

Sensores remotos pasivos y su utilidad en Drones Passive remote sensors and their usefulness in drones

Received: 02 02 2024, Accepted: 21 06 2024, Available online: 08 07 2024

Ingeniería topográfica; Integrante semillero de investigación TOPOCOORS, Facultad de Medio Ambiente y recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. anfvegap@udistrital.edu.co

Andrés Felipe Vega Porras

PhD. Educación. Msc. Educación, Docente Secretaria de Educación del Caquetá
Investigador grupo de Investigación Foraved, Secretaria Educación del Caquetá, campohermoso12@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1618-7813>

Wilber Ortiz Navarrete

PhD. Gerencia y Política Educativa. Msc. Educación, Esp. Educación y Orientación Familiar.
Investigador grupo de Investigación Foraved. Luisgomezmerchan@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5838-9037>

Luis Gómez Merchan

Resumen

La utilización de sensores remotos para el estudio de coberturas e investigaciones con énfasis en suelos ha tomado relevancia en los últimos años, esto debido a la implementación de tecnologías que permiten el muestreo y análisis de áreas de gran amplitud, minimizando los esfuerzos y costos derivados de la realización de un trabajo en campo, estas tecnologías se basan en la utilización de sensores con diversas fuentes de emisión de energía que permiten mediante plataformas aéreas capturar información en terreno, es por estas ventajas que dichas técnicas se han popularizado, de tal forma que hoy se existe una amplia variedad de entidades que permiten la difusión y el tratamiento de los datos capturados por sus sensores, tales como Sentinel, Landsat, Alos Palsar, SAOCOM, etc. Que adicionalmente han diversificado los servicios que ofrecen y cuentan con plataformas integradas para una amplia diversidad de aplicaciones, tales como sensores Ópticos, RADAR, LiDar y sus derivados.

La diversidad de aplicaciones que tiene esta técnica le ha otorgado un papel principal en el desarrollo e investigación en ciencias de la tierra, siendo un pilar para expertos en áreas como la geología, la topografía, la agronomía, agrología, etc. Y que adicionalmente presenta una ventaja económica para las entidades que requieren de estudios de gran porte minimizando costos y tiempos de operación. Es necesario resaltar que a pesar de tratarse de un trabajo cuya intervención en el terreno es mínima, debe existir un reconocimiento de la respuesta de los objetos analizados ante una serie de estímulos físicos, en aras de realizar un estudio exitoso y preciso.

Palabras clave: *Sensores Remotos, Coberturas, Terreno, RADAR, teledetección, plataformas aéreas.*

Abstract

The use of remote sensors for the study of land cover and research with emphasis on soil components has become relevant in recent years, due to the implementation of technologies that allow the sampling and analysis of large areas, minimizing the efforts and costs derived from field work, These technologies are based on the use of sensors with various sources of energy emission that allow through aerial platforms to capture information on the ground, it is for these advantages that these techniques have become popular, so that today there is a wide variety of entities that allow the dissemination and processing of data captured by its sensors, such as Sentinel, Landsat, Alos Palsar, SAOCOM, etc.. They have also diversified the services they offer and have integrated platforms for a wide variety of applications, such as RADAR, Optical and LiDar.

The diversity of applications of this technique has given it a leading role in the development and research in earth sciences, being a mainstay for experts in areas such as geology, topography, agronomy, agrology, etc. It also presents an economic advantage for entities that require large studies, minimizing costs and operation times. It is necessary to emphasize that despite being a work whose intervention in the field is minimal, there must be a recognition of the response of the analyzed objects before a series of physical stimuli, to conduct a successful and precise study.

Key Words: *Remote Sensing, Coverages, Terrain, RADAR, Remote Sensing, Aerial Platforms.*

1. Introducción

La teledetección, en su esencia, se caracteriza por la capacidad de obtener información de un objeto o fenómeno sin necesidad de un contacto directo con él (Jensen & Lulla, 2008). Los análisis derivados de esta técnica se fundamentan en principios físicos que hacen hincapié en los fenómenos de incidencia, dispersión y refracción de la luz. En este proceso, se concentra en la respuesta de los objetos a una serie de haces con diversas frecuencias que el sensor dirige hacia ellos. Así, se lleva a cabo un análisis exhaustivo que abarca una amplia variedad de rangos del espectro de luz. A través de técnicas de falso color, la información de los niveles radiométricos capturados por cada imagen espectral se superpone, dando lugar a imágenes multispectrales e hiperespectrales.

