ½.....	43
Figura 19. Relación energía incidente, reflejada y absorbida.	43
Figura 20. Ventanas Atmosféricas.	44
Figura 21. Distintos tipos de retro-dispersión.....	45
Figura 22. Patrones de reflexión de las microondas	46
Figura 23. Rugosidad y Longitud de onda	47

Figura 24. Ángulo de incidencia	48
Figura 25. Reflectividad del municipio de La Virginia – Colombia.....	49
Figura 26. Polarización y reflexión de las ondas electromagnéticas.	49
Figura 27. Curvas de reluctancia espectral correspondientes a distintos materiales.....	50
Figura 28. Concepto de imagen hiperespectral	51
Figura 29. Reconstrucción de la curva espectral.....	52
Figura 30. Humedad del suelo y capacidad de penetración a distintas longitudes de onda.	53
Figura 31. Distinción de la población y el oleaje de las costas, los Ángeles (California)	54
Figura 32. Propagación de la radiación en un sistema de teledetección	55
Figura 33. Esquema de la Atenuación Geométrica.....	56
Figura 34. Comparación de la irradiación solar antes y después de atravesar la atmósfera .	57
Figura 35. Comportamiento radiactivo de las distintas superficies	58
Figura 36. Influencia de la inclinación de la radiación sobre el terreno	59
Figura 37. Visualización del scattering atmosférico	60
Figura 39. Procesamiento digital de una imagen	63
Figura 40. Digitalización de una imagen	64
Figura 41. Valores en escala de grises.	65
Figura 42. Procesos que componen el sistema digital de la imagen.	66
Figura 43. Ubicaciones trapezoidales	70
Figura 44. Localización del dato del historial en la Fase re-cuadrícula.....	71
Figura 45. Retro dispersión de las ondas de un RADAR a causa de la superficie.....	77
Figura 46. Interferencia por retro-dispersión	79
Figura 47. Imagen satelital SAR.	80
Figura 48. Proceso <i>Multilook</i>	81
Figura 49. Curvas de distribución de para media unitaria	83
Figura 50. Imagen patrón	102

Figura 51. Histograma Imagen Original	102
Figura 52. Histograma 1 % Frost	103
Figura 53. Histograma Frost Mejorado.....	103
Figura 54. Histograma Kuan	104
Figura 55. Histograma Lee.....	104
Figura 56. Media con Ventana	105
Figura 57. Media sin ventana	105
Figura 58. Mediana.	105
Figura 59. Oddy	106
Figura 60. Histograma Frost	107
Figura 61. Histograma Frost Mejorado.....	107
Figura 62. Histograma Kuan	107
Figura 63. Histograma Lee.....	108
Figura 64. Media con ventana.....	109
Figura 65. Media sin Ventana	109
Figura 66. Histograma Mediana.....	110
Figura 67. Histograma Oddy.....	110
Figura 68. Filtro Frost 50 %	111
Figura 69. Filtro Frost mejorado.	112
Figura 70. Filtro Kuan.....	112
Figura 71. Filtro Lee.	113
Figura 72. Filtro Media con ventana	113
Figura 73. Media sin ventana	114
Figura 74. Mediana	114
Figura 75. Oddy.	115
Figura 76. Gráficas comparativa correlación.	118

Figura 77. Gráficas comparativa SNR.	118
Figura 78. Gráficas comparativa EEI.....	119
Figura 79. Gráficas comparativa Q.	119
Figura 80. Gráficas comparativa Q.	120
Figura 81. Gráficas comparativa Q.	120
Figura 82. Gráficas comparativa Q.	121
Figura 83. Gráficas comparativa Q.	121
Figura 84. Gráficas comparativa Q.	122
Figura 77. GUI	124
Figura 78. Segmento imagen Satelital SAR municipio Repelón, Atlántico Colombia.	125
Figura 80. Fotografía Satelital SAR municipio Repelón, Atlántico Colombia.....	125
Figura 84. Filtro Frost Mejorado.....	126
Figura 85. Zoom Filtro Frost Mejorado estructura rígida.	127
Figura 86. Histogramas correspondientes:	127
Figura 96. Filtro Media sin Ventana	128
Figura 97. Zoom sobre estructura rígida.	128
Figura 98. Histograma Correspondiente:	129
Figura 102. Filtro Oddy:	129
Figura 103. Zoom sobre estructura rígida:	130
Figura 104. Histograma y Graficas comparativas:.....	130
Figura 104. Índice de Speckle el Repelón.....	131
Figura 104. Índice de correlación el Repelón.	131
Figura 104. Índice ENL el Repelón.	132
Figura 104. Índice SD el Repelón.	132
Figura 104. Índice ENL el Repelón.	133
Figura 105. Imagen SAR(HV) de la Ciudad de Cartagena Colombia.	134

Figura 106. Fotografía satelital de Cartagena Colombia.	134
Figura 108. Gráficas Frost Mejorado.	135
Figura 112. Gráficas filtro Media sin Ventana.....	136
Figura 106. Gráficas filtro Oddy.	137
Figura 115. Gráficas índices de calidad imagen Cartagena.	138
Figura 115. Gráficas índices de calidad imagen Cartagena	138
Figura 115. Gráficas índices de calidad imagen Cartagena	139
Figura 110. Gráficas índices de calidad imagen Cartagena	140
Figura 115. Gráficas índice ENL filtrado imagen Cartagena	140
Figura 115. Gráficas índice de correlación imagen Cartagena	141
Figura 115. Gráficas Desviación Estándar imagen Cartagena.....	141
Figura 115. Gráficas tiempo de ejecución filtros imagen Cartagena.	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. Resultados estadísticos con 50% de <i>speckle</i>	111
Tabla 4. Tabla comparativa imagen filtrada con original 1%	116
Tabla 5. Tabla comparativa imagen filtrada con original 10%	117
Tabla 6. Tabla comparativa imagen filtrada con original 50%	117
Tabla 7. Resultados estadísticos el Repelón primer filtrado	126
Tabla 9. Resultados numéricos del filtrado en Cartagena.....	135

GLOSARIO

Atenuación:

La atenuación es la pérdida de la potencia de una señal, por tanto, para que la señal llegue con la suficiente energía es necesario el uso de amplificadores o repetidores situados a lo largo del sistema de transmisión. La atenuación se incrementa con la frecuencia, con la temperatura y con el tiempo.

Desviación Estándar SD:

Por sus siglas en inglés *Standar Desviation*, es una medida en la estadística de dispersión, este puede ser un índice de calidad sobre una región de una imagen determinada. Básicamente este índice nos indica qué tanto cambia en su conjunto un área en la tonalidad de sus pixeles.

Difracción:

Es otro fenómeno que se presenta sobre todo en lo que se refiere a imágenes de radar porque depende del ángulo con que se abre la onda y el diámetro del emisor o receptor de la misma. Este fenómeno afecta el tamaño angular de un punto sobre el terreno ya que si es demasiado grande significa pérdida de resolución espacial

Digitalización:

Es el proceso por el cual se realiza una muestra de la imagen y se le asigna valores numéricos, confeccionando un mapa de ella en forma de cuadrícula de puntos o pixeles. A cada pixel se le asigna un valor tonal (negro, blanco, gris o color), el cual está representado en un código binario (ceros y unos).

Efecto Doppler:

El efecto Doppler describe la variación de longitud que sufren las ondas al ser emitidas o recibidas por un objeto en movimiento. Para las ondas electromagnéticas, la frecuencia se ve alterada desplazándose hacia la izquierda o la derecha, según sea percibido el movimiento. Fue propuesto por Cristian Doppler (1803-1853) en 1842 en un trabajo llamado "Sobre el color de la luz en estrellas binarias y otros astros".

Error Cuadrático Medio RMSE:

Por sus siglas en inglés *Root Mean Square*, Es un estimador de la varianza de ruido, es decir que entre menor sea este indicativo la cantidad de ruido que posea la imagen será igualmente menor, es comparable con la desviación estándar.

Espectro Electromagnético:

El espectro electromagnético se define como la distribución de intensidad de una radiación en función de una magnitud característica, como la longitud de onda, la energía, la frecuencia o la masa, es decir que es una representación de la energía en función de la frecuencia.

Factor Scattering:

Es el esparcimiento en todas las direcciones de la radiación, debido a las moléculas atmosféricas. Cuando enviamos luz blanca (luz visible) aquellas ondas de mayor frecuencia (λ **menor**) se esparcen mucho más que las ondas de menor frecuencia (λ **mayor**).

Georreferenciación:

Se refiere al posicionamiento con el que se define la localización de un objeto espacial (representado mediante punto, vector, área, volumen) en un sistema de coordenadas determinado. Es el uso de coordenadas de mapa para asignar una ubicación espacial a entidades cartográficas.

Imagen IMG:

IMG: una imagen de un CD, es decir un archivo conteniendo una copia binaria de un CD o DVD.

Imagen Raster:

También llamada imagen de bit, están formadas por píxeles (conjunto de puntos). Estos puntos tienen un 1 o más valores que describen su color. Extensiones: .JPG, .GIP, .BMP, .JPEG, .VRT, .TIFF, .KAP.

Imagen Vectorial:

Son gráficos formados a base de curvas y líneas. Se componen de contornos y rellenos definidos matemáticamente mediante precisas ecuaciones. Extensiones: .EPS, .PDF, .WMF, .SVG, .VML, .DWG, .DXF.

Índice de Conservación de Bordos (EPI):

Por sus siglas en inglés *Edge Preservation Index*, es un método nos indica qué tanto se conservan los bordes después de la aplicación de filtros.

Índice de Correlación:

El índice de correlación es una medida que nos muestra numéricamente la mayor o menor preservación de los bordes de una imagen después de un proceso sobre la misma, en el que el mejor caso sería un número de medida de correlación que tiende a la unidad.

Índice de Mejoramiento de Contornos (EEI)

Por sus siglas en inglés *Edge Enhancing Index*, es un índice muestra cuantitativamente, qué tanto un filtro aplicado sobre una imagen conserva y define contornos; es muy significativo en el tratamiento de imágenes ya que se busca siempre es una mayor nitidez y que los contornos y formas se puedan visualizar después de un filtrado.

Irradiancia:

Es el flujo o potencia de la radiación en la superficie que recibe ese flujo. Se debe considerar la influencia que tiene el tamaño de la superficie sobre el que recae el flujo. Si los rayos que llegan a la superficie de manera perpendicular al área (A) no tienen igual tamaño si está orientada con alguna inclinación.

MATLAB:

Es un software de alto nivel que se utiliza para cálculos numéricos y simbólicos, por sus siglas en inglés Matrix Laboratory. Fue creado por Cleve Moler en la década de los 70' quien inicio las rutinas LINPACK y EISPACK. MATLAB cuenta con una diversidad de usos, los más importantes son: simular, modelar, crear prototipos, analizar datos y encontrar soluciones a sistemas complejos. Actualmente cuenta con herramientas para diferentes áreas tales como: Acústica, Aeronáutica, Astronomía, Biología, Biotecnología, Cálculo, Control, Estadística, entre otros.

Medida de Calidad Universal (Q)

Es un índice de calidad, generalmente nombre de como Calidad Universal de imagen.

Microondas:

Una microonda se define como una onda electromagnética cuya longitud está comprendida en el intervalo del milímetro al metro y cuya propagación puede realizarse por el espacio y por el interior de tubos metálicos.

Número de Looks ENL:

Por sus siglas en inglés *Equivalent Number of Looks*, o número de Looks, se define como la relación entre la media al cuadrado y la varianza, se estiman a partir de los datos de la imagen expresados en potencia radiométrica.

Píxel:

El concepto de píxel tiene su origen en el vocablo inglés *pixel* y surgió como acrónimo entre los términos *pix* (expresión que refiere a *picture*, “imagen”) y *element* (traducido al español como “elemento”). La noción se utiliza en el ámbito informático para indicar la

superficie homogénea más diminuta que forma parte de una imagen. El píxel, por lo tanto, puede definirse como la más pequeña de las unidades homogéneas en color que componen una imagen de tipo digital.

Orto rectificación:

Es un proceso para corregir geoméricamente una imagen para eliminar las distorsiones que se producen durante la captura de la imagen

Polarización:

Se refiere a la forma como son transmitidas las señales de radar. Una señal polarizada indica que su vibración se restringe a una dirección determinada.

Las ondas electromagnéticas son variables en el tiempo tanto en el campo magnético como eléctrico, estas dos componentes son perpendiculares a la dirección de desplazamiento, dichas componentes son ortogonales entre sí y son descritas por las Ecuaciones de Maxwell.

La polarización de una onda es la figura geométrica determinada por el extremo del vector que representa al campo eléctrico en función del tiempo, en una posición dada. Para ondas con variación sinusoidal dicha figura es en general una elipse.

Polimetría:

La polimetría se define como la ciencia que utiliza las mediciones de la matriz de reflexión difusa completa para inferir propiedades físicas de la superficie de la Tierra. La mayoría de los sistemas de RADAR SAR operan con señales de longitud de onda de entre 0,5 cm y 75 cm, la clasificación de su uso está dado por bandas a las que internacionalmente se les ha asignado una letra.

Reflectancia:

Es un parámetro físico como función de un punto del terreno (x,y) en una longitud de onda dada. Depende de la irradiancia proveniente de la fuente de iluminación y también depende de la Radiancia, la cual se establece del punto al sensor.

Como medio de propagación se encuentra la atmósfera que absorbe energía y la esparce a diferentes direcciones. Esto se conoce como *scattering*.

Relación señal a ruido SNR:

Por sus siglas en inglés Signal to Noise Ratio, se define como el cociente entre la media de los niveles digitales y su desviación estándar.

Resolución Espacial:

Designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen. Está determinada por el tamaño del pixel, medido en metros sobre el terreno. Depende de la altura del sensor con respecto a la Tierra, el ángulo de visión, la velocidad del escaneado, y las características ópticas del sensor.

Resolución Espectral:

Consiste en el número de canales espectrales (y su ancho de banda) que es capaz de captar un sensor. Los nuevos sensores, llamados también espectrómetros o hiperespectrales llegan a tener hasta 256 canales con un ancho de banda muy estrecho para poder separar de forma precisa distintos objetos.

Resolución Radiométrica:

También llamada resolución dinámica, se refiere a la cantidad de niveles de gris en que se divide la radiación recibida para ser almacenada y procesada posteriormente. Esto depende del conversor analógico digital usado.

Resolución Temporal:

Es la frecuencia del paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre. Es decir cada cuánto tiempo pasa el satélite por la misma zona de la Tierra. Depende de las características de la órbita.

Ruido:

Es un fenómeno físico que podemos definir en nuestro procesamiento de imágenes, como la variación inusual de un pixel respecto a lo que se espera afectando así la fidelidad de la imagen.

SAR:

Radar de Apertura Sintética. Es el sistema más amplio y difundido en teledetección activa, en el cual se tiene integrada su propia fuente de emisión de ondas electromagnéticas. Sus orígenes se ubican con el inicio de las actividades aeronáuticas en el siglo XX y fue evolucionando con el desarrollo de las actividades espaciales. La captura de imágenes se puede realizar bajo cualquier condición meteorológica incluso de día o de noche.

Speckle:

La varianza en la imagen o *speckle*, es un ruido granulado que existe de modo inherente en todas las imágenes SAR. Está presente en toda la imagen y es un factor dominante. Es un patrón indeseado que se produce por interferencia mutua de un conjunto de frentes de onda

reflejadas difusamente por los elementos del terreno sobre el receptor de resolución. Es un fenómeno no uniforme, es decir aditivo y multiplicativo.

Teledetección:

Es el proceso por el cual se captura la energía reflejada por los cuerpos celestes, energía proveniente del sol o de una fuente propia, por medio de dispositivos diseñados específicamente para tal fin.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad podemos percibir el mundo que nos rodea de muchas maneras. Con los avances de la tecnología y de la carrera espacial, hemos llegado a la capacidad de obtener imágenes de nuestro mundo desde una aeronave, o desde distancias más elevadas como transbordadores espaciales y satélites artificiales que orbitan el planeta, con una perspectiva que era un sueño solo hace unos años.

Para generar imágenes es necesaria la interacción de la energía en formas de onda que se reflejan sobre los cuerpos celestes, hay dispositivos diseñados específicamente para captar la radiación reflejada, bien sea proveniente del sol, o de una fuente propia de emisión de energía. Los sistemas de Teledetección activa tienen integrada su propia fuente de emisión de ondas electromagnéticas, tecnología que genera imágenes distintas a las captadas por una cámara satelital que percibe la luz del sol y reflejada por el objeto. En el caso del planeta tierra, podemos tomar imágenes de áreas que no tienen luz directa. El sistema más amplio y difundido es el conocido por la teledetección como Radar de Apertura Sintética SAR (*Synthetic Aperture Rada*), por sus siglas en inglés.

La Teledetección o percepción remota es una técnica que evolucionó aceleradamente durante las últimas décadas con el advenimiento de la tecnología satelital, sus orígenes se ubican con el inicio de las actividades aeronáuticas a principio de siglo XX y fue evolucionando con el desarrollo de las actividades espaciales. Hoy en día las definiciones de Teledetección se utilizan para describir las actividades que realizan los satélites, trasbordadores espaciales o determinados tipos de aviones. Bolaños, 2001 [1]

Sin embargo toda imagen contiene ruido, o variaciones indeseadas que no reflejan con exactitud la realidad. El objetivo de la presente tesis es evaluar el desempeño de ocho (8) de los métodos más comunes de filtrado para la reducción de ruido *speckle* usando como parámetro comparativo nueve (9) índices de efectividad y calidad en el proceso de reducción del ruido buscando tener una nitidez, preservación de detalles, bordes y claridad en las imágenes del caso de estudio.

1.1. Contexto

Todas las imágenes capturadas por dispositivos tecnológicos conllevan implícito un fenómeno físico conocido como ruido y se puede definir de manera general para imágenes como toda variación inusual de un pixel con respecto a lo que se espera, afectando así la fidelidad de la imagen. Es decir que en ciertas regiones se puede producir un fenómeno sobre la imagen que no refleja la realidad.

Con la digitalización este fenómeno sigue persistiendo y hay variedad de ruido dependiendo la tecnología utilizada así como la energía capturada por el sensor. Las imágenes SAR en particular tienen un ruido granulado conocido como *speckle* que aparece sobre la imagen de manera no uniforme que cambia perceptiblemente la imagen con respecto a la realidad.

En el procesamiento digital de imágenes existen diversos métodos estadísticos y matemáticos para reducir o suavizar el ruido sobre los píxeles que componen la imagen. Pero no hay certeza sobre cuál método de filtrado se comporta mejor con respecto a otro; Además, el tipo de terreno donde se aplican estos métodos y se hace uso de los índices es otro parámetro que influye al momento de escoger un método determinado. El territorio Colombiano es un claro ejemplo por la diversidad de suelos que posee nuestro territorio geográfico; en nuestro caso de estudio tomaremos como referencia la rivera del río Magdalena y suelos anegables de la costa atlántica.

1.2. Definición del problema

Durante el procesamiento de imágenes satelitales SAR se presentan varios problemas, entre los cuales el ruido que lleva consigo la imagen capturada. Este ruido se caracteriza porque no es uniforme, sino heterogéneo, técnicamente llamado ruido multiplicativo. Este defecto se conoce como *speckle*, tiene la peculiaridad de tener una distribución no uniforme. Es necesario utilizar herramientas por medio de software que permitan la reducción de este factor indeseado, tomando como base criterios estadísticos comparativos.

En Colombia se hace necesario el estudio de imágenes SAR para determinar el impacto de las inundaciones sobre las poblaciones y lugareños de la rivera del río Magdalena y las zonas anegables que debido a los fuertes cambios climáticos y mala planeación por parte de las autoridades. Estas inundaciones acumulan los mayores porcentajes de pérdidas de vidas y viviendas destruidas por encima de otros desastres naturales en Colombia, han cobrado

miles vidas humanas y afectación de poblaciones enteras *BM*, 2012 [2] La presente tesis como parte del proyecto de investigación para evaluar riesgos de inundación mediante imágenes SAR que pueden ser tomadas bajo cualquier condición atmosférica, analiza el problema del ruido *Speckle* inherente en estas imágenes para darle una suavizado y mejorarlas para proceso siguientes. Como no existe un modelo estandarizado debido a que las condiciones en cada país y región son totalmente diferentes lo cual hace difícil escoger el método más indicado de manera universal, por lo que es necesario realizar un estudio propio para validar por medio de índices calidad que permitan la escogencia de uno o varios filtros para mejorar las imágenes de nuestro caso de estudio.

1.3. Formulación del problema

Se puede deducir mediante la observación física la claridad y fidelidad de una imagen, sin embargo se pueden obtener resultados numéricos que corroboren dichas apreciaciones. Existen parámetros de comparación en cuanto a la calidad de la imágenes, que aplicados a los diferentes filtros, podrían determinar en nuestro caso de estudio cuál es la mejor opción. Partiendo de los parámetros como el índice de *speckle*, ENL (*Equivalent number of looks*), Correlación y SD (*Standard Desviation*) entre otros; ¿Cuál o cuáles métodos de filtrado más apto para una adecuada interpretación de las imágenes SAR en nuestro caso de estudio?

1.4. Justificación

Aunque existen varios métodos de filtrado, no hay un estudio que evalúe los filtros con un amplio número de criterios que permita la elección de uno específico en Colombia y mucho menos para las zonas inundables de la costa atlántica y que se base en conclusiones de un análisis comparativo *BM*, 2012 [2]. Esta falta de datos demora el proceso de análisis digital de las imágenes para el proyecto investigativo macro al cual pertenecemos; por tal motivo se hace indispensable desarrollar una herramienta que permita realizar un estudio sobre los filtros comúnmente utilizados, aplicados a las imágenes SAR de zonas anegables en la rivera del río Magdalena y la ciudad de Cartagena.

Es de trascendencia que un país tan accidentado geográficamente investigue y se provea de mayores recursos para buscar el uso eficiente de sus suelos. Así mismo controlar el impacto que el hombre realiza en la naturaleza y a su vez determinar áreas de riesgo para el hombre como las inundaciones, [2]. El presente estudio como parte de un proyecto investigativo

macro, permitirá desarrollar una herramienta de comparación y entregar las imágenes con una reducción de ruido *speckle* significativo buscando la preservación de bordes y detalles, facilitando así los procesos subsecuentes del proyecto en General.

1.5. Delimitación

La falta de información genera una de las más grandes limitaciones de nuestro proyecto investigativo, debido a que obtener imágenes de Colombia no es fácil estas son de un costo elevado y las entidades interesadas solo las adquieren en casos determinados, además que Colombia no cuenta con un satélite propio para la captura de imágenes SAR [2]. Nuestra investigación solamente abarcará los métodos de filtrado y la escogencia de uno de ellos para nuestro caso de estudio y entregará las imágenes con una reducción de *Speckle* buscando la conservación de bordes para entregarlas a procesos subsecuentes del grupo de investigación.

1.6. Objetivo general

Evaluar el desempeño de ocho métodos clásicos de filtrado de imágenes SAR, mediante los índices de correlación, ENL, SNR, EPI, Índice de Speckle, EEI, Índice de calidad universal (Q), correlación, SD y tiempo de ejecución, midiendo el desempeño de cada filtro a la hora de reducir el ruido *speckle* buscando conservar los detalles y bordes en las imágenes. Con los resultados obtenidos se escogerá el filtro con mejor desempeño para su posterior aplicación en procesos de detección y seguimiento de inundaciones en el territorio colombiano.

1.6.1. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión del estado del arte en técnicas de filtrado y métodos de evaluación de desempeño de los filtros.

- Comparar este trabajo con las investigaciones relacionadas encontradas en el estado del arte con la finalidad de especificar el aporte de esta investigación.
- Desarrollar una herramienta informática usando Matlab que permita aplicar los métodos de filtrado escogidos para este estudio y otra que permita evaluar el desempeño de cada filtro implementado, mediante los índices numéricos establecidos.
- Experimentar con imágenes sintéticas para encontrar el filtro con mejores resultados a la hora de conservar bordes, detalles y reducir de ruido *Speckle*.
- Establecer los tres filtros con menor tiempo de ejecución y recomendar el más óptimo de este grupo para nuestro caso de estudio.
- Entregar las imágenes del caso de estudio con el método de filtrado de mejor desempeño, para posteriores procesos de detección y seguimiento de inundaciones en el territorio Colombiano

2. INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN

Las imágenes satelitales nos permiten tener un mejor conocimiento del mundo en el que nos encontramos, las imágenes SAR desempeñan una función primordial en diversos campos desde la agricultura, ecología, hidrología, crecimiento demográfico, medición del impacto ambiental, prevención de riesgo, seguridad, entre otras. En este capítulo se realiza una introducción a la Teledetección.

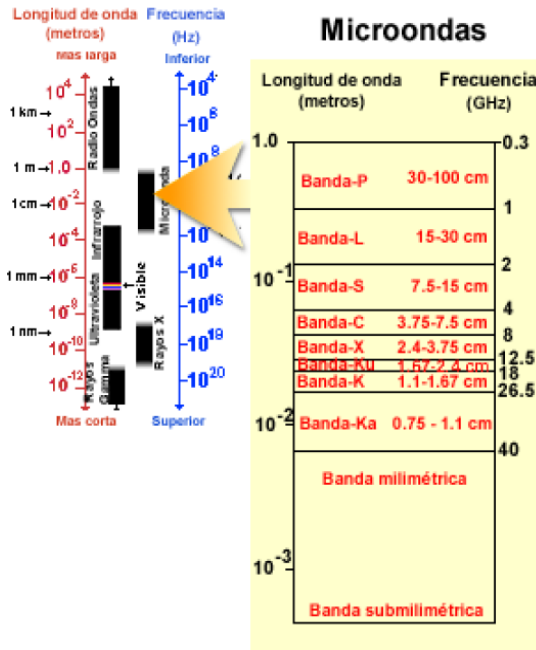
2.1. El Radar SAR y el Espectro Electromagnético.

El espectro electromagnético se define como la distribución de intensidad de una radiación en función de una magnitud característica, como la longitud de onda, la energía, la frecuencia o la masa, es decir que es una representación de la energía en función de la frecuencia.

La energía electromagnética viaja a la velocidad de la luz en forma de ondas o partículas (para el caso de la luz visible), y se detecta al interactuar con la materia. Entre las principales características de la energía electromagnética se encuentra la longitud de onda, frecuencia (inversamente proporcional a la longitud de onda) y la polarización.

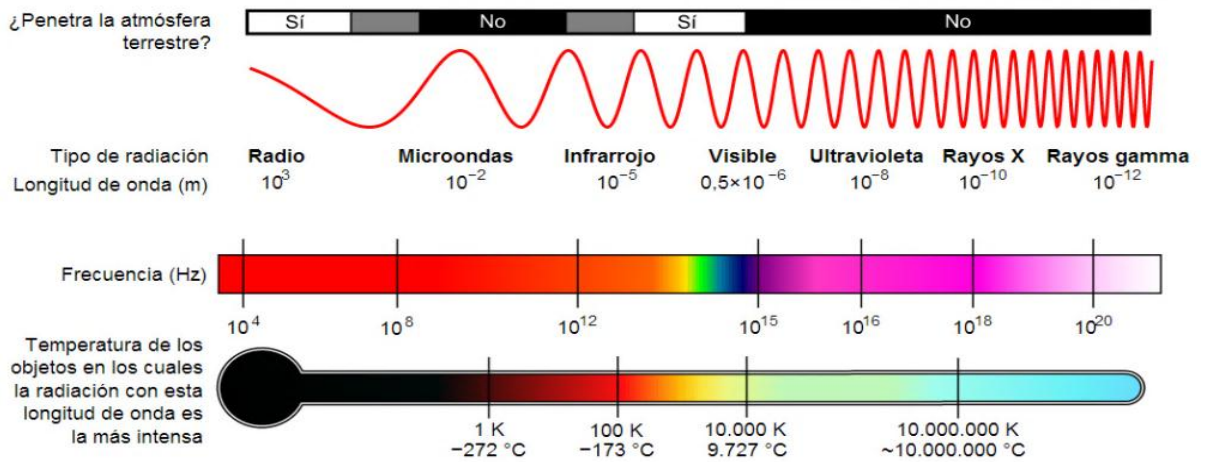
La percepción remota o teledetección emplea una corta porción del espectro electromagnético que se conoce como microondas, las frecuencias de esta franja se encuentra entre 0,3 y 300 GHz, es decir longitudes de onda corta entre 1mm y un 1m. Globe SAR Program, 2009 [3]

Figura 1. Espectro electromagnético – Microondas



Fuente: CCRS –Teledetección.

Figura 2. Composición del espectro electromagnético



Fuente: Procesamiento digital de imágenes ITP- De las Rosas R.

Una microonda se define como una onda electromagnética cuya longitud está comprendida en el intervalo del milímetro al metro y cuya propagación puede realizarse por el espacio y por el interior de tubos metálicos. RAE, 2013 [4]

La mayoría de los sistemas de RADAR SAR operan con señales de longitud de onda entre 0,5 cm y 75 cm, la clasificación de su uso está dado por bandas a las que internacionalmente se les ha asignado una letra. Las más comunes son:

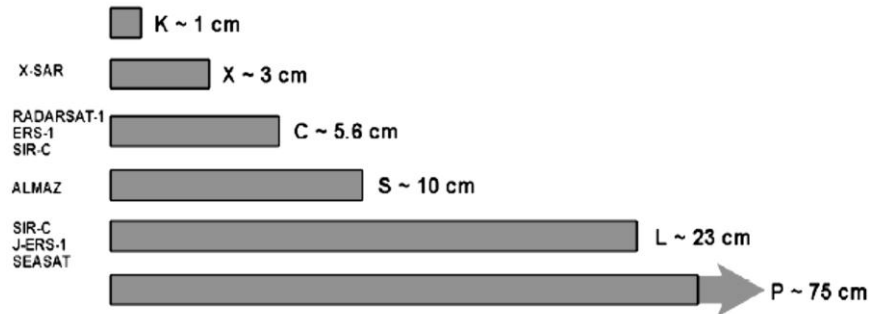
1. Banda X: desde 2,4 a 3,75 cm y en frecuencia desde 12,5 a 8 GHz, su uso está generalizado para el reconocimiento militar, y a nivel comercial. Según el Centro Canadiense de Teledetección: *Canada Centre for Remote Sensing (CCRS)*, se utiliza actualmente en el SAR CV-580, usado comercialmente por el centro de recursos naturales, esta banda permite identificación de hielo y características de escala relativamente pequeñas.
2. Banda C: desde 3,75 a 7,5 cm y en frecuencia desde 14 a 8 GHz, se utiliza en satélites en la estratosfera, tal como el radar RADARSAT canadiense y ERS1 europeo. Es la banda más común y la que permite mejores resultados en términos generales.
3. Banda S: Longitud de onda desde 7,5 a 15 cm, y frecuencia desde 4 a 2 GHz. Esta frecuencia es utilizado por el ALMAZ, satélite lanzado por la unión soviética. Space Research Institute (IKI) [5]
4. Banda L: desde 15 a 30 cm, con una frecuencia común desde 2 a 1 GHz, fue usado por el satélite de la NASA SEASAT, que fue el primer radar de teledetección en órbita en un satélite artificial. Esta banda permite el estudio de la cartografía geológica, y cuyas características son de escala grande. NASA, 2013 [6].
5. Banda P: longitudes de onda desde 30 a 100 cm, y frecuencia desde 1 a 0,3 GHz, este fue utilizado por el JPL en la misión AIRSAR el radar estaba montado en avión DC8, y volaba a un velocidad de 215 m/s, su última misión fue en el 2004 cuando fue remplazado por el proyecto UAVSAR. JPL-NASA, 2008 [7].

Esta banda permite penetrar el follaje y la vegetación, entre menor sea la frecuencia, mayor será dicha penetración.

Las longitudes de ondas más largas permiten que las ondas electromagnéticas penetren a través de las precipitaciones o la corteza terrestre. Los satélites que operan con longitudes de ondas superiores a 2 cm no se ven afectados por la nubosidad.

La lluvia afecta a longitudes de onda menores a 4 cm. Globe SAR Program, 2009 [3]

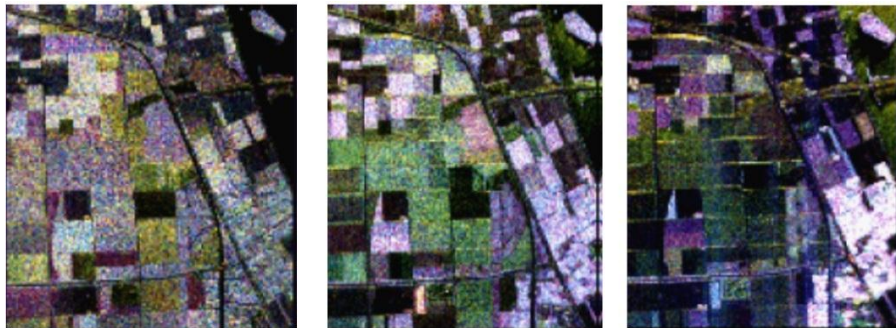
Figura 3 Bandas utilizadas por algunos sistemas SAR



Fuente: CCRS -Teledetección

La longitud de onda de cada sensor permite su especialización así como su utilización en los diferentes y diversos medio ambientes. Cada banda puede identificar las características particularidades del terreno.

Figura 4. Banda C, Banda L, Banda P, Color por Multipolarización



Fuente: JPL Imagen de campos agrícolas Flevoland, Holanda.

Los sistemas SAR presentan ventajas y desventajas dependiendo la frecuencia en la que operan. La operación en frecuencias bajas permite una electrónica más simple y un menor gasto de energía; sin embargo las señales presentan más dificultad de procesamiento y se requieren antenas grandes. Por otro lado, los sistemas SAR que operan a frecuencias más altas, requieren mayor potencia y tienen un gasto energético mayor, su electrónica se complica un poco más pero las antenas son mucho más pequeñas, lo que es una ventaja a la hora de colocarlos en órbita.

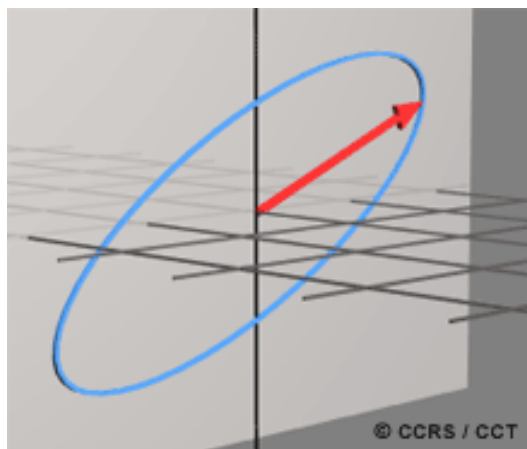
Muchos sistemas SAR utilizan dos o más bandas para realizar un escaneo del terreno que permita una mayor y mejor comprensión.

2.1.1. Polarización.

Las ondas electromagnéticas son variables en el tiempo tanto en el campo magnético como eléctrico estas dos componentes son perpendiculares a la dirección de desplazamiento, dichas componentes son ortogonales entre sí, y son descritas por las Ecuaciones de Maxwell. Sarden JJ., 2001 [8]

Los campos electromagnéticos se propagan a la velocidad de la luz en el "espacio libre", sin embargo hay que incluir condiciones atmosféricas más realistas. Hay tres parámetros que son necesarios y suficientes para describir propagación de ondas Electro Magnéticas (EM) en un medio dado: constante dieléctrica (o permitividad), la permeabilidad y la conductividad.

Figura 5. Polarización de una onda electromagnética que se propaga

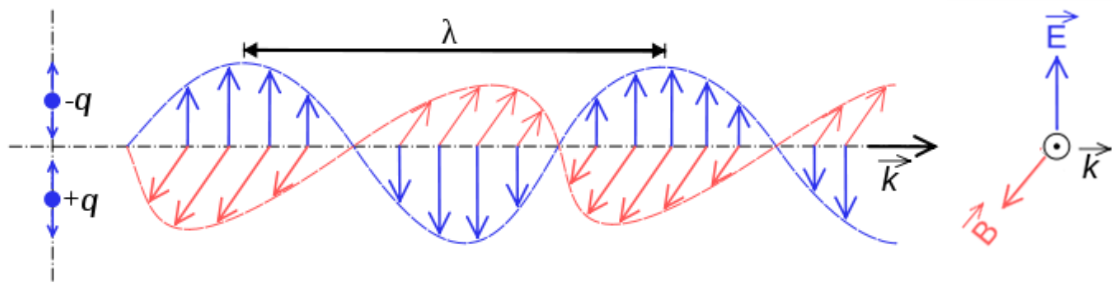


Fuente: CCRS – Radar Polarimetry

En la imagen anterior la flecha roja representa el campo eléctrico total, es el lugar geométrico que traza una elíptica durante un ciclo. En general, cuando una onda electromagnética se emite desde una fuente, como una antena de radar, las ondas se propagan en todas las direcciones posibles, cada una con una fase específica y una intensidad de campo en cada dirección.

En una onda electromagnética Polarizada, las oscilaciones del campo eléctrico, son perpendiculares a las oscilaciones del campo magnético, y ambas son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, estas dos componentes se encuentran por decirlo sencillamente sincronizadas es decir con la misma fase.

Figura 6. Polarización de una onda electromagnética.



Fuente: GFDL

Donde \vec{E} es el vector de campo eléctrico, \vec{B} es el vector de campo magnético, \vec{k} es el vector dirección de propagación y λ es el periodo. Las ecuaciones de Maxwell describen el proceso de ortogonalidad del campo magnético con el campo eléctrico, así como el cálculo del campo magnético es directamente proporcional al eléctrico, pudiendo calcular el campo magnético a partir del campo eléctrico. Por esta razón, una onda electromagnética puede ser caracterizada por el comportamiento de un vector de campo eléctrico en función del tiempo. Globe SAR Program, 2009 [3]

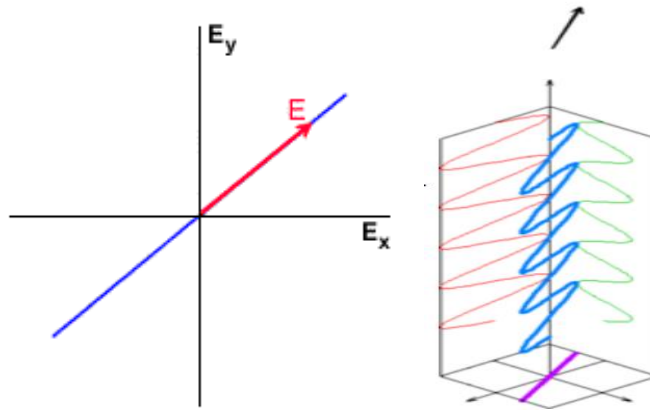
La figura 12 muestra la propagación de una onda electromagnética polarizada. Así pues existen tres tipos de polarización básica:

- **Polarización lineal**, el vector de campo eléctrico se ve en rojo y el lugar geométrico es representado por la línea azul, el vector toma todos los valores lineales del lugar geométrico en un periodo de tiempo.

Este tipo de polarización recibe los diferentes componentes de la polarización de una onda electromagnética simultáneamente. Por ejemplo, las partes de horizontales y verticales de una antena pueden recibir las dos componentes ortogonales de la onda incidente y la electrónica del sistema mantiene estas dos señales separadas.

Este tipo de polarización es producto de la sumatoria de ambas componentes cuando están en fase o con desfase nulo es decir que ambas alcanzan sus niveles máximos y mínimos en sincronía, también se da en el caso en el que se encuentra desfasada 180° y una componente alcanza el máximo mientras la otra está en el mínimo.

Figura 7. Polarización lineal

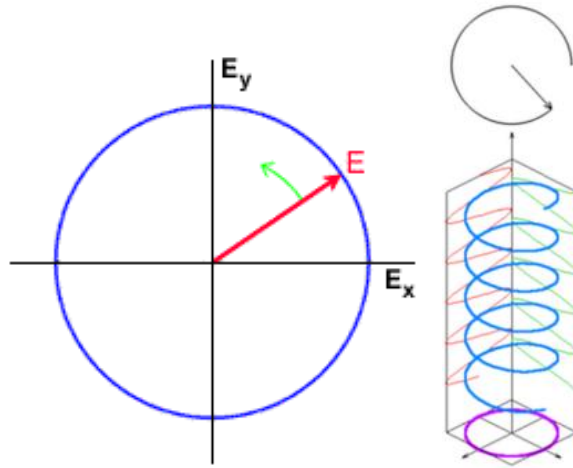


Fuente: CCRS – Radar Polarimetry- GFDL

En donde ψ es el ángulo de orientación, χ es excentricidad con función a sus semiejes mayor y menor, a y b respectivamente.

