



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Estimación de humedad de suelo en un bosque tropical mediante imágenes RADARSAT

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

BERENICE GUADALUPE RODRÍGUEZ MERCADO



DIRECCIÓN DE TESIS

DR. MIGUEL MOCTEZUMA FLORES

MÉXICO, D.F.

2014

ASESORES DE TESIS:

DRA. RAMATA MAGAGI

Universidad de Sherbrooke, Quebec.

DR. ALEJANDRO MONSIVÁIS HUERTERO

ESIME Ticomán, Instituto Politécnico Nacional.

DRA. JUDITH GUADALUPE RAMOS HERNÁNDEZ

Instituto de Ingeniería de la UNAM, División de Hidráulica.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM y Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haber otorgado la beca de licenciatura para la realización de este trabajo de tesis, como parte del proyecto Conacyt-CB 2010-01-155375.

Al Dr. Alejandro Monsiváis Huertero por su cátedra y amistad, siendo afortunada de haber contado con su conocimiento y asesoría a lo largo de este proyecto, además de las invaluable anecdotas, gracias por esa gran humildad que le caracteriza. Mi estima y agradecimiento no termina.

A la Dra. Judith Ramos por brindarme la oportunidad, apoyo y guía durante la primera etapa de este proyecto de tesis durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería y en la Universidad de Sherbrooke, Quebec, Gracias.

A la Dra. Ramata Magagi por su orientación, hospitalidad y el hermoso atardecer invernal en Magog. Y al Centro de Investigación de Aplicaciones de Teledetección (CARTEL) de la Universidad de Sherbrooke por haber otorgado las imágenes RADARSAT-2 utilizadas en este trabajo de tesis a través del proyecto de colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM y la Escuela Superior de Ingeniería Eléctrica y Mecánica del Instituto Politécnico Nacional.

Al Dr. Miguel Moctezuma por su apoyo y comprensión para concluir este trabajo de tesis y, ser parte de mi formación académica como alumna de la Facultad de Ingeniería de la honorable Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Dr. José Carlos Escalona, al M.I. Enrique Zempoaltecatl y a la M.I. Aura Torres por tantas sonrisas y ánimo.

A Tamai, Licho, Alejandro y Efraín quienes hicieron posible este proyecto con su apoyo y destreza durante las campañas de campo en la Reserva de la Biosfera de Calakmul, Gracias.

A mi alma máter y sus jacarandas de abril, ente cultural y cosmopolita que envuelve y transmuta mi ser. A sus murales en los que fueron plasmadas las raíces, la historia y las transformaciones sociales de nuestro México... a la Universidad Nacional Autónoma de México.

DEDICATORIAS

A quienes me han acompañado por este sendero, con anécdotas, canciones, libros, noches y sonrisas. A quienes estremecen mi sentido de vida y corazón:

A mis padres y hermanas que son mis raíces, guía y consejeros de vida.

A los amigos con los que aprendí a elegir mis amores y compañeros de vida.

A quien escribe poesía para nosotros, a quien me acompañó una tarde nevada.

A mis profesores que han tenido la intención de formar individuos lúcidos y capaces, a los que ejercen su vocación con amor e ímpetu.

“Por mi raza hablará mi espíritu”

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1 Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 Percepción Remota Satelital

1.1.2 Procesamiento de imágenes de radar

1.2 Importancia de la humedad del suelo dentro del ecosistema

1.3 Definición del problema

1.4 Descripción general del trabajo de tesis

Capítulo 2 Fundamentos teóricos

2.1 Espectro electromagnético

2.2 Sensores de microondas

2.2.1 Sensor pasivo de microondas

2.2.2 Sensores activos de microondas

2.3 Dispersión de una onda electromagnética

2.3.1 Coeficiente de dispersión de una escena natural

2.3.2 Componentes principales de dispersión

2.4 Efecto de la humedad de suelo sobre la dispersión de la onda

2.5 Descripción del sistema RADARSAT-2

Capítulo 3 Reserva de la Biosfera de Calakmul

3.1 Ubicación geográfica

3.1.1 Relieve e Hidrología

3.1.2 Clima

3.1.3 Problemática

3.2 Descripción del tipo de suelo y vegetación

Capítulo 4 Metodología

4.1 Procesamiento de imágenes de radar

4.1.1 Calibración

4.1.2 Filtrado del speckle

4.1.3 Técnicas de descomposición

4.1.4 Corrección geométrica

4.2 Obtención de la humedad de suelo

4.2.1 Descripción del modelo de dispersión

4.2.2 Descripción del modelo semiempírico

4.3 Clasificación de las imágenes de radar

Capítulo 5 Análisis de la variación del coeficiente de retrodispersión y las componentes de dispersión

5.1 Interpretación visual

5.1.1 Coeficiente de retrodispersión

5.1.2 Componentes de dispersión

5.2 Interpretación gráfica

5.2.1 Zona sur

5.2.2 Zona norte

Capítulo 6 Humedad de suelo y otros parámetros biofísicos sensibles

6.1 Modelo semiempírico simplificado

6.1.1 Entradas del modelo MIMICS

6.1.2 Parámetros biofísicos sensibles

6.1.3 Ecuaciones del modelo simplificado

6.2 Valores estimados de humedad de suelo

5.2.1 Zona sur

5.2.2 Zona norte

Capítulo 7 Conclusiones y perspectivas

7.1 Conclusiones

7.2 Perspectivas

Bibliografía y Referencias

Anexos

Anexo 1 Imágenes RADARSAT-2 preprocesadas

Anexo 2 Composición RGB de las componentes de Freeman-Durden

Anexo 3 Imágenes de humedad de suelo

Anexo 4 Trabajos derivados de la tesis

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La observación de la superficie terrestre a través de imágenes surge con la intención de ampliar la visión del ojo humano sobre los paisajes terrestres. Actualmente las técnicas de percepción remota representan un papel importante en distintas disciplinas del conocimiento e investigación: Geografía, Geología, Cartografía, Meteorología, Hidrología, Oceanografía, Ciencias ambientales, Ingeniería Agrícola [1], [2] y [3].

El término “percepción remota” fue acuñado en 1960 por Evelyn Pruitt de la Oficina de Investigación Naval de los Estados Unidos. Las primeras experiencias de la percepción remota se dieron alrededor del año 1859, cuando Gaspar Félix de Tournachon obtuvo las primeras fotografías aéreas desde un globo aerostático. Al año siguiente, James Wallace repitió la experiencia, esta vez sobre la ciudad de Boston para contribuir al conocimiento de la organización urbana. La primera fotografía desde un aeroplano fue una película tomada sobre Centochelli, Italia en 1909, en un avión piloteado por Wilbur Wright. Estos acontecimientos se dieron gracias a los avances tecnológicos en materia de óptica, adquisición y procesado fotográfico [4].

Durante la Primera Guerra Mundial, J. T. C. Moore-Brabazon desarrolló la primera cámara aérea. El segundo conflicto bélico contribuyó con un notable progreso en el desarrollo de cámaras de reconocimiento (primeras en infrarrojo desarrolladas por Kodak Research Laboratories), nuevos sensores como el radar, y mejoras en los sistemas de comunicación. La aeronáutica también representa un papel vital, brindando mayor estabilidad en las plataformas de observación.

1.1.1 PERCEPCIÓN REMOTA SATELITAL

A finales de la década de los 50, el desarrollo de los sistemas de navegación permitió la experimentación de los primeros vehículos espaciales con el lanzamiento del satélite Sputnik en 1957, seguido de varias series de misiones civiles y militares, permitiendo la exploración de nuestro planeta, la luna, planetas vecinos y cuerpos celestes.

La era moderna de la percepción remota satelital surge alrededor de la década de los sesenta con el lanzamiento del satélite TIROS-1 (Television Infrared Observation Satellite) por la NASA, cuya misión fue iniciar un proceso sistemático de monitoreo meteorológico desde el espacio. Otras misiones tripuladas fueron dedicadas a la exploración del sistema solar y la conquista de la luna. Las primeras fotografías espaciales fueron tomadas por Alan B. Shepard durante una de las misiones del Mercury en 1961. La NASA en 1972 lanza el primer satélite de la serie ERTS (Earth Resources Technology Satellite). Este proyecto fue llamado Landsat con la puesta en órbita del segundo satélite en 1975, resultando en uno de los proyectos más fructíferos para aplicaciones civiles de percepción remota. Así, estas misiones marcaron el inicio de la era moderna de la percepción remota, la cual se caracteriza por la disponibilidad de plataformas satelitales, sistemas de sensores eléctricos y ópticos, y herramientas cuantitativas y analíticas para el procesamiento de imágenes [3].

1.1.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE RADAR

El análisis de imágenes se emplea en muchas áreas del conocimiento científico y su uso se encuentra en crecimiento. La finalidad en el análisis de imágenes es la cuantificación de las propiedades de los objetos presentes en éstas; para esto, es necesario entender los elementos que las componen, su origen y su naturaleza. Una imagen digital no es nada más una colección bidimensional de datos, sino más bien la distribución espacial de la respuesta espectral de los elementos que componen la escena, entendiéndose por respuesta espectral a la variación de la intensidad de energía radiante en función de su longitud de onda [5].

Los sensores de radar utilizan diferentes esquemas de generación de imagen, entre ellos existen los sistemas RAR (Radar de Apertura Real) y los SAR (Radar de Apertura Sintética). Los sensores radar de apertura sintética (SAR) son capaces de generar imágenes de la superficie terrestre de alta resolución; sin embargo, durante la formación de una imagen de radar se producen problemas para la visualización y el análisis de los datos adquiridos por este sistema. Los diferentes tipos de distorsiones generadas durante la formación de una imagen SAR son consecuencia del ángulo de visión de la plataforma, tiempo de retardo de la señal y características del relieve donde la señal del radar puede proporcionar información incorrecta de las características. Uno de los fenómenos más comunes y encontrado en cualquier sistema coherente de imágenes, es el speckle, resultado de la interferencia entre los ecos coherentes de los diferentes mecanismos de dispersión producidos por los elementos de la superficie terrestre. El radar transportado en una plataforma espacial observa la superficie de la Tierra lateralmente, además de producir variaciones en los ángulos de emisión e incidencia de la radiación que resultan en deformaciones geométricas en las imágenes de radar, lo que agrega mayor complejidad a la interpretación de la imagen [6].

El procesamiento de imágenes, para este caso particular, de radar consiste en eliminar los errores sistemáticos del conjunto de datos de una imagen. Dos de los procesos más importantes son la corrección radiométrica o calibración, el filtrado del speckle y la corrección geométrica [5]. Otro aspecto a considerar es el reciente incremento del uso de datos polarimétricos de un sistema radar. Estos datos son muy útiles debido a la información que proveen acerca de la orientación de los elementos dispersores que pueden ser distinguidos en función de su mecanismo de dispersión, gracias a la respuesta recibida por el sensor radar. Esta respuesta es diferente para cada elemento dispersor en función de la polarización de la onda electromagnética.

El procesamiento de imágenes de radar requiere del conocimiento y manejo de uno o varias herramientas de software para la extracción de información adecuada y lo más precisa posible. Existe una gama amplia de herramientas de software destinadas al procesamiento de imágenes satelitales (ENVI, ERDAS, PCI, BEST, NEST, MATLAB, PolSARpro, etc.). En el caso de imágenes de radar las opciones se ven limitadas por la técnica de extracción de datos requerida, un ejemplo es el uso de datos polarimétricos, y/o la obtención de licencia de uso que en la mayoría de los casos resulta muy costosa.

1.2 IMPORTANCIA DE LA HUMEDAD DEL SUELO DENTRO DEL ECOSISTEMA

El suelo provee a las plantas un lugar para desarrollar sus raíces, abastecer de agua y nutrientes. Mientras el agua se mueve por el suelo, recoge nutrientes de los minerales y de la materia orgánica. El agua también ayuda a desechar sales dañinas, así como otros elementos del suelo al ser removido. El proceso por el cual los materiales son removidos del suelo por el agua es conocido como filtramiento. Los materiales filtrados pueden conservarse en las capas más bajas del suelo o pueden quedarse en el agua para fluir hacia los ríos, lagos y al agua subterránea.

El suelo actúa como una esponja enorme a lo largo de la superficie terrestre, ya que absorbe la lluvia, derrite la nieve, frena el desagüe y ayuda a controlar las inundaciones. La mayoría del agua contenida en el suelo está disponible para el uso de plantas durante tiempos de escasez de lluvia. Parte del agua absorbida por el suelo se evapora en el aire o se escurre al drenaje. El agua evaporada hacia la atmósfera afecta a la temperatura del suelo causando enfriamientos en el suelo e incrementando la humedad relativa del aire. Los cambios en la humedad relativa por evaporación de agua pueden afectar al clima local, en tanto, la cantidad de agua en el suelo afecta la temperatura del suelo [7].

De manera que las variaciones de la humedad del suelo afectan al clima local y, determina los flujos hídricos y energéticos que se producen en la capa límite entre el suelo y la atmósfera. La humedad de suelo influye en procesos de gran importancia para la agronomía y meteorología; sin embargo, sus implicaciones principales se producen en el ámbito de la hidrología que considera a la humedad de suelo una variable de estado clave para el ciclo hidrológico. Una de las características principales de la humedad del

suelo es su variabilidad, debido a su respuesta a los patrones de precipitación, tipo de suelo, vegetación y topografía, factores que determinan su distribución espacial y temporal. Esta característica junto con la dificultad de obtener mediciones representativas de zonas amplias, convierten a la humedad de suelo en un parámetro de calibración utilizado a menudo en la simulación de procesos hidrológicos. Las imágenes adquiridas mediante sensores de radar (sensores activos de microondas) proporcionan información de gran utilidad para el estudio de la humedad del suelo [8].

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la necesidad de monitoreo, exploración y explotación de recursos naturales ha incrementado el interés de la comunidad científica por comprender los procesos que involucran el ciclo hidrológico y su relación con el cambio climático. La interacción de la superficie terrestre con la atmósfera y los procesos involucrados tienen un nivel de complejidad que requiere de conocimientos de diversas áreas, como, por ejemplo, Física, Química, Geografía, Matemáticas, además del uso de tecnología avanzada empleando técnicas de optimización para su estudio.

Los sistemas de percepción remota y en particular los sistemas satelitales representan una herramienta importante para el monitoreo de procesos globales como el ciclo hidrológico o las variaciones climáticas a escalas regionales o locales [1]. En el monitoreo de las variables del ciclo hidrológico, especialmente para la humedad de suelo superficial, las frecuencias inferiores a los 10 GHz han mostrado los mejores resultados. En la actualidad, los sistemas satelitales operando en bandas C (5 – 6 GHz) y L (1 -2 GHz) son los más utilizados para aplicaciones de la estimación de la humedad de suelo superficial debido a la capacidad de penetración de la onda en capas vegetales a esas frecuencias [9].

En México, existe una problemática ambiental en materia de recursos hídricos, recursos forestales y biodiversidad, entre otros. En particular, los bosques tropicales se ven afectados por cambios en las condiciones del suelo (humedad de suelo, textura, etc.) causados por diversos aspectos como variaciones de precipitación, cambios de uso de suelo, actividades socioeconómicas (agricultura, ganadería, deforestación) y fenómenos naturales (huracanes, incendios, inundaciones y sequías, entre otros) [10], [11].

Debido a que los bosques mantienen una relación estrecha con el suelo y sus características; el suelo es el regulador del ciclo hidrológico, funciona como un reactor, filtra, amortigua y transforma compuestos, entre ellos los contaminantes. Así mismo, es el medio de sostén de la estructura socioeconómica, habitación, desarrollo industrial, sistemas de transporte, recreación, etc. La humedad de suelo determina la partición de la precipitación en escorrentía e infiltración, la tasa de evapotranspiración o la ocurrencia de erosión hídrica del suelo; aspectos que modifican las condiciones de suelo y por lo tanto de la cobertura de vegetación. En este contexto, las técnicas de percepción remota

satelital pueden constituir una fuente de información de gran interés para aplicaciones hidrológicas. Las imágenes adquiridas mediante sensores de radar, sensores activos de microondas, proporcionan información de gran utilidad para el estudio de la humedad del suelo, a través de las propiedades dieléctricas de la superficie [12].

Una de las zonas con mayor impacto ambiental se ubica en la frontera sur del territorio mexicano, la cual cuenta con importantes extensiones de bosques tropicales (selvas), disponibilidad de agua y una biodiversidad de las más ricas del mundo. La región sur la componen los estados de Campeche, Tabasco y Chiapas. Esta región es la que registra el mayor número de precipitaciones pluviales del país (21.4% total nacional) [11]; sin embargo, no existe aún un uso eficiente de sus recursos hídricos.

En Campeche, se encuentra la selva tropical de la Reserva de la Biosfera de Calakmul. Esta reserva forma parte de un corredor de selva tropical que se extiende a los países de Guatemala y Belice. Esta reserva mexicana es la segunda más grande de este tipo, después de la selva amazónica, con una mezcla de selvas altas, medianas y bajas temporalmente inundables con vegetación acuática. Esta diversidad en vegetación es favorecida por las características climatológicas, hidrológicas y edafológicas de la zona [13]. La selva o bosque tropical de la Reserva de la Biosfera de Calakmul (RBC) es parte del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INyS) [14] cuyos objetivos son la comprensión y localización de los terrenos forestales, la estimación de la dinámica de cambio de vegetación forestal, la presentación de los tipos de vegetación forestal y de suelos, la obtención de indicadores cuantitativos y otros indicadores obtenidos en campo en función de la condición o degradación de los ecosistemas. Por lo tanto, resulta de gran importancia para la RBC contar con información propia del sitio, además de involucrar el manejo propio de la reserva.

En zonas tropicales, el uso de imágenes de radar resulta de gran utilidad para el monitoreo de humedad de suelo debido a que la longitud de onda de un sistema radar no tiene afectaciones mayores de las condiciones climatológicas [2]. Esta longitud de onda pertenece a la región de microondas (1 a 10 cm), su característica principal se debe a la capacidad de penetrar capas de nubes y de vegetación, alcanzado el suelo del bosque tropical aún en condiciones de oscuridad.

Por lo anterior, la finalidad de este trabajo de tesis consiste en obtener información sobre la variación temporal del contenido de humedad del suelo dentro de la RBC a partir del análisis de imágenes de radar del satélite RADARSAT-2 con frecuencia de operación de 5.405 GHz (5.55 cm de longitud de onda, banda C). Esta técnica de Percepción Remota (PR) permitirá la adquisición de datos atendiendo a las necesidades espaciales y temporales necesarias para el manejo y monitoreo de los recursos naturales de la RBC a diversas escalas [3].

Las imágenes RADARSAT-2 (en formato raw data) fueron proporcionadas por el Centro de Investigación y Aplicaciones de Percepción Remota Satelital (CARTEL) de la

Universidad de Sherbrooke (Quebec, Canadá) a través del convenio celebrado con el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

1.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE TESIS

La metodología consiste en el procesamiento de imágenes de radar (RADARSAT-2) para la extracción del coeficiente de retrodispersión que permite la obtención de valores de humedad de suelo mediante la aplicación de un modelo semiempírico a las imágenes para estudiar e interpretar su variabilidad temporal y espacial. En adición, se emplearon imágenes derivadas de la descomposición de Freeman-Durden [15], de la imagen en tres componentes (volumen, superficie e interacciones) asociadas a los principales mecanismos de difusión generados al contacto con el suelo, la vegetación y la interacción doble entre suelo y vegetación de la escena, facilitando la interpretación del coeficiente de retrodispersión. Debido a la manera en la que se genera una imagen de radar y las condiciones de terreno de la escena es necesario realizar procesos de conversión de valores, filtrado y correcciones durante la extracción de la información de la imagen [5].

El procesamiento de las imágenes RADARSAT-2 consiste en dos etapas:

1) Extracción del coeficiente de retrodispersión

El coeficiente de retrodispersión (σ^0) es el resultado de la respuesta de la señal radar en función de los mecanismos de dispersión generados dentro de la escena por el contacto con el suelo, la vegetación y la interacción doble entre suelo y vegetación. El σ^0 es obtenido en cuatro canales de polarización: HH, HV, VH y VV.

2) Aplicación de la descomposición de Freeman-Durden en tres componentes

La descomposición de Freeman-Durden de tres componentes permite obtener la contribución de volumen, superficie e interacciones de una imagen. Esta descomposición ayuda a interpretar la imagen mediante la visualización de una composición RGB de las tres componentes, en la que se puede observar la componente dominante y aspectos diversos como cuerpos de agua y superficies con menor o mayor densidad de vegetación, entre otros.

3) Obtención de la humedad de suelo

La aplicación de un modelo de dispersión semiempírico a las imágenes después de la extracción del coeficiente de retrodispersión permite la obtención de los valores de humedad de suelo. Este modelo emplea información de la geometría de la vegetación, contenidos de humedad del suelo y de humedad de vegetación de la RBC.

El procesamiento de las imágenes de radar se realizó utilizando las herramientas de software PolSARpro¹ y NEST². Aunque existen distintas herramientas de software que pueden ser utilizadas para llevar a cabo las tareas antes mencionadas, NEST y PolSARpro proveen grandes ventajas en el procesamiento de imágenes de radar. A través de la extracción de sus parámetros polarimétricos de cada una de las imágenes, estas herramientas permiten obtener información de la respuesta de la señal radar de manera diferente por cada esquema de polarización, la aplicación de técnicas de descomposición y filtrado. Estas herramientas de software son de uso libre y distribuidas de manera gratuita por el portal de internet de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés), aportando otra enorme ventaja sobre otras herramientas de software con licencias costosas para su uso. Además de tener compatibilidad entre sí para facilitar y maximizar la explotación de la información contenida en las imágenes de radar.

¹ Software de distribución gratuita con registro previo en <http://earth.eo.esa.int/polsarpro/>

² Software de distribución gratuita con registro previo en <http://nest.array.ca/web/nest>

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS FÍSICOS

La percepción remota ha demostrado ser una herramienta útil para realizar el monitoreo de parámetros biofísicos tanto de la superficie terrestre como de la atmósfera; sin embargo, existe la necesidad de emplear sensores que operen en distintas regiones del espectro electromagnético, para ampliar o mejorar nuestra visión sobre una superficie. La región de microondas posee ciertas características de la propagación de la señal radar y generación de imágenes, ofreciendo información complementaria a la proporcionada por los sensores ópticos.

2.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Los sensores de satélite, además de diversos dispositivos para comunicaciones, radiodifusión y otras aplicaciones científicas, adquieren datos utilizando varias regiones del espectro electromagnético: ultravioleta, visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta, infrarrojo térmico y microondas. Por ejemplo, el infrarrojo térmico contribuye al estudio de la distribución espacial de la temperatura de un cuerpo de agua o superficie terrestre, así como en la detección de incendios forestales, temperatura de la superficie del mar, corrientes marítimas y el estrés hídrico en cosechas. A su vez, la región de microondas es capaz de "ver" a través de las nubes y mapear capas de vegetación a diferentes profundidades, detectar la humedad del suelo y coberturas de nieve [3].

El flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética propagada a través de la atmósfera. Y se explica a través de la Teoría Ondulatoria de la luz descrita por las ecuaciones de Maxwell [16] publicadas en 1973 y, la Teoría Cuántica desarrollada por Einstein y Planck [3]. De acuerdo con la Teoría Ondulatoria, la radiación electromagnética es una forma de energía derivada de la oscilación de los campos magnéticos y electrostáticos, que son mutuamente ortogonales y poseen la misma dirección de propagación. La energía electromagnética es transmitida de un lugar a otro siguiendo un modelo continuo y armónico (onda plana) con una velocidad de aproximadamente $3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, conocida como la velocidad de la luz, y usualmente denotada por la letra c o v . Las propiedades de esta energía se describen de acuerdo a la relación entre la longitud de onda λ y la frecuencia f dada por la siguiente expresión:

$$v = \lambda \cdot f \text{ [m/s]} \tag{2.1}$$

La figura 2.1 muestra las dos componentes del campo electromagnético con una sola dirección de propagación, además de acotar la longitud de onda en función de la distancia que existe entre dos puntos consecutivos con la misma fase de la onda electromagnética.

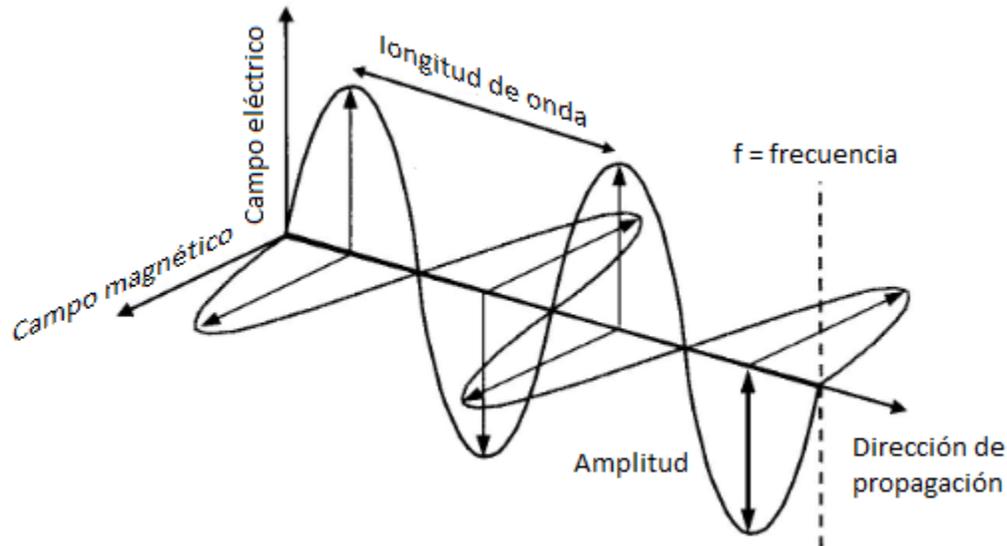


Figura 2.1 Oscilación del campo eléctrico y magnético de la propagación de la radiación electromagnética [3].

Por otro lado la Teoría Cuántica de la luz describe a la radiación como una sucesión de paquetes discretos de energía conocidos como cuantos o fotones, con masa igual a cero. Esta teoría calcula la cantidad de energía Q transportada por un fotón en función de su frecuencia f , a través de la expresión mostrada a continuación:

$$Q = h \cdot f \text{ [J} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (2.2)$$

donde h es la constante de Planck (6.26×10^{-34} J·s). De las ecuaciones anteriores se observa que a mayor longitud de onda, o menor frecuencia, el contenido de energía es menor y viceversa. Estas teorías son capaces de describir el comportamiento de cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia.

El conjunto completo de longitudes de onda o frecuencias es representado a través del espectro electromagnético (EEM), el cual es dividido en varias regiones o intervalos consecutivos, en los que la propagación de las ondas electromagnéticas es similar; sin embargo la naturaleza o fuente del tipo de radiación es diferente, ver figura 2.2. El EEM abarca desde la región con longitud de onda más corta (rayos gamma, rayos x), hasta la región con las longitudes de onda más largas, estas últimas son utilizadas comúnmente en Telecomunicaciones (ondas de radio y microondas).

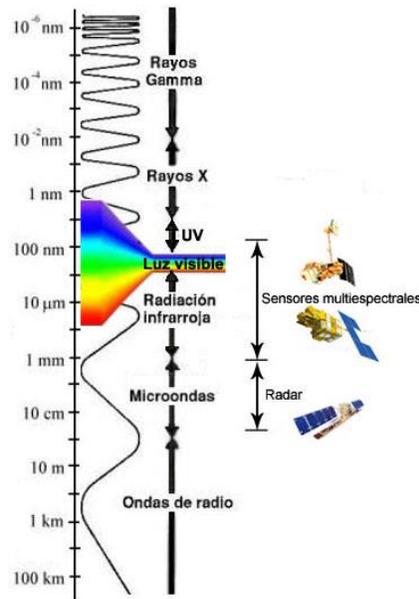


Figura 2.2 Representación de las regiones del espectro electromagnético.

En materia de percepción remota, las regiones del EEM más utilizadas son [3]:

- **Región visible** es la porción de la radiación electromagnética del EEM que puede ser captada por el ojo humano. Esta región representa a región más estrecha del EEM y se descompone en tres intervalos asociados a los colores primarios: azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm).
- **Región del infrarrojo cercano** (0.7 a 1.2 μm) va más allá de la capacidad de detección del ojo humano. Esta región resulta de interés especial para PR debido a su capacidad de discriminar vegetación verde.
- **Región del infrarrojo intermedio** (1.2 a 8 μm). En el intervalo de 1.2 a 3 μm , la energía detectada de la superficie es radiación solar reflejada, y es comúnmente referida como la región infrarrojo de onda corta. En el intervalo de 3 a 8 μm se incluye la señal reflejada por la energía solar y la señal emitida por la superficie, en la que intervienen procesos de reflexión y emisión. La región de 1.3 a 2.5 μm resulta de interés especial para estimar la humedad de la vegetación y el suelo, mientras en el intervalo de 3 a 5 μm es usado para la detección de fuentes con alta temperatura.
- **Región del infrarrojo térmico** (8 a 14 μm) representa a la energía emitida por la superficie de la Tierra y es comúnmente usada para el mapeo de temperaturas de superficies, así como en la detección del estrés hídrico de la vegetación, detección de nubes y en mediciones de la contaminación ambiental.
- **Región de microondas** (>1 mm) debido al tamaño de las longitudes de onda ofrece una capacidad mayor de penetración en nubes y capas de vegetación

respecto a ondas de longitud menor; es utilizada en análisis de rugosidad de la superficie y humedad del suelo.

Los rayos gamma es la región con frecuencia más alta y ha sido también empleada en ocasiones en PR para la determinación de la presencia de humedad debido a la propiedad de absorción de los rayos gama [2], [17].

En general, los sensores de PR son diseñados para operar en una o varias regiones, con el fin de complementar la información adquirida para el monitoreo y estudio del objeto, área o fenómeno de interés. El empleo de las bandas de microondas incluye aplicaciones diversas, más complejas y complementarias a aquellas medidas por las bandas ópticas. Actualmente, se ha dado un incremento en el número de misiones satelitales equipadas con sensores de microondas (ERS, Radarsat, Envisat, JERS y ALOS) debido a su capacidad de adquirir información en áreas cubiertas por nubes, como en regiones tropicales y polares, y para describir la interacción con la vegetación y el suelo en función del contenido de humedad. Como se observa en la figura 1.2, la región de microondas incluye las longitudes de onda más largas empleadas en PR y se expresan comúnmente en términos de unidades de frecuencia (Hertz, GHz), a diferencia de las demás bandas espectrales, las cuales se expresan en unidades de longitud (m).

2.2 SENSORES DE MICROONDAS

Los sensores de microondas a bordo de plataformas satelitales pueden "ver" a través de las nubes y elaborar mapas de las capas de vegetación a diferentes profundidades, además de detectar la humedad de suelo y las coberturas de nieve, gracias a la sensibilidad de las propiedades dieléctricas de la escena. Las observaciones remotas dentro de la región de microondas brindan mayor cobertura de área pero menor resolución espacial respecto a la región óptica. Esta región también permite observar la interacción de la señal del sensor con la vegetación y el suelo, gracias a la dimensión de su longitud de onda. A menor longitud de onda la interacción con la atmósfera es mayor y, éstas no son capaces de penetrarla. Estas ventajas se han observado principalmente en el uso de sensores activos (radares) y de sensores pasivos (radiómetros) [2], [3], [9].

2.2.1 SENSORES PASIVOS DE MICROONDAS

Los sensores pasivos son aquellos que miden o detectan la radiación emitida por un cuerpo u objeto, o bien la radiación solar reflejada por el mismo. A los sensores pasivos de microondas se les conoce como radiómetros. Las aplicaciones del uso de radiómetros van desde estudios astronómicos y aplicaciones militares hasta el monitoreo del

medioambiente. Dentro de la última categoría mencionada, se encuentra la determinación de la humedad de suelo, gracias a la sensibilidad de los radiómetros al contenido de humedad de suelo, rugosidad superficial del suelo, tipo de suelo y cobertura de vegetación.

Así, las técnicas de percepción remota que emplean radiómetros son capaces de proveer información útil de la variabilidad temporal y espacial de la humedad de suelo sobre áreas extensas, incluso con resoluciones del orden de 10 a 20 km. Desde que los sistemas radar han mostrado la capacidad de estimar el contenido de humedad de suelo, ha surgido una técnica que emplea una combinación del uso de imágenes de radar con resolución alta (mayor a la de los radiómetros), e imágenes de radiómetros con resoluciones inferiores. Esta técnica ha incrementado el potencial para generar los mapas de humedad de suelo [17].

Desafortunadamente esta técnica sólo puede ser empleada si se cuenta con los recursos y los dos tipos de sensores: radiómetro y radar, dentro de la misma zona de interés.

2.2.2 SENSORES ACTIVOS DE MICROONDAS

La percepción remota de microondas emplea tres tipos de sensores activos que incluyen *radar de imágenes*, *difusiómetros* (radar de alta frecuencia diseñado específicamente para medir la velocidad y la dirección del viento próxima a la superficie del océano) y *altímetros* (radar que transmite pulsos de microondas a un objeto y mide el tiempo de vuelta de la señal para determinar la distancia del objeto al sensor con vista hacia el nadir) [17]. En este trabajo de tesis se da énfasis al *radar de imágenes*, el cual es capaz de generar una imagen desde una plataforma satelital, a través de la medida de los pulsos retrodispersados de la señal radar, por medio de un barrido realizado por la antena del radar hacia la superficie o escena de interés, lo que permite caracterizar la respuesta del haz incidente en función de las características del terreno y la vegetación. Los pulsos retrodispersados son registrados en un medio magnético y procesados para formar una línea de píxeles de la imagen de radar. Con una imagen de radar es posible emplear *métodos de reconocimiento de patrones espectrales y espaciales* en el análisis de la imagen para inferir información de los parámetros del flujo de energía radiada por la superficie como el coeficiente de retrodispersión [7].

Los sistemas de radar operan con frecuencias de microondas. Este rango de frecuencias está dividido en intervalos conocidos como bandas (ver tabla 2.1). En general, los sistemas de radar operan dentro de todas las bandas de microondas, con excepciones de las bandas Q y V, algunos de los radares operan dentro de la banda X o frecuencias mayores [17].

Tabla 2.1 Bandas de microondas

Banda	Frecuencia [GHz]	Banda	Frecuencia [GHz]
P	0.225 – 0.390	K	10.90 -36.0
L	0.390 – 1.550	Q	36.0 – 46.0
S	1.550 – 4.20	V	46.0 – 56.0
C	4.20 – 5.75	W	56.0 – 100
X	5.75 -10.90		

En cuanto a los sensores de formación de imágenes (radar de imágenes) utilizan las bandas C, L y X; y otras como K, P y Q [11].

En la actualidad, los sistemas de radar transmiten (comúnmente) ondas polarizadas, horizontal o verticalmente; sin embargo, también podrían utilizarse polarizaciones circulares o elípticas (ver figura 2.3). Cuando la onda electromagnética interactúa con la superficie terrestre es despolarizada en varios grados, gracias a esta propiedad es posible generar imágenes de radar con diferentes esquemas de polarización. Si la señal emitida tiene polarización horizontal, H, y se mide la fracción de la polarización vertical, V, de la onda retrodispersada, se dice entonces que se trata de un esquema de polarización HV. Utilizando las combinaciones posibles de dos polarizaciones, se generan cuatro esquemas de polarización HH, HV, VV y VH [11] (ver figura 2.4).

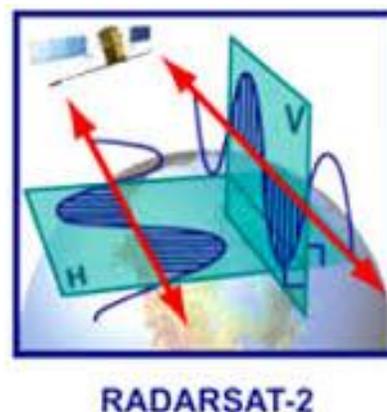
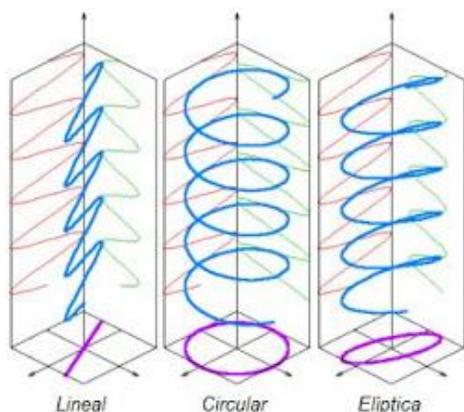


Figura 2.3 Polarizaciones una onda electromagnética Figura 2.4 Polarizaciones RADARSAT-2

2.3 DISPERSIÓN DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Los sistemas de radar como elementos activos emiten su propia señal de iluminación, la señal es generada por un tren de pulsos de corta duración en el tiempo y con una frecuencia de repetición muy alta; como es la frecuencia de microondas. Los pulsos son generados por una antena, que alterna entre emisora y receptora a una frecuencia igual a la de la repetición de los pulsos. Una imagen de radar se genera a través de la medida de los pulsos retrodispersados provenientes de la escena de contacto [7].

Para obtener la medida de los pulsos retrodispersados se utiliza la ecuación general del radar definida por Ulaby [2], esta ecuación establece la relación fundamental entre las características del sistema radar, la escena y los pulsos retrodispersados. Y se escribe de la siguiente manera:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^0}{(4\pi)^3 r^4} \quad (2.3)$$

En la ecuación anterior, P_r es la potencia de retrodispersión reflejada, P_t es la potencia emitida por el radar, G la ganancia de la antena, r la distancia entre el sensor y la superficie, λ la longitud de onda y, σ^0 que representa la intensidad del pulso retrodispersado por sección diferencial de dispersión, por unidad de ángulo sólido, por unidad de tiempo. La potencia a la cual se transmite los pulsos que forman el haz de iluminación del radar, junto con las características del terreno, determinan la intensidad de la señal retrodispersada.

A su vez, el coeficiente de retrodispersión depende del ángulo de incidencia de la señal emitida sobre la escena, la polarización y la longitud de la onda incidente, el ángulo de la pendiente del terreno, la constante dieléctrica volumétrica, la rugosidad de la superficie y el coeficiente complejo de dispersión volumétrica. Estos parámetros se relacionan con aspectos físicos del terreno de la siguiente manera:

En términos de la longitud de onda, entre más rugosa sea la superficie más difusa es la retrodispersión. Por otro lado, el valor de la constante dieléctrica depende del contenido de agua de la superficie; así, la penetración de la señal electromagnética es mayor y la reflexión de la misma es menor para un contenido de humedad bajo. Inversamente, la penetración es menor y la reflexión es mayor cuando la humedad es alta. Otro parámetro de gran importancia es la de rugosidad de la superficie del terreno que define la intensidad de los pulsos retrodispersados; y establece que tan accidentada o irregular es la superficie.

La longitud de onda es sensible a distintos parámetros biofísicos, en particular una longitud de onda de un sistema radar es sensible a parámetros de vegetación, humedad y rugosidad de superficie, entre otros [2], [5]. Estos parámetros deben ser inferidos mediante el cálculo e interpretación de una cantidad física, como es el coeficiente de retrodispersión.

Ulaby [2] encontró que la penetración de la señal del radar, a través de una capa o dosel de vegetación, disminuye con la frecuencia y el ángulo de incidencia. Para minimizar la disminución de la amplitud o potencia de la señal (coeficiente de atenuación α) sugirió emplear frecuencias bajas (longitudes de onda mayores) y ángulos de incidencia bajos.

2.3.1. COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN DE UNA ESCENA NATURAL

Dependiendo de la naturaleza de la escena, el haz del radar es dispersado en diferentes direcciones, así, la señal de retorno registrada es diferente para cada mecanismos de dispersión. Es por ello, que se han desarrollado distintos modelos en los que se separa a las contribuciones aportadas por los distintos elementos de la escena. Monsiváis-Huerta et al [18] realizaron el modelado para un área de transición entre el desierto del Sahel y la sabana africana, estimando el coeficiente de retrodispersión total como la suma de los coeficientes de retrodispersión en función de las contribuciones de arbustos, pastos y suelo por separado.

Para entender el significado del coeficiente de retrodispersión es necesario conocer los diferentes mecanismos de dispersión de una escena natural, ocasionados por el contacto de la señal del radar con los elementos de la escena. En la figura 2.5 se muestran tres mecanismos de dispersión. La dispersión especular, refleja la señal de radar con el mismo ángulo de incidencia y, en general, se da al contacto con superficies lisas, por ejemplo, agua. La dispersión difusa, fenómeno de reflexión de la señal radar en distintos ángulos e intensidades debido a las propiedades de los materiales e irregularidades de la superficie del terreno. Y, la dispersión por reflector de esquina, en el que se reúnen tres superficies aproximadamente planas y perpendiculares entre sí, produciendo una retrodispersión en dirección contraria a la onda incidente (independientemente del ángulo de depresión), fenómeno comúnmente observado en zonas urbanas o escenas naturales con presencia de árboles [3], [5].

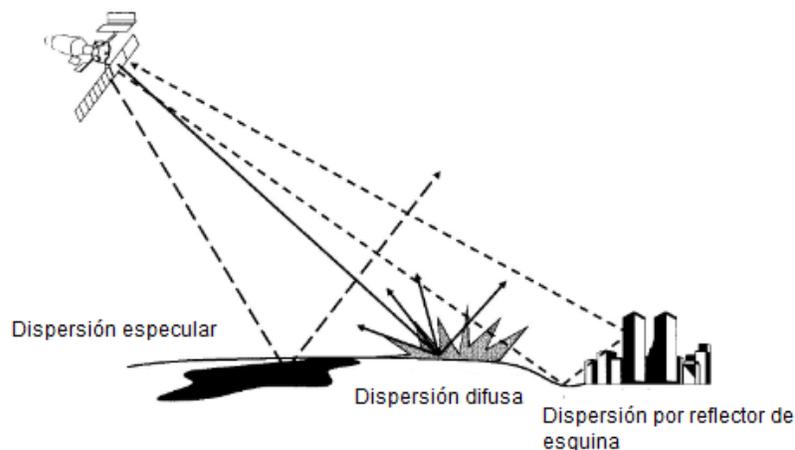


Figura 2.5 Mecanismos de dispersión [3]

En zonas de bosque o cultivos, la señal retrodispersada es el resultado de la contribución de la reflexión multitrayectoria (volumétrica) generada por el contacto con diferentes objetos o superficies, como son suelo, vegetación, cuerpos de agua y en ocasiones construcciones rurales. En consecuencia, la señal es retrodispersada de manera diferente con grados de polarización distintos, convirtiendo a los sistemas radar de imágenes polarimétricos en una herramienta de gran utilidad para discriminar objetos o superficies [5].

De la ecuación general del radar, el coeficiente de dispersión σ_0 , representa el promedio en magnitud y fase del campo disperso \overline{E}_s , producido por los diferentes mecanismos de dispersión. En la ecuación 2.4, A_0 es el área de la superficie iluminada por el haz, y la magnitud del campo eléctrico de la onda incidente es $|\overline{E}_i|$ [18].

$$\sigma_0(\overline{E}_s) = \frac{4\pi r^2 \langle |\overline{E}_s| \rangle}{A_0 |\overline{E}_i|} \quad (2.4)$$

El campo disperso \overline{E}_s representa una suma de la respuesta de los mecanismos de dispersión generados al interactuar con la vegetación y el suelo. De la ecuación 2.5, la primer sumatoria es el campo disperso asociado a elementos de vegetación y, la segunda sumatoria a la contribución de suelo. El campo disperso \overline{E}_s es una función de las formas geométricas de los troncos, ramas y hojas de la vegetación, así como con la rugosidad del suelo, su textura y propiedades dieléctricas. Las propiedades dieléctricas del terreno que están en función del contenido de agua, afectan críticamente a la señal retrodispersada ya que inciden directamente en la absorción y propagación de las ondas electromagnéticas [5].

$$\overline{E}_s = \sum_{i=1}^j \overline{E}_s^{veg} + \sum_{k=1}^l \overline{E}_s^{suelo} \quad (2.5)$$

Entonces, si el campo disperso puede ser representado por una suma de contribuciones por separado, el coeficiente de retrodispersión también puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\sigma_0 = \sigma_{veg} + \sigma_{suelo} + \sigma_{suelo-veg} \quad (2.6)$$

Tanto el modelo como su complejidad determinaran la cantidad de parámetros a estudiar. La ecuación 2.6 muestra las contribuciones asociadas a aspectos de vegetación, de suelo y por último de las interacciones de suelo y vegetación. Una de las técnicas del procesamiento y análisis de imágenes consiste en asociar las contribuciones mencionadas a los diferentes esquemas de polarización. Por ejemplo, se ha observado que el esquema de polarización HH aporta en su mayoría cuestiones de suelo en zonas boscosas, mientras el esquema VV aporta cuestiones de vegetación y los esquemas cruzados HV y VH han mostrado sensibilidad a los cuerpos de agua.

2.3.2 COMPONENTES PRINCIPALES DE DISPERSIÓN

Existen diversas formas de representar la señal de un sistema radar en función de sus esquemas de polarización, una de las más comunes y usadas es la matriz de dispersión, en inglés scattering matrix [2], [15]:

$$S = \begin{bmatrix} S_{VV} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{HH} \end{bmatrix} \quad \text{ó} \quad S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HH} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Cada elemento S_{pq} es un elemento complejo que describe la amplitud y fase de la señal q transmitida y la señal p recibida. En general, p y q pueden ser cualquier par de polarizaciones ortogonales, ya sean circulares o lineales. De esta manera se obtienen cuatro esquemas de polarización asociados a cada elemento de la matriz de dispersión.

Una de las ventajas que proporciona de la matriz de dispersión es la relación entre los campos de la onda incidente y la onda dispersada:

$$\begin{bmatrix} E_v^s \\ E_h^s \end{bmatrix} = \frac{e^{-jkr}}{R} \begin{bmatrix} S_{VV} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{HH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_v^i \\ E_h^i \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

En la mayoría de las observaciones realizadas sobre la superficie terrestre se ha encontrado que $S_{VH} = S_{HV}$, debido al principio de reciprocidad. Con la finalidad de proveer una estimación más precisa y asumiendo el principio de reciprocidad, la matriz de dispersión se puede expresar a través de los elementos de un vector k , en inglés *target vector*:

$$k = [S_{VV} \quad S_{VH} \quad S_{HH}]^T \quad (2.9)$$

El superíndice T significa que el vector está transpuesto.

Otra alternativa de representar la señal radar es la matriz de covarianza en la que se almacenan las correlaciones entre los diferentes canales de polarización. Esta matriz es adecuada para realizar un promedio simple e incrementar el número equivalente de vistas, además de reducir el speckle mientras preservan la información de fase entre los canales de polarización [19]. La matriz de covarianza C es la más común y, es generada a partir de la multiplicación del vector k (target vector) por su complejo conjugado. A continuación, la matriz de covarianza se muestra en su forma no recíproca (ver ecuación 2.10). Los corchetes, $\langle \rangle$ denotan el promedio sobre un conjunto de medidas, usualmente píxeles.

$$C = k k^* \quad (2.10)$$

$$C = \begin{bmatrix} \langle S_{HH} S_{HH}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{VH}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{HV} S_{HH}^* \rangle & \langle S_{HV} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HV} S_{VH}^* \rangle & \langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VH} S_{HH}^* \rangle & \langle S_{VH} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{VH} S_{VH}^* \rangle & \langle S_{VH} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV} S_{HH}^* \rangle & \langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{VV} S_{VH}^* \rangle & \langle S_{VV} S_{VV}^* \rangle \end{bmatrix}$$

La matriz de covarianza provee los valores de forma incoherente; es decir, sólo de amplitud, al operar con valores promedios. Actualmente, existen diversas técnicas de descomposición aplicadas a las imágenes de radar, que utilizan a la matriz de covarianza, para extraer la información de las contribuciones aportadas por el suelo, la vegetación y la interacción de entre ambas contribuciones, de manera individual. A estas contribuciones se les denomina componentes.

La descomposición Freeman-Durden [15] fue desarrollada principalmente para la interpretación del fenómeno de retrodispersión en bosques. Esta técnica de descomposición opera con la matriz de covarianza para obtener dos o tres componentes asociadas a la escena. La primera componente es la de dispersión de volumen (volume scattering), que es la interacción directa de la señal del radar con la vegetación. Otra componente es la de dispersión combinada (double scattering), generada por la interacción con superficies ortogonales (reflexión por diedros); por ejemplo, por el contacto de la señal radar con el suelo y después con un tronco de árbol. Por último, la componente de dispersión por superficie (odd scattering) que significa la interacción directa de la señal del radar únicamente con el suelo. Estas tres componentes son estadísticamente independientes asumiendo que las componentes de covarianza pueden ser sumados. De manera que, la matriz de covarianza puede ser expresada de la siguiente forma:

$$C = f_v C_{vol} + f_d C_{dbl} + f_s C_{suf} \quad (2.11)$$

Donde f_v , f_d y f_s son coeficientes asociados a la componente de volumen, combinada y superficie, respectivamente. La descomposición de Freeman-Durden representa un modelo no coherente debido a la suma de las covarianzas, lo que se traduce en la posibilidad tanto de sumar potencias como campos eléctricos. La convención utilizada por Freeman y Durden en la representación de la matriz de dispersión considera la transmisión de la polarización vertical primero.

El modelo de superficie utilizado en la descomposición de Freeman y Durden es basado en el modelo de dispersión de superficie de Bragg, y en los coeficientes de reflexión de Fresnel. Aplicando las respectivas matrices de covarianza se puede llegar a la siguiente expresión [15]:

$$C = f_v \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/3 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ 1/3 & 0 & 1 \end{bmatrix} + f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha^* & 0 & 1 \end{bmatrix} + f_s \begin{bmatrix} |\beta|^2 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta^* & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde β es el cociente de los coeficientes de reflexión de Fresnel ρ_H/ρ_V y sus respectivas polarizaciones, α expresa la relación de las distintas posibilidades de interacción de la señal con la superficie y los troncos de la vegetación, asumiendo que estos son verticales a la superficie.

2.4 EFECTO DE LA HUMEDAD DE SUELO SOBRE LA DISPERSIÓN DE LA ONDA

El sistema radar ha demostrado ser una herramienta útil para la medición de humedad de suelo como complemento a las mediciones de campo locales. El uso de imágenes generadas a partir de un radar de apertura sintética, permite determinar el contenido de humedad de suelo, mediante la medición de las propiedades dieléctricas del suelo debido a la relación con el contenido de agua de un material [1], [3], [9]. Como se ha mencionado en los dos subcapítulos anteriores, las imágenes de radar contienen información de la magnitud del campo eléctrico retrodispersado pero no directamente de humedad de suelo.

Para obtener valores asociados a la humedad de suelo, se debe aplicar un modelo a través de un conjunto de ecuaciones a las imágenes de radar. En las últimas dos décadas, se han desarrollado diversos modelos empíricos para la estimación de parámetros biofísicos utilizando información específica de la vegetación y el suelo de una zona en particular. Entre este tipo de modelos destacan el propuesto por Monsiváis-Huerta et al. [9], modelo de carácter semiempírico que permite la estimación de parámetros como contenido de humedad de suelo, densidad de vegetación y contenido de humedad de vegetación para los pastizales de la región de Sahel. Y el de MIMICS (Michigan Microwave Canopy Scattering) [20], modelo de dispersión basado en la solución de primer orden de la ecuación de transferencia de radiación para vegetación arbórea. Los dos modelos utilizan capas para describir la geometría de la vegetación y contribuir en la precisión de la estimación de humedad de suelo, contenido de humedad de vegetación y densidad de vegetación mediante el procesamiento de imágenes radar.