Estas imágenes no solo son visualmente impactantes, sino que también posibilitan realizar estimaciones y análisis complejos sobre la composición del suelo. Desde análisis multitemporales hasta la evaluación del estado de cobertura, biomasa activa y diversas aplicaciones en campos como la geología, ingeniería, agrología y gestión de riesgos, la teledetección ha demostrado ser una herramienta versátil y esencial.

El avance en los métodos de adquisición no solo se ha traducido en la expansión de los rangos del espectro electromagnético para captar información. También se ha experimentado un notable desarrollo en las tecnologías de las plataformas que transportan los sensores. En sus inicios, esta tecnología estaba asociada exclusivamente a plataformas satelitales, vinculando los procedimientos a condiciones adversas como la climatología, la densidad de nubes y los gases disueltos en la atmósfera. La disponibilidad de información estaba limitada por la resolución temporal y la órbita del satélite (geoestacionaria, polares).

No obstante, en la actualidad, se ha superado gran parte de estas limitaciones gracias a la integración de drones. Este avance ha eliminado las barreras de acceso a estas tecnologías al permitir la adquisición de información in situ. De esta manera, se ha ampliado significativamente la flexibilidad y la eficacia de la teledetección, convirtiéndola en una herramienta más accesible y poderosa para una variedad de aplicaciones científicas y prácticas.

2. Funcionamiento imágenes SAR

RADAR cuyas siglas traducen Radio Detection and Ranging son sensores activos que emiten ondas de energía en el espectro electromagnético con un rango de trabajo de 1 cm a 100 cm es decir en el intervalo de microondas, por lo que cuenta con una amplia variedad de ventajas con respecto a las imágenes ópticas, tales como las condiciones

atmosféricas, las cuales no tienen afectación en las imágenes radar.

El funcionamiento esquemático del sensor de radar tiene en cuenta una geometría completa de observación en direcciones perpendiculares y paralelas al movimiento conocidas como (along track y across track) y que generan imágenes mediante la captura de ecos en función del tiempo, existen diversos métodos de adquisición dependiendo del sensor y la finalidad es posible distinguir adquisiciones del modo STRIPMAP en la que el RADAR toma datos de un solo Swath, adquisición SPOTLIGHT en la que el RADAR observa un único blanco, por lo que debe reorientar la antena durante la adquisición, adquisición SCANSAR en la que el radar distribuye los pulsos en varias líneas de paso, adquisición TOPSAR en la que el RADAR distribuye pulsos entre varios swaths modificando el azimut para iluminar de forma homogénea. La construcción de una imagen radar es un mapa de reflectividad, es decir que es posible distinguir la cantidad de energía que volvió al sensor con un análisis óptico de la misma, una imagen SAR cuenta con zonas de alta y baja reflectividad, por lo que es posible distinguir zonas de alto contraste con gran presencia de tonalidades blancas y negras, esto es un indicador de la energía retrodispersada en el terreno, análisis que depende de la energía y la conductividad de las coberturas, la interpretación visual también realiza distinciones según el tono y la textura. Ecuación 1 Coeficiente de retrodispersión.

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A}$$

La ecuación 1 corresponde con el coeficiente de retrodispersión, elemento que determina la cantidad de energía que retorna al radar.

Donde σ es el coeficiente de retrodispersión y A es la unidad de área

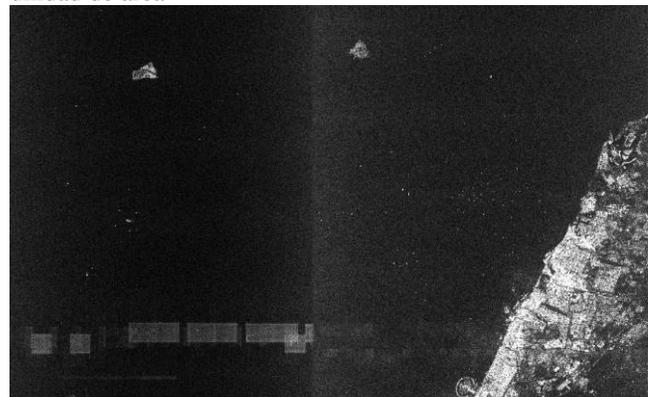


Ilustración 1 (Interacciones con el blanco) Imagen procesada SAR Sentinel 1. Fuente: Autor

La ilustración 1 muestra una imagen SAR del servicio Sentinel 1 en Dubái, y es un ejemplo de las imágenes de RADAR como mapas de reflectividad, adicionalmente la

variación de contraste, tono y textura demuestra las diversas interacciones con el blanco.