- **Polarización circular**, las componentes tienen exactamente igual amplitud pero están desfasadas 90 grados, una componente se puede anular, en el caso que la otra componente logre su máxima amplitud o también su mínimo valor de amplitud. El lugar geométrico trazado por el vector de campo corresponde en este caso a una circunferencia.

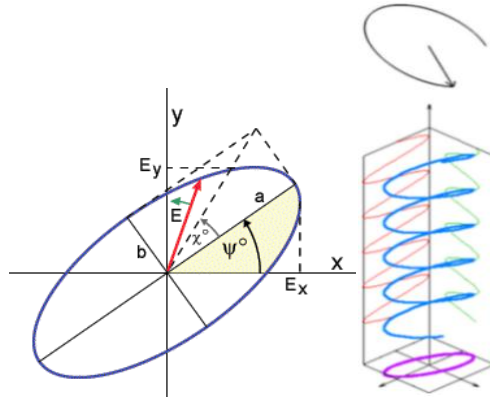
Figura 8. Polarización circular.



Fuente: CCRS – Radar Polarimetry- GFDL

- **Polarización elíptica**, el vector de campo eléctrico se ve en rojo y el lugar geométrico es representado por la circunferencia azul, estas componentes son perpendiculares a la dirección de propagación. El vector toma todos los valores lineales del lugar geométrico en un periodo de tiempo. El campo eléctrico de una onda plana se puede describir como la suma vectorial de dos componentes ortogonales, típicamente una componente horizontal y otra vertical.
- **Los dos componentes se caracterizan por sus amplitudes y por la fase relativa entre ellos.** Cuando se ve a lo largo de su dirección de propagación, la punta del vector de campo eléctrico de una onda completamente polarizada traza un patrón regular. En su forma más general, el patrón es una elipse, Globe SAR Program, 2009 [3].

Figura 9. Polarización elíptica



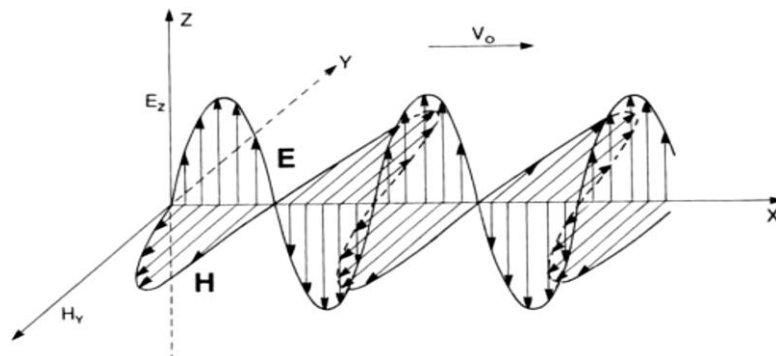
Fuente: CCRS – Radar Polarimetry - GFDL

En la polarización se toma en cuenta la orientación, la fase relativa y la periodicidad de los campos eléctricos y magnéticos de las ondas. Las antenas de los sistemas de radar se pueden configurar para transmitir y recibir radiación electromagnética polarizada ya sea horizontal o verticalmente. Sabemos que a unas cuantas longitudes de onda de la antena (del orden 10 a 20 λ para fines prácticos), la onda electromagnética puede considerarse plana. En este tipo de ondas las componentes de campo magnético y eléctrico, son en todo instante de tiempo ortogonales entre sí, y además perpendiculares a la dirección de propagación. Vega et al., 2007 [9]

2.1.1.1. Polarización Horizontal y Vertical.

En la siguiente figura podemos ver las componentes de una onda plana, con componentes E_z y H_y que viaja con velocidad v_0 en la dirección x . Vega et al., 2007 [9]

Figura 10. Componentes de una onda plana



Fuente: Constantino Vega- Comunicaciones - Universidad de Cantabria

Pérez Vega, 2007 define la polarización como el lugar geométrico trazado por el vector del campo eléctrico, en este caso E, en un plano estacionario, perpendicular a la dirección de propagación, cuando la onda atraviesa ese plano. El vector del campo en ese plano puede descomponerse en dos componentes ortogonales cuya amplitud puede ser variable en el tiempo y en el espacio. En el caso de la figura 16 el vector E está en el plano yz, siempre en la dirección z, de modo que la onda está polarizada verticalmente. Si E estuviera en el plano xy, en la dirección y, la polarización sería horizontal. Vega et al., 2007 [9].

En los sistemas de RADAR SAR se utiliza una antena que está diseñada para transmitir y recibir ondas electromagnéticas de una polarización específica. Las antenas vienen en muchas formas, en cada caso particular, las propiedades eléctricas y mecánicas de la antena son de tal manera que la onda transmitida es casi ideal con una polarización diseñada específicamente. En un sistema de radar sencillo la misma antena es a menudo configurada de manera que corresponda con la misma polarización en la recepción cuando una onda electromagnética incide sobre ella.

Las dos polarizaciones básicas más comunes son lineal horizontal (H), y lineal vertical (V); polarizaciones circulares también están en uso para algunas aplicaciones, por ejemplo, radares meteorológicos. Sus componentes básicos son denotados por R para circular mano derecha y L para circular izquierdas.

En los sistemas de radar más complejos, la antena puede estar diseñada para transmitir y recibir ondas en más de una polarización. En transmisión, ondas de diferentes polarizaciones se pueden transmitir por separado, utilizando un interruptor para dirigir la energía a las diferentes partes de la antena en secuencia (por ejemplo, el H y partes V). En algunos casos, las dos partes se pueden utilizar conjuntamente, por ejemplo, una señal polarizada circular puede ser transmitida por la alimentación de las partes H y V de la antena al mismo tiempo, con las señales de igual intensidad y una diferencia de fase de 90° . Globe SAR Program, 2009 [3].

Cuando una onda electromagnética es devuelta por un objeto debido a la reflexión, la onda de radar puede modificarse su polaridad debido al tipo de superficie, dependiendo de las propiedades físicas de la misma. Esta modificación, en ciertas regiones se puede representar de distintas formas en la imagen producida por el radar. Debido a esto, se usan diferentes escenas polarimétricas. En muchas ocasiones el tipo de superficie se puede inferir a partir de éstas imágenes. Globe SAR Program, 2009 [3].

El sistema puede transmitir y recibir polarizaciones en diferentes configuraciones dependiendo de su diseño, un sistema de radar puede por lo tanto tener los siguientes canales:

- HH - para transmisión horizontal y recepción horizontal, (HH)
- VV - para la transmisión vertical y recepción vertical (VV)
- HV - para transmisión horizontal y recepción vertical (HV)
- VH - para transmisión vertical y recepción horizontal (VH).

La primera de estas dos combinaciones de polarización se conoce como “*like-polarized*”, porque las polarizaciones de transmisión y recepción son las mismas. Las dos últimas combinaciones se conocen como de polarización cruzada debido a que la transmisión y recepción son polarizaciones ortogonales entre sí.

Un sistema de radar puede tener diferentes niveles de complejidad de polarización:

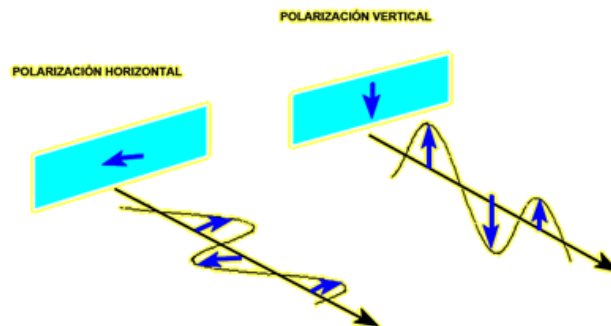
- Polarizado sencillo - HH o VV o HV o VH
- Polarización dual - HH y HV, VV y VH, o HH y VV
- Cuadripolarización - HH, VV, HV, y VH

Un radar de cuadratura polarizado (es decir, polarimétrico) utiliza estas cuatro polarizaciones, y mide la diferencia de fase entre los canales, así como las magnitudes. Algunos radares de polarización dual también miden la diferencia de fase entre los canales, esta fase juega un papel importante en la extracción de información.

La polarización múltiple es muy práctica para la identificación de terrenos y sus características particulares de cualquier superficie reflectora son:

- Alineación de estructuras con respecto al radar polarización HH y VV
- Carácter aleatorio de la reflexión difusa como en la vegetación bosques HV
- Estructuras angulares edificio, HH, VV.
- Rugosidad y reflexión en mares y océanos VV. Globe SAR Program, 2009 [3]

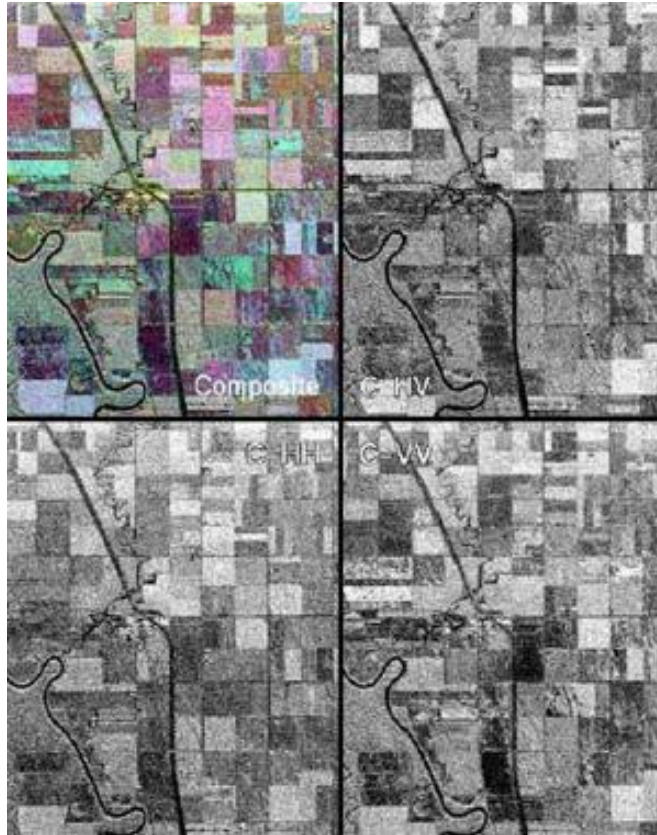
Figura 11. Polarización vertical y horizontal



Fuente: CCRS – Curso de teledetección

A continuación se muestran imágenes con los diferentes tipos de polarización.

Figura 12. Imágenes con diferente polarización

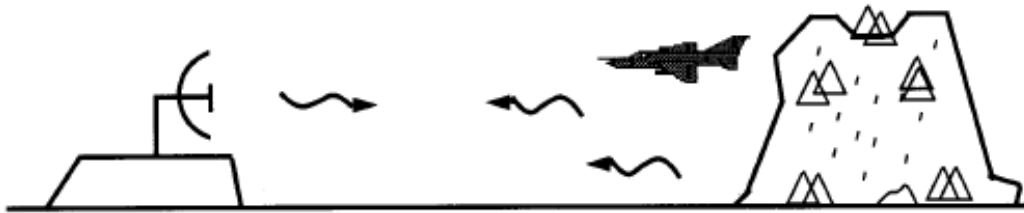


Fuente: Agencia espacial canadiense.

2.2. Radar de Apertura Sintética (SAR)

Una imagen de radar funciona de manera similar a una cámara fotográfica que proporciona su propia luz para iluminar un área y tomar una imagen. Los dispositivos de radar utilizan una antena que emite una señal y digitaliza la imagen en una computadora. Un RADAR (*Radio Detection And Ranging*) por sus siglas en inglés, básicamente es un dispositivo que detecta blancos concretos determinando su distancia y su ubicación, estos dispositivos emiten una onda de radio-frecuencia que es reflejada en los objetos y este mide el tiempo que tarda en volver una onda emitida. Con ese tiempo y conociendo la velocidad de propagación de las ondas emitidas calcula el espacio y objetos que existen entre el dispositivo y el blanco. Cervera, 2007 [10].

Figura 13. RADAR



Fuente: The Electrical Engineering Handbook.

Un radar típico de teledetección, mide la fuerza, el tiempo de ida y vuelta de las señales de microondas que se emiten desde la antena de radar y se reflejan en una superficie o un objeto distante. (Freeman, 1996) [11]

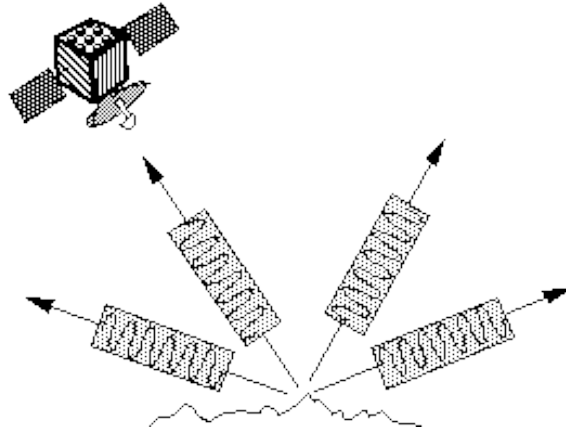
La diferencia entre un sistema SAR y un Radar de Apertura Real, es la manera como se consigue la resolución espacial. Ésta se define como la capacidad de discriminar dos blancos muy próximos situados a una distancia determinada del sistema. En el Radar de Apertura Sintética hace uso de las microondas y obtiene una resolución espacial del orden de metros. Las dimensiones de las antenas son proporcionales al tamaño de los satélites y aeronaves.

La Apertura Real de la antena se consigue desplazando el vehículo sobre el que se transporta la antena a una velocidad considerable, produciendo un ángulo entre las diferentes tomas a un mismo punto logrando así una apertura real de antena, posteriormente esta información se procesa en datos digitales obtenidos a través del efecto Doppler por el sistema SAR. Cervera, 2007 [10]

Ventajas del sistema SAR sobre otros sistemas de teledetección:

- Las nubosidad e hidrometeoros son por usual transparentes para los Sistemas SAR
- Dependiendo de la frecuencia de operación penetran el Hielo, pueden detectar el fondo oceánico de baja profundidad así como oleajes y vientos sobre el mar.
- Penetrar la Vegetación.
- Poseen alta sensibilidad a factores como rugosidad, humedad, características de los suelos y el viento.

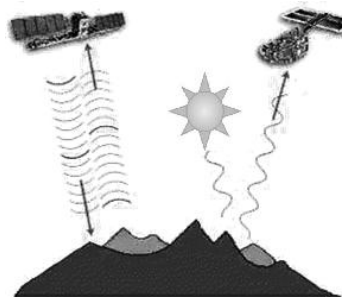
Figura 14. Radar emitiendo Ondas sobre una superficie



Fuente: JPL Nasa.

Los Radares de Apertura Sintética son sistemas activos que emiten un haz energético de microondas y registra la energía reflejada luego de interactuar con la superficie u objetos. Los radares también son denominados radiómetro activo de microondas y trabajan en una banda comprendida entre 0.1 cm y 1 m del espectro electromagnético. Estos emiten microondas en un período pequeño de tiempo y recibe los ecos provenientes de reflexiones de la señal en los objetos dando lugar a una apertura sintética, es decir, debido a la gran velocidad de desplazamiento del vehículo espacial (7,5 Km/s aproximadamente), la antena del dispositivo SAR se convierte en una antena virtual de mayor tamaño debido al Efecto *Doppler*. El blanco permanece en el haz de la antena durante unos instantes y está observado por el radar desde numerosos puntos a lo largo de la trayectoria de satélite, lo que es equivalente a prolongar la longitud real de la antena, J.L. Morales, 2012 [12].

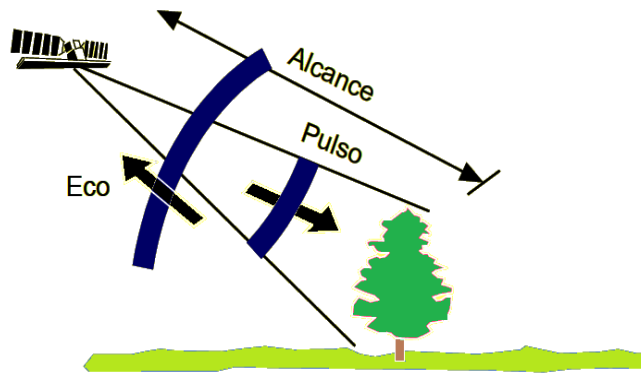
Figura 15. Sistema de teledetección Activo (Izquierda) y Pasivo (Derecha)



Fuente: Natural Resources Canadá.

A este tipo de tecnología se le conoce como teledetección la cual es la percepción remota de objetos, o terrenos. En la actualidad dicha definición se aplica para escribir las actividades que realizan algunos satélites, trasbordadores espaciales o por determinado tipo de aviones adecuados con la tecnología para la captación de imágenes SAR, Bolaños, 2001 [1]. Para la obtención de imágenes SAR se utilizan actualmente satélites estacionarios en la estratosfera. Estos son dispositivos activos es decir que permiten a partir de la emisión de microondas generar imágenes monocromáticas de alta resolución. Este dispositivo emite una señal electromagnética a intervalos síncronos de tiempo sobre un terreno en particular, la señal se dispersa en el terreno y vuelve al dispositivo, el cual detecta la intensidad de la señal recibida y el retardo desde la emisión de la señal recibida (“backscattering”).

Figura 16. Detección y localización por Radio (RADAR)



Fuente: CCRS – Radio detection and ranging.

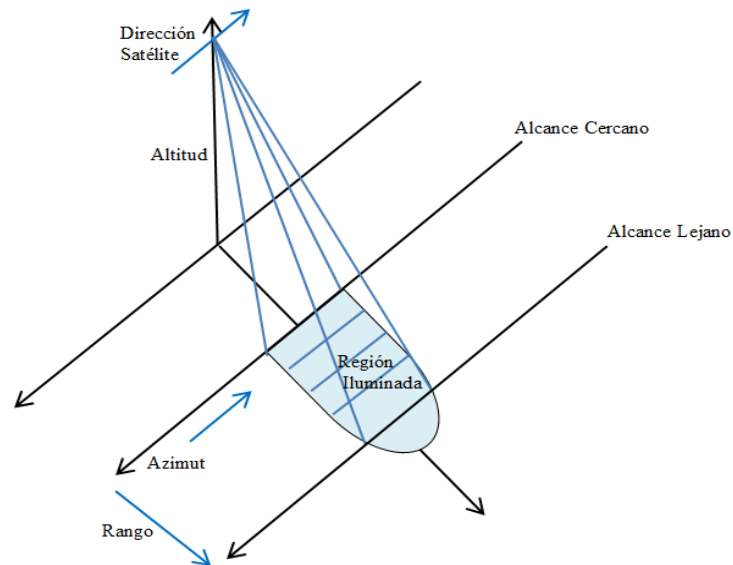
Un sistema de RADAR SAR básicamente tiene tres funciones primordiales:

- Transmitir señales de microondas hacia un objetivo.
- Recibir la energía reflejada por el objetivo o escena iluminada en un sensor diseñado para tal fin.
- Medir la intensidad de fuerza de la señal reflejada calculando el tiempo que se demora en regresar.

2.2.1. Geometría SAR.

En la figura 5 podemos observar la geometría de un radar SAR en profundidad, podemos observar los siguientes conceptos:

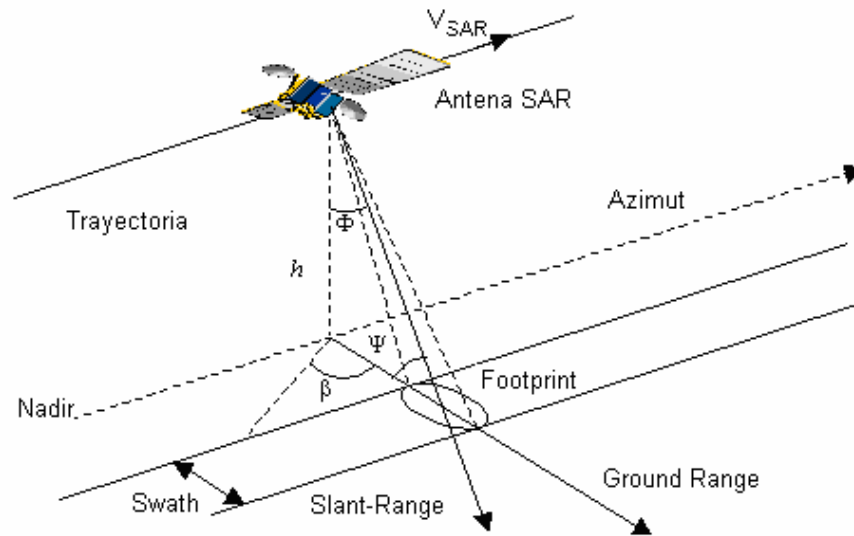
Figura 17. Geometría Básica SAR



Fuente: Los autores

- **Nadir** es la proyección del satélite sobre la Tierra.
- **Swath** corresponde al ancho de la escena iluminada por el haz de la antena del RADAR.
- **Near / Far angle** son los ángulos de inclinación correspondientes a los puntos más próximos y más lejanos cubiertos por el *swath* del RADAR.
- **Ángulo de observación** (Φ) es el ángulo en que la antena del satélite ilumina la superficie terrestre. En el caso de *Envisat* es regulable y varía entre 19 y 44° con 7 modos diferentes.
- **Range** dirección satélite, (blanco).
- **Slant Range** es la distancia desde el satélite hasta el blanco.
- **Ground Range** es la proyección del *Slant Range* sobre la superficie terrestre.
- **Squint** (β) es el ángulo con el que se modifica la inclinación de la antena para minimizar el efecto de la rotación de la Tierra sobre las medidas.
- **Ángulo de incidencia** (θ) es el ángulo que forma el vector normal a la superficie terrestre con el vector *Slant Range*, Cervera, 2007 [10].

Figura 18. Geometría de un SAR



Fuente: Di Masso, N - Universitat. Autònoma de Barcelona

2.2.1.1. Efecto Doppler.

El efecto *Doppler* describe la variación de longitud que sufren las ondas al ser emitidas o recibidas por un objeto en movimiento. Para las ondas electromagnéticas la frecuencia se ve alterada, desplazándose hacia la izquierda o la derecha dependiendo como se perciba el movimiento, la frecuencia está dada por la siguiente ecuación:

$$F = \frac{2Vr}{\Delta} \quad \text{Ecuación 1}$$

Gracias al descubrimiento de dicho efecto, hoy su uso es muy apreciado en los satélites de observación y eco localizadores, por solo dar unos ejemplos; los cambios de frecuencias son percibidos y sabemos si el objeto observado se aleja o se acerca.

2.2.2. Ecuaciones de los sistemas SAR.

Todo sistema de teledetección SAR utiliza lo que se conoce como la “ecuación del RADAR” Pérez Vega et al., 2007 [13].

Esta fórmula permite calcular la relación señal a ruido conocida por sus siglas en inglés como SNR y es básicamente el alcance máximo del sistema en función de la zona iluminada por el radar considerando el diseño del mismo, de la siguiente manera:

$$SNR = \frac{p \cdot g \cdot \delta \cdot a}{\nabla^2 \cdot f \cdot k \cdot t \cdot wb}$$

Ecuación 2

Dónde:

SNR: Relación señal a ruido

p = Potencia de transmisión

g = Ganancia de la antena de transmisión

δ = Coeficiente decaimiento del objetivo

a = Apertura efectiva de la antena de transmisión

∇ = $4\pi r^2$ donde r es la distancia entre el dispositivo y el blanco

f = Factor de ruido

k = constante de Boltzmann.

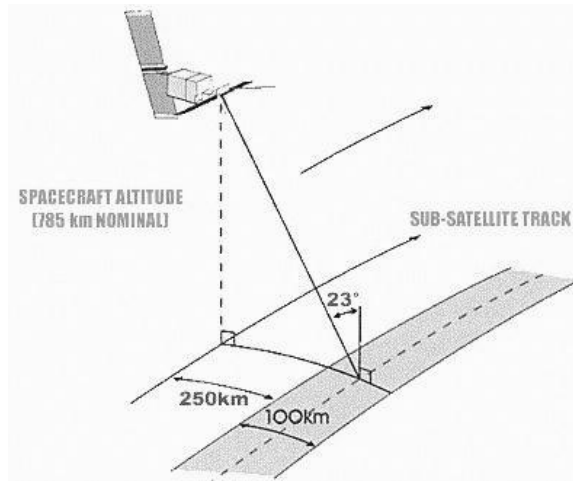
wb = Ancho de Banda

2.2.3. Polimetría mediante radares.

La polimetría se define como la ciencia que utiliza las mediciones de la matriz de reflexión difusa completa para inferir propiedades físicas de la superficie de la Tierra, Globe SAR Program, 2009 [3].

La siguiente imagen muestra el satélite Ruso ERS 1/2, en su geometría básica:

Figura 19. Satélite ERS ½

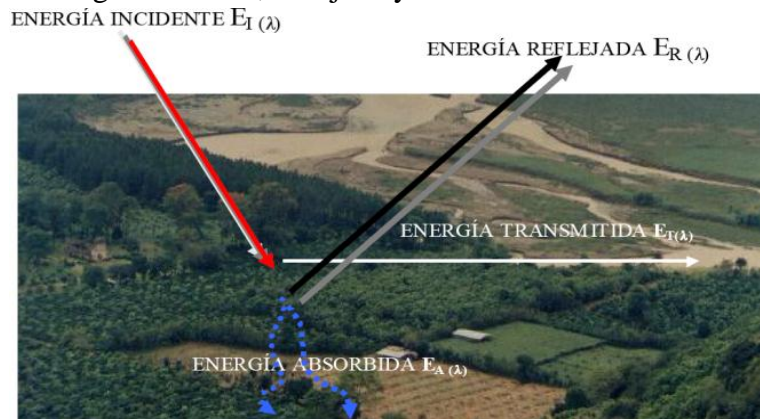


Fuente: Instituto de Investigación espacial de la academia de Ciencias de Rusia

2.3. Las Microondas con el Ambiente

La energía electromagnética que se encuentra con la materia ya sea sólida, líquida o gaseosa, se denomina *radiación incidente*. Al interactuar, pueden cambiar algunas propiedades de dicha radiación incidente: intensidad, dirección, longitud de onda, polarización y fase. Se registran y se detectan estos cambios de manera objetiva, interpretando las imágenes resultantes, los datos para determinar las características de la materia que “ha enviado información”. En la figura 19 se aprecia de forma concreta lo que acabamos de explicar. Seguidamente se describen algunos fenómenos con la atmósfera y el suelo.

Figura 20. Relación energía incidente, reflejada y absorbida.



Fuente: CCRS –Teledetección.

La relación entre energía incidente, reflejada y absorbida por la superficie terrestre

$$E_{I(\lambda)} = E_{R(\lambda)} + E_{A(\lambda)} + E_{T(\lambda)} \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

$E_{I(\lambda)}$: Energía que llega al cuerpo o superficie.

$E_{R(\lambda)}$: Energía reflejada por el cuerpo o superficie.

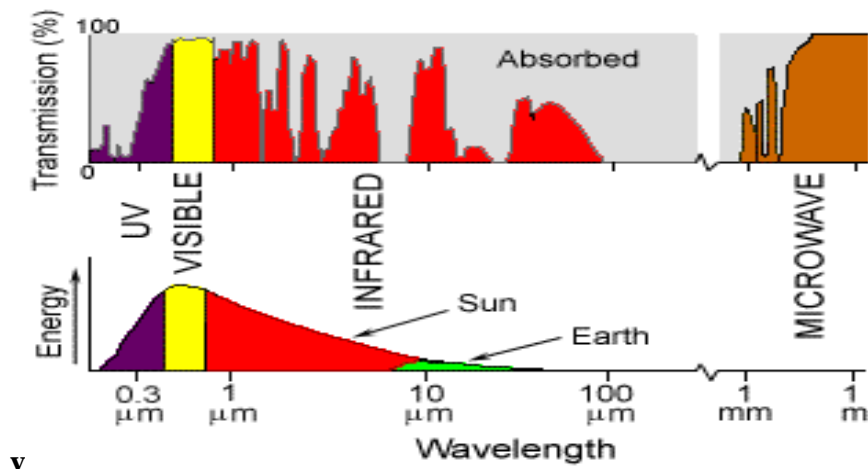
$E_{A(\lambda)}$: Energía absorbida por el cuerpo o superficie.

$E_{T(\lambda)}$: Energía transmitida por el cuerpo o superficie.

2.4. Espectro de los materiales en la superficie terrestre

Como ya sabemos los sensores remotos miden la energía proveniente de un objeto de la superficie terrestre, en varios rangos predeterminados, de diferentes longitudes de onda. Pero algunas consideraciones tecnológicas, la dispersión de las partículas en la atmósfera terrestre y la importancia de los datos obtenidos, hacen que se excluyan ciertas longitudes de ondas. Cada rango de longitud de onda tiene su propia respuesta y el uso depende de la información que aporta luego del proceso de interpretación espacial. Por esta razón existen sistemas satelitales para operar en un determinado rango espectral y que además proveen datos complementarios a otros sensores.

Figura 21. Ventanas Atmosféricas.

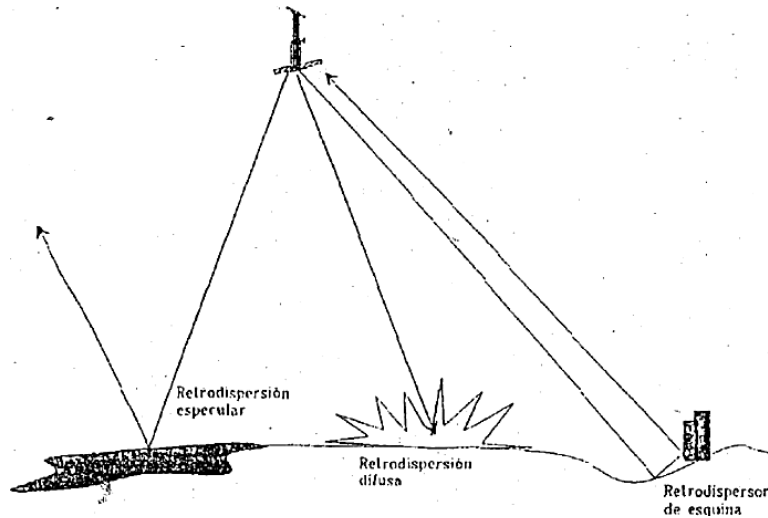


Fuente: Chuvieco, 2000.

La figura 20 indica los rangos comúnmente utilizados en teledetección, siendo un punto de partida para distinguir los sensores que nos interesan, a los cuales clasificaremos nuestros

filtros, ya que corresponden únicamente a la región de las microondas y los fenómenos físicos que se presentan cuando interactúan con terrenos y con la atmósfera de por medio. Según la naturaleza del sustrato, el haz principalmente se dispersa hacia la atmósfera, como es el caso del suelo; se dispersa hacia el propio objeto, como es el caso de la vegetación; o se refleja especularmente, como es el caso del agua. El radar registrará una señal de retorno muy distinta. Este flujo viene determinado por el coeficiente de retro-dispersión, análogamente a la Reflectividad en el espectro visible. Ver figura 21:

Figura 22. Distintos tipos de retro-dispersión



Fuente: Campbell, 1987.

Muchos factores “medioambientales”, influyen en la señal que detecta el sensor. Los más importantes son: la rugosidad y geometría del terreno, el ángulo de incidencia del flujo y su polarización. Estos factores hacen que varíe el coeficiente promedio de cada tipo de cubierta, concretamente su conductividad o constante dieléctrica.

Con estos factores llegamos a la ecuación fundamental del radar, similar a la mencionada anteriormente:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 h}{(4\pi)^3 r^4} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

P_r = Potencia retro - dispersada

P_t = Potencia emitida por el radar
 G = Factor de ganancia de la antena
 r = indica la distancia entre el sensor y la cubierta
 h = sección eficaz de retro – difusión

Y este último factor h , es el de mayor complejidad porque depende de la rugosidad del material y sus condiciones dieléctricas, las condiciones del terreno, como son pendiente y orientación frente al flujo emitido.

La rugosidad incide en la señal de retorno. Más adelante mencionamos, cómo depende este elemento de la longitud de onda, si es mayor o menor, consecuentemente de la frecuencia, si es alta o baja. Para esto existe el criterio de Rayleigh y el de Fraunhofer, que consideran en últimas, que un terreno aparecerá más liso cuanto se trabaje en longitudes de onda mayores, y/o con ángulos de incidencia mayores.

Criterio de Rayleigh:

$$h < \lambda/8 \cos \alpha \quad \text{Ecuación 5}$$

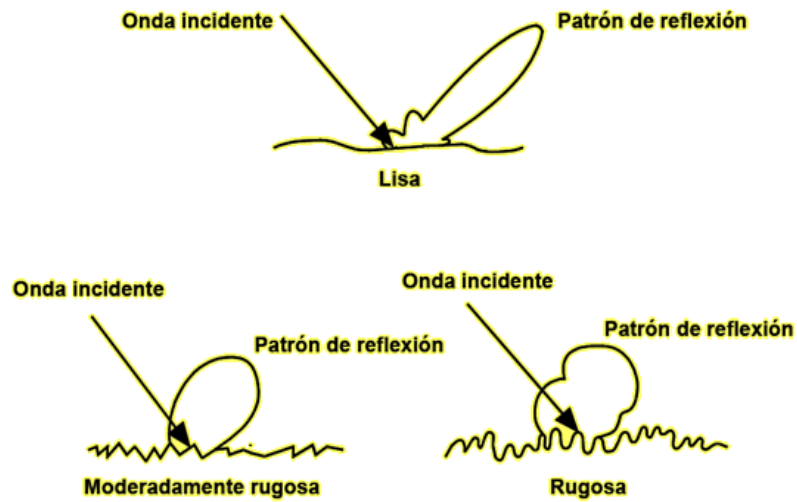
Criterio de Fraunhofer, para superficies donde $\lambda \cong \sigma$

$$h < \lambda/32 \cos \alpha \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

h = raíz cuadrática media de las alturas
 α = ángulo de incidencia
 λ = longitud de onda

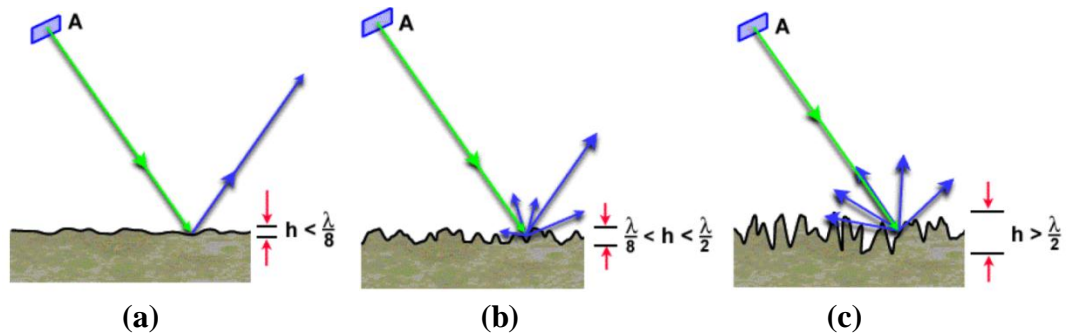
Figura 23. Patrones de reflexión de las microondas



Fuente: CCRS – Curso de teledetección

Esta relación es muy importante, ya que en una superficie que aparece como rugosa, la dispersión de retorno se dirige a todas las direcciones y el sensor capta una fuerte señal. En cambio, si aparece lisa, la reflexión tiende a ser especular y la señal de retorno puede llegar a ser prácticamente nula. En las figuras 22 y 23 se puede apreciar claramente esta explicación. Como lo mencionaremos adelante, es por esto que las masas de agua aparecen oscuras en una imagen de radar.

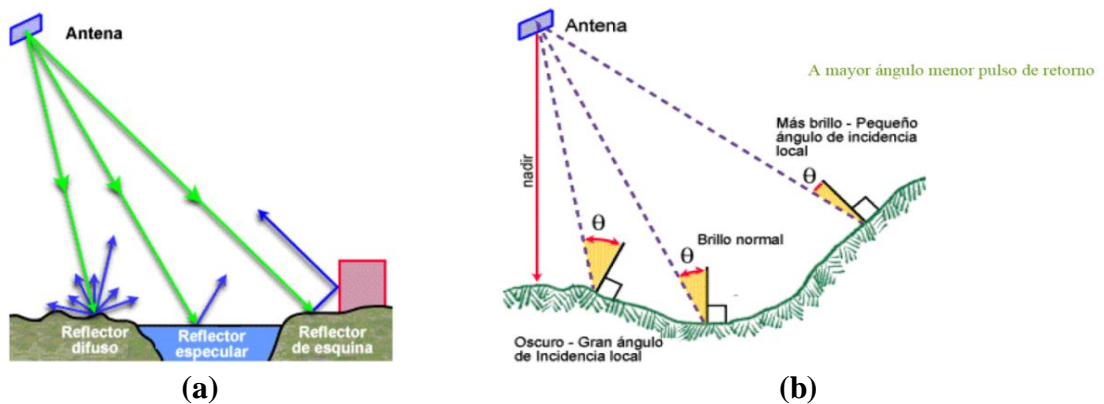
Figura 24. Rugosidad y Longitud de onda



Fuente: Sandra Bolaños, Generación de modelos digitales con imágenes RADAR SAT, por el método radiométrico.

Las características eléctricas de la cubierta y la geometría de observación influyen directamente en la señal que retorna al sensor. Una de las variables a tener en cuenta es la constante dieléctrica, la cual trata de medir la Conductividad y la Reflectividad de un tipo de material. En general, los materiales poseen una constante dieléctrica entre 3 y 8, en cambio el agua ofrece un valor de 80. Por consiguiente, la presencia de agua en el suelo o la vegetación puede alterar el pulso de retorno, que tiende a ser mayor que en los suelos secos, pues casi siempre la vegetación está cargada de humedad. Las superficies metálicas ofrecen valores de retro-difusión bastante elevados. En cuanto a la geometría del terreno, pendientes y orientaciones del ángulo de incidencia del radar se consideran el caso de las zonas urbanas, porque se obtienen señales de retorno intensas, debido a la presencia de los “reflectores de esquina” que cambian la trayectoria de la señal incidente retornándola en la misma dirección de origen. El ángulo de incidencia también influye en el coeficiente de retro-difusión. A mayor ángulo, menor el pulso de retorno, porque la dispersión también será menor. Si ocurre un ángulo de incidencia bajo con un ángulo largo, el pulso del radar puede penetrar a una cierta profundidad, obteniendo información sobre fondos de vegetación y suelos. Ver figura 24.

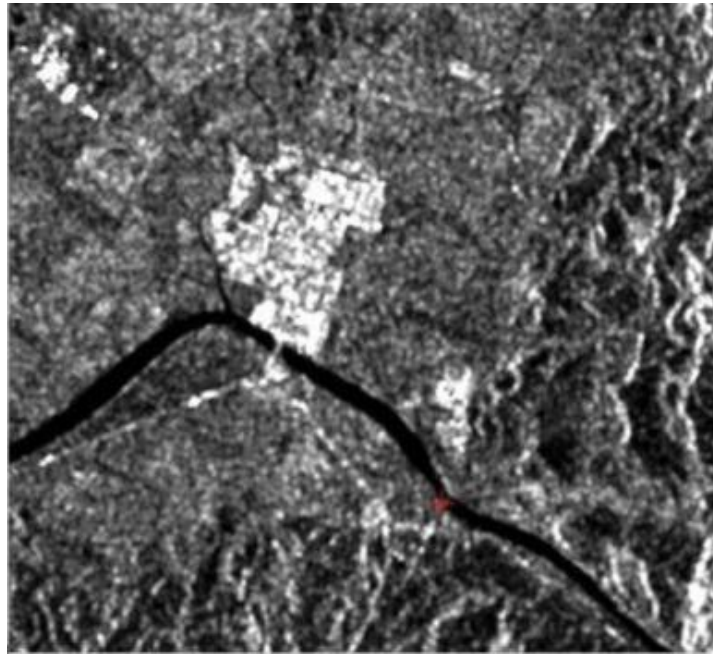
Figura 25. Ángulo de incidencia



Fuente: CCRS – Curso de Teledetección

Igualmente la información morfológica que se obtiene del radar depende del ángulo de incidencia; con ángulos bajos el efecto de sombra se realiza notablemente así como las deformaciones geométricas. La sombra es relativa a la orientación de la antena. Si la trayectoria del sensor varía, se pueden conseguir efectos estereoscópicos. Es una reconstrucción en 3D.