2.5 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA RADARSAT-2

El sistema RADARSAT-2 es el segundo satélite de tamaño mediano (2300 kg) de la misión espacial de la Agencia Espacial Canadiense (CSA por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es la observación terrestre. Una de las características del sistema RADARSAT-2 es la integración de sistemas con resolución espacial alta y el uso de técnicas de polarimetría (transmisión y recepción de polarización vertical y horizontal, en pulsos alternados).

Las aplicaciones del sistema RADARSAT-2 incluyen áreas como la agricultura, administración de desastres, monitoreo de hielo, vigilancia marina, geología, hidrología, monitoreo de recursos forestales y cartografía. En materia de hidrología, el monitoreo de la distribución de la cantidad de agua alrededor de la tierra resulta esencial. El sistema radar de imágenes con la tecnología de apertura sintética (SAR) ha permitido mejorar la técnica de estimación de humedad de suelo, junto con el uso de modelos digitales de

elevación. Así, el sistema RADARSAT-2 representa una herramienta poderosa para la adquisición de imágenes para la estimación de humedad de suelo.

El sistema RADARSAT-2 opera en banda C (5.405 GHz), utilizando la técnica de adquisición de imágenes SAR y ofrece diferentes modos a los usuarios. Estos modos son definidos por un conjunto de propiedades de la imagen y detalles del modo de adquisición, por ejemplo: ángulo de incidencia, resolución de rango terrestre, resolución de azimuth, ancho de barrido, número de vistas y, polarización de transmisión y recepción (ver figura 2.6)

Las imágenes utilizadas durante este proyecto son del modo quad-polar que provee imágenes con datos de la respuesta de la señal de radar utilizando cuatro esquemas de polarización. El sensor alterna la polarización de la transmisión de pulso a pulso y recibiendo ambas polarizaciones, horizontal (H) y vertical (V), simultáneamente para cada pulso. A esta técnica de adquisición de imágenes se le conoce como polarimetría [21].

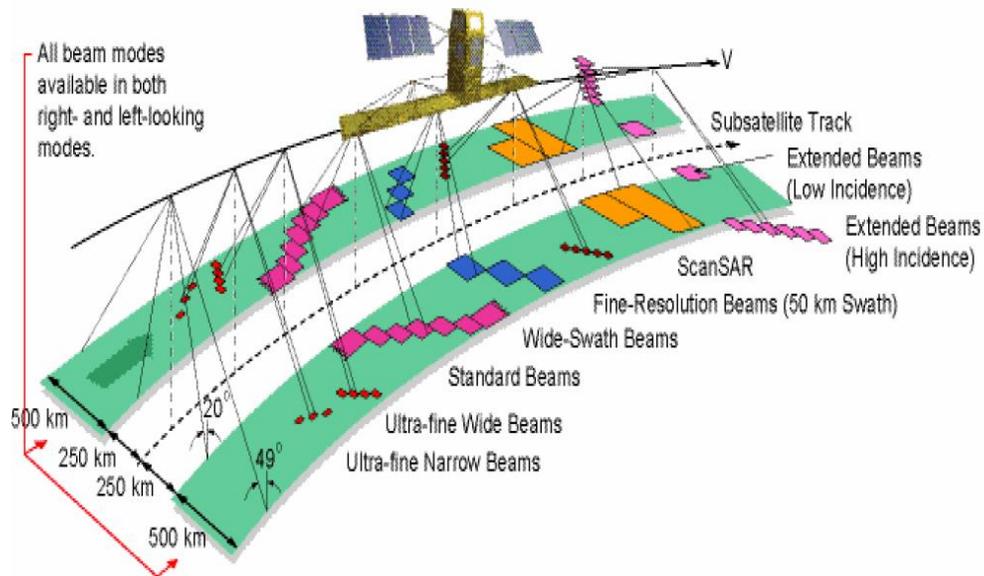


Figura 5. Modos RADARSAT-2 [21].

CAPÍTULO 3. RESERVA DE LA BIOSFERA DE CALAKMUL

La Reserva de la Biosfera de Calakmul se encuentra dentro del estado de Campeche. Campeche forma parte de la península de Yucatán y constituye un bloque tectónico sin plegamientos, proveniente del Paleozoico. La ausencia de montañas en la península le distingue del resto del país y le proporciona su singularidad. El clima de la península de Yucatán es notoriamente influenciado por los mares que la circundan (e.g. posición geográfica, corrientes marinas, vientos dominantes, eventos meteorológicos extraordinarios, como huracanes que son fenómenos recurrentes dentro de la región), y contribuyen a definir el clima del estado de Campeche. Por otro lado, el material geológico de la península de Yucatán, determina en gran medida las características hidrológicas y edáficas del estado.

3.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La Reserva de la Biosfera de Calakmul (RCB) se encuentra al sureste del estado de Campeche, en el límite con el estado de Quintana Roo (este) y con la República de Guatemala (sur). Las coordenadas extremas en que se ubica la Reserva son las 19°15' y 17°45' latitud norte y 90°10' y 89°15' longitud oeste. La RCB constituye una de las mayores superficies forestales del trópico mexicano además de su importante contribución al mantenimiento de los procesos ecológicos esenciales, como son los regímenes hídricos y climáticos, los procesos ecológicos y evolutivos que determinan la biodiversidad de la zona. Además, es el corredor biológico que permite el desplazamiento en ambas direcciones de las especies entre las regiones subxéricas del norte de la Península de Yucatán y las zonas de clima subhúmedo y húmedo al sur. La RCB contiene ecosistemas caracterizados por su gran diversidad, riqueza y fragilidad. La fauna de la zona incluye especies raras, endémicas, amenazadas y en peligro de extinción [22].

La RCB comprende una extensión total de 723,185 hectáreas con dos zonas núcleo (248,260 hectáreas) y una zona de amortiguamiento (474,924 hectáreas), ésta última involucra la existencia de asentamientos humanos sobre los límites establecidos. La RCB es atravesada por dos ejes carreteros, el primero oriente – poniente que corresponde a la carretera federal Escárcega-Chetumal dividiendo a la RCB en la zona norte y sur; y el segundo se divide en dos tramos, el primero corre de la carretera estatal Dzibalchen – X'pujil atravesando las zonas núcleo y de amortiguamiento de la zona norte, y el segundo va de X'pujil hacia Arroyo Negro bordeando la RCB.

3.1.1 RELIEVE E HIDROLOGÍA

Entre los diversos mitos sobre el relieve del estado de Campeche, uno de ellos dice que “es plano”; pero es plano o no según la escala de observación. Desde un avión se puede observar parte del territorio nacional, en el que la diferencia de alturas entre el centro del país y la península de Yucatán rebasan los 3 000 metros. Ahora, desde una avioneta a menor altitud sobrevolando la península; se logra distinguir una montaña y diversos lomeríos en comparación con el estado de Yucatán que se seguiría viendo plano, por lo tanto, el estado de Campeche no es tan plano como parecía ser. A esta última escala, se identifican tres tipos de relieve: planicies subhorizontales, lomeríos y planicies onduladas que alcanzan los 300 metros sobre el nivel del mar. En las planicies subhorizontales y onduladas existen montículos donde la cantidad de suelo es diferente a la contenida en las planadas o nivel de base; es imprescindible reconocer esos sitios porque se relacionan con los insumos, cantidad y tipo de energía utilizada. [23]

El estado de Campeche cuenta con 4 regiones, 7 cuencas hidrológicas y 2 200 km², de lagunas costeras, lo que convierte a Campeche en una región hidrológica de gran magnitud e importancia. La zona de la Península y particularmente en la porción sur-suroeste del territorio de Campeche, se concentra el mayor número de corrientes superficiales (ríos, lagos, lagunas y esteros). Las corrientes superficiales de esta zona pertenecen a distintas cuencas, siendo la de mayor extensión la del sistema Grijalva-Usumacinta, seguida por las cuencas de los ríos Candelaria, Chumpán y Mamantel. En el sur de Campeche se presenta una serie de depósitos de agua conocidos en la región como aguadas o akalches. Estos depósitos se generan durante la temporada de lluvia, debido a la saturación de la zona vadosa en el subsuelo, como consecuencia de la alta precipitación. Este fenómeno se potencia con el aporte de los arroyos que aparecen en la misma temporada húmeda y que desembocan en dicha zona. La mayor parte de las aguadas desaparecen durante la temporada de canícula, cuando la evapotranspiración excede a la precipitación y la zona vadosa deja de estar saturada.

A pesar de la presencia de las aguadas, el agua subterránea representa la mayor fuente de agua, donde el nivel freático se encuentra a profundidades de 6 a 90 m y es el principal cuerpo receptor de precipitación y de aguas residuales que se infiltra en la región [23].

3.1.2 CLIMA

La posición geográfica de la península de Yucatán, por ende de la RBC, ubica a esta región entre la Corriente Ecuatorial Norte y el Golfo de México. Esto determina un contraste marcado en la temperatura de las aguas que la circundan tanto por el lado oriente como por occidente, combinado con la dirección dominante del viento y el efecto que ejerce la superficie terrestre sobre la corriente del aérea dominante. Así mismo

promueve un gradiente de precipitación pluvial de mayor a menor en dirección sureste a noroeste en la Península. Esta característica dota a la península de Yucatán de una variedad de vegetación.

Otra característica climática que gobierna la estacionalidad de la precipitación pluvial son las corrientes Tropical y la del Noroeste. Estas corrientes rigen la variación en la cantidad de lluvia que cae anualmente en toda la Península. Unos años por exceso y otros por ausencia, son la causa principal de los altibajos en las actividades agropecuarias. Adicionalmente existe otro fenómeno climático que influye dentro de la RBC, los huracanes.

En general, los climas predominantes son los cálidos y muy cálidos con lluvias en verano; las precipitaciones mínimas son al final del invierno y principios de verano. La temperatura promedio anual es de 26.2°C y la precipitación promedio anual de 1272.8 mm. Hay presencia de canícula o sequía intraestival (reducción de la precipitación durante los meses de julio y agosto), generada por una onda de alta presión proveniente del norte que debilita a los vientos alisios. El clima predominante sobre la RBC es el cálido subhúmedo con régimen de lluvias intermedio y alto porcentaje de lluvia invernal, con estaciones secas y húmedas marcadas [22], [23].

3.1.3 PROBLEMÁTICA

Las actividades humanas dentro de la RBC han producido deforestación, sobreexplotación y perturbación del ecosistema, a causa del escaso manejo de los recursos naturales. La inercia económica de la región es el legado de una continua tendencia hacia la extracción de recursos naturales para mercados externos, provocando una estructura desequilibrada de producción, degradación ambiental y una economía local retrasada. La economía ha dependido de la exportación de unos cuantos recursos naturales, en una secuencia de ciclos de auge y quiebra, sin lograr ampliar el campo de las actividades económicas.

Desde 1970, la inercia rural ha sido trastornada mediante los proyectos de desarrollo agrícola dirigidos a recuperar la autosuficiencia en alimentos básicos, mediante estímulos comerciales en la producción del sector ejidal, convirtiéndolo en negocio para aseguradoras, más que promover y ampliar la base productiva, en la que la pérdida de la cosecha y el endeudamiento crónico de los campesinos.

Calakmul, además ha sido sometido a una explotación progresiva de sus recursos (maderas preciosas tropicales, madera dura para fabricar durmientes de ferrocarril, chicle y presas de caza), aunado a la creciente presión de los milperos que practican la roza, tumba y quema, y de la práctica de pastoreo de ganado.

Actualmente, la RBC cuenta con un programa de manejo, en el que se realiza un diagnóstico del área, su problemática y aprovechamiento, a fin de lograr acciones planificadas que lleven a la conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales por parte de las poblaciones locales. Por mencionar, la agricultura moderna puede modificarse a través de la identificación del tipo de relieve y para lograr una agricultura de precisión o de sitio específico, que además de generar una alta productividad contribuye al cuidado del medio ambiente [22], [23].

3.2 DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE SUELO Y VEGETACIÓN

El suelo es un sistema tridimensional, dinámico, complejo y activo en el espacio y el tiempo, además actúa como regulador del ciclo hidrológico, ya que filtra, amortigua y transforma compuestos, entre ellos los contaminantes; es el medio de sostén de la estructura socioeconómica, habitación, desarrollo industrial, sistemas de transporte, recreación, etc.

La distribución de los suelos y los tipos de vegetación son reflejo de las condiciones ambientales inducidas por los grados de humedad determinada por el relieve en el paisaje. Las diversas condiciones, como la profundidad y la estacionalidad de la lámina de agua, favorecen la diversidad edáfica y vegetal. Las partes más elevadas con predominancia de Leptosoles (LP) donde se establece la selva baja caducifolia, los declives de los lomeríos con Vertisol (VR) que ocupa la selva baja subcaducifolia y las planicies acumulativas con Gleysol (GL) donde se encuentra la selva baja subperennifolia, conforman un mosaico con una gran diversidad de especies de plantas asociadas a esos hábitats, incluyendo las acuáticas; de las cuales algunas se encuentran bajo alguna categoría de riesgo o protección especial.

Hacia la parte este conocida regionalmente como Meseta Baja de Zoh-Laguna, se encuentran los lomeríos a 300 msnm. Las lomas presentan cimas redondeadas y cúpulas bajas típicas de ambientes cársticos tropicales, con LP de muy variados tipos, así como Cambisoles (CM) y Luvisoles (LV) en el nivel de base. La vegetación es de selva baja caducifolia, crece sobre las cimas y laderas de las lomas en LP. Sobre las planicies onduladas de transición que interceptan el manto freático, se encuentra el tipo VR. La infiltración es de lenta a moderada de 0.5 y 12.5 cm/h respectivamente. La vegetación es de selva baja subcaducifolia, la mayor disponibilidad de humedad permite que los componentes arbóreos de la selva sean menos caducifolios. La característica más importante de este tipo de vegetación son las especies arbóreas, que no rebasan los 12 m de altura.

Los LP son los suelos más comunes en el estado de Campeche, son poco profundos, ya que están limitados por roca dura continua, dentro de los 25 cm. En términos generales son suelos fértiles, pero llegan a tener deficiencias en fósforo y manganeso debido a lo alcalino que son. Estos suelos no son los más aptos para la agricultura por su poca profundidad, alta porosidad y riesgo de erosión.

Los suelos VR son arcillosos que presentan grietas que se abren y cierran periódicamente al cambiar las condiciones de humedad. Por su alto contenido de arcilla y relativo alto contenido de materia orgánica, estos suelos se consideran como fértiles. Están relacionados espacialmente con los GL, sólo los diferencia el grado en el que son afectados por el agua (cubiertos, inundados) en tiempo y profundidad.

Los LV no contienen arcillas expansibles, son suelos sin problemas fuertes de fertilidad química, sin problemas para el laboreo mecánico y, de manera general, de buena aptitud agrícola.

Los CM son suelos con un horizonte subsuperficial de 15 cm de espesor o mayor. Se encuentran en la parte sur correspondiente a las partes bajas del relieve, junto a los LV y LP. De manera general, son suelos de buena calidad agrícola manejados de manera intensiva. Se utiliza en el cultivo de pastizales [23].

La vegetación de la Reserva está compuesta principalmente por la selva mediana subperennifolia que representa 50% de la Reserva y la selva baja subperennifolia que representa 35%. El resto de la Reserva está cubierto por selva alta perennifolia y subperennifolia, vegetación secundaria y pequeñas áreas cubiertas por vegetación acuática [24]. En general, la vegetación nunca pierde completamente sus hojas. Lo único que sucede es que su biomasa de hojas (densidad) baja, pero nunca al grado de ser cero, las hojas guardan una gran cantidad de agua.

La **Selva alta perennifolia o subperennifolia** constituye el 5% de la vegetación total con suelos profundos de tipo laterítico de color café oscuro a gris oscuro. Las especies dominantes en el estrato arbóreo son: *Manilkara achras*, *Talisia olivaeformis*, *Brosimum alicastrum*, *Stemmadenia donell-smithi*, *Bursera simaruba*, *Cedrela odorata*.

La **Selva mediana subperennifolia** representa el 50% de la vegetación y es la de mayor extensión en la reserva. Los suelos en los que se establece son de color blanco y a veces algo rojizos, rocosos, con pendientes. Las especies dominantes son: *Vitex gaumeri*, *Lonchocarpus* sp., *L. yucatanensis*, *Malmea depressa*, *Croton reflexifolius*, *Caesalpinia yucatanensis*, *C. violacea*, *Manilkara achras*, *Brosimum alicastrum*, *Lysiloma latisiliqua*, *Coccoloba cozumelensis*, *C. acapulcensis*, *Guettarda* spp., *Jatropha gaumeri*, *Bursera simaruba* y *Talisia olivaeformis*, entre otras.

La **Selva baja subperennifolia** representa el 35% y se encuentra distribuida entre la extensión de la selva mediana subperennifolia, especialmente en los bajos, a la orilla de las cañadas, en las aguadas o en los ríos. Se establece en suelos de color blanco grisáceo, profundos pero de escaso drenaje, por lo que en la época de lluvias se inundan. El estrato arbóreo no sobrepasa los 15 m y, está dominado por: *Bucida buceru*, *Haematoxylum campechianum*, *Manilkara achras*, *Metopium browneii*, *Diospyros anisandra*, *Cameraria latifolia* [22].

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

El procesamiento de imágenes de radar consiste en eliminar los errores sistemáticos generados durante su formación, para minimizar los problemas de visualización, análisis e interpretación de una imagen. Los diferentes tipos de distorsiones son consecuencia de las características del sistema, por mencionar, el ángulo de visión entre la antena del radar y la superficie, tiempo de retardo de la señal y características del relieve en donde la señal del radar puede proporcionar información incorrecta de las características reales [5], [6], [26].

El desarrollo de la tecnología, el incremento de la capacidad de almacenamiento y la reducción del tiempo de procesamiento de los recursos de cómputo, han permitido desarrollar técnicas más sofisticadas y mejorar la precisión en la estimación de valores. Un ejemplo es el uso de datos polarimétricos de un sistema radar y las técnicas de descomposición para la obtención de parámetros biofísicos.

4.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE RADAR

El procesamiento de las imágenes fue realizado utilizando una computadora con sistema operativo Windows 7, procesador Intel core i5 y memoria RAM de 6 GB y, las herramientas de software NEST versión 5.0.12 y Polsarpro versión 4.2.

Las etapas del procesamiento consisten en:

- 1) Extracción del coeficiente de retrodispersión

Como se explica en el capítulo dos, la extracción del coeficiente de retrodispersión permite interpretar a la imagen de radar como la suma de las contribuciones de suelo, de vegetación y de interacción doble de suelo y vegetación. Para mejorar la precisión de la información y realizar una interpretación correcta del coeficiente de retrodispersión, se requiere de realizar procesos de conversión de valores o calibración, filtrado y corrección geométrica.

2) Obtención de la humedad de suelo

También, en el capítulo dos, se justifica el uso de un modelo de dispersión basado en las características particulares de la vegetación y suelo de una zona en particular para mejorar la estimación de la humedad de suelo y otros parámetros biofísicos. Considerando el tipo de vegetación de la RBC, el modelo de Michigan Microwave Canopy Scattering (MIMICS) [25] es el más apropiado para obtener los valores estimados más precisos posibles de humedad de suelo dentro de la RBC. El modelo es aplicado a las imágenes de las que el coeficiente de retrodispersión fue extraído previamente.

4.1.1 CALIBRACIÓN

Uno de los procesos más importantes del procesamiento de imágenes y el primero a realizar se conoce como calibración. Este proceso consiste en realizar la conversión del valor o número digital (ND) de cada píxel de la imagen en un valor asociado a una cantidad física para su interpretación. Para este caso particular, la calibración se realizó utilizando las ecuaciones provistas por el proveedor de las imágenes Radarsat-2 para estimar el coeficiente de retrodispersión [26].

4.1.2 FILTRADO DEL SPECKLE

Durante la formación de la imagen de radar ocurren diversos fenómenos físicos que producen distorsiones o introducen ruido. En la literatura, el speckle es conocido como ruido debido al aspecto visual similar al granuloso en una fotografía, este tipo de ruido puede ser modelado como del tipo multiplicativo; sin embargo, el speckle es más bien un fenómeno físico producido por la interacción coherente de la radiación empleada para iluminar el área de interés y sus elementos dispersores. El speckle introduce un elemento de textura en la imagen que no tiene relación con la escena y si no es eliminado o reducido, puede conducir a una interpretación errónea de la información [5] y [15].

Una de las técnicas para reducir el speckle consiste en la aplicación de un filtro a la imagen de radar, utilizando herramientas de probabilidad y estadística para mejorar la calidad de la imagen y facilitar la búsqueda de información. Existen varios filtros comúnmente utilizados en el procesamiento de imágenes, por ejemplo: Promedio, Lee, Gaussiano, Boxcar, Frost, entre otros. La elección del filtro adecuado para aplicar a una imagen de radar debe ser basada en los principios de eliminar la diafonía (interferencia) entre canales de polarización y preservar las propiedades polarimétricas, características y bordes de los objetos de la imagen. En particular, el filtro Refined Lee utiliza un algoritmo

que opera con los elementos de la matriz de covarianza y emplea ventanas impares con bordes alineados, además de aplicar el estimador MMSE (mínimum mean square error) con la finalidad de mantener los bordes y líneas de la imagen, y preservar la información contenida. En general, un buen filtrado del speckle utiliza ventanas impares grandes para proporcionar un efecto suavizante mayor, pero un efecto borroso para detalles finos. Así que, en caso de requerir preservar mejor la información acerca de la textura del terreno, el uso de ventanas pequeñas es mejor. La ventana puede ser de cualquier tamaño, pero debe considerarse que un tamaño mayor puede sobre estimar, por el contrario, un tamaño menor puede no reducir suficientemente el speckle y causar pérdida de información, destruyendo la relación entre los elementos de las matrices de coherencia y covarianza. Esta es la razón por la que se eligió utilizar el filtro Refined Lee con ventanas de 7x7 para el procesamiento de las imágenes de este trabajo, respetando el uso de ventanas impares. Otros tamaños comúnmente usados son los de 9x9 y 11x11, en función de la aplicación [15], [19].

4.1.3 TÉCNICAS DE DESCOMPOSICIÓN

Además de la interpretación de los coeficientes de retrodispersión de las imágenes de radar, se ha encontrado que el uso de técnicas de descomposición permite separar e identificar a los mecanismos de difusión dominantes dentro de la escena. De esta manera, se propone el uso de la técnica de descomposición de Freeman-Durden [15] en tres componentes para obtener por separado los principales mecanismos de difusión y facilitar la interpretación y visualización de la variación del coeficiente de retrodispersión.

Entre varias técnicas de descomposición, la de Freeman-Durden es una técnica que separa a la imagen de radar en tres componentes diferentes que representan a los principales mecanismos de difusión (vegetación, suelo e interacción doble de suelo y vegetación) para mejorar visualización e interpretación de la imagen. Esta técnica opera con las matrices de covarianza o de coherencia, matrices que proveen la información estadística de los valores de cada pixel de la imagen asociados a cada esquema de polarización y permiten estimar parámetros para la discriminación de los elementos de la imagen. La diferencia entre estas dos matrices es que la matriz de covarianza únicamente trabaja con información de amplitud de la señal de radar, en cambio la de coherencia utiliza la información de amplitud y fase.

La técnica de descomposición debe ser aplicada después de los procesos de calibración y filtrado del speckle, utilizando a los elementos de la matriz de covarianza (o coherencia) para estimar el valor de cada píxel [26]. Cada componente de Freeman-Durden se puede visualizar de manera individual o bien realizar una composición RBG con las tres componentes y observarlas en una misma imagen.

4.1.4 CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

La corrección geométrica es otro de los procesos fundamentales para llevar a cabo la interpretación y análisis correcto de la imagen. Para formar la imagen, el sistema radar mide la distancia y tiempo de retardo entre la señal transmitida y los ecos recibidos. A partir de estos ecos, se construye un sistema de coordenadas oblicuo en cuyos nodos se posicionan los píxeles de la imagen. Este proceso genera una serie de distorsiones y particularidades geométricas, por ejemplo: las sombras en áreas montañosas pueden producir un realce del relieve del terreno, o el escorzo que es el efecto de traslape de la cima de una montaña con su propio pie. Estas distorsiones pueden ser corregidas empleando un modelo digital de elevaciones del área que cubre, a este proceso se le conoce como corrección de terreno [7]. En este trabajo, el modelo utilizado para realizar la corrección de terreno es STRM 3Sec, proporcionado por el software NEST de la Agencia Espacial Europea.

Además, las dimensiones de una imagen generada por el sistema de radar son distintas a las dimensiones reales del geoide terrestre. Las dos dimensiones fundamentales son el tiempo de retardo (rango) y la distancia a la trayectoria de vuelo (azimuth). Cada píxel representa la respuesta de la señal de radar para una dimensión particular en rango y azimuth, la cual no es necesariamente igual a las dimensiones de la superficie terrestre. En otras palabras, la corrección geométrica consiste en realizar la proyección de la imagen de radar sobre un sistema de coordenadas geográficas. La corrección geométrica debe ser realizada después de toda la manipulación de la información contenida en la imagen, es decir, después de los procesos de calibración, filtrado del speckle y descomposición [7], [15], [26].

La proyección de la imagen utilizó el Sistema de coordenadas Geográficas Mundial 84 (WGS84 por sus siglas en inglés). El sistema WGS84 ha sido uno de los sistemas más usados debido a su precisión. Este proceso es realizado por el software NEST utilizando el método de vecinos cercanos (*nearest neighbour*), el cual consiste en un algoritmo que asigna a cada celda de la imagen corregida, el valor del coeficiente de retrodispersión (σ°) que corresponde al píxel más cercano. Este método es considerado el más rápido y sencillo y, no modifica los valores de los píxeles [27].

Una vez aplicados estos procesos se obtienen, en total, por cada imagen de radar siete imágenes: cuatro de los esquemas de polarización y tres de las componentes de Freeman-Durden; sin embargo, considerando el principio de reciprocidad para los esquemas de polarización (HV = VH), utilizaremos seis imágenes para analizar la variación espacial y temporal del coeficiente de retrodispersión. Así mismo, una imagen más en composición RGB de las componentes de Freeman-Durden.

4.2 OBTENCIÓN DE LA HUMEDAD DE SUELO

A partir del procesamiento de imágenes de radar se han propuesto varios modelos que simulan el proceso de retrodispersión de una onda electromagnética en la superficie terrestre a partir de características de la superficie y parámetros de la adquisición, para la estimación de humedad de suelo. Se han desarrollado modelos empíricos para condiciones de ausencia de vegetación, como el de Oh et al., y otros modelos con base física como el modelo Integral Equation Method [8]; sin embargo, en el monitoreo de zonas boscosas con densidad de vegetación alta, estos modelos no permite realizar una estimación adecuada del contenido de humedad de suelo. Ante la necesidad de monitorear superficies con vegetación arbórea, el modelo de Michigan Microwave Canopy Scattering (MIMICS) representa una de las mejores opciones. Este modelo se propuso para ser utilizado en la región de 0.5 a 10 GHz con ángulos de incidencia mayores a 10° [25].

4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE DISPERSIÓN SEMIEMPÍRICO

El modelo de dispersión denominado Michigan Microwave Canopy Scattering (MIMICS) permite estimar la respuesta radar de una escena natural. Este modelo permite caracterizar la vegetación dominante de la RBC, los árboles. El modelo emplea datos medidos en campo de las características más importantes de la geometría de los árboles, rugosidad y textura del suelo, además de los contenidos de humedad de suelo y humedad de vegetación. MIMICS calcula la respuesta radar a partir de la teoría de transferencia de radiación [25].

MIMICS define tres capas para la caracterización de la escena, la primera es la de las copas de los árboles, modelada en términos de la distribución de cilindros dieléctricos y discos para representar ramas y hojas. La segunda capa es la de troncos y utiliza cilindros dieléctricos verticales a la superficie con diámetro uniforme. Por último la tercer capa es la de suelo y emplea información de la rugosidad, textura y humedad de suelo.

Para la obtención de los datos medidos en campo se tomaron muestras representativas de la vegetación dentro de un área de 10 m x 10 m. Se contó la cantidad de árboles dentro del área, se identificaron las especies dominantes y se tomaron medidas de alturas (del tronco, rama primaria, rama secundaria y altura total) y diámetros (copa, tronco). Para obtener la información de la cantidad y geometría de las ramas y hojas se cortó una rama como muestra y con permiso de las autoridades de la RBC. La figura 4.1 muestra algunas de las variables consideradas.

En cuanto a la información de suelo, se utilizó el método gravimétrico para la toma de muestras y la estimación de su contenido de humedad y textura. Así mismo, se emplearon sensores basados en la técnica Time Domain Reflectometer (TDR) para medir la humedad del suelo a profundidades de 2.5, 5 y 10 cm. La figura 4.2 muestra el

rugosímetro utilizado durante una de las campañas de mediciones para estimar la geometría o perfil de la superficie; es decir, su rugosidad.

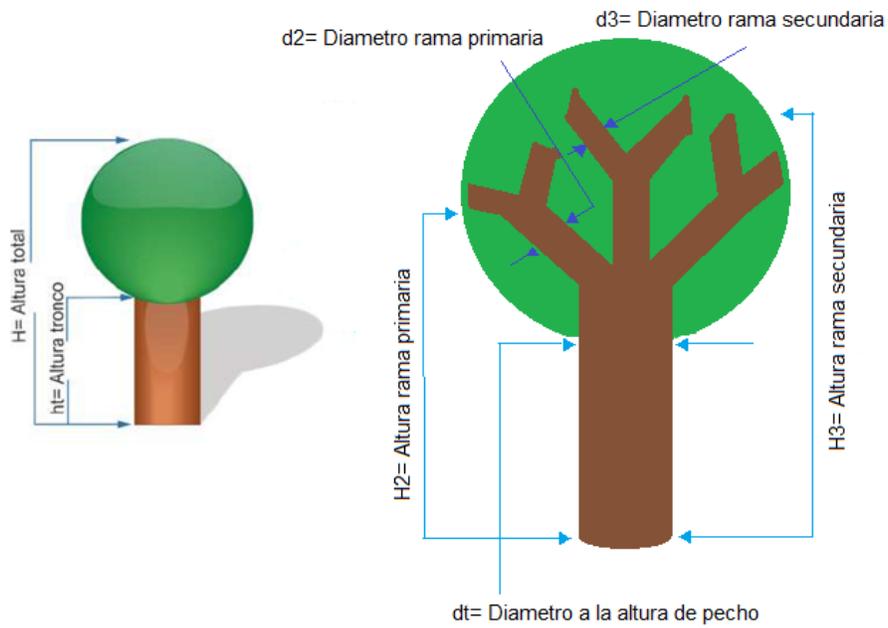


Figura 4.1. Diagrama de variables de las medidas de vegetación



Figura 4.2. Rugosímetro de agujas

4.2.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE DISPERSIÓN SEMIEMPÍRICO

El modelo MIMICS requiere de, aproximadamente, 30 variables de entrada. Con la finalidad de aligerar el tiempo de cálculo, se construyó un modelo simplificado o semiempírico basado en curvas de regresión lineal de las salidas del modelo MIMICS. Para la construcción del modelo semiempírico, se identificaron los parámetros sensibles que gobiernan la respuesta de la señal retrodispersada, de acuerdo a las ecuaciones implementadas en MIMICS. Los parámetros sensibles fueron aquellas variables de entrada que producían variaciones en al menos 0.5 dB en un canal de polarización. El rango de la variación de las variables de entrada fue basado en las mediciones de campo. Además de los parámetros sensibles, el modelo semiempírico también incluye la variación angular del coeficiente de retrodispersión, cubriendo el rango de ángulos de incidencia del satélite RADARSAT-2.

Uno de los parámetros sensibles será la humedad de suelo. De esta forma, la humedad de suelo podrá ser estimada a partir del modelo semiempírico.

4.3 CLASIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES DE RADAR

Las imágenes de radar cubren dos áreas dentro de la Reserva de la Biosfera de Calakmul. En la figura 4.3, se muestra la huella del satélite para algunas de las imágenes RADARSAT-2. En total son 23 imágenes con diferente modo de adquisición (FQ4, FQ4, FQ12, FQ17, etc), lo que proporciona una variedad de coordenadas de las áreas cubiertas y distintos ángulos de incidencia, además de fechas de adquisición aleatorias. En promedio, se tiene una imagen por mes para la zona norte y la zona sur.

El primer paso fue clasificar a las imágenes por zona, fecha y ángulo de incidencia. En las tablas 4.1 y 4.2 se muestra la clasificación de las 23 imágenes RADARSAT-2 en función de la zona que abarca (sur o norte), modo de adquisición y ángulo de incidencia. Las coordenadas extremas de la zona norte son 18°30' y 18°50' latitud norte y 89°05' y 89°23' longitud oeste. Las coordenadas extremas de la zona sur son 17°47' y 18°06' latitud norte y 89°11' y 89°26' longitud oeste.

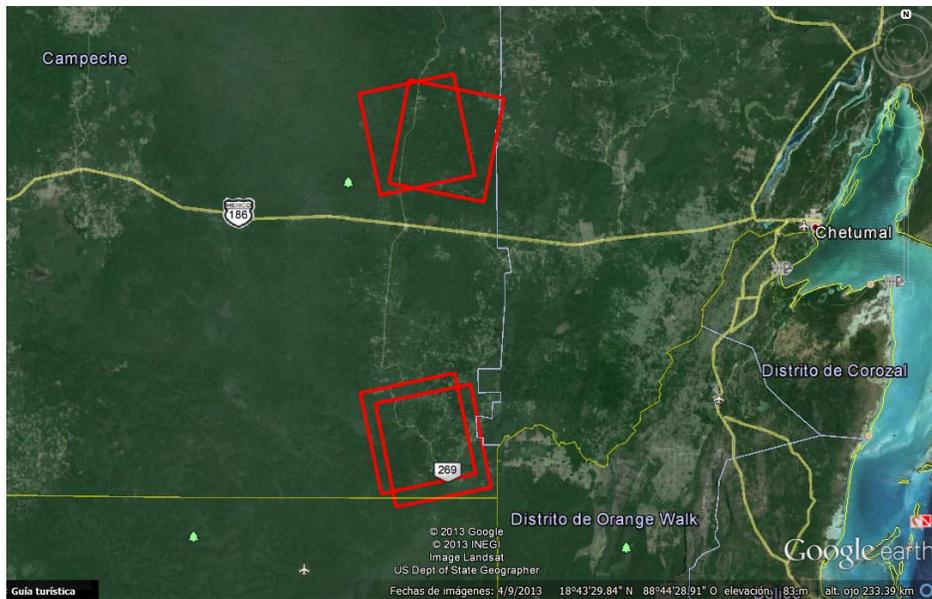


Figura 4.3. Huella de las imágenes RADARSAT-2

Tabla 4.1 Clasificación zona sur

Fecha/ Zona Sur	Modo de adquisición	Ángulo de Incidencia
26/04/2010	FQ4	22.1 – 24.2
20/05/2010	FQ4	22.1 – 24.2
13/06/2010	FQ4	22.1 – 24.2
07/07/2010	FQ4	22.1 – 24.2
17/09/2010	FQ4	22.1 – 24.2
11/10/2010	FQ4	22.1 – 24.2
22/12/2010	FQ4	22.1 – 24.2
15/01/2011	FQ4	22.1 – 24.2
08/02/2011	FQ4	22.1 – 24.2
21/04/2011	FQ4	22.1 – 24.2
11/08/2010	FQ17	36.4 – 38.0
15/11/2010	FQ17	36.4 – 38.0
15/03/2011	FQ17	36.4 – 38.0

Tabla 4.2 Clasificación zona norte

Fecha/Zona Norte	Modo de adquisición	Ángulo de Incidencia
20/05/2010	FQ5	23.4 – 25.3
07/07/2010	FQ5	23.4 – 25.3
22/11/2010	FQ12	31.3 – 33.0
16/12/2010	FQ12	31.3 – 33.0
22/03/2011	FQ12	31.3 – 33.0
26/09/2010	FQ15	34.4 – 36.0
09/08/2010	FQ16	35.4 – 37.0
28/09/2010	FQ18	37.4 – 38.9
19/02/2011	FQ18	37.4 – 38.9
29/06/2010	FQ22	41.0 – 42.4

Después de haber clasificado las imágenes por zona, hay que delimitar las áreas para la toma de valores del coeficiente de retrodispersión, promediar los valores de todo el conjunto de píxeles y obtener las gráficas de la variación temporal del coeficiente de retrodispersión. Las áreas delimitadas se denominan sitios y tienen dimensión de un kilómetro cuadrado.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN Y DE LAS COMPONENTES DE DISPERSIÓN

En este capítulo se mencionan las principales características o aportaciones de las imágenes del coeficiente de retrodispersión por esquema de polarización y de las componentes de dispersión de Freeman-Durden [15]. El análisis de su variación temporal y espacial es realizado a partir de una interpretación visual y otra de carácter gráfico.

5.1 INTERPRETACIÓN VISUAL

Una imagen radar aún después del preprocesamiento resulta difícil de interpretar de manera visual. Con un poco de esfuerzo, es posible observar carreteras, asentamientos urbanos o rurales y cuerpos de agua. Por esta razón, se utilizan herramientas de manipulación y composición de color que ayudan a resaltar y contrastar los patrones ya mencionados.

En las imágenes del coeficiente de retrodispersión no se observa una gran diferencia de una imagen a otra, mientras que en las imágenes de las componentes de dispersión presentan apariencia de relieve y permiten apreciar fácilmente a la componente dominante.

5.1.1 COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN

En general, las imágenes de los esquemas de polarización son similares. En el esquema cruzado VH los valores del coeficiente de retrodispersión son notablemente inferiores respecto a los otros dos esquemas, VV y HH (ver figura 5.1). Los colores utilizados en la manipulación de color fueron: rojo, blanco, azul y negro; el color rojo para los valores más altos y negro para los más bajos. El rango de los valores corresponde de -2 dB a -14 dB.

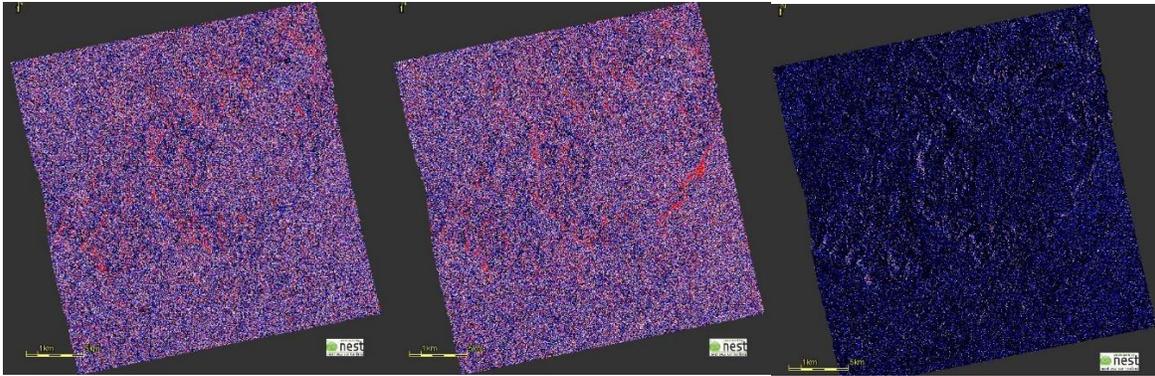


Figura 5.1. Imágenes RADARSAT-2 por esquema de polarización: VV (izquierda), HH (centro) y VH (derecha). Fecha de la imagen: 17 de septiembre de 2010.

Para realizar alguna interpretación de estas imágenes, es necesario recordar que el esquema HH tiene mayor sensibilidad a cuestiones de superficie o suelo, el esquema VV a cuestiones de volumen o vegetación, y el esquema VH es la despolarización de la onda y contribuye a la identificación de cuerpos de agua. Así mismo, en el esquema VH, la contribución de superficie es muy baja por lo que se observa principalmente patrones debido a la contribución de vegetación.

En este escrito, el Anexo 1 contiene todas las imágenes de radar del coeficiente de retrodispersión por esquema de polarización, clasificadas por fecha y ángulo de incidencia. Además de las tres imágenes de las componentes de Freeman-Durden.

5.1.2 COMPONENTES DE DISPERSIÓN

Las imágenes por componentes de dispersión de Freeman-Durden, a diferencia de las imágenes por esquema de polarización, descomponen a la imagen en función de los tres principales mecanismos de dispersión de una escena natural, utilizando la información de la matriz de covarianza para discriminar con mayor precisión el tipo de superficie de la que proviene la respuesta de la señal de radar. El conjunto de imágenes se incluyen en el Anexo 2.

La figura 5.2 muestra las imágenes de las componentes de Freeman-Durden: de volumen o vegetación (Freeman_Vol), superficie o suelo (Freeman_Odd) y doble o interacción entre suelo y vegetación (Freeman_Dbl). Se utilizó el mismo rango de valores (de -2 a -14 dB) y colores (rojo, blanco, azul y negro) que en las imágenes del coeficiente de retrodispersión. En estas imágenes, el contraste es mucho mayor de una componente a otra. La componente de volumen en su mayoría es de tonalidad roja (valores más altos), dejando en evidencia a la componente dominante. En cuanto a la componente de superficie, la tonalidad es azul oscura con algunas zonas rojiblancas, estas últimas

indican mayor contribución de superficie que en las zonas azules. Por último, la componente de interacción es muy oscura con pequeñas zonas azul oscuro, lo que significa que su contribución es mucho menor respecto a las otras dos componentes.

Un fenómeno muy importante a destacar es la presencia de una curva en las imágenes y su cambio de color de una imagen a otra (ver figura 5.3). En el esquema HH aparece de color rojo, de color oscuro en el esquema VH; en la componente de volumen nuevamente de color rojo y en la componente de interacción entre suelo y superficie de color blanco y rojo. A partir de este comportamiento, se infiere que se trata de una zona de vegetación inundable debido a la importante contribución de vegetación y de superficie. Esta vegetación inundable está constituida por pastos altos, los cuales se secan durante cierto período del año. Esto ocasiona que durante el período de sequía se vea como suelo desnudo y durante el período de máxima cobertura de pastos como cubierta vegetal³.

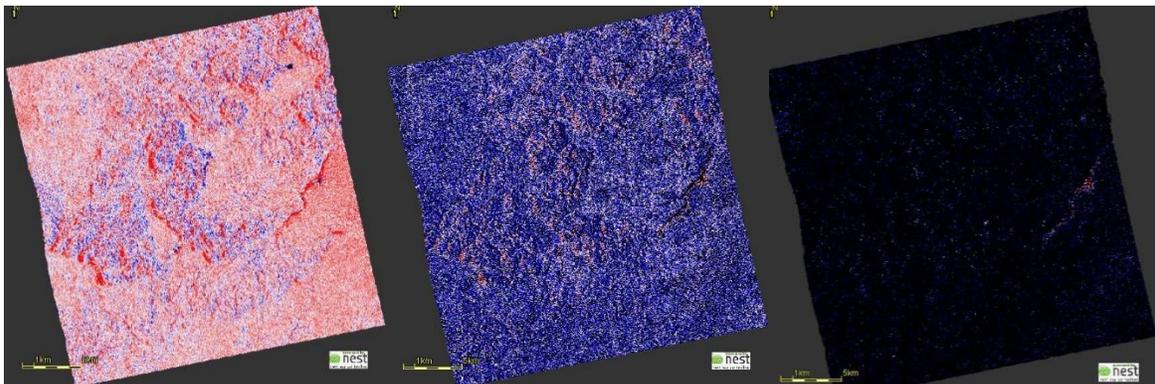


Figura 5.2. Imágenes RADARSAT-2 por componentes de Freeman-Durden, volumen (izquierda), superficie (centro) y doble (derecha). Fecha de la imagen: 17 de septiembre de 2010, zona sur.

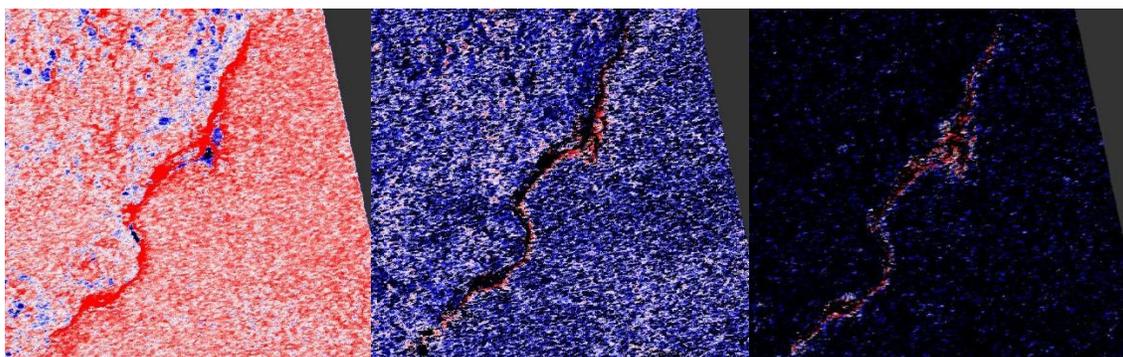


Figura 5.3. Zona de vegetación inundable. Componentes: de vegetación (izquierda), de suelo (centro) y de interacción entre suelo y vegetación (derecha).

³ Información dada por habitantes locales

Se encontró como herramienta de gran utilidad a la composición RGB de una imagen. Con resultados mucho mejores para las componentes de Freeman-Durden, se utilizó el color rojo para la componente de interacción entre suelo y vegetación, color verde para la componente de vegetación y color azul para la componente de suelo. Esta herramienta ayuda a observar con mayor facilidad y de manera más directa los patrones de una imagen como cuerpos de agua, carreteras, asentamientos urbanos, variación en la densidad y tipo de vegetación. Asimismo, permite resaltar la variación de las componentes de dispersión para facilitar el análisis temporal y espacial de una imagen a otra.

En la zona sur, como sitio de prueba se eligió un sitio llamado Ley de Fomento ($89^{\circ}25'22.494''$ O y $18^{\circ}4'6.74''$ N) ubicado cerca de una carretera y un importante cuerpo de agua (llamado localmente como aguada) (ver figura 5.4). Este cuerpo de agua a lo largo de la serie de imágenes, incluidas en el Anexo 2 (tabla 3), cambia de dimensiones e incluso se forma otro cuerpo de agua cercano a éste pero de dimensiones inferiores. Este fenómeno coincide con el período de lluvias de verano. El tamaño máximo del cuerpo de agua principal es de 133.5 m y el tamaño mínimo es de 125.6 m, de acuerdo a la imagen de radar. En la figura 5.5 se muestra un segundo sitio llamado Boscoso Sur ($89^{\circ}18'14.4''$ O y $17^{\circ}53'2.4''$ N) y se trata de una zona homogénea del bosque tropical, las imágenes del sitio se pueden apreciar también en el Anexo 2 (tabla 4).

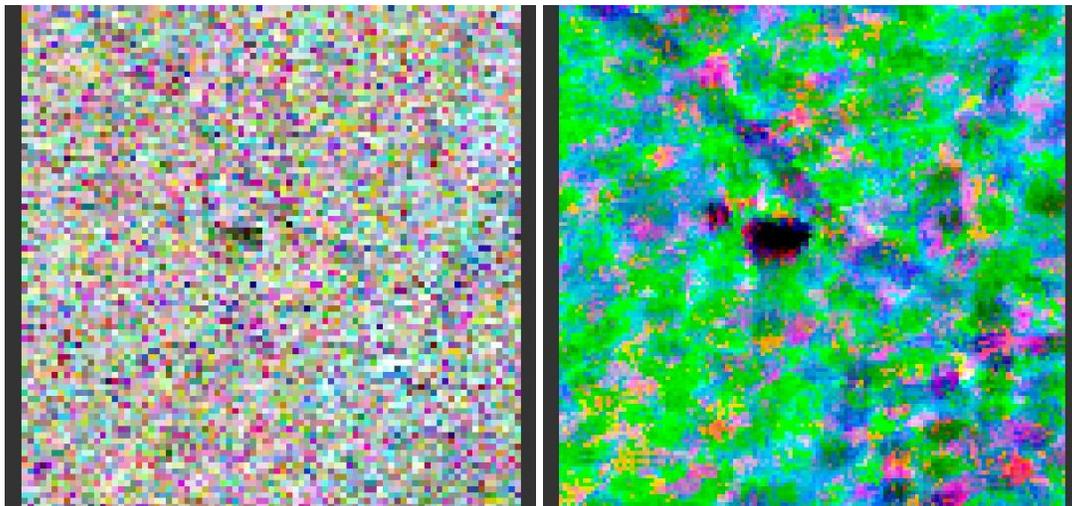


Figura 5.4. Imágenes RGB de los esquemas de polarización (izquierda) y las componentes de Freeman-Durden (derecha), sitio Ley de Fomento. Fecha de la imagen: 17 de septiembre de 2010, zona sur.

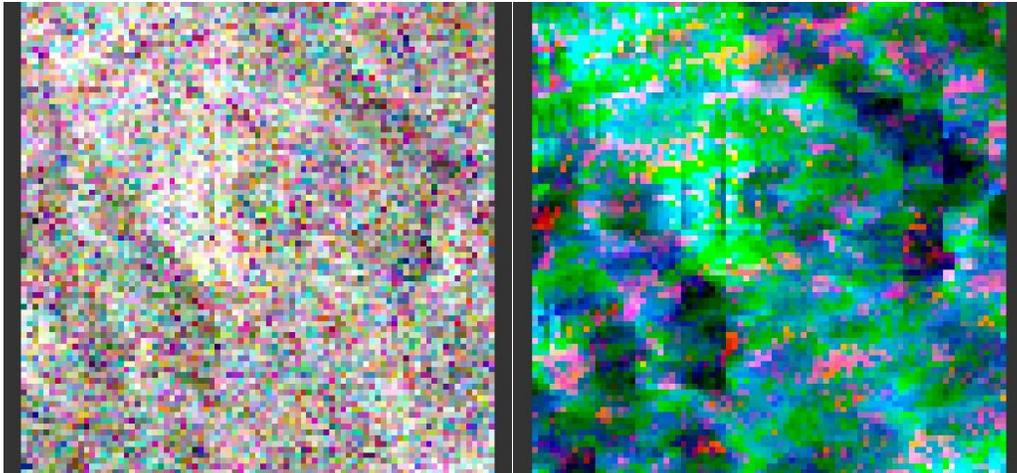


Figura 5.5. Imágenes RGB de los esquemas de polarización (izquierda) y las componentes de Freeman-Durden (derecha) sitio Boscoso Sur. Fecha de la imagen: 26 de septiembre de 2010, zona sur.

El área de cada sitio, tanto de la zona sur como norte es de un kilómetro cuadrado alrededor de las coordenadas indicadas para cada sitio. Y las coordenadas pertenecen al centro de la imagen.

En la zona norte, los sitios de prueba son llamados: Nuevo Becal ($89^{\circ} 16' 40.197''$ O y $18^{\circ} 36' 19.029''$ N) y Boscoso Norte ($89^{\circ} 16' 4.8''$ O y $18^{\circ} 42' 36''$ N). La figura 5.6 muestra las imágenes RGB del coeficiente de retrodispersión y las componentes de Freeman-Durden del sitio Nuevo Becal y la figura 5.7 del sitio Boscoso Norte.

