



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE MONAGAS
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
MATURÍN - MONAGAS - VENEZUELA**

**EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DEL VIGOR DE LA VEGETACIÓN
PRESENTE EN LA CUENCA DEL RÍO AREO DEL ESTADO MONAGAS
PARA EL PERÍODO 2013-2017 MEDIANTE TÉCNICAS DE
PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE SATÉLITES**

**TRABAJO DE GRADO
MODALIDAD INVESTIGACIÓN**

**PRESENTADO POR
BR. ROXANA CATALINA BRAVO ASTUDILLO C.I.: 22706943**

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO AGRÓNOMO

MATURÍN, ABRIL DE 2018



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE MONAGAS

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
SUB-COMISIÓN DE TRABAJO DE GRADO

ACTA DE EVALUACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

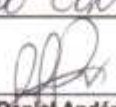
CTG-EIA-IA- 2018

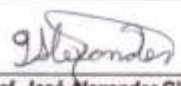
MODALIDAD: TESIS DE GRADO

ACTA N° 1874

En Maturín, siendo las 10:00 (a.m.) del día 20 de abril del 2018 reunidos en la Sala de Economía Agrícola Campus: Los Guaritos del Núcleo de Monagas de la Universidad de Oriente, los miembros del jurado profesores: Victor Malavé (Asesor Académico), Luis Daniel Andérico (Jurado), José Alexander Gil Marín (Jurado). A fin de cumplir con el requisito parcial exigido por el Reglamento de Trabajo de Grado vigente para obtener el Título de Ingeniero Agrónomo, se procedió a la presentación del Trabajo de Grado, titulado: "EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DEL VIGOR DE LA VEGETACIÓN PRESENTE EN LA CUENCA DEL RIO AREO DEL ESTADO MONAGAS PARA EL PERIODO 2013-2017 MEDIANTE TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE SATÉLITES." Por la Bachiller: ROXANA CATALINA BRAVO ASTUDILLO, C.I: 22.706.943. El jurado, luego de la discusión del mismo acuerdan calificarlo como:

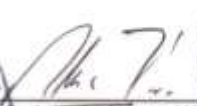
APROBADO CON MENCIÓN PUBLICACIÓN


Prof. Luis Daniel Andérico. MSc.
C.I.: 4.619.571
Jurado


Prof. José Alexander Gil Marín. Dr.
C.I.: 8.409.845
Jurado


Prof. Victor Malavé. MSc.
C.I.: 8.895.244
Asesor Académico


Prof. Nelson José Montaña Mata. Dr.
C.I.: 4.505.457
Sub-Comisión de Trabajo de Grado


Prof. Jesús Acosta. MSc.
C.I.: 11.005.240
Jefe de Departamento (E)



Según establecido en resolución de Consejo Universitario N° 034/2009 de fecha 11/06/2009 y Artículo 13 Literal J del Reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad de Oriente. "NOTA: Para que esta acta tenga validez debe ser asentada en la hoja N°- XXX del XX libro de Actas de Trabajos de Grado del Departamento de Ingeniería Agronómica, EIA de la Universidad de Oriente y estar debidamente firmada por el (los) asesor (es) y miembros del jurado."

DEL PUEBLO VENIMOS / HACIA EL PUEBLO VAMOS

DEDICATORIA

En primer lugar a mi querida madre **María Eugenia Astudillo** por creer en mí, por ser mi inspiración, mi aliento y mi apoyo incondicional.

A mi padre **Germán Francisco Bravo** que a pesar de no estar presente en mi vida constantemente, me siento orgullosa de ser su hija.

A mis amadas sobrinas **Mariannys Astudillo** y **Andrea Astudillo** para que este logro les sirva de motivación y tengan las ganas de aprender, de luchar y levantarse tras cada tropiezo porque cada día Dios nos da nuevas oportunidades.

A mi querida hermana **Yohana Andreina Astudillo** que a pesar de no compartir las mismas ideas, es una persona con un corazón gigante, llena de optimismo y valentía, así como he logrado muchas cosas hasta ahora, igualmente tienes el potencial para lograr todo lo que te propongas recordando que detrás cada atardecer siempre habrá un nuevo día.

A mi querida abuela **Sabas Astudillo** porque le debo gran parte de mi crianza, que Dios la mantenga con vida y salud.

A mi recordada abuela **Catalina Bravo de Subero** que desde el cielo guía mis pasos.

Roxana Catalina Bravo Astudillo

AGRADECIMIENTO

A **Dios** todopoderoso por darme oportunidades cada nuevo día y por cada tropiezo la fortaleza necesaria para levantarme y continuar.

A mi amada madre **María Eugenia Astudillo** por estar siempre allí para mí, por ser esa fuerza de voluntad todos los días de mi vida.

A mi gran amigo y compañero **Sebastián Flores Barrancas** por ser esa persona que me motivó y me brindó la fuerza necesaria para levantarme tras cada tropiezo y cada una de las dificultades que se me presentaron durante toda la carrera universitaria, gracias por estar desde el principio hasta el final.

A mi gran compañero de estudios **William Núñez Millán**, porque más que amigo eres como un hermano para mí, gracias por el apoyo, por las vivencias, por las motivaciones que me dabas y desde lo más profundo de mi alma, todo el éxito en la vida.