Adicionalmente se distinguen las bandas de adquisición de los sensores, la variedad de longitudes de onda que pueda tener un sensor determina también su interacción con los objetivos, es posible encontrar entonces fenómenos de superficie especular y de backscatter ya sea doble o en volumen (entiéndase backscatter como la reflexión o rebote de la onda), en blancos cuya superficie no permita la penetración de la onda, sin embargo también existen objetivos que serán penetrados, así como algunos de los objetos analizados tendrán poca interacción o una amplia gama de variaciones de backscattering, hay materiales, por ejemplo, los metales, que no producen reflexión difusa, sino que se comportan como espejos produciendo un tipo de dispersión especular. Los reflectores esquinados tienen esa característica y se usan para calibrar imágenes, ya que al colocarse en localidades precisas permiten relacionar su ubicación con la imagen (Fernández Ordoñez & Soria Ruiz, 2015). Las principales bandas encontradas en sensores RADAR son: P, L, S, C, X y K, los radares consideran también la información de retorno polarizada tanto horizontalmente como verticalmente.

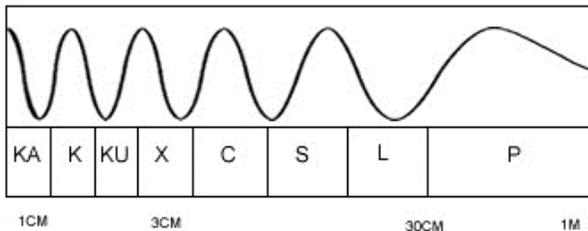


Ilustración 2 Longitud de Onda, región de microondas.
Fuente: Autor

La ilustración 2 muestra la longitud de onda para las bandas que existen dentro del rango manejado por los sensores RADAR.

La resolución de los sistemas radar está dada por el movimiento del sensor y se da en dos direcciones: resolución en rango (perpendicular al movimiento del satélite) y resolución en azimuth (paralelo al movimiento del satélite).

Ecuación 2 Resolución en rango

$$\rho_{RG} = \frac{c}{2B}$$

Ecuación 3 Resolución en azimuth

$$\rho_{AZ} = \frac{L}{2}$$

Las ecuaciones 2 y 3 corresponden a las resoluciones de los sensores RADAR: en rango y en azimuth respectivamente.

Donde c es la constante de la velocidad de la luz, L equivale a la longitud de la antena y B es el ancho de banda.

3. Procesamiento de imágenes SAR

El análisis estadístico de los productos SAR es imperativo para el procesamiento de las imágenes capturadas por los sensores, en la polarimetría SAR, las estadísticas ayudan con la detección y discriminación de firmas de objetivos en un fondo de desorden del terreno. En otra aplicación importante como es la interferometría SAR transversal, el conocimiento exacto de las estadísticas es importante para analizar cuantitativamente la influencia de la correlación en la fase γ , por tanto, medir la precisión de altura alcanzable. (Gierull, 2004), por lo que previo a cualquier procedimiento de filtrado se deben aplicar modelamientos estadísticos de los valores contenidos en cada producto, generalmente muchas de las imágenes de RADAR se encuentran comprimidas horizontal o verticalmente, por lo que ha de realizarse un procedimiento de descompresión en el que se obtienen las bandas correspondientes a las formas de interacción con el blanco y la radiación, cada una de estas corresponde con una imagen polarizada por la dirección en que se emite la energía, esta orientación es inherente al sensor con el que se esté trabajando, generalmente se encuentran las bandas (HH, HV, VH, VV) cada banda cuenta con los valores backscatter. Posterior a la descompresión se ha de realizar una calibración radiométrica de los valores por píxel de las imágenes, ya que los productos SAR de nivel 1 no cuentan con correcciones radiométricas (*Sentinel-1 Radiometric Calibration—ArcMap / Documentation*, n.d.), la calibración permite que se representen los verdaderos valores de backscattering obtenidos por el RADAR.

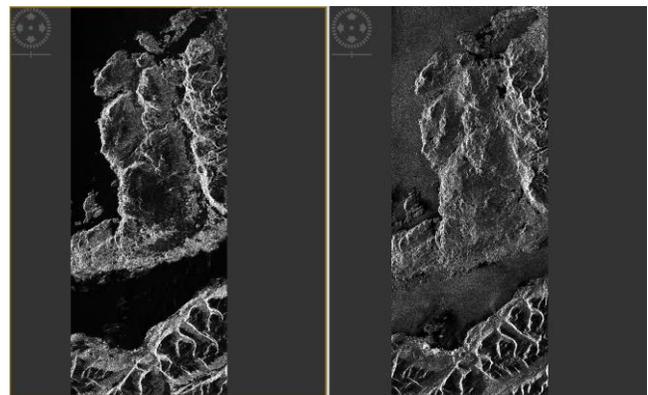


Ilustración 3 Imágenes Polarizadas (interacciones con el blanco). Fuente: Autor.