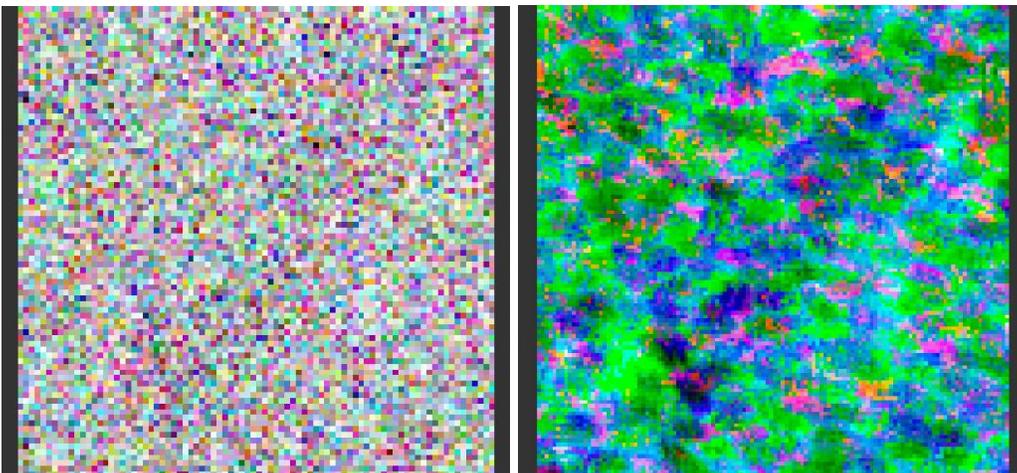


Figura 5.6. Imágenes RGB sitio Nuevo Becal, coeficiente de retrodispersión (izquierda) y componentes de Freeman-Durden (derecha). Fecha de la imagen: 26 de septiembre de 2010, zona norte.

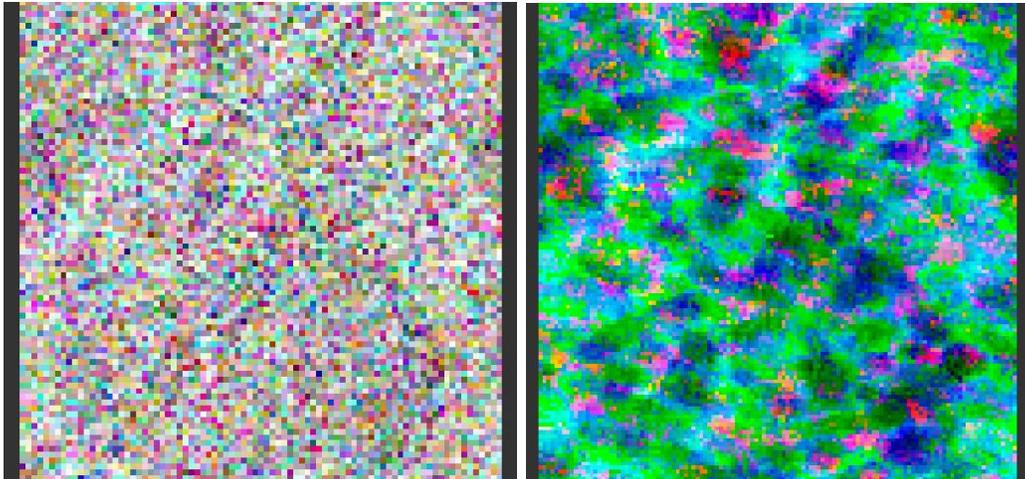


Figura 5.7. Imágenes RGB sitio Boscoso Norte, coeficiente de retrodispersión (izquierda) y componentes de Freeman-Durden (derecha). Fecha de la imagen: 26 de septiembre de 2010, zona norte.

5.2 INTERPRETACIÓN GRÁFICA

Para realizar una interpretación más específica de la variación del coeficiente de retrodispersión y las componentes de dispersión, se seleccionaron los sitios de prueba mostrados en las figuras 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7. La dimensión de cada uno de los sitios es de un kilómetro cuadrado (1 km^2) y los resultados son separados en zona norte y zona sur. Los valores son promediados y graficados para su análisis.

5.2.1 ZONA SUR

La figura 5.8, muestra una de las imágenes de la zona sur con los dos sitios seleccionados. El sitio de la parte superior es Ley de Fomento y el sitio de la parte inferior es un área seleccionada de manera aleatoria para representar una zona homogénea. Al tratarse de una zona con vegetación densa y uniforme, se nombró Boscoso Sur.

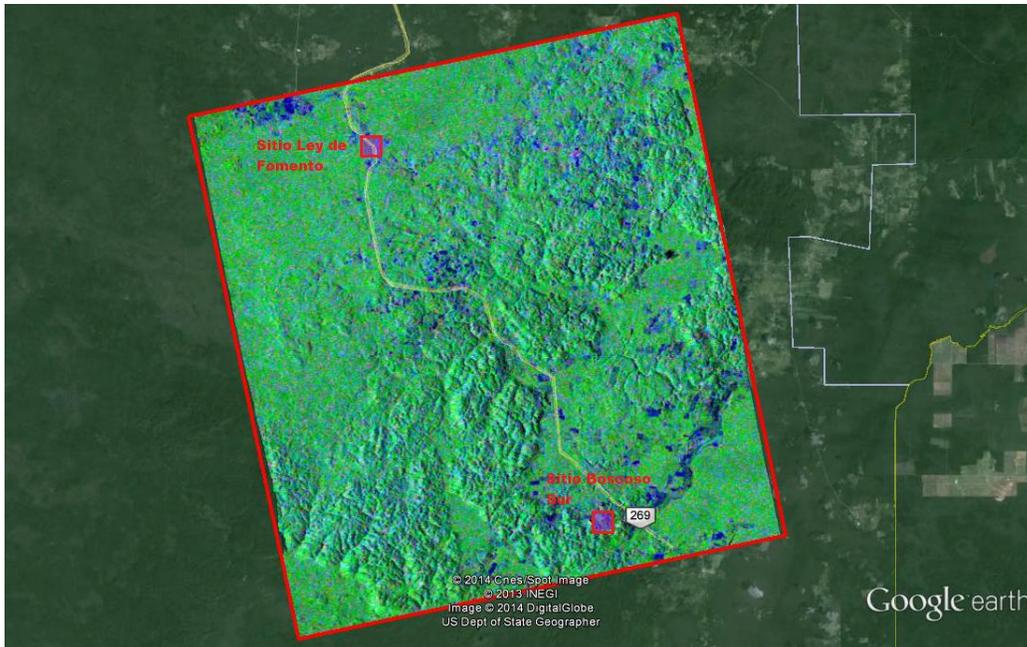


Figura 5.8 Sitios en zona sur. Imagen RGB de las componentes de Freeman-Durden en Google Earth.

Una vez identificados los sitios, se tomaron los valores de cada imagen dentro del área de 1 km² y fueron promediados, clasificados de acuerdo a la fecha y ángulo de incidencia para facilitar el análisis temporal y el efecto del ángulo de incidencia. Hay que recordar que para cuestiones de humedad de suelo lo más recomendable son ángulos bajos, preferentemente inferiores a 30°.

Para el sitio **Ley de Fomento** (figura 5.9), se incluyen los resultados de cinco imágenes. Las primeras cuatro con el mismo ángulo de incidencia de 22.1 a 24.2° y la última con ángulo de incidencia mayor de 36.4 a 38°. La dinámica del coeficiente de retrodispersión es casi nula, los valores de los esquemas de polarización VV y HH son idénticos, mientras los valores del esquema VH son menores con una diferencia de aproximada de 6 [dB]. A diferencia de los resultados de las componentes de Freeman-Durden (figura 5.10), utilizando las mismas imágenes, muestran una dinámica más sensible de los valores en cada una de las componentes. Por ejemplo, la componente de vegetación es casi constante con una caída de poco menos de 2 [dB] para la imagen del 11/08/2010 debido al cambio de ángulo de incidencia. A mayor ángulo de incidencia se espera observar una contribución de vegetación mayor [2]. En la componente de suelo, existe un incremento de alrededor de 2 [dB] de la fecha del 26/04/2010 a la fecha del 20/05/2010, y se mantiene constante hasta la fecha del 11/08/2010 en la que ocurre un decremento de 2 [dB]. Por último, el comportamiento de la componente de interacción entre suelo y vegetación sólo presenta un mínimo incremento en la imagen del 20/05/2010 respecto a las otras imágenes.

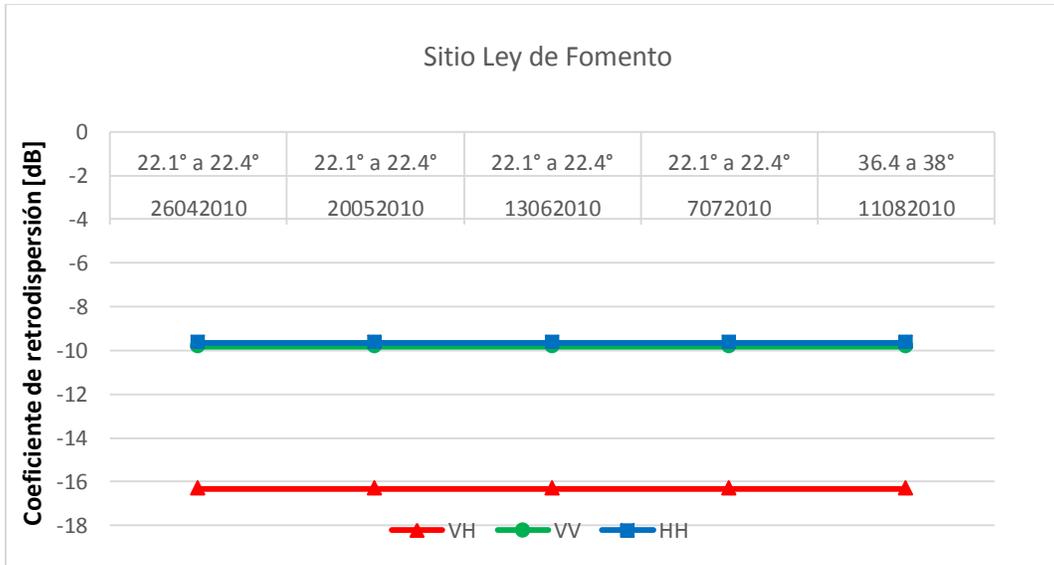


Figura 5.9 Coeficiente de retrodispersión. Sitio Ley de Fomento.

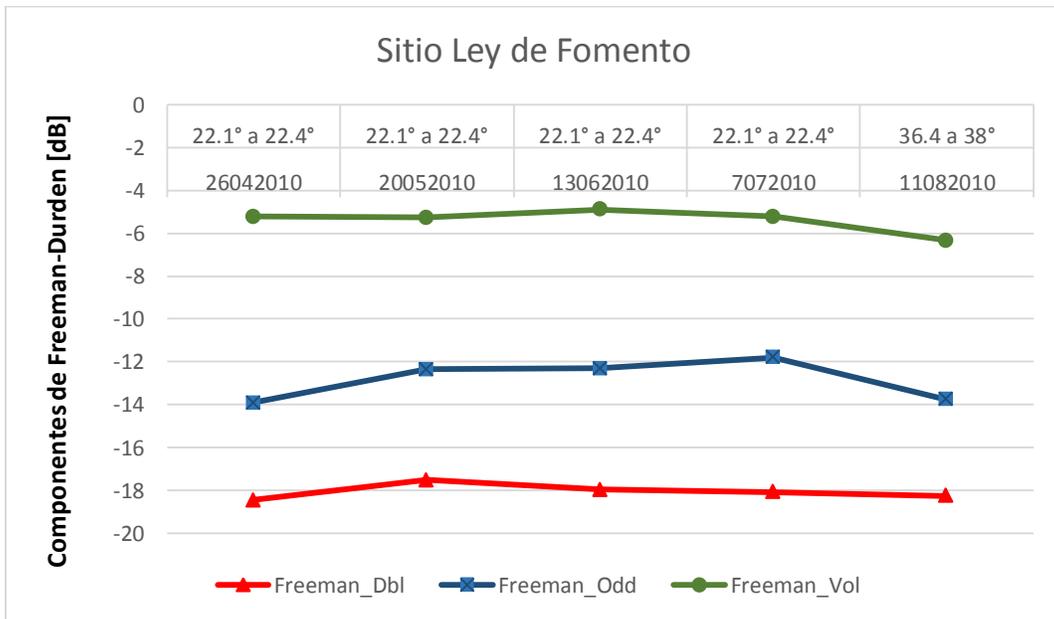


Figura 5.10 Componentes de Freeman-Durden. Sitio Ley de Fomento.

Como se observa en las figuras 5.9 y 5.10, las variaciones en la vegetación no son capturadas por el coeficiente de retrodispersión en banda C. Sin embargo, las variaciones en las interacciones de suelo y vegetación son descritas por el radar, principalmente en el periodo del 26/04/2010 al 13/06/2010. Asimismo, se observa que la descomposición de Freeman-Durden sirve como guía para determinar la componente de dispersión dominante y observar variaciones en el suelo a pesar de su pequeña contribución.

Para el sitio **Boscoso Sur** se utilizaron 13 imágenes, diez con el mismo ángulo de incidencia de 22.1 a 24.2° (figura 5.11 y otras tres con ángulo de incidencia de 36.4 a 38° (figura 5.12). Las primeras diez imágenes abarcan un intervalo de tiempo del 20/05/2010 al 21/04/2011 con espacios de uno a dos meses, y se puede observar que en las primeras tres imágenes el valor del coeficiente de retrodispersión es constante, después ocurre un incremento en el 17/09/2010 de aproximadamente 1.5 [dB], seguido de un decremento menor a 1 [dB], manteniéndose con ligeras variaciones hasta una caída de 0.5 [dB] en la última fecha del 21/04/2011. Este comportamiento ocurre para los tres esquemas de polarización, y la diferencia entre los valores de los esquemas VV y HH con los del esquema VH también es de 6 [dB] y casi constante durante todo el período de estudio. En cambio, para las tres imágenes con ángulo de incidencia de 36.4 a 38°, no existe variación alguna. Es importante mencionar que el intervalo entre una imagen y otra es de tres a cuatro meses y por esta razón pudiera no ser visible algún cambio.

Como se mencionó anteriormente, los efectos de la contribución de la vegetación son más visibles a ángulos de incidencia mayores. Dado que se está observando una zona boscosa, existen pocas variaciones en la vegetación y las observaciones a ángulos mayores a 30° no logran captarlas.

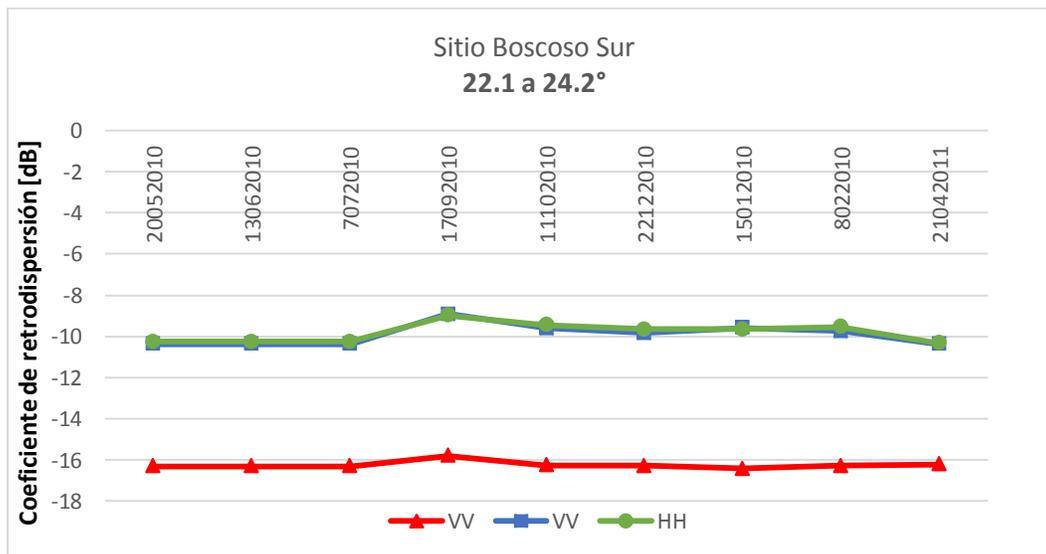


Figura 5.11 Coeficiente de retrodispersión. Sitio Boscoso Sur. Ángulo de incidencia de 22.1 a 24.2°.

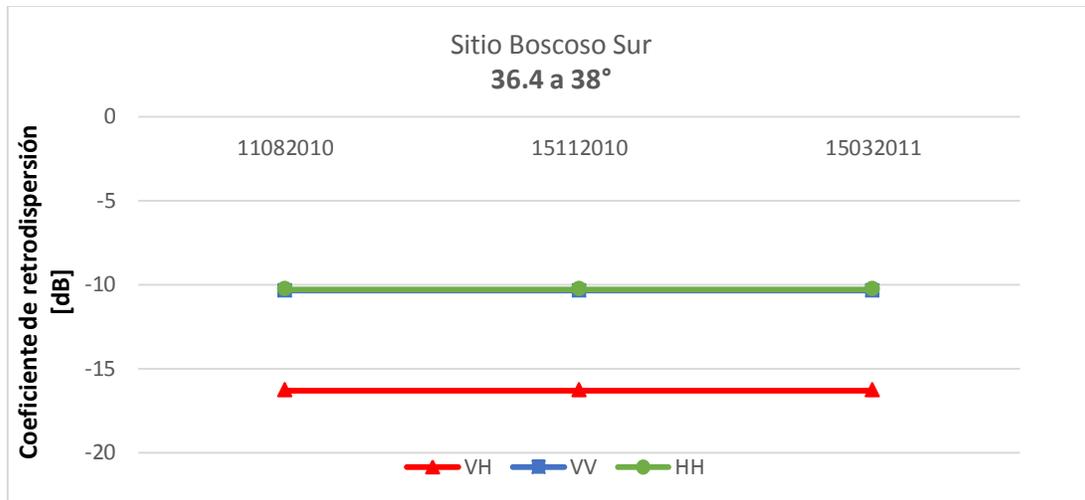


Figura 5.12 Coeficiente de retrodispersión. Sitio Boscoso Sur. Ángulo de incidencia de 36.4 a 38°.

Por otro lado, en las componentes de Freeman-Durden del sitio **Boscoso Sur** (figuras 5.13 y 5.14) para las mismas imágenes. La componente de vegetación de las imágenes con ángulo de incidencia de 22.1 a 24.2° es prácticamente constante en todo el intervalo de tiempo, mientras que en la componente de suelo ocurren dos incrementos graduales seguidos de dos decrementos. Lo que genera dos pendientes, la primera pendiente más prolongada que la segunda. En la componente de interacción no ocurren cambios significativos del 26/04/2010 hasta el 17/09/2010, en donde disminuye y vuelve a subir para el 08/02/2011. Para las imágenes con ángulo de incidencia de 36.4° a 38° la componente de vegetación también es prácticamente constante. La componente de suelo incrementa aproximadamente 3 [dB] durante todo el conjunto de imágenes y en la componente de interacción entre suelo y vegetación sólo ocurre un incremento en la fecha intermedia.

Nuevamente, en este caso, se observa que la descomposición de Freeman-Durden logra un mayor contraste entre las componentes de dispersión, permitiendo identificar variaciones en el suelo e interacciones.

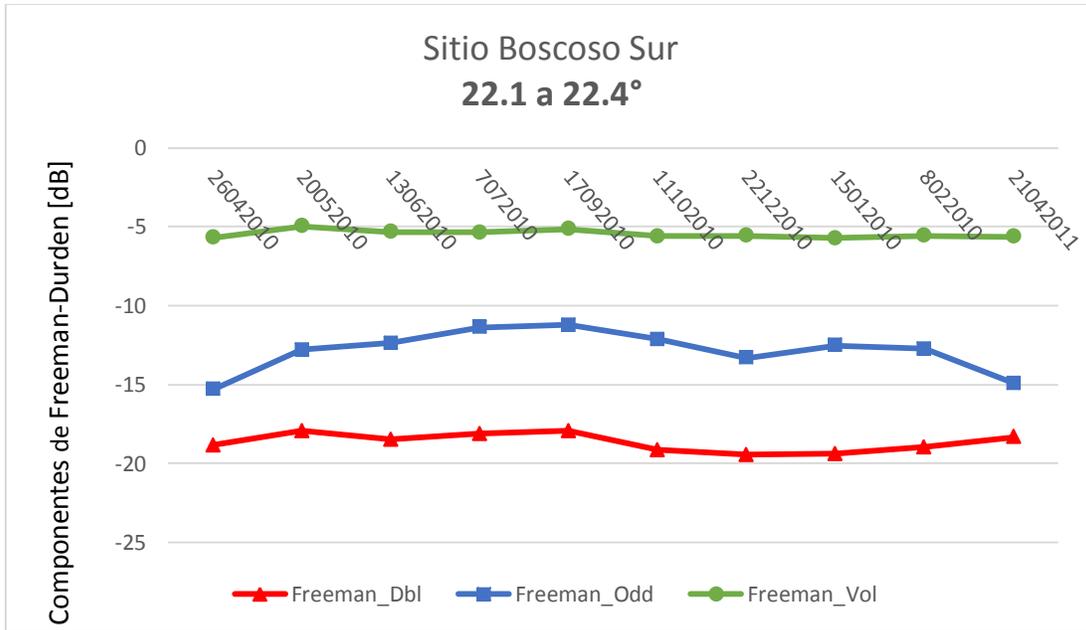


Figura 5.13. Componentes de Freeman-Durden. Sitio Boscoso Sur. Ángulo de incidencia 22.1 a 22.4°

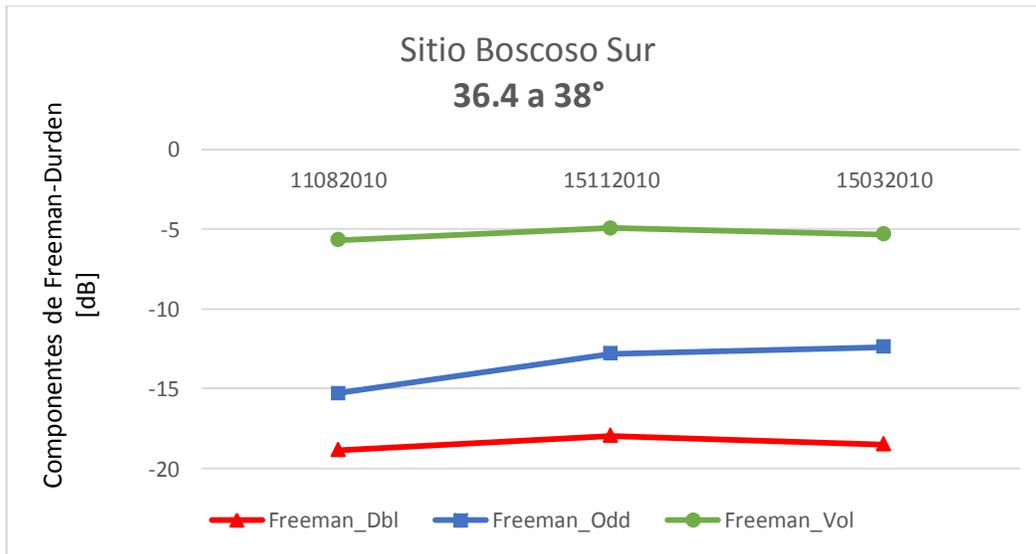


Figura 5.14. Componentes de Freeman-Durden. Sitio Boscoso Sur. Ángulo de incidencia 36.4 a 38°

5.2.2 ZONA NORTE

De manera similar a los sitios en la zona sur, los sitios en la zona norte miden un kilómetro cuadrado. En la parte superior de la imagen de la figura 5.15 se encuentra el sitio Boscoso Norte, zona homogénea de bosque tropical similar a la elegida en la zona sur. Y en la parte inferior se encuentra el otro sitio llamado Nuevo Becal.

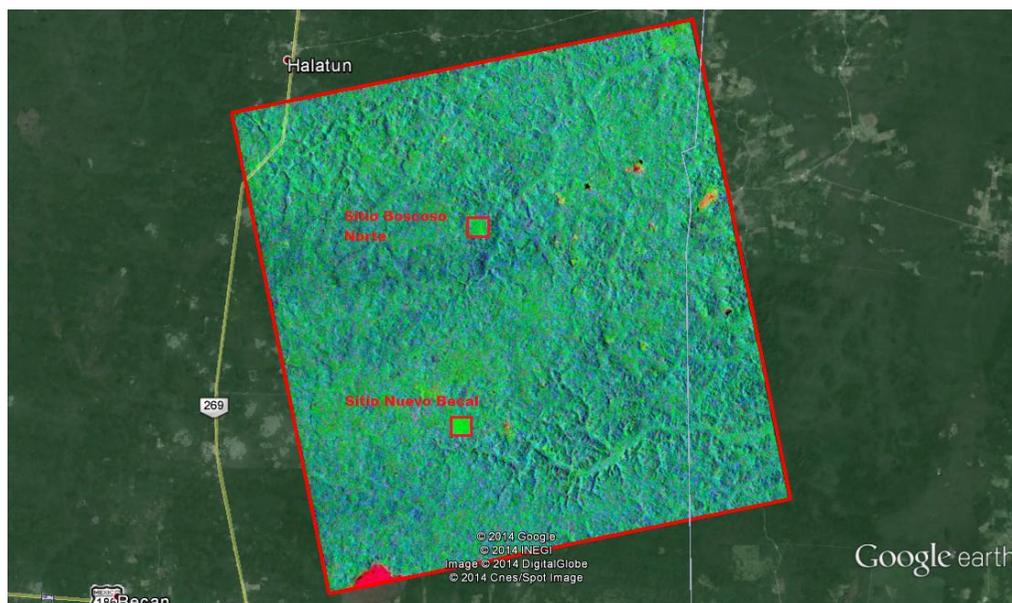


Figura 5.15. Sitios en la zona norte. Imagen RGB de las componentes de Freeman-Durden en Google Earth.

Con los mismos criterios de clasificación, se agruparon los resultados obtenidos en función del ángulo de incidencia y la fecha. En el caso del sitio Nuevo Becal, son siete imágenes con una heterogeneidad en los valores del ángulo de incidencia. Es por ello que se clasificaron en dos grupos: tres con ángulo de incidencia de 31.3 a 33° y cuatro con ángulo de incidencia de 34.4° a 42.4° .

La figura 5.16 corresponde a los resultados de las primeras tres imágenes dentro del período del 22/11/2010 al 22/03/2010. La imagen intermedia es de la fecha del 16/12/2010, poco menos de un mes después de la primer imagen y tres meses antes de la tercer imagen. Se puede observar un decremento de 2 [dB] a lo largo del período para los tres esquemas de polarización, con la misma diferencia de 6 [dB] entre los esquemas VV y HH con el de VH. Por otro lado, en la figura 5.17, dos de las imágenes son de fecha muy cercana (26 y 28 de septiembre de 2010) con un ligero cambio en el ángulo de incidencia. En este caso, es posible observar con claridad los cambios producidos a causa del paso de la tormenta tropical Mathew⁴ (23 al 26 de septiembre) con el incremento de eventos de precipitación, por ende, mayor cantidad de humedad. Este

³ Reseña de la tormenta tropical Matthew del Océano Atlántico <http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2010/atlantico/Mathew2010a.pdf>

fenómeno también es apreciado visualmente en la imagen del 28 de septiembre de 2010, donde aparecen zonas borrosas y oscuras similares al efecto producido por las nubes en una imagen óptica; sin embargo en imágenes de radar se debe a la acumulación de moléculas de agua. En esta figura sólo se observa un incremento menor a 0.5 [dB] en el esquema VH del 26 al 28 de septiembre.

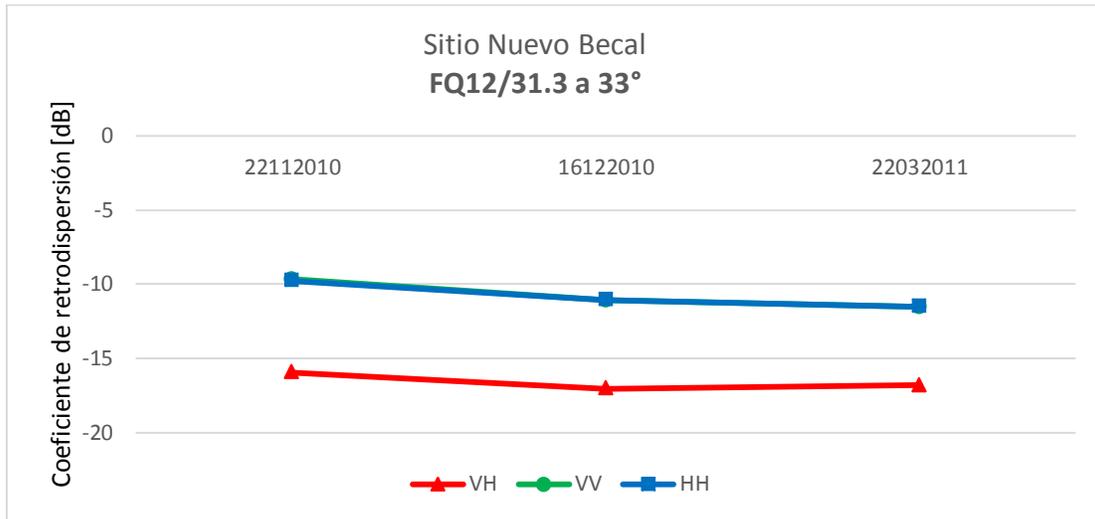


Figura 5.16. Coeficiente de retrodispersión. Sitio Nuevo Becal. Ángulo de incidencia 31.3 a 33°

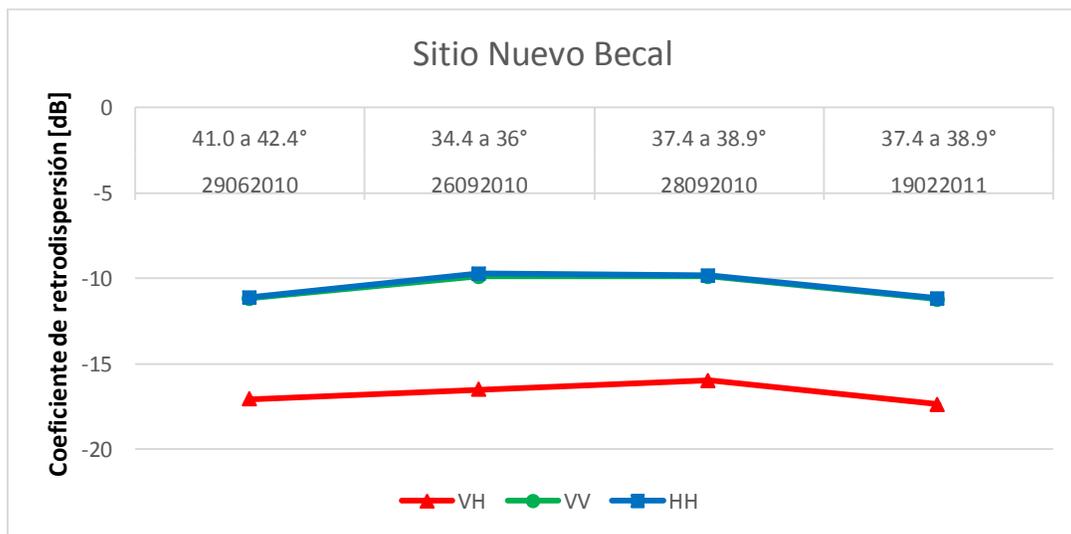


Figura 5.17. Componentes de Freeman-Durden. Sitio Nuevo Becal. Ángulo de incidencia mayor a 34°.

En cambio, la variación de las componentes de Freeman-Durden en Nuevo Becal es notoriamente diferente. En las imágenes con ángulo de incidencia de 31.3 a 33° (figura 5.18) la componente de vegetación es prácticamente constante, la componente de superficie presenta un incremento de poco menos de 2 [dB] del 22/11/2010 al 16/12/2010 y se mantiene en el mismo valor hasta la fecha del 22/03/2011. Sin embargo, este último intervalo de tiempo es mucho mayor al primer intervalo y, la componente de interacción entre suelo y vegetación presenta un comportamiento similar con la diferencia de un pequeño decremento en la imagen del 22/03/2010.

En las imágenes con ángulo de incidencia de 34.4 a 42.4° (figura 5.19), entre el 26 y 28 de septiembre de 2010 ocurre un decremento de 2.5 [dB] en la componente de suelo, a su vez un incremento menor a un decibel en la componente de vegetación y un decremento de alrededor de 2 [dB] en la componente de interacción entre suelo y vegetación. El incremento en la componente de vegetación es debido a una ligera variación del ángulo de incidencia y el incremento en la componente de superficie debido a una mayor cantidad de humedad en el suelo asociada al paso de la tormenta tropical Matthew. Después de este incremento, en la componente de vegetación ocurre una caída de 1.5 [dB] con un decremento muy pequeño de la componente de suelo y un incremento también pequeño en la componente de interacción de suelo y vegetación.

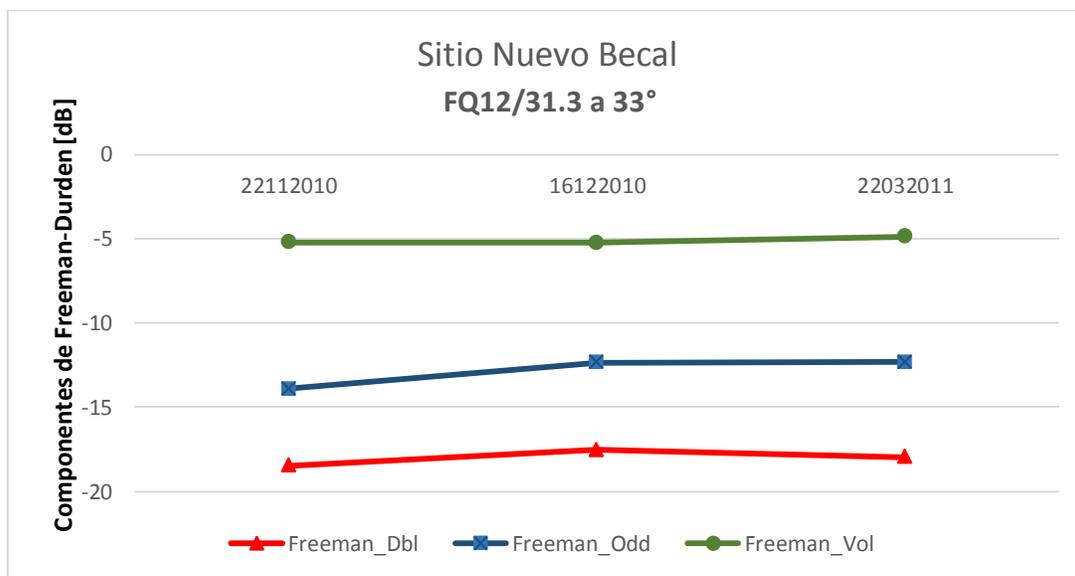


Figura 5.18. Componentes de Freeman-Durden. Sitio Nuevo Becal. Ángulo de incidencia 31.3 a 33°.

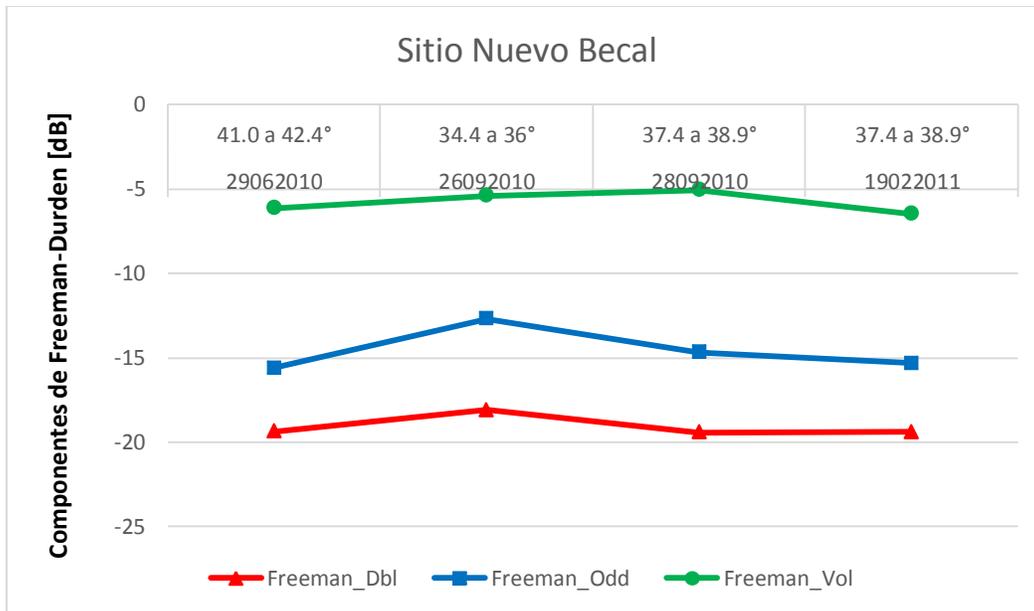


Figura 5.19. Componentes de Freeman-Durden. Sitio Nuevo Becal. Ángulo de incidencia mayor a 34°.

Por último, para el sitio **Boscoso Norte** se utilizaron diez imágenes que fueron agrupadas en dos conjuntos, en función de su ángulo de incidencia. La figura 5.20 muestra los valores del coeficiente de retrodispersión de cinco imágenes, las primeras dos imágenes con ángulo de incidencia de 23.4 a 25.3° y las últimas tres con 31.3 a 33°. En el primer conjunto de imágenes ocurre un incremento de un decibel, seguido de un decremento de la misma magnitud en los esquemas VV y HH, que puede ser atribuido al cambio de ángulo de incidencia y continua decreciendo hasta llegar a -11 [dB]. El patrón del esquema VH es idéntico a los de los esquemas de polarización VV y HH con una diferencia de 6 [dB] respecto a los valores mostrados por las co-polarizaciones. Además, VH presenta un ligero incremento del 16/12/2010 al 22/03/2011. La figura 5.21 muestra las otras cinco imágenes del sitio Boscoso Norte con diferentes ángulos de incidencia mayores a 34.4°, del período del 29 de junio al 26 de septiembre de 2010. Los valores de coeficiente de retrodispersión incrementan y después vuelven a disminuir, con valores máximos en 29/06/2010.

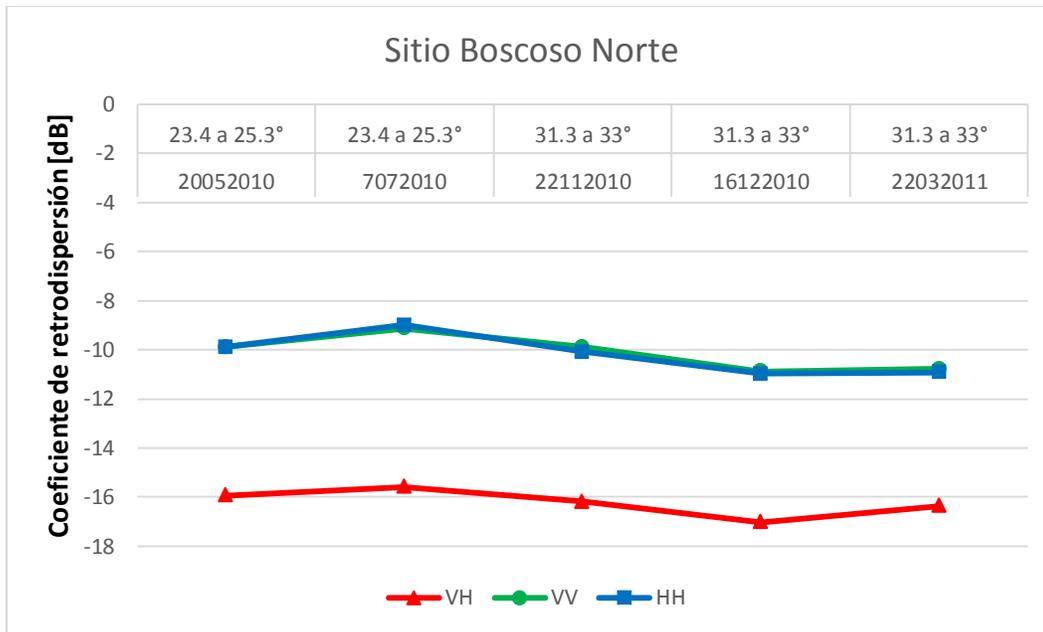


Figura 5.20. Coeficiente de retrodispersión. Sitio Boscoso Norte. Ángulo de incidencia de 23 a 33°

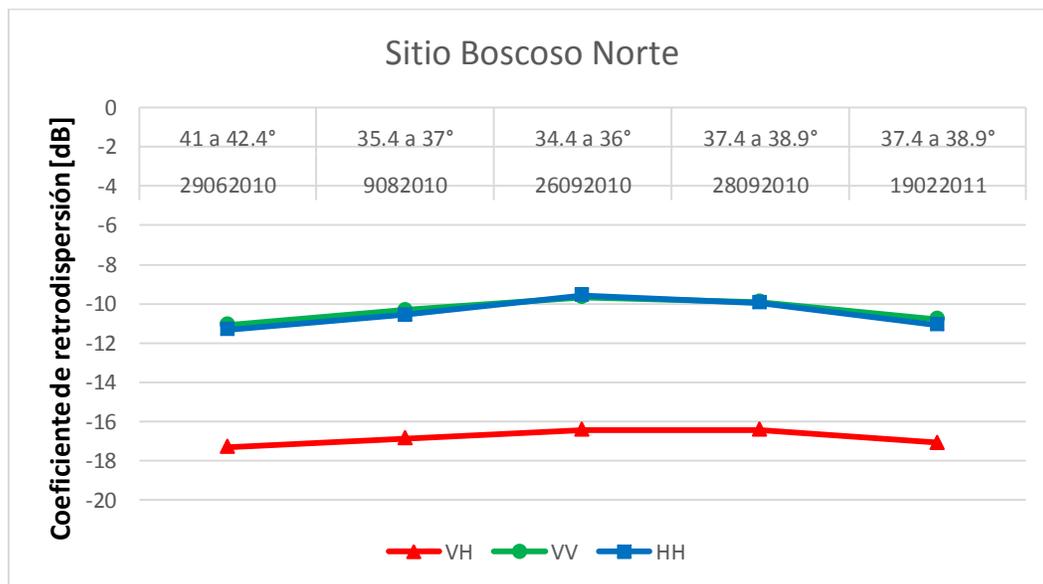


Figura 5.21. Coeficiente de retrodispersión. Sitio Boscoso Norte. Ángulo de incidencia de 34.4 a 42.4°.

En la figura 5.22 (componentes de Freeman-Durden a ángulos de incidencia elevados), las componentes de suelo y la de interacción entre suelo y vegetación decrecen. La primera de -12.5 hasta -17.3 [dB] y en la segunda sólo ocurre una caída de poco menos de 5 dB que coincide con el incremento del ángulo de incidencia. Mientras, el valor de la componente de vegetación disminuye gradualmente a lo largo de todo el período, lo que podría considerarse constante bajo el efecto del incremento del ángulo de incidencia.

Finalmente, en la figura 5.23, se observa un patrón idéntico de las componentes de vegetación y la de suelo con una diferencia de 8 [dB]. En la componente de interacción entre suelo y vegetación del último par de imágenes (28/09/2010 y 19/02/2011) el valor es el mismo, lo que difiere del patrón de las otras dos componentes en las que sí decrece.

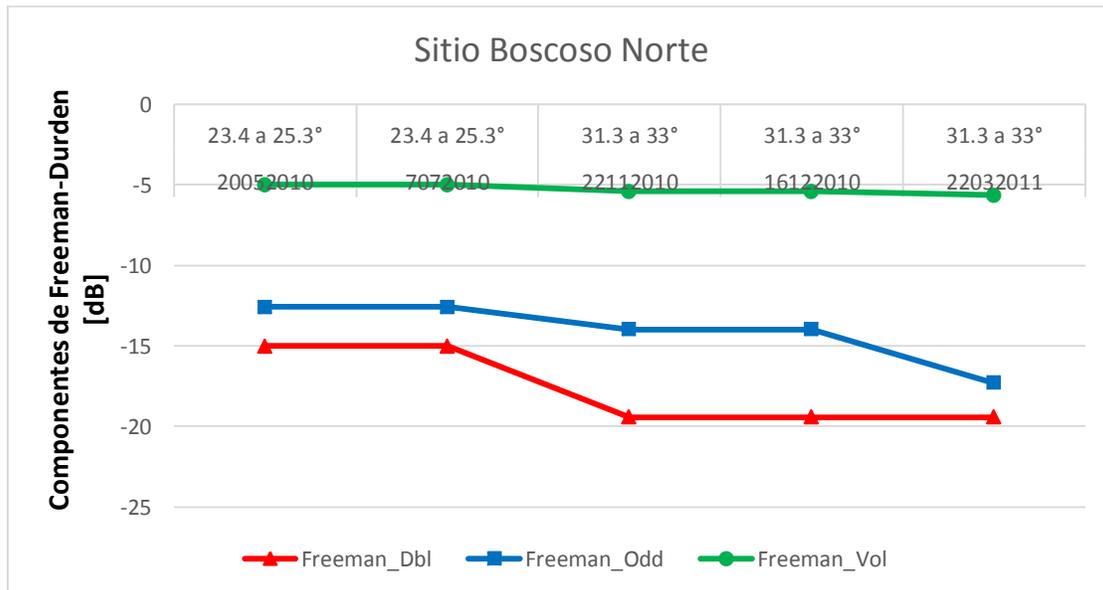


Figura 5.22. Componentes de Freeman-Durden. Sitio Boscoso Norte. Ángulo de incidencia de 23 a 33°.

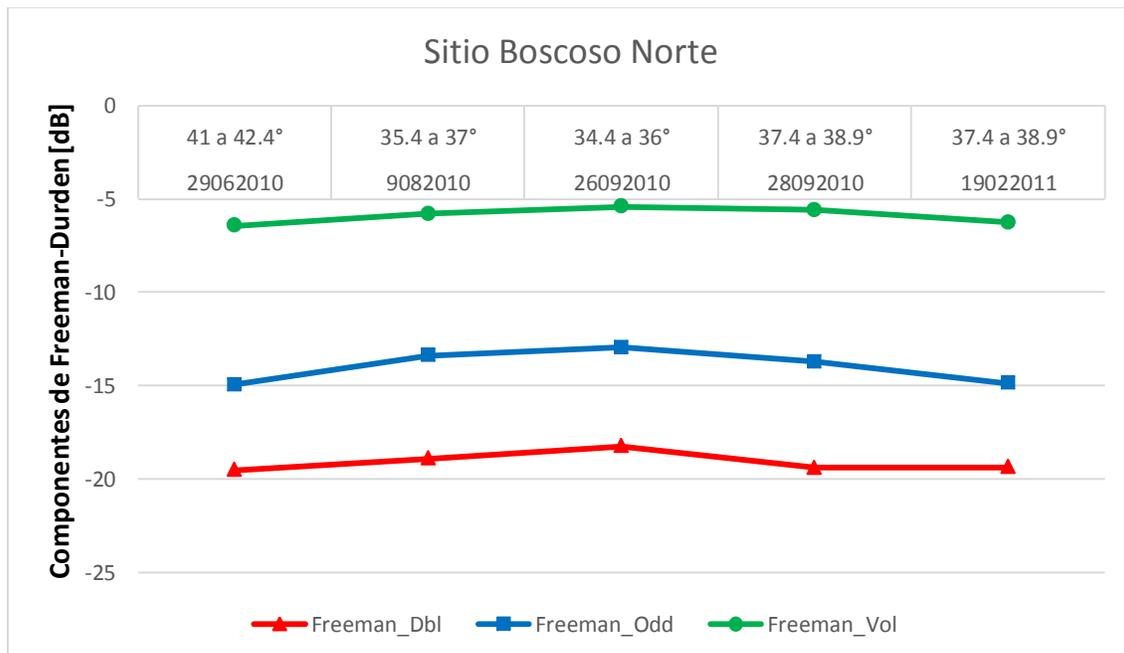


Figura 5.23. Componentes de Freeman-Durden. Sitio Boscoso Norte. Ángulo de incidencia de 34.4 a 42.4°.

En general, la descomposición de Freeman-Durden logra un contraste mayor entre las componentes de dispersión, aportando información valiosa de la componente de superficie y su interacción con la vegetación. La componente de vegetación como componente dominante presenta variaciones menores en sus valores, lo que corresponde al tipo de vegetación del bosque tropical que nunca pierde completamente sus hojas (sólo disminuye su densidad de hojas).

CAPÍTULO 6. HUMEDAD DE SUELO Y OTROS PARÁMETROS BIOFÍSICOS SENSIBLES

6.1 MODELO SEMIEMPÍRICO O SIMPLIFICADO

A partir de las salidas generadas por el modelo de MIMICS [25] se determinaron los principales parámetros sensibles que representan las entradas al modelo semiempírico o simplificado. Los parámetros con mayor sensibilidad resultaron ser la humedad de ramas y el ancho de copa de árbol, además de la humedad de suelo como variable de estudio. Para obtener las salidas del modelo de MIMICS se utilizaron cerca de 30 entradas, entre ellas, la frecuencia de operación del sistema RADARSAT-2 de 5.405 GHz, el ángulo de incidencia, la temperatura ambiente promedio (30°) y los datos existentes que describen la vegetación y suelo de la zona de estudio.

6.1.1 ENTRADAS DEL MODELO MIMICS

Los datos utilizados como valores de entrada fueron medidos durante la campaña de septiembre de 2012 en los sitios: El Refugio (89°22'37.946" O y 18°48'11.059" N) (Tabla 6.1) y Modesto Ángel (88°42'37" O y 18°36'46" N) (tabla 6.2) de la zona norte. Las tablas 6.1 y 6.2 presentan los datos medidos en campo de la geometría de vegetación y la tabla 6.3 muestra los datos de humedad de suelo, humedad de vegetación y textura del suelo considerados en el estudio. El sitio Modesto Ángel posee mayor densidad de vegetación y se trata de una zona con menor impacto ambiental que el sitio El Refugio.

Tabla 6.1 Parámetros de vegetación (parte 1)

Sitio	Altura del tronco (m)	Altura de árbol (m)	Longitud rama primaria (m)	Longitud rama secundaria (m)	Radio de copa (m)	Diámetro de troncos (cm)	Diámetro ramas primarias (cm)	Diámetro ramas secundarias (cm)
El Refugio	4.68	11.42	2.92	1.84	2.047	8.58	6.11	2.96
Modesto Ángel	5.025	11.265	1.44	0.96	2.4	15.82	11.775	7.075

Tabla 6.2 Parámetros de vegetación (parte 2)

Sitio	Densidad espacial de árboles (m ²)	Densidad volumétrica de troncos (m ³)	Densidad volumétrica de hojas (m ³)	Densidad volumétrica ramas primarias (m ³)	Densidad volumétrica ramas secundarias (m ³)	Largo hoja (cm)	Ancho hoja (cm)
El Refugio	0.27	0.0577	730.00	0.75	9.16	10.3	5.37
Modesto Ángel	0.4	0.0796	1178.88	0.992	7.6	9.52	3.72

Tabla 6.3 Humedades de vegetación y suelo, textura y rugosidad de suelo

Sitio	humedad de hojas (%)	humedad de ramas (%)	humedad volumétrica de suelo (%)	altura rms (mm)	Arena (%)	Arcilla (%)
El Refugio	32.2	54.38	62.3	16.48	22.8	44
Modesto Ángel	53.9	50.15	62.3	10.28	26.44	61.86

6.1.2 PARÁMETROS BIOFÍSICOS SENSIBLES

El estudio de sensibilidad efectuado mostró que el coeficiente de retrodispersión es significativamente sensible a las variaciones de humedad de suelo, humedad de ramas y al ancho de copa de los árboles. Las gráficas mostradas en la figura 6.1 permiten apreciar la respuesta del coeficiente de retrodispersión a la variación de cada parámetro mencionado ($\pm 15\%$ respecto al valor central y ángulo de incidencia de 35°) para los sitios Modesto Ángel y El Refugio. El comportamiento más lineal se observa en el sitio Modesto Ángel de acuerdo a las pendientes.