A mis compañeros de estudios **Danniela Brito, Placido Marín, Emilith Romero, Zurisadai Prieto, Manuel Ledezma y Eduardo Garcías**, por la amistad sincera y buenos deseos, de mi parte esperaré de ustedes lo mejor en cada momento para que construyan un camino exitoso.

A mi llamado compañero de tesis **Ricardo Belmonte Charmel** por pensar siempre de manera positiva ante las circunstancias y las adversidades vistas en la elaboración de este trabajo. Todo con dedicación y empeño da buenos resultados.

A **Jesús Urbano Gil** por ofrecerme su apoyo incondicional en todo momento, por sus consejos y palabras sabias que me ayudaron a ser mejor persona cada día.

A mi querido profesor y tutor **Víctor Malavé Girón** por ser el motor principal de este trabajo de investigación, gracias por la enseñanza, por el empeño, por la dedicación, por la paciencia dada yendo siempre más allá del objetivo planteado.

A todos los profesores que integran la **Escuela de Ingeniería Agronómica** por haberme brindado todos esos conocimientos requeridos durante toda mi trayectoria universitaria.

A la **Universidad de Oriente** por abrirme las puertas al camino de la preparación y el aprendizaje, donde aprendí que todo esfuerzo por más mínimo que sea, vale pena.

Roxana Catalina Bravo Astudillo

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
SUMMARY	xii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
MARCO TEÓRICO	4
ANTECEDENTES	4
CUENCA COMO UNIDAD TERRITORIAL	6
TELEDETECCIÓN	9
Sensor remoto	15
Sensores Pasivos	15
Sensores activos	16
SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	16
ESTRUCTURA DE DATOS	19
Representación de los datos	19
Aplicaciones de la Percepción Remota	20
Aplicaciones en la Agricultura	21
NATURALEZA DE LA RADIACIÓN	21
REFLECTIVIDAD DE LAS SUPERFICIES NATURALES	22
Características de la vegetación en el espectro óptico	23
ÍNDICES DE VEGETACIÓN	26
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI)	29
Índice de Vegetación Verde (GVI)	31
Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI)	31
Uso e interpretación de los Índices de Vegetación	32
PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL	34
El programa Landsat	34
Landsat 8	35
Diferencias y semejanzas de Landsat 8	36
El futuro de LDCM (Landsat 8)	39
Instrumentos en Landsat 8	40
IMÁGENES DE SATÉLITES	43
Corrección atmosférica para imágenes de satélites	44

Software utilizado para el análisis de imágenes de satélite	47
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON	47
COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN	49
MARCO METODOLÓGICO	51
UBICACIÓN DE LA CUENCA EN ESTUDIO	51
MATERIALES Y EQUIPOS	52
METODOLOGÍA	53
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	72
COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO Y GEOESPACIAL DEL VIGOR DE LA VEGETACIÓN PARA ARVI, NDVI Y GVI EN LA CUENCA DEL RÍO AREO PARA EL PERIODO EN ESTUDIO	72
DETERMINACIÓN DE DIFERENCIAS ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS TRES ÍNDICES DE VEGETACIÓN	96
MODELO DE REGRESIÓN LINEAL PARA LA SIMULACIÓN DEL VIGOR DE LA VEGETACIÓN	97
CONCLUSIONES	105
REFERENCIAS	106
HOJAS METADATOS	111

ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 1. Escenas descargadas del Landsat 8 desde el visualizador global (GLOVIS).52
- Cuadro 2. Resumen general de los resultados estadísticos obtenidos para el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI) para el periodo 2013-2017.73
- Cuadro 3. Resumen general de los resultados estadísticos obtenidos para el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para el periodo 2013-2017.74
- Cuadro 4. Resumen general de los resultados estadísticos obtenidos para el Índice de Vegetación Verde (GVI) para el periodo 2013-2017.75

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Elementos que conforman un sistema de Teledetección espacial (Chuvieco, 1995).13
- Figura 2. Longitudes de ondas en el Espectro Electromagnético (Martini, 2008).28
- Figura 3. Especificaciones de Productos LDCM a nivel 1 (USGS, 2013).38
- Figura 4. Promedio de la respuesta espectral relativa en LDCM (Ariza, 2013)39
- Figura 5. Rangos espectrales y tamaños de pixel de bandas en el sensor OLI (USGS y NASA, 2013.)41
- Figura 6. Diagramas de dispersión (Morales, 2011)48
- Figura 7. Ubicación geográfica del río Areo del Estado Monagas, Venezuela51
- Figura 8. Histograma que muestran la frecuencia para ARVI en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.78
- Figura 9. Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.79
- Figura 10. Histograma que muestra la frecuencia para NDVI en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.80
- Figura 11. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.81
- Figura 12. Histograma que muestra la frecuencia para el GVI en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.82
- Figura 13. Índice de Vegetación Verde en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.83
- Figura 14. Histograma que muestra la frecuencia para ARVI en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.84
- Figura 15. Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.85
- Figura 16. Histograma que muestra la frecuencia para el NDVI en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.86
- Figura 17. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.87
- Figura 18. Histograma que muestra la frecuencia para el GVI en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.88
- Figura 19. Índice de Vegetación Verde en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.89
- Figura 20. Histograma que muestra la frecuencia para ARVI en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017.90