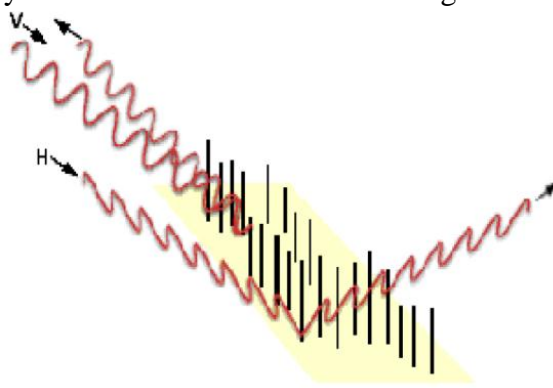
Figura 26. Reflectividad del municipio de La Virginia – Colombia.



Fuente: RADARSAT, destaca el casco urbano, el puente, las casas al borde de las carreteras de acceso y otras infraestructuras.

La polarización, ya expuesta anteriormente, se refiere a la forma como son transmitidas las señales de radar. Una señal polarizada indica que su vibración se restringe a una dirección determinada; la dirección con que la señal está polarizada influye en el flujo de retorno, porque el eco del radar es selectivo a la dirección de propagación. Chuvieco, 2000 [14].

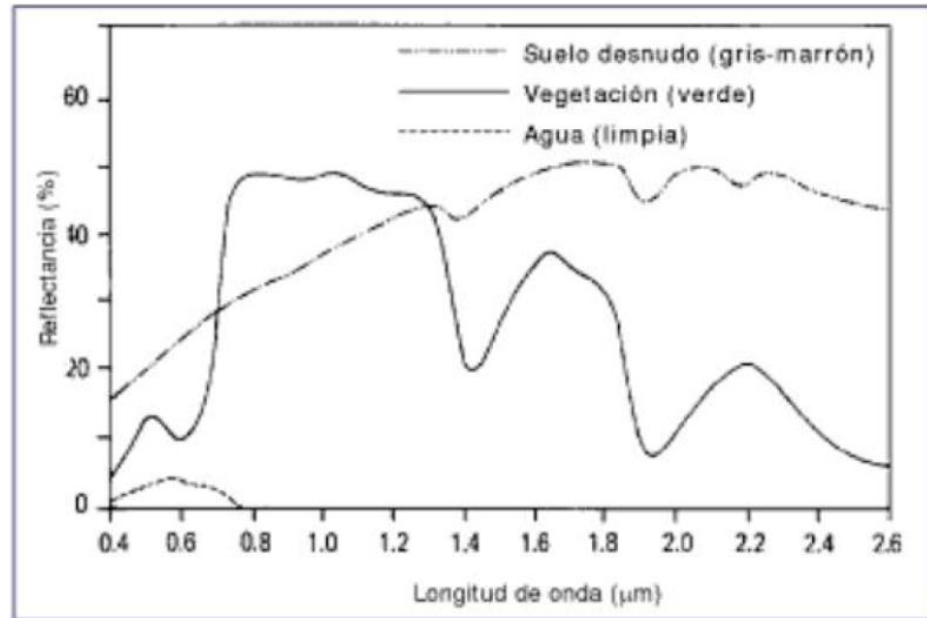
Figura 27. Polarización y reflexión de las ondas electromagnéticas.



Fuente: Principios de Teledetección, Chuvieco, 2000

La superficie de la tierra está recubierta por materiales muy diversos, repartidos de manera heterogénea sobre ella. Cada uno igualmente con comportamiento diferente. En este apartado estudiaremos el comportamiento espectral de tres grandes cubiertas presentes en la superficie de la Tierra. Vegetación, litología, suelos y agua. Ver figura 25.

Figura 28. Curvas de reluctancia espectral correspondientes a distintos materiales



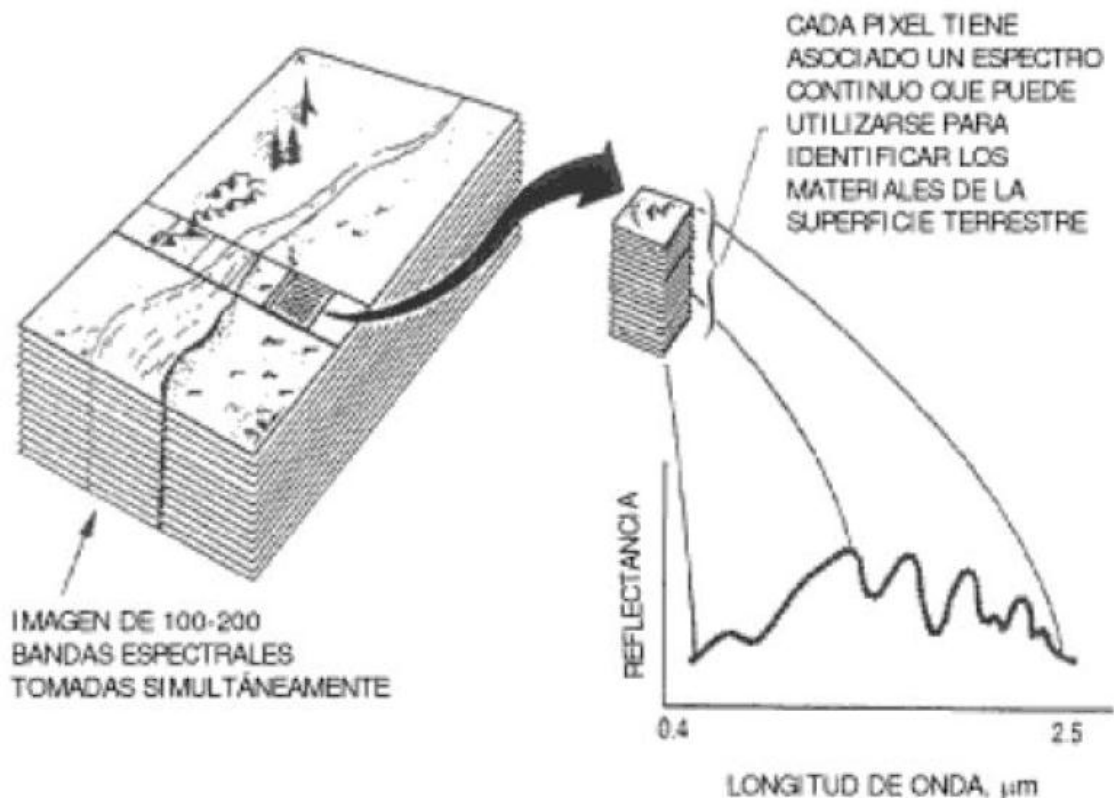
Fuente: Chuvieco, 2000.

Los sensores incorporados en las plataformas tanto aéreas como espaciales tienen detectores, con la función de captar longitudes de onda de un intervalo específico. Entonces existen sensores como el LANDSAT 5-TM con siete detectores a los que se reciben siete imágenes diferentes, llamadas bandas, tomadas de manera simultánea; esto se conoce como imágenes multiespectrales. Esto significa que para cada pixel o porción del terreno se toman siete datos, pudiéndose representar la curva espectral de esa porción de terreno.

En los últimos años se han venido desarrollando otra clase de sensores llamados hiperespectrales, dotados con muchos detectores capaces de generar imágenes tomadas en muchos intervalos de longitudes de onda, como por ejemplo el AVIRIS, con 224 detectores. Entiéndase entonces que para cada pixel existen 224 datos, para reconstruir fielmente la curva espectral de cada porción de terreno.

En la figura 27 podemos entender de qué manera se manipulan las imágenes captadas por los sensores de microondas, para referirnos al término celda, matriz de referencia o patrón de trabajo, que se convertirá en lo que venimos analizando como pixel.

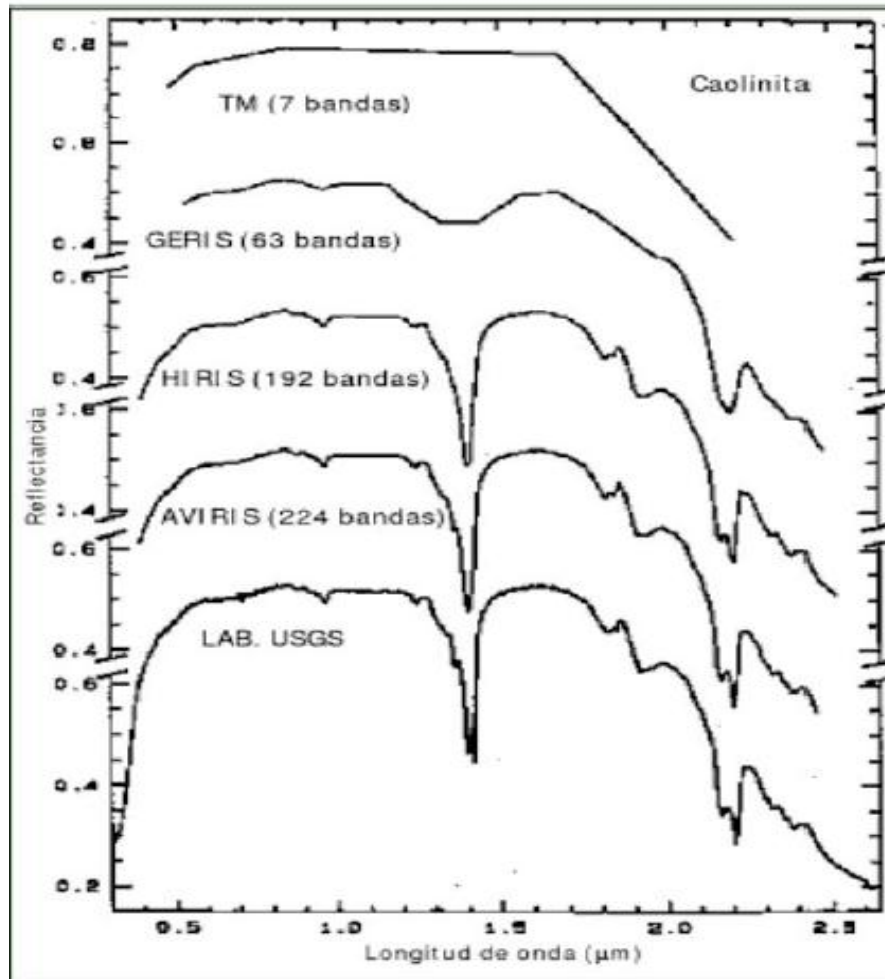
Figura 29. Concepto de imagen hiperespectral



Fuente: ENVI, 1997

Con la siguiente figura se puede ver cómo se reconstruyen las curvas espectrales de una porción de terreno o pixel, predomina la presencia de caolinita según el uso de sensores con distinto número de bandas. Esto se obtiene comparando con la curva espectral que se obtiene en laboratorio.

Figura 30. Reconstrucción de la curva espectral



Fuente: ENVI, 1997.

2.4.1. Comportamiento espectral de la vegetación en la región de las microondas.

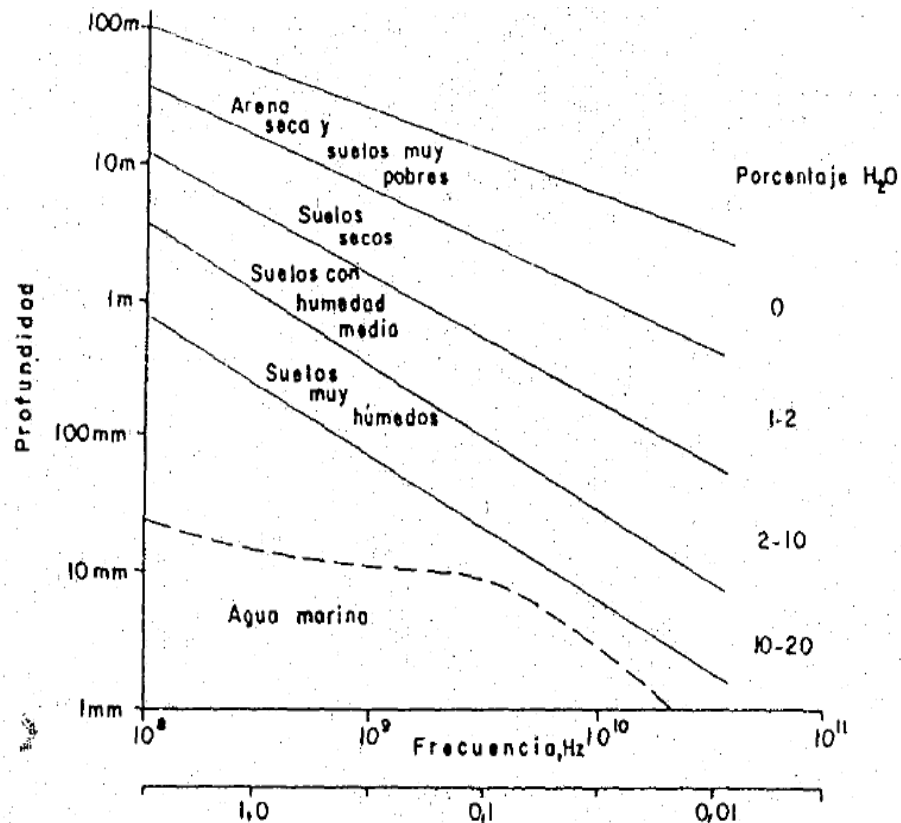
La curva espectral de la vegetación muestra valores relativamente bajos en las regiones del rojo y del azul del espectro visible, con un pico en la banda espectral del verde. La Reflectancia aumenta bruscamente en el infrarrojo cercano (debido a la estructura interna de las hojas). A partir de 1,35 m. la Reflectancia va disminuyendo, estando principalmente controlada por el contenido en agua de las hojas. Para distinguir entre varios tipos de vegetación y evaluar las tasas de crecimiento a partir de imágenes de satélite es necesario usar multitemporales.

Tres elementos que influyen al interactuar las microondas: La rugosidad, porque depende del tamaño, la forma, la orientación y el número de hojas. La conductividad, porque la constante dieléctrica es bastante alta y constante para la mayor parte de las masas vegetales; y además se incrementa debido a la humedad y la época de crecimiento. Y la polarización, en suelos secos hace que la profundidad de penetración sea mayor y de manera semejante (HH) o (VV); y que sea menor en suelos húmedos y de manera cruzada (HV), (VH).

2.4.2. Comportamiento espectral del suelo en la región de las microondas.

También tres aspectos a mencionar: Los suelos secos y rugosos tienen un mayor coeficiente de retro-difusión, aparecerán entonces en tonos claros en el radar. (si la señal se reduce, quiere decir que se trata de suelos más húmedos). Para este tipo de suelos con longitud de onda (λ) larga, la capacidad de penetración alcanza hasta varios metros, ver figura 29. La población, también aparecen con unos tonos claros debido a su alta rugosidad. Son núcleos de longitudes largas. Meliá, et al., 1987 [15].

Figura 31. Humedad del suelo y capacidad de penetración a distintas longitudes de onda



Fuente: J.W. Travett, 1996

2.4.3. Comportamiento espectral del agua en la región de las microondas

Varias consideraciones:

- Con las microondas se proporciona una capacidad de penetración, cuando el ángulo de incidencia sea bajo y se trabaje con longitudes de onda largas.
- El agua generalmente refleja el pulso recibido, aunque el retorno es bastante bajo.
- El oleaje se puede manifestar en la imagen de radar, porque se entiende como una rugosidad superficial, siempre que el ángulo de incidencia sea bajo, ver figura 30.

Figura 32. Distinción de la población y el oleaje de las costas, los Ángeles (California)



Fuente: CCRS – Curso de Teledetección

2.5.

2.6. Las microondas con la atmosfera y el suelo

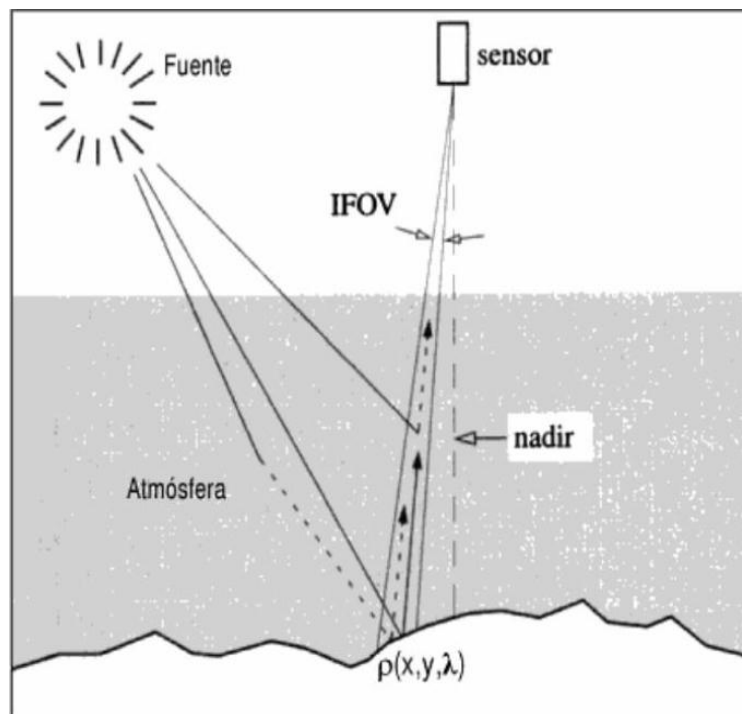
La energía que recibe un sensor desde un objetivo de interés debe pasar a través de la atmósfera. Los componentes gaseosos y las partículas de materia dentro de la atmósfera, pueden afectar la intensidad y la distribución espectral de la energía y pueden impedir la observación de características de la superficie. A continuación una breve explicación de algunos fenómenos que suceden al respecto, nos apoyamos en imágenes que muestran de manera más explícita el sentido de cada fenómeno.

2.6.1. Reflectancia.

Es un parámetro físico como función de un punto del terreno (x,y) en una longitud de onda (λ) dada, depende de la irradiancia proveniente de la fuente de iluminación, en este caso el sol, y también depende de la radiancia, la cual se establece del punto al sensor, figura 31.

Como medio de propagación se encuentra la atmósfera que absorbe energía y la esparce a diferentes direcciones. Esto se conoce como *scattering*.

Figura 33. Propagación de la radiación en un sistema de teledetección



Fuente: R.A. Schowendgerd, 1997.

2.6.2. La Difracción.

Es otro fenómeno que se presenta sobre todo en lo que se refiere a imágenes de radar porque depende del ángulo (λ) con que se abre la onda y el diámetro del emisor o receptor de la misma. Este fenómeno afecta el tamaño angular de un punto sobre el terreno ya que si es demasiado grande significa pérdida de resolución espacial.

La técnica SAR permite sintetizar electrónicamente diámetros de antena del orden de Km., porque disminuye el ángulo y aumenta la resolución.

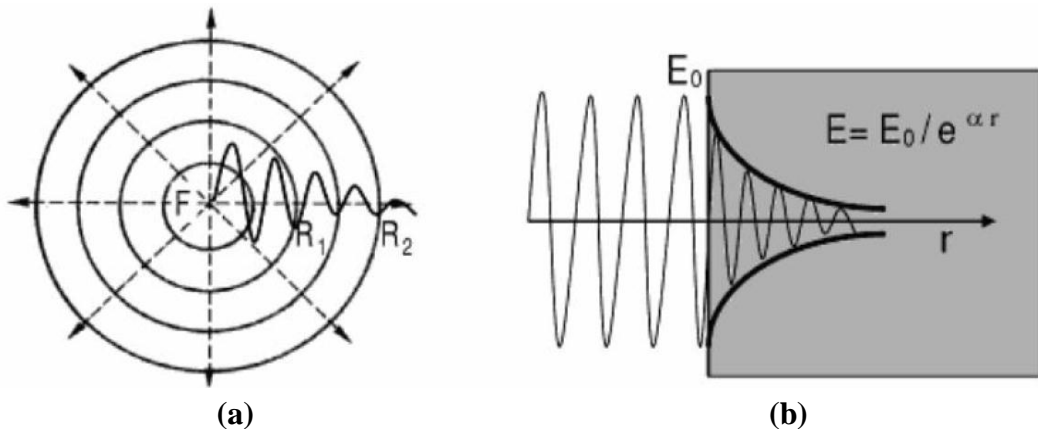
2.6.3. La Atenuación de la Radiación.

La atenuación de la radiación con la distancia recorrida desde la fuente al receptor. Se trata en realidad de una atenuación geométrica, ya que la intensidad de la onda disminuye según la expresión:

$$E = \frac{\phi}{4\pi R^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde R es la distancia del foco emisor; y ϕ la potencia o flujo de la onda emitida. Para esto se tienen detectores muy sofisticados de gran sensibilidad.

Figura 34. Esquema de la Atenuación Geométrica



Fuente: Pérez y Muñoz.

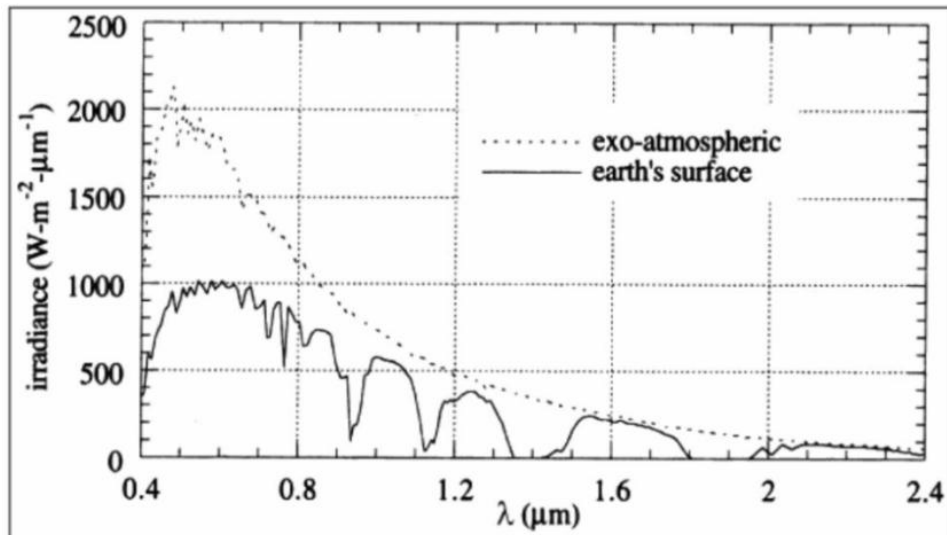
En la figura anterior al alejarnos una distancia R del foco F emisor de la onda (izquierda) y de la atenuación exponencial según un coeficiente al viajar en un medio absorbente una distancia r (derecha), a continuación la ecuación de intensidad de la onda atenuada, dependiendo de r es:

$$E = \frac{E_0}{e^{\alpha r}} \quad \text{Ecuación 8}$$

2.6.4. Atenuación por absorción de moléculas atmosféricas.

Se trata de una disminución exponencial de la intensidad de la onda y depende de la distancia del medio absorbente que atraviesa. Para el agua y el espectro visible, este factor es bastante elevado; para la atmósfera es mucho menor: ver Figura 33.

Figura 35. Comparación de la irradiación solar antes y después de atravesar la atmósfera



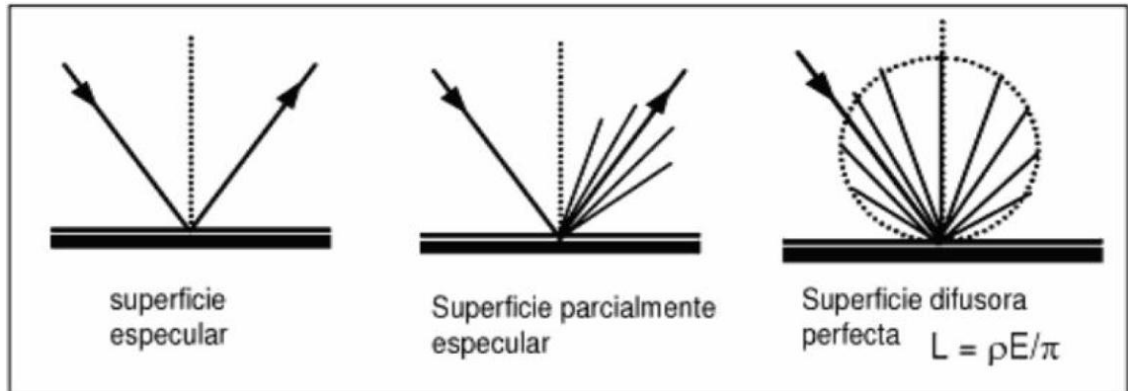
Fuente: Schowendgerdt, 1997.

2.6.5. Comportamiento de la radiancia de las superficies materiales.

Aunque estos materiales se comportan dentro de dos opciones de acuerdo al ángulo de incidencia, máxima en la normal y mínima en la tangencial de la superficie, la radiancia L ,

el cual es el flujo de energía emitido por unidad de área perpendicular y de ángulo sólido, ver Figura 34.

Figura 36. Comportamiento radiactivo de las distintas superficies



Fuente: Pérez y Muñoz, 2006 .

En la anterior figura se observa la superficie especular, típica en superficies reflectantes como los espejos. A continuación se observa la ecuación de radiancia o flujo de energía emitido por unidad de área.

$$L = \frac{\rho E}{\pi} \quad \text{Ecuación 9}$$

2.6.6. Irradiancia E

Es el flujo o potencia de la radiación en la superficie que recibe ese flujo. Se debe considerar la influencia que tiene el tamaño de la superficie sobre el que recae. Si los rayos que llegan a la superficie de manera perpendicular al área (A) no tienen igual tamaño si están orientados con alguna inclinación θ , ver figura 35.

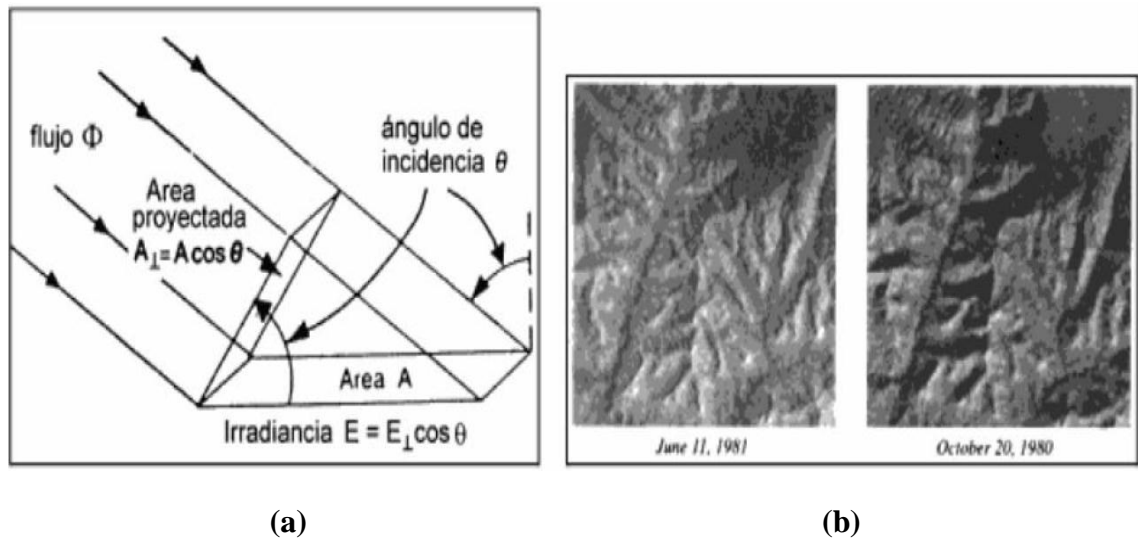
El factor entre una y otra área es el coseno del ángulo θ de incidencia, respecto a la perpendicular del terreno. Este factor coseno depende del relieve (inclinación del terreno) y la inclinación de los rayos de la fuente.

Esto se conoce como *clinometría* de radar. Cálculo de la irradiancia, dependiente del ángulo:

$$E = E_{\perp} \cos \theta$$

Ecuación 10

Figura 37. Influencia de la inclinación de la radiación sobre el terreno



Fuente: Pérez y Muñoz, 2006.

En la Figura 35, dos imágenes del Gran Cañón. En Junio, la elevación solar de 65° incrementa la irradiancia frente a los 38° de octubre. Por la comparación de ambas en cada pixel se puede extraer el relieve y la elevación del terreno (clinometría). Fotos LANDSAT MSS (Schowendgerdt, 1997) [16].

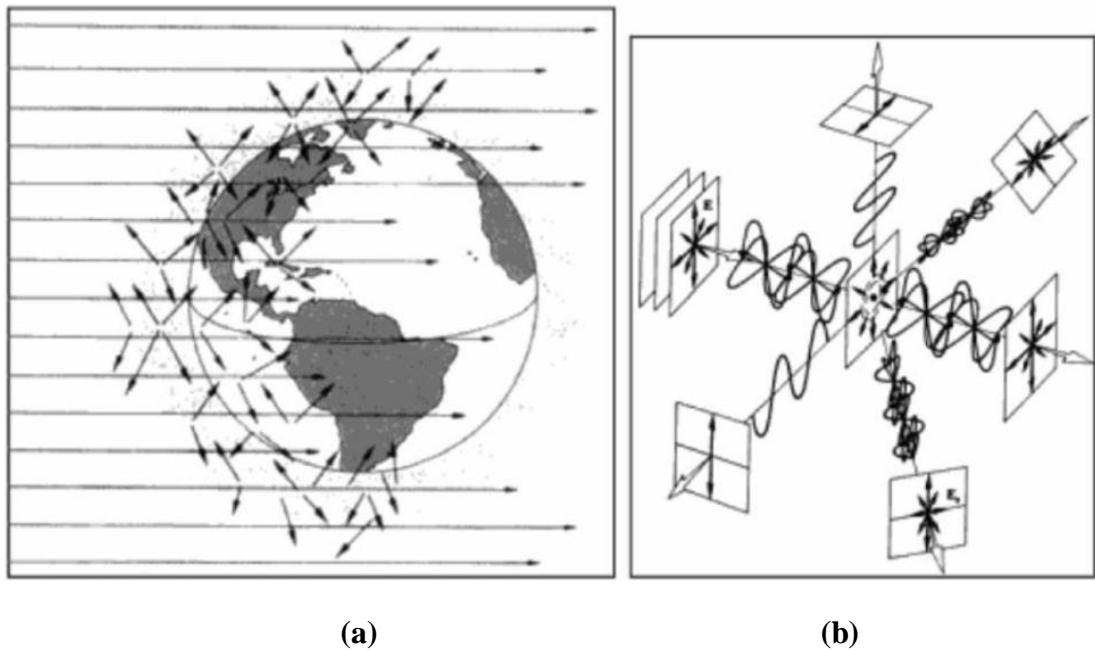
2.6.7. Factor Scattering.

Es el esparcimiento en todas las direcciones de la radiación, debido a las moléculas atmosféricas. Ver Figura 36. La intensidad del scattering sigue la ley de Rayleigh que establece una dependencia con la cuarta potencia de la frecuencia de la onda. Cuando enviamos luz blanca, luz visible, aquellas ondas de mayor frecuencia (λ **menor**) se esparcen mucho más que las ondas de menor frecuencia (λ **mayor**).

Esta es la razón por la cual el cielo tiene un color azul. Los fotones azules de mayor frecuencia se dispersan por causa de la retrodispersión (scattering) por toda la atmósfera.

Los atardeceres y amaneceres se aprecian de color rojo porque la menor frecuencia de este al dispersarse, se ve cuando el sol está muy bajo en el horizonte. En esta misma línea, se entiende por qué en los satélites se distinguen de color negro las aguas y los océanos. Los fotones azules se pierden en la atmósfera y no llegan al detector.

Figura 38. Visualización del scattering atmosférico



Fuente: Pérez y Muñoz

En la figura 36, la parte derecha representa una molécula atmosférica (punto central) vibrando con la radiación E incidente de la fuente y remitiendo esta radiación en diferentes direcciones, en particular en la misma que traía proveniente de la fuente. En la parte izquierda se visualiza el esparcimiento más intenso de las altas frecuencias en la atmósfera que provoca su característico color azulado. Hecht, 2001 [17].

2.6.8. Disminución en el contraste de las imágenes

Es el aspecto más relevante del scattering cuando ocurre una superposición de la radiación difusa de las moléculas atmosféricas, sobre la radiación que proviene de cada punto del terreno en dirección al sensor. Para esto se necesitarán filtros para estas frecuencias en el sensor y filtros de polarizaciones que se cruzan a raíz de la dispersión, Pérez et al., 2006 [18].

A manera de conclusión podemos afirmar que las imágenes generadas a partir de datos obtenidos mediante Radar de Apertura Sintética (SAR) proveen valiosa información sobre recursos naturales, permitiendo el monitoreo del medio ambiente y el conocimiento de ecosistemas. También es posible evaluar efectos de la acción del hombre tales como deforestación, cultivos y embalses. Las ventajas que poseen este tipo de imágenes sobre las imágenes generadas por sensores ópticos y casi-ópticos convencionales son las siguientes:

- Independencia de la luz solar: el radar de imágenes posee un sistema de iluminación propio que permite la adquisición tanto de día como de noche.
- Independencia de las condiciones climáticas: la radiación electromagnética a las frecuencias de operación de los sistemas SAR atraviesa las nubes sin atenuación, por lo tanto el clima no es una limitación en el proceso de adquisición de imágenes.
- Operación en diferentes polarizaciones: Esto permite obtener distintos tipos de información sobre un mismo objetivo.

Algunas aplicaciones son:

- Planeamiento y monitoreo agrícola.
- Identificación, mapeo y fiscalización de cultivos agrícolas.
- Detección de claros en zonas de forestación.
- Determinación relativa de la humedad de los suelos; eficiencia de sistemas de irrigación.
- Detección de manchas de petróleo en el mar.
- Detección y seguimiento de icebergs en zonas de tránsito marítimo.
- Topografía del fondo oceánico.
- Climatología.
- Análisis de estructuras geológicas (fracturas, fallas, pliegues y foliaciones).
- Evaluación del potencial de los recursos hídricos superficiales.
- Identificación de áreas para prospección mineral, Gambini, 2006 [19].

2.7. Teoría de imágenes.

La fotografía es la técnica para capturar imágenes duraderas, RAE, 2013 [4], debido a la acción de los fotones sobre una película o un dispositivo fotosensible. Una imagen se puede definir como la representación digital o análoga de la percepción visual en todo el rango del espectro, que tiene una apariencia muy similar al mundo real, con lo cual la imagen proporciona una descripción de la misma. Es decir que la imagen es la representación de objetos los cuales son registrados a través de su energía radiante, por ejemplo la luz, infrarrojo o microondas. Por tanto la conformación de una imagen requiere una fuente de radiación, un objeto o cuerpo y un sistema de formación.

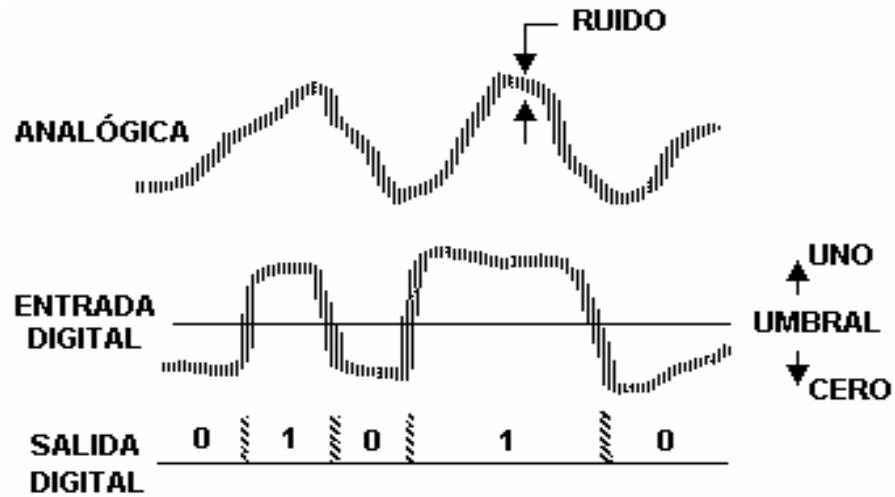
El sistema de formación se entiende como los mecanismos o procesos para captar y comprender la radiación reflejada o proyectada por un cuerpo básicamente existen tres tipos: natural o biológica, que es la visión de los seres humanos y animales; fotoquímicas como las cámaras fotográficas analógicas y por último electrónicos como los aparatos con sensores digitales tales como cámaras, computadores, satélites entre otros. Todos los sistemas nos entregan imágenes análogas, sin embargo con el avance de las últimas décadas en la electrónica digital, el último sistema nos permite obtener imágenes digitales que pueden ser comprendidas por las computadoras y tratadas por programas de ordenador, De la Rosa, 2007 [20].

El ojo humano solo ve un pequeño segmento del espectro electromagnético, por lo que el hombre utiliza otros dispositivos tecnológicos para captar lo que la visión humana no capta. El espectro electromagnético se define como el rango de todas las posibles frecuencias de la radiación electromagnética, NASA, 2004 [21].

La mayor diferencia de una imagen de radar con una imagen de fotografía, es la dependencia de la luz. Un dispositivo de fotografía es un elemento pasivo, es decir tan solo capta la luz proveniente de un objeto, sin embargo las imágenes SAR son captadas mediante un dispositivo activo que produce su propia radiación, tiene una fuente y por medio de una antena dispara ondas electromagnéticas que impactan en la superficie y se devuelven a un sensor que captura las ondas transformando estas señales en una imagen coherente.

Su independencia de la luz y la capacidad de atravesar las nubes, vegetación, nieve y aun los suelos, convierten a esta tecnología indispensable en la obtención de imágenes satelitales de cuerpos celestes y de nuestro planeta tierra. Freeman, 1996 [11].

Figura 39. Procesamiento digital de una imagen

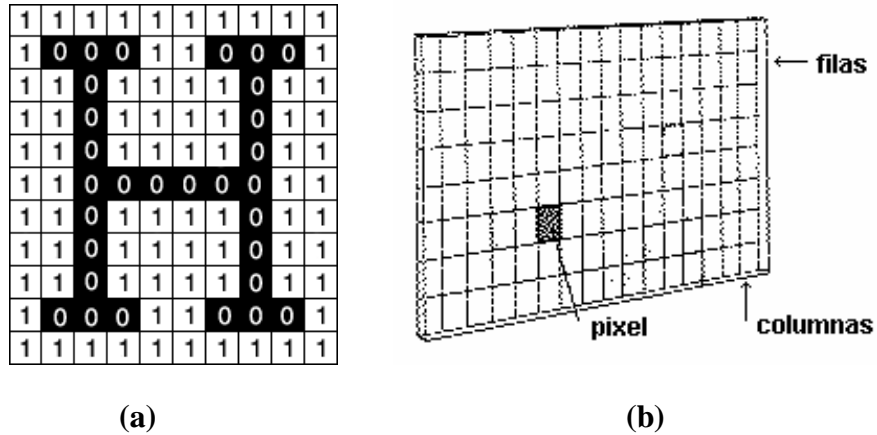


Fuente: Procesamiento digital de imágenes ITP

Para lograr obtener una imagen que pueda ser comprendida por un computador es necesario realizar un proceso denominado digitalización, Se realiza una muestra de la imagen digital y se confecciona un mapa de ella en forma de cuadrícula de puntos o elementos de la figura (píxeles).

A cada píxel se le asigna un valor tonal (negro, blanco, matices de gris o color), el cual está representado en un código binario (ceros y unos). Los dígitos binarios ("bits") para cada píxel son almacenados por una computadora en una secuencia, y con frecuencia se los reduce a una representación matemática (comprimida). Luego la computadora interpreta y lee los bits para producir una versión analógica para su visualización o impresión, Cornell University Library, 2003 [22].