En la figura 6.2 se puede observar el efecto del ángulo de incidencia, desde 20 a 50° con los valores centrales de cada parámetro sensible, sobre la respuesta del coeficiente de retrodispersión por cada esquema de polarización. Nuevamente, los resultados del sitio Modesto Ángel arrojaron un comportamiento más lineal del coeficiente de retrodispersión respecto al sitio El Refugio.

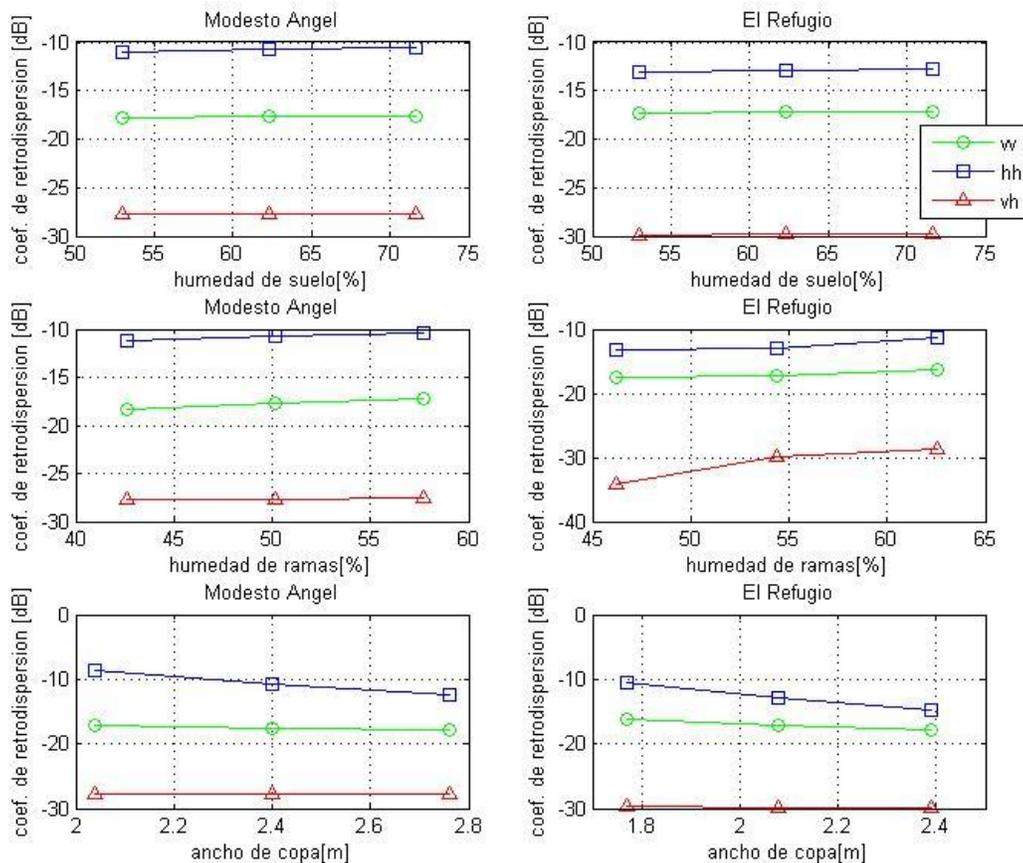


Figura 6.1. Sensibilidad de los parámetros: humedad de suelo (arriba), humedad de ramas (centro) y ancho de copa (abajo)

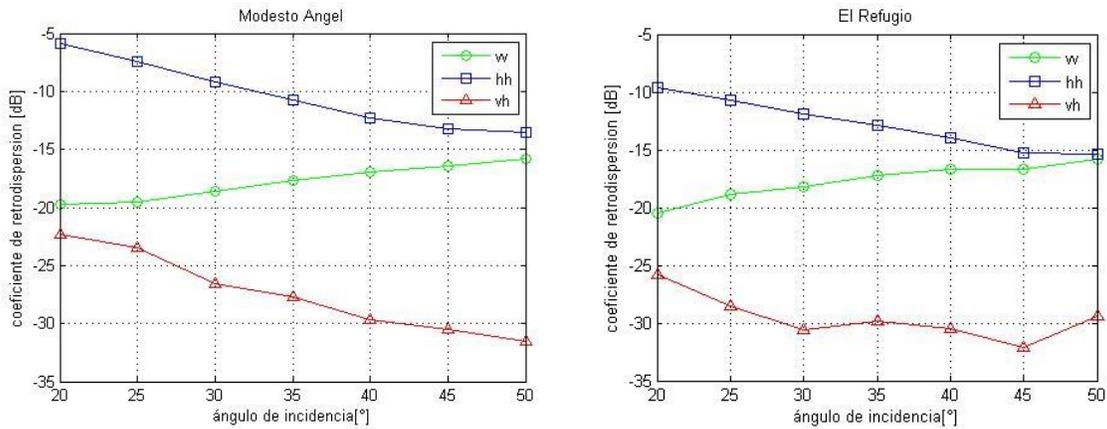


Figura 6.2. Efecto del ángulo de incidencia

Considerando que el coeficiente de retrodispersión es sensible a los parámetros de humedad de suelo, humedad de ramas, ancho de copa de los árboles y al ángulo de incidencia, las figuras 6.3 y 6.4 muestran el conjunto de superficies elaboradas con la variación de cada uno de los parámetros por esquema de polarización. A manera de ejemplo y para continuar con el análisis, sólo se muestran las correspondientes a Modesto Ángel. En la superficie VV de humedad de suelo (figura 6.3, lado izquierdo), el coeficiente de retrodispersión aumenta con el ángulo de incidencia y disminuye junto con el porcentaje de humedad de suelo. Mientras que en los esquemas HH y VH de humedad de suelo, el coeficiente de retrodispersión disminuye con el incremento del ángulo de incidencia. Además, el coeficiente de retrodispersión incrementa junto con el contenido de humedad de suelo en el esquema HH. De manera similar, en la que las superficies de humedad de ramas se encuentran a la derecha de la misma figura, las superficies tienen la misma orientación con pendiente ligeramente mayor. En la figura 6.4, las superficies de ancho de copa presentan pendientes mayores y con variaciones distintas del coeficiente de retrodispersión en los extremos, respecto a las superficies de humedad de suelo y humedad de ramas.

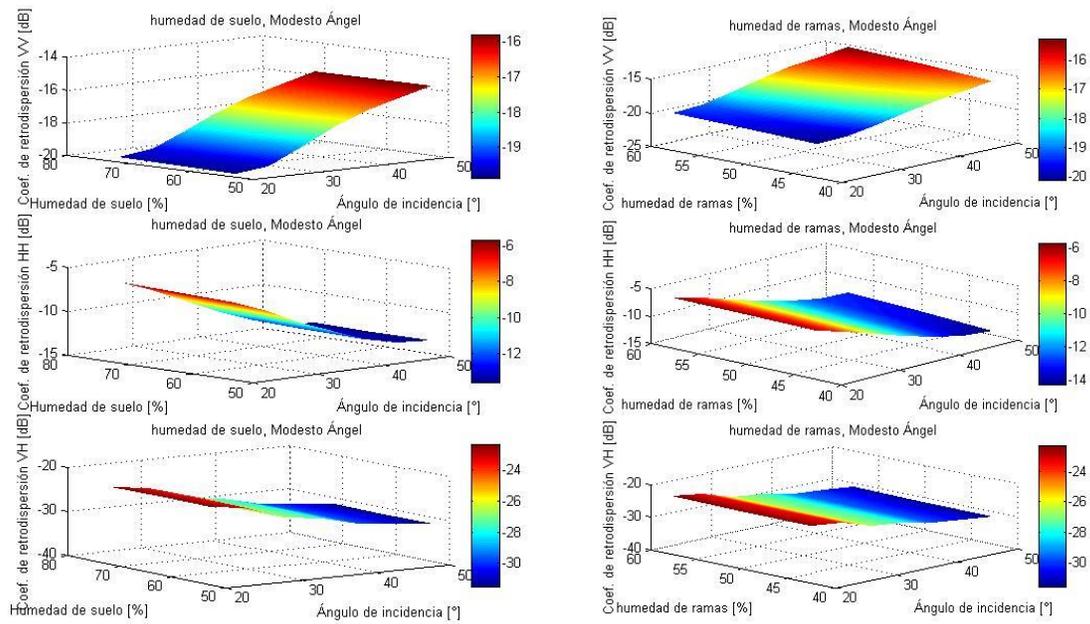


Figura 6.3 Superficies de humedad de suelo (izquierda) y humedad de ramas (derecha) del sitio Modesto Ángel, polarizaciones: VV (arriba), HH (centro) y VH (abajo)

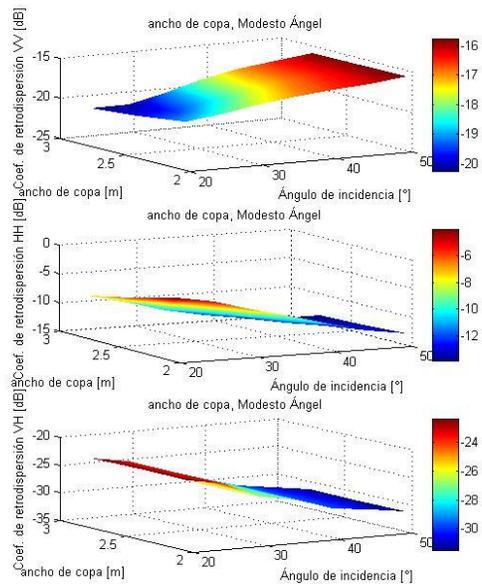


Figura 6.4 Superficies de ancho de copa del sitio Modesto Ángel polarizaciones: VV (arriba), HH (centro) y VH (abajo)

6.1.3 ECUACIONES DEL MODELO SIMPLIFICADO

El modelo simplificado es una representación linealizada del comportamiento del coeficiente de retrodispersión a la variación de los parámetros sensibles. Esta representación lineal considera también la variación angular del coeficiente de retrodispersión. Los valores con los que se elaboraron las superficies de las figuras 6.3 y 6.4 fueron resultado de la variación de $\pm 15\%$ respecto al valor central de cada parámetro sensible y de la variación angular del coeficiente de retrodispersión utilizando valores centrales de los parámetros sensibles. Con estos valores se construyó cada elemento de la ecuación matricial que describe al modelo simplificado:

$$\widetilde{M} = \mathcal{A}(\theta)(x - x_0) + \mathcal{L}^0(\theta) \quad (6.1)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{VV}^0 \\ \sigma_{HH}^0 \\ \sigma_{VH}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{msVV}(\theta) & a_{mbVV}(\theta) & a_{hcVV}(\theta) \\ a_{msHH}(\theta) & a_{mbHH}(\theta) & a_{hcHH}(\theta) \\ a_{msVH}(\theta) & a_{mbVH}(\theta) & a_{hcVH}(\theta) \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} ms \\ mb \\ hc \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} ms_0 \\ mb_0 \\ hc_0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \sigma_{cVV}^0 \\ \sigma_{cHH}^0 \\ \sigma_{cVH}^0 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

donde \widetilde{M} es el vector matriz de 3x1 del coeficiente de retrodispersión estimado de cada esquema de polarización. $\mathcal{A}(\theta)$ es la variación angular de las pendientes en la representación lineal de σ^0 a las variaciones de humedad de suelo (ms), humedad de ramas (mb) y ancho de copa (hc), x es el vector matriz (3x1) de los valores de los parámetros de entrada y x_0 el vector matriz (3x1) de los valores centrales de los mismos parámetros. Finalmente, $\mathcal{L}^0(\theta)$ es el vector matriz resultante de la suma de los vectores de 3x1 de los coeficientes de los polinomios de cuarto grado asociados a la variación angular de los valores de entrada. En la expresión 6.3, el subíndice numérico indica la posición de cada coeficiente de los polinomios de cuarto grado, empezando en cero para el término independiente y terminando con cuatro para el coeficiente de cuarto grado.

$$\mathcal{L}^0(\theta) = \begin{bmatrix} \rho_{0VV} \\ \rho_{0HH} \\ \rho_{0VH} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_{1VV} \\ \rho_{1HH} \\ \rho_{1VH} \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} \rho_{2VV} \\ \rho_{2HH} \\ \rho_{2VH} \end{bmatrix} \theta^2 + \begin{bmatrix} \rho_{3VV} \\ \rho_{3HH} \\ \rho_{3VH} \end{bmatrix} \theta^3 + \begin{bmatrix} \rho_{4VV} \\ \rho_{4HH} \\ \rho_{4VH} \end{bmatrix} \theta^4 \quad (6.3)$$

De manera homónima, la expresión 6.4 es la suma de las matrices de coeficientes asociados a la variación de los parámetros de entrada del modelo simplificado. En este caso la posición del coeficiente de los polinomios de cuarto grado se indica con el número entre paréntesis, empezando en cero para el término independiente y terminando con cuatro para el coeficiente de cuarto grado. Multiplicados por la potencia correspondiente del ángulo de incidencia.

$$\begin{aligned}
\mathcal{A}(\theta) = & \begin{bmatrix} a_{msVV(0)} & a_{mbVV(0)} & a_{hcVV(0)} \\ a_{msHH(0)} & a_{mbHH(0)} & a_{hcHH(0)} \\ a_{msVH(0)} & a_{mbVH(0)} & a_{hcVH(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{msVV(1)} & a_{mbVV(1)} & a_{hcVV(1)} \\ a_{msHH(1)} & a_{mbHH(1)} & a_{hcHH(1)} \\ a_{msVH(1)} & a_{mbVH(1)} & a_{hcVH(1)} \end{bmatrix} \theta + \\
& \begin{bmatrix} a_{msVV(2)} & a_{mbVV(2)} & a_{hcVV(2)} \\ a_{msHH(2)} & a_{mbHH(2)} & a_{hcHH(2)} \\ a_{msVH(2)} & a_{mbVH(2)} & a_{hcVH(2)} \end{bmatrix} \theta^2 + \begin{bmatrix} a_{msVV(3)} & a_{mbVV(3)} & a_{hcVV(3)} \\ a_{msHH(3)} & a_{mbHH(3)} & a_{hcHH(3)} \\ a_{msVH(3)} & a_{mbVH(3)} & a_{hcVH(3)} \end{bmatrix} \theta^3 + \\
& \begin{bmatrix} a_{msVV(4)} & a_{mbVV(4)} & a_{hcVV(4)} \\ a_{msHH(4)} & a_{mbHH(4)} & a_{hcHH(4)} \\ a_{msVH(4)} & a_{mbVH(4)} & a_{hcVH(4)} \end{bmatrix} \theta^4 \tag{6.4}
\end{aligned}$$

Las expresiones 6.7 y 6.8 muestran los coeficientes de las matrices del modelo simplificado para el sitio Modesto Ángel:

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}^0(\theta) = & \begin{bmatrix} 6.1948 \\ -6.6021 \\ -60.665 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -3.3374 \\ 0.46125 \\ 5.4536 \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} 0.14938 \\ -0.027767 \\ -0.2644 \end{bmatrix} \theta^2 + \begin{bmatrix} -0.0027347 \\ 0.00032727 \\ 0.0050792 \end{bmatrix} \theta^3 + \\
& (1 \times 10^{-4}) \begin{bmatrix} 0.1821 \\ -0.00242 \\ -0.34788 \end{bmatrix} \theta^4 \tag{6.5}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathcal{A}(\theta) = & \begin{bmatrix} -0.1183 & -0.014786 & 39.48 \\ 0.0001402 & -0.048094 & -12.61 \\ 0.022012 & 0.092674 & 1.2338 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.014694 & 0.002601 & -4.7915 \\ 0.0011876 & 0.008994 & 1.5547 \\ -0.002977 & -0.1098 & -0.1404 \end{bmatrix} \theta + \\
& (1 \times 10^{-4}) \begin{bmatrix} -5.9243 & 0.6427 & 1940.7 \\ 0.57102 & -4.5434 & -974.31 \\ 1.4722 & 5.0532 & 50.463 \end{bmatrix} \theta^2 + \\
& (1 \times 10^{-6}) \begin{bmatrix} 9.8415 & -2.7939 & -3291.2 \\ -3.5472 & 10.934 & 2315.7 \\ -3.0606 & -9.8592 & -71.829 \end{bmatrix} \theta^3 + (1 \times 10^{-8}) \begin{bmatrix} -5.84 & 2.4178 & 2020.2 \\ 3.8933 & -8.8652 & -1792.9 \\ 2.2711 & 7.2534 & 33.67 \end{bmatrix} \theta^4 \tag{6.6}
\end{aligned}$$

Y las expresiones 6.7 y 6.8 muestran los coeficientes de las matrices del modelo simplificado para el sitio El Refugio:

$$\mathcal{L}^0(\theta) = \begin{bmatrix} -25.022 \\ 16.141 \\ 127.98 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.10511 \\ -3.1247 \\ -18.683 \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} 0.0323 \\ 0.14317 \\ -0.82297 \end{bmatrix} \theta^2 + (1x10^{-4}) \begin{bmatrix} -9.4869 \\ -30.352 \\ -159.19 \end{bmatrix} \theta^3 + (1x10^{-6}) \begin{bmatrix} 8.363 \\ 23.394 \\ 113.45 \end{bmatrix} \theta^4 \quad (6.7)$$

$$\mathcal{A}(\theta) = \begin{bmatrix} 0.044598 & -1.1085 & 0.98292 \\ 0.068025 & -0.50151 & -9.4051 \\ -0.21606 & 4.8914 & 27.959 \end{bmatrix} + (1x10^{-2}) \begin{bmatrix} 0.27286 & 13.494 & -38.453 \\ 0.45487 & 6.8162 & 57.92 \\ 3.4547 & -62.551 & -492.97 \end{bmatrix} \theta + (1x10^{-4}) \begin{bmatrix} 1.3562 & -54.665 & 24.715 \\ 2.3376 & -27.65 & -397.7 \\ -17.079 & 284.34 & 2484 \end{bmatrix} \theta^2 + (1x10^{-6}) \begin{bmatrix} -3.5905 & 94.495 & 309.92 \\ -5.6453 & 48.915 & 936.9 \\ 34.108 & -534.33 & -4952 \end{bmatrix} \theta^3 + (1x10^{-8}) \begin{bmatrix} -3.244 & -59.812 & -431.51 \\ 4.5422 & -32.312 & -629.8 \\ -24.074 & 359.97 & 3465.2 \end{bmatrix} \theta^4 \quad (6.8)$$

En el proceso inverso para obtener los valores de los parámetros de entrada, aplicando las propiedades de operaciones con matrices. La expresión resulta de la siguiente manera:

$$x = \mathcal{B}(\theta) [\bar{\mathcal{M}} - \mathcal{L}^0(\theta)] + x_0 \quad (6.9)$$

donde $\mathcal{B}(\theta)$ es la la matriz inversa de $\mathcal{A}(\theta)$. De esta manera, las ecuaciones serán aplicadas a las imágenes de radar para obtener los valores de humedad de suelo, humedad de ramas y ancho de copa. Si se desea estimar sólo uno de los parámetros, Lin y Sarabandi [28] propusieron el uso de un vector binario ω (de 1x3) que habilita o anula la estimación de cualquiera de los parámetros utilizando las polarizaciones que presentan sensibilidad mayor. La expresión resulta de la siguiente manera:

$$x = \mathcal{B}(\theta) [\omega \cdot (\bar{\mathcal{M}} - \mathcal{L}^0(\theta))] + x_0 \quad (6.10)$$

Para evaluar la precisión del modelo simplificado se realizaron los diagramas de dispersión con los valores estimados por el modelo MIMICS y los estimados con el modelo simplificado (figura 6.5). A pesar de utilizar la misma metodología para cada uno de los sitios, los resultados del sitio El Refugio son significativamente distintos a los del sitio Modesto Ángel, en particular para los esquemas HH y VH en el que son más dispersos. Además de la no linealidad de la dinámica de la naturaleza, podría asociarse a las condiciones particulares de cada sitio, recordando que el sitio Modesto Ángel representa un área con mayor densidad de vegetación y con menor impacto ambiental, por lo que la cobertura vegetal es más homogénea.

De tabla 6.4, en la que se muestran los coeficientes de correlación y de covarianza calculados con los valores de los diagramas de dispersión de la figura 6.5, se observa que los coeficientes de correlación (R_{VV} , R_{HH} , R_{VH}) del sitio Modesto Ángel son significativamente mayores a los de El Refugio correspondiendo al efecto visual de los esquemas de dispersión. Y como se ha inferido, el esquema HH es el que arroja los valores más cercanos al valor máximo del coeficiente debido a su sensibilidad a los parámetros de entrada, mientras el esquema de polarización cruzada VH es el de valor menor, en especial para el sitio El Refugio debido a las condiciones de heterogeneidad ya mencionadas del sitio. En cuanto a los valores de covarianza (P_{VV} , P_{HH} , P_{VH}), sólo el valor en el esquema HH es mayor en el sitio Modesto Ángel que en el Refugio. Como se observa en los diagramas de dispersión de El Refugio, para los esquemas HH y VH existe un sesgo estadístico producido por la naturaleza de los parámetros de entrada, el sesgo es notablemente mayor en el esquema cruzado debido a la necesidad de calibración de las polarizaciones de la señal de radar.

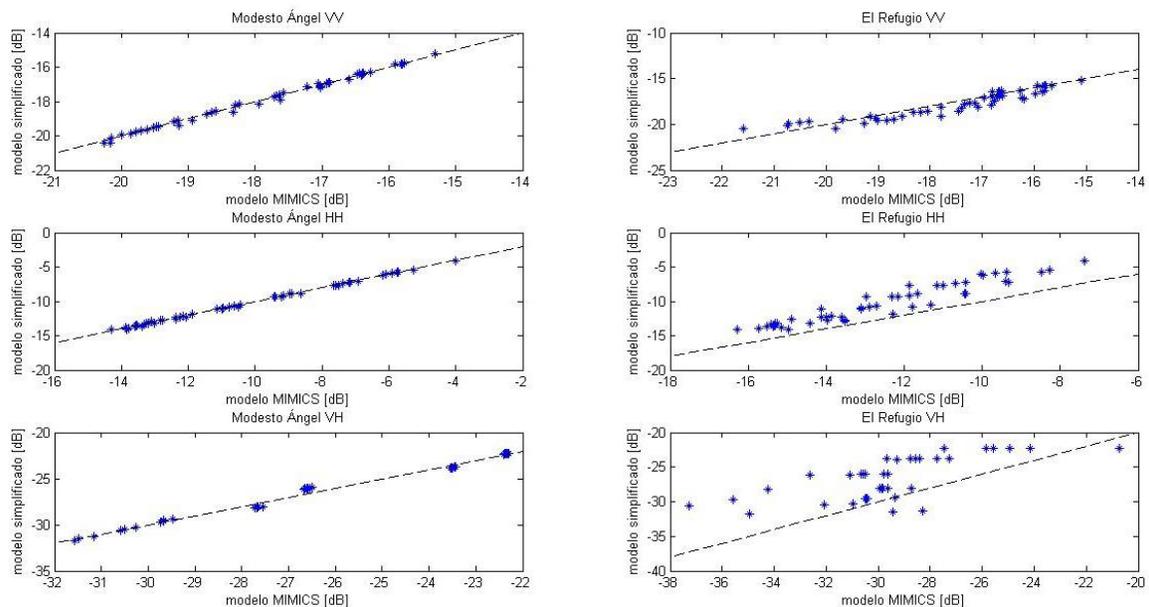


Figura 6.5 Diagramas de dispersión construidos con el modelo MIMICS y el modelo simplificado por esquema de polarización. Modesto Ángel (izquierda), El Refugio (derecha).

Tabla 6.4 Coeficientes de correlación y covarianza del modelo simplificado

Coeficientes	Modesto Ángel	El Refugio
R_{vv}	0.9981	0.9423
R_{hh}	0.9992	0.9639
R_{vh}	0.9958	0.6630
P_{vv}	1.4775	1.4885
P_{hh}	2.8673	2.4935
P_{vh}	3.2377	2.3875

En el proceso de inversión para la obtención de los parámetros utilizando los valores estimados por MIMICS del coeficiente de retrodispersión, se encontró que la polarización cruzada VH es vulnerable a la variación del orden de centésimas del coeficiente de retrodispersión, arrojando valores erróneos de los parámetros estimados por el modelo simplificado. Actualmente, ningún modelo de dispersión de superficie calcula la contribución de suelo en polarización cruzada debido a la complejidad de cómputo para la resolver la ecuación del campo de disperso de forma cerrada. Es por ello que los valores del coeficiente de retrodispersión empleando MIMICS oscilan entre -24 y -32 dB, y los valores de una imagen radar para este mismo esquema varían entre -14 y -18 dB. Así, al sustituir los valores de la imagen de radar en el conjunto de ecuaciones, los valores de la polarización cruzada se ven fuertemente afectados y dan estimaciones fuera de un rango físico aceptable. Lo que sugiere la necesidad de un proceso de optimización del modelo simplificado y el desarrollo de modelos de dispersión de la onda en los que el esquema VH sea calibrado. Sin embargo, la implementación de un proceso de optimización queda fuera de los objetivos de este trabajo de tesis.

De esta manera, se optó por utilizar la metodología propuesta por Lin y Sarabandi [28] y emplear únicamente un conjunto de ecuaciones lineales para la polarización más sensible a partir de los valores estimados por el modelo MIMICS y continuar con la estimación de humedad de suelo. Es importante recordar que las entradas del modelo MIMICS fueron los valores medidos en campo del suelo y de la vegetación de la RBC y, además que el modelo fue desarrollado particularmente para estimar parámetros biofísicos de zonas boscosas.

Aplicando las ecuaciones de humedad de suelo descritas anteriormente, se obtienen las estimaciones presentadas en la figura 6.7 del sitio Boscoso Norte (ángulo de incidencia de 35°, fecha de 26/09/2010) con valores entre 50.6 y 68% de humedad de suelo. Para mejorar la visualización se aplicó la misma paleta de color utilizada en las imágenes del coeficiente de retrodispersión y las imágenes de Freeman-Durden del capítulo cuatro (negro, azul, blanco y rojo).

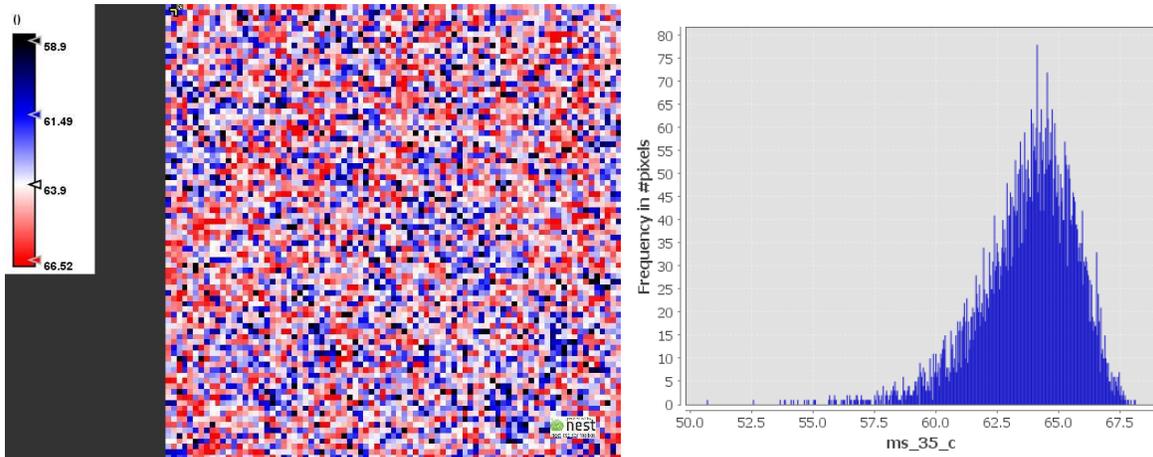


Figura 6.7 Humedad de suelo estimada con el modelo MIMICS simplificado, sitio Boscoso Norte. Fecha de 26/09/2010 y ángulo de incidencia 35°.

6.2 VALORES ESTIMADOS DE HUMEDAD DEL SUELO

Utilizando la misma metodología descrita en la sección 6.1, se obtuvo el conjunto de ecuaciones del modelo simplificado (MIMICS simplificado) para cada ángulo de incidencia promedio de las imágenes de radar. Mismas que fueron aplicadas sólo a los sitios Boscoso Norte y Boscoso Sur porque representan la mayor ocupación de suelo y a las zonas con mayor homogeneidad en vegetación y de características similares al sitio Modesto Ángel con el que fue elaborado el modelo simplificado. El modelo simplificado permite la estimación de la humedad de suelo para cada imagen en particular, tomando en cuenta su ángulo de incidencia de observación. Únicamente se utilizó el esquema de polarización HH debido a su mayor sensibilidad a cambios de humedad de suelo. Del capítulo 5, se retomaron los valores de la componente de superficie de Freeman-Durden de tres componentes para comparar la contribución de superficie con la humedad de suelo estimada.

En el anexo 3, se puede encontrar las series de imágenes para cada uno de los sitios, de las imágenes con los valores estimados de humedad de suelo en polarización HH, a la

izquierda y del lado derecho las imágenes de la componente de superficie de Freeman-Durden. Visualmente, las áreas resaltadas en color rojo intenso corresponden a zonas con mayor humedad de suelo mientras en la otra imagen la contribución de superficie es menor con tonalidades de azul oscuro.

6.2.2 SITIO ZONA SUR

Con los valores de humedad de suelo de cada imagen, se calculó el valor promedio y se graficó para analizar su variación temporal. Al igual que en el capítulo 4, las trece imágenes se dividieron en 2 conjuntos con ángulo de incidencia igual. De la parte superior de la figura 6.8 podemos observar que la variación de humedad de suelo es menor al 1% en las imágenes con ángulo de incidencia de 23.1°. Mientras que, en la parte inferior de la misma figura la variación es aún menor, alrededor de 0.1% de variación para las imágenes con ángulo 37.2, de tal manera que la humedad de suelo tiene mayor sensibilidad a ángulos de incidencia menores. Las imágenes para el sitio Boscoso Sur presentan mayor homogeneidad del ángulo de incidencia permitiendo observar mucho mejor la variación de humedad de suelo asociada al cambio estacional, respecto al sitio Boscoso Norte. Aun cuando existe mayor nivel de impacto ambiental en la zona sur respecto a la zona norte, los sitios de cada zona fueron seleccionados con el mismo criterio para minimizar ésta diferencia.

Para el ángulo de incidencia de 23.1° (figura 6.8 y 6.9), del 26 de abril al 7 de julio de 2010 el radar no detecta variaciones en la humedad de suelo, en septiembre incrementa poco más de 0.5%, en noviembre disminuye cerca del 0.2% hasta llegar al valor de diciembre que prácticamente no presenta variaciones hasta febrero y para el mes de abril de 2011, disminuye al mismo valor que el del año anterior. De la descripción de la zona en el capítulo 3, las precipitaciones mínimas son al final del invierno y principios de verano correspondiendo al comportamiento del contenido de humedad de suelo, siendo menor en la época de abril a julio en la que la sequía se presenta y después ocurre un considerable aumento de humedad de suelo debido al inicio de la época de lluvias, en agosto y septiembre. Y es hasta después de febrero, a finales de invierno, cuando la humedad vuelve a disminuir. Mientras que, la contribución de superficie es mayor en la componente de superficie de Freeman-Durden durante el período de sequía debido a menor humedad de suelo y, en agosto y septiembre con el inicio de la temporada de lluvias la humedad de suelo incrementa.

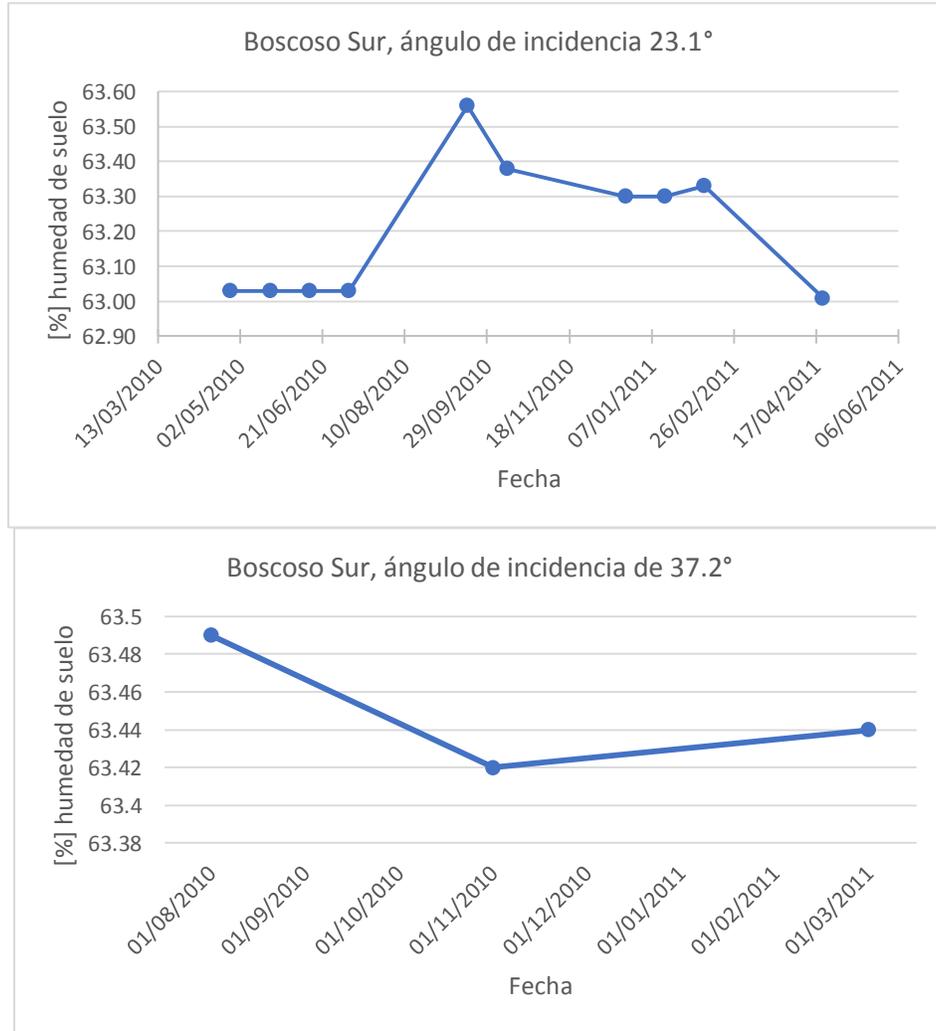


Figura 6.8. Estimaciones de humedad de suelo superficial del sitio Boscoso Sur

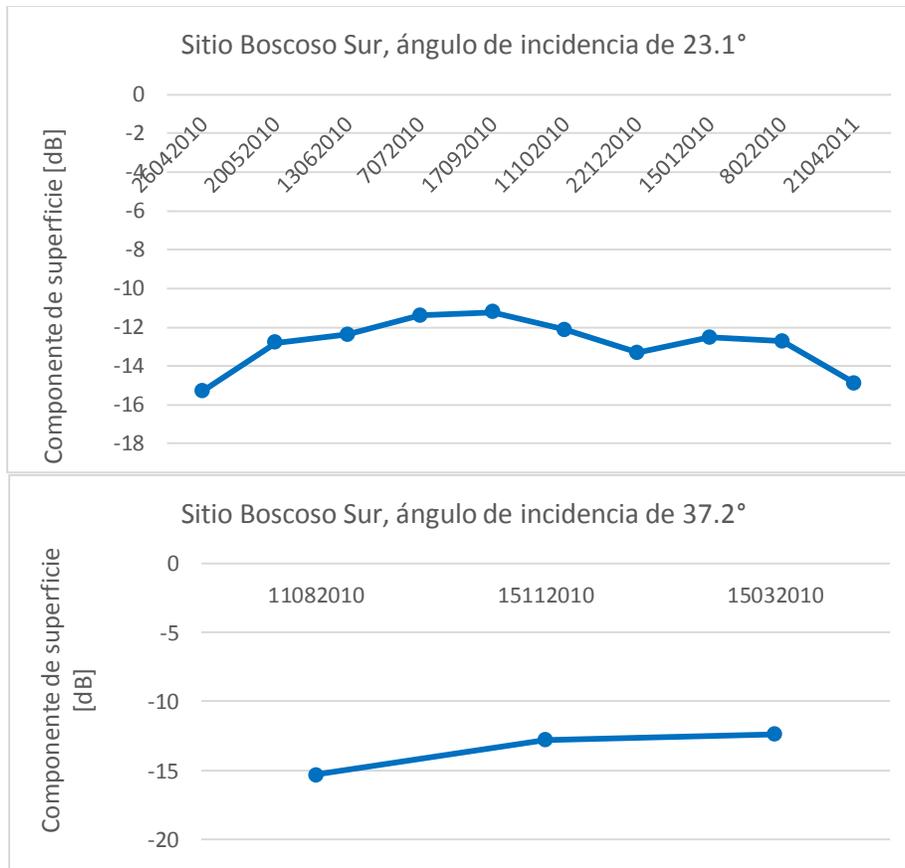


Figura 6.9. Componente de superficie de la descomposición de Freeman-Durden de tres componentes, sitio Boscoso Sur

6.2.2 SITIO ZONA NORTE

Con los valores de humedad de suelo de cada imagen, se calculó y graficó su valor promedio para analizar la variación temporal. Al igual que en el capítulo 4, las diez imágenes se dividieron en 2 conjuntos con ángulo de incidencia similar o cercano. La parte superior de la figura 6.10 muestra los valores de humedad de suelo estimados con ángulos de incidencia menores a 33°, y en la parte inferior los estimados con ángulos de incidencia mayores de 35 y 40°. La humedad superficial también presenta variaciones menores al 1%, similar a la zona sur el incremento en humedad de suelo con ángulos de incidencia menores a 30° ocurre en el mes de julio con el inicio de la temporada de lluvias; sin embargo disminuye meses antes, en diciembre y mantenerse prácticamente igual en marzo del siguiente año. Permitiendo asociarlo a la descripción del clima de la región con lluvias locales, en este caso para la zona sur y no para la norte en época invernal. Para ángulos mayores a 35° resulta difícil observar un patrón similar asociado al período de lluvias como ocurre en la zona sur. Cabe destacar que los valores en el mes de

septiembre, ocurre un incremento de humedad significativo entre los días 26 y 28 posiblemente asociado al paso de la tormenta tropical Mathew.

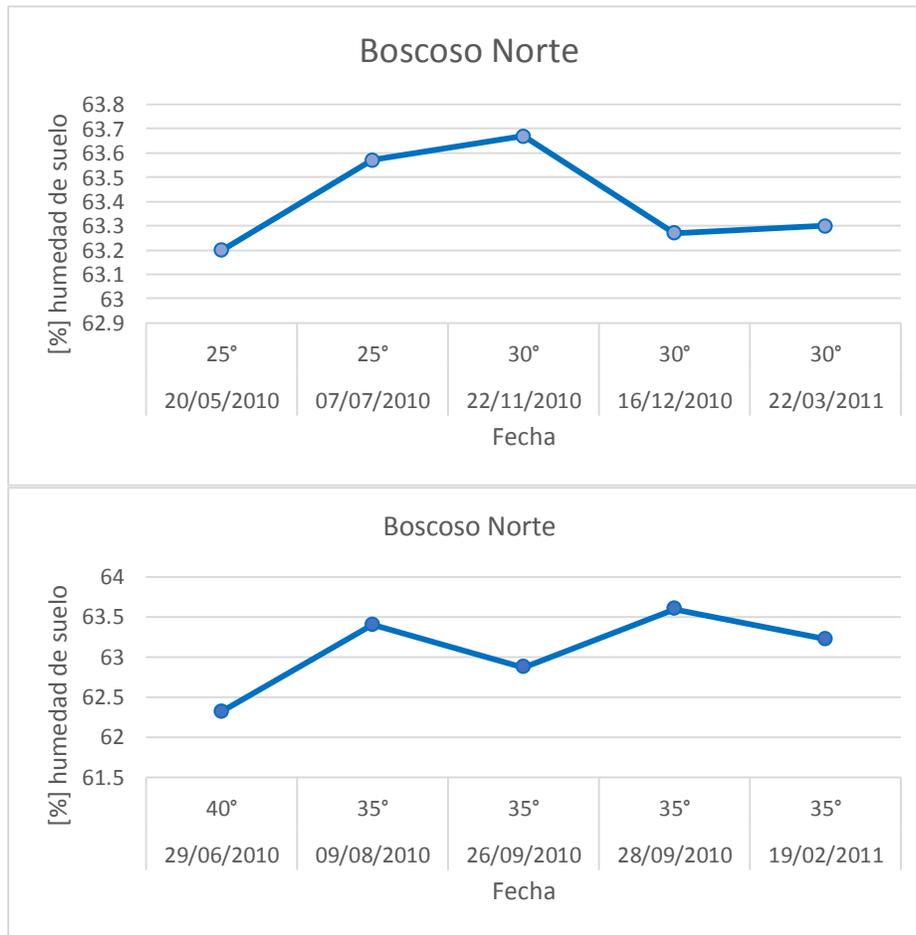


Figura 6.10. Estimaciones de humedad de suelo superficial para el sitio Boscoso Norte, efecto del ángulo de incidencia

En figura 6.11 de la componente de superficie de Freeman-Durden, en contraste con la zona sur no es evidente la congruencia con las curvas de humedad de suelo, para ángulos menores a 30°, aun cuando decrece la contribución de superficie con el inicio de la temporada de lluvias, ésta no incrementa con la llegada del invierno como sucede con la humedad de suelo. Finalmente, para ángulos mayores a 35° la contribución de superficie incrementa significativamente durante los meses de agosto y septiembre, contrario a la disminución esperada por el incremento de humedad de suelo asociada a eventos de lluvia e incluso del paso de la tormenta tropical Mathew. A diferencia de la zona sur, aquí no es posible apreciar períodos de sequía o de lluvia, debido a la poca sensibilidad del coeficiente de retrodispersión a capturar variaciones de la humedad de suelo bajo condiciones de una fuerte cobertura vegetal.

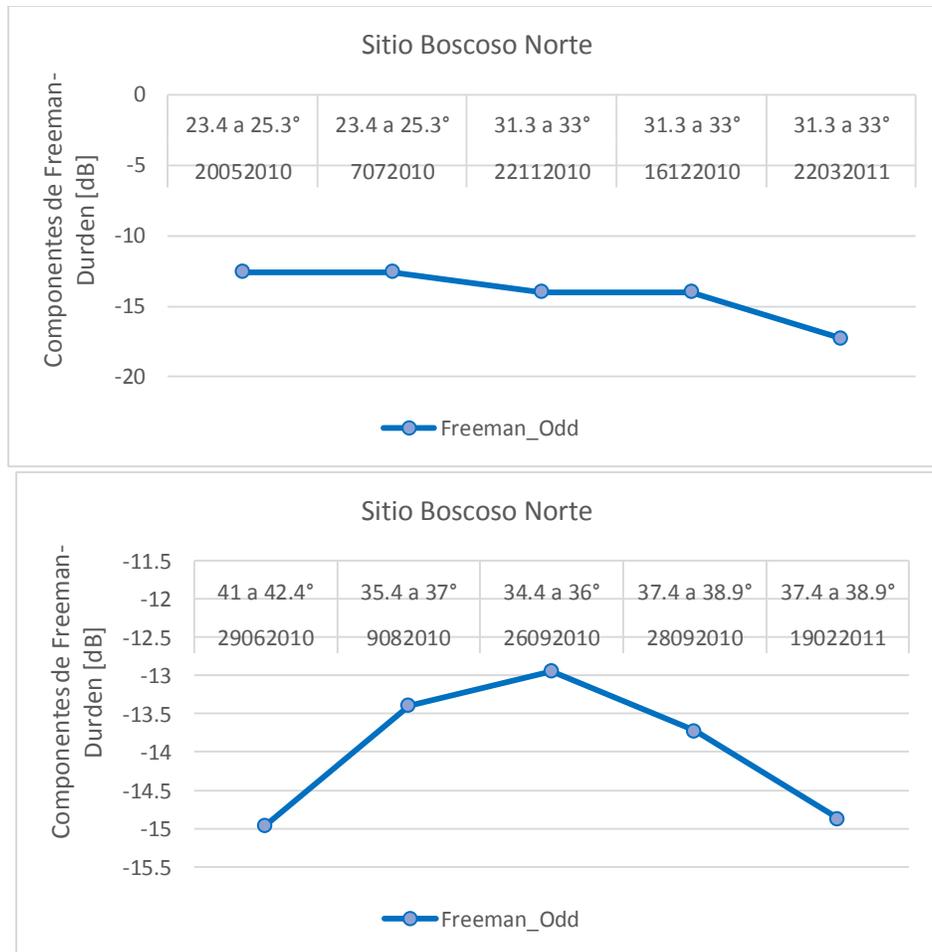


Figura 6.11 Componente de superficie de la descomposición de Freeman-Durden de tres componentes, sitio Boscoso Norte

En general, la señal retrodispersada a ángulos de incidencia bajos muestra valores de humedad de suelo con una menor dispersión, debido principalmente a su alta sensibilidad y mayor certidumbre en la estimación que a ángulos de incidencia elevados. Y la tendencia de las variaciones de la humedad de suelo está en consistencia con la curva de tendencia de la contribución de superficie de la descomposición de Freeman-Durden.

En conclusión, para la observación de la contribución de superficie y, en consecuencia, la estimación de la humedad de suelo, es deseable el empleo de imágenes con un ángulo de incidencia bajo. Además, cuando se tiene una configuración radar similar en las observaciones; es decir, mismo ángulo de incidencia y área de cobertura, es posible capturar las variaciones en la humedad de suelo sobre una zona homogénea a pesar de una cobertura vegetal. Gracias a la implementación de una metodología que combina el modelado de la dispersión de la onda y el procesamiento de la imagen satelital.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

7.1 CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo de tesis consistió en desarrollar una metodología para la estimación de humedad de suelo en un bosque tropical, mediante el procesamiento de imágenes de radar, RADARSAT-2. En el capítulo 4, se describió en detalle la metodología del preprocesamiento de las imágenes de radar para la obtención del coeficiente de retrodispersión a partir de datos polarimétricos y, la aplicación del modelo de retrodispersión de la onda simplificado para estimar la humedad de suelo en el capítulo 6. Este modelo fue desarrollado empleando la metodología de Lin y Sarabandi con el modelo MIMICS y datos medidos en campo de las características de vegetación y de suelo del bosque tropical. El modelo MIMICS fue diseñado para la estimación de parámetros biofísicos en zonas boscosas como humedad de suelo, humedad de hojas, humedad de ramas, cantidad de biomasa, entre otros utilizando datos polarimétricos de las imágenes radar.

También, se utilizó la técnica de descomposición de Freeman-Durden para separar a la imagen de radar en tres contribuciones principales a partir de los mecanismos de dispersión de la onda, producto del contacto con la superficie del suelo, la capa de vegetación y del doble contacto de la señal con los dos tipos de superficie mencionados. Los resultados e imágenes obtenidas se expusieron en el primer foro de investigación “Los retos de la Geomática en México” con la presentación titulada “La potencialidad de la descomposición de Freeman-Durden para la interpretación de las imágenes RADARSAT-2 en un bosque tropical”, demostrando la utilidad de esta técnica como herramienta de observación de variaciones en las contribuciones de superficies y por ende, inferir variaciones en el contenido de humedad de suelo como consecuencia del cambio estacional, factores socioeconómicos e incluso de fenómenos físicos como lo fue la tormenta tropical Mathew en el 2010.

El coeficiente de retrodispersión varía de -8 a -12 dB en VV y HH y, de -15 a -17.5 en VH en función de la estación del año y del ángulo de incidencia del radar. Las variaciones en el coeficiente de retrodispersión confirma la heterogeneidad de la zona. La descomposición de Freeman-Durden, logra un contraste mayor entre las componentes de dispersión respecto al coeficiente de retrodispersión, aportando información valiosa del suelo y su interacción con la capa de vegetación. La capa de vegetación como componente dominante presenta variaciones apenas perceptibles debido al tipo de vegetación del bosque tropical que nunca pierde sus hojas completamente y del que sólo disminuye su densidad de hojas. Con ayuda de una composición RGB de las componentes de Freeman-Durden se encontró una herramienta aplicable a la

identificación y monitoreo de la formación de cuerpos de agua y de zonas afectadas por la deforestación de bosques tropicales. A pesar de la potencialidad de las imágenes por componentes de Freeman-Durden, aún no se han desarrollado modelos para la estimación de humedad de suelo a partir de esta técnica de descomposición.

Para la estimación de la humedad de suelo, se empleó un modelo simplificado a partir de las simulaciones del modelo MIMICS. El modelo simplificado es una representación linearizada del comportamiento del coeficiente de retrodispersión, generada por el estudio de sensibilidad de los principales parámetros biofísicos del bosque tropical y el efecto del ángulo de incidencia de la onda electromagnética sobre la superficie. Se encontró que el coeficiente de retrodispersión es significativamente sensible a las variaciones de humedad de suelo, humedad de ramas y al ancho de copa de los árboles. El coeficiente de retrodispersión incrementa con el ángulo de incidencia pero disminuye junto con el porcentaje de humedad de suelo.

De los esquemas de polarización, el esquema HH es el más sensible a las variaciones en la superficie de suelo, mientras el esquema VV a la contribución de vegetación. En cuanto al esquema VH, aunque ningún modelo de dispersión de superficie calcula la contribución de suelo en polarización cruzada, hasta ahora, éste es de gran utilidad para la identificación de cuerpos de agua y vegetación inundable. Debido a la complejidad para resolver la ecuación de polarización cruzada de manera cerrada o asintótica, el proceso de inverso para la obtención de valores de los parámetros biofísicos utilizando el modelo simplificado arrojó valores que fueron de un rango físicamente razonable. Por lo cual, se sugiere la implementación de un proceso de optimización del modelo simplificado para trabajos futuros, además del desarrollo de modelos de dispersión de la onda en los que el esquema VH sea calibrado.

Los valores estimados de humedad de suelo para los esquemas copolarizados (HH y VV) estuvieron dentro del rango de valores medidos en campo de humedad de suelo, del 57 al 68%. A pesar de obtener variaciones de humedad de suelo en polarización HH menores al 1%, fue posible identificar patrones asociados al cambio estacional y las temporadas de lluvia. Además, se observó una consistencia entre los valores estimados de humedad de suelo y los de la componente de superficie de Freeman-Durden, en áreas con mayor humedad de suelo la contribución de superficie es menor y viceversa. Este fenómeno se observa mejor en la zona sur, gracias a la homogeneidad de la configuración radar de las imágenes. En general, la señal retrodispersada a ángulos de incidencia bajos muestra valores de humedad de suelo con una menor dispersión, debido principalmente a su alta sensibilidad y mayor certidumbre en la estimación que a ángulos de incidencia elevados.