- Figura 21. Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017.91
- Figura 22. Histograma que muestra la frecuencia para el NDVI en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017.92
- Figura 23. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017.93
- Figura 24. Histograma que muestra la frecuencia para el GVI en la cuenca del río para el 16 de febrero del 2017.94
- Figura 25. Índice de Vegetación Verde en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017.95
- Figura 26. Resumen del Análisis de Varianza.96
- Figura 27. Nivel de Significancia para rangos p-values (Verzani, 2005)96
- Figura 28. Resultados que muestran la desviación estándar para los tres índices de vegetación.97
- Figura 29. Resumen para el modelo polinómico de grado 5.98
- Figura 30. Resumen numérico del modelo polinómico de grado 5 para la predicción de la fecha dada.98
- Figura 31. Resumen para el modelo polinómico de grado 6.99
- Figura 32. Resumen numérico del modelo polinómico de grado 6 para la predicción de la fecha dada.99
- Figura 33. Resumen para el modelo polinómico de grado 7.100
- Figura 34. Resumen numérico del modelo polinómico de grado 7 para la predicción de la fecha dada.100
- Figura 35. Resumen numérico del modelo polinómico de grado 8 para la predicción de la fecha dada que muestra valores fuera de rango.101
- Figura 36. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera para el periodo 2013-2017.103
- Figura 37. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para el periodo 2013-2017.104
- Figura 38. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación Verde para el periodo 2013-2017.104



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE MONAGAS
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DEL VIGOR DE LA VEGETACIÓN
PRESENTE EN LA CUENCA DEL RÍO AREO DEL ESTADO MONAGAS
PARA EL PERÍODO 2013-2017 MEDIANTE TÉCNICAS DE
PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE SATÉLITES.**

Autor: Roxana Bravo

RESUMEN

La evaluación multitemporal del vigor de la vegetación con tres índices de vegetación (ARVI, NDVI y GVI) realizado durante un periodo determinado en la cuenca hidrográfica del río Areo perteneciente en su gran parte al estado Monagas, se realizó mediante las técnicas de procesamiento digital de imágenes obtenidas del satélite Landsat 8 y procesadas con el software libre GRASS para el análisis gráfico y el software R para análisis estadísticos conjuntamente con un paquete llamado Tinn-R. Como resultado se obtuvo que para los tres índices de vegetación el valor mínimo se presentó el 2 de mayo de 2015 mientras que el valor máximo para ARVI y NDVI resultó el 15 de enero de 2017 y por consiguiente, GVI lo obtuvo el 9 de septiembre de 2016. Existió diferencia estadísticamente significativa entre los tres índices de vegetación tanto ARVI como el NDVI tuvieron un comportamiento similar, en cambio GVI resultó un índice con menor variabilidad. En la representación gráfica la mayor vegetación se situó hacia el norte de la cuenca. Con la obtención de los resultados se creó un modelo matemático de tipo polinómico para predecir el vigor de la vegetación en meses siguientes. La expresión para el modelo matemático resultó de grado 7: $y = 2,270 \times 10^{-1}X - 5,665 \times 10^{-2}X^2 + 5,702 \times 10^{-3}X^3 - 2,880 \times 10^{-4}X^4 + 7,731 \times 10^{-6}X^5 - 1,055 \times 10^{-7}X^6 + 5,762 \times 10^{-10}X^7 + 2,238 \times 10^{-2}$. El comportamiento multitemporal del vigor de la vegetación de acuerdo a la línea de tendencia indicó que este va aumentando a través del tiempo, lo que indica que la salud de la vegetación será mejor y por ende mayor vigor.

Palabras clave: Índice de Vegetación, Modelo de regresión, Vigor, Landsat 8.



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE MONAGAS
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**MULTITEMPORAL EVALUATION OF THE VIGOR OF VEGETATION
PRESENT IN THE BASIN OF THE AREO RIVER OF THE MONAGAS
STATE FOR THE PERIOD 2013-2017 BY MEANS OF TECHNIQUES OF
DIGITAL PROCESSING OF SATELLITE IMAGES.**

Author: Roxana Bravo

SUMMARY

The multi-temporal evaluation of the vigor of the vegetation with three vegetation indexes (ARVI, NDVI and GVI) carried out during a given period in the Areo River watershed, for the most part part of the Monagas state, was carried out using digital processing techniques. images obtained from the Landsat 8 satellite and processed with GRASS free software for graphic analysis and R software for statistical analysis together with a package called Tinn-R. As a result, it was obtained that for the three vegetation indices the minimum value was presented on May 2, 2015 while the maximum value for ARVI and NDVI was on January 15, 2017 and therefore, GVI obtained it on September 9, 2016. There was a statistically significant difference between the three vegetation indices, both ARVI and NDVI had a similar behavior, whereas GVI was an index with less variability. In the graphic representation, the greatest vegetation was located towards the north of the basin. With the obtaining of the results a mathematical model of polynomial type was created to predict the vigor of the vegetation in following years. The expression for the mathematical model turned out to be grade 7: $y = 2,270 \times 10^{-1}X - 5,665 \times 10^{-2}X^2 + 5,702 \times 10^{-3}X^3 - 2,880 \times 10^{-4}X^4 + 7,731 \times 10^{-6}X^5 - 1,055 \times 10^{-7}X^6 + 5,762 \times 10^{-10}X^7 + 2,238 \times 10^{-2}$. The multitemporal behavior of the vigor of the vegetation according to the trend line indicated that it is increasing over time, which indicates that the health of the vegetation will be better and therefore greater vigor.

Keywords: Vegetation Index, Regression Model, Vigor, Landsat 8.