Figura 40. Digitalización de una imagen



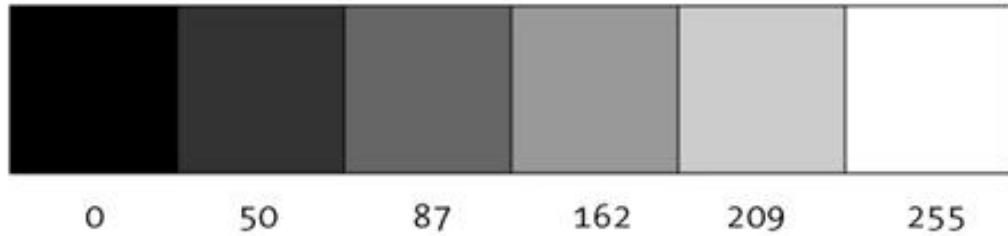
Fuente: Procesamiento digital de imágenes ITP- De las Rosas R.

En las anteriores graficas se observa una imagen bitonal donde a cada píxel se le asigna un valor tonal, para este ejemplo asignamos 0 para el negro y 1 para el blanco. En este proceso los resultados pueden ser de un único valor llamado escala de grises o bien un vector con tres valores por polígono, lo que se conoce como RGB, los cuales corresponden a la intensidad de color rojo (R), verde (G) y azul (B). En la escala de colores también hay un rango discreto (ejemplo, 8bits = 256 valores).

Las imágenes en escala de grises con sólo 2 colores: blanco y negro (0 y 1, respectivamente), se llaman imágenes binarias, en el presente trabajo analizaremos las imágenes en escala de grises que son las que se generan por los radares de apertura sintética. En una imagen en escala de grises el valor de cada píxel se encuentra en una sola tonalidad en la que solo se muestra la intensidad de la información de la imagen, y varía del negro a una intensidad más fuerte en blanco. Johnson, 2003 [23].

El color, para un computador es una serie de números. En el caso de imágenes en escala de grises 0 significa negro y 255 significa blanco. En medio, cada uno de los números tal como 50, 87, 162, 209, y así sucesivamente es un tono de gris que van desde el negro al blanco. Processing Software, 2012 [24].

Figura 41. Valores en escala de grises.



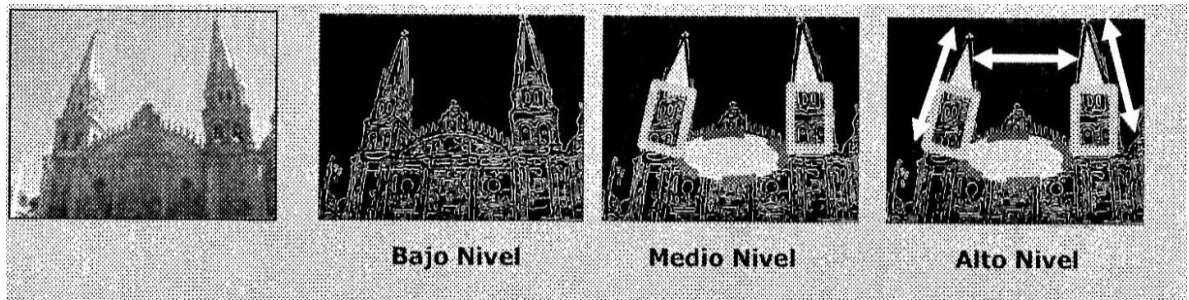
Fuente: Procesamiento digital de imágenes ITP- De las Rosas R.

Las imágenes representada en términos matemáticos, se definen como una función bidimensional que cuantifica la intensidad de la luz o energía magnética a lo largo del espectro se representa como $I(x,y)$ donde el valor de la intensidad se obtiene por el indexado de las coordenadas x e y . Cuevas, 2011 [25]. Las imágenes se representan numéricamente en matrices así:

$$I(x,y) = \begin{bmatrix} I(1,1) & I(2,1) & \cdots & I(N,1) \\ I(1,2) & I(2,2) & \cdots & I(N,2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I(1,M) & I(2,M) & \cdots & I(N,M) \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 11}$$

La visión por computadora se define como el intento en el desarrollo de algoritmos con el fin de lograr que una máquina simule hasta cierto grado el proceso de visión. De la misma manera podemos definir el procesamiento digital de imágenes como una operación de imágenes mediante computadora, Cuevas, 2011 [25]. El procesamiento digital se divide en subniveles dependiendo el trabajo que se realice sobre las imágenes así mismo se da su clasificación. Estos subniveles son bajo, medio y alto nivel.

Figura 42. Procesos que componen el sistema digital de la imagen.



Fuente: Procesamiento digital de imágenes ITP- De las Rosas R.

En el bajo nivel se encuentran los procesos realizados sobre imágenes tales como suavizado, *umbralización*, eliminación de ruido, definición de bordes; estos procesos se les conocen como *pre-procesos*. En el nivel medio se encuentran procesos como límites y extracción de características. En alto nivel se establecen relaciones semánticas entre los objetos de la escena es decir el significado, sentido o interpretación de los objetos de la imagen. Nuestro trabajo tiene su eje en el nivel bajo principalmente en análisis de filtros.

La diferencia más importante entre la visión y el procesamiento digital, corresponde a que las imágenes con las que se trabajan en el último caso no solo provienen del espectro visible correspondiente a los sentidos de nuestra visión ya que pueden originarse de la captación de cualquier parte del espectro electromagnético, como por ejemplo las microondas que no son visibles a nuestros ojos pero si pueden ser captadas por dispositivos diseñados para tal fin. En la actualidad existe el procesamiento digital sobre imágenes censadas de rayos X, rayos gama, microondas entre otras. Sin embargo tanto la visión y el PDI (procesamiento digital de imágenes) usan las imágenes como la representación del mundo real, estas contienen información importante que es captada por medios tecnológicos mediante un proceso de muestreo. En el PDI, para obtener una imagen coherente, se sigue un proceso que involucra la captación, muestreo, cuantificación y codificación.

2.7.1. TIFF.

Tagged Image File Format es uno de los más populares y flexibles formatos de archivos de imagen ráster (mapa de bits) de dominio público en la actualidad. Muchos formatos de

archivo de imagen tienen una cabecera con campos fijos que contienen información como las dimensiones de la imagen, la especificación del espacio de color, etc. El formato de archivo TIFF es diferente, ya que permite un juego flexible de campos de información. Existe una especificación para muchos de estos campos de información, denominado "etiquetas", que van desde el más fundamental como las dimensiones de la imagen, y un poco más específicas como información de derechos de autor, hasta las llamadas "etiquetas privadas" o "etiquetas personalizadas" que se puede definir para mantener su propia información específica de la aplicación. La especificación TIFF define un marco para un encabezado de imagen llamado "IFD" (Directorio de archivos de imagen), que es esencialmente un conjunto flexible de concreto aquellas etiquetas que el software de grabación TIFF desea especificar. Una última diferencia importante entre TIFF y otros formatos de archivos de imagen, es que define la compatibilidad con varias imágenes en un único archivo. Este tipo de archivo se llama entonces "de varias páginas". Por lo tanto, el formato TIFF es muy adecuado para por ejemplo almacenar las muchas páginas de un solo fax en un solo archivo, o imágenes provenientes de por observación remota de un sitio.

2.7.1.1. GeoTif.

GeoTiff es una variación basada del el formato TIFF 6.0 con etiquetas personalizadas, y fue el resultado de un esfuerzo por parte de más de 160 diferentes empresas de percepción remota, SIG, cartografía, empresas topográficas y organizaciones afines para establecer un estándar basado en el formato de intercambio de archivos TIFF para imágenes raster georreferenciada.

GeoTIFF utiliza un pequeño conjunto de etiquetas TIFF reservadas para almacenar una amplia gama de información de georreferenciación, así como los sistemas de coordenadas de acuerdo a las necesidades. Para codificar decenas de elementos de información se usa sólo 6 etiquetas, aprovechando la representación en formato de datos independiente de la plataforma TIFF para evitar dificultades de intercambio multiplataforma. Están diseñadas de manera paralela a las etiquetas TIFF estándar, y siguen de cerca la disciplina TIFF en su estructura y el diseño. Nuevas etiquetas pueden ser definidas a medida que surgen más necesidades en el marco actual, y sin requerir la asignación de nuevas etiquetas o modificaciones. Adobe [26].

2.7.2. Aproximación Matemática a la formación de la imagen.

Doerry, 2005 [27] Armin et al., 2005 explican la formación de imagen de SAR se puede lograr a través de una 2-D transformada de Fourier, ya que los datos recogidos representa el

espacio de Fourier de la escena 3-D que se está estudiando (Doerry, 2001) [27]. Sin embargo, cuando una escena grande es proyectada en una resolución fina, una Transformada de Fourier simple en 2-D es inadecuada debido a Movimiento del blanco a través de Células de Resolución (MTRC) (Brown et Fredericks, 1969) [28].

Una técnica para aliviar las manchas de la imagen causada por MTRC, se conoce como el procesamiento de formato polar (Walker, 1980) [29]. En general, los datos en bruto, generan un histórico de datos recogidos para la escena, representa una trama polar en el dominio de Fourier, de manera que el procesamiento de formato polar formatea los datos a una matriz de cuadrícula Cartesiana para un eficaz procesamiento digital y formación de la imagen de los datos recogidos del SAR.

En un sistema en tiempo real, la operación de "re-cuadricular" de polar a rectangular es el proceso más intensivo. Normalmente, las técnicas de interpolación de datos en 2-D se utilizan para volver a formatear los datos, a pesar de que es posible manipular el hardware del radar para variar pulso a pulso la forma de onda y los parámetros de muestreo para simplificar considerablemente el siguiente remuestreo, y limitarla a una operación de 1-D, ayudando así a reducir algunos de los tiempos de procesamiento requerido.

Los sistemas de radar Sandia son capaces de esto y con frecuencia recogen datos sobre una rejilla trapezoidal que está espaciada de manera uniforme tanto en la dirección del Rango y por cada fila, espaciadas de manera uniforme en la dirección del Azimut. Esta rejilla trapezoidal conduce a la reconstrucción del tradicional formato polar, es un algoritmo con un procedimiento simplificado que interpola cada fila en la dirección del Azimut a la cuadrícula cartesiana, de modo que la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de 2-D puede utilizarse para generar la imagen.

Una segunda alternativa de algoritmo de reconstrucción implementado para el procesamiento del formato polar en tiempo real se lleva a cabo a través de una variación en la tradicional interpolación FFT de 2-D del algoritmo mencionado anteriormente (Martin et al., 2005) [30]. En primer lugar, se debe tener en cuenta que debido a la separación, el total de la operación FFT 2-D se puede dividir en un 1-D Azimut de FFT y en un rango 1-D de la transformada FFT. Por lo tanto, el método de procesamiento en el formato tradicional polar se divide en 3 pasos.

En primer lugar, interpolar cada fila en la dirección del Azimut, en segundo lugar, realizar una transformada 1-D FFT en la dirección del Azimut, y tercero, una transformada 1-D FFT en la dirección del rango. La variación para el segundo algoritmo es un cambio de operaciones del orden del método anterior. Este cambio en el 1-D Azimut FFT, seguido por un re-muestreo lineal en la dirección del Azimut, y finalmente, un rango 1-D FFT.

El cambio más notable aquí es el re-muestreo en la dirección del Azimut que se realiza después de la FFT del Azimut. Esta opción está disponible debido a la separación lineal proporcionada por el muestreo de Azimut de los datos del histórico de la fase inherentes con una abertura trapezoidal.

La tercera alternativa, el algoritmo de reconstrucción para la red trapezoidal utiliza transformada Z a lo largo de la dirección del Azimut, seguido de una FFT en la dirección del rango Doerry, 2001 [27]. Este método produce excelentes resultados cuando se implementa como una convolución rápida. Sin embargo, mientras que evita los errores de interpolación, a menudo es aún menos computacionalmente eficiente si se compara con otros métodos que dan resultados similares de calidad. Con el fin de entender se implementa en MATLAB y se pueden hacer de los 3 diferentes algoritmos, un modelo general para los datos recogidos del SAR que es presentado como una explicación de cómo se lleva a cabo la formación de imágenes para cada modelo.

2.7.2.1. Fase histórica del Modelo

Fase histórica del Modelo: recolección de datos del SAR (Martin et al., 2005) [30]

$$\mathbf{X}_V(\mathbf{i}, \mathbf{n}) \approx A_R \sigma(s) \exp j\{\mathbf{k}_x(\mathbf{i}, \mathbf{n})S_x + \mathbf{k}_y(\mathbf{i})S_y\} \quad \text{Ecuación 12}$$

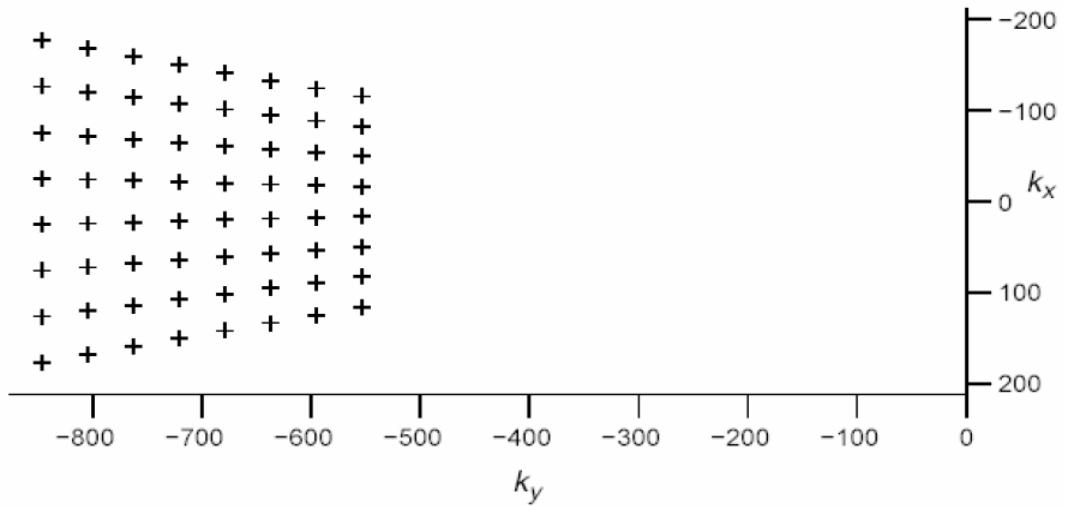
Donde los coeficientes de Fourier son:

$$\mathbf{k}_x(\mathbf{i}, \mathbf{n}) = \frac{2}{c} [\omega_0 + \gamma_0 T_{s,0} \mathbf{i}] \cdot \cos \psi_0 \cdot d\alpha \cdot n, \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\mathbf{k}_y(\mathbf{i}) = -\frac{2}{c} [\omega_0 + \gamma_0 T_{s,0} \mathbf{i}] \cdot \cos \psi_0 \quad \text{Ecuación 14}$$

Este modelo define una malla trapezoidal en el Espacio de Fourier de la escena:

Figura 43. Ubicaciones trapezoidales



Fuente: SAR Polar Format Implementation with MATLAB [31]

El modelo puede ser reescrito como:

$$X_V(i, n) \approx A_R \sigma(s) \exp j\{k_y(i)S_y\} \cdot \exp j\{k_x(i, n)S_x\} \quad \text{Ecuación 15}$$

Y ser usado en esta forma de derivación de las tres diferentes técnicas.

2.7.2.2. Procesamiento del Azimut usando el re-muestreo por la TF

Procesamiento formato polar con este método se vuelve a muestrear $k_x(i, n)$ buscando no depender de i . Esto se logra mediante la interpolación de tal manera que:

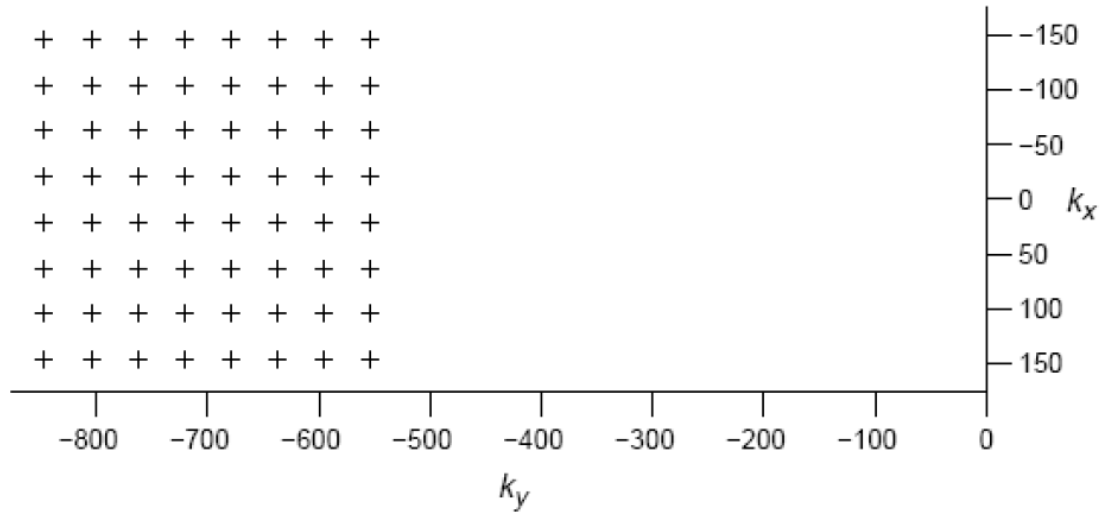
$$[\omega_0 + \gamma_0 T_{s,0} i] \cdot d\alpha \cdot n = [\omega_0] \cdot d\alpha \cdot n', \quad \text{Ecuación 16}$$

O encontrar los datos valorados y localizados

$$\mathbf{n} = \frac{[\omega_0]}{[\omega_0 + \gamma_0 T_{s,0} i]}, \mathbf{n}' = \left(\frac{1}{1 + \frac{\gamma_0 T_{s,0}}{\omega_0} i} \right) \cdot \mathbf{n}' \quad \text{Ecuación 17}$$

El dato será registrado en el plano Cartesiano como se aprecia en la figura 43:

Figura 44. Localización del dato del historial en la Fase re-cuadrícula



Fuente: SAR Polar Format Implementation with MATLAB [31]

La siguiente FFT 1-D para la formación de la imagen, en la dirección n' y la dirección i . Con una sustitución de la exponencial con índice n para la interpolada n' , el modelo del histórico de fase se ha convertido en:

$$X_V(i, n') \approx A_R \sigma(s) \exp j\{k_y(i) S_y\} \cdot \exp j \left\{ \frac{2 \cdot \omega_0 \cos \psi_0}{c} \cdot d\alpha \cdot S_x \cdot n' \right\} \quad \text{Ecuación 18}$$

Y la Transformada de Fourier a lo largo de la dirección n' evaluada para:

$$FFT_n(X_V(i, n')) \approx [A_R \sigma(s) \exp j\{k_y(i)S_y\}] \cdot W_n \left(\frac{2 \cdot \omega_0 \cos \psi_0}{c} \cdot d\alpha \cdot S_x - \frac{2\pi}{N'} u \right) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde $W_n()$ representa la imagen “respuesta del impulso” en la dirección del azimut. Se advierte que en ausencia de funciones de la ventana o de otros datos se estrecha.

$$W_n(\Omega) = \sum_n e^{j\Omega n} \quad \text{Ecuación 20}$$

El cuál tiene la forma de una función sinc () cerca de su valor de pico. La FFT resultante tiene entonces una respuesta de pico

$$\frac{2\pi}{N} u = \frac{2 \cdot \omega_0 \cos \psi_0}{c} \cdot d\alpha \cdot S_x \quad \text{Ecuación 21}$$

que es independiente del índice i . Con el fin de optimizar al máximo la FFT, en potencias de 2 y deben ser utilizados para la longitud, a esto se requiere el número de interpolaciones a ser llevado a cabo para ser el más grande siguiente potencia de 2 mayor que la longitud del conjunto de datos. Esto también asegura el espaciamiento apropiado en la salida para las muestras que se utilizarán en la imagen final. Tener en cuenta que el número de píxeles de la imagen es típicamente mucho menor que el número total de muestras de Azimut.

2.7.2.3. Procesamiento del Azimut usando la TF seguido por *re-muestreo*.

Procesamiento formato polar con este método realizará una FFT de 1-D en la dirección n tal que:

$$FFT_n(X_V(i, n')) \approx [A_R \sigma(s) \exp j\{k_y(i)S_y\}] \cdot W_n \left(\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot \cos \psi_0}{c} \cdot d\alpha \cdot S_x \cdot \left(1 + \frac{\gamma_0 T_{s,0}}{\omega_0} i \right) - \frac{2\pi}{N'} u \right) \quad \text{Ecuación 22}$$

La función SinC resultante, entonces tiene una respuesta pico en:

$$\frac{2\pi}{N} u = \frac{2 \cdot \omega_0 \cdot \cos \psi_0}{c} \cdot d\alpha \cdot S_x \cdot \left(1 + \frac{\gamma_0 T_{s,0}}{\omega_0} i\right) \quad \text{Ecuación 23}$$

Se debe tener en cuenta que esta respuesta depende todavía del índice i . Para eliminar esta dependencia, podemos definir un nuevo índice u' de tal manera que:

$$\frac{2\pi}{N} u' = \frac{2 \cdot \omega_0 \cos \psi_0}{c} \cdot d\alpha \cdot S_x \quad \text{Ecuación 24}$$

y volver a muestrear los datos para posiciones interpoladas donde

$$u = \frac{[\omega_0 + \gamma_0 T_{s,0} i]}{[\omega_0]} \cdot u' = \left(1 + \frac{\gamma_0 T_{s,0}}{\omega_0} i\right) \cdot u' \quad \text{Ecuación 25}$$

La formación de la imagen restante requiere un 1-D FFT en la dirección del rango.

5.2.5.4. Procesamiento del Azimut usando el CZT.

Considere la posibilidad de una aplicación de la transformada Chirp-Z directamente en la dirección n del modelo de historia la fase del SAR.

$$CTZ_n (X_V(i, n)) \approx [A_R \sigma(s) \exp j\{k_y(i) S_y\}].$$

$$\sum_n \exp j \cdot \left(\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot \cos \psi_0}{c} \cdot d\alpha \cdot S_x \cdot \left(1 + \frac{\gamma_0 T_{s,0}}{\omega_0} i\right) n\right) - j \cdot \Delta_f \cdot u \quad \text{Ecuación 26}$$

Para forzar Δ_f para que varíe con el índice i tal que:

$$\Delta_f = \frac{2\pi}{N} \left(1 + \frac{\gamma_0 T_{s,0}}{\omega_0} i\right) \quad \text{Ecuación 27}$$

El CZT se evalúa como

$$CTZ_n (X_V(i, n)) \approx$$

$$[A_R \sigma(s) \exp j\{k_y(i)S_y\}] \cdot W_n \left(\left(1 + \frac{\gamma_0 T_{s,0}}{\omega_0} i \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot \cos \psi_0}{c} \cdot d\alpha \cdot S_x - \frac{2\pi}{N} u \right) \right) \quad \text{Ecuación 28}$$

Esto también ofrece una clara respuesta máxima cuando

$$\frac{2\pi}{N} u = \frac{2 \cdot \omega_0 \cos \psi_0}{c} \cdot d\alpha \cdot S_x \quad \text{Ecuación 29}$$

2.7.2.4. Retrospectiva y Síntesis.

Es importante mencionar algunos de los beneficios de cada aplicación y cómo se relacionan con MATLAB, así como algunas de las deficiencias. El método tradicional en formato polar tiene una facilidad de implementación. Dado que el criterio de muestreo de Nyquist se ha cumplido, el procedimiento de interpolación es simplemente una función sinc () de convolución. Incluso hay implementaciones de esta llamada "interpoladores-sinc-rápidas" para eliminar la función seno transitoria de la suma. (Jackowatz et al. 1996) [32] afirma que una función sinc () truncada de Hann ponderado con 8 pasos por cero y un factor de reducción de 1,04 de ancho de banda proporciona un filtro de interpolación viable. Sin embargo, el método tradicional del formato polar exhibe deficiencias, primero en el núcleo de interpolación se ejecuta relativamente lento en un entorno de MATLAB ya que se interpreta, y segundo, el número de interpolaciones requeridas es grande, teniendo en cuenta que el número píxeles de la imagen solamente serán a menudo una fracción del número total de puntos en los datos del histórico de fase.

A pesar de que este procedimiento de interpolación es fácil de implementar, aunque es el factor dominante en el tiempo de procesamiento requerido para el algoritmo, también es una fuente de error en la imagen final.

El segundo método que se discute es la transformada de la interpolación del post-Azimut. Este método tiene varias ventajas sobre el método tradicional en formato polar, en el que se tiene las siguientes consideraciones:

1. La transformación ocurre antes de la interpolación, por lo que utiliza todo el espacio de frecuencia de los datos y no se limita a la región de un rectángulo inscrito, ofreciendo así ligeramente una mejorada de resolución.
2. El método no sufre mayores dificultades en la mitigación de los efectos de los lóbulos laterales que son problemas de un rectángulo inscrito.

3. Dado que la transformada se produce antes de la interpolación, la transformada no utiliza los datos desagradados por interpolaciones inexactas. Estos errores de interpolación se introducen más adelante en la cadena de procesamiento y conducen a un menor error en general.
4. Dado que la imagen por lo general contiene menos píxeles de Azimut que el número de los puntos de muestreo de Azimut originales, a menudo se requieren menos interpolaciones.
5. Junto con el numeral 3, el método no requiere filtrado de pasa bajos en conjunción con su interpolación como lo hace el método tradicional.
6. Con el error introducido en la cadena de procesamiento con formato polar que se hace más adelante, la transformada de interpolación del Azimut, puede utilizar menor-fidelidad y granos más pequeños que su homólogo tradicional para la misma calidad de imagen (FFT dependiente de la longitud).
7. Como resultado del numeral 4 y numeral 6, con menos interpolaciones de granos más pequeños permiten una mayor eficiencia, una implementación más fácil, y un funcionamiento más rápido.

El principal inconveniente de este método es el error de interpolación. Interpolaciones inexactas ocasionan una modulación de la dirección del rango y captará falsos objetivos dentro de la imagen. Sin embargo, esto puede ser mitigado si se completa adecuadamente con ceros los datos, a una longitud más allá de la siguiente potencia de 2. Desafortunadamente, esto también añade carga computacional.

El último método es el algoritmo de formación de la imagen transformada-Z Chirp. Este método tiene ventajas similares a la de la Transformada de la Segunda Interpolación del Azimut, estas son:

1. Esta técnica utiliza todo el espacio de la frecuencia de los datos y no se limita a la región de un rectángulo inscrito, ofreciendo así ligeramente mejora en la resolución.
2. El método no sufre las mayores dificultades en la mitigación de los efectos de lóbulos laterales problemáticos de una escuadra inscrita.
3. El CZT no utiliza datos degradados por interpolaciones inexactas. De hecho, no hay interpolaciones.
4. La técnica no requiere el filtrado pasa bajo del conjunto de datos.

5. El CZT se puede implementar como una convolución rápida utilizando sólo transformadas rápidas de Fourier (FFTs).

La deficiencia CZT es que requiere 3 FFTs de 2 veces la longitud de la secuencia de entrada. Y también 2 multiplicaciones complejas de la misma longitud. Esto puede ser más ineficiente que una interpolación y requiere significativamente más memoria para poner en práctica el método de la transformada CZT.

2.7.3. Ruido

Se puede definir el ruido como una señal o información que no es de interés y que genera variaciones, modificaciones o degradaciones de información primordial que dificultan su estudio. Márquez, 2012 [33]

Este fenómeno se puede presentar antes o después de un determinado proceso, puede radicar en el sensor con los que interacciona energía captada, o en el medio que la genera, amplifica, envía, transmite o recibe. Puede haber ruido en su codificación y hasta en su interpretación, la presencia del ruido dependerá del proceso de captura, la tecnología utilizada y el medio entre otros factores.

El ruido se puede clasificar en dos grandes clases dependiendo su comportamiento probabilístico dentro de una imagen:

- Determinístico. Este ruido se caracteriza por que presenta una forma y apariencia constante para cada sistema, suele manifestarse como una distribución constante y uniforme dentro de una imagen.
- Ruido Aleatorio. Se produce por fuentes imprevistas y su distribución es estocástica y cambiante en el tiempo. Fernández, 2012 [34]

Dentro del sistema de interpretación de una imagen tenemos que el ruido se puede presentar durante tres etapas: adquisición, transmisión y procesamiento de las imágenes.

2.7.3.1. Ruido Aditivo.

Este Ruido es independiente de la señal, y tiene un efecto notorio sobre la imagen, aquí el ruido se suma a la señal o al valor original y se define por la ecuación:

$$g(x, y) = f(x, y) + n(x, y)$$

Donde f la imagen original y el ruido n son variables independientes. Dentro de este tipo de ruido encontramos por ejemplo el ruido blanco gaussiano.

2.7.3.2. Ruido Multiplicativo.

El ejemplo clásico de esta clase de ruido es el Speckle (moteado, pecas o manchas), debido a la interferencia constructiva o destructiva principalmente en la imágenes SAR, Radar y ecografías, así como tomografías foto-acústicas. Márquez, 2012 [33]

Es un ruido intrínseco, inherente y correlacionado a la señal, se define así:

$$g(x,y) = f(x,y) n(x,y) \quad \text{Ecuación 30}$$

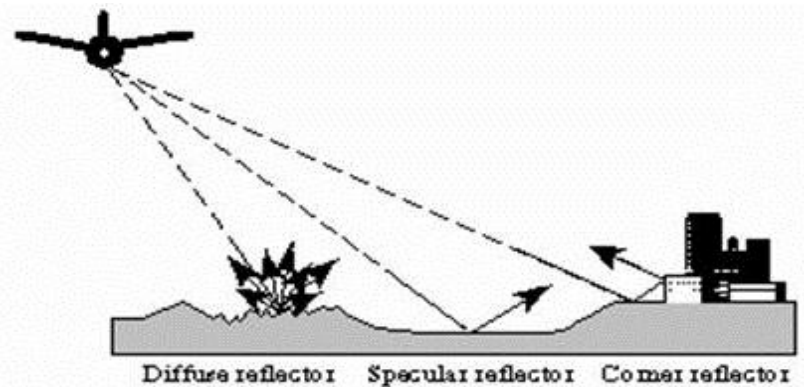
2.7.4. Speckle

Es un patrón indeseado que se produce por interferencia mutua de un conjunto de frentes de onda reflejadas difusamente por los elementos del terreno, sobre el receptor o célula de resolución durante el proceso de captura. Dainty, 2002 [35]; Raney, 1998 [36].

El *speckle* es un ruido granulado que existe de modo inherente en todas las imágenes SAR, este ruido está presente en toda la imagen y es un factor dominante en toda la imagen, cuando poseen más observaciones de una misma región “multilook” el ruido resultante disminuye. Un radar SAR emite una onda incidente, la cual es irradiada por el terreno, las ondas son reflejadas difusamente y se propagan en todas direcciones. Kiefer, 1994 [37].

Este tipo de ruido no tiene una distribución normal (como el ruido gaussiano), se presenta de manera aleatoria y se define por un modelo matemático multiplicativo, que explicaremos más adelante, este modelo ha sido ampliamente aceptado por los estudiosos del tema.

Figura 45. Retro dispersión de las ondas de un RADAR a causa de la superficie



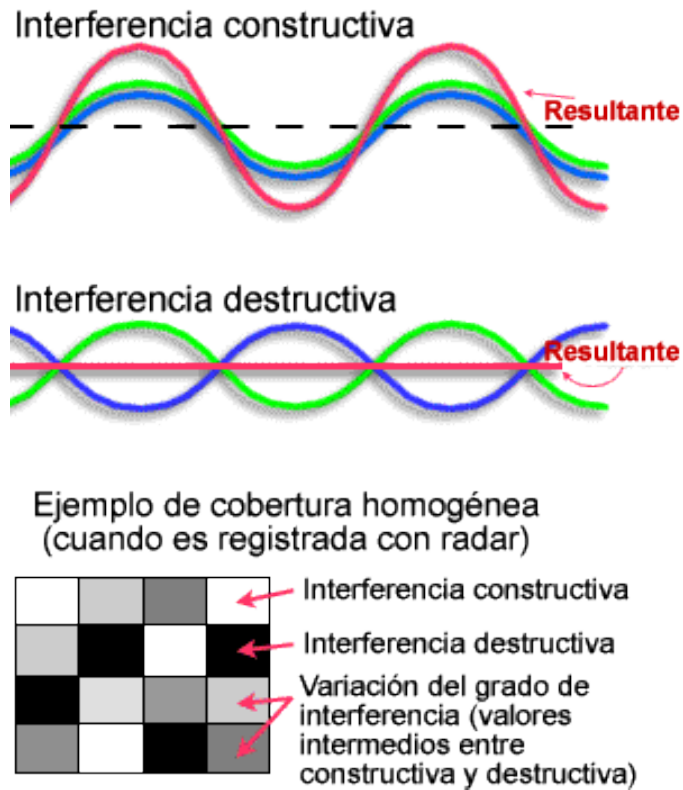
Fuente: Remote Sensing and Image Interpretation

La señal recibida por el sensor, básicamente se compone por la suma tanto de dirección y fase de las ondas que son reflejadas difusamente que alcanzan a llegar a la antena receptora. Las componentes de fase relativa contienen las diferenciales de las trayectorias de propagación. El modelo clásico de *speckle* asume la presencia de un gran número de reflexiones de puntos independientes con similares características de dispersión, ubicados dentro del área determinada por la resolución del pixel.

Cuando la señal del radar incide sobre la superficie, cada punto contribuye a dispersar la energía, cuyas fases de onda en la señal y cambios de potencia son sumados coherentemente en la señal reflejada.

Luego de que las señales son reflejadas o dispersadas, éstas pueden sumarse para generar respuestas alta o baja en el radar, esto dependerá si la interferencia es del tipo constructiva o destructiva produciendo puntos brillantes y oscuros con distribución aleatoria sobre las imágenes.

Figura 46. Interferencia por retro-dispersión



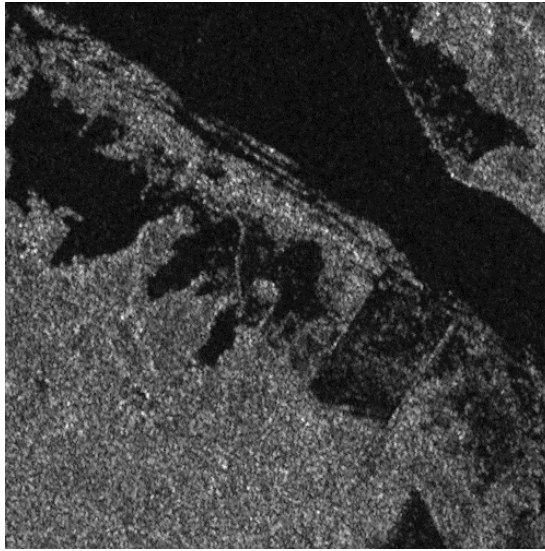
Fuente: Centro internacional de agricultura tropical. CIAT

La Interferencia constructiva constituye un aumento en la intensidad promedio, el resultado son superficies más brillantes. La interferencia destructiva por el contrario en una disminución en la intensidad promedio produce píxeles oscuros u opacos. Globe SAR Program, 2009 [3].

Cuando la señal del radar incide sobre la superficie, cada punto contribuye a dispersar la energía, cuyas fases de onda en la señal y cambios de potencia son sumados coherentemente en la señal reflejada. Luego que las señales son reflejadas o dispersas, éstas pueden sumarse para generar respuestas altas o bajas en el radar, esto dependerá si la interferencia es del tipo constructiva o destructiva produciendo puntos brillantes y oscuros con distribución aleatoria sobre las imágenes. Como vimos anteriormente, la reflexión difusa, especular, angular y la rugosidad de la superficie afectan los patrones de reflexión de las microondas.

Dichos fenómenos naturales son asociados con el brillo de cada pixel en las imágenes de radar. Los píxeles adyacentes en las imágenes de radares SAR son espacialmente correlacionados en términos de *speckle* y por lo tanto no son independientes; el ruido viene inherente a la imagen aleatoriamente. CIAT, 2005 [38].

Figura 47. Imagen satelital SAR.



Fuente: Centro Canadiense de Percepción Remota, Ministerio de Recursos Naturales de Canadá

Esta imagen de una región del río Magdalena, Colombia, se observa gránulos debido al ruido *Speckle*.

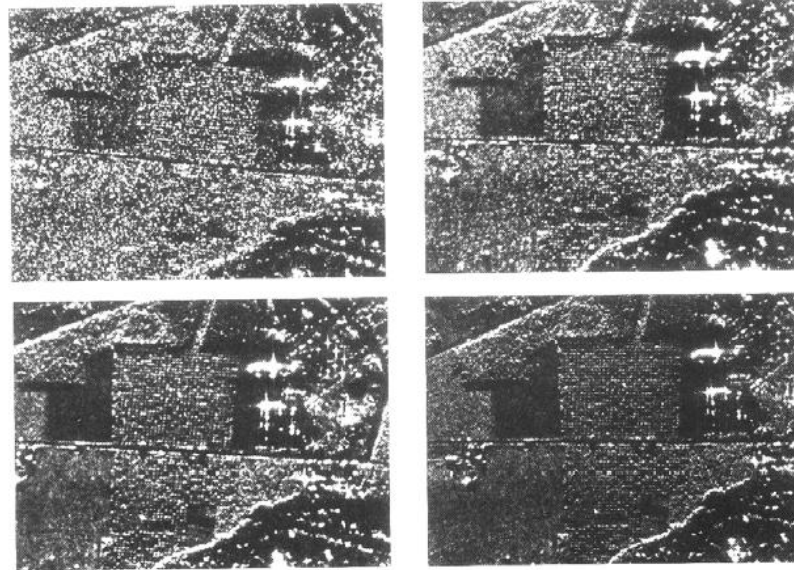
El clásico modelo de *speckle* asume la presencia de un gran número de reflexiones de puntos independientes con similares características de dispersión, ubicados dentro del área determinada por la resolución del pixel.

En una imagen de iluminación coherente, cuando se calcula la radicación producida siempre se observa interferencia (ruido) así mismo en la señal reflejada por los dispersores. En regiones como bosques y cultivos encontramos que hay una fluctuación de la intensidad y varía de pixel a pixel. Jacobo, 1999 [39].

Para la reducción del ruido *speckle* se usan básicamente dos métodos. El primero usa la observación múltiple (*multilook*) se divide la señal en bandas de frecuencia con un cierto mínimo de sobre posición, se procesa cada banda para generar una imagen de resolución reducida. Se registran las imágenes, se detectan y se suman esas imágenes detectadas. Global SAR Program, 2009 [3].

En la figura 48 se presentan ejemplos del procesamiento de *observación múltiple*; nótese que A, B y C tienen la misma resolución. Por otra parte C y D tienen factores de calidad comparables, C tiene más números de vistas que A y B. Raney, 1998 [40].

Figura 48. Proceso *Multilook*



A 6.1 m x 6.1 m N = 1 $Q_{SAR} = 0.027$	Cortesía de R. Shuchman y E. Kasischke, ERIM	B 6.1 m x 6.1 m N = 4 $Q_{SAR} = 0.11$
C 6.1 m x 6.1 m N = 16 $Q_{SAR} = 0.43$		D 1.5 m x 2.13 m N = 1 $Q_{SAR} = 0.31$

Fuente: Centro Canadiense de Percepción Remota, Ministerio de Recursos Naturales de Canadá

Las imágenes multilook reducen el ruido *speckle*, entregando imágenes con un índice menor de ruido. El segundo proceso es el método estadístico: se utiliza un algoritmo para obtener la media, o el promedio, por ejemplo de un pixel respecto a su vecindario o los pixeles que lo rodean. Con este método se genera una imagen con ruido *speckle* aunque este se reduce también a la resolución espacial.