En la ilustración 3 se puede observar la diferencia que tiene la interacción con el blanco de la misma imagen polarizada de dos formas distintas (VH y VV respectivamente).

La adquisición de información mediante tecnología radar es dependiente de la posición en que esta es direccionada por la plataforma hacia el terreno, de tal forma que la textura que degrada la calidad de la imagen resultante no es ruido, ya que es determinística, es decir que al repetir la captura solo habrán cambios si se modifica la geometría de obtención, este fenómeno conocido como Speckle es el resultado de la suma de las señales individuales capturadas por el sensor que puede resultar en interferencias constructivas o destructivas, por lo que ha de realizarse una corrección estadística, en la que se promedian potencialmente los valores de los píxeles adyacentes, en un procedimiento conocido como Multilooking, por tanto se han de realizar balances estadísticos del Speckle y de los elementos que puedan degradar la calidad de las imágenes para ello, se ha de promediar el moteado tomando varias observaciones de un objetivo en una sola barrida del radar (Greatbatch, 2012). Por lo tanto, ha de conocerse el modelo estadístico al que pertenece la imagen, la clasificación de modelos estadísticos de imágenes SAR puede dividirse en dos categorías modelos paramétricos y no paramétricos. Cuando se trata de un modelo paramétrico al principio se dan varias distribuciones de probabilidad conocidas de las imágenes SAR. Normalmente, los parámetros de estas distribuciones son desconocidos y deben estimarse a partir de los datos reales de la imagen. (Gao, 2010).

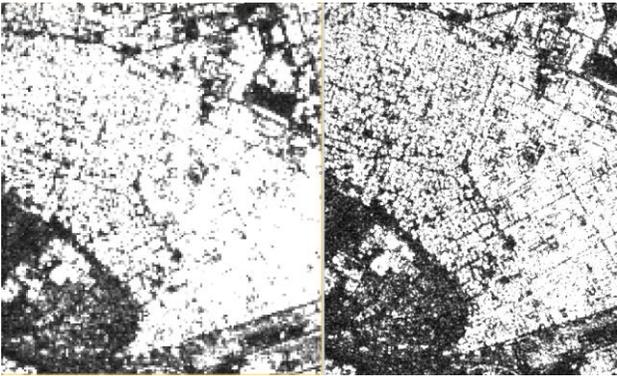


Ilustración 4 Multilooking. Fuente: Autor.

La ilustración 4 muestra la misma imagen antes (izquierda) y después (derecha) del procesamiento Multilooking, se puede apreciar en la imagen de la derecha que el tejido urbano se encuentra mejor definido, existe mayor coherencia en el contraste de cada píxel y se ha eliminado la información que degrada la imagen.

El tratamiento de una imagen radar contiene información de la distancia entre la plataforma y el terreno, esto debido a que el rebote de los ecos se toma en función del tiempo de la onda, por lo que estas imágenes contienen información altimétrica de la zona de análisis, por lo que, se puede realizar un ajuste de las alturas, proyectando la información sobre un datum de referencia, mediante técnicas de remuestreo, tales como correcciones de rango-

Doppler o ajustes por valores de grilla para un geoide de referencia.

Para el procesamiento de imágenes completamente polarimétricas debe realizarse la descomposición de las matrices de covarianza o matrices de coherencia, que son matrices que proporcionan la información de los parámetros de scattering en cada píxel (Parra Garzón et al., 2023), se define también como la matriz del medio material, que en conjunto con la matriz identidad conforman el conjunto completo de magnitudes físicas características (elementos de la matriz de Mueller) (Gil et al., n.d.).

La obtención de la matriz de coherencia permite discriminar la interacción entre el blanco y la polarización, de tal forma que se generan autovalores que permiten realizar modelos estadísticos de comportamiento para el backscattering, como explica (Penta et al., 2014) la matriz de dispersión describe principalmente cómo los blancos radar o los elementos de la superficie del suelo dispersan la energía electromagnética. y, por tanto, permite la descomposición polarimétrica de la imagen, estas descomposiciones se utilizan para generar discriminadores polarimétricos que pueden utilizarse para la interpretación o la clasificación. Los datos SAR totalmente polarimétricos pueden descomponerse para extraer información sobre los procesos de dispersión utilizando diversas técnicas y estos métodos se conocen como "descomposiciones de blancos" (Penta et al., 2014).