INTRODUCCIÓN

Las coberturas vegetales pueden verse notablemente afectadas por muchos factores y se consideran importantes cuando están relacionadas con cuencas hidrográficas de las cuales se abastecen comunidades. El recurso vegetación, que es uno de los principales actores del ciclo hidrológico, así como protector de la superficie del suelo y fuente de energía para la especie animal, debe ser evaluado y monitoreado constantemente brindando protección permanente a los recursos naturales que interactúan en una cuenca hidrográfica.

Gracias a los avances tecnológicos, existen técnicas de teledetección que permiten evaluar el vigor de la vegetación presente en cualquier sitio de interés, conociéndose como índices de vegetación que son monitoreados a través de los satélites de la tierra.

Es tan importante conocer sus diferentes aplicaciones que de una u otra manera nos permiten predecir cambios a futuro sobre la salud de la vegetación, proporcionan rapidez y precisión en los estudios ambientales, facilitando la evaluación, análisis, toma de decisión y puesta en marcha de proyectos en espacios ecológicamente amenazados.

Estas técnicas de teledetección permiten alcanzar un conocimiento global de cualquier región de la superficie de la tierra a partir de imágenes provenientes de sensores remotos a bordo de plataformas satelitales, que pueden ser de fácil acceso a cualquier persona o institución y siendo más provechoso aún porque las imágenes pueden obtenerse totalmente gratis desde la web con tan solo tener un acceso a internet.

En el trabajo de investigación realizado que se muestra a continuación, se evaluaron los cambios que se han sobrevenido en un periodo de tiempo determinado respecto al vigor de la vegetación presente en la cuenca del río Areo, ubicada al nor-este del estado Monagas, los cuales arrojaron la información necesaria para poder inferir acerca de cómo ha sido la evolución del vigor de la vegetación, poder predecir el vigor en años siguientes, y hacer seguimiento a la cuenca.

Para poder llevar a cabo dicha investigación, ésta se realizó mediante el satélite de la familia Landsat, siendo estos los más conocidos, y específicamente con el último en lanzarse, el Landsat 8. El estudio de esta investigación es provechoso para los futuros trabajos a realizarse y brinda un conocimiento más amplio acerca de las técnicas de teledetección para su aplicación en diferentes problemas tanto en el ámbito económico, ecológico, social y agronómico.

Justificando el provecho que puede obtenerse del uso de las técnicas de teledetección para la evaluación del vigor de la vegetación presente en cuencas hidrográficas o en determinadas zonas, está demás decir la razón para la consecución del objetivo del presente trabajo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Describir la evolución del vigor de la vegetación presente en la cuenca del río Areo del estado Monagas, para el periodo comprendido entre 2013 a 2017.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar el comportamiento estadístico de los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), verde (GVI) y resistente a la atmósfera (ARVI) para la cuenca del río Areo, manifestados en el periodo 2013-2017.
2. Determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los índices de vegetación: normalizado (NDVI), verde (GVI) y resistente a la atmósfera (ARVI) para la cuenca del río Areo, considerando su valor promedio calculado en el periodo 2013-2017.
3. Caracterizar el comportamiento geoespacial del vigor de la vegetación presente en la cuenca del río Areo, para el periodo en estudio.
4. Construir un modelo matemático de tipo polinómico para la simulación del vigor de la vegetación de la cuenca del río Areo.

MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES

En un trabajo de Hernández (2010), donde evaluó la evolución del comportamiento del vigor de la vegetación de acuerdo a los índices de vegetación ARVI, NDVI, EVI y SAVI a través de imágenes de satélites provenientes del Landsat 5-7 TM y ETM+, en la cuenca del río Areo del Estado Monagas para el periodo 1986-2001. Determinó la ubicación y área de la cuenca, aplicó tres métodos de corrección atmosférica, grado de correlación para los índices y patrón de cambio respecto al vigor de la vegetación. Como resultado obtuvo que de los tres métodos de corrección se seleccionó el Algoritmo 6S por presentar mejor homogeneidad, el índice en mostrar mejor comportamiento del vigor de la vegetación presentando menor error estándar fue el SAVI. Por otra parte, hubo diferencias estadísticamente significativas entre los índices evaluados y hubo una correlación temporal donde EVI mostró valores idóneos en el grado 5, siendo SAVI el más homogéneo en sus resultados.

Por otra parte, González (2012) comparó los Índices de vegetación NDVI, SAVI, GEMI y PVI en su capacidad para presentar el vigor de la vegetación en la cuenca del río Aragua del Estado Anzoátegui. En primera instancia calculó la ubicación y los parámetros morfométricos de la cuenca, aplicó el método de reflectividad para la corrección atmosférica y así obtener el valor para cada índice. Como resultado obtuvo que el índice en mostrar el mejor comportamiento del vigor de la vegetación presentando menor coeficiente de variación fue GEMI. En la comparación de cada índice de

vegetación con la clasificación no supervisada, el NDVI resultó ser el mejor en describir la evolución del vigor de la vegetación.