2.7.4.1. Distribución modelo multiplicativo.

El modelo multiplicativo supone la independencia para las variables independiente en cada uno de los pixeles de la imagen y también la independencia de los campos aleatorios x e y . A continuación la ecuación para describir cada pixel (i, j) para imágenes de tamaño $M \times N$

$$g_{i,j} = x_{i,j} y_{i,j}, \quad 0 \leq i \leq M - 1, \quad 0 \leq j \leq N - 1 \quad \text{Ecuación 31}$$

El formato SAR (complejo, intensidad) determina la distribución de la variable aleatoria $y_{i,j}$, mientras que número de looks determina un valor para su parámetro estadístico. La heterogeneidad de la zona correspondiente a cada pixel (i, j) determina una distribución más adecuada para cada $x_{i,j}$ Buemi, 2012 [41]

2.7.4.2. Distribución para el Ruido Speckle.

Como ya hemos visto el ruido speckle aparece debido a la adición coherente producido por los elementos de forma individual sobre cada celda de resolución. Supongamos que un sensor captura una imagen que proviene de una región del suelo donde encontramos vegetación, suelo y posible humedad presente, cada uno de los retornos corresponde a cada uno de los elementos presentes en el terreno estos se suman y se presenta una adición incoherente, el valor final del gris de dicho pixel es el módulo del número complejo resultante.

A continuación se presenta la ecuación para la componente de speckle asociada para cada pixel.

$$S_n = \lambda(n, 2n) \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde n es el número de looks o número equivalente de Looks por lo tanto su densidad está dada por:

$$f_y y = \frac{n^n}{\lambda(n)} y^{n-1} e^{-ny}, \quad y \geq 0 \quad \text{Ecuación 33}$$

Se omite los índices de variable aleatoria porque esta distribución es validad para todas las coordenadas, esto debido a que la cantidad de looks es la misma en cualquier parte de la imagen. El valor mínimo para n es 1, este valor corresponde a las imágenes generadas sin que se hallan promediado, este tipo de imágenes tienen más ruido pero poseen una mejor resolución azimutal, lo que indica más información. Este parámetro puede suponerse o estimarse en la etapa inicial del análisis.

2.7.4.3. Distribución para el Backscatter.

La Retrodispersión se puede modelar de diferentes maneras. Se trata en últimas de distintas distribuciones de la variable aleatoria. Como modelo general, se puede considerar, una

variable aleatoria con distribución Gaussiana Inversa Generalizada; es acertada porque describe una cantidad de blancos pero es limitada porque lleva distribuciones para el retorno para las cuales los parámetros son analíticamente complejos y numéricamente inestables. Una particular solución se encuentra con la distribución Recíproca Gamma. Esta distribución fue propuesta como un modelo universal para datos SAR y lleva a la distribución G^0 para el retorno. Buemi [41]

La distribución Recíproca de Gamma, llamada γ^{-1} se caracteriza por la función de densidad siguiente:

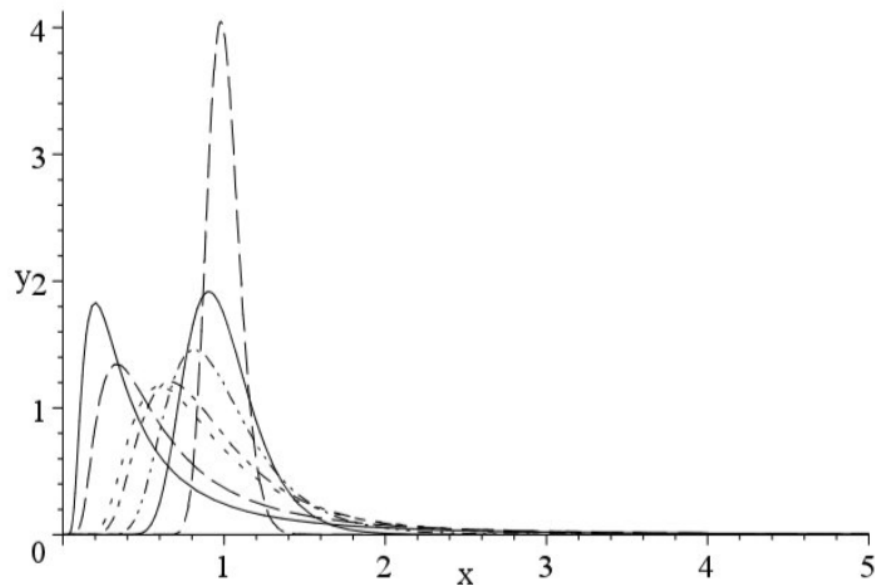
$$f_x(x) = \frac{2^\alpha}{\gamma^{\alpha\Gamma(-\alpha)}} x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\gamma}{2x}\right), \quad x > 0, \quad -\alpha > 0, \quad \gamma > 0 \quad \text{Ecuación 34}$$

Y la fórmula de los momentos viene dada por:

$$\exists[X^r] = \left(\frac{\gamma}{2}\right)^r \frac{(-\alpha-r)}{(-\alpha)} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde $\alpha < 0$ y $|\alpha| > r$. Buemi [41]

Figura 49. Curvas de distribución de para media unitaria y α igual a -1,5 (sólida), -2(trazos), -4(puntos), -5 (punto-trazo), -10(punto-punto-trazo), -20(sólida) y -100(trazos).



Fuente: Tratamiento de imágenes de Radar SAR. Buemi [41]

2.8. Filtros

Nuestro trabajo tiene su eje en el nivel bajo, principalmente en análisis de filtros. Este proceso se trata de la reducción de ruido, como lo explicamos en el capítulo anterior hace parte de lo que se conoce como *pre-proceso*.

En una imagen SAR podemos observar que sí hay una cantidad de pixeles que parecieran encontrarse fuera de lugar con respecto a su entorno y que aparentemente tienen un valor muy alto o muy bajo, lo que representa un cambio abrupto en el nivel de intensidad respecto a sus pixeles vecinos. Cuevas, 2011 [25].

Para solucionar este problema referente al ruido *speckle*, en esta clase de imágenes cada pixel fuera de lugar o con un valor por encima o por debajo de lo esperado es remplazado mediante un cálculo algorítmico observando el valor de sus vecinos. Este método contempla una ventana sobre el pixel a evaluar que puede ser de 3x3, 5x5, o 7x7 donde el pixel central es el que se evaluará con respecto a los pixeles que lo circundan, dando así un valor más adecuado al pixel.

2.8.1. Filtro Frost

García et al. 2003, [42] muestra el filtro Frost. Es un filtro adaptativo que realiza un cálculo mediante un algoritmo basado en el error cuadrático medio que se adapta a las estadísticas de la imagen; este algoritmo asume que el ruido es multiplicativo y aleatorio.

El filtro Frost realiza una convolución de los valores de los pixeles dentro de una ventana con una respuesta de impulso exponencial. Quiñones, 2011 [43].

La siguiente ecuación es la base para el algoritmo del filtro:

$$m = e^{-a.t}$$

Ecuación 36

$$a = damp \times Ci^2 \quad \text{Ecuación 37}$$

$$C_i = \frac{\delta}{\bar{y}} \quad \text{Desviacion estandar/ Media} \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde a es un parámetro de amortiguación dada por la ecuación 2, $damp$ es el factor que determina la amortiguación y C_i es una medida de dispersión respecto a la media del conjunto de la ventana (Ecuación 32).

$$d(t_0, t) = \sqrt{(x - k)^2 + (y - l)^2} \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde t es la distancia media del pixel procesado, $t_0 = k, l$ representa la localización del pixel a procesar, $d(t_0, t)$ es la distancia media desde la localización del pixel $t = x, y$ al $t_0 = k, l$.

La exponencial involucrada en la ecuación es una función de amortiguamiento que confiere mayor peso a los pixeles más cercanos al del centro circularmente simétrica de radio. Lira, 2002 [44]

La estimación del pixel t se da por la siguiente ecuación:

$$f(x, y) = \frac{y_1 m_1 + y_2 m_2 + \dots + y_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde $y_i = (k, l)$ es el pixel original en la posición de la ventana, y m_i los coeficientes exponenciales de la convolución. Quiñones, 2011 [43].

2.8.2. Filtro Frost Mejorado

El filtro de Frost mejorado es el resultado del trabajo de Lopes et al. 1990 [45] y Lopes et al. 1997 [46], quien realizo una modificación en busca de la mejora de este filtro. La ecuación entonces quedo así:

$$m = e^{-damp\left(\frac{c_i - c_u}{c_{max} - c_i}\right) \cdot t} \quad \text{Ecuación 41}$$

En esta ecuación los términos entre paréntesis expresan una función hiperbólica, en donde:

$$c_u = \sqrt{\frac{1}{l}} \quad \text{Ecuación 42}$$

$$c_{max} = \sqrt{1 + \frac{2}{l}} \quad \text{Ecuación 43}$$

Dónde: l son el numero de looks

Una imagen SAR está compuesta de múltiples imágenes de la misma zona donde cada pixel es el resultado de realizar un promedio de los valores de intensidad entre las diferentes imágenes esto se conoce como *multilook*, reduciendo el ruido *speckle* Gambini, 2006 [47]. Generalmente este valor no está disponible por lo tanto se puede aproximar mediante el número equivalente de *looks ENL* por sus siglas en inglés y se calcula así:

$$ENL = \frac{x^2}{\sigma^2} \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde x es la media, y σ^2 es la varianza del área de la imagen a analizar respectivamente.

2.8.3. Filtro Lee

Utiliza el error cuadrático medio, basándose en estadísticas como la media y variación estándar, proporcionando el parámetro de peso adecuado para suavizar la imagen J.S. Lee, 1981 [48], este método no reduce o elimina los bordes afilados. Patil et al., 2011 [49].

El algoritmo del filtro se basa en la siguiente ecuación.

$$g_{ij} = f_{media} + k_{xy}|(f_{xy} - f_{media})| \quad \text{Ecuación 45}$$

Donde f_{media} es el valor de la media estimando los pixeles vecinos en la ventana y k_{xy} es un parámetro que se adapta a cada pixel de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$k_{xy} = \frac{f_{\sigma^2}}{f_{\sigma^2} + r_{\sigma}} \quad \text{Ecuación 46}$$

Donde f_{σ^2} es la varianza de $f(k, l)$ en la ventana donde se lleva a cabo el proceso, y r_{σ} es la desviación estándar del ruido. Para el último parámetro se pueden tomar valores de 1, 2, o 3 generalmente se toma la unidad, Quiñones, 2011 [43].

El resultado del filtro sobre cada pixel es un promedio lineal de los pixeles circundantes, sin embargo si la diferencia es abismal entre el pixel a procesar y su vecindario el resultado puede ser muy similar al mismo valor de entrada del pixel, es decir a un número menor de ENL el suavizado es mayor, mientras que si el ENL es más elevado se conserva prácticamente el pixel, Patil et al. 2010-2011 [49].

2.8.4. Filtro de Kuan

Este filtro está basado en el criterio del error al cuadrado medio mínimo, Minimum Mean Square Error (MMSE), esta estimación se basa en este criterio; primero considera un modelo de ruido aditivo $y = x + n$, mientras que el ruido multiplicativo se considera de la forma $y = x + (n - 1)x$, bajo la suposición de que el ruido posee como Media la unidad. La estimación del pixel \hat{x} viene dada por:

$$\hat{x} = \bar{y} + \frac{\sigma_x^2 (y - \bar{y})}{\sigma_x^2 + (\bar{y}^2 + \sigma_x^2) / ENL} \quad \text{Ecuación 47}$$

con

$$\sigma_x^2 = \frac{ENL\sigma_y^2 - \bar{y}^2}{ENL + 1} \quad \text{Ecuación 48}$$

En el supuesto de que las medidas produzcan estimas negativas o complejas $\hat{x} = \bar{y}$. El filtro Kuan es óptimo cuando la escena y las intensidades detectadas son distribuciones gaussianas, De la Cruz et al., 2007 [50]; Gagnon, 1997 [51].

2.8.5. Filtro de Oddy

Se trata de un filtro de media cuya forma de la ventana varía de acuerdo con la estadística local. La evaluación se realiza localmente sobre una ventana de vecindad 3x3 donde se obtiene $m = \frac{1}{8} \sum_k \sum_l |y(k, l) - y|$ siendo α el parámetro del filtro. W juega el papel de una máscara binaria adaptativa que se aplica sobre la ventana. El resultado se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\hat{x} = \bar{y}, \quad \text{si} \quad m \leq \alpha \bar{y}; \quad \text{Ecuación 49}$$

$$\hat{x} = \frac{\sum_k \sum_l W_{kl} y(k, l)}{\sum_k \sum_l W_{kl}} \quad \text{si, } m > \alpha \bar{y} \quad \text{Ecuación 50}$$

Siendo $W_{kl} = 1$, cuando $|y(k, l) - y| \leq m$ y $W_{kl} = 0$ en cualquier otro caso. Martinsanz, 2007 [50].

2.8.6. Filtro de Mediana

Es un filtro paso bajo no lineal. El valor del pixel central es reemplazado por la mediana del conjunto de pixeles en cada ventana. La mediana es el valor que ocupa el lugar central de todos los datos cuando estos están ordenados de menor a mayor, Quiñones, 2011 [43].

El filtro de la mediana permite eliminar estructuras no deseadas en la imagen sin afectar significativamente los bordes. Pertenece este a la clase de filtros estadísticos, cuyo significado, en estadística, la mediana es el valor de la variable que deja el mismo número de datos antes y después de él.

Se aplican las siguientes ecuaciones para una muestra ordenada en orden creciente:

Para un valor $n = \text{par}$:

$$M_e = \frac{x_{n+1}}{2} \quad \text{Ecuación 51}$$

Para un valor $n = \text{impar}$:

$$M_e = \frac{\frac{x_n + x_{n+1}}{2}}{2} \quad \text{Ecuación 52}$$

De esta manera se puede decir que el filtro de mediana sustituye cada pixel de la imagen por la mediana de los valores de intensidad dentro de la región de influencia $R(x, y)$ definida por el filtro, esto expresado formalmente quedaría como:

$$I'(x, y) = M_e(R(x, xy)) \quad \text{Ecuación 53}$$

Para el cálculo de la mediana de los datos que conforman la región de interés $R(x, y)$, solo es necesario dos pasos. Primero acomodar los valores de intensidad de la imagen que corresponden región de influencia definida por el filtro en forma de vector, después reacomodarlos en orden creciente, si existen valores repetidos en el nuevo arreglo.

Debido a que un filtro normalmente se define como una matriz cuyo conjunto de datos es impar, el valor de la mediana corresponde siempre al valor central del vector ordenado en forma creciente correspondiente a la región de interés $R(x, y)$. Cuevas, 2011 [25].

2.8.7. Filtro de Media

Este es un filtro lo podemos catalogar como tipo pasa bajo, y básicamente realiza un remplazo del pixel central dentro de una ventana de tamaño $N \times M$, por el promedio de los pixeles dentro de la ventana, es decir la media aritmética.

$$f(x, y) = \text{media} [g(k, l)] \quad \text{Ecuación 54}$$

Donde $f(x, y)$ es el resultado o salida del filtro, y es la estimación de la imagen sin ruido $g(k, l)$ representa el valor de la imagen original o ruidosa. [43]

2.9. Medidas de calidad

Como lo que buscamos es la calidad de la imagen, existen muchos parámetros por medio de los cuales se analizan los resultados del filtrado de las imágenes. Es un proceso de evaluación mediante programas computacionales y algoritmos avanzados “buscando la obtención de una calidad aceptable después del proceso”, Buemi et al., 2007 [52].

Hemos escogido los que consideramos más relevantes porque involucran bordes y formas de una imagen SAR; entre estos, son: Índice de Correlación (β), la Relación Señal a Ruido (SNR), el Error Cuadrático Medio (RMSE), el Número de Looks Equivalentes (ENL), El Índice de Mejoramiento de Contornos (EEI), una Medida Universal de Calidad (Q), Desviación Estándar (SD), Tiempo de ejecución, entre otros; y a continuación los exponemos.

2.9.1. Índice de Correlación

El índice de correlación es una medida que nos muestra numéricamente la mayor o menor preservación de los bordes de una imagen después de un proceso de filtrado, en el que el mejor caso sería un numero de medida de correlación que tiende a la unidad. El índice de correlación se calcula de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{\delta \nabla^2_x \nabla^2_y}{\delta^2_{\nabla^2_x} \delta^2_{\nabla^2_y}} \quad \text{Ecuación 55}$$

Donde $\nabla^2 x$ y $\nabla^2 y$ son el Laplaciano de la imágenes X e Y, respectivamente.

2.9.2. SNR

Relación señal a ruido. Por sus siglas en inglés (Signal to Noise Ratio) se define como el cociente entre la media de los niveles digitales y su desviación estándar, así:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_i \sum_j x_{ij}^2}{\sum_i \sum_j (x_{ij} - v_{ij})^2} \right) \quad \text{Ecuación 56}$$

En concreto la variación de este índice y más específicamente el aumento de su valor, proporciona una estimación sobre la eficiencia de actuación de los filtros de reducción de ruido *speckle*. Paudyal y Aschbacher, 1993 [53]. El aumento o disminución de SNR no debe ser el único medio para evaluar un filtro, ya que este valor dice muy poco sobre áreas muy heterogéneas, estructuras lineales y pequeñas.

2.9.3. Error Cuadrático Medio

Es un estimador de la varianza de ruido, es decir que entre menor sea este indicativo la cantidad de ruido que posea la imagen será igualmente menor. Supongamos una imagen G, donde $i \geq 1$, $j \leq N$, el ruido de dicha imagen vendría dado por la diferencia entre G e I, de la siguiente manera, Martini, 2009 [54]:

$$e(i, j) = I(i, j) - G(i, j) \quad \text{Ecuación 57}$$

Error cuadrático medio:

$$e_{RMS} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (e(i, j))^2 \quad \text{Ecuación 58}$$

También se puede expresar como la raíz cuadrada de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum k \sum l [z(k,l) - f(k,l)]^2}{N^2}} \quad \text{Ecuación 59}$$

2.9.4. ENL

Por sus siglas en inglés *Equivalent Number of Looks*, o número de Looks, se define como la relación entre la media al cuadrado y la varianza, se estiman a partir de los datos de la imagen expresados en potencia radiométrica Laur et al., 2004 [55].

$$ENL = \frac{\bar{x}^2}{\sigma^2} = \left(\frac{\bar{x}}{\sigma}\right)^2 \quad \text{Ecuación 60}$$

Entre mayor sea el valor de este índice, mayor la reducción de ruido speckle.

2.9.5. Índice de Mejoramiento de Contornos (EEI)

Por sus siglas en inglés (*Edge Enhancing Index EEI*) este un índice nos muestra cuantitativamente, qué tanto un filtro aplicado sobre una imagen conserva y define contornos, es muy significativo en el tratamiento de imágenes ya que lo que se busca siempre es una mayor nitidez y que los contornos y formas se puedan visualizar después de un filtrado. Su expresión matemática se muestra así:

$$EEI = \frac{\sum |f(a) - f(b)|}{\sum |g(a) - g(b)|} \quad \text{Ecuación 61}$$

En la anterior ecuación $f(a)$ y $f(b)$ son valores que toman los pixeles después del filtro a cada lado de un contorno y $g(a) - g(b)$ son los valores que originalmente de los pixeles. El valor ideal para EEI es 1 entre más aproximado sea a 1, mejores resultados darán los contornos. Quiñónez, 2011 [43].

2.9.6. Medida de Calidad Universal (Q)

Es un índice de calidad generalmente nombrado como Medida de Calidad Universal de la imagen, Zhou Wang y Bovik, 2002 [56], este índice se define con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\delta_{xy}}{\delta_x \delta_y} \frac{2\bar{X}\bar{Y}}{\bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \frac{2\delta_x \delta_y}{\delta_x^2 + \delta_y^2}$$

Ecuación 62

Donde

$$\delta_x^2 = (N - 1)^{-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2, \text{ y}$$

$$\delta_y^2 = (N - 1)^{-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \text{ ,}$$

$$\text{Donde } \bar{X} = N^{-1} \sum_{i=1}^N X_i \text{ y } \bar{Y} = N^{-1} \sum_{i=1}^N Y_i, .$$

El rango dinámico del índice Q es [-1, 1], donde 1 es el mejor valor o el ideal. Para evaluar el índice de la señal entera, se calcula los índices locales Q_i para cada pixel usando una ventana cuadrada y luego los resultados son evaluados en su promedio para producir la calidad total e la imagen es decir Q. (Gambini, 2006) [19].

2.9.7. Tiempo de ejecución

Se mide el tiempo que toma al filtro en procesar una imagen, esto es determinante para probar un filtro en términos de eficiencia, recordamos que para la comparación de los filtros, realizaremos pruebas con un procesador i7 3612QM, con 8 GB de memoria RAM DDR3.

2.9.8. Desviación estándar **SD**

Es una medida en la estadística de dispersión, este puede ser un índice de calidad sobre una región de una imagen determinada. Básicamente este índice nos indica qué tanto cambia en su conjunto un área en la tonalidad de sus pixeles. Se expresa de la siguiente manera:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Ecuación 63

Vale la pena recordar que la desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza y se conocen como medidas de dispersión con respecto a la Media.

2.9.9. Índice de conservación de bordes

El EPI (*Edge Preservation Index*) por sus siglas en inglés, es un método nos indica que tanto se conservan los bordes después de la aplicación de filtros y se expresa en la siguiente ecuación:

$$EPI = \frac{\sqrt{\sum(\Delta I - \bar{\Delta I})^2 \sum(\Delta F - \bar{\Delta F})^2}}{\sum(\Delta I - \bar{\Delta I})(\Delta F - \bar{\Delta F})} \quad \text{Ecuación 64}$$

En la ecuación anterior nos indica el índice de conservación de bordes de la imagen en dirección horizontal y vertical, después de ser tratada por un filtro específico cuanto menor sea el valor del índice mejor será la conservación de los bordes.

ΔI y ΔF son la versión de la imágenes filtradas I y F Originales Horizontal y vertical. Se obtienen al aplicar una ventana de 3 x 3 del operador Laplaciano. El rangos de los valores de EPI oscilan entre 0 y 1, entre más este valor se acerque al límite de 0, mejor será la capacidad de conservar bordes del filtro, este índice es adaptado para imágenes Sar ya que fue inicialmente creado para imágenes ultrasónicas Singh, et al., 2009 [57].

2.9.10. Índice de Speckle

Es la relación matemática entre la desviación estándar sobre la media. Indica la cantidad de ruido speckle que encontramos sobre la imagen basado en la medida de dispersión de la Desviación Estándar SD. El valor ideal es cercano a cero. [58]

$$SI = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad \text{Ecuación 65}$$

3. ESTADO DEL ARTE

El primer estudio comparativo de filtros fue desarrollado por Z. Shi, et al., 1994 [59], realizaron un estudio comparativo entre los filtros Lee, Frost, MAP. (Canada Centre for Remote Sensing, Ottawa, Canada). Utilizaron imágenes realizadas por computadora y analizaron básicamente los siguientes índices de calidad ENL, media, mediana, y la varianza, así como la observación física de las imágenes después del filtrado, el trabajo aportó que los índices de conservación de imagen comparados con los de suavizado de ruido *speckle* son a veces contradictorios. Fue el primer estudio que trató de establecer bases con referencia en la observación de unos índices a priori combinados con la visualización física para tener conclusiones empíricas.

L. Gagnon y A. Joan et al., 1997, [51] realizaron una comparación de los filtros de tipo “clásico”: Gamma, MAP Gausiano, aplicados sobre un modelo de ruido *speckle* a nivel multiplicativo, con un filtro denominado *Wavelet Coefficient Shrinkage* (WCS), o filtro de transformada de *Wavelet* cuya particularidad se basa en el uso de Daubechies Simétricos (SD) o una propiedad de simetría. Las pruebas comparativas con 8 filtros estándar, arrojaron un resultado que el filtro wavelet basado en WCS realiza de manera eficiente la reducción de ruido. Los resultados cuantitativos y cualitativos se registraron teniendo en cuenta los criterios de Relación Señal a Ruido SNR, Error Cuadrático Medio RMS, el Número Equivalente de Looks, ENL. Y concluyeron que al igual que los filtros estándar se reduce el ruido de bajo nivel, pero el WCS es más eficiente que los “clásicos” para situaciones con ruido de alto nivel. Señalan claramente que para hacer un filtrado en tiempo real se necesitan procesadores muy avanzados para que automaticen el proceso de filtrado.

García, et al. 2003 [42], en el X Congreso de Teledetección, en España, se expone un análisis del comportamiento de los filtros que reducen el *speckle* basándose en imágenes ERS2-SAR diurnas y nocturnas de un área agrícola. La calidad de los filtros se evaluó mediante el uso de los índices de señal a ruido (SNR) y ENL así como mediante la inspección visual de las imágenes.

Qui, et al., 2004 [60] desarrolló un filtro adaptativo con mediana que detecta el ruido moteado y lo reemplaza con el valor medio local (ventana 3x3), basaron sus evaluaciones en los índices EEI, Feature-Preserving Index, Speckle Supresión Index y Comparación visual, llegaron a la conclusión que el filtro de Mediana ofrece una mejora en cuanto a la reducción del *speckle* conservando bordes y detalles de la imagen.

Touzi, 2002 [61] propone un estudio del modelo de estadístico o numérico del ruido speckle así como el modelo matemático de filtrado para dicho ruido, hace un análisis general de diferentes métodos de suavizado dividiéndolos en dos Modelos: Multiplicativo Estacionario de filtrado para ruido *s speckle* (SMSM) y Modelo Multiplicativo No Estacionario de filtros *speckle* (NSMSM). Añade técnicas de multi resolución para los filtros clásicos, en sus evaluaciones utilizó el error cuadrático medio como medida de calidad y la observación visual para concluir que la técnica multi resolución presenta mejorías respecto al método de suavizado utilizado sin esta técnica.

Gambini, M.J. 2006, [19] experta en el campo de la computación, presenta un nuevo enfoque para modelar imágenes SAR. Parte de la importancia y el valor que tienen las imágenes SAR y lo difícil de analizarlas debido al ruido *speckle* que corrompe la imagen. La propuesta es extraer las características, detectar bordes y segmentar las imágenes SAR por medio del ajuste del contorno de regiones en la imagen.

Rudorff y Gherardi, 2008 [62] por medio de un análisis de imágenes obtenidas de RADARSAT-1, aplicaron filtros multispectrales para la reducción del ruido *speckle*. Se realizó una clasificación digital basada en la segmentación de imágenes y se evaluó este proceso por medio de una matriz de error construida entre la clasificación de imágenes SAR y un mapa de referencia obtenido de una TM Landsat-5 clasificación. La conclusión del trabajo al que llegaron, es que los filtros adaptativos muestran mejores resultados para la supresión de *speckle* y preservación de bordes.

El artículo muestra que los filtros Kuan, Lee, Frost y Frost mejorado; son los que mejor se identifican con este propósito. Aunque no se dictamina por uno u otro filtro en mención, sí hay una comparación que muestra las bondades de cada uno, aplicándose sobre imágenes

que detectaban los arrecifes de coral emergentes en el Área de la “Costa dos Corais” en Brasil.

Huang, S.Q. et al., 2009 [63] propone un nuevo filtro y una aplicación práctica para detectar objetos pequeños en una imagen SAR, concretamente barcos. Proponen dos algoritmos como métodos para reducir el ruido *speckle*. El primero se llama CRSM (*Coherence Reduction Speckle Noise*) y consiste en establecer un mecanismo de imágenes SAR coherentes. Los resultados muestran que este algoritmo es aceptable suavizando las imágenes SAR. El otro algoritmo es CCFAR (*Coherence Constant False-Alarm Ratio*), detecta objetos pequeños, débiles y ocultos en una imagen como un buque o un barco.

El resultado del filtro CRSN mostró un mejor rendimiento que los filtros MAP, de mediana, Frost mejorado y *Wavelet*, observado los índices de ENL, ESI, SD, y con una duración de la rutina menor que de la mayoría de los filtros.

Chen J, et al., 2009 [64] presenta un nuevo parámetro para la medida de la heterogeneidad, como criterio para clasificar las imágenes SAR en regiones homogéneas y heterogéneas. Adoptan procedimientos de iteración finito y algoritmos de detección de bordes para lograr un equilibrio entre la reducción del *speckle* y la preservación del borde. Desarrolla una medición cuantitativa y lleva el nombre de HBSRF (*Heterogeneity-Based Speckle Reduction Filter*)

Soto, L.F. et al., 2009 [65], se realizó un estudio sobre la velocidad de flujo de los glaciares en la península antártica, en el que se debía filtrar el ruido de “moteado” para distinguir correctamente las grietas que ellos presentan en su superficie. Usaron el filtro Lee de dos maneras: la primera estrategia es pasar el filtro dos veces sobre la misma imagen antes de extraer los vectores de linealidad. Además se utilizaron los índices de calidad ENL y SD para informar la variación de los datos, dando resultados positivos; las imágenes con un filtrado muestran mejores resultados en la extracción de los vectores de velocidad para los algoritmos de correlación cruzada como las imágenes originales.

Maitré, H. et al., 2009 [66], en una conferencia de teledetección y otras aplicaciones, la ponencia titulada “*A comparison of SAR Image speckle filters*” los autores mostraron cómo

la reducción de ruido sigue siendo uno de los problemas principales en el proceso de interpretación de imágenes SAR. La clasificación que hacen es de dos maneras, la primera Multilook o MMSE, o mínimo error cuadrático medio, donde se trata de eliminar puntos. Ejemplo de estos son los filtros Lee, Kuan Frost. La segunda clasificación usa como modelo la medida MAP, Máxima eliminación de puntos posteriori. Ejemplo de estos son el filtro Gaussiano MAP, porque se requiere saber la función de densidad de media.

Iglesias et al., 2009 [67], se interesa por el estudio de la selección de píxeles. Proponen un nuevo método de selección de alta resolución, creando un nuevo algoritmo de selección de píxeles a alta resolución basado en las *propiedades espectrales de los Sublooks* del set de imágenes disponibles; razón por la cual el nombre del proyecto. Consiguen reducir las falsas detecciones y aumentar la resolución de imágenes puntuales en la ambigüedad en azimut y también en los reducidos coeficientes de *dispersión y retro-dispersión* que aparecen en el proceso.

Patil, L.V. et al., 2010 - 2011 [49], por medio de una trabajo doctoral bajo un detallado estudio de varios filtros ya manejados y conocidos; hacen énfasis en el área “conservación de objetivos puntuales”, “crecimiento de región homogénea” y “conservación de bordes” para imágenes SAR y buscan la mejora de la imagen usando el modelo estadístico para el proceso de filtrado. El propósito de su trabajo fue determinar el efecto de diferentes técnicas del filtrado mediante la alteración de parámetros de algoritmos de evaluación en las imágenes de salida.

Shanthi en 2011, [68] propuso la supresión de ruido *speckle* mediante un híbrido de filtros de mediana y media, evaluando los índices de calidad MSE, RMSE, SNR, PSNR, ENL. Probaron con ventanas de 5x5 y 7x7, dicho híbrido mejoró los índices de SNR, PSNR y ESI vertical, en comparación a los filtros Lee y Kuan y Frost.

Quiñones, 2011 [43], por medio de una imágenes del radar del satélite RADARSAT-2 haciendo un seguimiento del crecimiento de los diferentes cultivos, en este caso del arroz; propuso un filtro híbrido entre Media, Moda y Mediana, para buscar lo mejor de cada filtro en uno solo. Utilizó cuatro índices de calidad ENL, RMSE, SNR, EEI y el tiempo de ejecución del algoritmo. Como muchas veces estos índices son contradictorios, propone una función de compromiso entre los índices, tomando los valores máximos de sólo tres índices, logrando normalizar los resultados. El filtro MMN propuesto por Quiñones mostró

mejores resultados utilizando una ventana adaptativa en comparación a filtros como el Frost, Lee, entre otros.

Buemi, M.E. et al., 2012 [52], realizaron un trabajo muy completo donde se evalúan los filtros lineales de los no lineales y entre estos, los filtros Stack. En 2012 se concreta una tesis doctoral donde se estudia la aplicación de esos filtros a imágenes SAR, la capacidad de eliminar ruido preservando al mismo tiempo los bordes existentes. La optimización de estos filtros se hizo con el criterio del Error Absoluto Medio (MAE) Para dicha evaluación de la efectividad de los filtros Stack se utilizaron imágenes SAR simuladas bajo el modelo G^0 y también imágenes reales. Utilizaron medidas de calidad porcentual tales como el índice de calidad universal Q y el índice b para la preservación de bordes, [41].

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para la elaboración del presente proyecto se cumplió con los siguientes lineamientos:

FASE 1.

- Recopilación de información sumamente necesaria en cuanto a imágenes SAR, ruido *speckle*, sistemas de procesamiento digital, y análisis de filtros.
- Profundizar en estudios y documentos que analicen los diversos tipos de filtrado.
- Realizar un método experimental para comparar resultados después del filtrado.

FASE 2.

- Realizar dos GUI en MATLAB para agrupar los filtros, y permitir un método de comparación sencillo.
- Pruebas de funcionamiento, así como la tabulación de datos estadísticos.
- Elaboración de la Tesis de Grado.

Se realizó la experimentación comparativa basada en los índices de calidad: Índice de *Speckle*, ENL, Correlación, SD, Tiempo de ejecución. La implementación de un Gui mediante Matlab, nos permite analizar los diferentes algoritmos de los filtros aplicados a las imágenes suministradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Utilizamos cuatro imágenes para nuestra metodología de investigación, la primera imagen corresponde a un territorio agua y tierra sobre el municipio de El Repelon en polarización HV, observamos el comportamiento de los diferentes filtros en esta clase de imágenes. En segunda medida utilizamos una sobre las playas y la ciudad de Cartagena, la tercera imagen es una imagen sintética a la que se le aplica 3 niveles de ruido diferentes del 1% , 10% y 50 % *Speckle*.

Las medidas de calidad tradicionales como MSE, SNR, índice de *Speckle* o similares, su análisis es bastante simple, con un claro significado físico notorio y aceptadas ampliamente, sin embargo pueden no ser un adecuado predictor de la calidad visual que se percibe después del filtrado, especialmente cuando el ruido no es aditivo. [41]

En nuestro experimento utilizamos 9 índices de comparación, dos Gui una para filtrar y analizar el resultado del filtrado, y otra comparativa. Esto con el fin de determinar cuáles filtros presentan un mejor comportamiento visual y su relación matemática analizada estadísticamente con un espectro amplio de índices comparativos.

Encontramos en la literatura existente que generalmente se evalúan tres o cuatro índices esto puede resultar que los datos generados por estas experimentaciones no tengan en cuenta índices complementarios que pueden ser muy informativos y dar un abanico comparativo más amplio de las imágenes en cuanto calidad.

En una segunda Gui se analizan imágenes sintéticas con ruido *Speckle* añadido en diferentes porcentajes, se analizan los siguientes índices correlkación, SNR, EEI, Q EPI ENL y SD, compara la imagen original con la resultante después del filtrado, para obtener factores o índices de calidad significativos que nos permitan analizar mejor los resultados.

4.1. Experimento 1: Aplicación de filtros a imágenes sintéticas

Se elabora una imagen sintética con el siguiente patrón, la imagen es la siguiente:

Figura 50. Imagen patrón

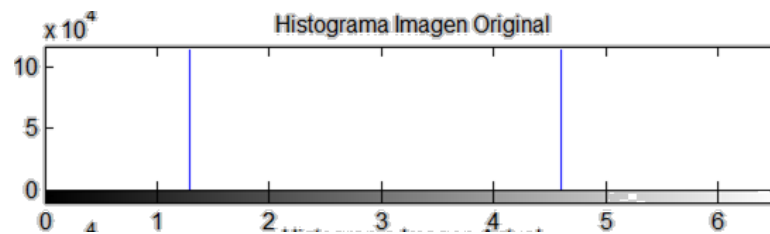


Fuente: Los Autores.

La imagen presenta las siguientes características:

Índice Speckle	0.565217
ENL	3.13018
Tamaño	1024 X 1024
SD	16979.7
Banda	--

Figura 51. Histograma Imagen Original



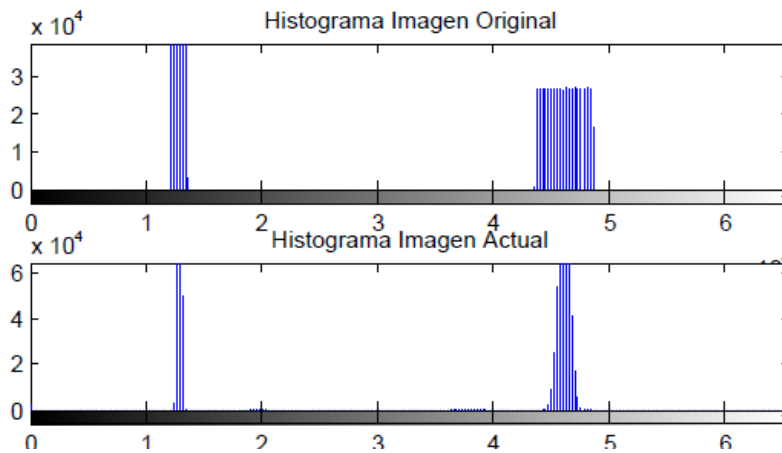
Fuente: Los Autores.

4.1.1. Imagen con 1 %.

A continuación se prueba la imagen con el 1 % de ruido *speckle* inducido por función de Matlab, se aplican los filtros a la imagen con las siguientes características.