Al igual que en el tratamiento convencional de la imagen SAR para elementos que degradan la calidad de la imagen Multilooking, se puede realizar un filtrado del ruido polarimétrico, procedimiento conocido como filtrado polarimétrico Speckle.

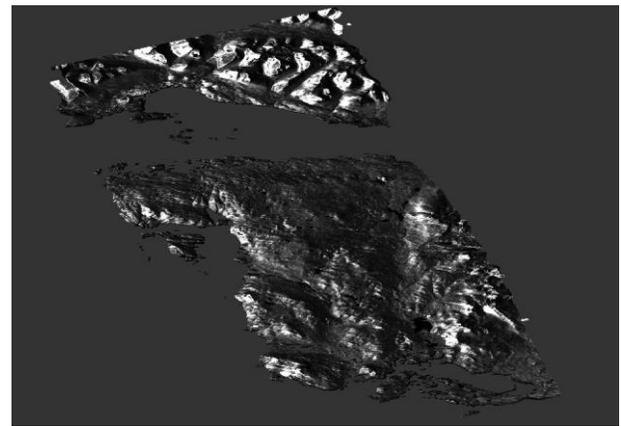


Ilustración 5 Imagen polarimétrica filtrada y proyectada. Fuente: Autor.

La ilustración 5 presenta una imagen full polarizada que fue calibrada, se obtuvo su matriz de coherencia, se filtró,

se ajustó mediante el procedimiento “deskewing”¹ y proyectó al elipsoide WGS 84.

Finalmente se realiza la anteriormente mencionada descomposición polarimétrica, existen varios métodos, tales como la descomposición de Pauli, procedimiento con mayor popularidad y que se caracteriza por clasificar los fenómenos de backscattering en bandas de color (R, G, B) para permitir una visualización de la interacción de cada mecanismo con el blanco, se trata de un método coherente, es decir implica una matriz de correlación y no de dispersión, la asignación en las bandas RGB se realiza mediante las fórmulas:

$$R = \left(\frac{HH - VV}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad G = (\sqrt{2}HV)^2 \quad B = \left(\frac{HH + VV}{\sqrt{2}} \right)^2$$

Ecuación 4 Ecuaciones RGB (descomposición de Pauli) para visualización de scattering.

La ecuación 4 demuestra la forma en que se asignan las bandas con diferentes polarizaciones a los canales de luz visible, esto mediante el método de descomposición de Pauli

R,G, B, son las cantidades complejas que representan, respectivamente, el rebote simple, el rebote doble y los componentes de dispersión rotados 45°(Cloude & Pettier, 1996).

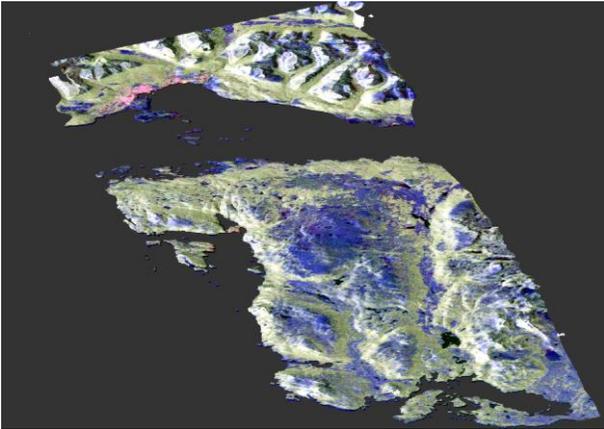


Ilustración 6 Descomposición de Pauli. Fuente: Autor.

La ilustración 6 muestra la descomposición de Pauli de una imagen obtenida por la misión ALOS PALSAR 1.

Otro de los modelos más populares es la descomposición de Freeman, modelo que propone tres mecanismos de scattering, en los que se asume que el retorno está orientado aleatoriamente con respecto a la dirección de

observación del radar, con un ángulo ϕ desde la dirección de polarización vertical y cuya matriz se descompone en tres matrices, una para cada mecanismo de rebote (especular, doble y en volumen). (Freeman & Durden, 1998).