Por consiguiente, Carvacho y Sánchez (2010) donde compararon cinco índices de vegetación, NDVI, SAVI, ARVI, Green NDVI y EVI, calculados a partir de imágenes MODIS en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. Determinaron las características de sus comportamientos según cubiertas vegetales distintas, zonas agrícolas, praderas y forestal, y dos periodos contrastados a lo largo del año, verano e invierno de los años 2001, 2003 y 2005. Los resultados arrojaron que estos índices son semejantes, pero que si existen diferencias localizadas haciendo evidente la necesidad de elegir correctamente el tipo de índice de acuerdo a las necesidades que cada investigación requiera concibiendo particular énfasis en la necesidad de contar con una mayor discriminación de cubiertas vegetales para hacer una evaluación más refinada de las semejanzas y diferencias entre los índices estudiados.

En este mismo sentido, Aguilar (2014) evaluó tres índices de vegetación como estimadores de cambios de diferentes tipos de cobertura vegetal en la provincia de Loja al sur de Ecuador. Los índices empleados fueron: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI, Índice de Estrés Hídrico MSI y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI, aplicados a imágenes provenientes de dos sensores, Landsat 7 ETM+ y ASTER. Además aplicó técnicas de análisis espacial como kriging para establecer superficies climáticas, generadas a partir de datos de precipitación y temperatura para verificar la relación del vigor vegetal de las coberturas, dada por los valores de los índices de vegetación, con respecto a esas variables climáticas. Los resultados mostraron que los tres índices de vegetación permitieron discriminar los diferentes tipos de cobertura vegetal analizadas y que no

hubo diferencias significativas entre los tres. En cuanto a la capacidad para estimar el estado de las coberturas el MSI fue el índice que tuvo ligeramente mejor correspondencia entre sus valores y los estados de las coberturas vegetales en las dos imágenes. Sin embargo, las insuficiencias y vacíos de datos climáticos en el área de estudio no permitieron obtener superficies de precipitación y temperatura adecuadas y esto influyó al momento de establecer correlaciones entre estas variables climáticas y los índices de vegetación, por tanto, no se encontraron correlaciones significativas.

Por último, Boix (2015) evaluó en primer lugar y mediante distintas técnicas de teledetección, la producción agrícola de cítricos a partir de datos de sensores remotos en la cuenca del río Guadalhorce y en segundo lugar evaluó las respuestas de índices de vegetación (NDVI, SAVI, EVI, PVI y TSAVI) en parcelas de cítricos con distintos niveles de cobertura y suelo, con el propósito de estimar su producción en el periodo 2000-2011. Como resultados obtuvo que el NDVI y SAVI, fueron los mejores en reflejar la cubierta de cultivo en la zona y su relación con la actividad productiva mientras que los índices PVI y TSAVI mostraron relación, resultando aún más débil. Sin embargo, el índice EVI mostró una alta restrictividad, con una correlación negativa o ninguna con el rendimiento.

CUENCA COMO UNIDAD TERRITORIAL

Para Ordoñez (2011) la cuenca es una unidad del territorio en donde funciona la combinación de un subsistema hídrico que produce agua, simultáneamente con los subsistemas ecológico, económico, social y político. Un rápido resumen de las funciones, valores y beneficios de las cuencas pone de manifiesto que éstas son un elemento clave para hacer frente a la

crisis ambiental; debido a que los principales beneficios de las cuencas, son fruto de las funciones inherentes a los ecosistemas.

Una cuenca hidrográfica se refiere a la definición geográfica de la misma, es el contorno o límite de la misma que drena agua en un punto en común. Dentro de los términos que generalmente se utilizan para definir e identificar los componentes que identifican las características de una cuenca se tiene:

❖ **Cuenca**

Sistema integrado por varias subcuencas o microcuencas.

❖ **Subcuencas**

Conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente.

❖ **Microcuencas**

Una microcuenca es toda área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una Subcuenca; es decir, que una subcuenca está dividida en varias microcuencas.

❖ **Quebradas**

Es toda área que desarrolla su drenaje directamente a la corriente principal de una microcuenca.

❖ **Divisoria de aguas**

La divisoria de aguas o *divortium aquarum* es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica. Una divisoria de aguas marca el límite entre cuencas hidrográficas y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado

de la divisoria desemboca generalmente en ríos distintos. También se denomina *parteaguas*.

❖ **Rio Principal**

El río principal suele ser definido como el curso con mayor caudal de agua (medio o máximo) o bien con mayor longitud. Tanto el concepto de río principal como el nacimiento del río son arbitrarios, como también lo es la distinción entre el río principal y afluente. Sin embargo, la mayoría de cuencas de drenaje presentan un río principal bien definido desde la desembocadura hasta cerca de la divisoria de aguas. El río principal tiene un curso, que es la distancia entre su nacimiento y su desembocadura.

❖ **Afluentes**

Corresponde a un curso de agua, también llamado tributario, que desemboca en otro río más importante con el cual se une en un lugar llamado confluencia. En principio, de dos ríos que se unen es considerado como afluente el de menor importancia (por su caudal, su longitud o la superficie de su cuenca).

❖ **Efluentes**

Lo contrario de un afluente es un efluente o distributario, es decir, una derivación (natural o artificial) que se desprende fuera de la corriente principal de un río mayor a través de otro menor. Los de origen natural se encuentran en su mayoría en los deltas fluviales. Son más frecuentes los efluentes de “origen artificial”, es decir, de una derivación, acequia o canal que se utiliza con fines de regadío o de abastecimiento de agua en regiones relativamente alejadas del río principal.