En conclusión, gracias a la implementación de una metodología que combina el modelado de la dispersión de la onda y el procesamiento de imágenes es posible tener una estimación de la humedad de suelo, a pesar de una cobertura vegetal cuando se tiene una configuración radar similar en las observaciones. Asimismo, se observó que la banda C no es el mejor rango de frecuencias para estimar la humedad de suelo en una zona de

bosques. Se recomienda el empleo de la Banda L y de preferencia con ángulos cercanos a 20°.

7.2 PERSPECTIVAS

Los resultados de este trabajo permitieron apreciar la potencialidad de los datos polarimétricos de una imagen radar para estimar parámetros biofísicos en zonas tropicales en las que las imágenes ópticas tienen visibilidad limitada debido a las condiciones climáticas, cobertura vegetal y resolución espacial. Además de la metodología para estimar humedad de suelo superficial a partir del coeficiente de dispersión se presentó a la técnica de descomposición de Freeman-Durden como una herramienta de gran utilidad y de fácil interpretación visual para complementar el análisis de variación estacional de humedad de suelo, identificación de cuerpos de agua y caminos, áreas con tipos de vegetación distinta y/o afectadas por la deforestación de bosques tropicales.

De la misma manera, la construcción del modelo simplificado forma un primer acercamiento al desarrollo de una metodología de estimación de parámetros biofísicos en un bosque tropical con una importante capa de vegetación y cumple el objetivo en la observación de patrones asociados a condiciones de suelo y tipo de vegetación. La optimización del modelo simplificado significaría un incremento en la precisión y alcance en la sensibilidad de los parámetros biofísicos a la respuesta de la señal radar y, una nueva ventana de observación e interpretación de la respuesta combinada de las dos polarizaciones lineales utilizadas actualmente.

Desafortunadamente, no fue posible contar con suficientes datos medidos en campo fiables para la validación a detalle de los datos estimados, sumado a la diferencia en tiempo entre la fecha de adquisición de las imágenes de radar sobre la Reserva de la Biosfera de Calakmul y las campañas de trabajo en campo para la toma de muestras de vegetación y suelo. Se recomienda la implementación de una campaña de mediciones en donde se prevea la colección de datos de campo de forma simultánea a la adquisición de imágenes satelitales de radar.

Cabe destacar, que además del trabajo escrito presentado se logró una mención honorífica en el segundo certamen de fotografía “H2O: Efecto esperado 2012” con la fotografía titulada “Libélula de Calakmul” tomada durante la campaña de mediciones de campo del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

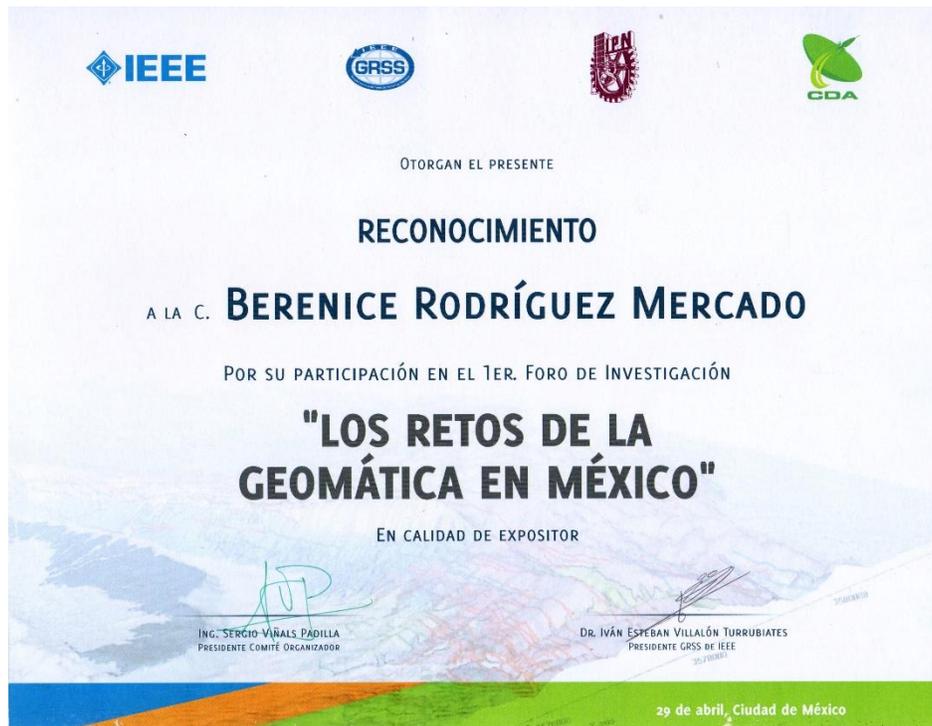
- [1] N. Arnell, Hydrology and Global Environmental Change, Malasia. Prentice Hall, 2002.
- [2] F. Ulaby et al., Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volumen 1, E. U. A., 1981.
- [3] E. Chuvieco y A. Huete, Fundamentals of Satellite Remote Sensing, E. U. A. CRC Press, 2010.
- [4] FAO, Aplicación de la tecnología de Percepción Remota a las pesquerías marinas: manual introductorio. «Depósito de documentos de la FAO,» 1990. [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/docrep/003/t0355s/t0355s01.htm>. [Último acceso: 26 de septiembre de 2013].
- [5] J. Lira, Introducción al tratamiento digital de imágenes, Cuadernos del Instituto de geofísica, UNAM. Número 9, 1995.
- [6] M. E. Buemi, Tratamiento de imágenes de radar de apertura sintética mediante filtros stack, Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires, 2002.
- [7] J. Lira. Sistema Radar de Imágenes, Monografías del Instituto de Geofísica, Volumen 5, Universidad Nacional Autónoma de México, 2002.
- [8] J. Álvarez-Mozoz y J. J. Crespo, Estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas por medio de imágenes de teledetección radar. Universidad Pública de Navarra, España. [En línea]. Disponible: <http://www.ingegraf.es/> [último acceso: 25 de octubre de 2013].
- [9] A. Monsiváis-Huerta et al., «Estimation of Sahelian Grassland Parameters Using a Coherent Scattering Model and Genetic Algorithm,» IEEE, 2009.
- [10] G. Vera Castillo, Estado de la diversidad biológica de los árboles y bosques en el Sur y Sureste de México. Documentos de Trabajo: Recursos Genéticos Forestales. FGR/61S. Servicio de Desarrollo de Recursos Forestales, Dirección de Recursos Forestales, FAO, Roma. (Inédito), 2003.
- [11] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Problemática Ambiental de la región, situación específica. Última fecha de Modificación: 16 de noviembre de 2010. Disponible: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/internacional/fronterasur/Paginas/Problematica.aspx>. [Último acceso: 2 de octubre de 2013].
- [12] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. Depósito de documentos de la FAO, 2005. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/documents/es/detail/194154>. [Último acceso: 2 de octubre de 2013].

- [13] J. S. Flores, «Reporte preliminar de la vegetación de la Reserva de la Biosfera de Calakmul, Campeche,» Yucatán, México, 1990.
- [14] Comisión Nacional Forestal, Inventario Nacional Forestal y de suelos (INFyS).
- [15] J. A. Richards, Remote Sensing with Imaging Radar, Springer, 2009.
- [16] D. M. Pozar. Microwave Engineering. Tercera edición. Editorial John Wiley and Sons. 2005
- [17] GLOBE Campaña de la humedad del suelo. [El línea]. Disponible: <http://web.hwr.arizona.edu/globe/sci/SM/SMC/AGIsmIntroESP.pdf> [Último acceso: 25 de octubre de 2013]
- [18] A. Monsiváis-Huertero, K. Sarabandi e I. Chênerie. Multipolarization Microwave Scattering Model for Sahelian Grassland, IEEE, 2010.
- [19] J.S Lee, M. R. Grunes and G. de Grandi, Polarimetric SAR Speckle Filtering and Its Implication for Classification. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, No. 5. 1999.
- [20] F. Ulaby, K. Sarabandi, K. McDonald, M. Whitt and M. Craig Dobson. Michigan Microwave Canopy Scattering Model (MIMICS), version 1. University of Michigan.
- [21] RADARSAT-2 System and Mode Description. Defence Research and Development Canada, Ottawa.
- [22] Instituto Nacional de Ecología, Programa de manejo de la Reserva de la Biosfera de Calakmul, 1999.
- [23] Villalobos-Zapata, G. J., y J. Mendoza Vega, La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (conabio), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur, México, 2010.
- [24] Contreras Ramos, A., García Aldrete, A. N. y E. González Soriano. Reconocimiento de la biodiversidad de la Reserva de la Biósfera Calakmul: Odonata, psocóptera y díptera acuáticos (Insecta). Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. Informe final SNIBCONABIO proyecto No. M003. México, D.F, 2000.
- [25] F. Ulaby, K. Sarabandi, K. McDonald, M. Whitt y M. Craig Dobson. Michigan Microwave Canopy Scattering Model. Version 1.0. Departamento de Ingeniería Electrica y Ciencias de la Computación de la Universidad de Michigan
- [26] I. H. Woodhouse, Introduction to Microwave Remote Sensing, E. U. A.: Taylor and Francis, 2006.

[27] T. Fernández, Correcciones Geométricas, Tema 12 del curso de Teledetección, 2008. [En línea]. Disponible en: http://coello.ujaen.es/Asignaturas/teledeteccion/tel/tel_tfc_archivos/Tema12.pdf. [Último acceso: 22 de Octubre de 2013].

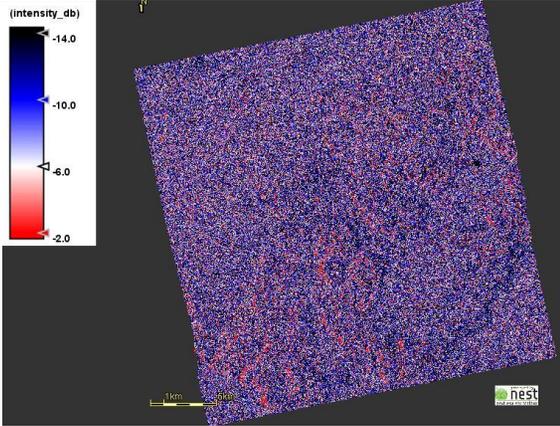
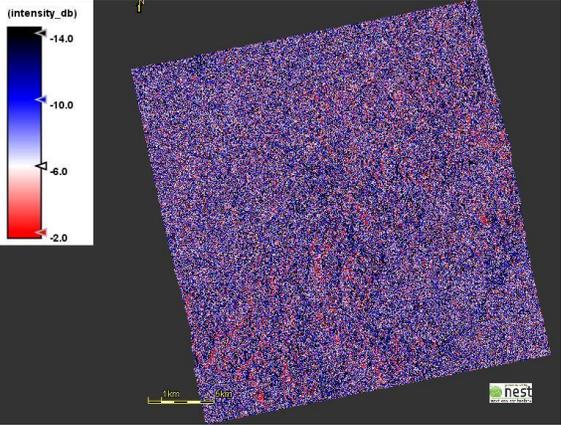
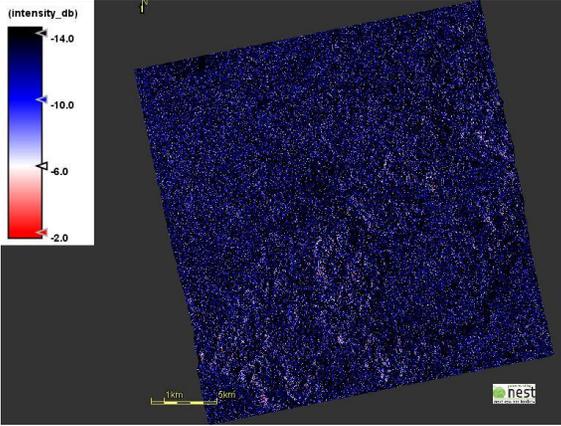
[28] Y. Lin y K. Sarabandi, Retrieval of Forest Parameters Using a Fractal-Based Coherent Scattering Model and a Genetic Algorithm. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, No. 3, mayo 1999.

TRABAJOS DERIVADOS DE LA TESIS

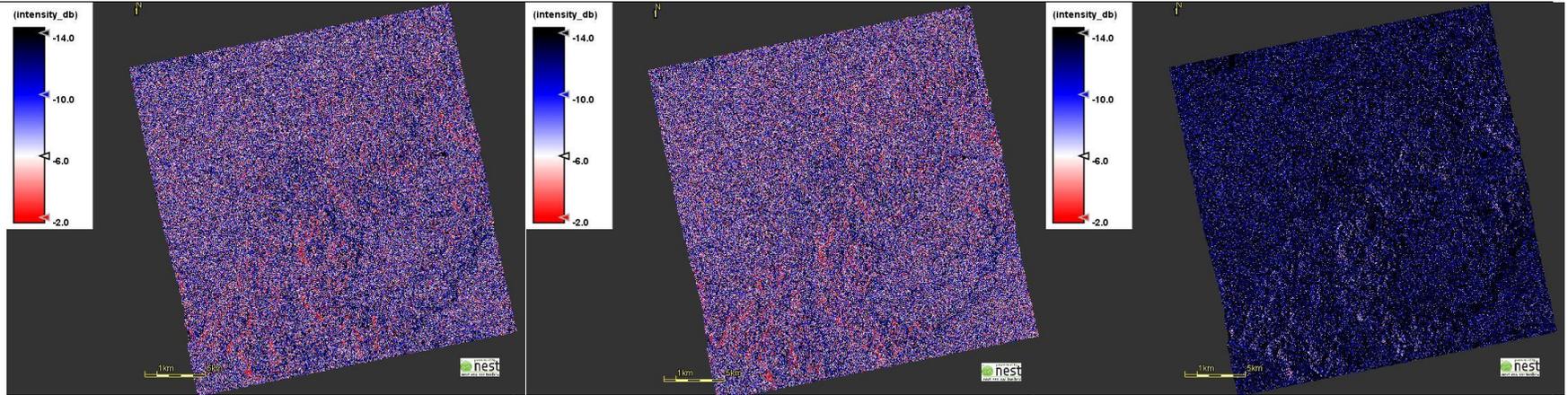


ANEXO 1. IMÁGENES RADARSAT-2 PREPROCESADAS

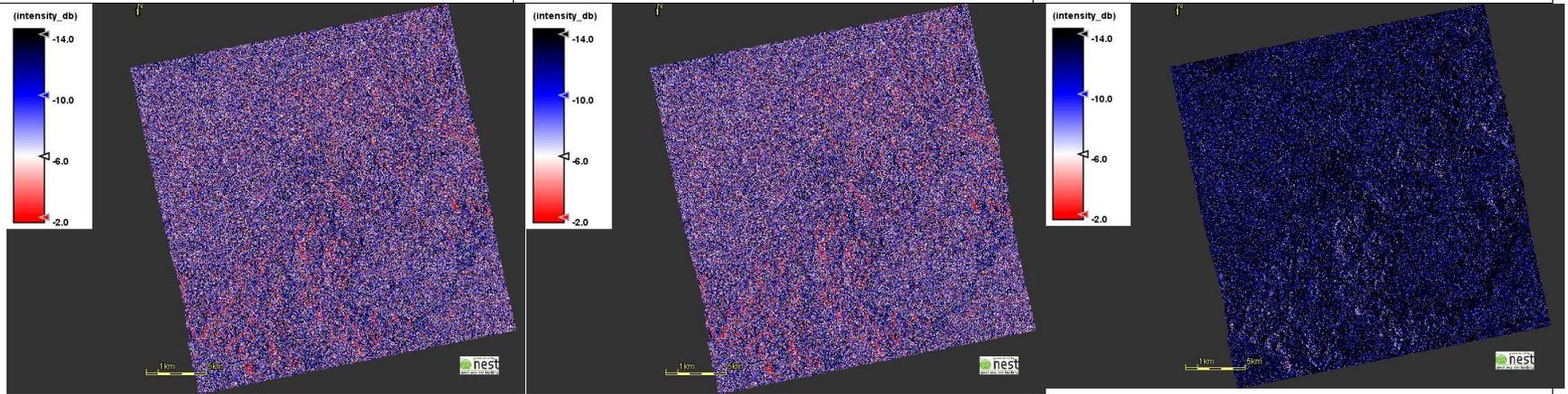
Tabla 1. Coeficiente de retrodispersión de imágenes RADARSAT-2 por esquema de polarización, Zona Sur

Fecha	VV	HH	VH
26/04/2010			

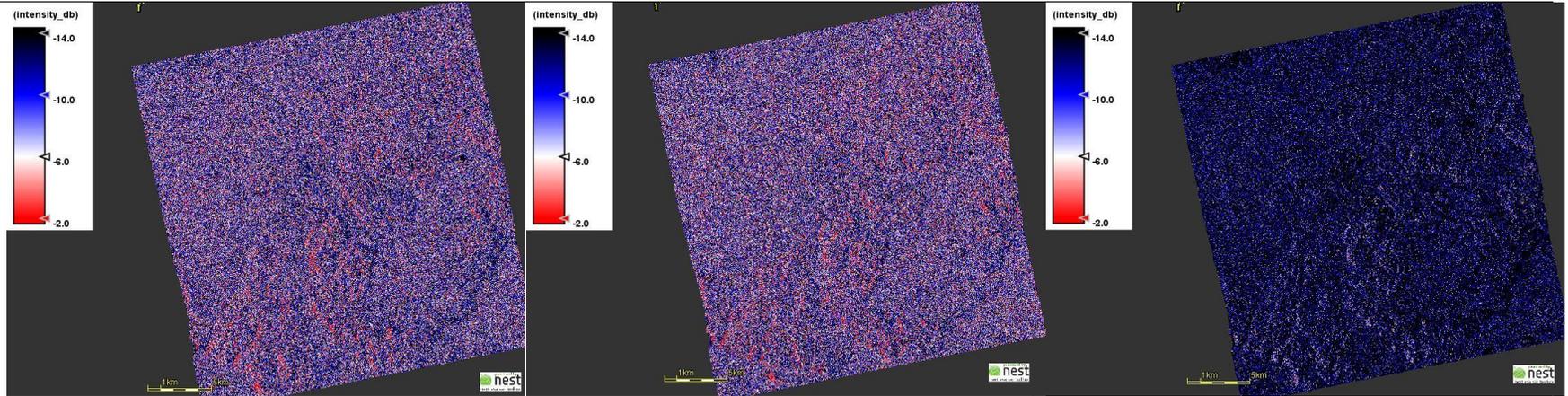
20/05/2010



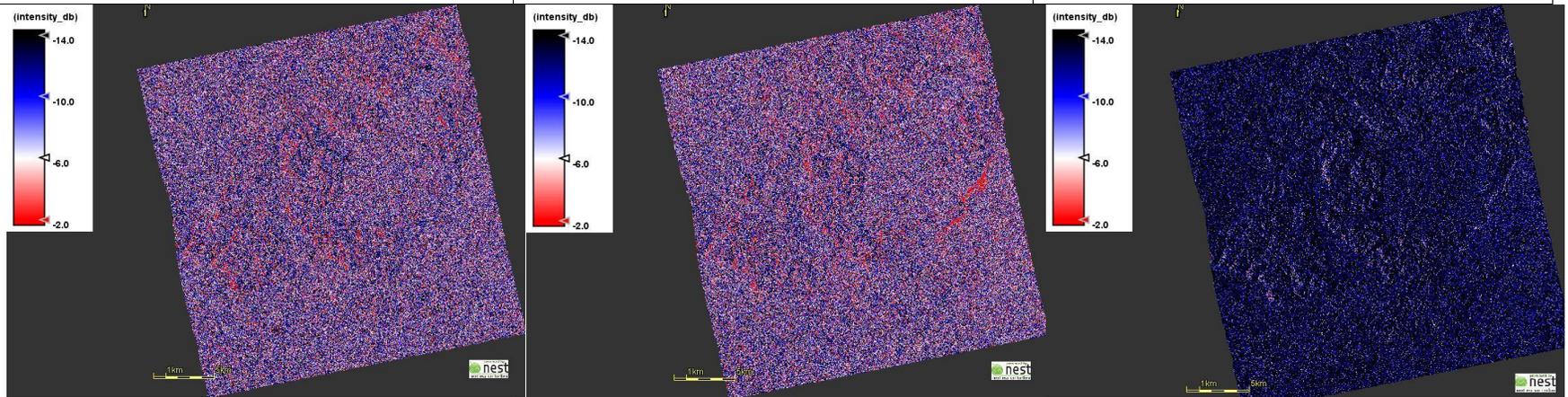
13/06/2010



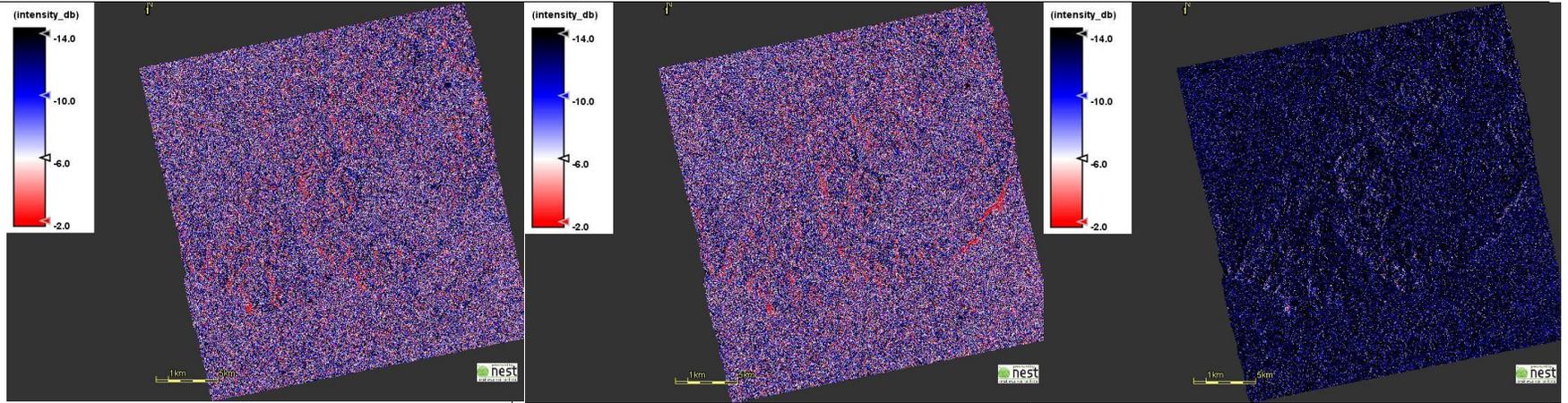
07/07/2010



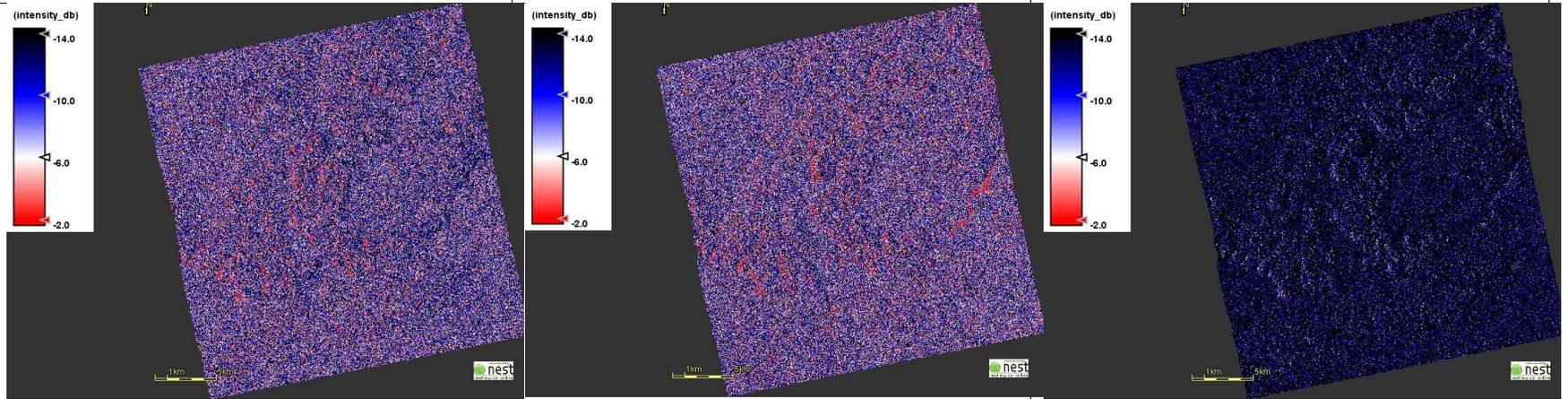
17/09/2010



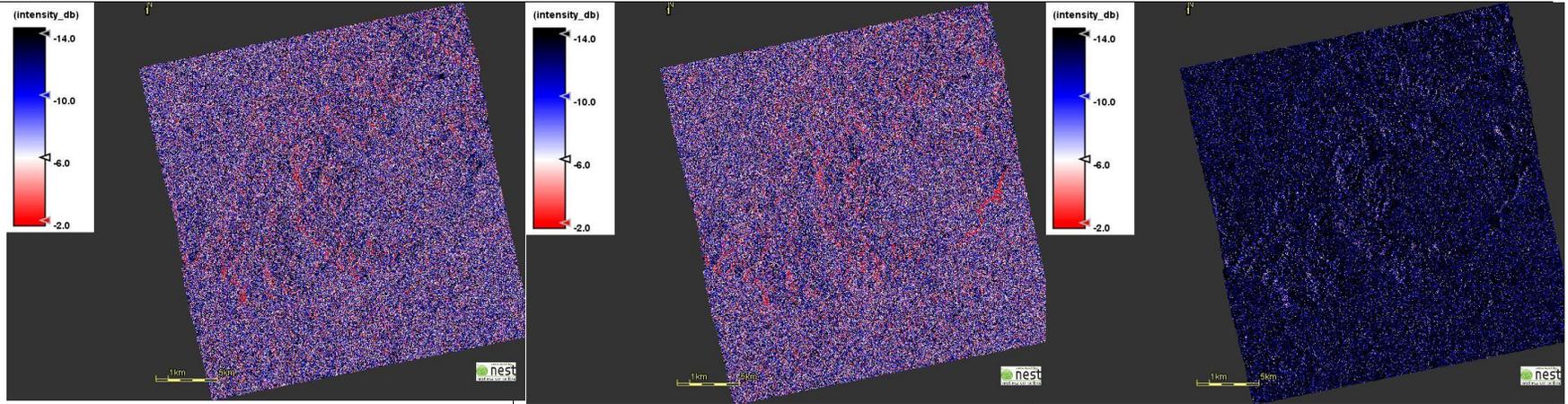
11/10/2010



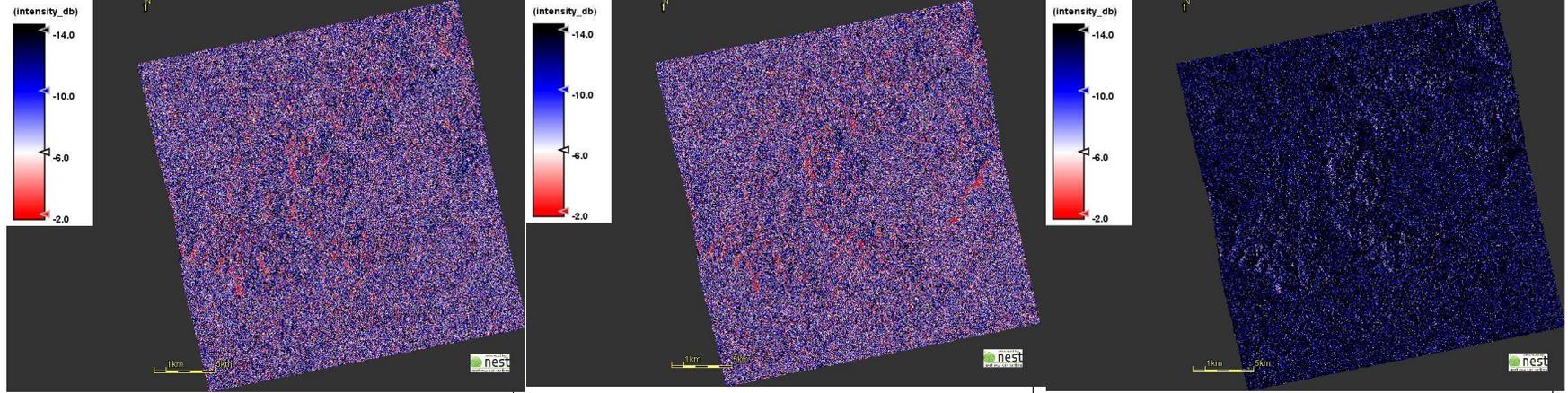
22/12/2010



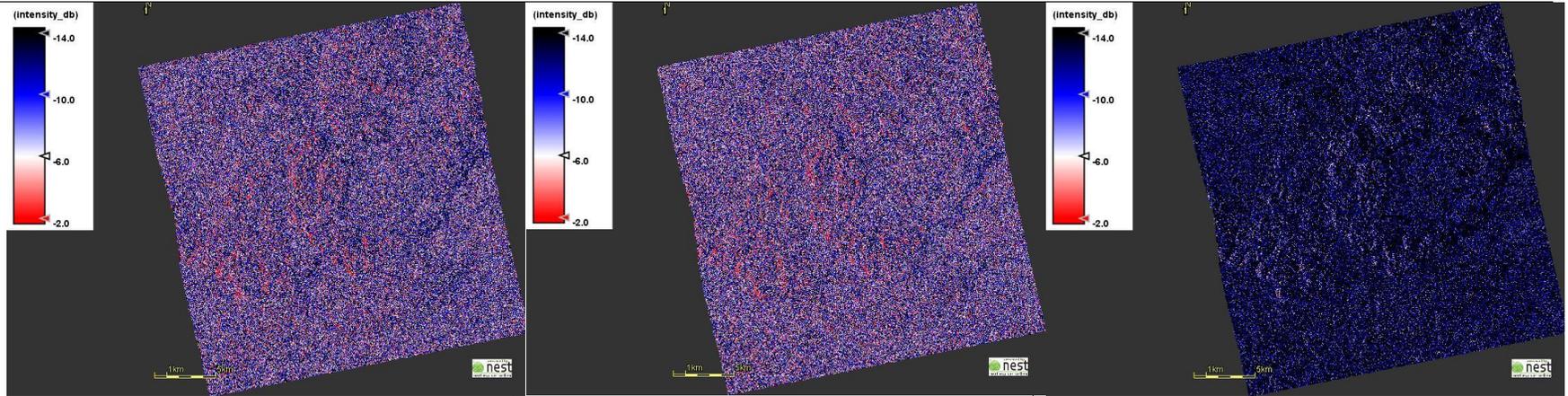
15/01/2011



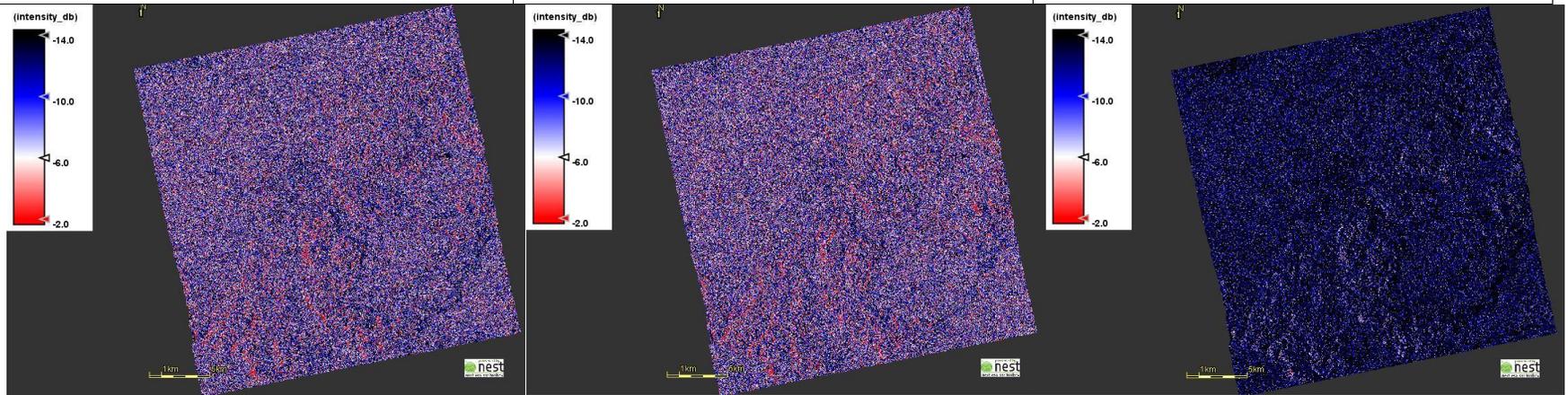
08/02/2011



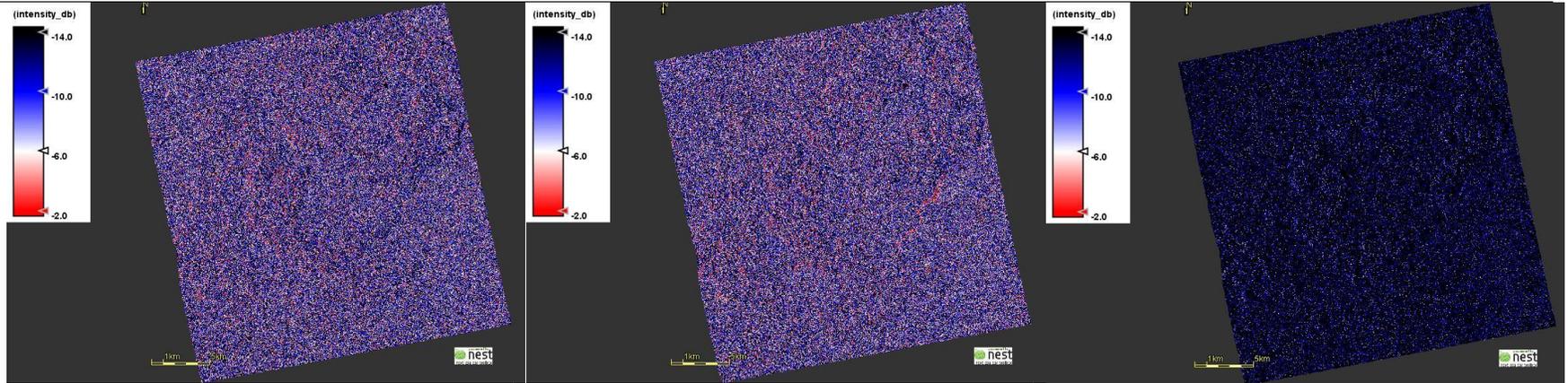
21/04/2011



11/08/2010



15/11/2010



15/03/2011

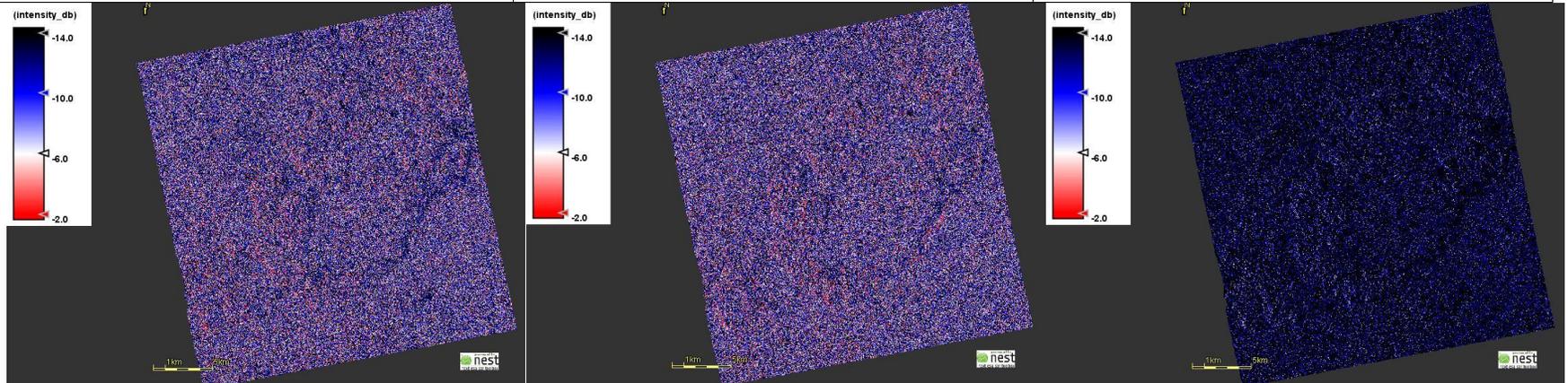
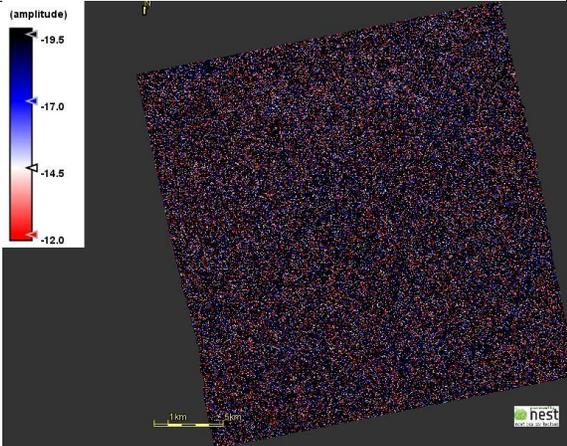
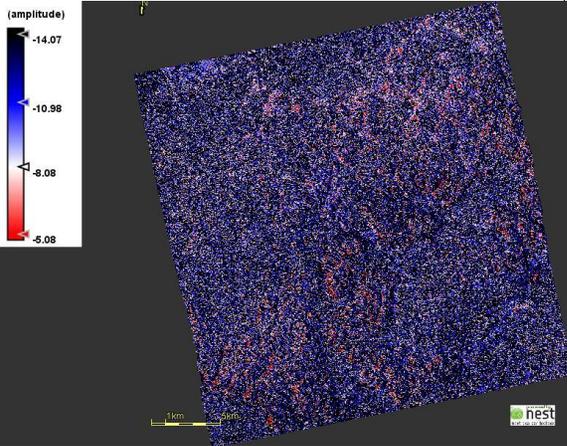
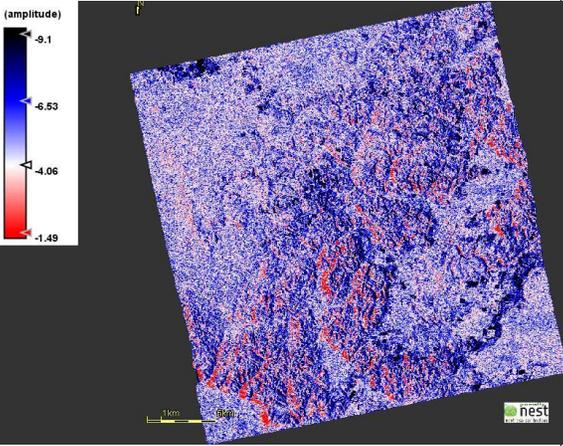
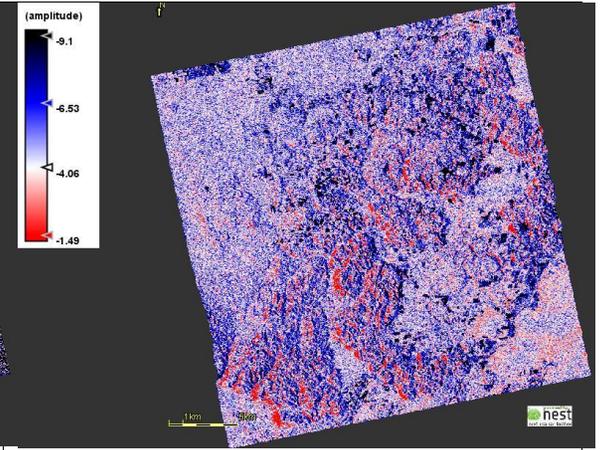
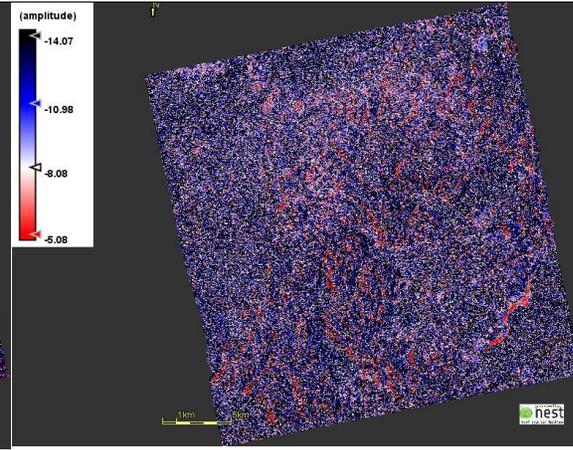
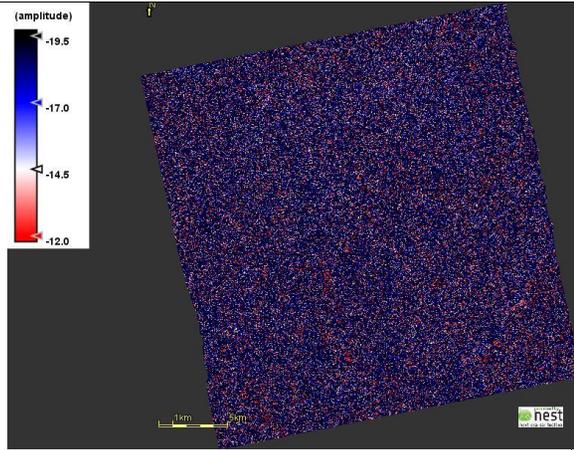


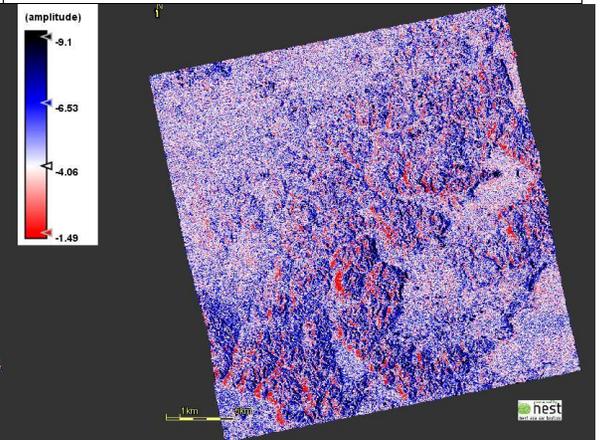
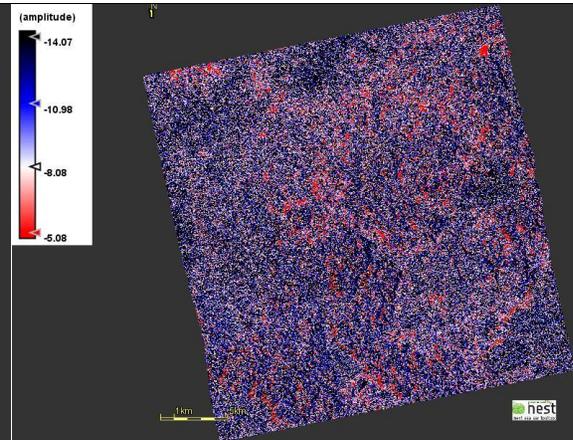
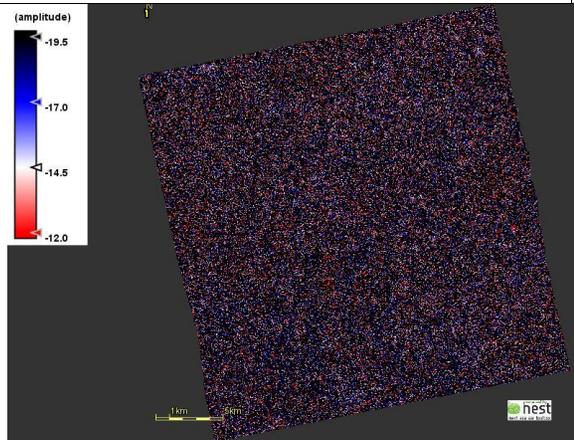
Tabla 2. Componentes de Freeman-Durden de imágenes RADARSAT-2, Zona Sur

Fecha	Componente de Interacción (double)	Componente de superficie (Surface/odd)	Componente de vegetación (volume)
26/04/2010			

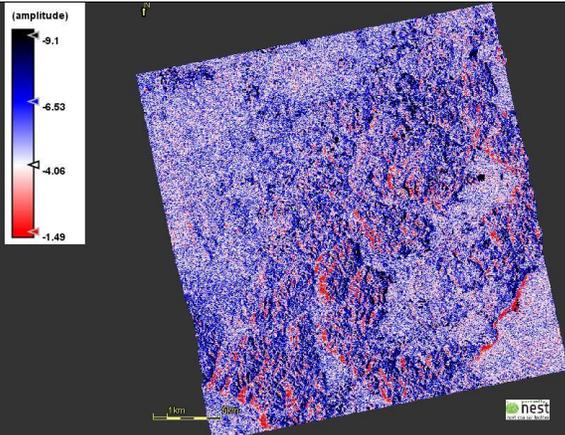
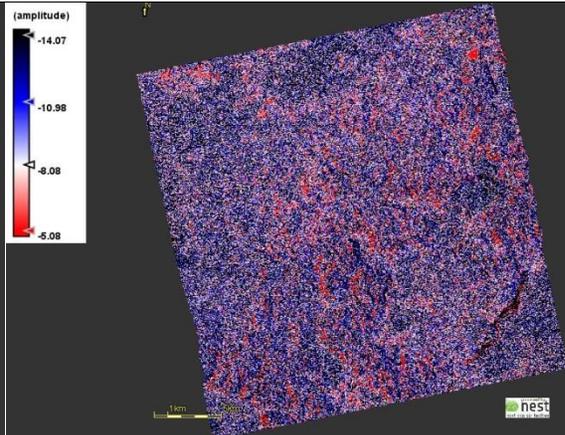
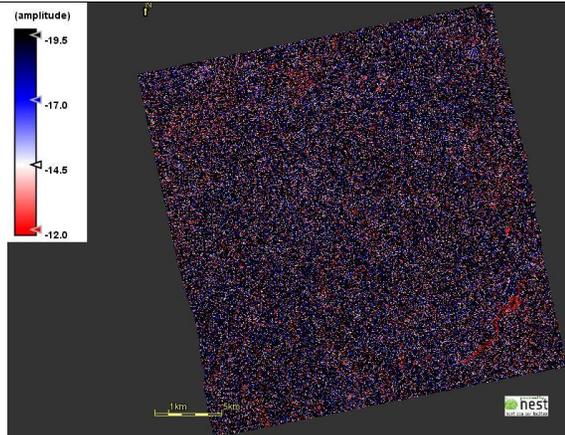
20/05/2010



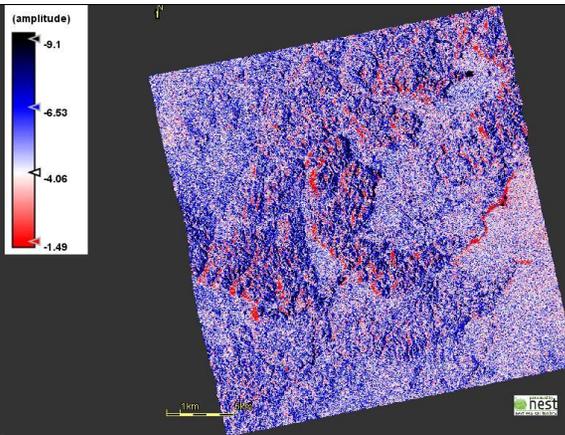
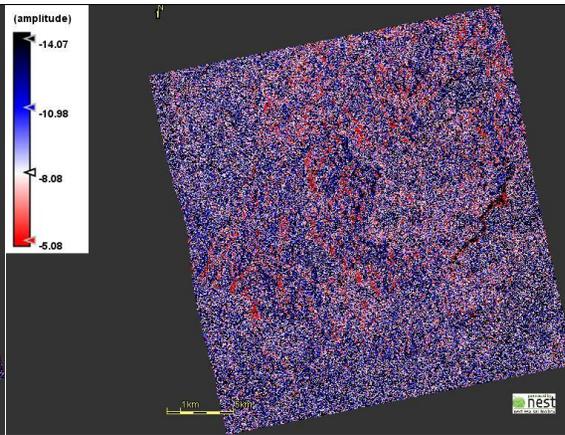
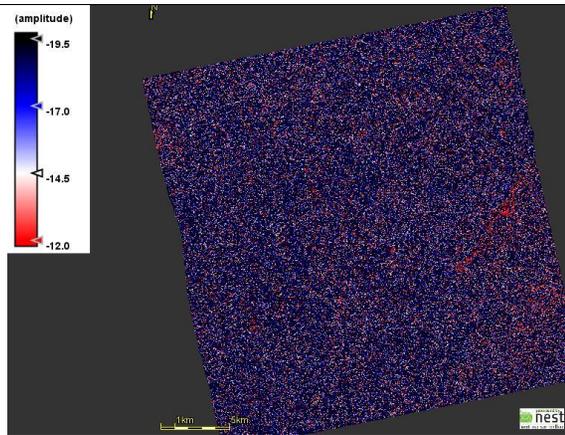
13/06/2010