Ecuación 5 Componentes descomposición de Freeman.

$$P_s = f_s(1 + |\beta|^2), P_d = f_d(1 + |\alpha|^2), P_v = \frac{8}{3}f_v$$

Estas ecuaciones se aplican a las bandas RGB y representan el scattering simple en la superficie, el rebote doble y el scattering en volumen. Puntualmente f_s , f_d y f_v representan las contribuciones de scattering de los elementos superficie, doble rebote y volumen.

Adicionalmente se puntualiza que estas son el resultado de la descomposición P:

Ecuación 6 Potencia medida, Descomposición de Freeman.

$$P = P_s + P_d + P_v$$

La ecuación 6 representa la ecuación de potencia de la descomposición de Freeman

Donde P es la potencia medida por el sensor.

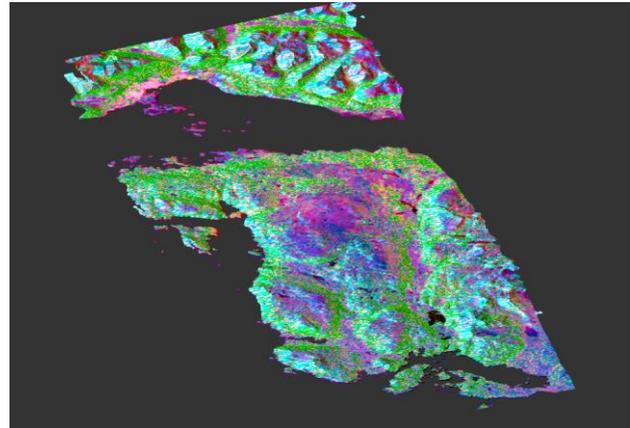


Ilustración 7 Descomposición polarimétrica Freeman. Fuente: Autor.

La ilustración 7 muestra la descomposición polarimétrica por medio del modelo incoherente de Freeman aplicado a una imagen obtenida por medio del servicio ALOS PALSAR 1.

Según la comparativa de múltiples modelos de descomposición realizada por (Zhang et al., 2008) las descomposiciones de Pauli, Freeman y Cameron se ajustaron mejor para la descripción de objetivos naturales, mientras que las descomposiciones SDH, OEC y el modelo de cuatro componentes dieron mejores resultados

¹ La imagen corresponde al satélite ALOS PALSAR 1, cuyas imágenes se encuentran inclinadas respecto al azimut de observación, por lo que deben ser orto corregidas previamente, mediante un procedimiento conocido como deskewing.

para describir objetivos creados por el humano, sin embargo también especifica que esta conclusión se obtuvo realizando tan solo una prueba, por lo que se recomienda realizar una revisión y seguimiento de los resultados en otros análisis.

4. Adquisición de imágenes SAR con drones

La implementación de drones en conjuntos con sensores hiperespectrales es cada vez más común, hecho que también ha involucrado a los sistemas de RADAR, tecnología que a priori, presenta múltiples ventajas con respecto a las técnicas más comunes de teledetección y fotogrametría, tales como las inherentes a la naturaleza de la onda, cuyas características físicas le permiten inhibir los efectos tanto de la atmosfera como de la climatología, por lo que, en conjunto con la posibilidad de realizar análisis de mediana y pequeña escala mediante drones facilita y disminuye los costos de la producción de cartografía y los análisis de coberturas resultantes de la conjunción de estas dos tecnologías.

Se ha demostrado que la implementación de sistemas de radar en drones permite una correcta asimilación de la información capturada por el sensor pues este es dependiente del ancho de banda de transmisión del pulso, por lo que la única modificación de este parámetro hace viable la adecuación de sistemas RADAR en UAV'S en palabras de (Jenssen et al., 2020) el ancho de banda del sistema de radar

es un parámetro fundamental de la resolución de alcance y, teóricamente, el único atributo que puede modificarse para mejorar la resolución de alcance de forma significativa, en la investigación de Jenssen se utilizó un RADAR de banda ultrancha montado en un dron de 8 hélices para realizar un análisis de las propiedades de una cobertura de nieve, para realizar una correcta toma de datos se ajustó el ancho de banda en el rango de 8-18 GHZ con una correlación de 0.92 relativa a la profundidad del sitio, las mediciones fueron correctas y concluye que Las imágenes radar resultantes del vuelo de prueba muestran respuestas similares entre la mediciones realizadas en la nieve con las mediciones en tierra. Por tanto, podemos el UWIBASS² funciona bien cuando se monta en una plataforma aérea.(Jenssen et al., 2020).