TELEDETECCIÓN

Según Sebem (2005) la observación remota de la superficie terrestre constituye el objeto de estudio de la teledetección. Para Sobrino *et al.*, (2000) el vocablo teledetección deriva del francés *téledétection*, traducción dada en 1967 al termino anglosajón *remote sensing* o percepción remota. Así, en su más amplio sentido se entiende por teledetección o percepción remota “la adquisición de información sobre un objeto a distancia, esto es, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador”.

La idea de desarrollar un sistema sensor, para registrar la radiación reflejada y/o emitida por los objetos de la superficie terrestre, a partir de plataformas orbitales, nació después del análisis de las primeras fotografías sacadas de la tierra, durante los programas Mercury y Gemini (Díaz, 2015).

El registro de estas respuestas espectrales de los objetos (sea en las regiones del ultravioleta, visible, infrarrojo o microondas) de la superficie terrestre es hoy día una de las más importantes fuentes de información para la gran mayoría de los estudios de las áreas ambientales, geofísicas e instrumento de desarrollo socio-económico.

La teledetección es el resultado de los esfuerzos multi-disciplinares que involucran avances en la Física, Química, Fisicoquímica, Ciencias Biológicas, Geociencias y el desarrollo de la informática. La complejidad de las actuales técnicas de teledetección hace que, cada vez más, un mayor número de personas participen en el proceso de transformación de la energía registrada en información (Novo, 1992).

La importancia de la teledetección en nuestros días está reflejada en el último informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) Perspectivas del Medio Ambiente Mundial 2002 (GEO-3): Pasado, presente y futuro (PNUMA, 2002):

“La visión del rumbo a seguir, para satisfacer las necesidades humanas de forma sostenible en un medio ambiente bajo presión, se reflejó en las nuevas y detalladas imágenes del planeta que aparecieron en el decenio de 1970 como resultado del lanzamiento del satélite Landsat por Estados Unidos en julio de 1972. Estas imágenes fueron determinantes en el cambio de las actividades humanas hacia el estado del medio ambiente mundial. El registro de 30 años que ofrece Landsat también demuestra que, lamentablemente, tales actitudes no se han modificado lo suficiente.”

Para Gilabert *et al.*, (1997) la teledetección tiene por finalidad identificar y caracterizar los materiales de la superficie terrestre y los procesos que en ella ocurren a partir de la radiación electromagnética procedente de la misma, entendiendo por tal tanto la emitida por la propia superficie terrestre como la reflejada de la que llega del sol, prevaleciendo una sobre otra en función del intervalo espectral considerado. En la región óptica del espectro, o espectro solar (0.4-3.0 μm), la radiación procedente de las superficies es la radiación solar reflejada.

En general, cuando la radiación solar incide sobre un material, una parte de la misma se refleja en la parte más superficial del mismo y el resto se propaga por su interior. Allí, parte es absorbida y el resto sufre un proceso de dispersión (en todas sus direcciones) de tal modo que la parte de la

energía dispersada emerge del material por la misma superficie por la que penetra, sumándose así a la radiación reflejada en la capa superficial.

La suma de estas dos contribuciones constituye la radiación reflejada por el material y, juntamente con la irradiancia, permite definir la reflectividad espectral del mismo, R_λ . Es precisamente la dependencia de la reflectividad con la longitud de onda λ , justamente con el hecho de que la reflectividad espectral está íntimamente relacionada con la naturaleza del material (rasgos de absorción en función de los constituyentes químicos de los materiales) lo que hace posible el reconocimiento de materiales en Teledetección.

Al ser este tipo de absorción un proceso que está cuantizado, dichos rasgos se encuentran localizados en longitudes de ondas concretas, dependiendo de la presencia de determinados componentes en el material, estando la intensidad de los mismos relacionada en forma directa con la cantidad de dicho componente (Baret, 1995).

Así por ejemplo, los rasgos que son consecuencia de transiciones electrónicas (como los debidos a la presencia de óxidos de hierro o a la presencia de clorofila) se localizan en la región visible del espectro, mientras que los debidos a transiciones de tipo rotacional (como los del ion OH^-) se producen en la zona del infrarrojo cercano.

Un sistema de Teledetección espacial, incluye los siguientes elementos, representados en la figura 1 (Chuvieco, 1995):

- ❖ **Fuente de Energía**, que supone el origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor,

en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por éste (teledetección activa). La fuente de energía más importante, obviamente, es la energía solar.

- ❖ **Cubierta terrestre**, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía, y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
- ❖ **Sistema sensor**, compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarlas y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- ❖ **Sistema de recepción-comercialización**, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado, y, tras las oportunas correcciones, se distribuye a los intérpretes.
- ❖ **Interprete**, que analiza esa información normalmente en forma de imágenes analógicas o digitales, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- ❖ **Usuario final**, encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.



Figura 1. Elementos que conforman un sistema de Teledetección espacial (Chuvieco, 1995).

El símil de la visión humana puede ayudar a entender el significado de estos componentes. El ojo humano (3) recibe un haz energético procedente de los objetos exteriores (2) por reflejo de la luz solar (1). Esa señal se transmite al cerebro (4), que es capaz de formar una serie de imágenes sobre el mundo real que le circunda. El individuo que observa es a la vez intérprete (5) y usuario final (6) de la imagen detectada, lo que le permite tomar decisiones sobre su propio comportamiento.

En otras palabras, la visión humana forma un sistema de teledetección, puesto que nos permite caracterizar con mucho detalle los objetos que observamos.