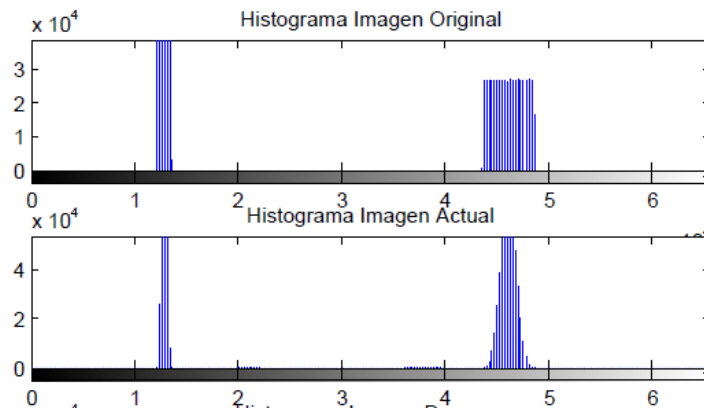
Índice Speckle	0.566369
ENL	3.11746
Tamaño	1024 X 1024
SD	16674.2
Banda	--

Figura 52. Histograma 1 % Frost



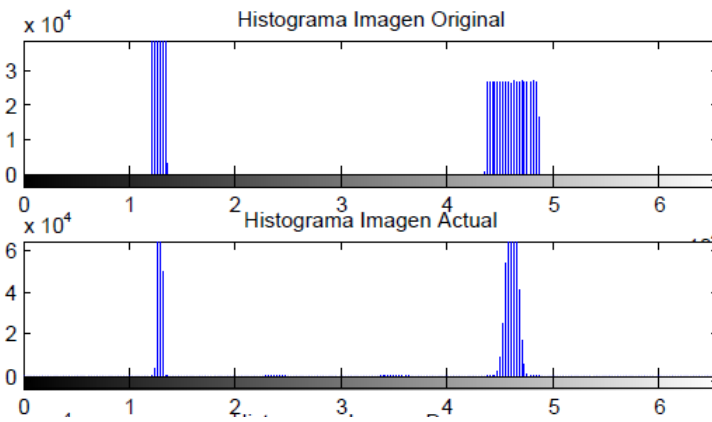
Fuente: Los autores

Figura 53. Histograma Frost Mejorado



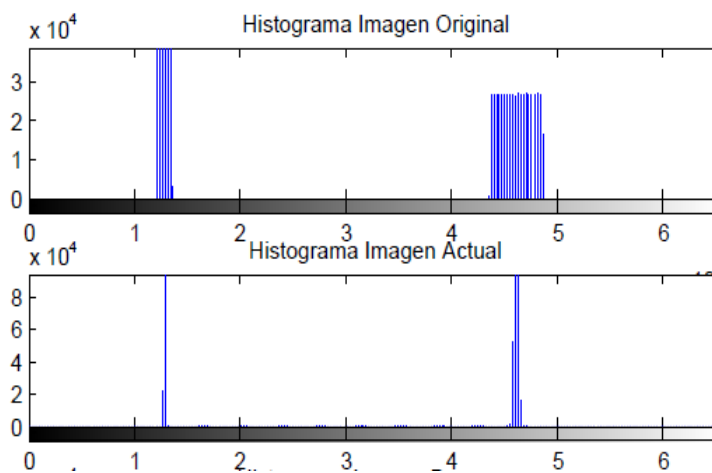
Fuente: Los autores

Figura 54. Histograma Kuan



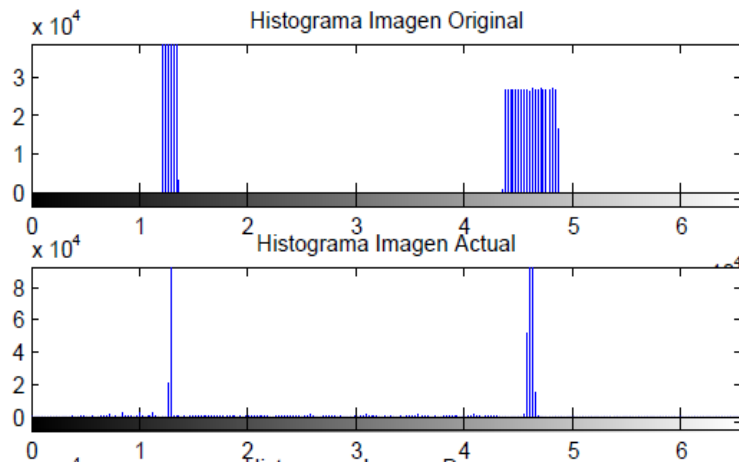
Fuente: Los autores

Figura 55. Histograma Lee



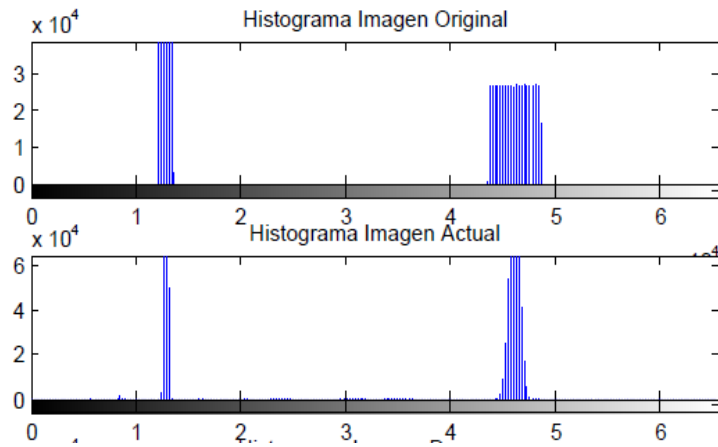
Fuente: Los autores

Figura 56. Media con Ventana



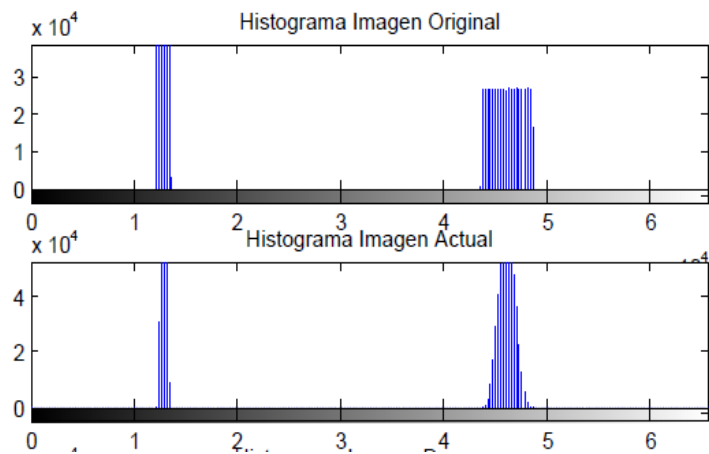
Fuente: Los autores

Figura 57. Media sin ventana



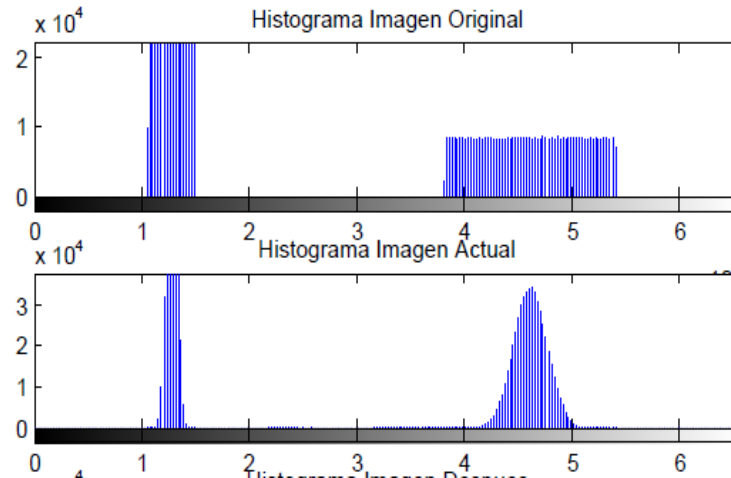
Fuente: Los autores

Figura 58. Mediana.



Fuente: Los autores

Figura 59. Oddy



Fuente: Los autores

La aplicación del ruido Speckle sobre la imagen no represento un cambio significativo para la imagen en sí. Sin embargo en la aplicación de los filtros encontramos los siguientes aspectos:

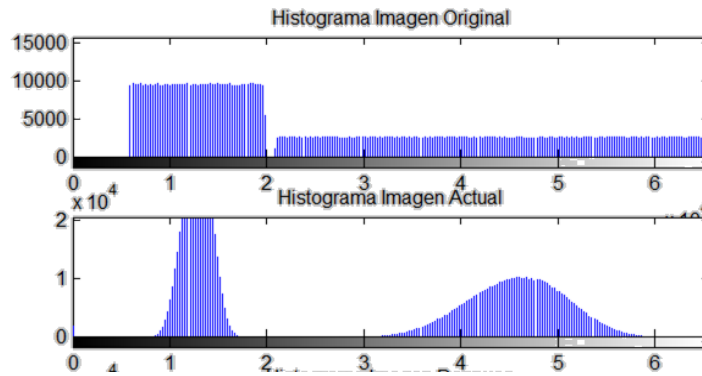
Filtro Frost y Frost Mejorado tienden hacia las medidas centrales, borrando datos cerca de los extremos lejanos de la media, sin embargo el filtro Frost Mejorado conserva más valores. En el filtro Kuan observando su histograma tiene un comportamiento similar al Frost mejorado, solo que en este filtro se conservan unos valores menos que en el filtro Frost mejorado. Al analizar el filtro Lee y media con ventana observamos que son los filtros que más valores promedian borrando muchos valores de pixeles que distan de las medias de los histogramas. Tienen otras particularidades en especial que el borde se difumino completamente. Media con Ventana y Mediana, observamos los histogramas y observamos que estos filtros suavizan los valores que se alejan de la media conservando valores que pueden ser significativos. Filtro Oddy, al igual que en el experimento anterior obtuvo un muy buen comportamiento conservando detalles y eliminando ruido Speckle que este caso era muy poco por lo que se evaluó en este experimento es que tanto afecta la calidad de una imagen. Este filtro es particularmente bueno para conservar detalles importantes en las imágenes.

4.1.2. Imagen sintética con el 10 % de Speckle.

A continuación se prueba la imagen con el 10 % de ruido Speckle inducido por función de MATLAB, se aplican los filtros a la imagen con las siguientes características.

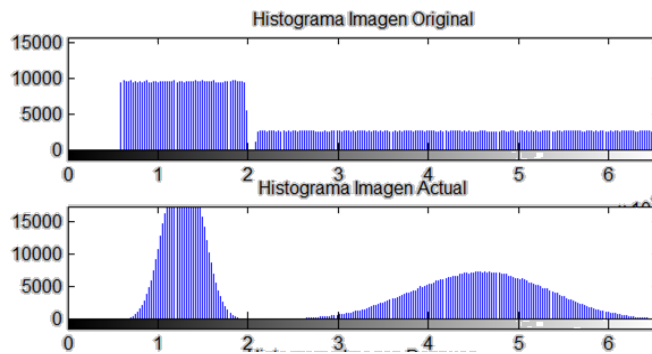
Índice Speckle	0.664727
ENL	2.26315
Tamaño	1024 X 1024
SD	19457.1
Banda	--

Figura 60. Histograma Frost



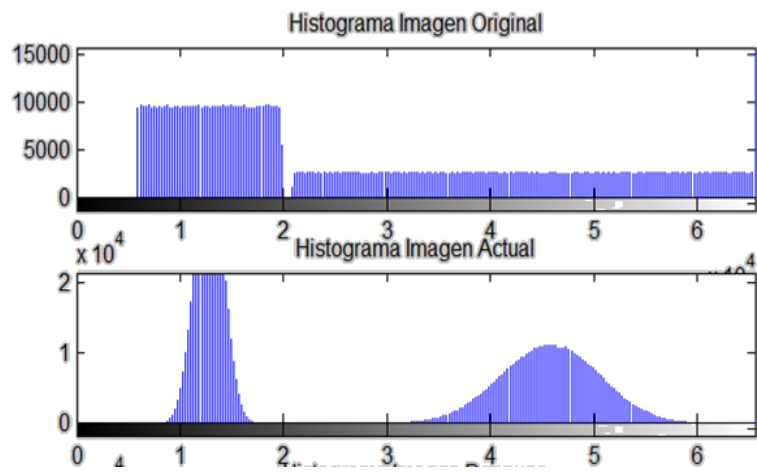
Fuente: Los autores

Figura 61. Histograma Frost Mejorado.



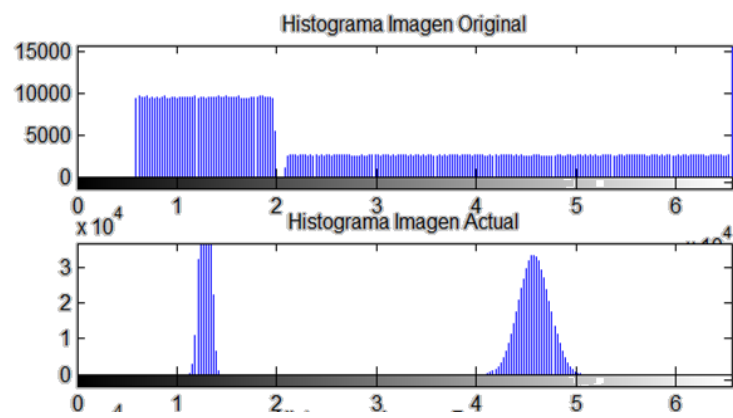
Fuente: Los autores

Figura 62. Histograma Kuan



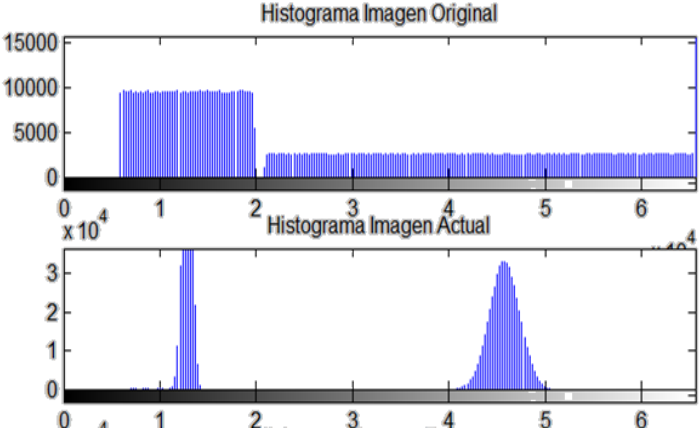
Fuente: Los autores

Figura 63. Histograma Lee



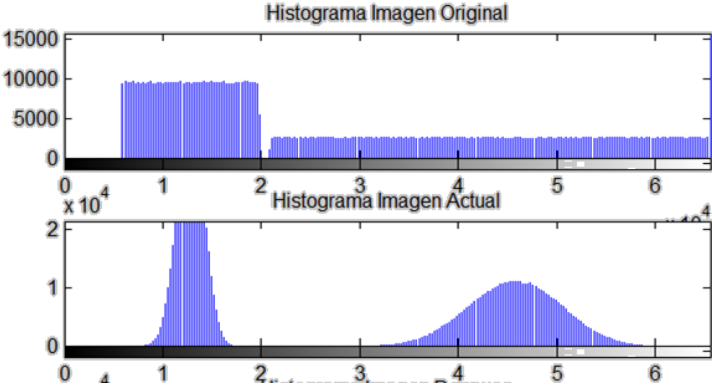
Fuente: Los autores

Figura 64. Media con ventana



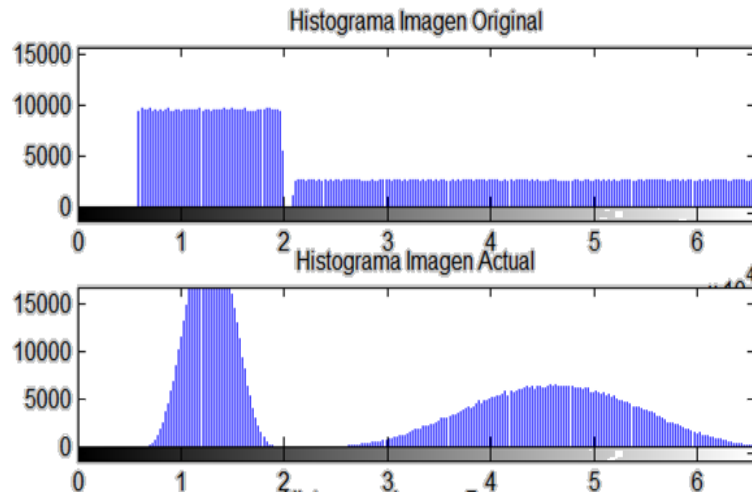
Fuente: Los autores

Figura 65. Media sin Ventana



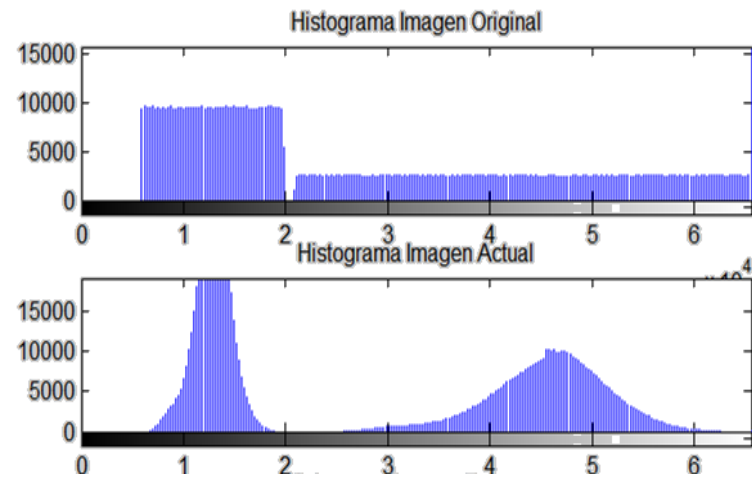
Fuente: Los autores

Figura 66. Histograma Mediana



Fuente: Los autores

Figura 67. Histograma Oddy



Fuente: Los autores

4.1.3. Imagen con el 50 % ruido.

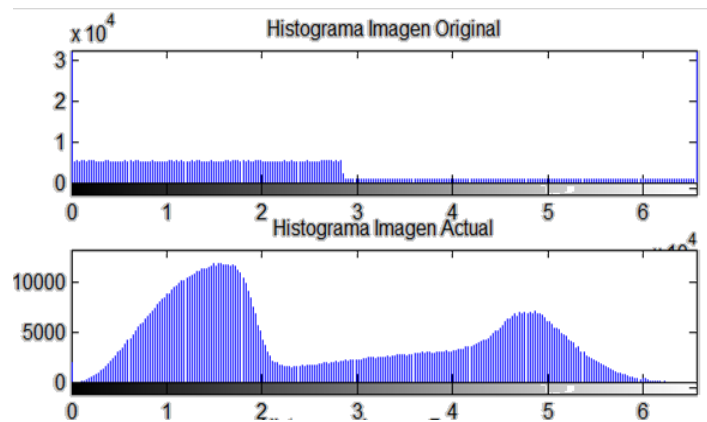
A continuación se prueba la imagen con el 50 % de ruido Speckle inducido por función de MATLAB, se aplican los filtros a la imagen con las siguientes características.

Índice Speckle	0.859568
ENL	1.35344
Tamaño	1024 X 1024
SD	22984.9
Banda	--

Tabla 1. Resultados estadísticos con 50% de *speckle*.

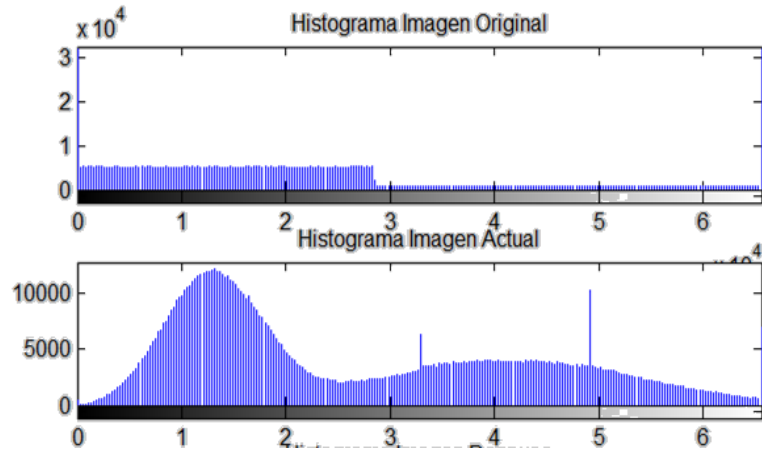
Fuente: Los Autores

Figura 68. Filtro Frost 50 %



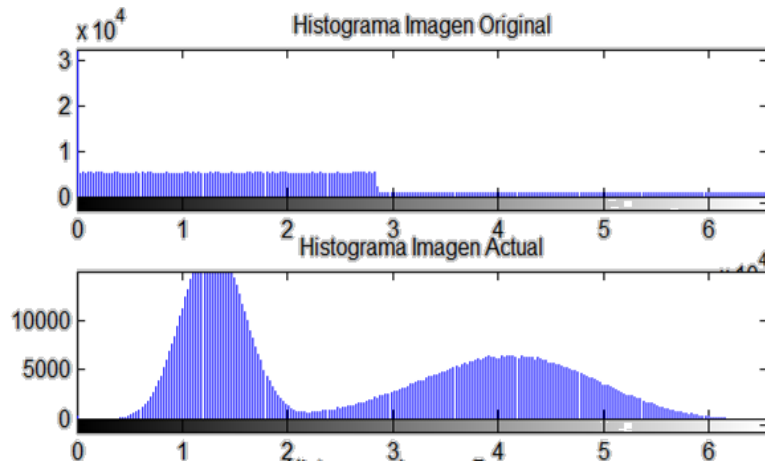
Fuente: Los Autores

Figura 69. Filtro Frost mejorado.



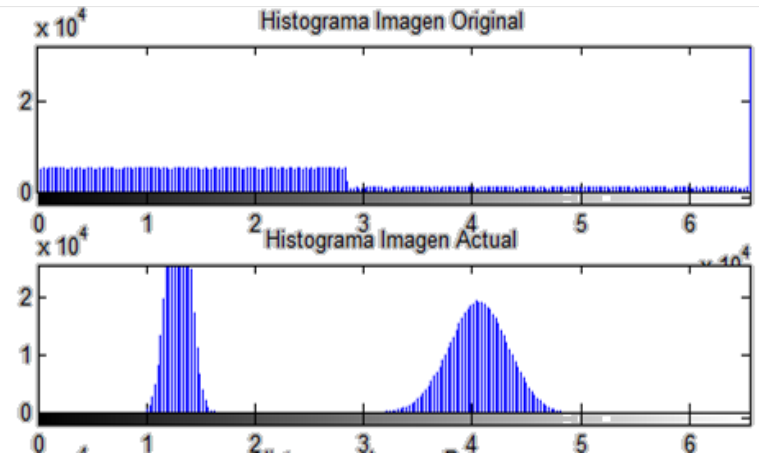
Fuente: Los Autores

Figura 70. Filtro Kuan



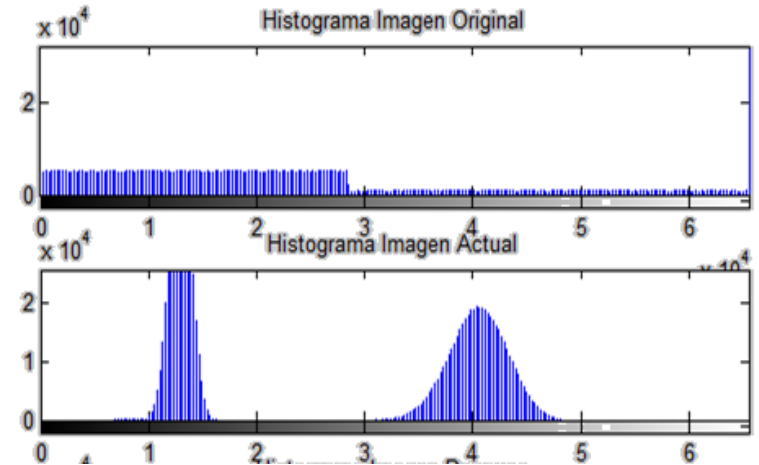
Fuente: Los Autores

Figura 71. Filtro Lee.



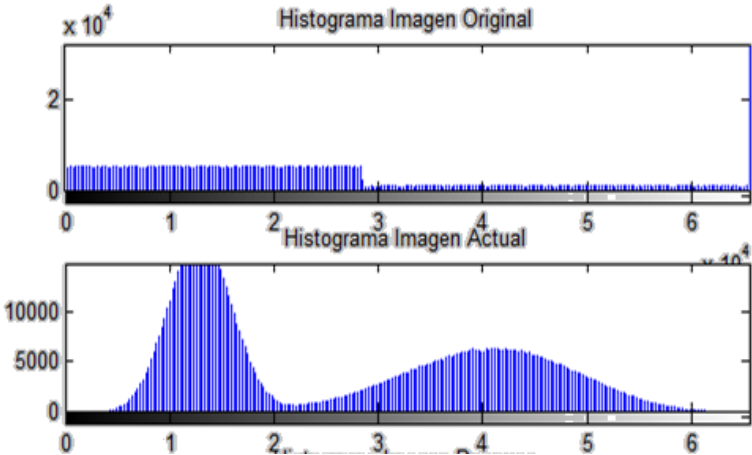
Fuente: Los Autores

Figura 72. Filtro Media con ventana



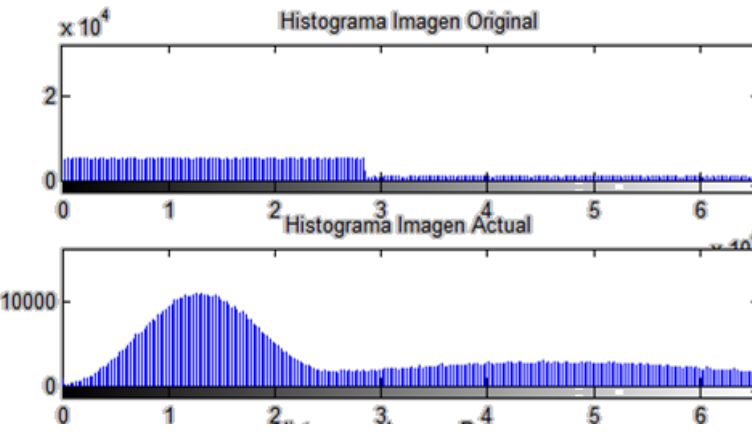
Fuente: Los Autores

Figura 73. Media sin ventana



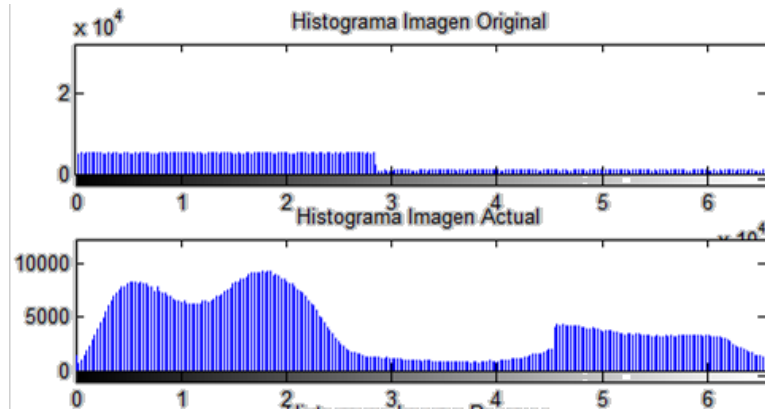
Fuente: Los Autores

Figura 74. Mediana



Fuente: Los Autores

Figura 75. Oddy.



Fuente: Los Autores

4.2. Experimento 2: Comparación de calidad de imágenes filtradas con índices numéricos

Se desarrolla una Gui que nos permite hacer la comparación directa de una imagen original ruido y con la imagen después del filtrado, se encuentra los siguientes resultados.

Imagen Original sin ruido

ENL	3.13017
Tamaño	1024 X 1024
SD	16640

Imagen con Ruido 1 %

ENL	3.11746
Tamaño	1024 X 1024
SD	16674.2

magen con Ruido 10%

ENL	2.26315
Tamaño	1024 X 1024
SD	19457.1

Imagen con Ruido 50%

ENL	1.35344
Tamaño	1024 X 1024
SD	22984.9

Tabla 2. Tabla comparativa imagen filtrada con original 1%

	Frost	Frost Mejorado	Kuan	Lee	Media Ventana	Media Sin Vent.	Mediana	Oddy
Correlación	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
SNR	34,89	34,32	34,89	31,47	26,65	31,22	35,49	29,11
EI	0,49	0,50	0,33	0,11	0,11	0,33	0,96	0,72
Q	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
EPI	0,24	0,33	0,24	0,18	0,22	0,35	0,40	0,36
ENL	3,11	3,13	3,13	3,15	3,13	3,13	3,13	3,12
SD	16666,70	16636,30	16629,00	16592,00	16569,30	16622,40	16647,20	16672,50
Índice Speckle	0,57	0,57	0,56	0,56	0,57	0,57	0,57	0,57
Tiempo Sg	104,39	459,63	114,76	0,37	0,12	0,08	0,19	325,79

Fuente: Los Autores

Tabla 3. Tabla comparativa imagen filtrada con original 10%

	Frost	Frost Mejorado	Kuan	Lee	Media Ventana	Media Sin Vent.	Mediana	Oddy
Correlación	0,89	0,81	0,86	0,85	0,84	0,86	0,85	0,91
SNR	18,76	16,22	19,59	27,17	24,71	19,55	15,58	17,37
EEI	0,49	0,50	0,33	0,11	0,11	0,33	0,59	0,85
Q	0,98	0,95	0,98	1,00	0,99	0,98	0,95	0,96
EPI	0,83	0,89	0,74	0,28	0,48	0,89	0,88	0,90
ENL	2,99	2,88	3,03	3,16	3,14	3,03	2,81	2,94
SD	19641,00	17261,00	16821,00	16461,00	16437,20	16804,00	17528,00	17037,00
Índice Speckle	0,58	0,59	0,57	0,56	0,56	0,57	0,60	0,58
Tiempo Sg	100,50	446,47	111,51	0,45	0,30	0,09	141,85	340,83

Fuente: Los Autores

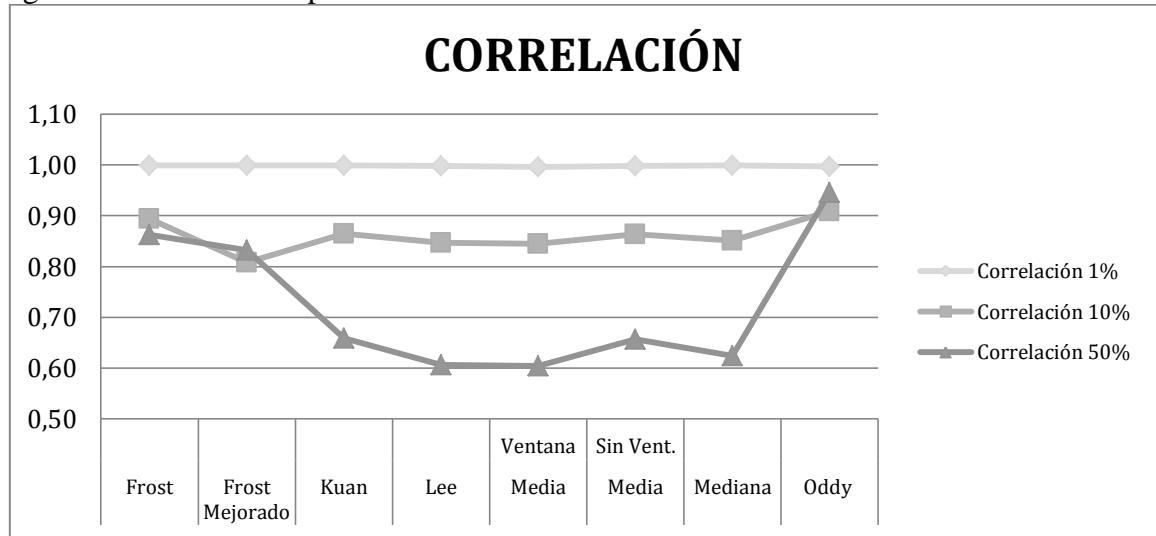
Tabla 4. Tabla comparativa imagen filtrada con original 50%

	Frost	Frost Mejorado	Kuan	Lee	Media Ventana	Media Sin Vent.	Mediana	Oddy
Correlación	0,862458	0,832458	0,65864	0,60646	0,6043	0,656455	0,624629	0,94548
SNR	18,76	10,54	13,24	17,47	17,04	13,29	11,26	17,29
EEI	0,46	0,48	0,29	0,10	0,10	0,29	0,33	0,81
Q	0,90	0,91	0,90	0,97	0,96	0,90	0,86	0,68
EPI	0,92	0,96	0,86	0,43	0,68	0,95	0,95	0,97
ENL	7,10	5,93	11,24	16,90	16,67	11,34	4,03	4,37
SD	16209,00	16606,70	15129,00	13910,00	13902,20	15084,70	18845,10	19276,40
Índice Speckle	0,607431	0,621038	0,56581	0,52055	0,52217	0,564867	0,682577	0,73783
Tiempo Sg	102,27	441,18	110,33	0,30	0,18	0,09	0,07	428,36

Fuente: Los Autores

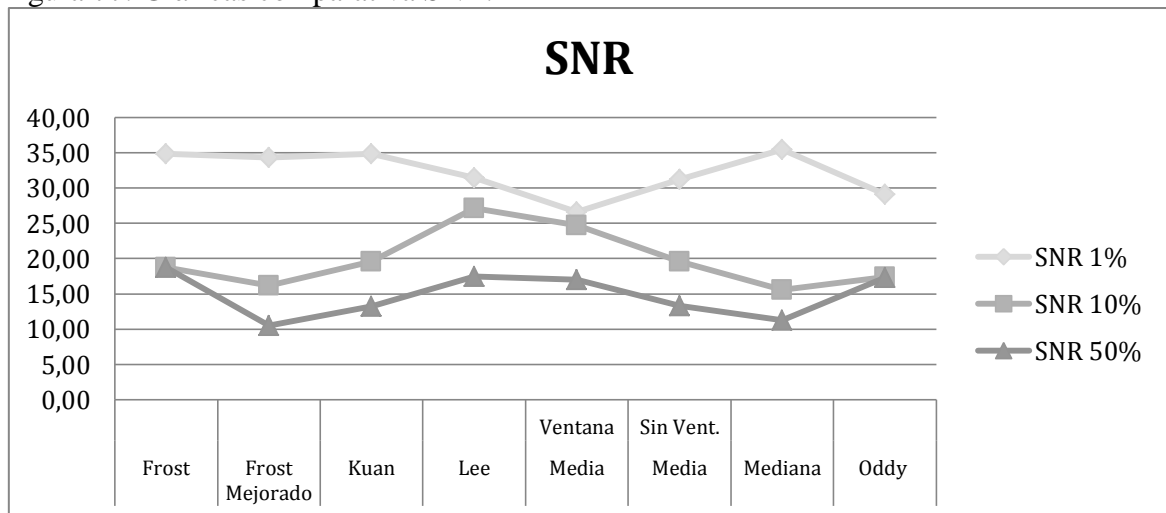
A continuación las gráficas comparativas por índices comparativos de calidad de imagen después de la aplicación de cada filtro con los diferentes niveles de ruido speckle.

Figura 76. Gráficas comparativa correlación.



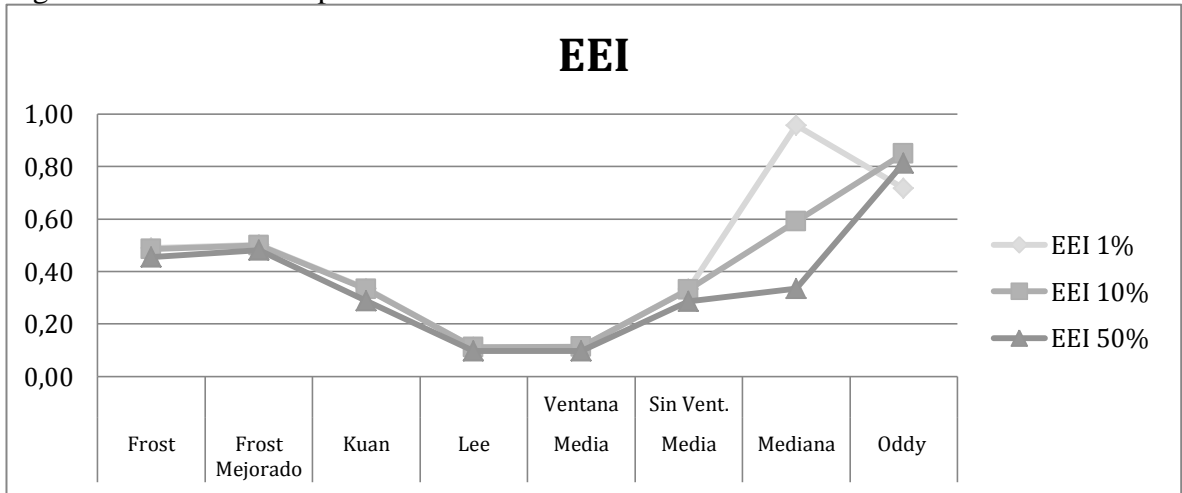
Fuente: Los autores.

Figura 77. Gráficas comparativa SNR.



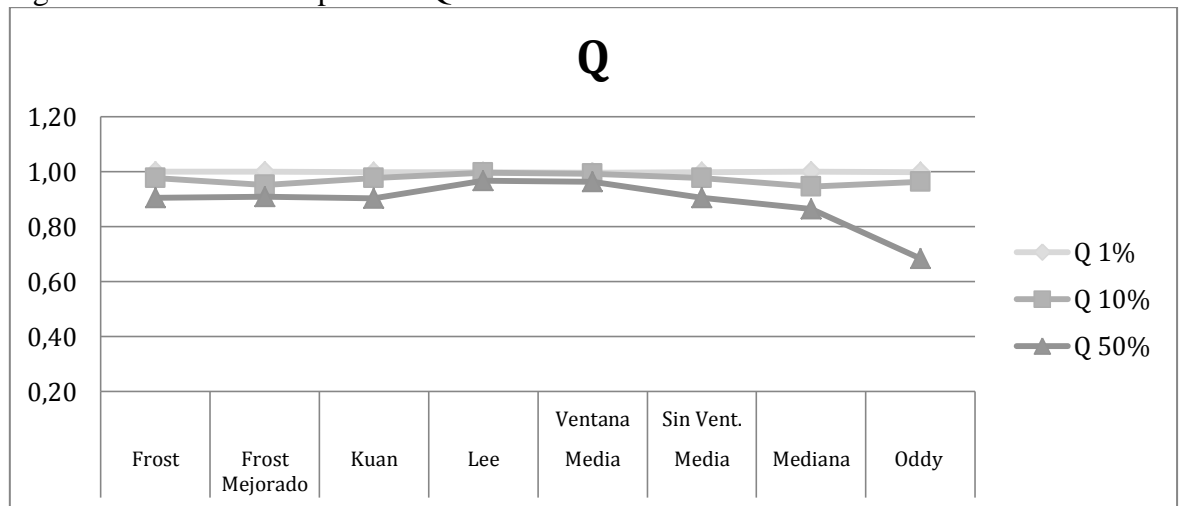
Fuente: Los autores.

Figura 78. Gráficas comparativa EEI.



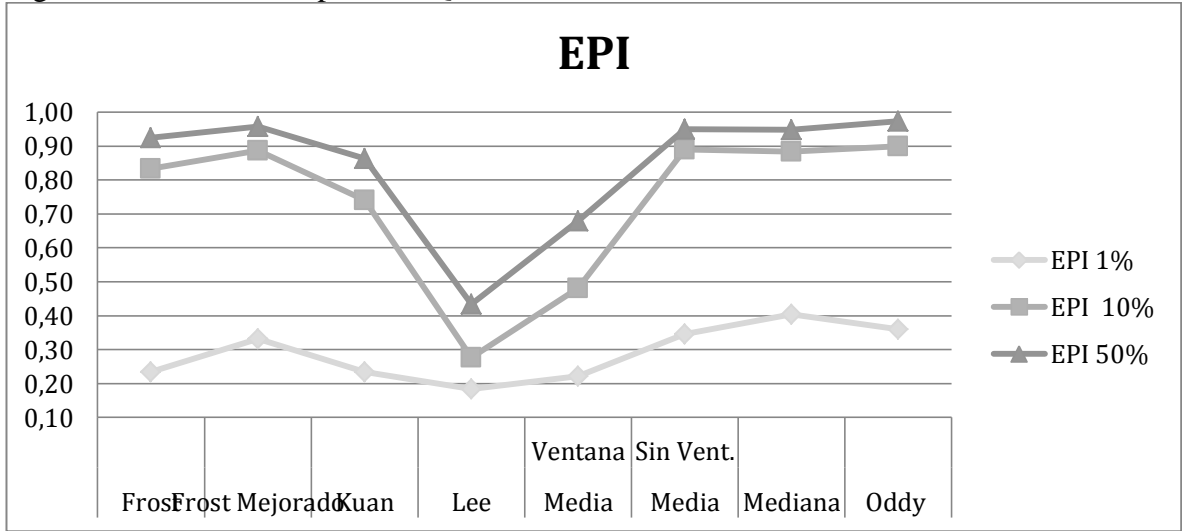
Fuente: Los autores.

Figura 79. Gráficas comparativa Q.



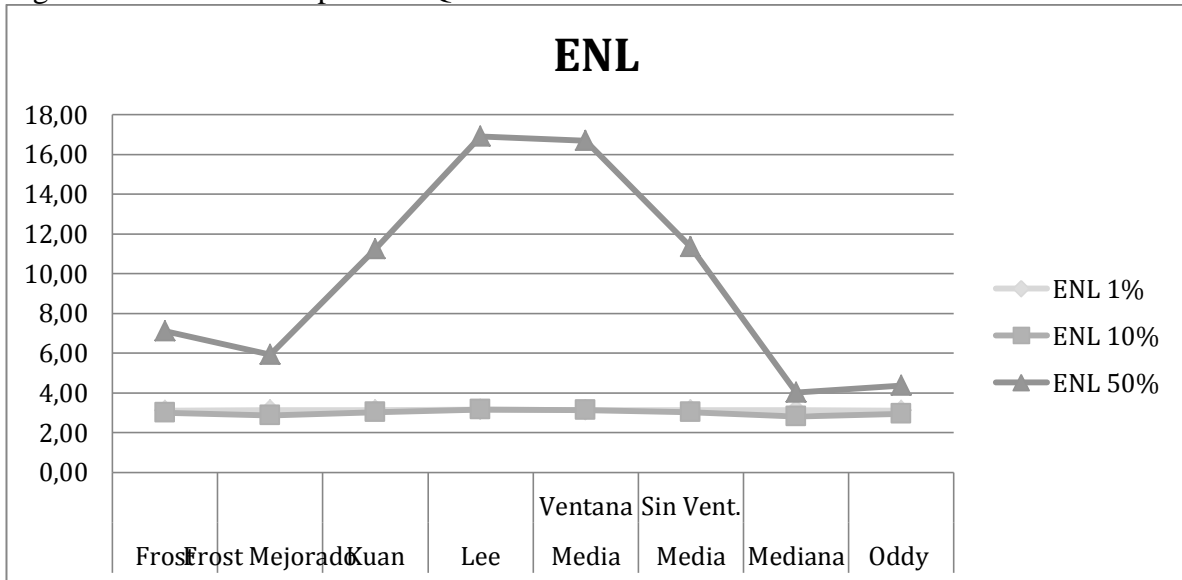
Fuente: Los autores.