Una de las principales adversidades que enfrentan los sistemas de RADAR en una plataforma aérea como el dron son las distorsiones inherentes al movimiento de la aeronave puesto que estas son plataformas mucho menos estables, sin embargo, tal y como demuestran (Bekar et al., 2022) es posible conseguir precisiones de hasta 2cm mediante la utilización algoritmos de autoenfoco y corrección del centroide, en conjunto con tecnología

GPS/INS-based MoCo para ajustar los movimientos de la plataforma y lograron demostrar que la implementación de estas tecnologías en conjunto es funcional en rangos cortos y utilizando anchos de banda amplios.

Un experimento reciente incorporó un sistema de dron con un sensor RADAR, en la investigación de (Svedin et al., 2021) se utilizó un UAV desarrollado por los autores y se realizaron variaciones de las condiciones de adquisición de las imágenes, y se encontró que las que incorporaron la unidad de movimiento inercial (IMU) contienen una notoria mejoría en la calidad del producto, el estándar de evaluación fue la cantidad de pixeles generados en la imagen, se encontró que la mayor desviación en los estándares de calidad surge en los momentos en que hay perturbaciones en el vuelo, tales como la velocidad o las condiciones de viento, problemáticas que se solucionaron con la incorporación de sistemas de ³control de actitud.

Otra tecnología que se adapta al uso de Drones y cuya confluencia con la tecnología SAR produce gran expectativa son los sensores LiDar, los cuales representan la última innovación en el campo de los sensores remotos, esta emerge a mediados de 1990 y provee datos de alta velocidad y precisión (Agrawal & Khairnar, 2019). Se trata de un mecanismo que emplea sensores activos que disparan un láser con características físicas conocidas y que por tanto puede obtener con gran versatilidad datos de altura facilitando el desarrollo de modelos de elevación. La utilización de ambos métodos ha generado una enriquecedora discusión durante los últimos años. (Kahraman & Bacher, 2021) afirman que la confluencia de ambas tecnologías permitiría una lectura mucho más completa, ya que los datos LiDar tiene información tridimensional precisa, y puede clasificar los datos utilizando información de altura, sin embargo, carecen de habilidad para clasificar información espectral, por lo que los autores realizan una revisión completa de la literatura en la que se realizan combinaciones de información mediante diversos métodos, a pesar de que son modelos aun en desarrollo, estos permitirían generar conjuntos de información completos a partir de la confluencia de dos tecnologías en auge y con tendencia a prevalecer en el campo científico.

² UWIBASS: Sonda de nieve, es un sistema de radar desarrollado para realizar análisis de coberturas de nieves y adaptado para operaciones realizadas con dron

³ Attitude Sensors: Sensores de control de actitud, son sensores que permiten el control la orientación durante la navegación

5. Conclusiones

A través de los estudios analizados es posible concluir que existe una amplia línea investigativa que ha desarrollado con éxito modelos de estudio y análisis para imágenes RADAR, permitiendo estudios en grandes áreas y con resultados precisos, con una serie de ventajas sobre las metodologías más comunes, tornando a las imágenes hiperespectrales de sensores RADAR una tecnología imprescindible en el estudio de coberturas, geología e ingeniería, permitiendo adicionalmente comprender el comportamiento de los diversos objetivos ante la incidencia de una serie de campos electromagnéticos cuyo vector puede variar en dirección e intensidad según las características del sensor, incrementando la gama de análisis que se pueden realizar mediante esta tecnología, factor que la hace polivalente en utilización y aplicación. Se llega a la conclusión de que hay una diversidad de enfoques en el tratamiento y procesamiento de los productos de servicios RADAR. Muchos de estos enfoques se centran en el análisis radiométrico, mientras que otros exploran la riqueza del componente polarimétrico de las imágenes. Lo que comparten estos métodos es una sólida influencia matemática y estadística, diferenciando sus metodologías según el propósito particular. Por ejemplo, las descomposiciones polarimétricas destacan como especialmente eficaces en ciertas aplicaciones. Este panorama resalta la importancia de adaptar las técnicas de tratamiento y procesamiento a las necesidades específicas, evidenciando la versatilidad y la complejidad matemática que caracterizan a la manipulación de datos provenientes de servicios RADAR. En última instancia, se constata que la integración de tecnología RADAR abarca diversas categorías, incluyendo la analizada, SAR, y otros tipos de sensores acoplados a drones. No obstante, se identifican limitaciones y ajustes en estos sensores, los cuales solo logran lecturas de calidad en distancias cortas y con aumentos en el ancho de banda. Además, se hace necesario implementar correcciones de movimiento, dado que la tecnología RADAR fue inicialmente concebida para plataformas con una estabilidad superior a la ofrecida por un dron. A pesar de estos desafíos, se han desarrollado estrategias efectivas para mitigar tales errores, resultando en lecturas de alta calidad. Este panorama destaca la adaptabilidad y la capacidad de superar obstáculos inherentes a la integración de tecnología RADAR con drones, evidenciando avances significativos en la optimización de la calidad de los datos obtenidos.