El uso de la Teledetección espacial, facilita un apoyo muy conveniente para reducir los costes o el tiempo invertido en obtener resultados. Ambos elementos, costes y tiempo, se justifican por las propias características de la

observación espacial. En breves términos, esta técnica aporta- frente a la fotografía aérea- las siguientes ventajas (Chuvieco, 1995):

- ❖ **Cobertura global y periódica de la superficie terrestre.** Gracias a las características orbitales del satélite podemos obtener imágenes repetitivas de la mayor parte de la tierra, incluso de aéreas inaccesibles por otros medios (zonas polares o desérticas, por ejemplo).
- ❖ **Visión panorámica.** La altura orbital del satélite le permite detectar grandes espacios, proporcionando una visión amplia de los hechos geográficos. Una fotografía aérea, escala 1:18.000 capta en una sola imagen una superficie aproximada de 16km², que asciende a unos 49 km² en el caso de fotografías de mayor altitud (1:30.000). una imagen Landsat nos permite contemplar 34.000 km² en una sola adquisición, cifrándose en 9 millones de km² los abarcados por una imagen del satélite meteorológico NOAA.
- ❖ **Homogeneidad en la toma de datos.** Tan vasta superficie se detecta por el mismo sensor, y en la fracción muy pequeña de tiempo, lo que asegura la necesaria coherencia para abordar un estudio sobre grandes espacios.
- ❖ **Información sobre regiones no visibles del espectro.** Los sensores ópticos-electrónicos facilitan imágenes sobre áreas no accesibles con la fotografía convencional: infrarrojo medio y térmico, micro-ondas. Estas bandas del espectro proporcionan una valiosa información para estudios medio ambientales, registrando problemas imperceptibles al ojo humano.
- ❖ Por último, el **formato digital** de las imágenes agiliza su tratamiento con la ayuda de los equipos adecuados y reduce costes para integrar

posteriormente los resultados con otro tipo de cartografía más convencional.

Esta relación no implica, naturalmente, que consideremos a la teledetección espacial como una panacea para detectar cualquier problema que afecte al medio ambiente. Esta observación es complementaria con otras técnicas convencionales, como la fotografía aérea, y no invalida la importancia del trabajo en campo. En otras palabras, es una técnica auxiliar más, idónea de múltiples contextos y discreta en otros, en los que su aplicación resulta solo un ensayo experimental.

Sensor remoto

Según Chuvieco (1995) un sistema de teledetección requiere, al menos, tres componentes: foco energético, superficie terrestre y sensor. Entre las variadas formas de clasificar los sensores remotos, una de las más habituales considera su procedimiento de recibir la energía procedente de las distintas cubiertas. En este sentido, se habla de dos tipos de sensores: pasivos, cuando se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos, y activos, cuando son capaces de emitir su propio haz de energía.

Estos últimos son, lógicamente, más flexibles, puesto que no dependen tanto como los primeros de las condiciones exteriores al sistema sensor-tierra.

Sensores Pasivos

Estos se limitan a recoger la energía electro-magnética procedente de las cubiertas terrestres, ya sea ésta reflejada de los rayos solares, ya emitida en virtud de su propia temperatura. Puede establecerse una división en estos

sensores en función del procedimiento que emplean para recibir la radiación procedente de los objetos. Antes se aludía a los sensores fotográficos, óptico-electrónicos y de antena. En el primer grupo entrarían las cámaras fotográficas. En el segundo, los exploradores de barrido y de empuje, y las cámaras de vidicon. Por último, los sensores pasivos de antena que se conocen con el nombre de radiómetros de micro-ondas (Chuvieco, 1995).

Sensores activos

Característica común de los sistemas activos es su capacidad de emitir un haz energético que, posteriormente, recogen tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar. Entre ellas, el sistema más conocido es el radar, radiómetro activo de micro-ondas, que trabaja en una banda comprendida entre 0,1 cm y 1 m. Gracias a su flexibilidad –puede trabajar en cualquier condición atmosférica-, el radar está ganando la atención de la comunidad científica internacional, especialmente por su aplicación a países ecuatoriales, en donde resulta casi persistente la cobertura de nubes (Chuvieco, 1995).

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Chuvieco (1995) afirma que para la mayor parte de los usuarios de la teledetección espacial, el fruto de los ensayos de clasificación es un mapa temático que refleja adecuadamente el estado de la variable de interés (tipo de suelo o de vegetación) en el área de estudio.

En muchos casos la obtención de ese mapa constituye la parte final del trabajo, su resultado último. En otros, se trata de un documento más que proporciona –junto a otras variables territoriales- un conocimiento integrado

del espacio en estudio. En ese planteamiento, la cartografía obtenida a partir de la teledetección constituye una variable mas dentro de un sistema de información integrado, tan interesante para el mejor conocimiento del espacio que nos rodea.

En pocas palabras, la teledetección, en este contexto, constituye una técnica más de información territorial, que, unida a otros datos cartográficos o estadísticos, facilita una evaluación más certera del paisaje, necesaria para su mejor aprovechamiento o conservación.

Este tipo de enfoques se han visto notablemente favorecidos por las nuevas tecnologías de almacenamiento, manipulación y salida grafica de la información espacial. De esta forma, han nacido los denominados Sistemas de Información Geográfica (SIG), que pueden definir bases informatizadas de datos con algún tipo de componente espacial. Esto significa que la información que almacena esta referenciada geográficamente, ya se trate de mapas, estadísticas o datos climáticos sobre un territorio concreto, por lo que todas estas variables pueden relacionarse mutuamente de formas muy diversas.