Figura 80. Gráficas comparativa Q.



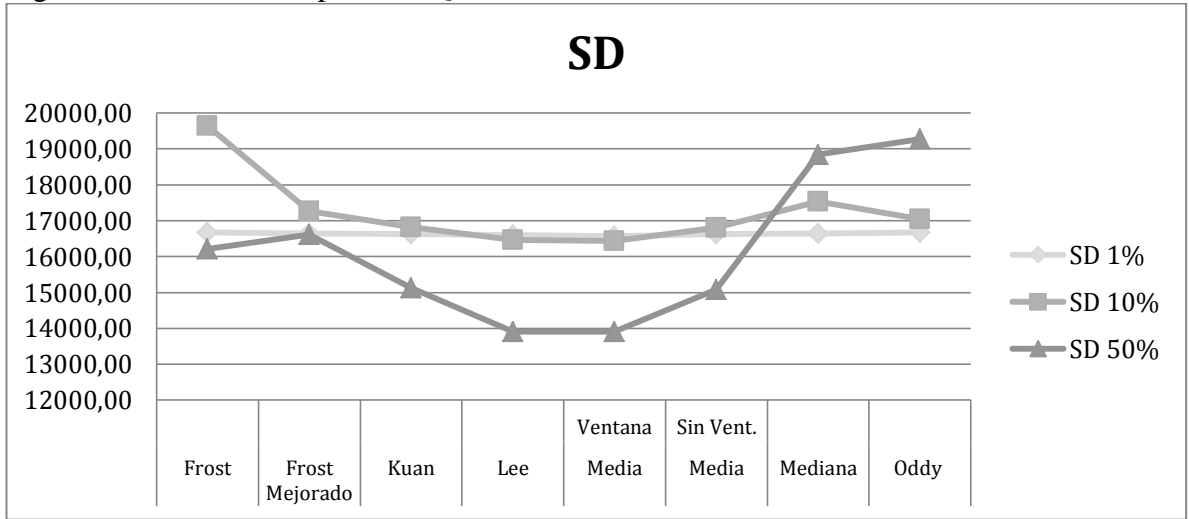
Fuente: Los autores.

Figura 81. Gráficas comparativa Q.



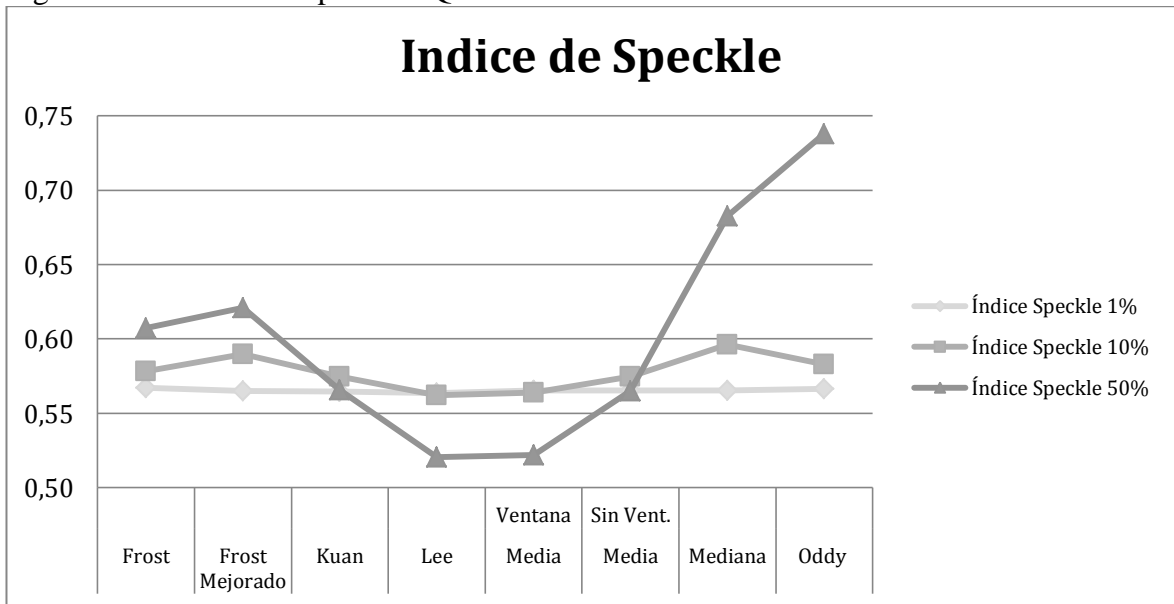
Fuente: Los autores.

Figura 82. Gráficas comparativa Q.



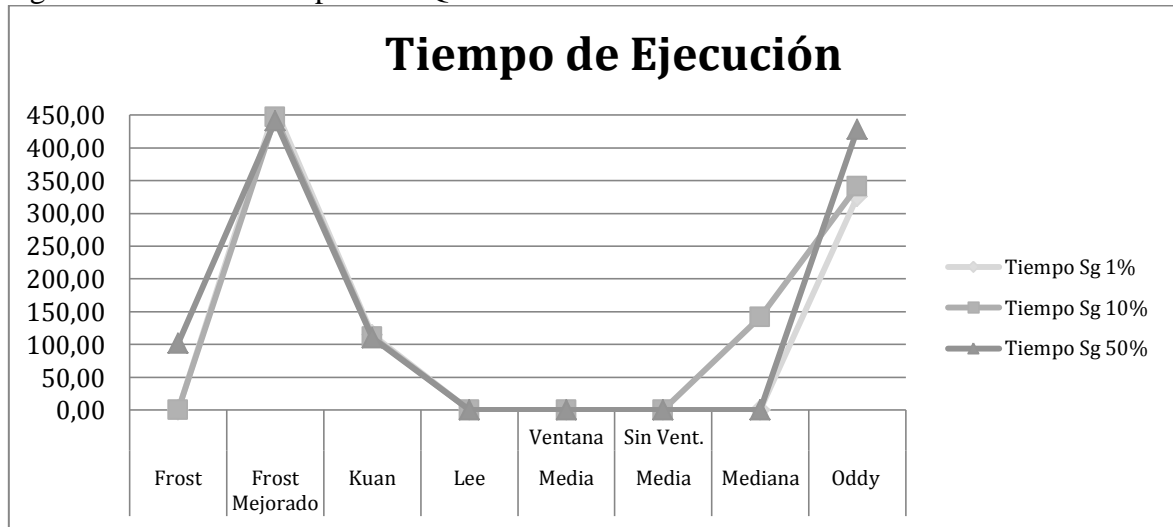
Fuente: Los autores.

Figura 83. Gráficas comparativa Q.



Fuente: Los autores.

Figura 84. Gráficas comparativa Q.



Fuente: Los Autores

Se observa que los índices clásicos MSE y ENL no determinan el grado de claridad y nitidez de una imagen, ya que filtros como el Media con ventana y el Lee presentan según estos índices mejor comportamiento, pero muestran baja calidad en EEI, SNR.

Esto determina un espectro más amplio mostrando que estos filtros en particular no son buenos conservando detalles y bordes. Dentro del análisis se incluyó un índice EPI, EEI y Correlación que son índices de contornos, que muestran claramente una manera muy apropiada de cuantificar la calidad de un índice en cuanto a la preservación y claridad de los bordes.

Analizando el resultado de la experimentación con el conjunto del índice EEI y correlación, los filtros que mejor se comportaron son Frost Mejorado, Media sin ventana, Mediana y Oddy. Las medidas de correlación y Q mostraron los filtros clásicos como Lee y mediana con ventana como muy apropiados a medida que el ruido en la imagen aumenta, pero cuando hay un bajo nivel de ruido en la imagen no se comportan tan bien. Sin embargo cabe destacar que los filtros Frost mejorado y Mediana tuvieron un comportamiento aceptable en este índice.

Comportamiento de los filtros con la imagen sintética encontramos los siguientes aspectos:

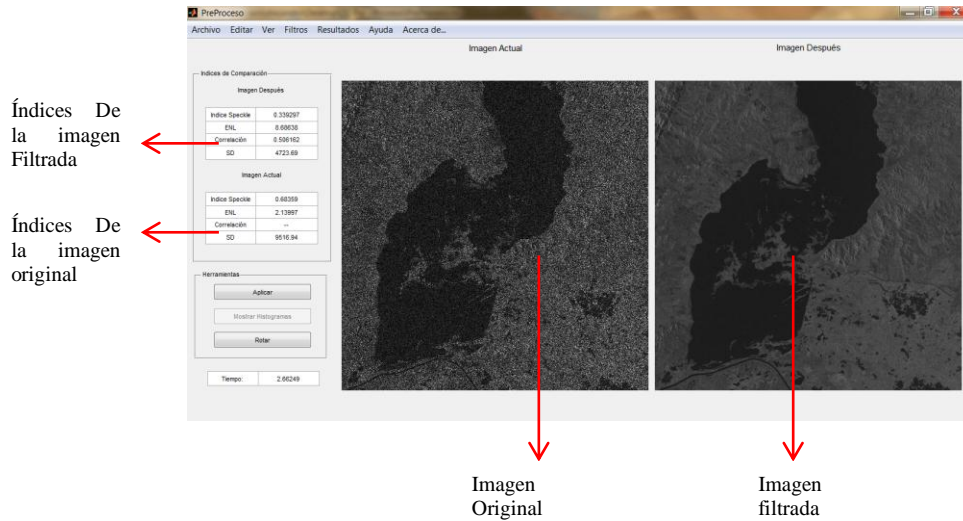
- Filtro Frost y Frost mejorado tienden hacia las medidas centrales, borrando datos cerca de los extremos lejanos de la media, sin embargo el filtro Frost mejorado conserva más valores permitiendo conservar algunos detalles.
- En el filtro Kuan observando su histograma tiene un comportamiento similar al Frost mejorado, este filtro conserva menos valores que el filtro Frost mejorado.
- Al analizar el filtro Lee y Media con ventana observamos que son los filtros que más valores promedian borrando muchos valores de píxeles que distan de las medias de los histogramas. Tienen otras particularidades en especial que el borde se difumino completamente.
- Media con ventana y Mediana, observamos los histogramas y estos filtros suavizan los valores que se alejan de la media conservando valores que pueden ser significativos.
- Filtro Oddy, al igual que en el experimento anterior, obtuvo un muy buen comportamiento conservando detalles y eliminando ruido *Speckle*, en este caso se evaluó que tanto afecta la calidad de una imagen. Este filtro es particularmente bueno para conservar detalles importantes en las imágenes.

4.3. Experimento 3: Comparación de imágenes filtradas imagen del Municipio del Repelón polarización HV con zoom.

Se elige al municipio del repelón recordando que en diversas ocasiones se ha visto afectado por inundación la más reciente y catastrófica en el 2010 con el rompimiento del canal del dique que ocasiono 22,196 damnificados, afectando la vida , trabajo y lugar de residencia de los lugareños. [69]

A continuación se presentan los resultados de la experimentación comparativa basada en los índices de calidad Índice de *Speckle*, ENL, Correlación, SD, Tiempo de ejecución. La implementación de un GUI mediante MATLAB, nos permite analizar los diferentes algoritmos de los filtros aplicados a las imágenes suministradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La GUI desarrollada se presenta a continuación:

Figura 85. GUI



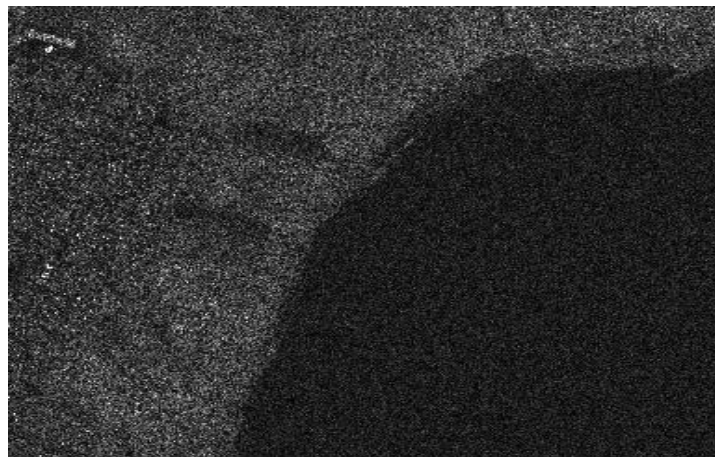
Fuente: Los Autores

A Continuación los datos de la imagen del Municipio del Repelón que se filtrará

Índice <i>Speckle</i>	0.698863
ENL	2.04746
Tamaño	385 X 312
Peso	237 Kb
SD	8110.46
Banda	HV
RE	5 x 5

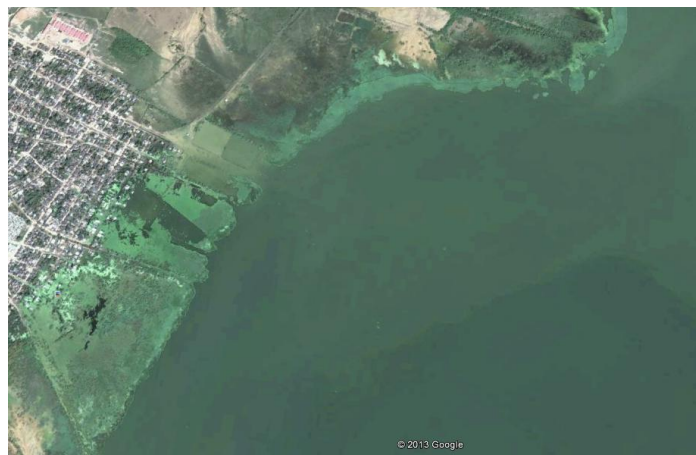
En la Figura 78 se observa un segmento de imagen SAR con bastante interferencia *speckle*, corresponde al municipio de Repelón en el departamento del Atlántico en Colombia. En la Figura 79 se observa una fotografía satelital que corresponde a la misma área, se logra apreciar con más claridad parte del casco urbano y del embalse del Guajáro, así como vegetación nativa y cultivos. Esta imagen contiene un ruido *speckle* que corrompe la nitides y fidelidad de la imagen.

Figura 86. Segmento imagen Satelital SAR municipio Repelón, Atlántico Colombia.



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Figura 87. Fotografía Satelital SAR municipio Repelón, Atlántico Colombia.

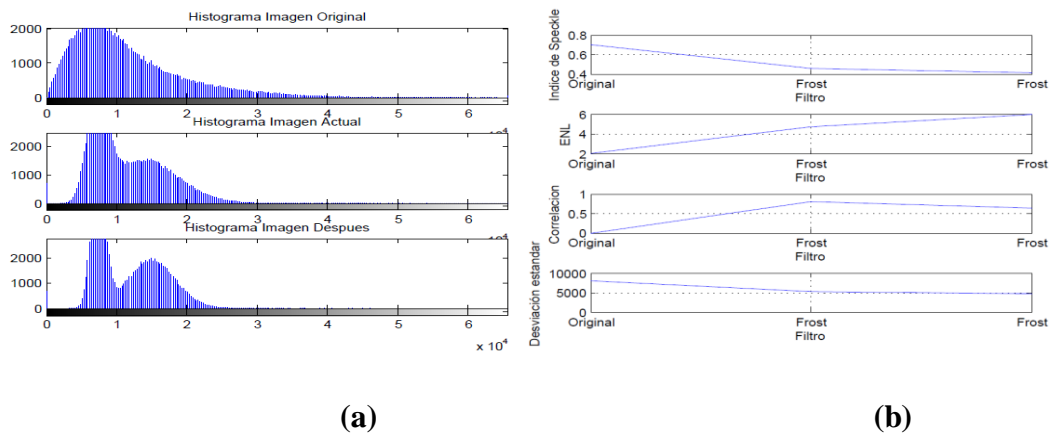


Fuente: Google Earth.

A continuación se procedió a la aplicación de cada uno de los filtros sobre la imagen y estos fueron los resultados.

Tabla 5. Resultados estadísticos el Repelón primer filtrado

	Frost Mejorado	Media Sin Vent.	Oddy
Índice Speckle	0.4783	0.42237	0.5321
ENL	4.3694	5.60531	3.5310
Correlación	0.8476	0.6076	0.9071
SD	5552.17	4881.5	6064.27
Tiempo Sg	5.40061	0.044085	5.0525

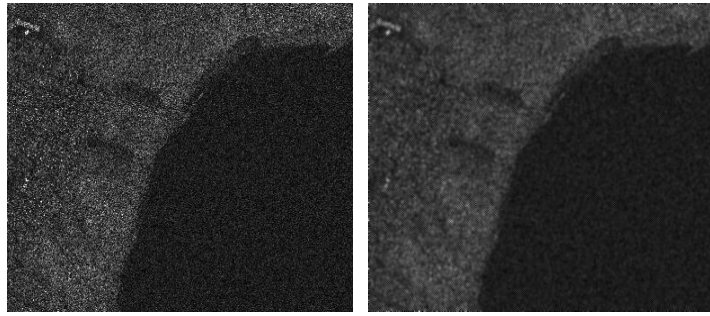


Fuente: Los Autores

4.3.1. Frost Mejorado.

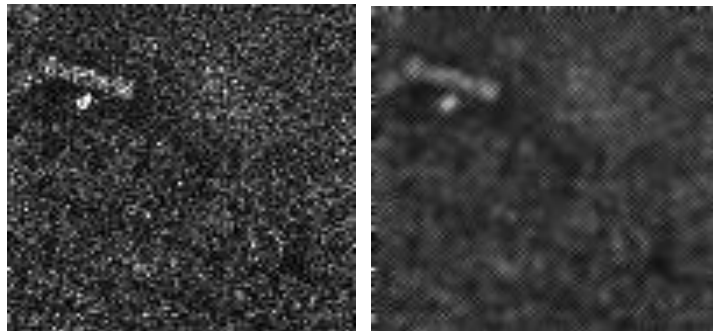
Si se analizan los resultados del filtro Frost mejorado pareciese que preserva menos detalles que el anterior. Sin embargo si bien es cierto que los índices de correlación y *Speckle* parecen mejores en el filtro anterior, la desviación estándar no se ve tan afectada en este filtro lo que permite que ciertos detalles que en el anterior filtro se perdieran o difuminaran en este se conserve un poco mejor.

Figura 88. Filtro Frost Mejorado



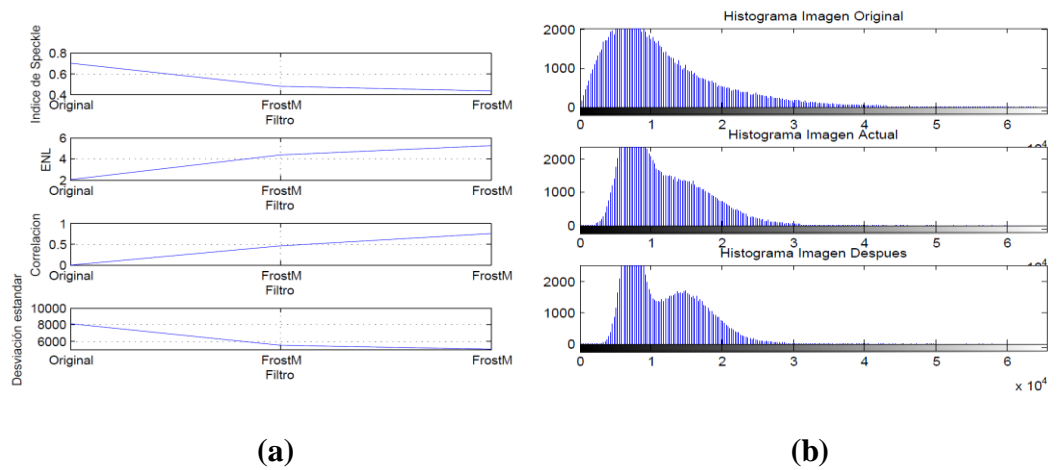
Fuente: Los Autores

Figura 89. Zoom Filtro Frost Mejorado estructura rígida.



Fuente: Los Autores

Figura 90. Histogramas correspondientes:



(a)

(b)

Fuente: Los Autores

4.3.5. Media sin Ventana.

El filtro media sin ventana presenta un índice de *Speckle* un poco más alto que el anterior filtro, sin embargo no afecta del mismo modo la DS, lo que produce que se conserven valores significativos en la imagen. Al realizar un zoom podemos observar mejor detalles de las imágenes si lo comparamos con el anterior o con Lee.

Figura 91. Filtro Media sin Ventana

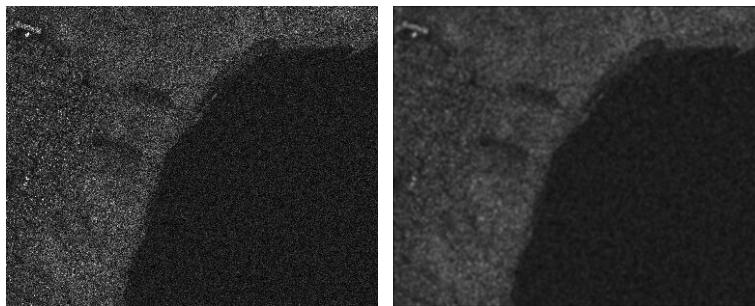


Figura 92. Zoom sobre estructura rígida.

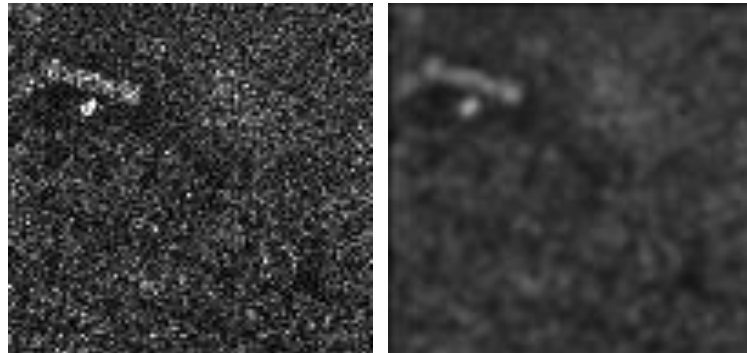
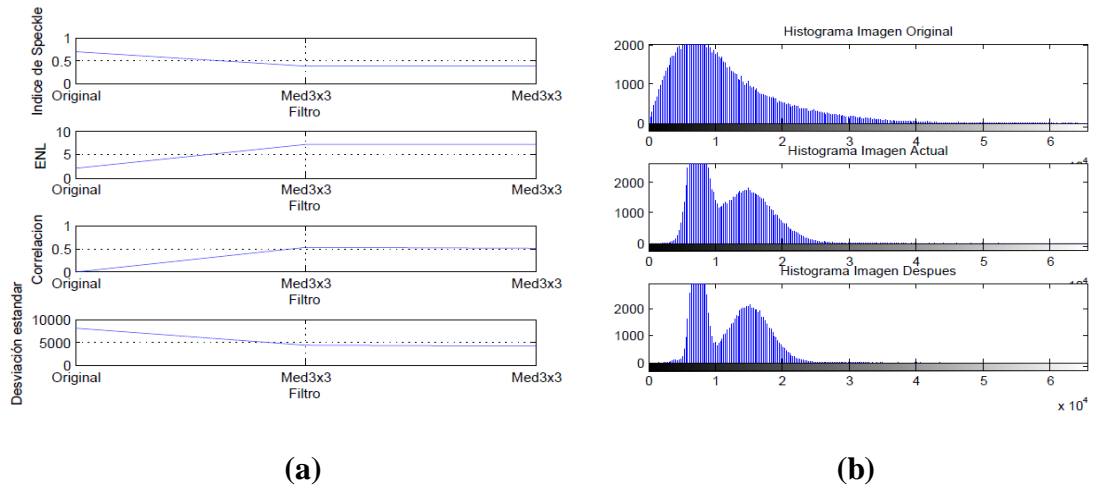


Figura 93. Histograma Correspondiente:

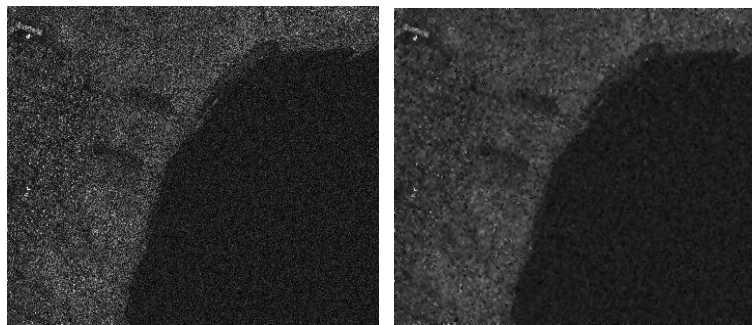


Fuente: Los Autores

4.3.6. Filtro Oddy.

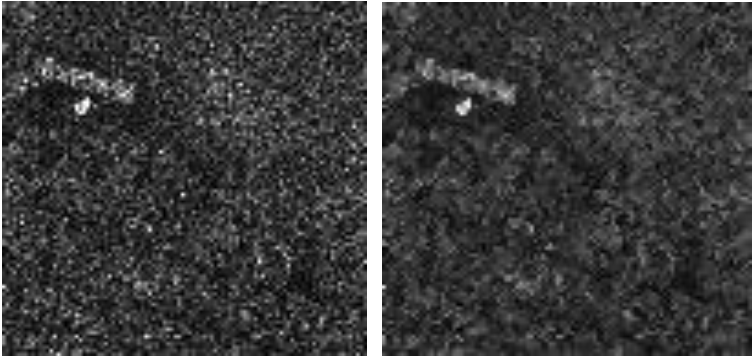
Este filtro Afecta valores ENL y desviación estándar, sin embargo a diferencia de otros filtros, conserva otros índices de forma más equitativa, lo que en conjunto nos da como resultado una imagen con un buen filtrado que permite ver estructuras y conservar detalles en la imágenes. El filtro se ejecuta en un tiempo medio.

Figura 94. Filtro Oddy:



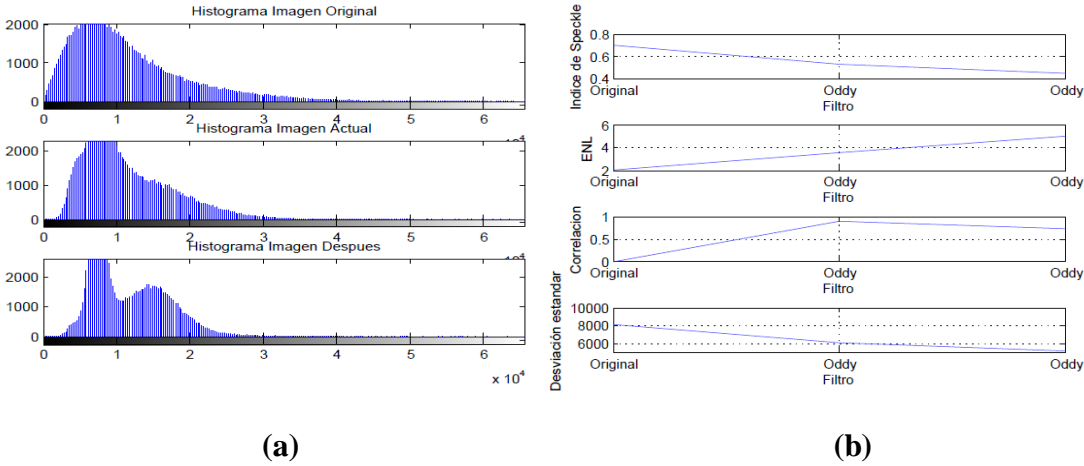
Fuente: Los Autores

Figura 95. Zoom sobre estructura rígida:



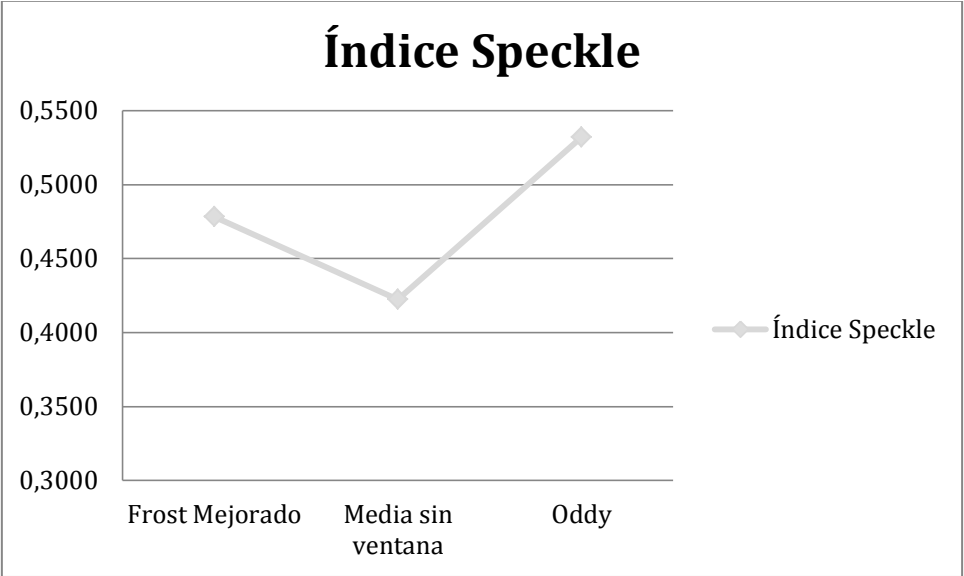
Fuente: Los Autores.

Figura 96. Histograma y Graficas comparativas:



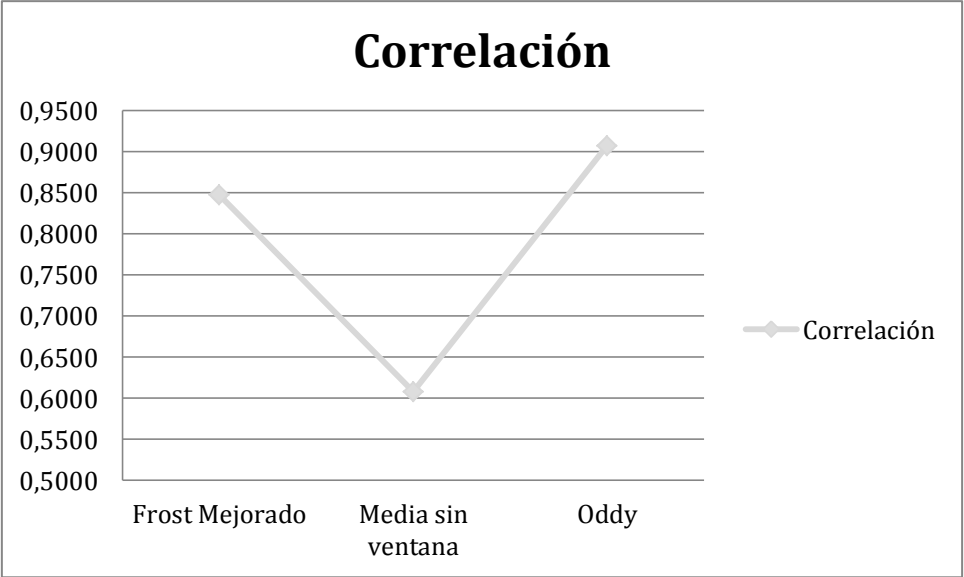
Fuente: Los Autores

Figura 97. Índice de Speckle el Repelón.



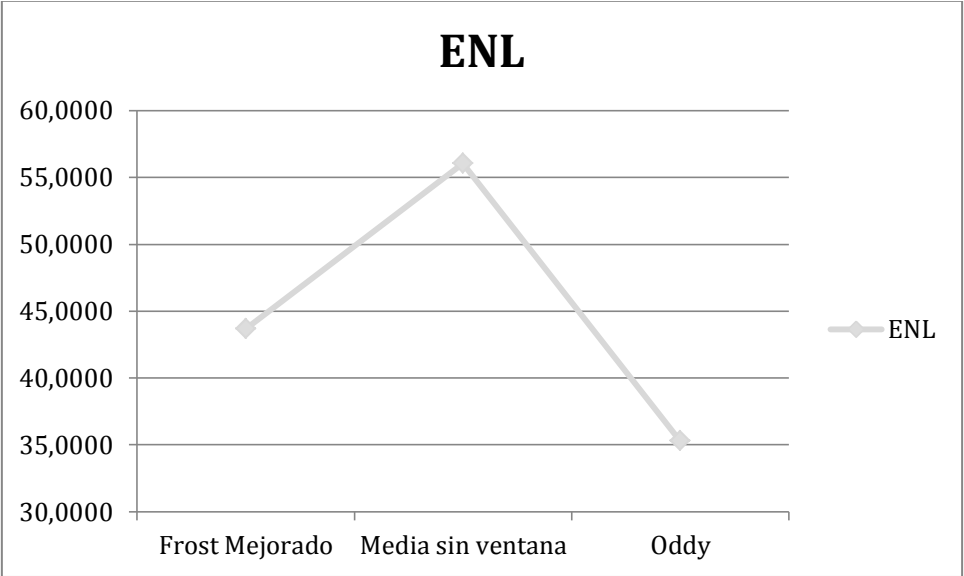
Fuente: Los Autores

Figura 98. Índice de correlación el Repelón.



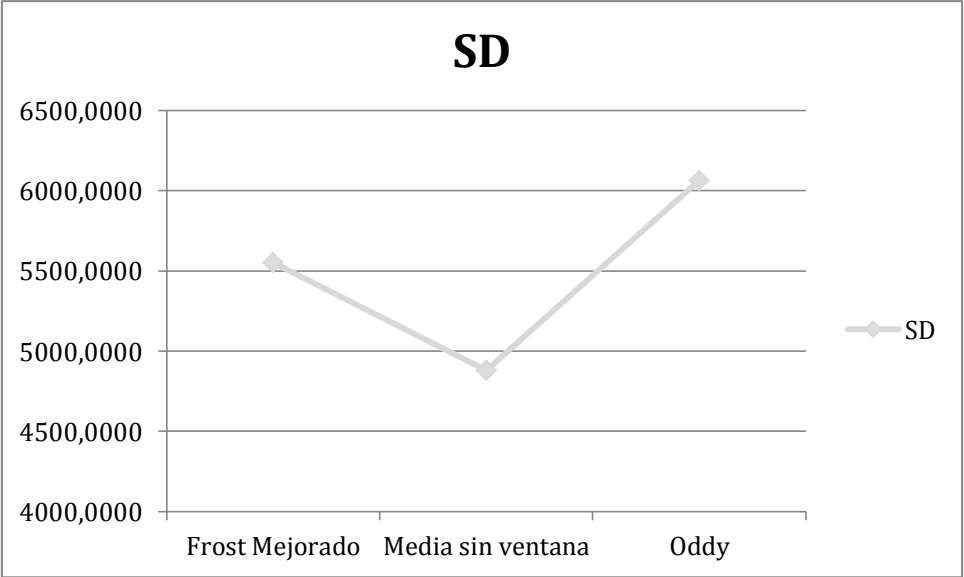
Fuente: Los Autores

Figura 99. Índice ENL el Repelón.



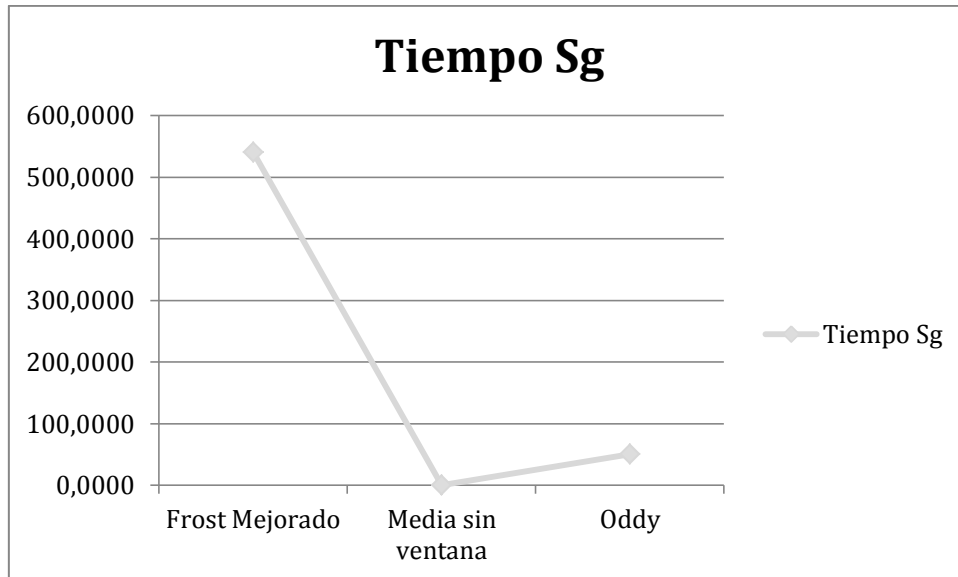
Fuente: Los Autores

Figura 100. Índice SD el Repelón.



Fuente: Los Autores

Figura 101. Índice ENL el Repelón.



Fuente: Los Autores

4.4. Experimento 3: Comparación estadística de filtros imagen de Cartagena con polarización HH

En este experimento utilizamos una segmento de imagen SAR de la ciudad de Cartagena su escogencia se debió a las múltiples inundaciones que sufre la ciudad desde tiempo de la colonia, y que aún hoy persisten, que presenta graves problemas para la ciudad debido a la alta densidad poblacional [70].

Índice Speckle	0.83684
ENL	1.42796
Tamaño	1425 X 925
SD	17599.3
Banda	HH
RE	5 X 5 mt
Peso	25 Mb

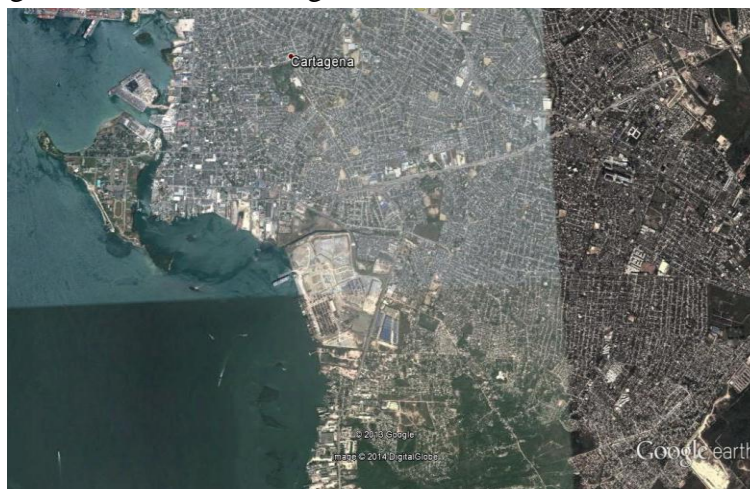
Figura 102. Imagen SAR(HV) de la Ciudad de Cartagena Colombia.



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

A continuación observamos la misma imagen, en una fotografía satelital.

Figura 103. Fotografía satelital de Cartagena Colombia.



Fuente: Google Earth.

Este experimento varía en la polimetría de la imagen que se usa, en este caso se usa polarización HV. En la imagen se observa la ciudad de Cartagena (estructuras artificiales) y la costa del océano atlántico. A continuación los resultados del experimento.

Tabla 6. Resultados numéricos del filtrado en Cartagena.