A pesar de que la incorporación de estas tecnologías es algo reciente se han dado casos de adopción satisfactoria, a pesar, de que se observó en todos los casos que han de cumplirse una cierta cantidad de condiciones de vuelo y climáticas que disminuyan las perturbaciones en la operación de vuelo son dos tecnologías con el potencial de

trabajar juntas, ampliando las expectativas de uso para ambos sistemas.

Bibliografía

- Agrawal, S., & Khairnar, G. B. (2019). A comparative assessment of remote sensing imaging techniques: Optical, sar and lidar. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(5/W3), 1–6. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W3-1-2019>
- Bekar, A., Antoniou, M., & Baker, C. J. (2022). Low-Cost, High-Resolution, Drone-Borne SAR Imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3085235>
- Cloude, S. R., & Pettier, E. (1996). A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2), 498–518. <https://doi.org/10.1109/36.485127>
- Fernández Ordoñez, Y. M., & Soria Ruiz, J. (2015). Imágenes de radar de apertura sintética y conceptos básicos de polarimetría. *Avances y perspectivas de geomática con aplicaciones ambientales, agrícolas y urbanas*, 37–66.
- Freeman, A., & Durden, S. L. (1998). A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 963–973. <https://doi.org/10.1109/36.673687>
- Gao, G. (2010). Statistical modeling of SAR images: A survey. In *Sensors* (Vol. 10, Issue 1, pp. 775–795). <https://doi.org/10.3390/s100100775>
- Gierull, C. H. (2004). Statistical analysis of multilook SAR interferograms for CFAR detection of ground moving targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(4), 691–701. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.821886>
- Gil, J. J., Ferreira, C., Correas, J. M., Melero, P. A., San José, I., & Delso, J. (n.d.). matrices de coherencia: un modelo unificado para la representación matemática de fenómenos polarimétricos.
- Greatbatch, I. (2012). *Polarimetric Radar Imaging: from basics to applications*, by Jong-Sen Lee and Eric Pottier. *International Journal of Remote Sensing*, 33(2), 661–662. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.535193>
- Jensen, J. R., & Lulla, K. (2008). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. Jensen, J. R., & Lulla, K. (1987). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. *Geocarto International*, 2(1), 65–65.

- Doi:10.1080/10106048709354084 , 1–2.
<https://doi.org/10.1080/10106048709354084>
- Jenssen, R. O. R., Eckerstorfer, M., & Jacobsen, S. (2020). Drone-mounted ultrawideband radar for retrieval of snowpack properties. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(1), 221–230.
<https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2893043>
- Kahraman, S., & Bacher, R. (2021). A comprehensive review of hyperspectral data fusion with lidar and sar data. In *Annual Reviews in Control* (Vol. 51, pp. 236–253). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.03.003>
- Parra Garzón, J. C., Herrera Escorcia, J. L., & Triana Forero, R. (2023). Análisis polarimétrico de uso y cobertura de la tierra utilizando SAR polarimetry target analysis y la metodología Corine Land Cover. *Perspectiva Geográfica*, 28(2), 1–16.
<https://doi.org/10.19053/01233769.14336>
- Penta, B., Rao Kakani, N., & Kumar Joshi, A. (2014). Analysis of Synthetic Aperture Radar polarimetric decomposition methods for land cover interpretation.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3646.6723>
- Sentinel-1 Radiometric Calibration—ArcMap | Documentation. (n.d.). Retrieved November 28, 2023, from <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manag-e-data/raster-and-images/sentinel-1-radiometric-calibration.htm>
- Svedin, J., Bernland, A., Gustafsson, A., Claar, E., & Luong, J. (2021). Small UAV-based SAR system using low-cost radar, position, and attitude sensors with onboard imaging capability. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 13(6), 602–613.
<https://doi.org/10.1017/S1759078721000416>
- Zhang, L., Zhang, J., Zou, B., & Zhang, Y. (2008). Comparison of Methods for Target Detection and Applications Using Polarimetric SAR Image. In *PIERS ONLINE* (Vol. 4, Issue 1).
<https://www.researchgate.net/publication/2662698>