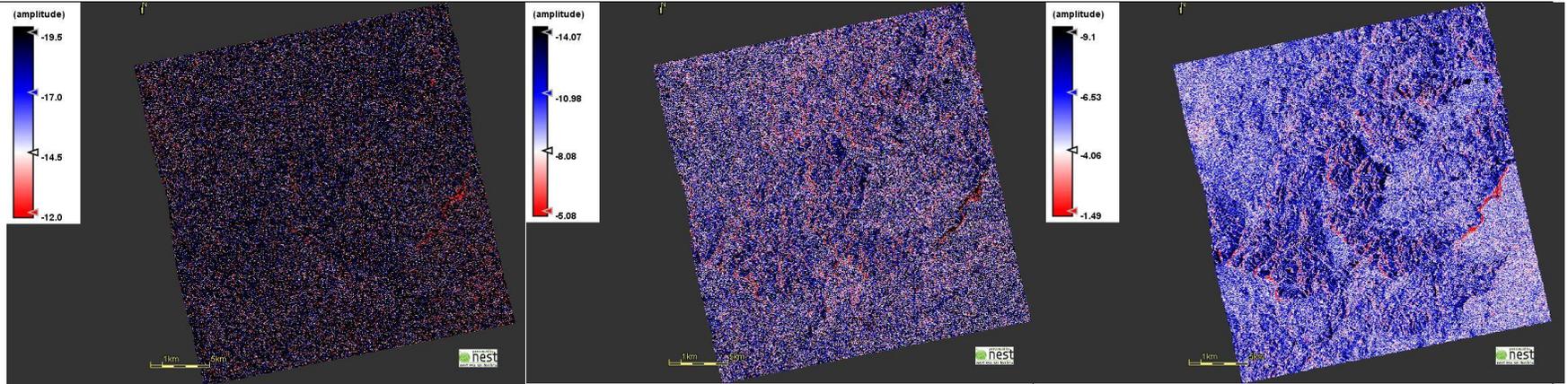
07/07/2010



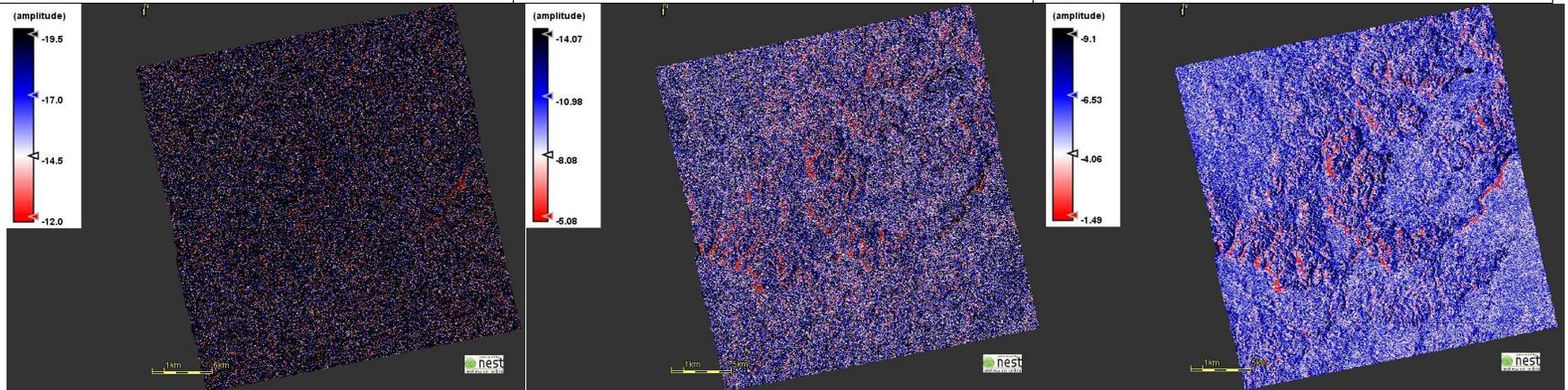
17/09/2010



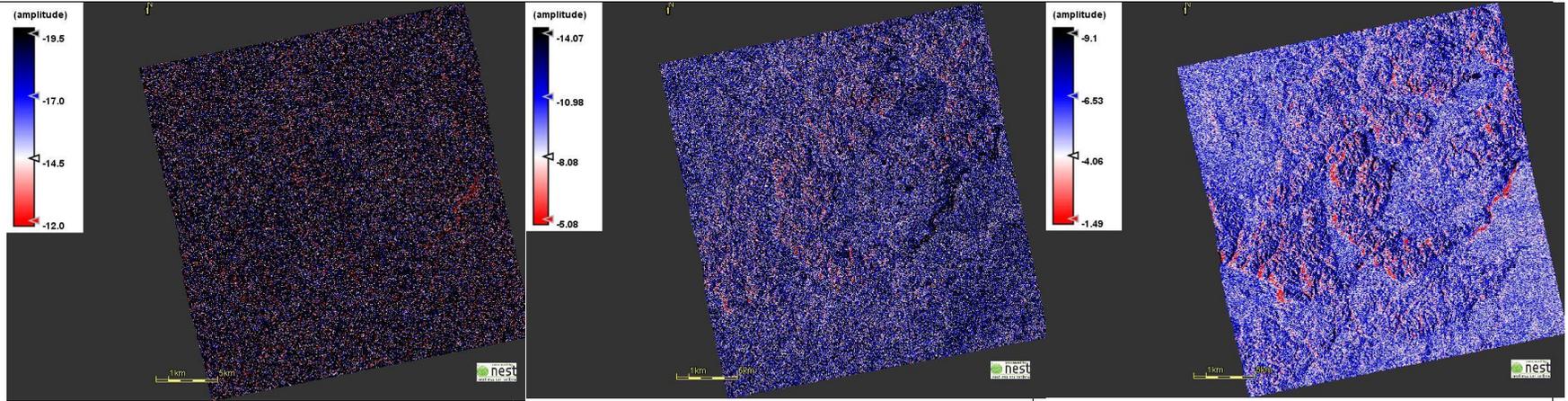
11/10/2010



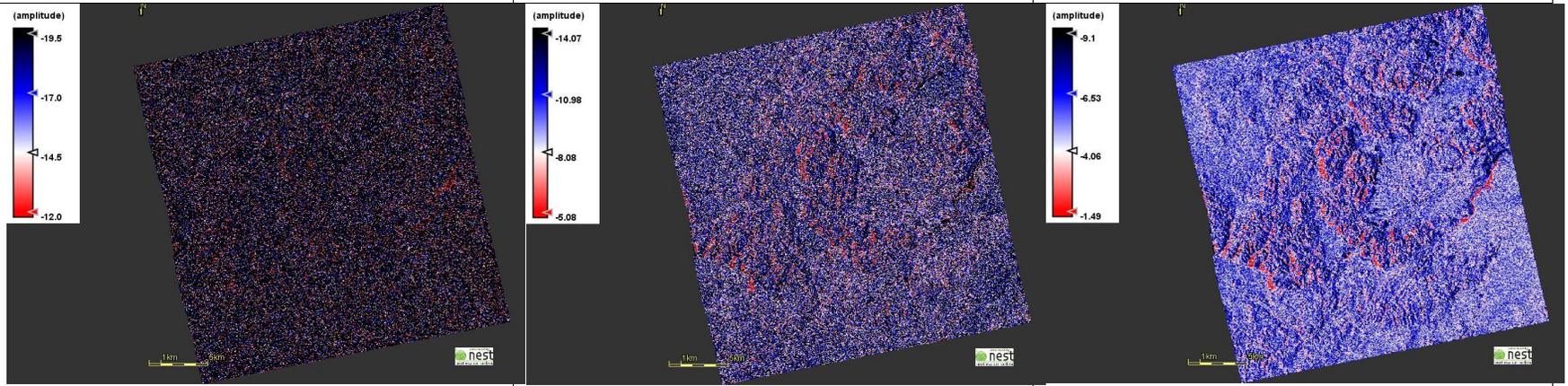
22/12/2010



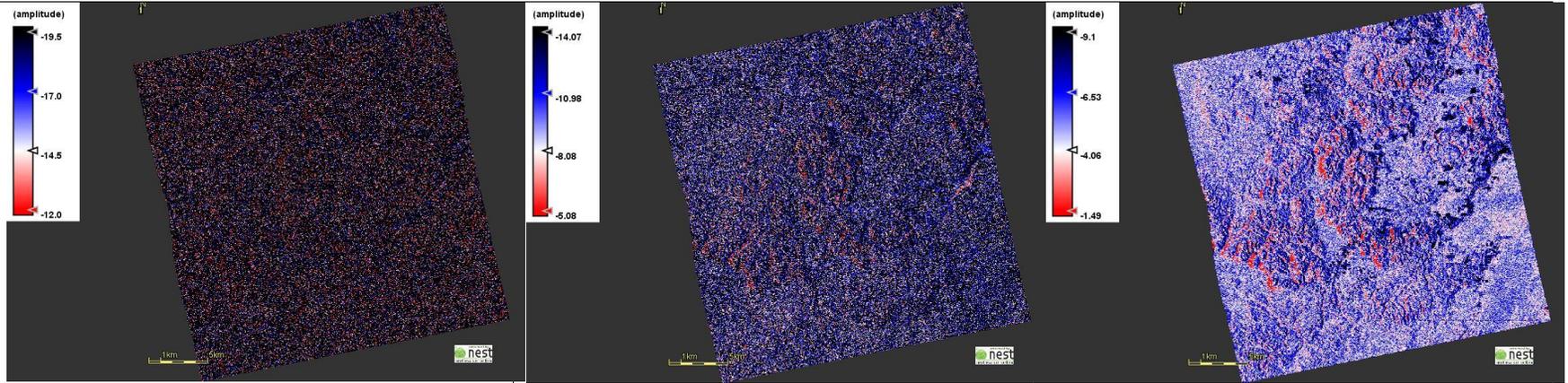
15/01/2011



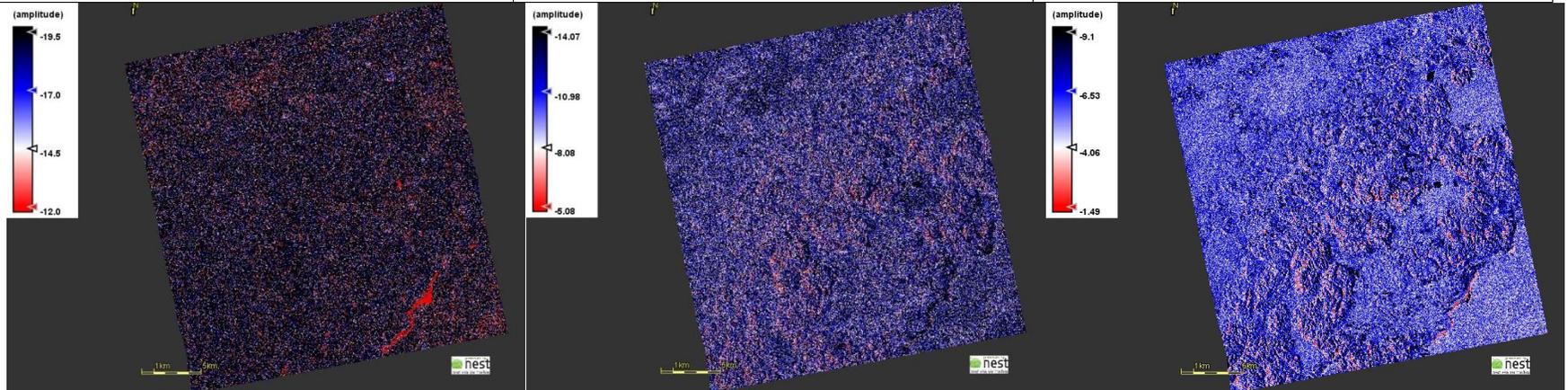
08/02/2011



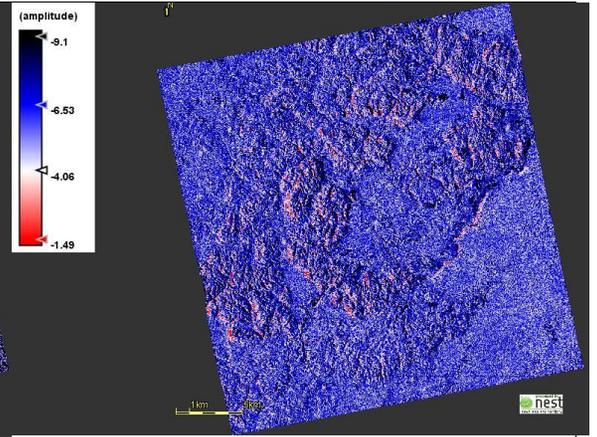
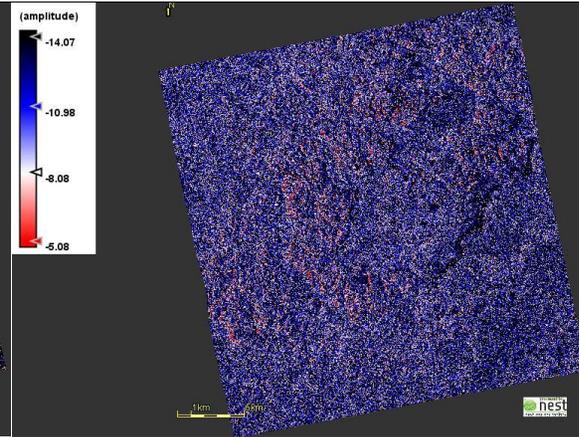
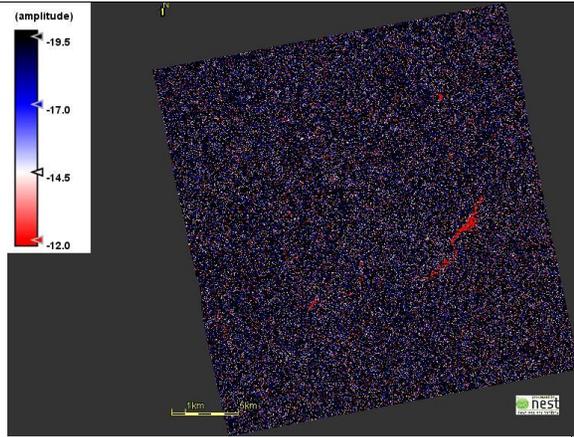
21/04/2011



11/08/2010



15/11/2010



15/03/2011

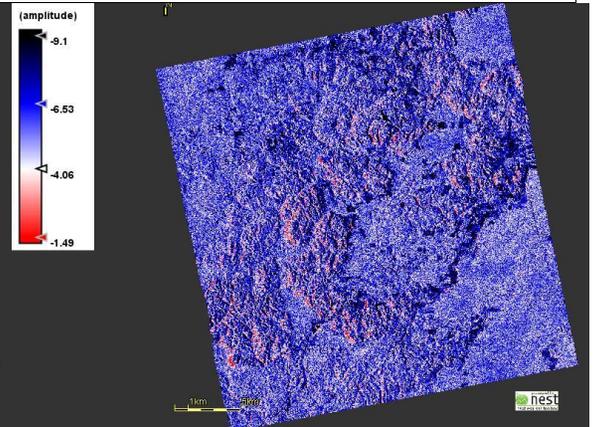
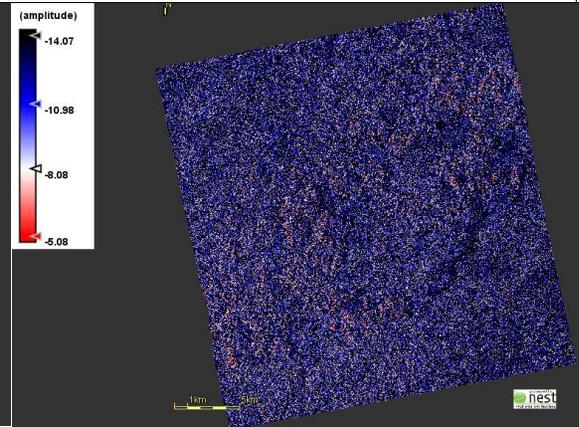
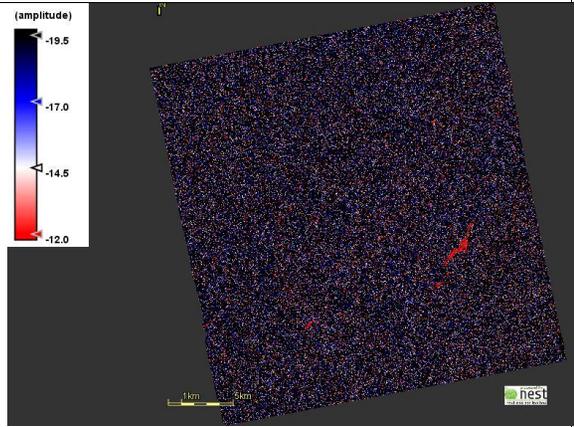
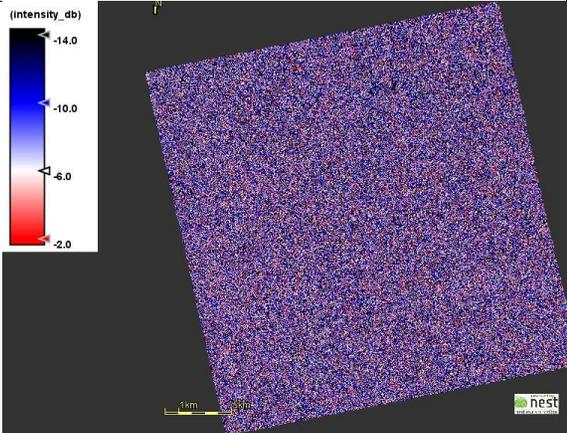
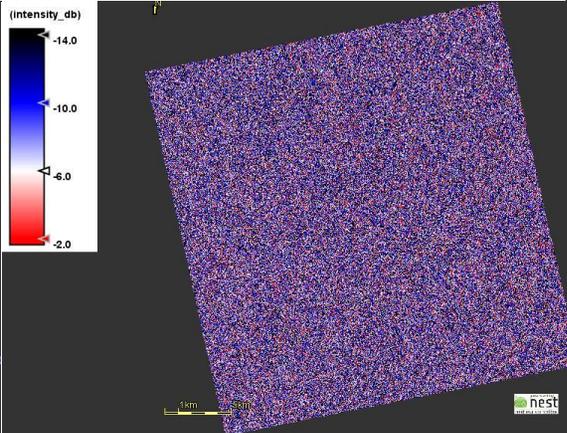
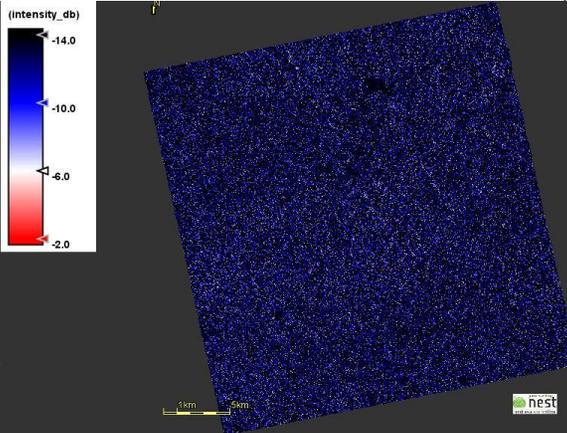
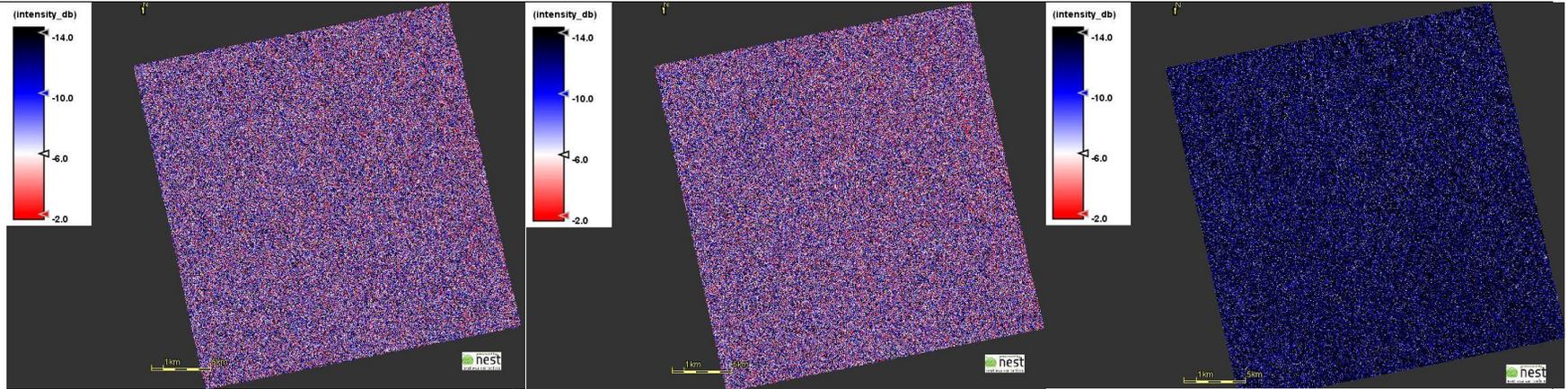


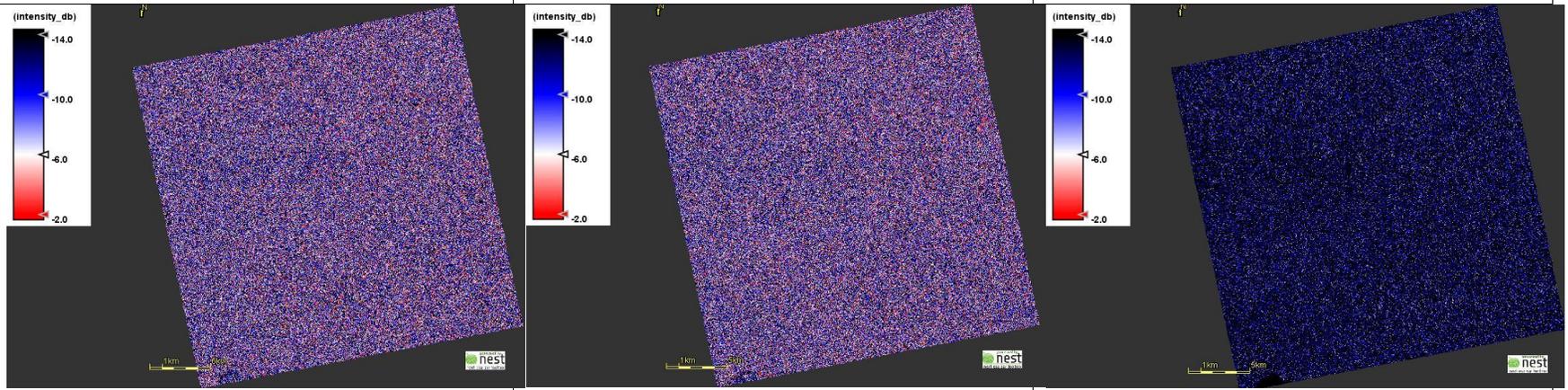
Tabla 3. Coeficiente de retrodispersión de las imágenes RADARSAT-2 por esquema de polarización, Zona Norte

Fecha	VV	HH	VH
20/05/2010			

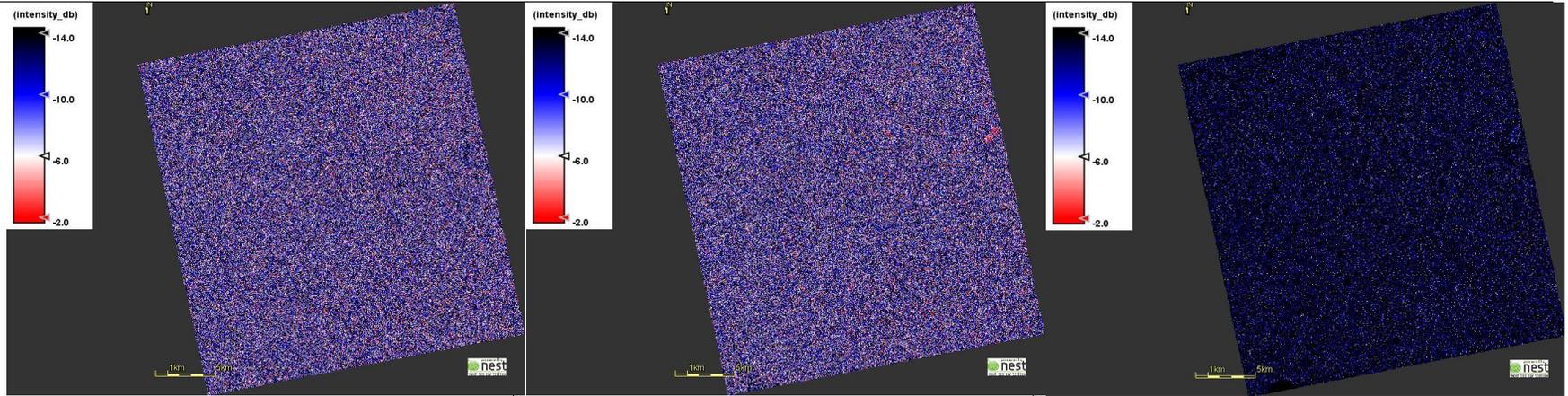
07/07/2010



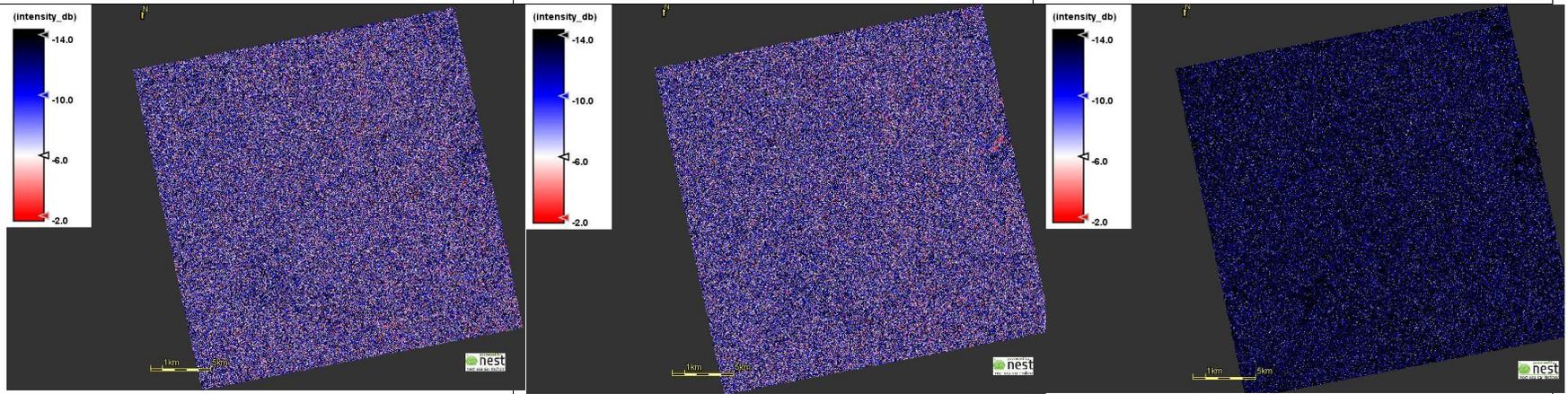
22/11/2010



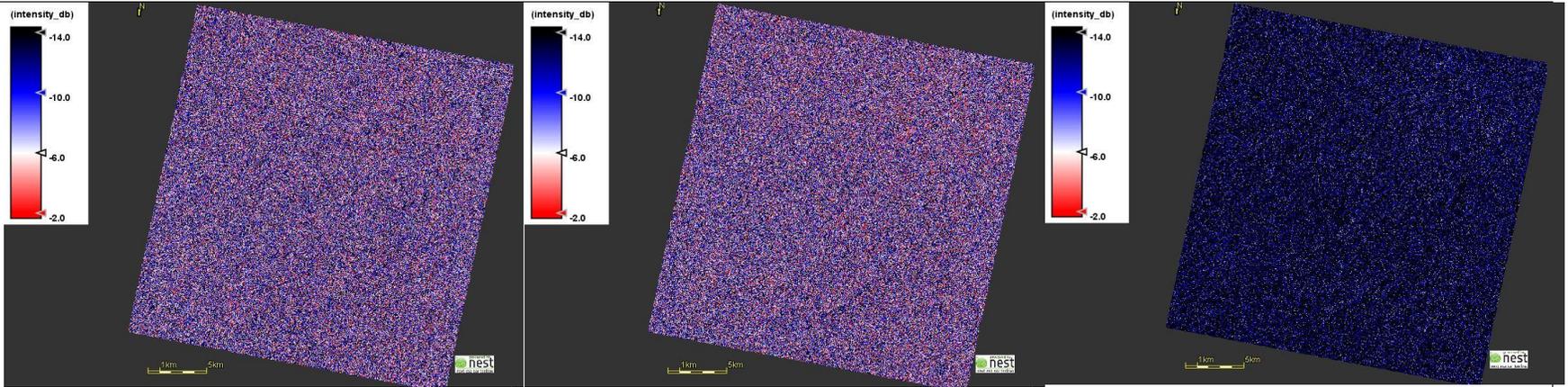
16/12/2010



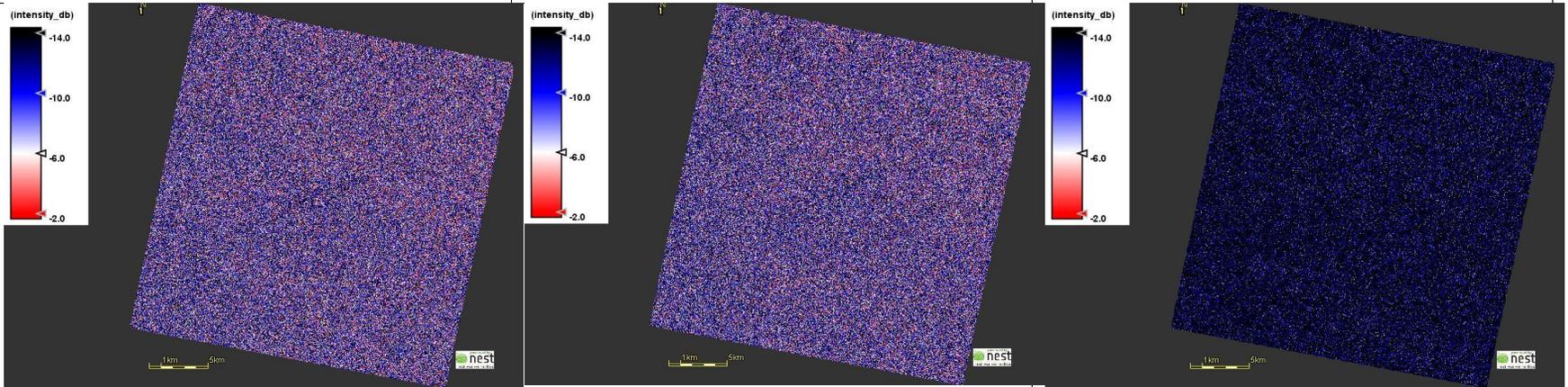
22/03/2011



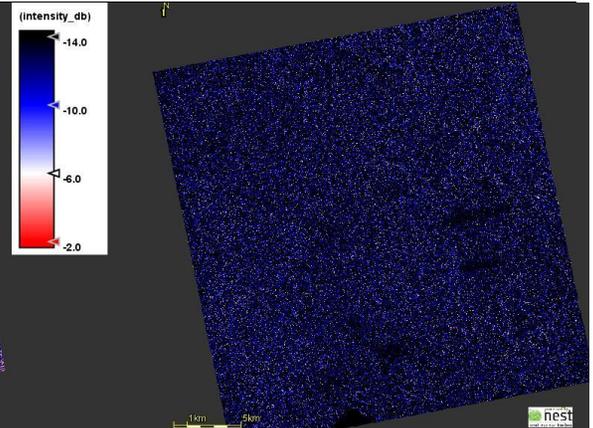
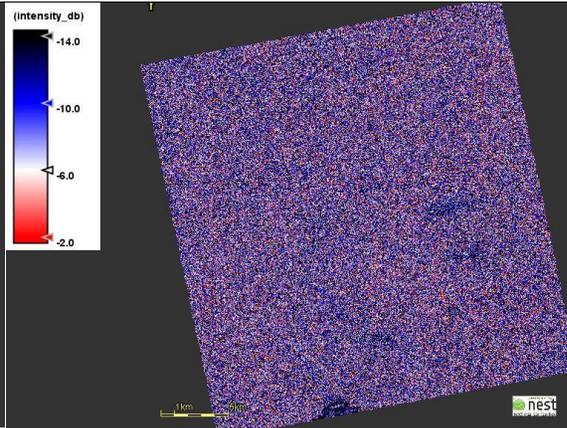
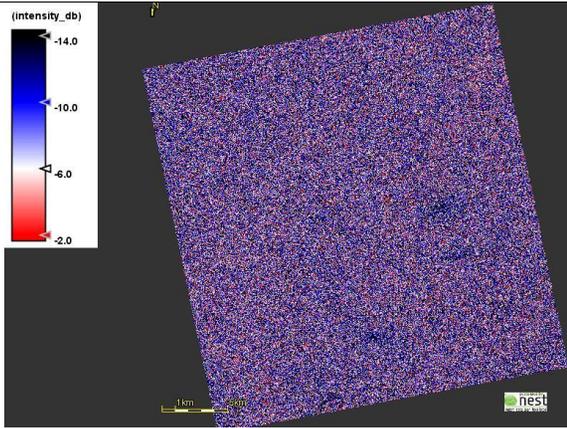
26/09/2010



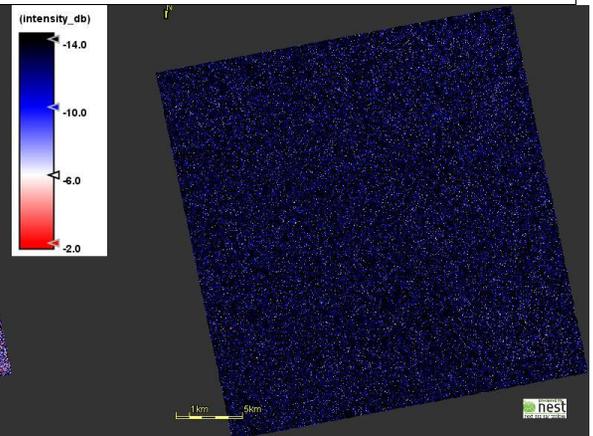
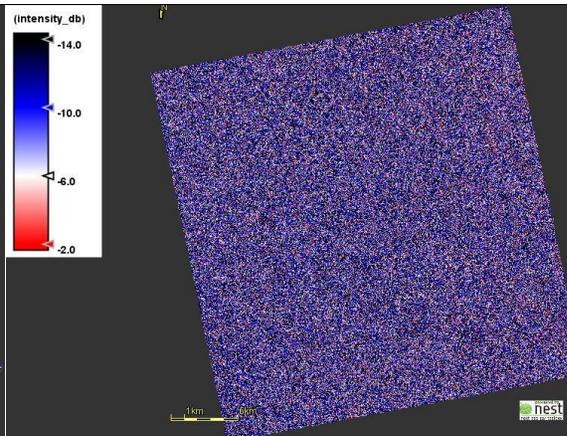
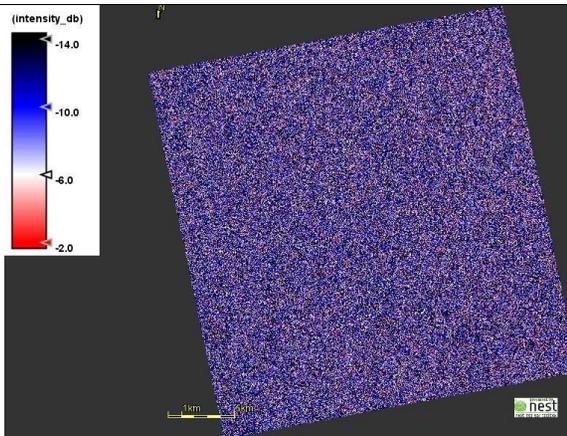
09/08/2010



28/09/2010



19/02/2011



29/06/2010

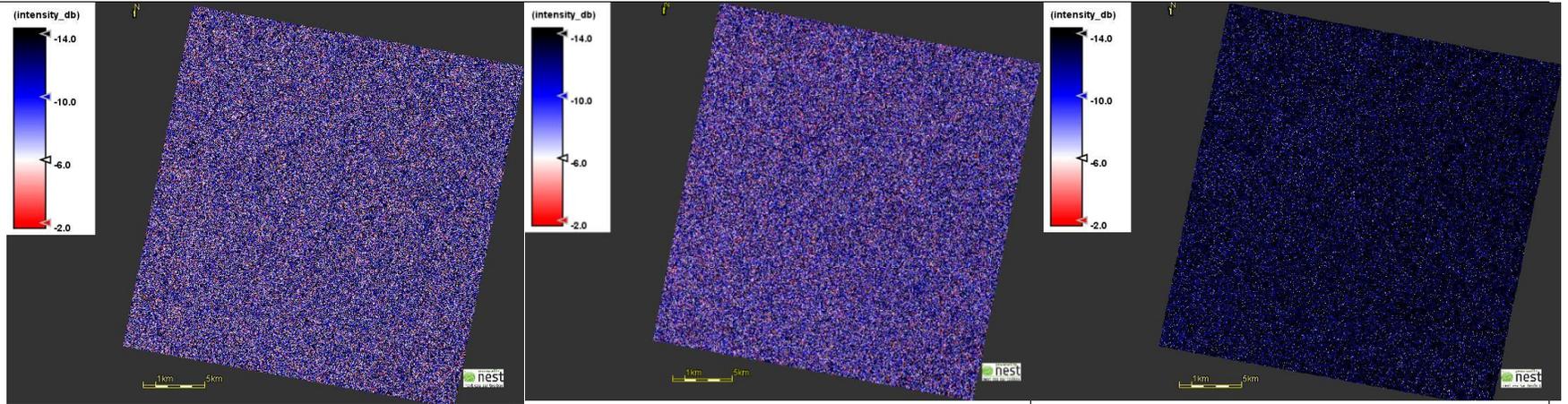
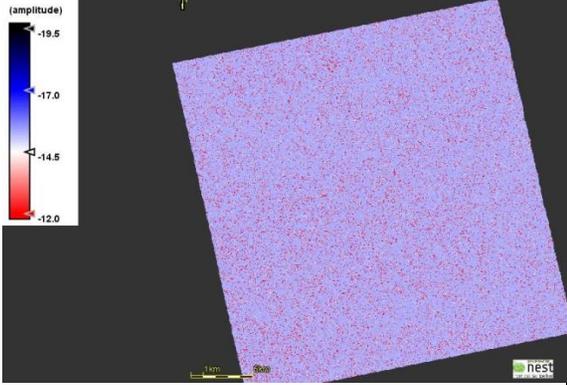
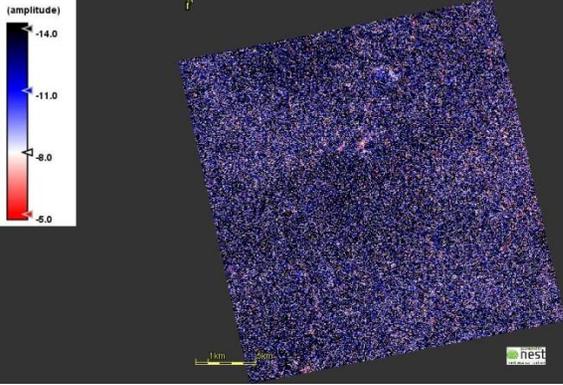
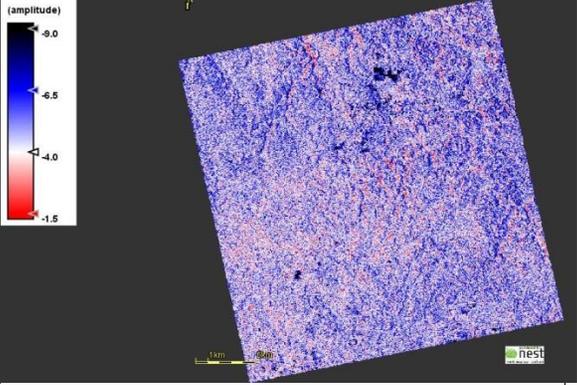
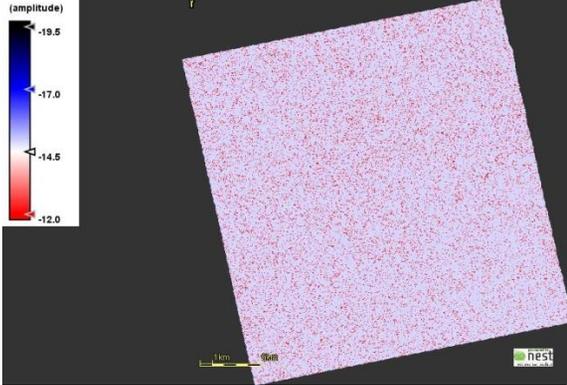
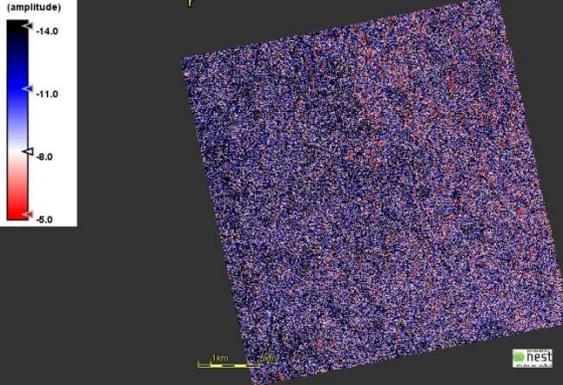
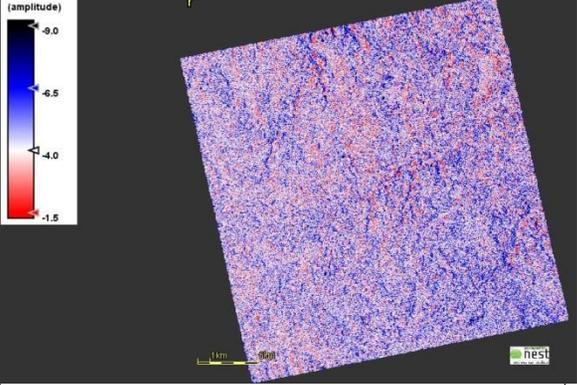
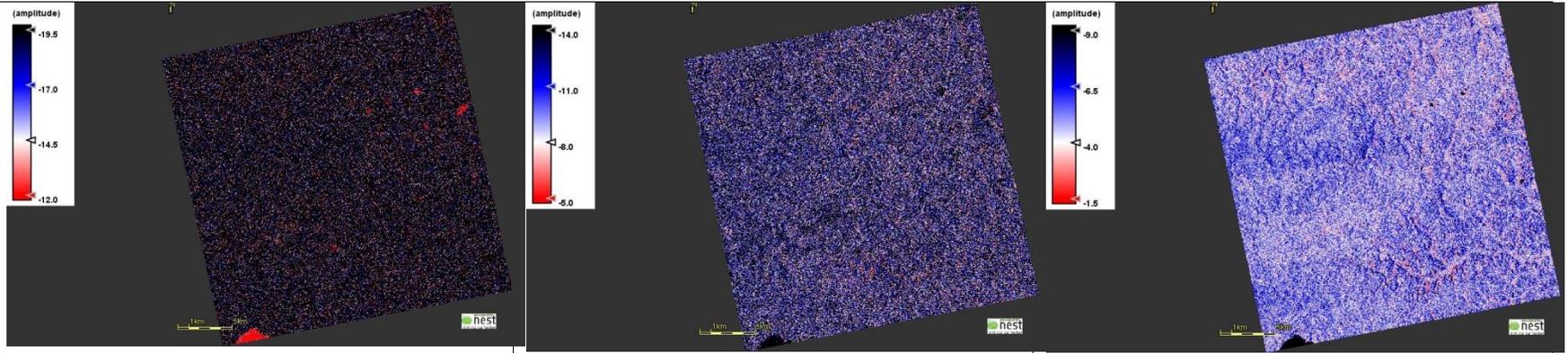


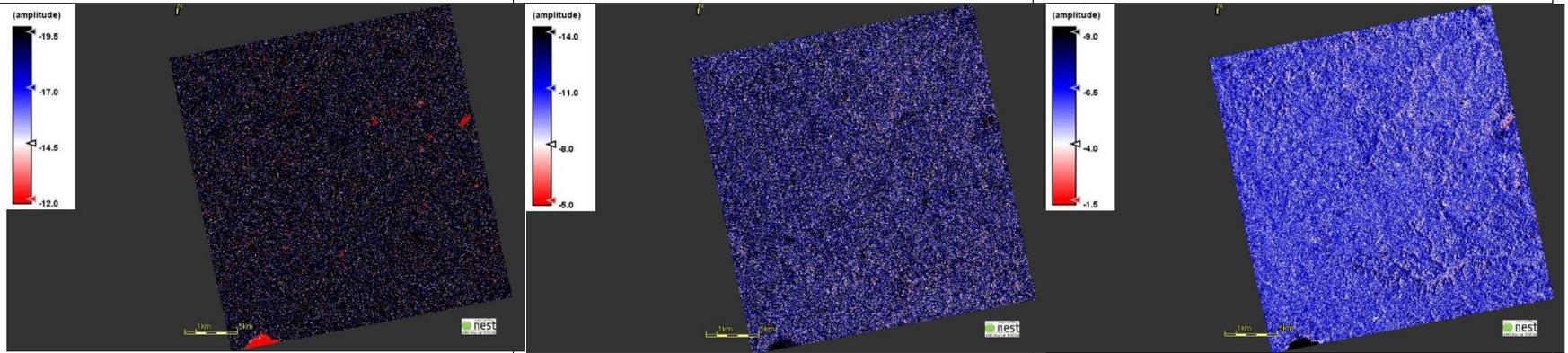
Tabla 4. Componentes de Freeman-Durden de las imágenes RADARSAT-2, Zona Norte

Fecha	Componente de Interacción de suelo/vegetación (double)	Componente de suelo (Odd)	Componente de vegetación (volume)
20/05/2010			
07/07/2010			