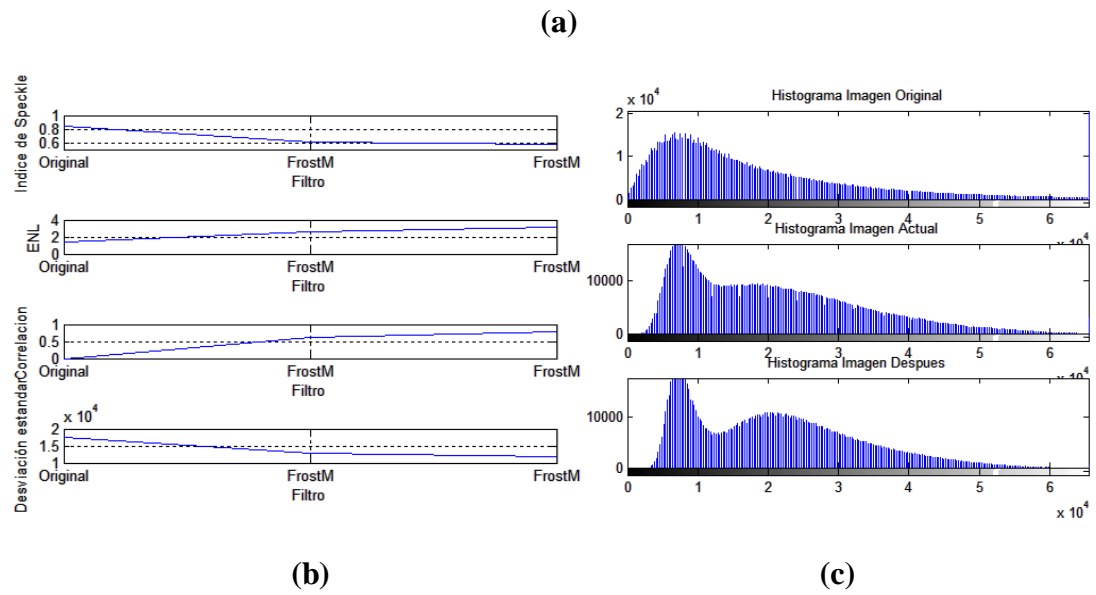
	Frost Mejorado	Media	Oddy
Índice Speckle	0.61510	0.569	0.704
ENL	2.64303	3.082	2.015
Correlación	0.61198	0.712	0.938
SD	12936.1	11964	14352
Tiempo Sg	123	1.19	39.40

Fuente: Los Autores

4.4.5. Frost Mejorado

Figura 104. Gráficas Frost Mejorado.





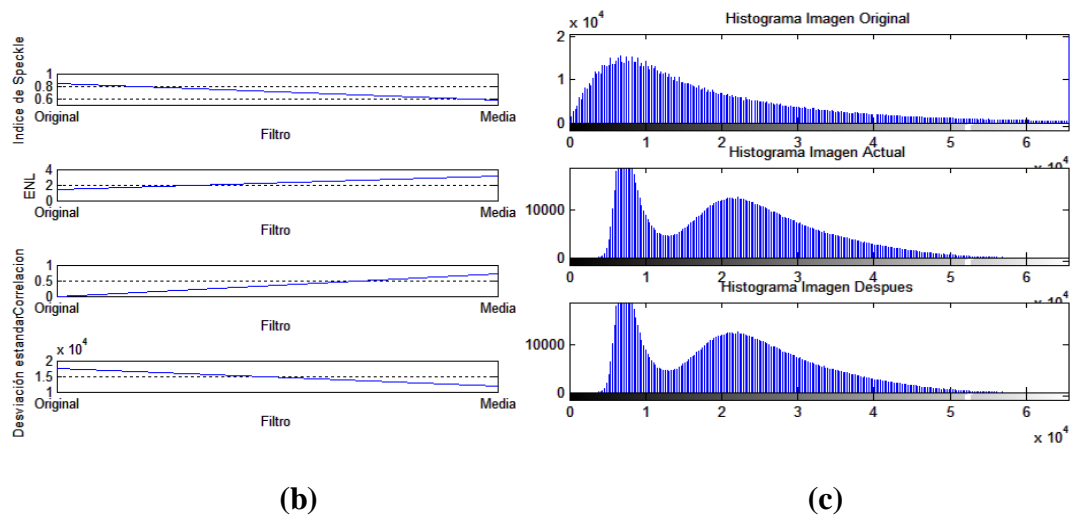
Fuente: Los Autores

4.4.6. Filtro Media sin Ventana.

Figura 105. Gráficas filtro Media sin Ventana.



(a)

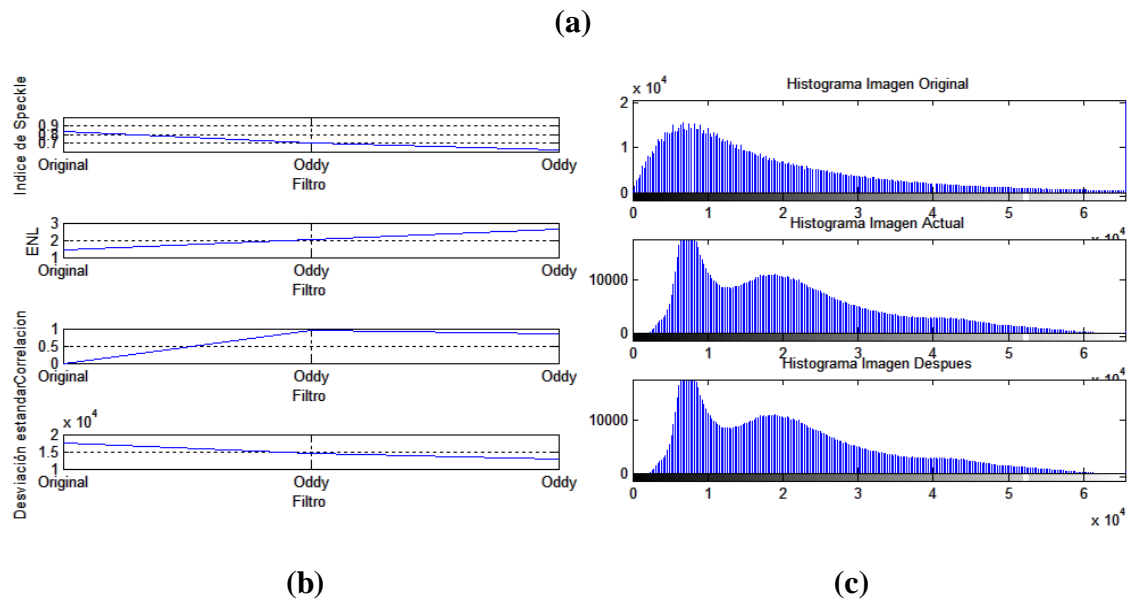


Fuente: Los Autores

4.4.7. Filtro Oddy:

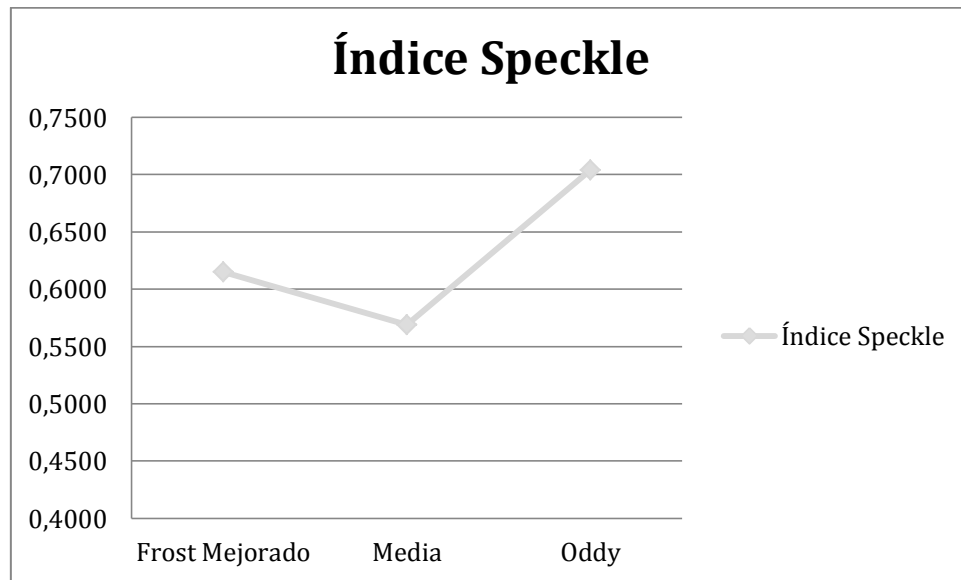
Figura 106. Gráficas filtro Oddy.





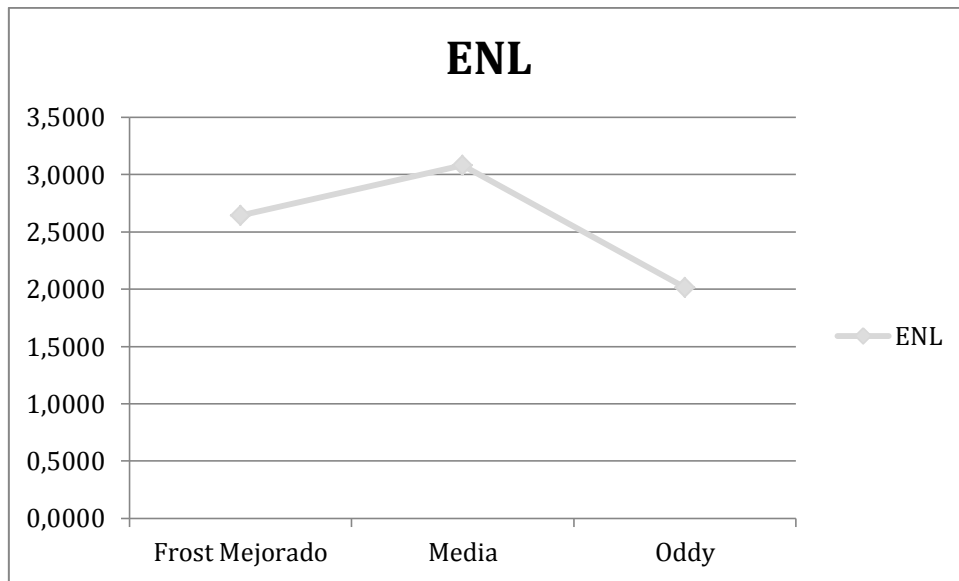
Fuente: Los Autores

Figura 107. Gráficas índices de calidad imagen Cartagena.



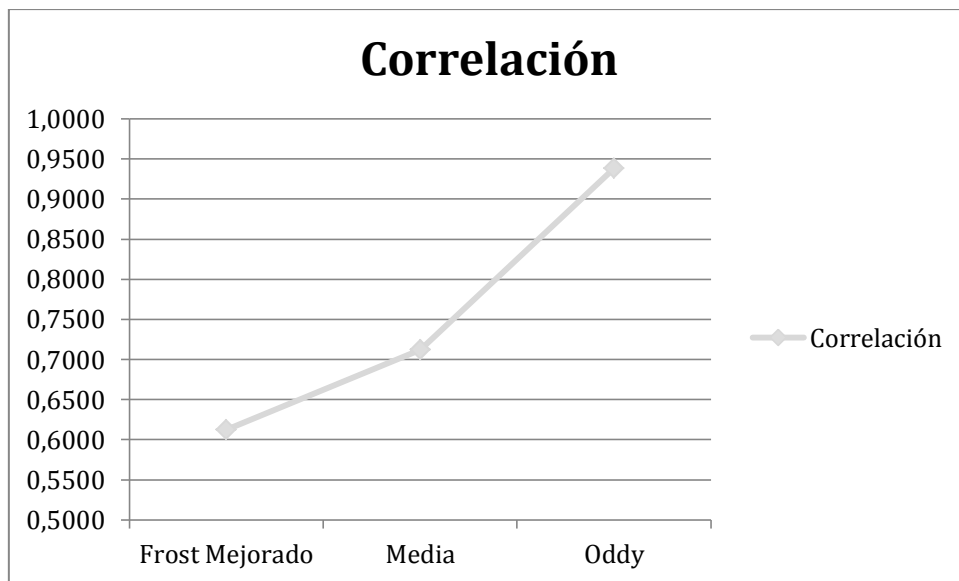
Fuente: Los Autores

Figura 108. Gráficas índices de calidad imagen Cartagena



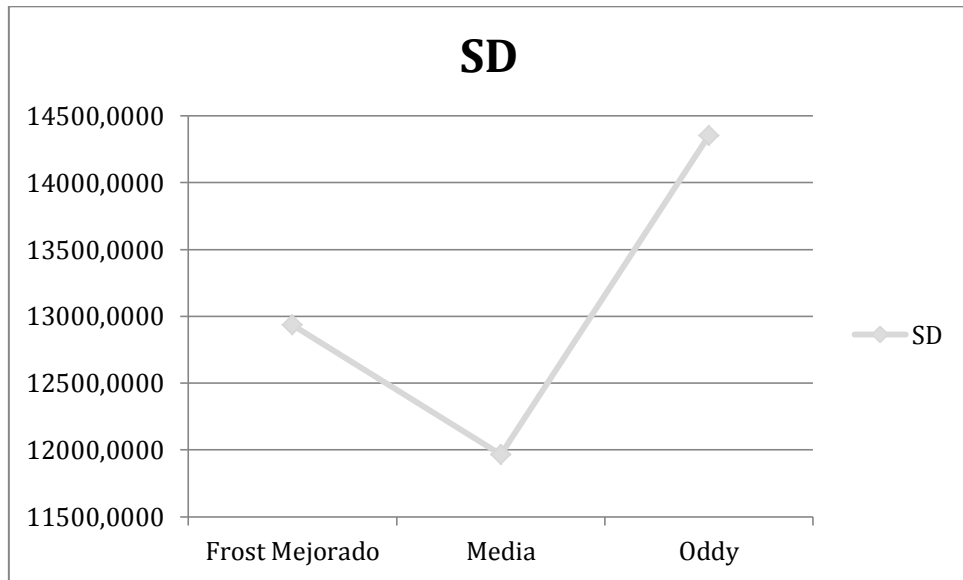
Fuente: Los Autores

Figura 109. Gráficas índices de calidad imagen Cartagena



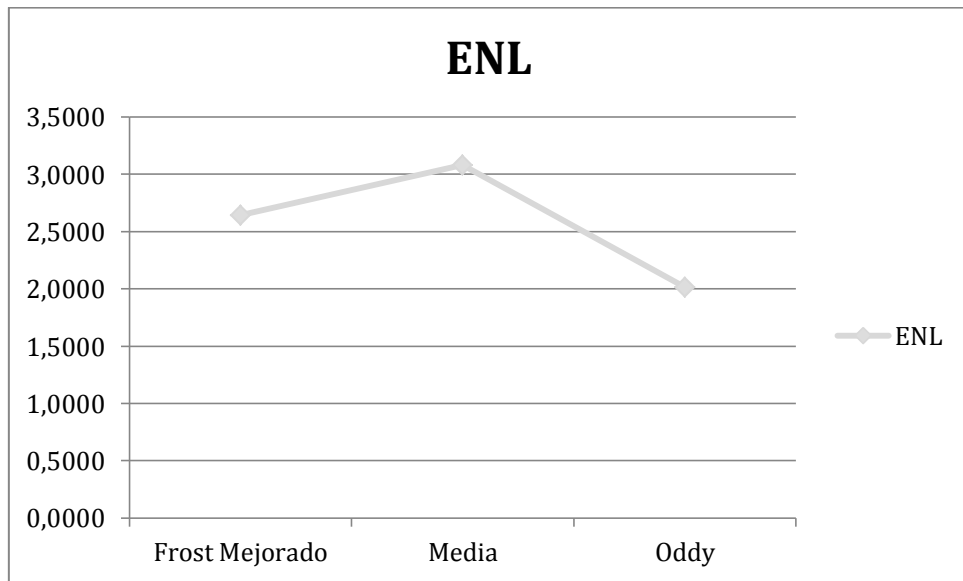
Fuente: Los Autores

Figura 110. Gráficas índices de calidad imagen Cartagena



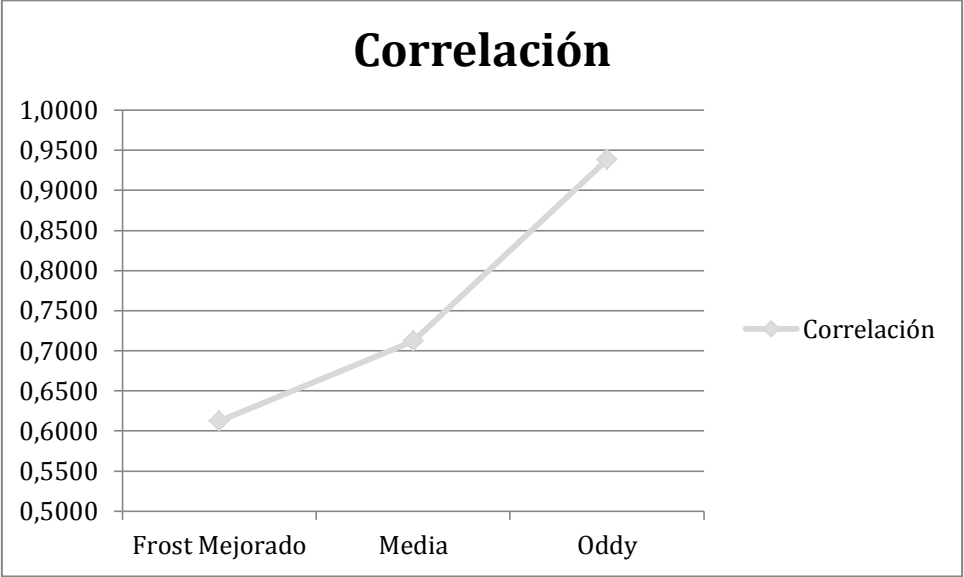
Fuente: Los Autores

Figura 111. Gráficas índice ENL filtrado imagen Cartagena



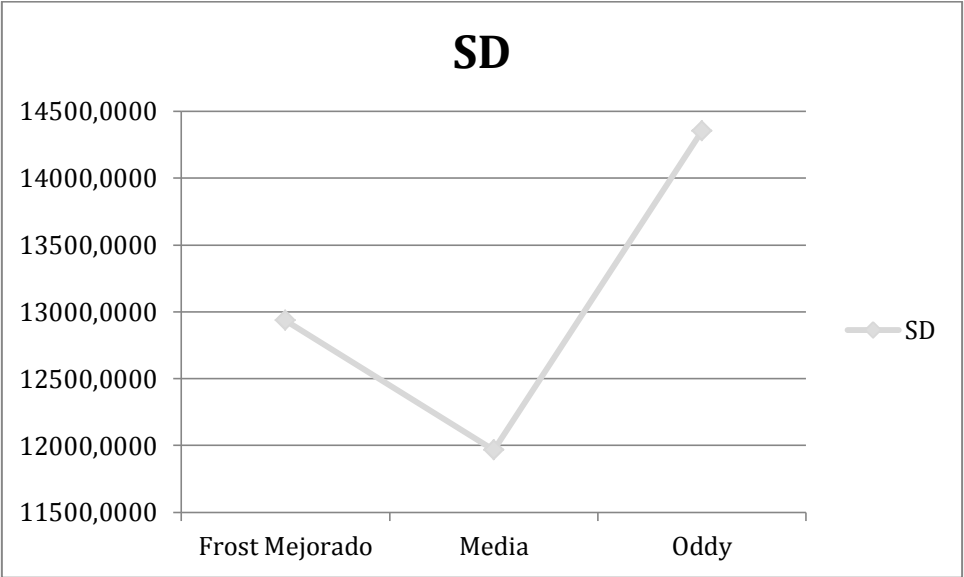
Fuente: Los Autores

Figura 112. Gráficas índice de correlación imagen Cartagena



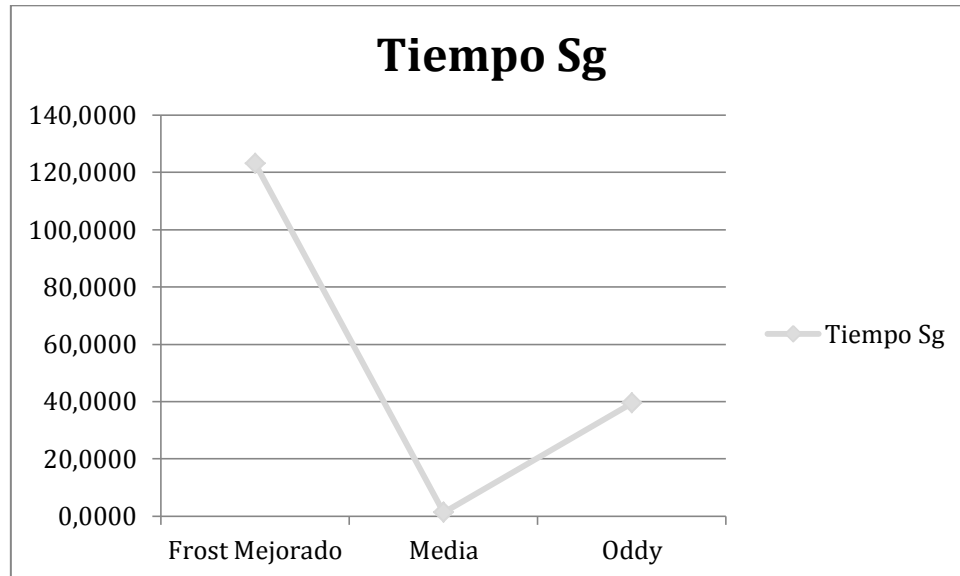
Fuente: Los Autores

Figura 113. Gráficas Desviación Estándar imagen Cartagena



Fuente: Los Autores

Figura 114. Gráficas tiempo de ejecución filtros imagen Cartagena.



Fuente: Los Autores

Al establecer una comparación entre algunos tipos de filtrado, cruzándola con los criterios más relevantes de comparación para el procesamiento de imágenes, buscando reducir el ruido que siempre se presentará, podemos afirmar las siguientes conclusiones de acuerdo a estos parámetros:

- **Índice *Speckle*:** El filtro Mediana y el Oddy, son los que mejor se aproximan a dejar la imagen más cercana a la original, ya que están más próximos a la unidad con un nivel de reducción del *speckle* del 0,62024 y 0,6130 respectivamente.
- **ENL:** El filtro media tubo el mejor desempeño eliminando ruido *speckle* sin embargo los índices de calidad de frost mejorado y el Oddy están relativamente cerca Oddy presentan un comportamiento deseado, porque sus niveles son los más reducidos entre los resultados que muestran los otros filtros.
- **Correlación:** En este criterio de comparación, es el filtro Oddy que se destaca con 0,83912, acercándose a la unidad, seguido del filtro Frost Mejorado con 0,79. Así de esta manera estos filtros son los que mejor preservan los bordes en una imagen.

- **SD:** Nuevamente es el filtro Oddy quien nos informa qué tanto cambia en su conjunto un área en cuanto a la tonalidad de sus pixeles, que aunque maneja un nivel más alto de desviación estándar, indica que elimina ruido pero busca la conservación de bordes.
- **Tiempo de ejecución:** El filtro más rápido de nuestra selección es el filtro media sin ventana. Este criterio es esencial a la hora de realizar múltiples filtrados sobre diferentes imágenes que puede ahorrar tiempo considerablemente.

5. CONCLUSIONES

- Se realizó una investigación sobre los métodos clásicos de filtrado para imágenes SAR, así como los índices de calidad para aplicarlos en nuestro proyecto; se analizó y se implementó el algoritmo para cada filtro y nueve índices de calidad de la imagen.
- Concluimos según la literatura existente, con una indagación en el estado del arte que nuestro aporte es el primero en términos de comparación de filtros para el territorio colombiano en imágenes satelitales SAR utilizando como referencia conservación de bordes y detalles.
- Se desarrolló una GUI para filtrar las imágenes SAR con ocho métodos clásicos de filtrado, y una GUI para comparar la calidad de las imágenes sintéticas con diferentes niveles de *Speckle* después del proceso de filtrado.
- Se concluyó que los índices EEI, EPI y Correlación, que indican la conservación de contornos de la imagen, están relacionados mostrando resultados que son coherentes y complementarios entre sí (tabla 4), que contrastado con las investigaciones actuales no se había documentado dicha relación.
- El resultado de la experimentación con imágenes sintéticas mostro que el filtro con mejores resultados conservando bordes y detalles es el filtro Oddy: el Índice de Correlación obtuvo un 50% de mejoría que otros filtros, el Índice EEI comparado a otros filtros es superior en un 25% y el índice EPI con el resultado más alto del 0,95 como muestra la tabla 4.
- Encontramos que los filtros Lee, Media con ventana, Media sin ventana y Mediana son los filtros de menor gasto computacional y se ejecutan en tiempos relativamente similares (ver Tabla 4). De estos, para nuestro caso de estudio recomendamos el filtro Media sin ventana que es la base del filtro Oddy, como filtro de rápida ejecución.
- Las imágenes de nuestro caso de estudio se filtran con el método Oddy y se entregan con una reducción de índice de *Speckle* del 30%, un índice de Correlación superior al 90% y un Número Equivalente de Looks (ENL) de más de 2 unidades después del proceso de filtrado.

- Otro filtro que se destacó en conservación de bordes es el filtro Frost Mejorado que obtuvo un desempeño cercano al filtro Oddy en los índices Correlación, EEI y EPI como se observa también en la tabla 4.
- La inclusión del índice EPI mostró estar acorde con los índices clásicos de conservación de detalles y bordes para teledetección; este índice se usa generalmente en imágenes de diagnóstico ultrasónicas. Se adaptó para imágenes SAR que presentan el mismo tipo de ruido y resultó útil mostrando otra referencia comparativa que complementa los resultados de los índices clásicos como vemos en las tabla 2, 3 y 4.

5.1. TRABAJOS FUTUROS

- Implementar nuevos métodos de filtrado y compararlos con el filtro Oddy, con el fin de encontrar filtros más eficaces, para conservación de bordes y detalles.
- Implementación de nuevos índices bajo el modelo de ruido multiplicativo que busquen un equilibrio entre reducción de *Speckle* y desviación estándar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bolaños, S, CIAT, *Generación de Modelos Digitales de Elevación con Imágenes RADARSAT: uso del método radargramétrico*, 2001.
- [2] Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial, *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia : un aporte para la construcción de políticas publicas*, Bogota: Banco Mundial, 2012.
- [3] CCRS - Globe SAR Program, «Material educativo para teledetección mediante radares,» Processing 2, Mayo 2009. [En línea]. Available: WWW: http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/programs/globsar/gsar2_e.html. [Último acceso: 24 Abril 2013].
- [4] RAE, *Diccionario de la Lengua Española 22ª edición.*, Real Academia de la Lengua Española, Consultado el 23 de Abril de 2013.
- [5] Russian Space Research Institute, «Space Research Institute,» Instituto de Investigaciones Espaciales de la Academia de Ciencias de Rusia (IKI), [En línea]. Available: <http://www.iki.rssi.ru/eng/>. [Último acceso: 5 2 2013].
- [6] NASA - National Aeronautics and Space Administration EUA, «nasa.gov,» NASA, 30 Abril 2013. [En línea]. Available: <http://science.nasa.gov/missions/seasat-1/>.
- [7] Jet Propulsion Laboratory - JPL NASA, «<http://www.jpl.nasa.gov/>,» NASA, 19 Agosto 2008. [En línea]. Available: <http://airsar.jpl.nasa.gov/>.
- [8] Van der Sanden J.J., Ross S.G., *Applications Potential of RADARSAT-2* -, Toronto: Canada Centre for Remote Sensing/Centre canadien de télédétection, 2005.
- [9] Pérez Vega, Rodrigo C; Zamanillo Sáinz de la Maza, José María; López, Alicia Casanueva, *Sistemas de Comunicación*, Publicaciones de la Universidad de Cantabria ed., U. d. Cantabria, Ed., Santander: Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, 2007, p. 495.
- [10] N. D. M. Cervera, *Diseño del subsistema RF para el receptor SAR biestático en banda-C SABRINA*, Bellatera- Cataluña España: Universidad Autonoma de Barcelona, 2007.
- [11] Freeman, Tony - JPL NASA, «What is Imaging Radar?,» Mayo 1996. [En línea]. Available: <http://southport.jpl.nasa.gov/desc/>. [Último acceso: 03 03 2013].

- [12] J. Morales, «Fundamentos de Percepción Remota,» Junio 2012. [En línea]. Available: http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/informes_anuales/2012.pdf.
- [13] J. C. y. R. McDonough, *Synthetic Aperture Radar*, John Wiley & Sons., 1991.
- [14] E. Chuvieco, *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Madrid: Ediciones Rialp S.A., 2000.
- [15] Meliá, J. y J.A. Sobrino, «A study on the utilization of SIR-A data for population estimation in the Eastern part of Spain,» *Geocarto International*, vol.2, vol. 2, nº 4, pp. 33-38, 1987.
- [16] R. Schowendgerdt, *Remote Sensing, Models and Methods for Image Precessing*, Academic Press, 2006.
- [17] E. Hecht, *Elementos de Electromagnetismo*, 4 th ed., U. d. Texas, Ed., Texas: Pearson Addison Wesley, 2001.
- [18] C. Perez G. y A. L. Muñoz, *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*, Madrid: Universidad de Salamanca, 2006.
- [19] Gambini, Maria Juliana, *Modelos de segmentación basados en regiones y contornos activos aplicados a imágenes SAR*, F. d. C. E. y. Naturales, Ed., Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2006.
- [20] R. De la Rosa Flor, *Procesamiento digital de imágenes*, Mexico: Universidad Autónoma de Puebla, 2007.
- [21] NASA, «Imagine the Universe Dictionary,» NASA, 5 Junio 2004. [En línea]. Available: <http://imagine.gsfc.nasa.gov/>.
- [22] C. U. Library, *Tutorial de digitalización de imagenes*, New York, 2003.
- [23] S. Johnson, *Stephen Johnson on Digital Photography*, O'REILLY, 2006.
- [24] Processing Software, «Learning introduction,» processing.org, 2012. [En línea]. Available: <http://processing.org/>. [Último acceso: 15 01 2013].
- [25] Z. D. P. M. Cuevas E., *Procesamiento digital de imágenes con MATLAB y Simulik*, Mexico: Alfaomega, 2011.
- [26] Adobe Systems Incorporated, «<http://partners.adobe.com/>,» Abode, [En línea]. Available: <http://www.awaresystems.be/imaging/tiff/faq.html>. [Último acceso: 3 02 2014].
- [27] A. W. Doerry, «Real-time Polar-Format Processing for Sandia's Testbed Radar

Systems,» 2001.

- [28] W. R. F. Brown, «Range-Doppler Imaging with Motion though Resolution Cells,» Vols. %1 de %2Vol. AES-5, n° No.1, pp. 98-102, January 1969.
- [29] J. Walker, «Range-Doppler Imaging of Rotating Objects,» *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vols. %1 de %2Vol. AES-16, n° No.1, pp. 23-52, January 1980.
- [30] A. W. D. M. H. Grant D. Martin, «A Novel polar Format Algorithm for SAR Images Utilizing Post Azimuth Transform Interpolation,» 2005.
- [31] A. W. D. Grant D. Martin, «SAR Polar Format Implementation with MATLAB,» new Mexico, 2005.
- [32] D. W. P. D. G. P. T. C.V. Jakowatz Jr., Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach, Kluwer Academic Publisher, 1996.
- [33] Jorge Márquez Flore, «Ruido en datos, señales $x(t)$ e imágenes $I(x, y)$,» UNAM, Mexico, 2012.
- [34] Fernandez Nicolás, «Visión artificial avanzada,» Cordoba - España, 2012.
- [35] C, Dainty, Laser Speckle y los fenómenos conexos, Arizona: Springer; Edición: 2 En Sub., 2010.
- [36] R. Raney, Principles & Applications of imagin radar. Manual of Remote Sensing. Principles and Applications of Imaging Radar., Dublin, 1998.
- [37] T, Lillesand., R, Kiefer, «Remote Sensing and Image Interpretation,» *Geological Journal*, vol. 30, n° 2, p. 204, 1995.
- [38] CIAT, *Generación de Modelos Digitales de Elevación con Imágenes RADARSAT*, CCRS, 2005.
- [39] J. Jacobo., «Radar de apertura sintética.,» de *Reporte Técnico*, 1999.
- [40] K. Raney, *Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing*, 1998.
- [41] M. E. Buemi, Tratamiento de imagenes de radar de apertura mediante filtro stack, Departamento de Computación ed., F. d. C. E. y. Naturales, Ed., Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2012.
- [42] García, R. González, C.; De la Vega, R.; Valverde, A. y Sabem E., «Análisis del comportamiento de filtros de reducción de speckle en imágenes ER2-SAR,» de

Teledetección y Desarrollo Regional. X Congreso de Teledetección, Cáceres, España, 2003.

- [43] J. A. Quiñones S., *Clasificación automática de los estados de desarrollo del arroz a partir de imágenes de RADARSAT-2*, Bogotá: UNC, 2011, p. 110.
- [44] Lira Jorge, *Sistema de Radar de Imágene*, Ciudad de Mexico: UNAM, 2002.
- [45] A. Lopes y R. a. N. E. Touzi, «Adaptive speckle filters and scene heterogeneity.,» *Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, n° 6, pp. 992 - 1000, 1990.
- [46] A. a. S. F. Lopes, «Optimal speckle reduction for the product model in multilook polarimetric SAR imagery and the Wishart distribution,» *Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, n° 3, pp. 632 - 647, 1997.
- [47] Gambini, Maria J., *SAR, Modelos de segmentación basados en regiones y contornos activos aplicados a imágenes*, Buenos Aires: UBA, 2006.
- [48] Lee, J.S., «Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images.Computer graphics and image processing,» *Computer Graphics and image Processing*, vol. 17, n° 7, p. 24, 1981.
- [49] Patil, Leena Vasant; Rane, Ketkee Kishor; Salvi, Aadeeti Prashant, *Evaluation of Statistical Digital Image Filters*, S. W. University, Ed., Mumbai: Usha Mittal Institute of Technology UMIT, 2010-2011, p. 61.
- [50] Martinsanz, P., G. De la Cruz García, J., *Ejercicios resueltos de Visión por Computador*, Mexico: Alfaomega, 2007, p. 84.
- [51] Gagnon, L., Jouan, A., «Speckle Filtering of SAR Images - A Comparative Study Between Complex-Wavelet-Based and Standard Filters,» *SPIE Proceedings*, vol. 31, n° 69, pp. 80-91, 1997.
- [52] Buemi, M.E.; Mejail, M.; Jacobo, J.; Gambini, J., «Improvement in SAR image classification using adaptative stack filters.,» de *In Proceedings of the XX Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, SIBGRAPI '07*, Washington DC, 2007.
- [53] Paudyal, D.R.; Aschbacher, J., «Land cover separability studies of filtered ERS-1/SAR images in the tropics.,» *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 3, n° 7, pp. 1216 - 1218, 1993.
- [54] C. Martini, *Estudio comparativo de un detector de bordes basado en los algoritmos de susan y su inmunidad al ruido*, Ciudad de Guatemala. : Universidad de Sancarlos de Guatemala, 2009.

- [55] Laur, H.; Bally, P.; Meadows, P.; Sanchez, J.; Schaettler, B.; Lopinto, E., *ERS SAR calibration. derivation of the backscattering coefficient s_0 in ESA ERS SAR PRI products.*, vol. 2, Agencia Espacial Europea, 2004, pp. 12-53.
- [56] Zhou Wang and A.C. Bovik., «A universal image quality index,» *Signal Processing Letters*, vol. 9, n° 3, pp. 81 - 84, 2002.
- [57] Singh, M., Sukhwinder, S., Kansal ,S., *Comparative Analysis of spatial filters for Speckel Reduction in Ultrasound Images"*, Kansas: World congresson Computer Science and information Enginneering, 2009.
- [58] Y. H. a. J. v. Genderen, «Evaluation of Several Speckle Filtering Techniques for ERS-1&2 Imagery Enschede the Netherlands,» de *International Archivies of Photogrammetry and Remote Sensing*, Viena, 1996.
- [59] Shi, Zhenghao and Fung, Ko B., «A comparison of digital Speckle Filters,» *Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation.*, *International*, vol. 4, pp. 2129 - 2133, 1994.
- [60] Qiu, F., Berglnd, J., Thakkar P., *Speckle Noise Reduction in SAR Imagery Using*, Dallas: University of Texas at Dallas, 2004.
- [61] R. Touzzi, «A Review of Speckle Filtering in the Context,» *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, vol. VOL. 40, n° NO. 11, pp. 2392-2404, 2002.
- [62] F. d. M. Rudorff y D. F. M. Gherardi, «Detección de los arrecifes de coral con sar/radarsat-1 imágenes a Costa dos Corais, pe / al, Brasil.,» *Brazilian Journal of Oceanography*, vol. 56, n° 2, pp. 85-96, Abril/Junio 2008.
- [63] Huang, Shi-qi; Gao, Dai-zui Liu: Gui-qing; Guo, Xi-jian, «A novel method for speckle noise reduction and ship target detection in SAR images,» *ELSEVIER*, vol. 42, n° 7, pp. 1533-1542, January 2009.
- [64] Z. J. L. C. Z. Y. Chen Jie, «A Novel Speckle Filter for SAR Images Based on Information-theoretic Heterogeneity Measurements,» *Chinese Journal of Aeronautics*, n° 22, pp. 528-534, Mayo 2009.
- [65] L. F. N. J. A. Velho y J. C. Simões, *Uso del filtro lee en la reducción de motas en las imágenes SAR utilizados en la determinación de la velocidad de flujo de los glaciares de la península antártica*, Sul: Universidad federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- [66] Maitré, Henri; Sun, Hong; Lei, Bangjun; Feng, Jufu, «A comparasión of SAR Image speckle filters,» de *Conferencia Teledetección y otras Aplicaciones*, California, 2009.

- [67] R. Iglesias González, Selección de píxeles mediante correlación espectral entre Soblooks para DInSAR, Cataluña: Universidad Politecnica de Cataluña, 2009.
- [68] I. Shanthi., Dr. M.L. Valarmathi., «Speckle Noise Suppression of SAR Image using Hybrid Order Statistics Filters,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGIES*, vol. 5, nº 2, pp. 229 - 235, 2011.
- [69] Comisión Económica para América Latina y el Caribe - Cepa, «Valoración de daños y pérdidas Ola invernal en Colombia 2010-2011,» Banco Interamericano de Desarrollo - BID, Bogotá, 2012.
- [70] CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS, «Pronóstico de inundaciones en Cartagena,» DIRECCIÓN GENERAL MARÍTIMA, Cartagena de Indias, 2013.
- [71] Toutin, T. Canada Centre for Remote Sensing, *VALUE ADDED RADARSAT PRODUCTS FOR GEOSCIENTIFIC APPLICATIONS*, Ontario, 2001.
- [72] VasantPatil, L., KishorRane, K., PrashantSalvi, A., “*Evaluation of Statistical Digital Image Filters*”, Mumbai: Usha Mittal Institute of Technology, 2011.
- [73] T. K. P. B. E. G. Beauchemin M, «The ratio of the arithmetic to the geometric mean: a first-order statistical test for multilook SAR Image homogeneity.,» *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, vol. 34, nº 3, pp. 604-606, 1996.
- [74] A. W. Doerry, Real-time Polar-Format Processing for Sandia's Tesbed Radar System, Vols. %1 de %2SAND2001-1644P, S. N. Laboratories, Ed., United Sattes Departament of Energy,, June 2001.

Ç

Anexo 1: Código Criterios de comparación GUI MatLab

```
function Indices_Comparacion(hObject, eventdata, handles,
imagenO,imagenf)

%Funcion de Indices de Comparacion

%Indices de comparacion

%Correlacion

correlacion = corr2(imagenO,imagenf);
set(handles.CorrDespuesR, 'String', correlacion);

%imagenO = double(imagenO);
%imagenf = double(imagenf);

%[m n] = size(imagenf);
%[x y] = size(imagenO);

%cálculo del número de Looks (L) = ENL
var_imagen = (std2(imagenf))^2;
media_imagen = mean2(imagenf);
L = media_imagen^2/var_imagen;
```

```

%ENL
set(handles.ENLDespuesR, 'String', L);

%RSD
RSD = std2(imagenf);
set(handles.RSDDespuesR, 'String', RSD);

%Indice de Speckle
SD = std2(imagenf);
IS = SD/media_imagen;
set(handles.ISDespuesR, 'String', IS);
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in BRotar.
function BRotar_Callback(hObject, eventdata, handles)

answer = inputdlg('Digite los grados a rotar', 'Grados');
val = str2num(answer{1});

[val status] = str2num(answer{1}); % Use curly bracket for
subscript
if status
    % Se digito algun valor
    % ...

```

```

handles.antes = handles.temp;

imagenR = imrotate(handles.temp, val);

imshow(imagenR, 'Parent', handles.axes1);

respuesta = questdlg('¿Desea aplicar los cambios?', ' Aplicar
Cambios ', 'Si', 'No', 'No');

if(respuesta == 'Si')
    handles.temp = imagenR;
else
    imshow(handles.temp, 'Parent', handles.axes1);
end

%habilita el boton DesHacer
set(handles.DesHacer, 'enable', 'on');

guidata(hObject, handles);

end

```