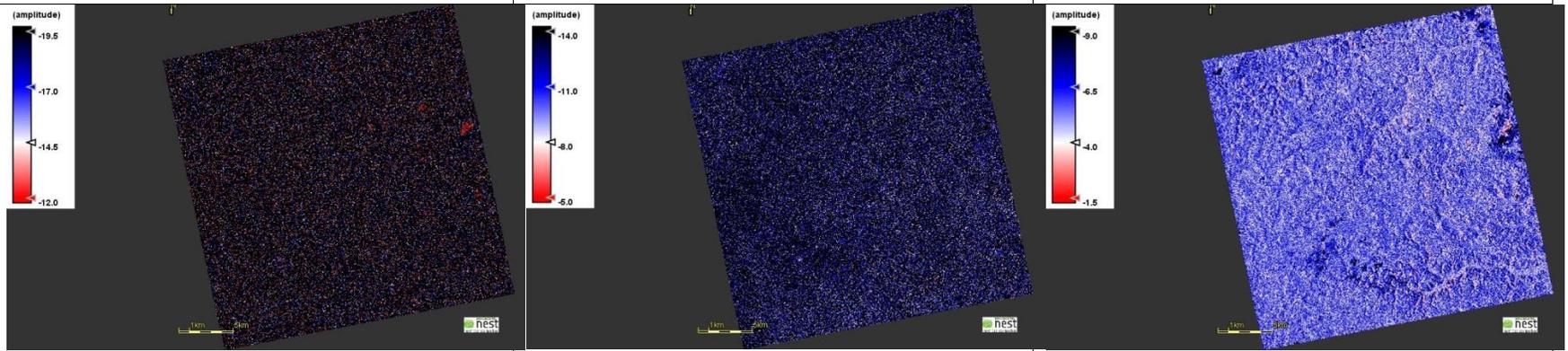
22/11/2010



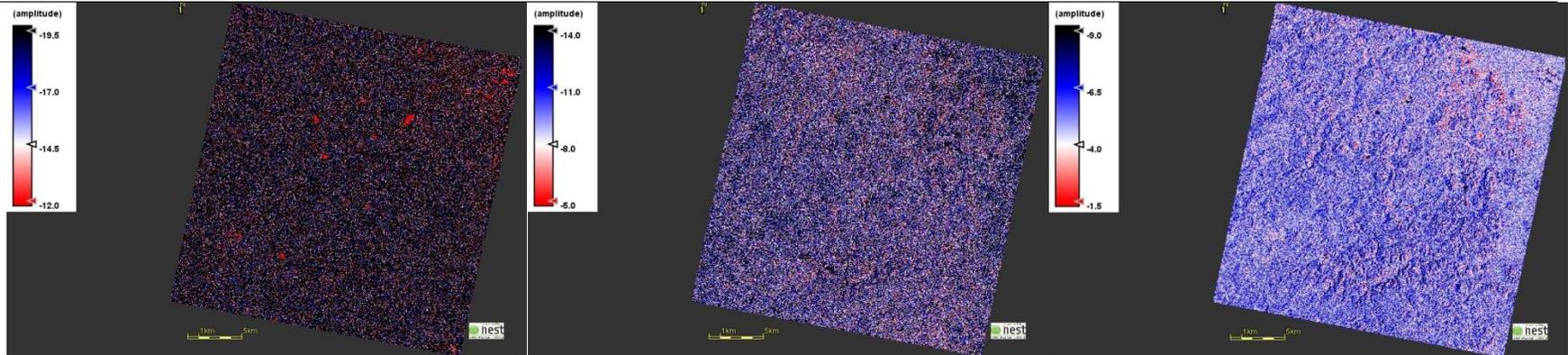
16/12/2010



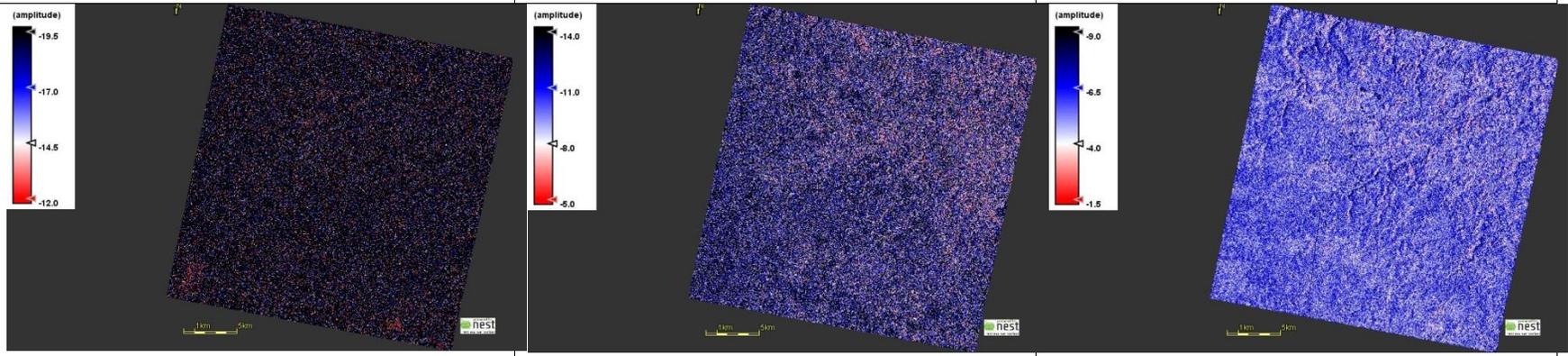
22/03/2011



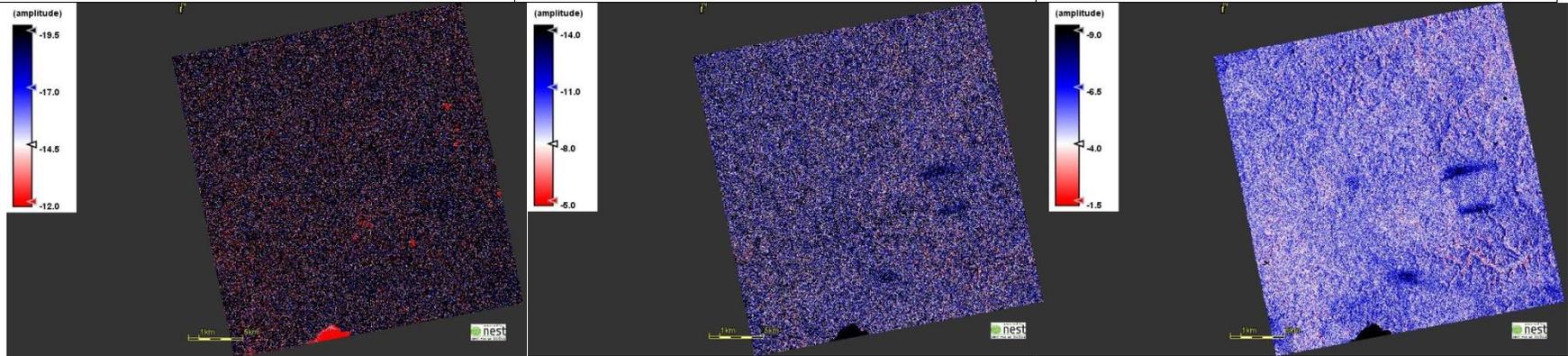
26/09/2010



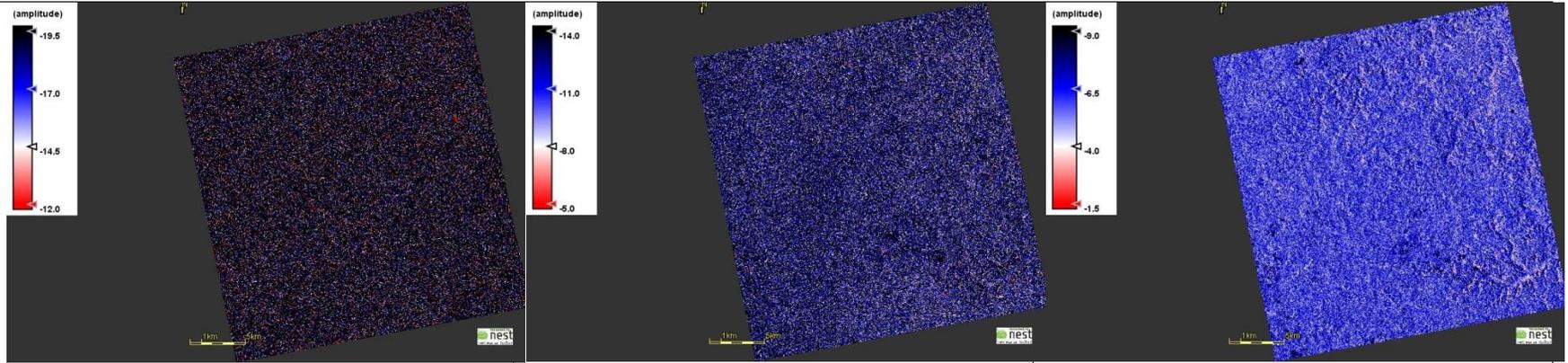
09/08/2010



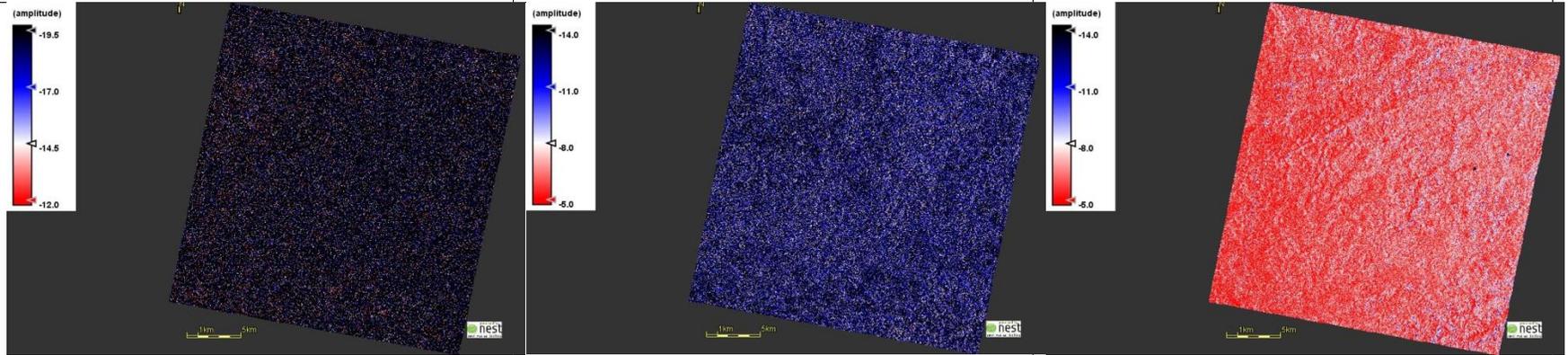
28/09/2010



19/02/2011

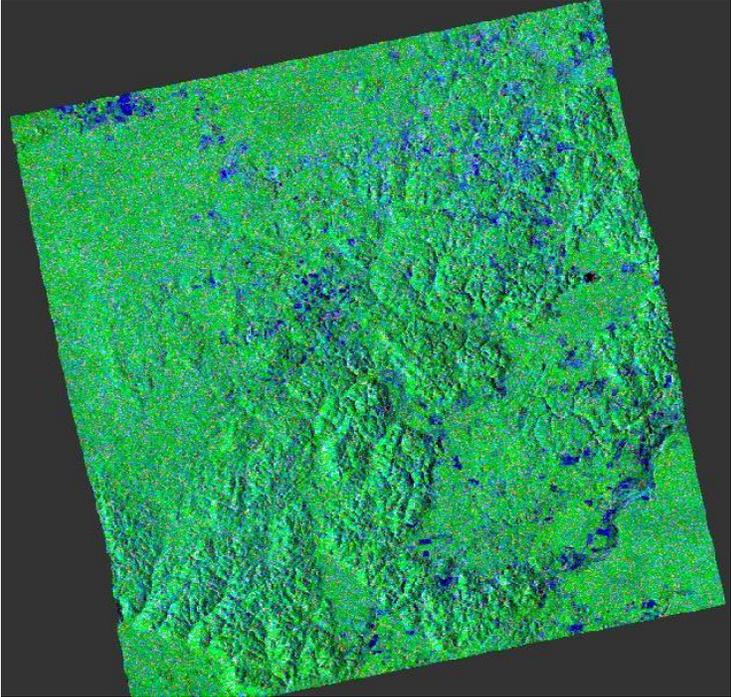


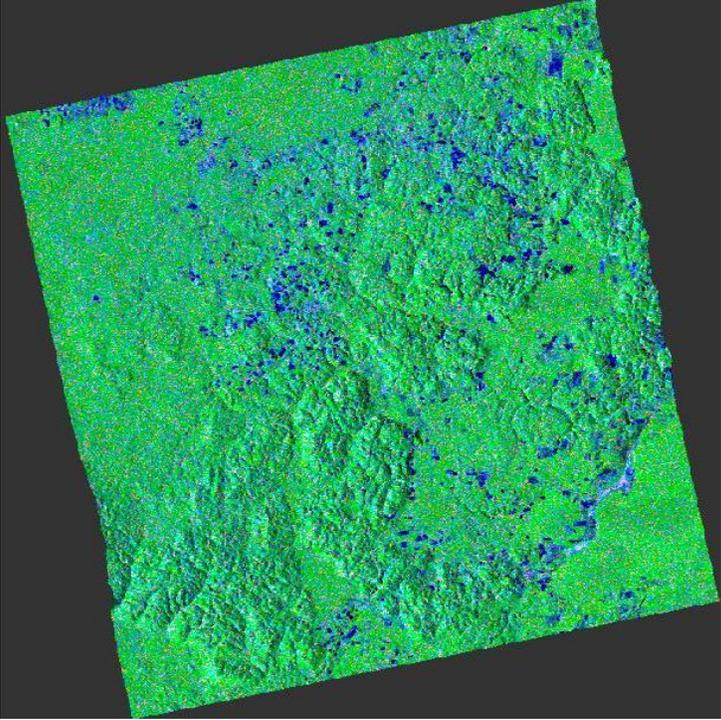
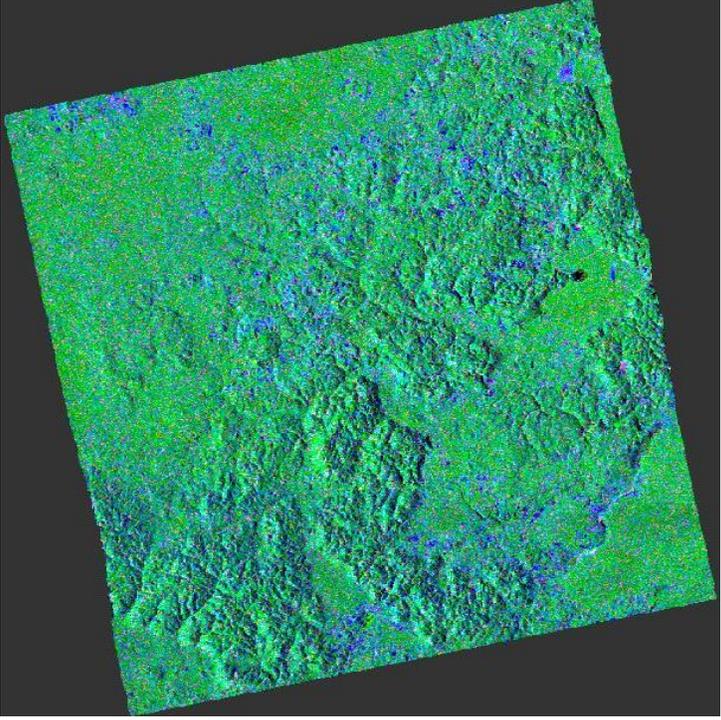
29/06/2010

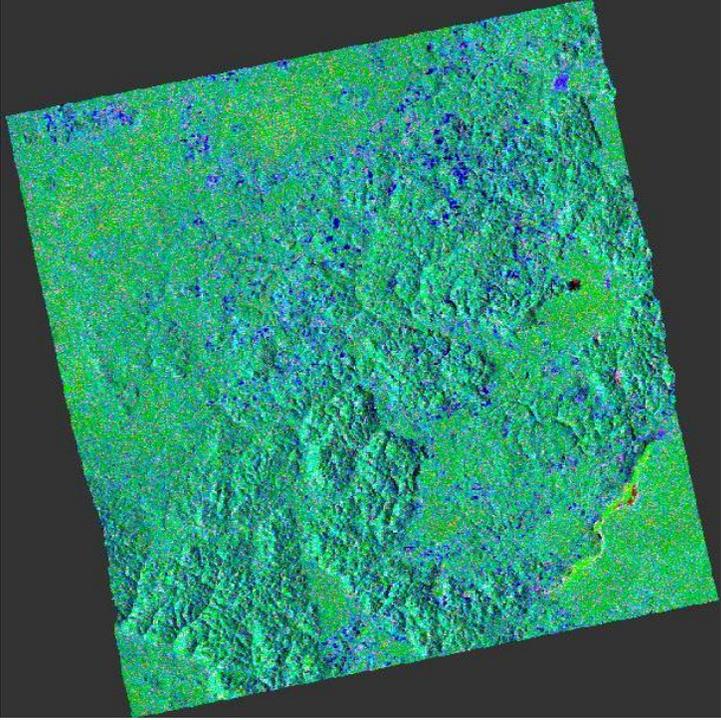
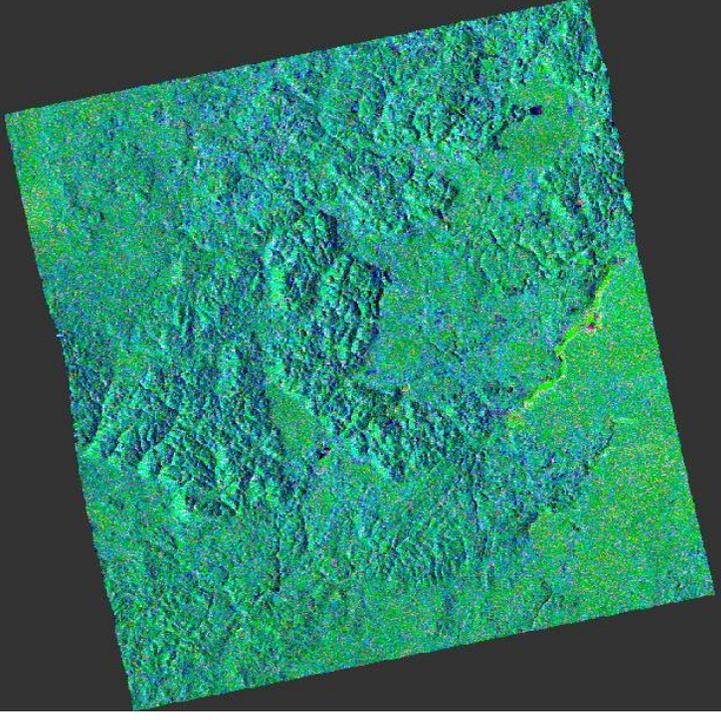


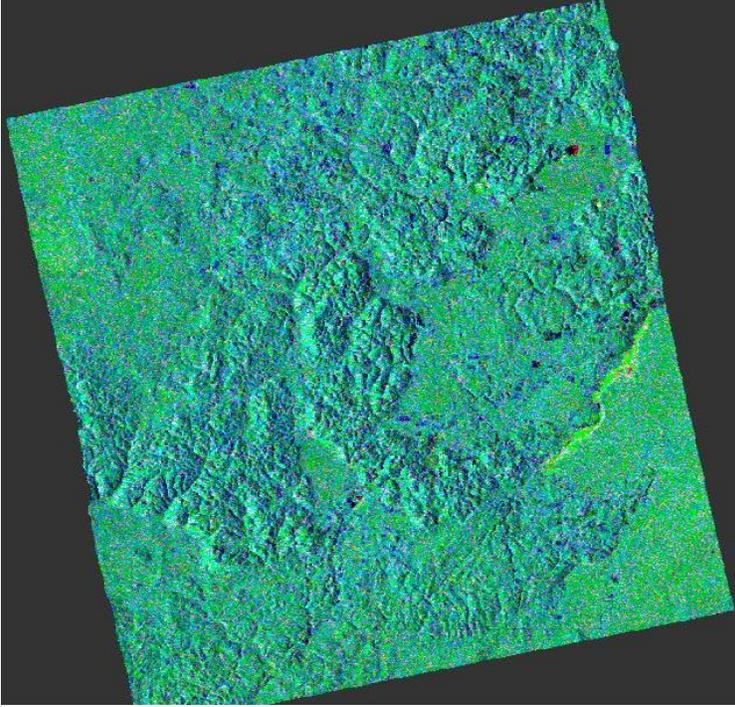
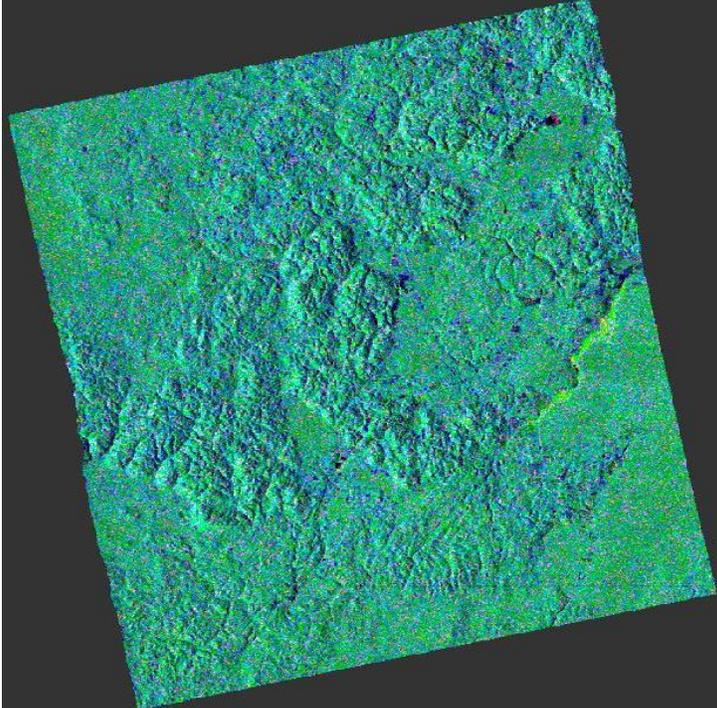
ANEXO 2. COMPOSICIÓN RGB DE LAS COMPONENTES DE FREEMAN-DURDEN

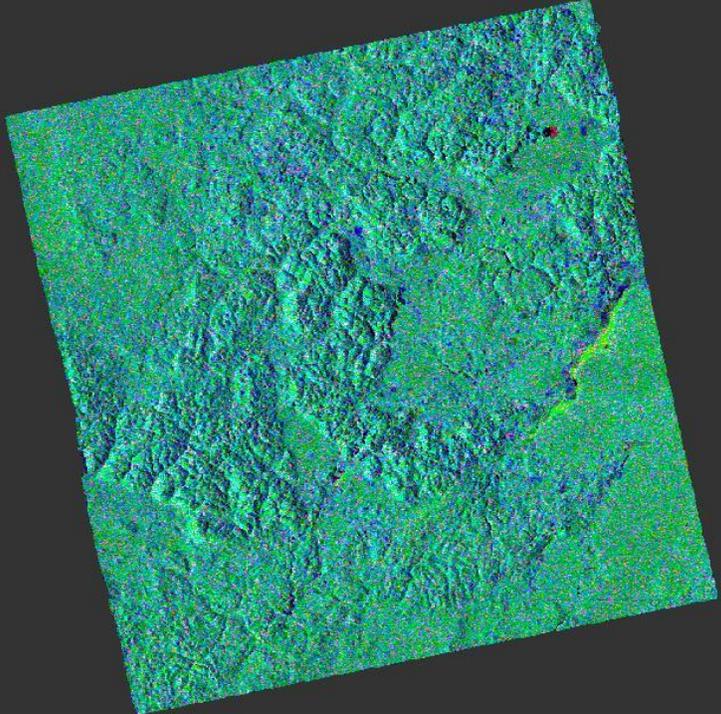
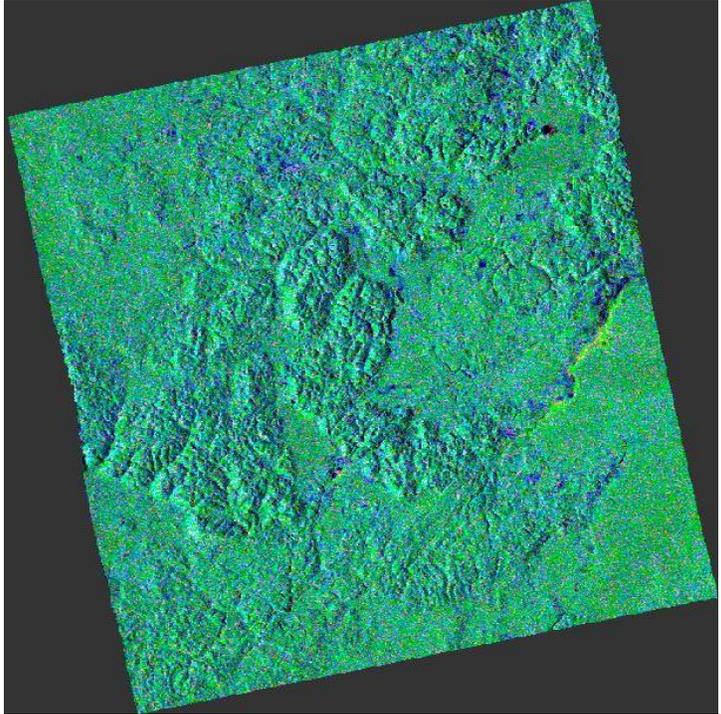
Tabla 1. Imágenes de la Zona Sur en composición RGB de las tres componentes de Freeman-Durden

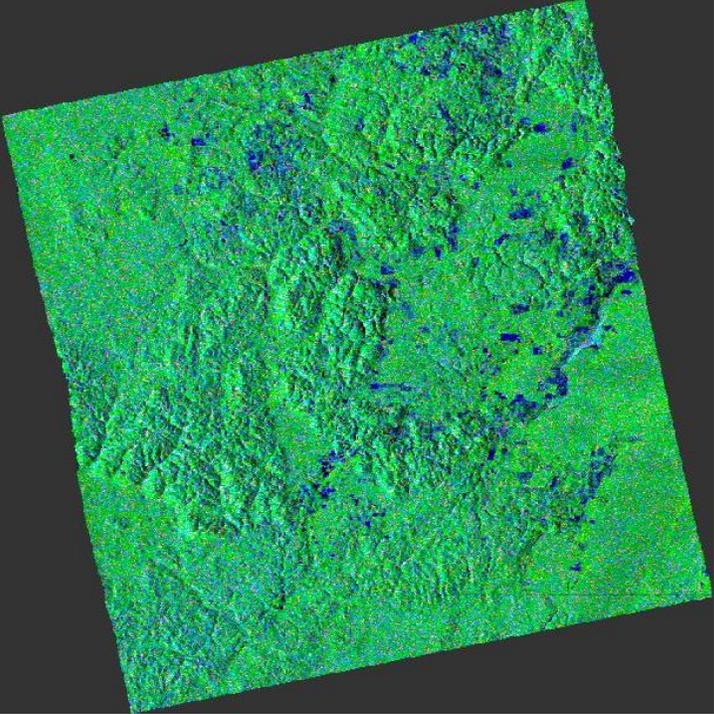
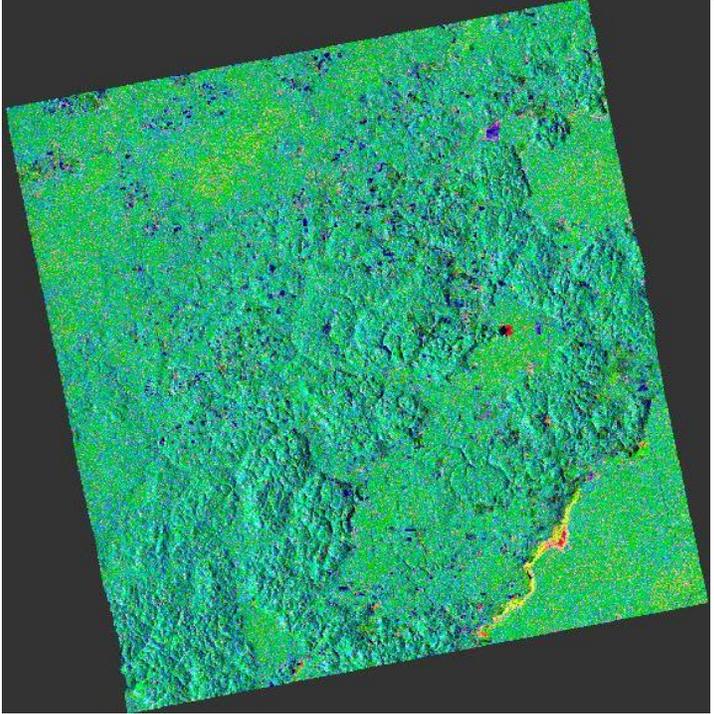
Fecha	Angulo de incidencia	Rojo=Interacción Verde(G)=Vegetación Azul (B)= Suelo
26/04/2010	22.1 – 24.2	

20/05/2010	22.1 – 24.2	
13/06/2010	22.1 – 24.2	

07/07/2010	22.1 – 24.2	
17/09/2010	22.1 – 24.2	

11/10/2010	22.1 – 24.2	
22/12/2010	22.1 – 24.2	

15/01/2010	22.1 – 24.2	
08/02/2011	22.1 – 24.2	

21/04/2011	22.1 – 24.2	
11/08/2010	36.4 – 38.0	

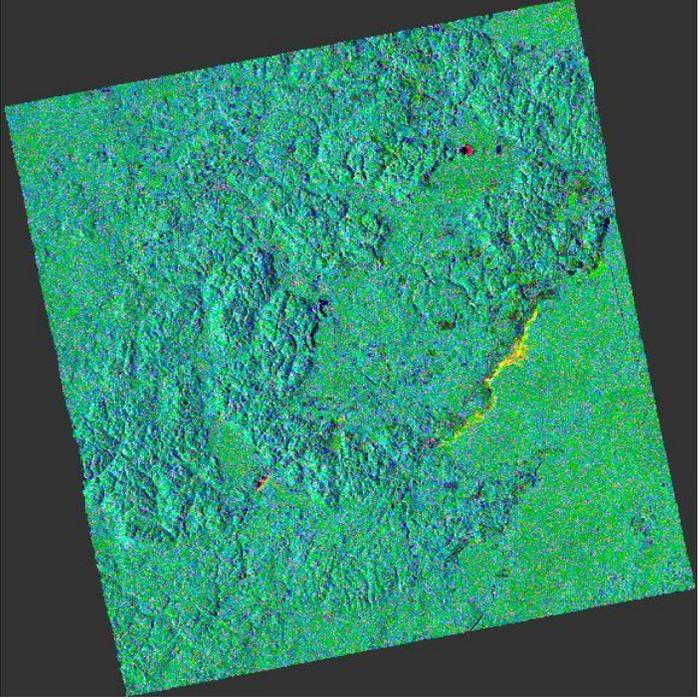
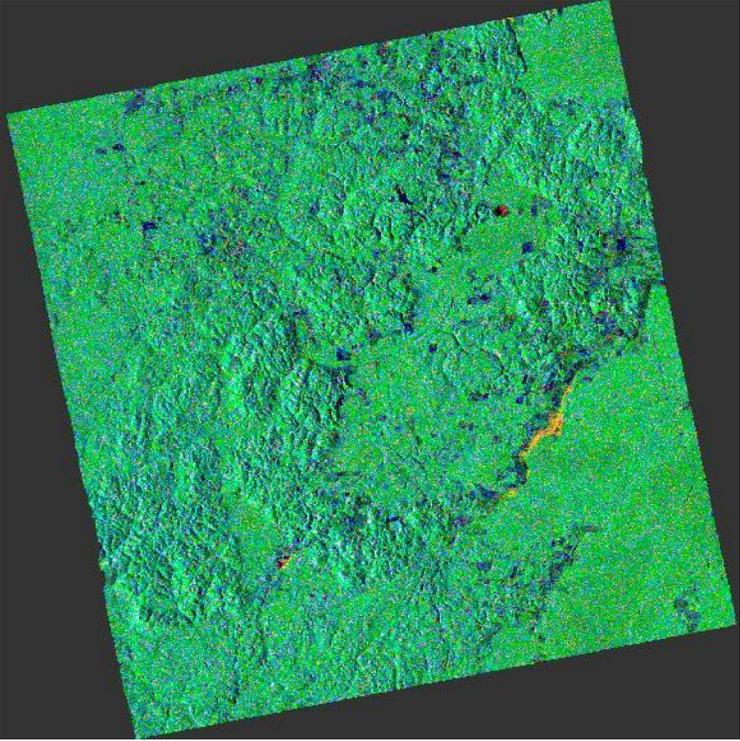
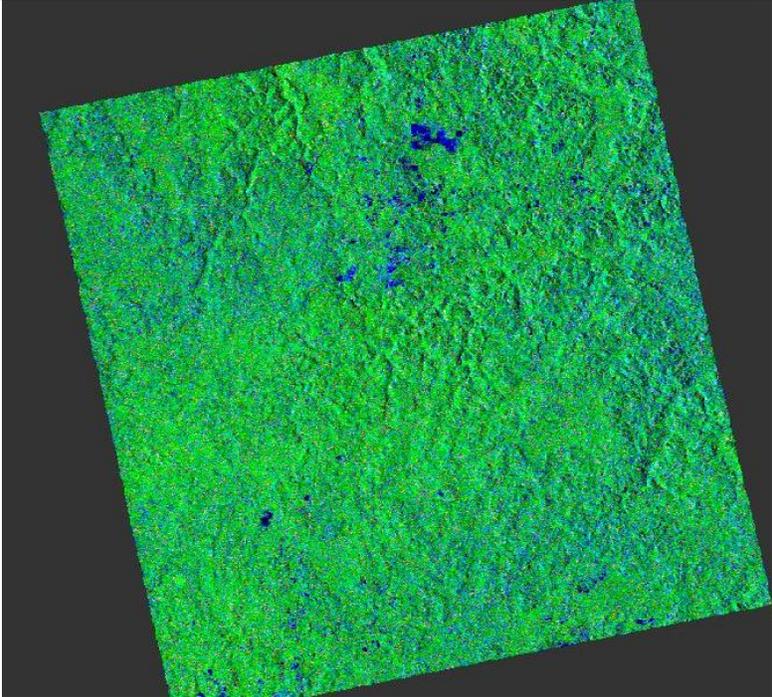
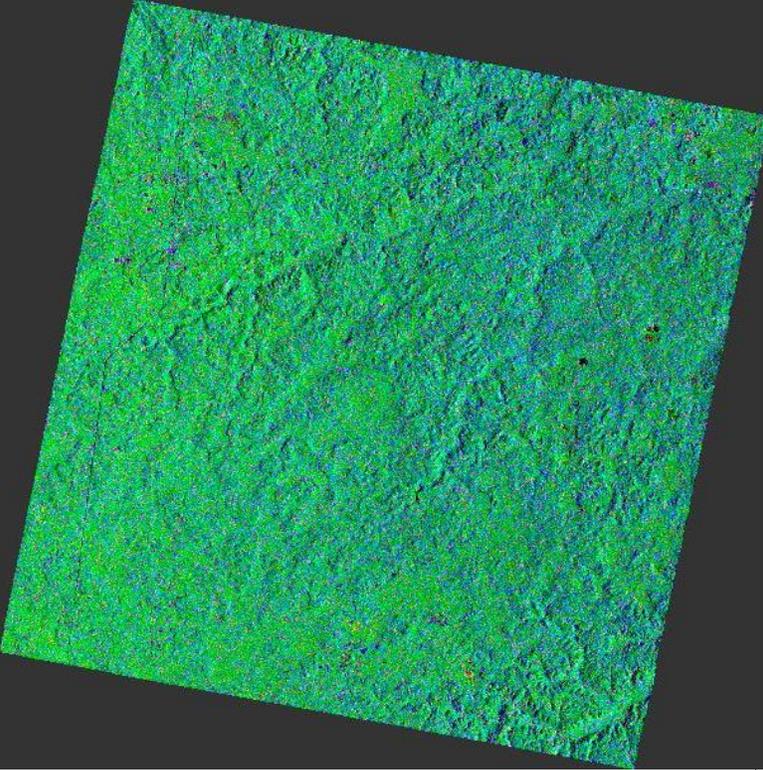
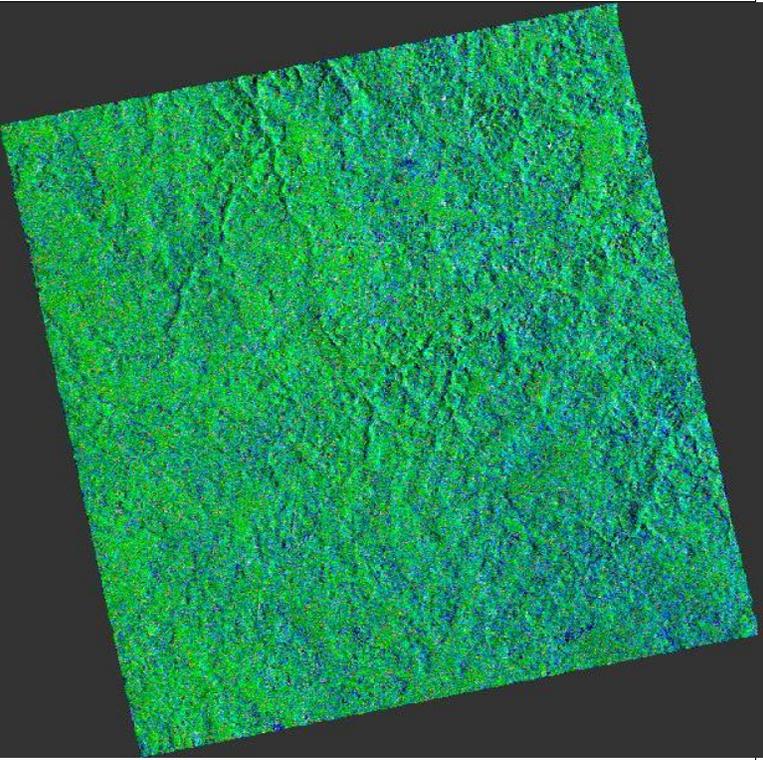
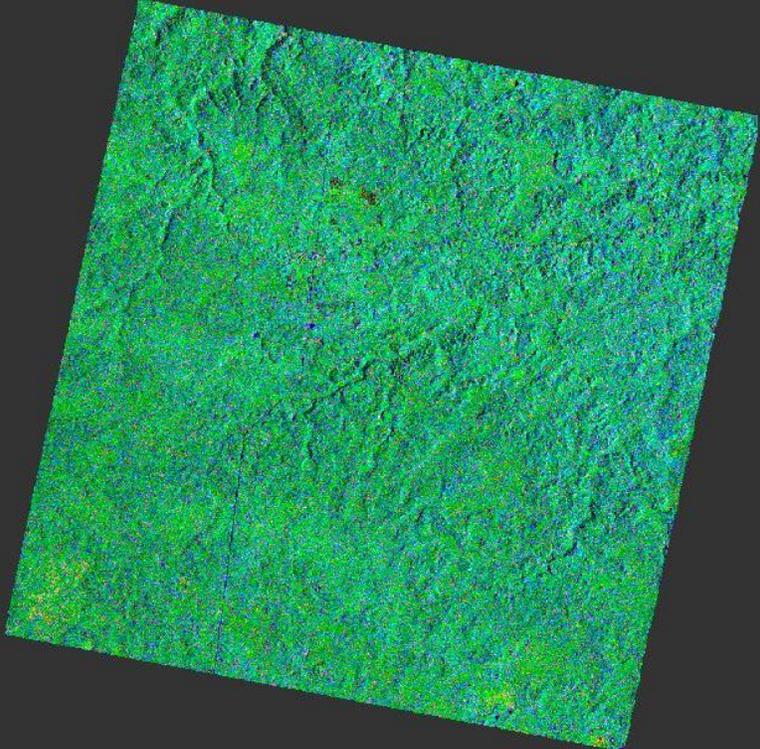
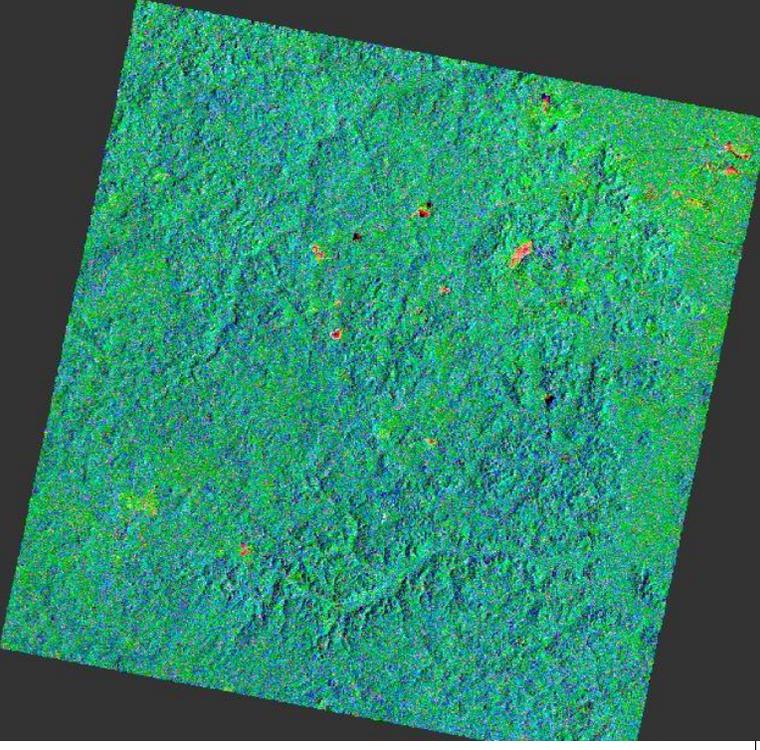
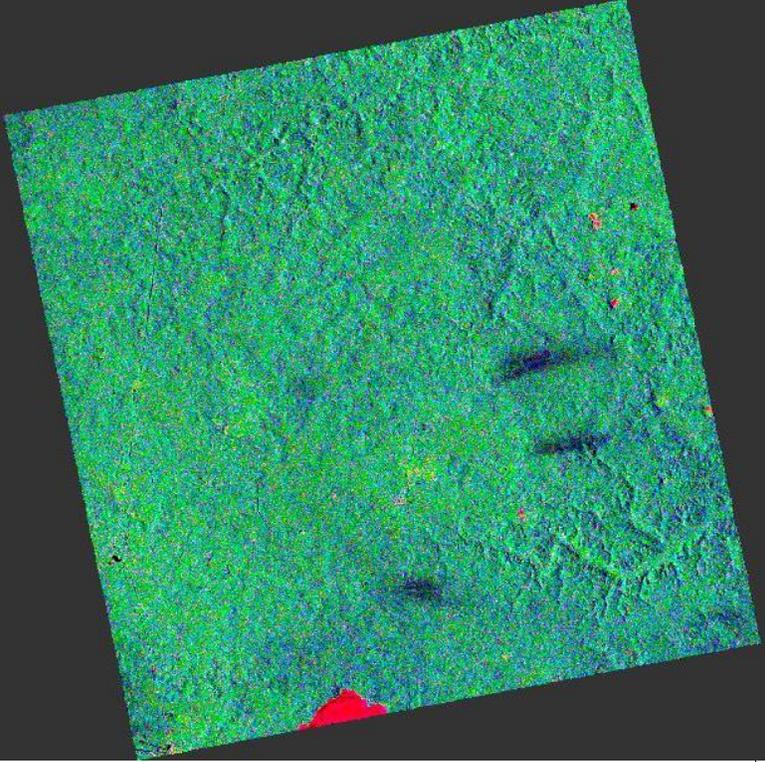
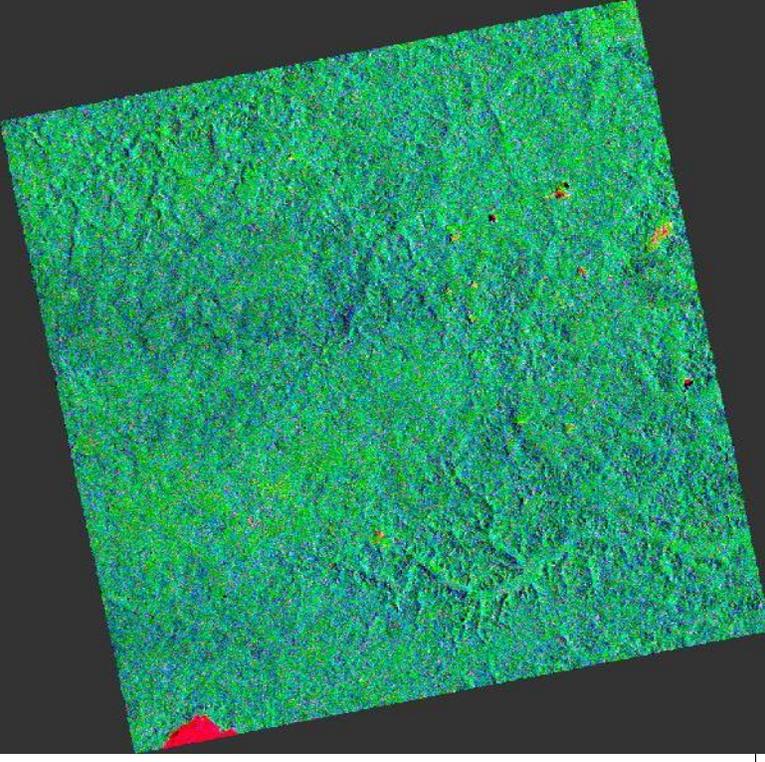
15/11/2010	36.4 – 38.0	
15/03/2011	36.4 – 38.0	

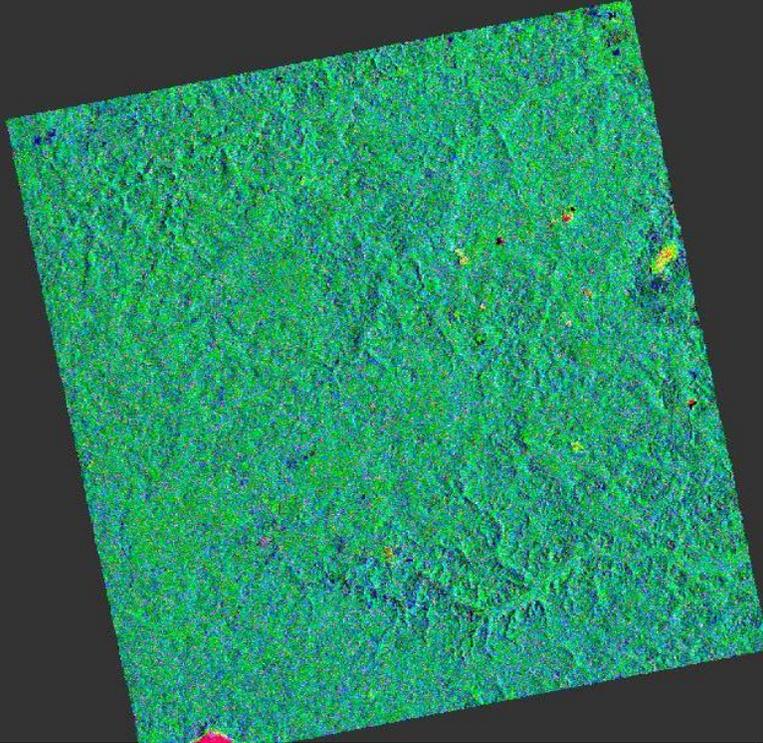
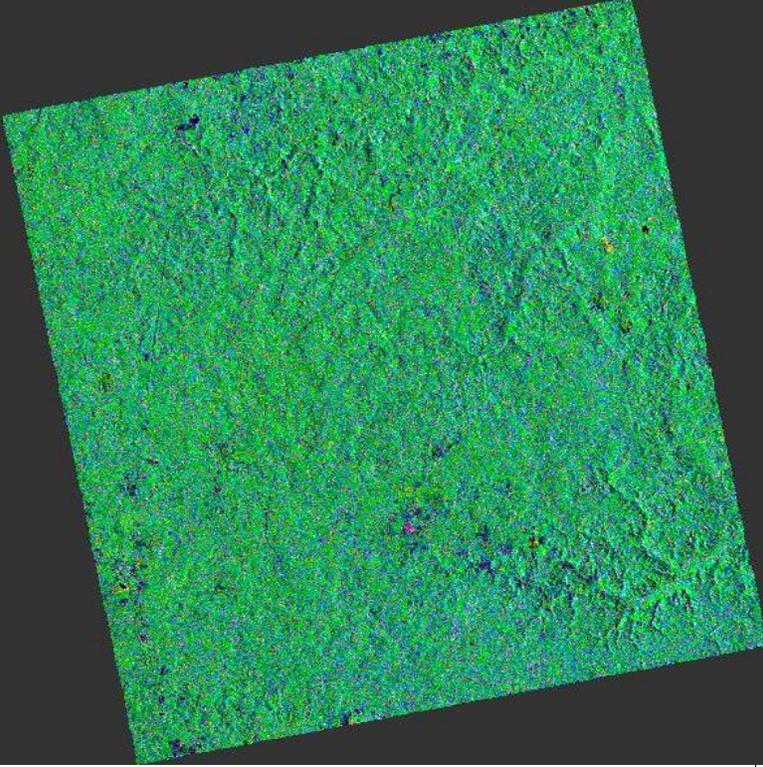
Tabla 2. Imágenes de la Zona Norte en composición RGB de las tres componentes de Freeman-Durdeen

Fecha	Ángulo de incidencia	Rojo=Interacción Verde(G)=Vegetación Azul (B)= Suelo
20/05/2010	23.4 – 25.3	

29/06/2012	41.0 – 42.4	
07/07/2012	23.4 – 25.3	

09/08/2010	35.4 – 37.0	
26/09/2012	34.4 – 36.0	

28/09/2012	37.4 – 38.9	
22/11/2010	31.3 – 33.0	

16/12/2010	31.3 – 33.0	
19/02/2011	37.4 – 38.9	

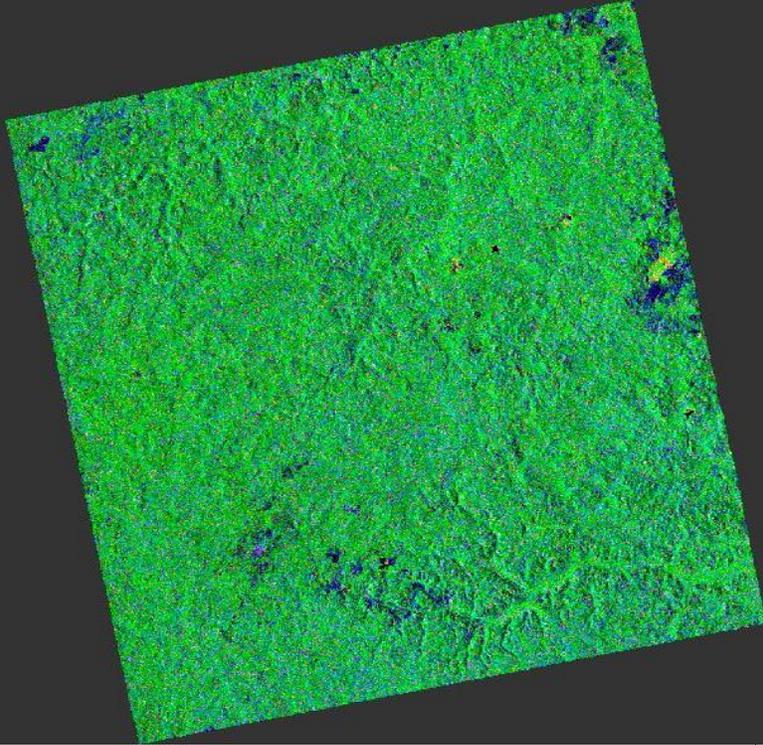
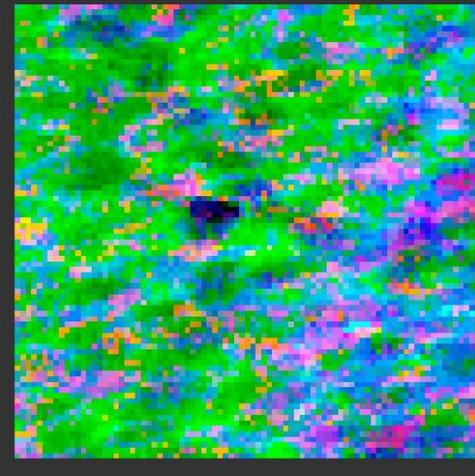
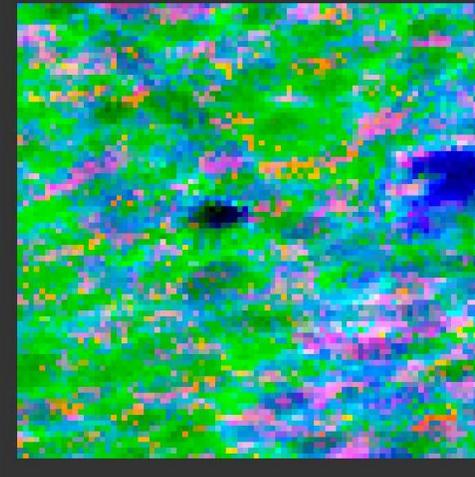
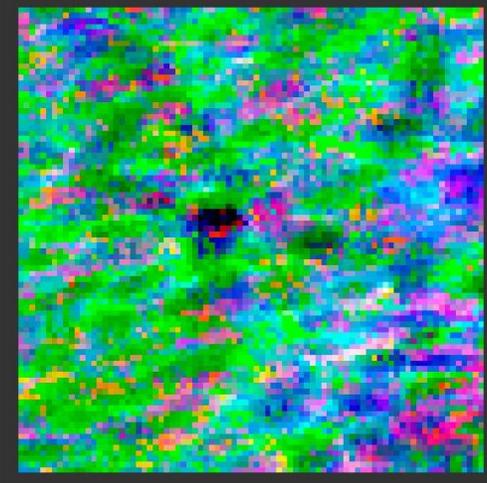
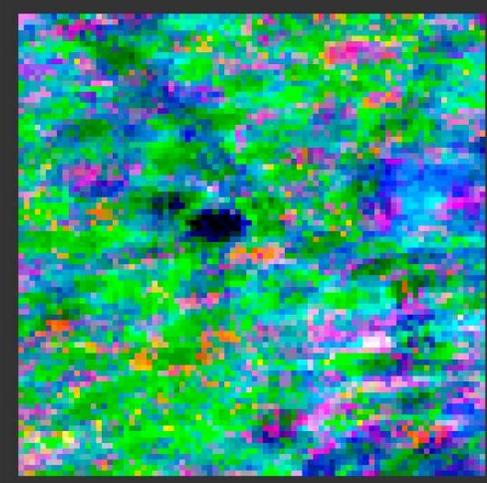
22/03/2011	31.3 – 33.0	
------------	-------------	--

Tabla 3. Zona sur, sitio Ley de Fomento

Fecha	Ángulo de incidencia	Sitio Ley de Fomento
26/04/2010	22.1 – 22.4	
20/05/2010	22.1 – 22.4	

13/06/2010	22.1 – 22.4	
07/07/2010	22.1 – 22.4	

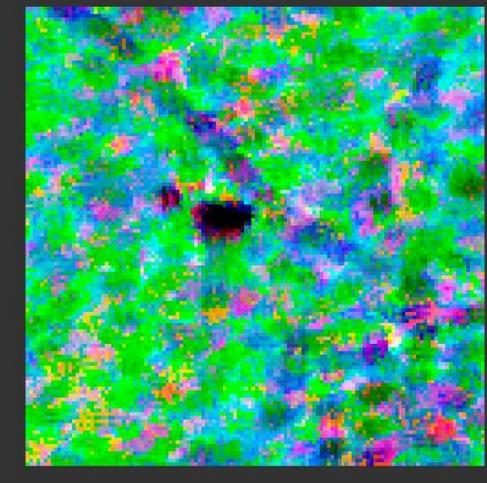
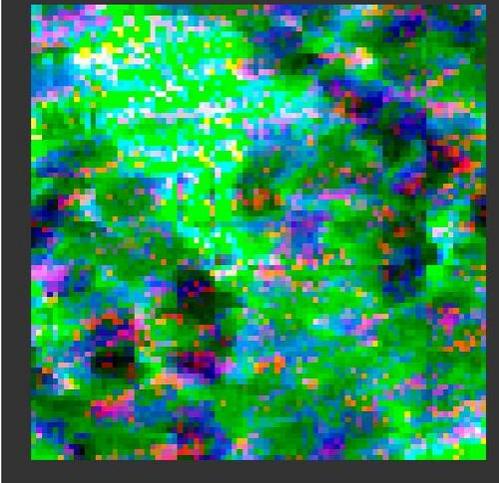
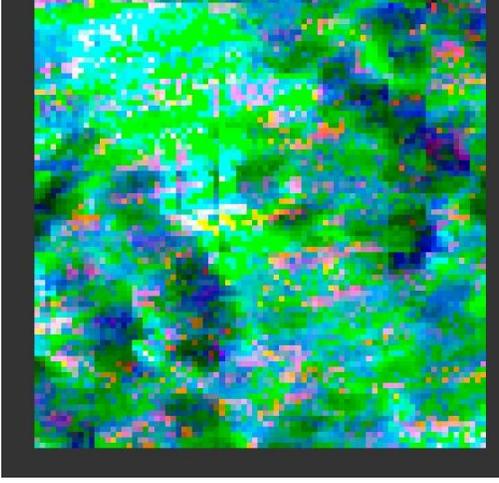
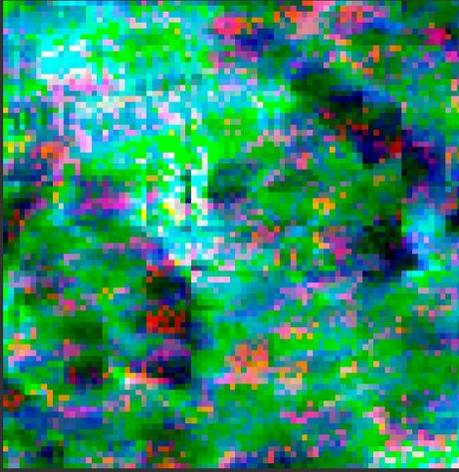
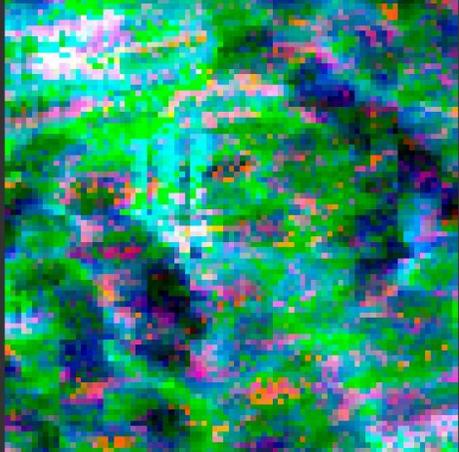
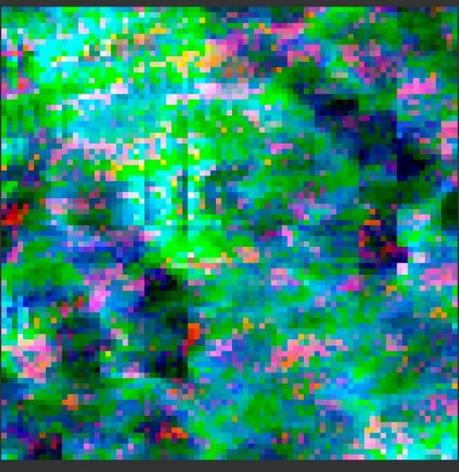
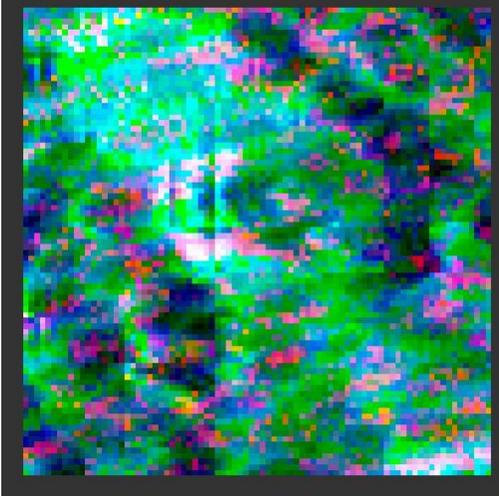
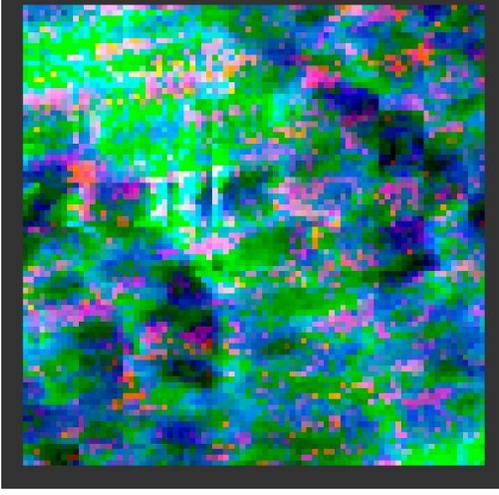
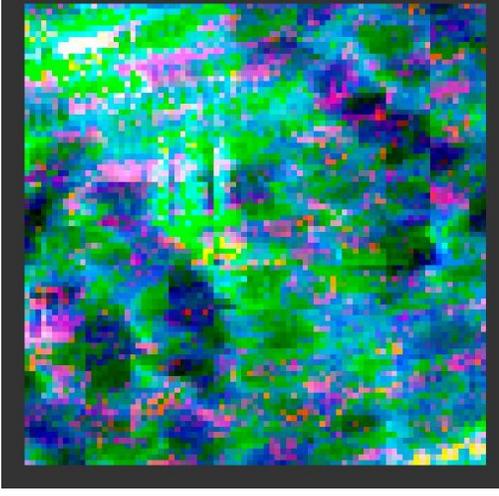
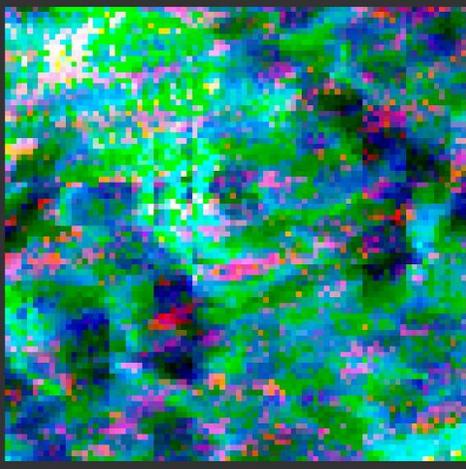
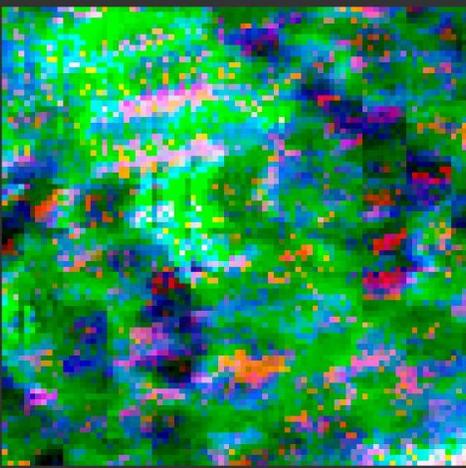
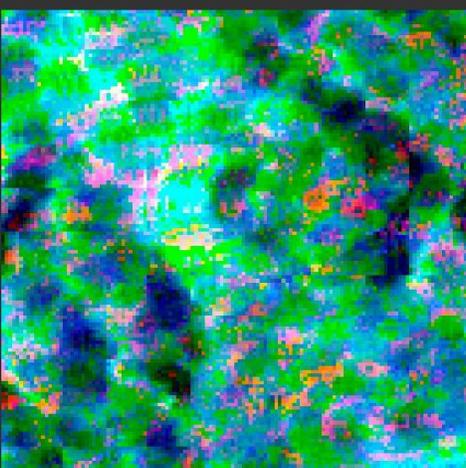
11/08/2010	36.4 – 38.0	
------------	-------------	--

Tabla 4. Zona sur, sitio Boscoso Sur

Fecha	Ángulo de incidencia	Sitio Boscoso Sur
26/04/2010	22.1 – 22.4	
20/05/2010	22.1 – 22.4	

13/06/2010	22.1 – 22.4	
07/07/2010	22.1 – 22.4	
17/09/2010	22.1 – 22.4	

11/10/2010	22.1 – 22.4	
22/12/2010	22.1 – 22.4	
15/01/2010	22.1 – 22.4	

08/02/2011	22.1 – 22.4	
21/04/2011	22.1 – 22.4	
11/08/2010	36.4 – 38.0	

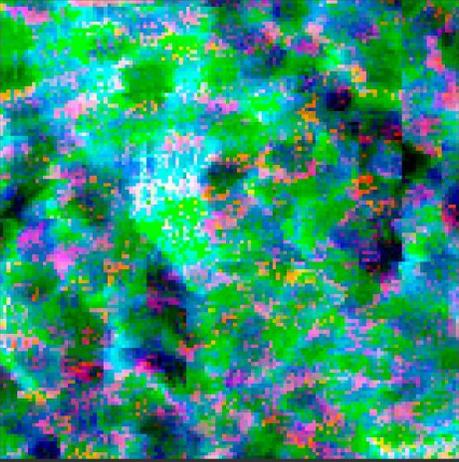
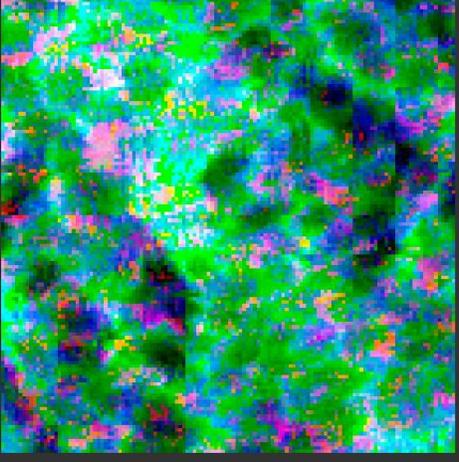
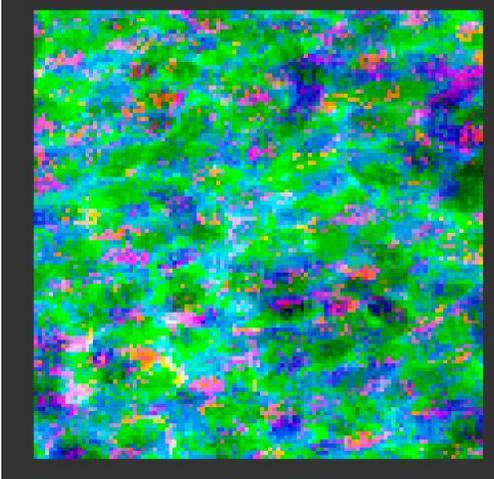
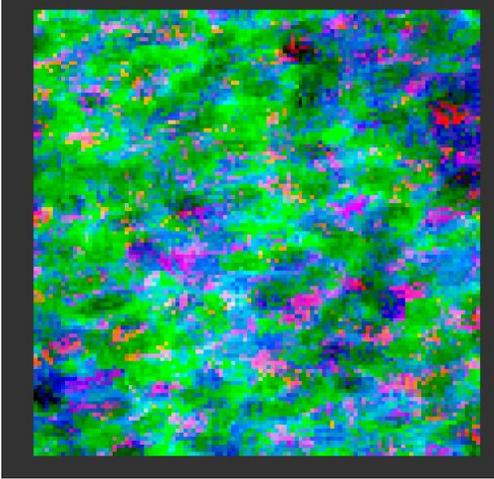
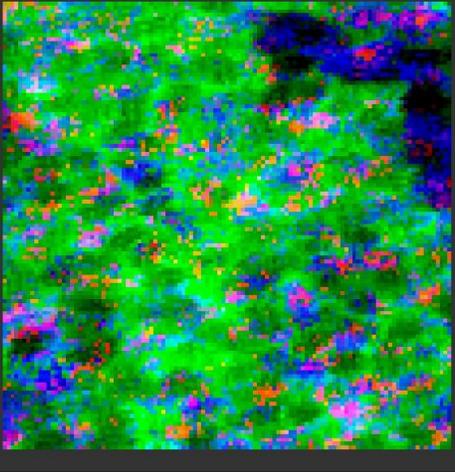
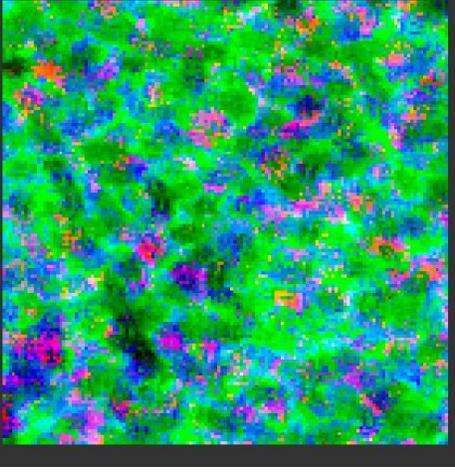
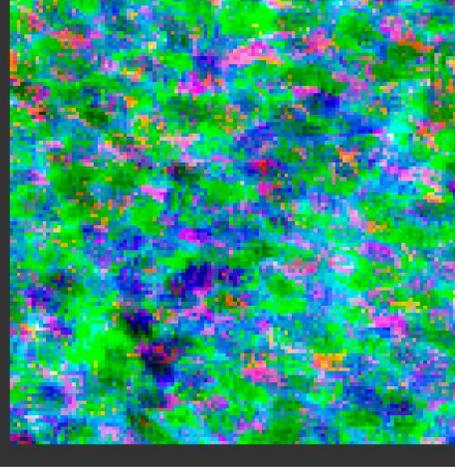
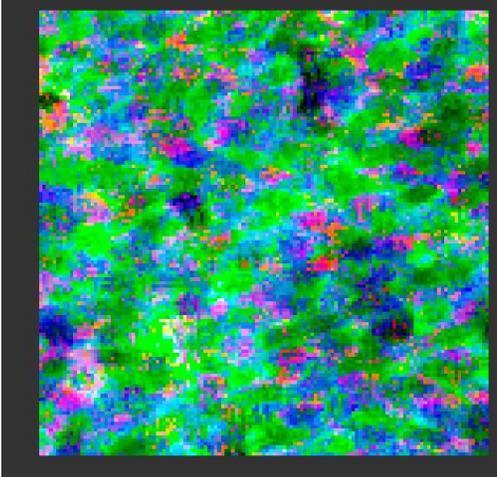
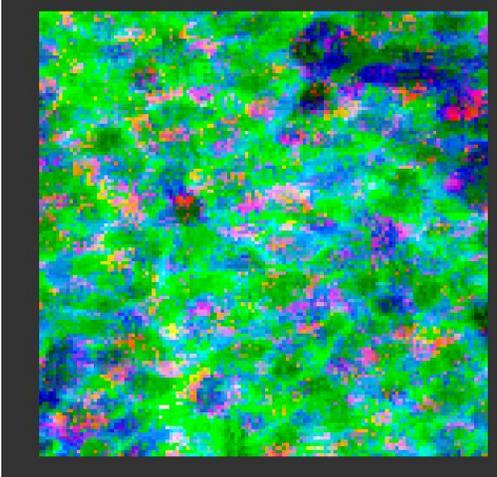
15/11/2010	36.4 – 38.0	
15/03/2011	36.4 – 38.0	

Tabla 5. Zona norte, sitio Nuevo Becal

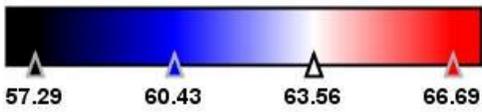
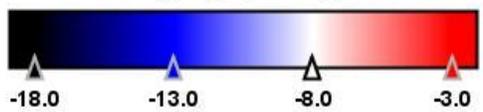
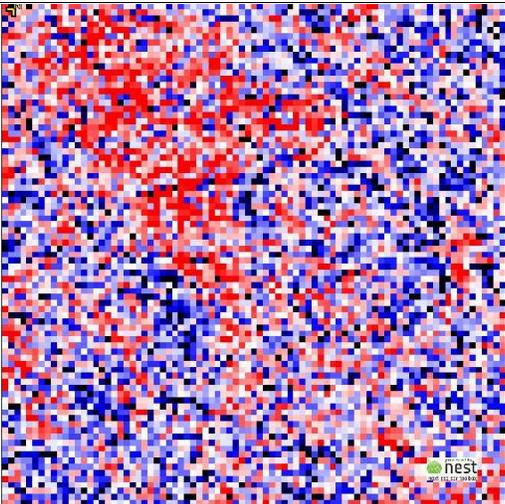
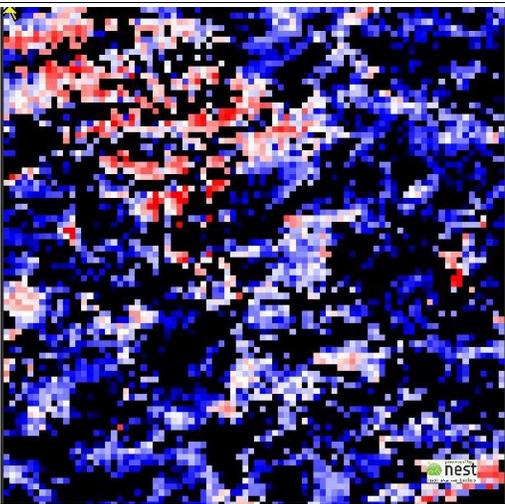
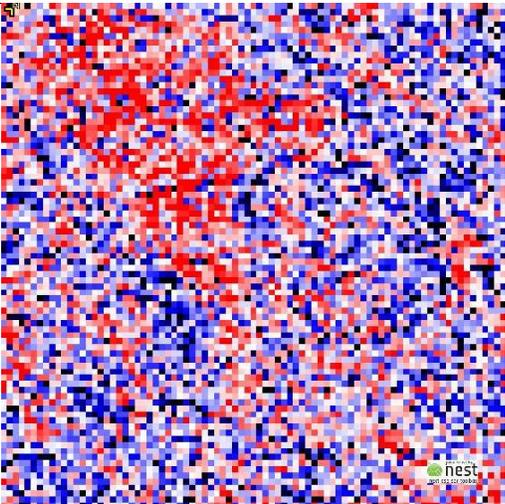
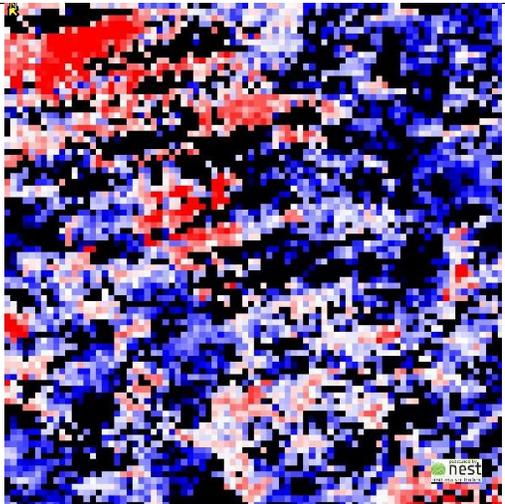
Fecha	Ángulo de incidencia	Nuevo Becal
22/11/2010	31.3 – 33°	
16/12/2010	31.3 – 33°	

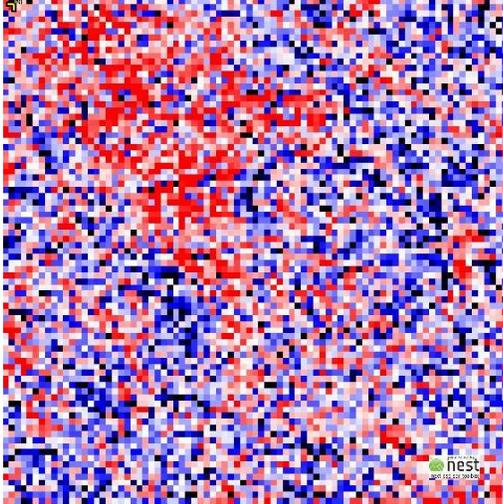
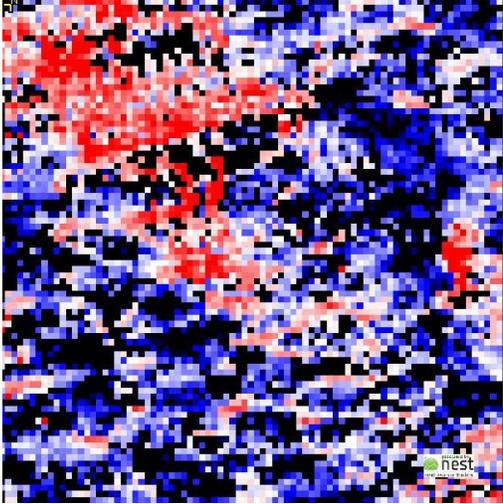
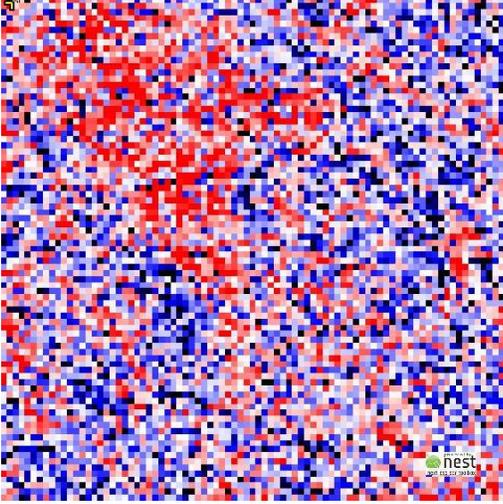
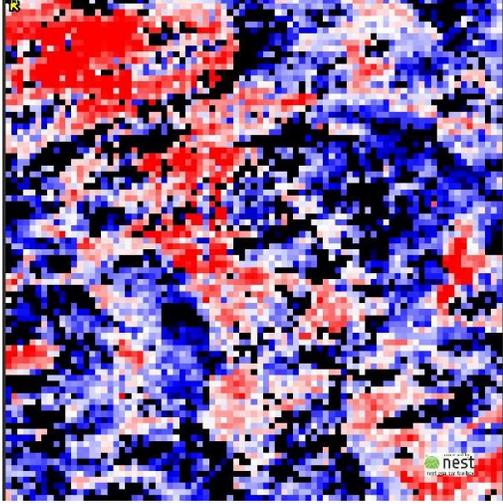
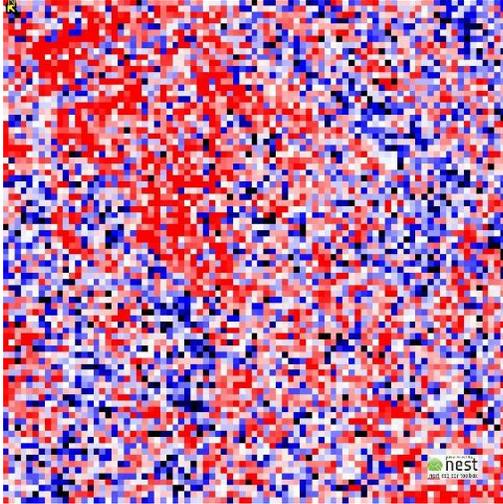
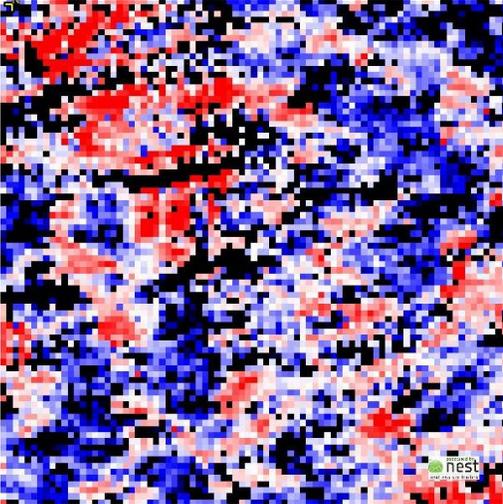
22/03/2011	31.3 – 33°	
29/06/2010	41.0 – 2.4°	
26/09/2010	34.4 – 36.0°	

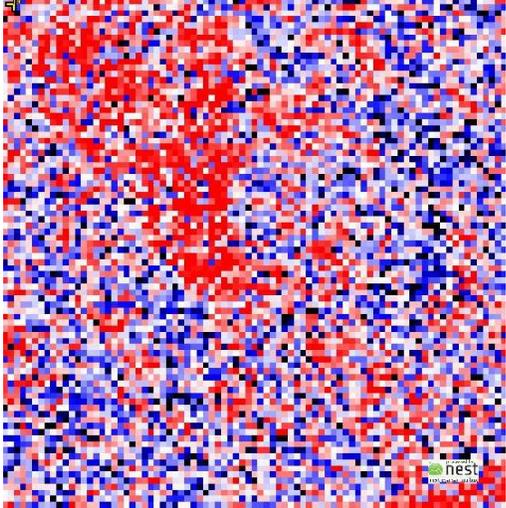
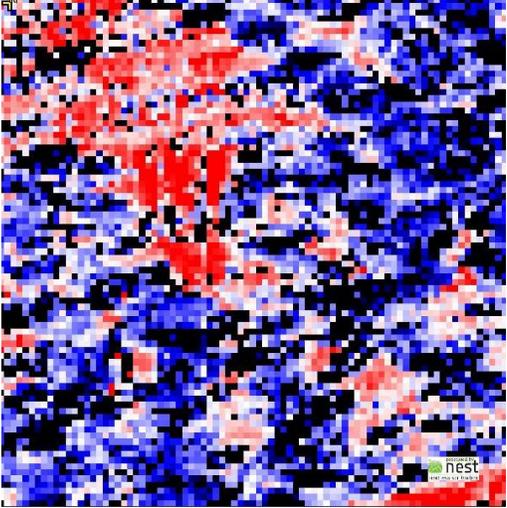
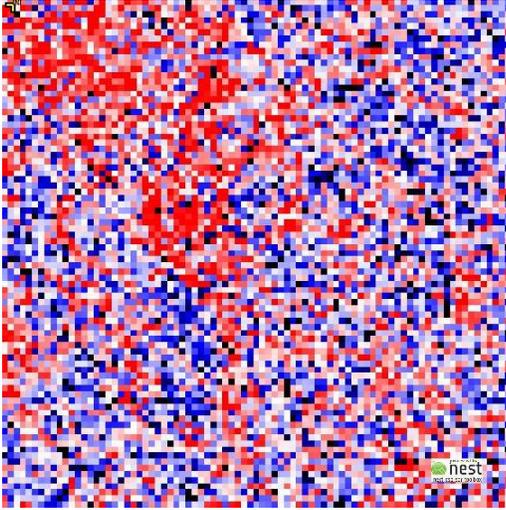
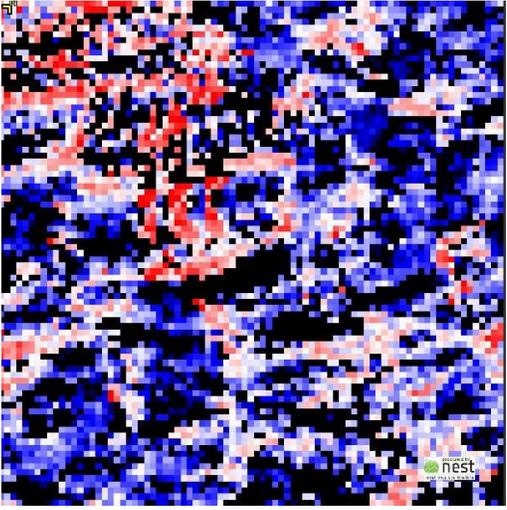
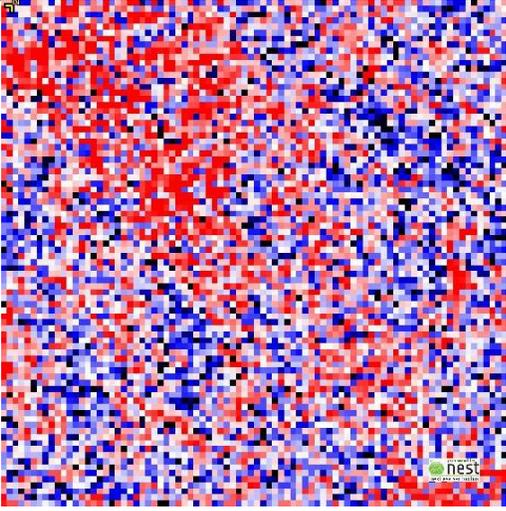
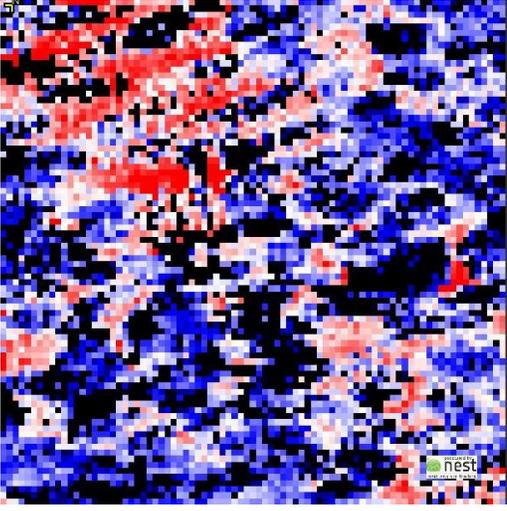
28/09/2010	37.4 – 38.9°	
19/02/2011	37.4 – 38.9°	

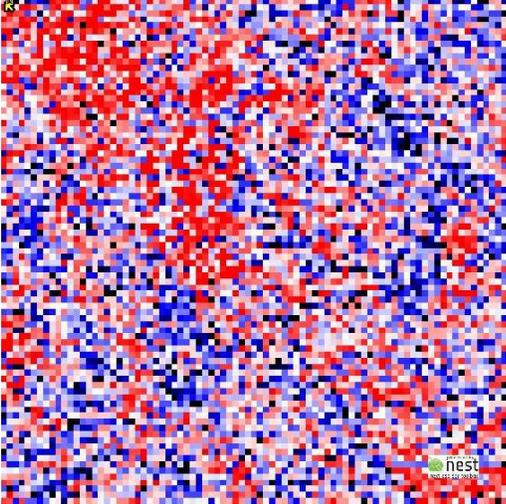
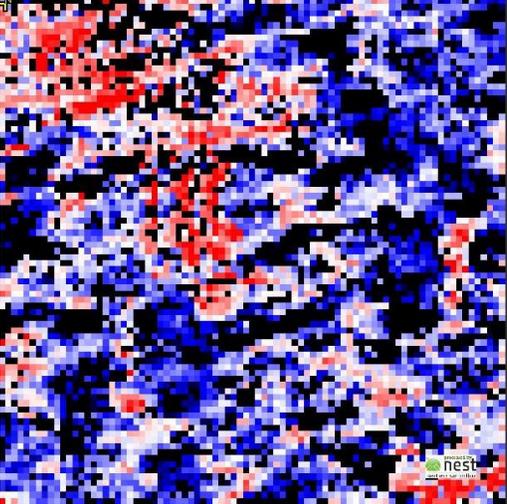
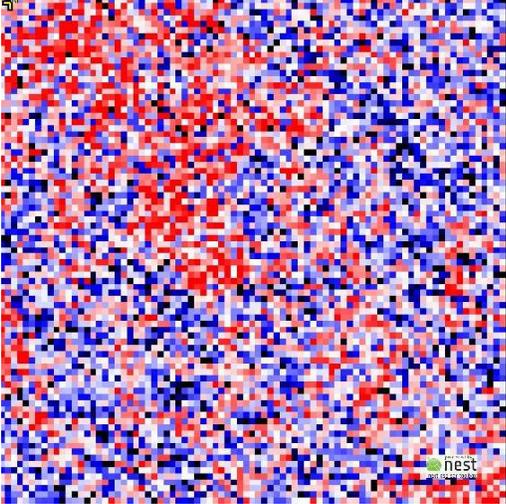
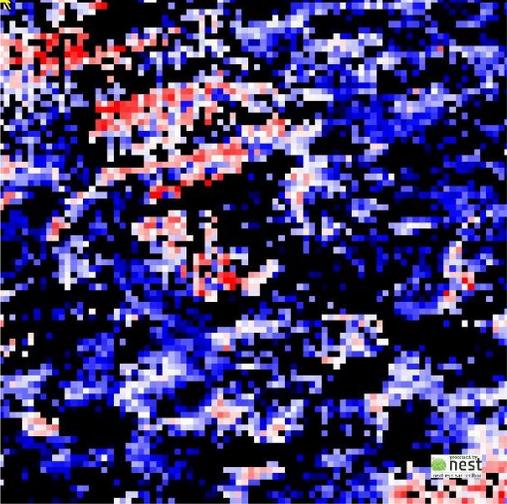
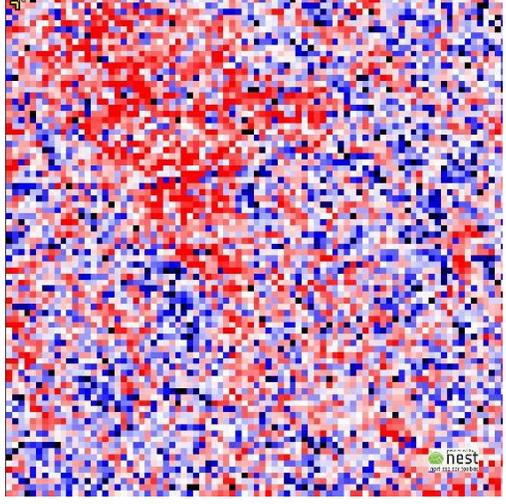
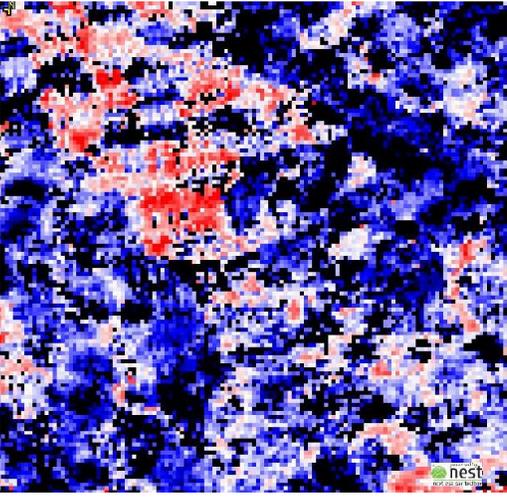
ANEXO 3. IMÁGENES DE HUMEDAD DE SUELO

Tabla 1. Imágenes humedad de suelo y de superficie de Freeman-Durden, Boscoso Sur

Fecha	humedad de suelo [%]	Freeman-Durden superficie [dB]
		
26/04/ 2010		
20/05/ 2010		

<p>13/06/ 2010</p>		
<p>07/07/ 2010</p>		
<p>17/09/ 2010</p>		

<p>11/10/ 2010</p>		
<p>22/12/ 2010</p>		
<p>15/01/ 2011</p>		

<p>08/02/ 2011</p>		
<p>21/04/ 2011</p>		
<p>11/08/ 2010</p>		

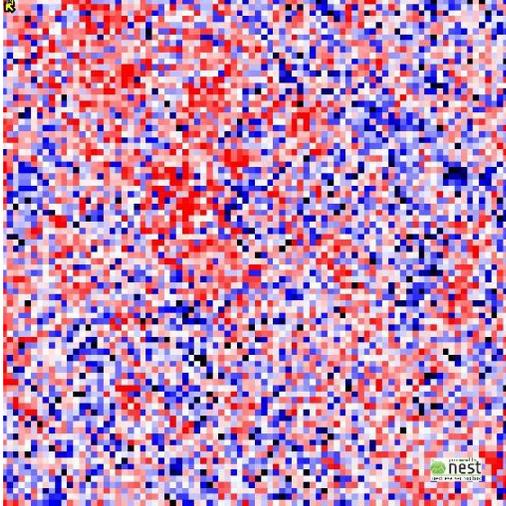
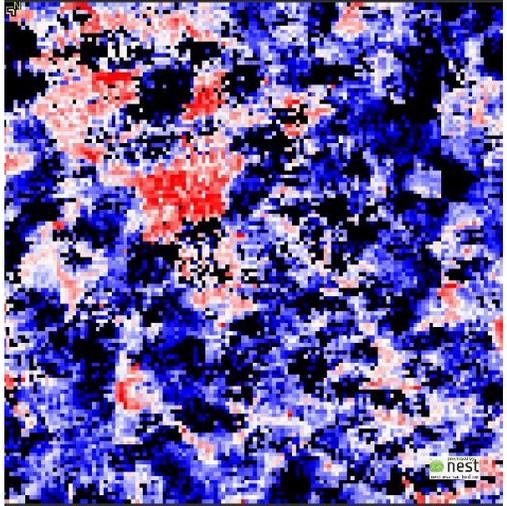
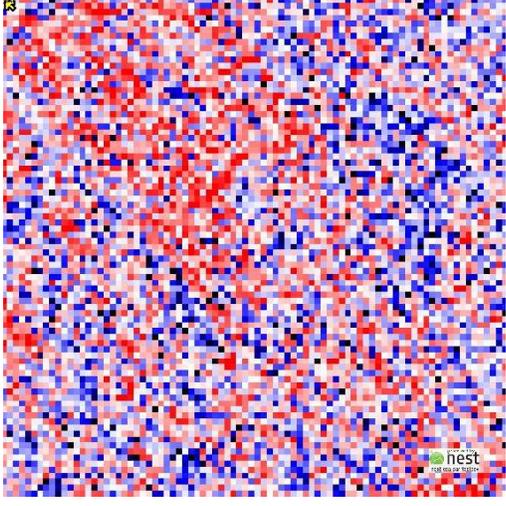
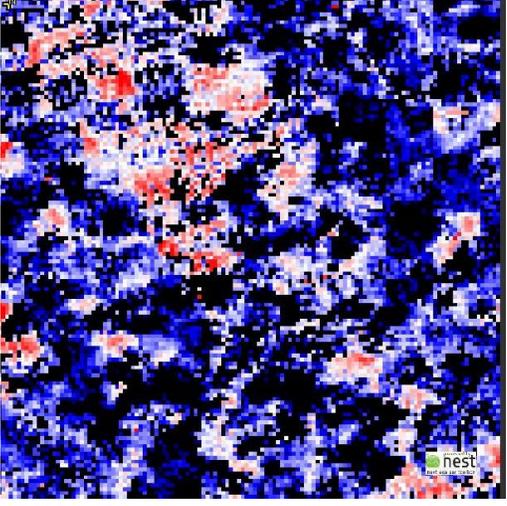
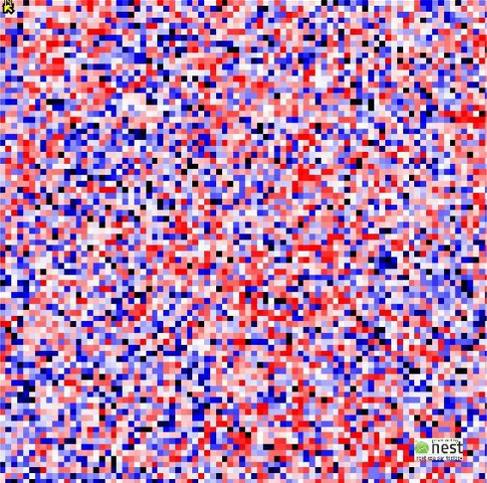
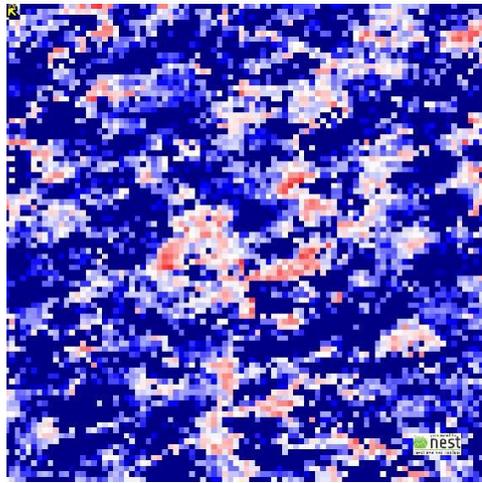
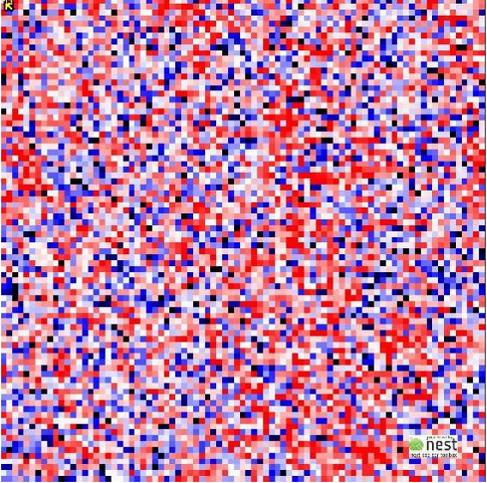
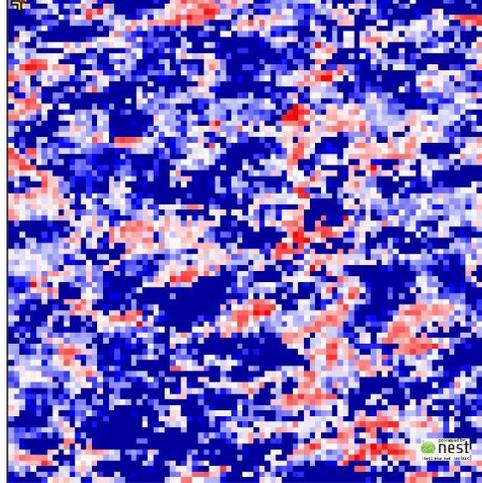
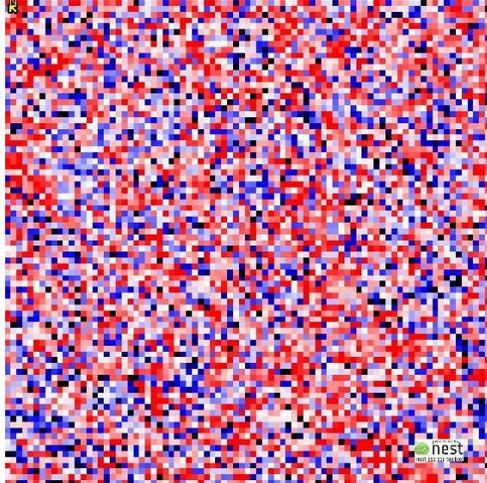
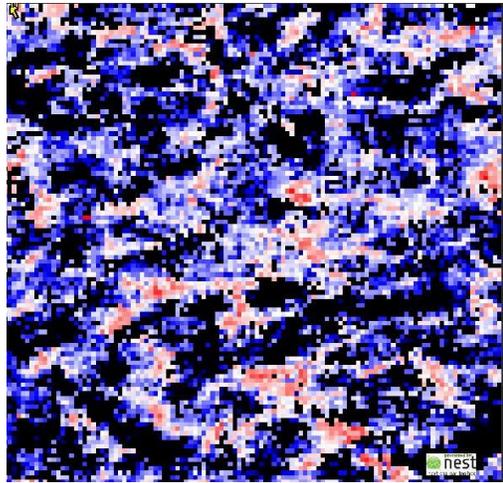
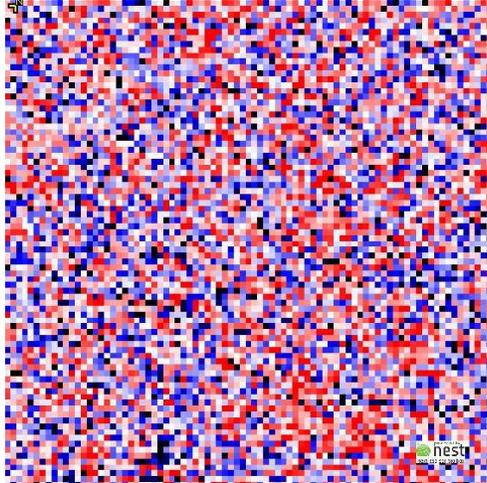
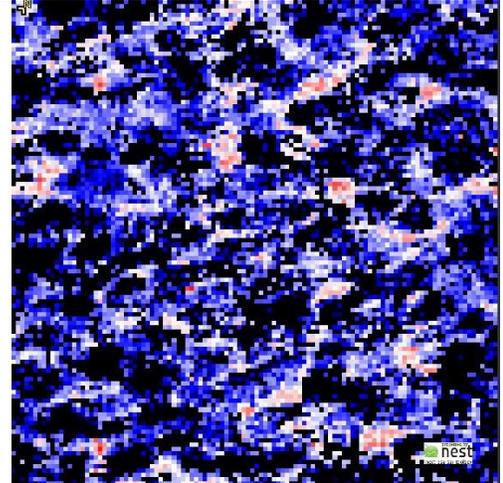
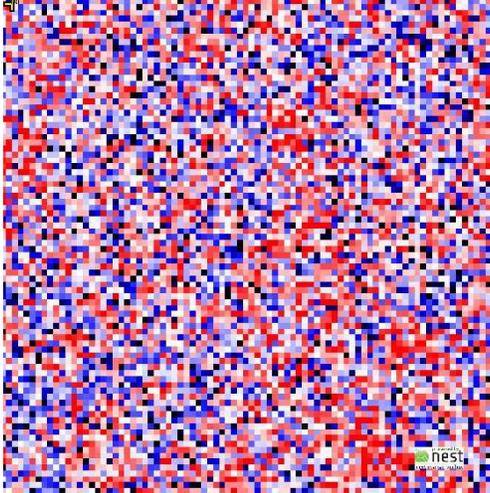
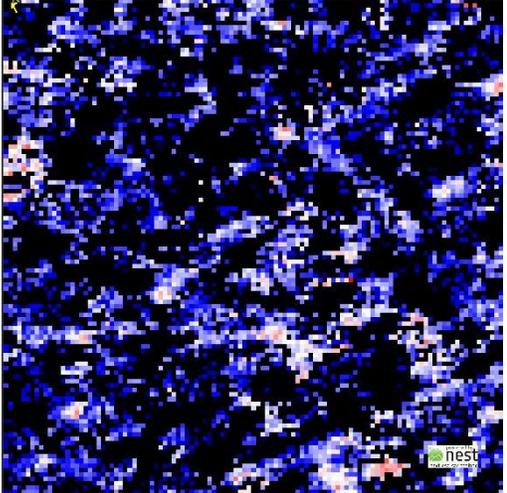
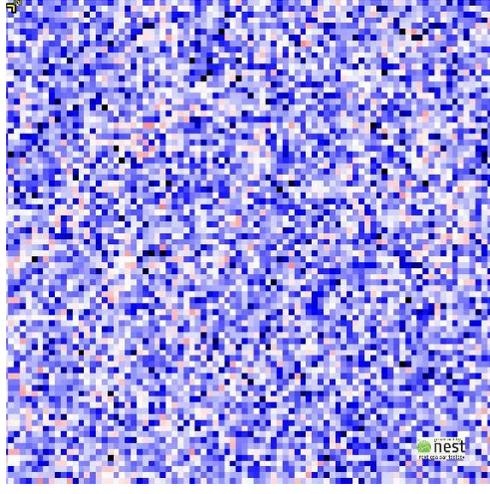
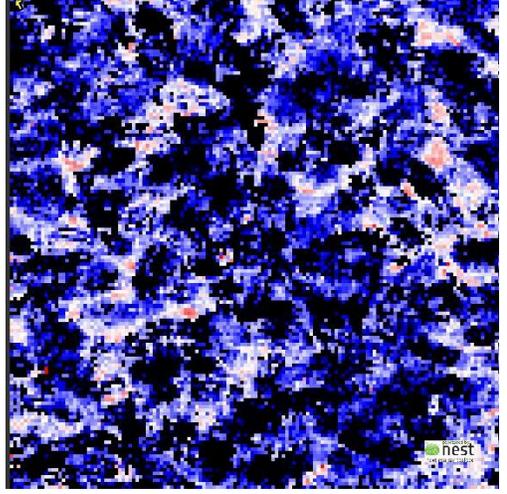
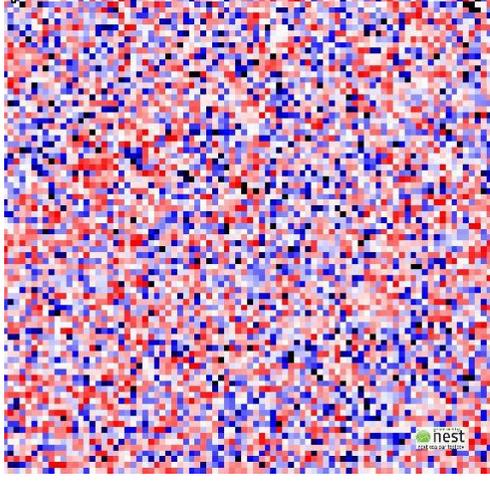
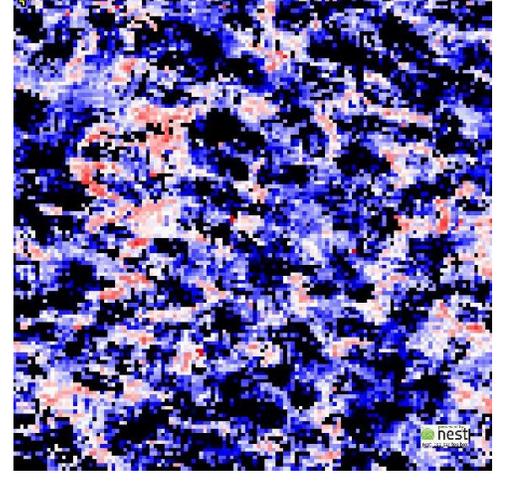
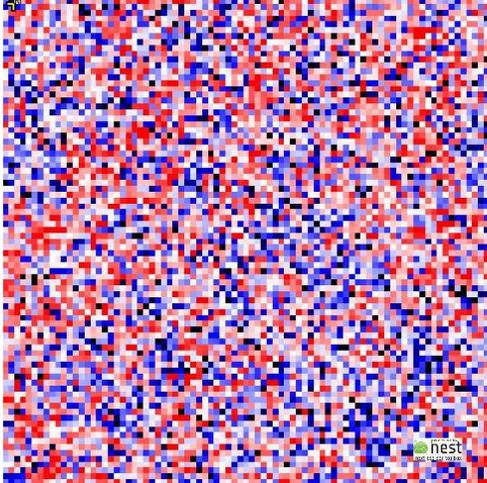
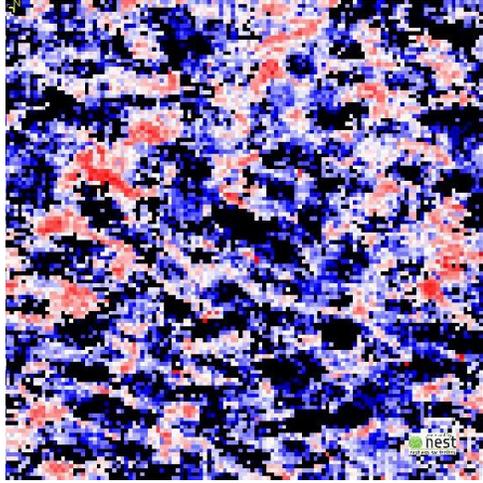
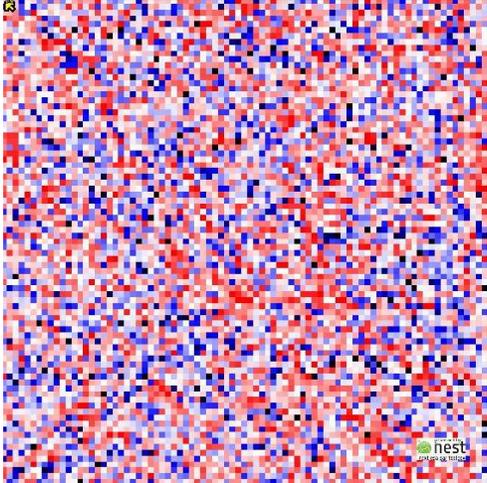
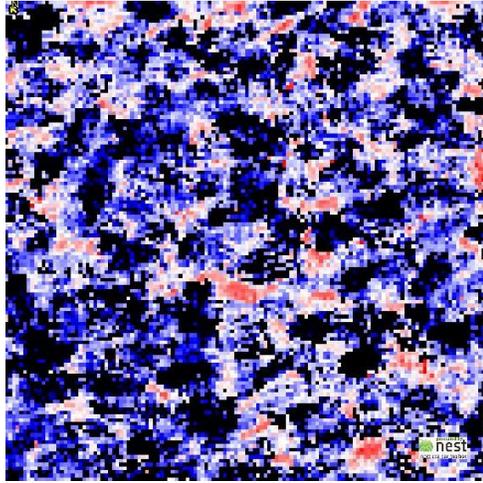
15/11/ 2010		
15/03/ 2011		

Tabla 2. Imágenes humedad de suelo y de superficie de Freeman-Durden, Boscoso Norte

Fecha	humedad de suelo [%]	Freeman-Durden superficie [dB]
20/05/ 2010 25°		
07/07/ 2010 25°		

<p>22/11/ 2010 30°</p>		
<p>16/12/ 2010 30°</p>		

<p>22/03/ 2011</p> <p>30°</p>		
<p>29/06/ 2010</p> <p>40°</p>		
<p>09/08/ 2010</p> <p>35°</p>		

<p>26/09/ 2010 35°</p>		
<p>28/09/ 2010 35°</p>		
<p>19/02/ 2011 35°</p>	