Por cuanto la información que contienen almacena en formato digital, los SIG aprovechan las posibilidades analíticas de los ordenadores, facilitando múltiples operaciones que resultan difícilmente accesibles por medios convencionales: generalización cartográfica, integración de variables espaciales, análisis de vecindad, etc. Además, los SIG permiten almacenar esa información espacial de forma eficiente, facilitando su actualización y acceso directo al usuario. En definitiva, amplían enormemente las posibilidades de análisis que brindan los mapas convencionales, además de facilitar su almacenamiento y visualización.

Un SIG está compuesto por unos equipos físicos, especializados en el manejo de información espacial, y una serie de programas que, conectados con aquellos, permiten realizar múltiples transformaciones a partir de las variables espaciales introducidas al sistema. El SIG no es un producto cerrado en sí, sino un compuesto de elementos diversos: ordenador, digitalizador, trazador gráfico, impresoras, distintos paquetes de programas, orientado hacia una finalidad específica.

También existen SIG comerciales, que intentan recoger todos estos productos bajo una misma estructura, si bien lo más habitual –en el momento presente- sea la comercialización exclusiva de los programas, que pueden adaptarse a configuraciones *hardware* muy amplias.

De ahí surge la primera conexión entre teledetección y los SIG: ambos utilizan equipos muy similares, puesto que ambos se dirigen a procesar información con un claro componente espacial. De esta forma, ambas tecnologías han caminado bastante parejas a lo largo de las últimas décadas, mostrándose, en el momento presente, una clara convergencia. Si los SIG son una herramienta idónea de almacenamiento y gestión medio ambiental, la teledetección brinda al sistema una de sus fuentes de información más interesantes.

En pocas palabras, los SIG son la continuación lógica de una buena parte de las aplicaciones temáticas de la teledetección.

Un SIG proporciona un almacenamiento coherente de la información espacial, que puede ser actualizada o manipulada con el mínimo esfuerzo.

Permite obtener modelos cartográficos, a partir de la transformación o combinación de diversas variables: señalar corredores de una determinada distancia a un río o carretera; realizar tablas de coincidencia entre dos o más mapas, calcular pendientes, exposiciones o medidas de textura; superponer dos o más capas de información, etc.

Asimismo facilita la presentación gráfica de los resultados, al permitir el acceso a diversos periféricos controlados por ordenador. Por último, un SIG puede emplearse como instrumento de simulación, "... como campo de pruebas para el estudio de los procesos ambientales o el análisis de los impactos causados por decisiones de planeamiento". En otras palabras, gracias al ordenador pueden simularse las consecuencias de esta o aquella decisión, antes de que un error de previsión haya modificado irreversiblemente el paisaje mismo.

ESTRUCTURA DE DATOS

La percepción del usuario con respecto a un fenómeno que actualmente existe o su conceptualización de lo que es la realidad tiene que ser representado y almacenado en una base de datos. Existen muchas maneras de organizar esta información en una computadora. La distribución espacial de puntos, líneas, áreas y superficies se las representa en forma digital de dos maneras: Modelo Teselar y Modelo Vectorial. (CLAS, 2006).

Representación de los datos

Modelo Vectorial

CLAS (2006) y Bautista *et al.*, (2004) coinciden que los objetos son representados por los puntos y líneas que definen sus límites; la posición de cada objeto se define por su ubicación en un mapa espacial que se organiza por un sistema de referencia coordinado.

Modelo Ráster

Es una de las estructuras de datos más simple de organización en forma de malla de los datos espaciales; en este tipo de estructuras un valor para el parámetro de interés (clase de uso de tierra, tipo de suelo, etc.) se desarrolla para cada celda un vector sobre el espacio. A cada celda en un archivo ráster se le asigna solamente un valor, los atributos diferentes son almacenados como archivo de datos separados (CLAS, 2006)

Aplicaciones de la Percepción Remota

Según Chuvieco (1995) los avances tecnológicos de las últimas décadas en el campo de la percepción remota y de sus cada vez más numerosas aplicaciones tales como:

- ❖ Estudios de Erosión.
- ❖ Inventario regional del medio ambiente para estudios de impacto ambiental
- ❖ Cartografía Geológica para exploración mineral y petrolífera.
- ❖ Cartografía de cobertura vegetal del suelo.
- ❖ Cartografía e inventario de cultivos por especies.
- ❖ Cartografía e inventario de la cobertura y uso del suelo.
- ❖ Inventarios Forestales.
- ❖ Estudios Multitemporales.

- ❖ Estimación de modelos de escorrentía y erosión.
- ❖ Inventario de aguas superficiales.

Aplicaciones en la Agricultura

Según Bense (2007) señala que la percepción remota, es particularmente empleada para la identificación de cultivos así como analizar el estado de éstos, jugando para ello un papel primordial las características espectrales de las principales coberturas terrestres lo que constituye una importante fuente de información en el manejo de la producción agrícola, no sólo a escalas locales sino a nivel global, particularmente para aquellas regiones en que el suministro de alimentos suele pasar por períodos críticos.

NATURALEZA DE LA RADIACIÓN

De acuerdo con Paco (2003), la radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga mediante ondas que se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz (300000 km/s) transportando cantidades discretas de energía (cuantos). Estas ondas se caracterizan por tener longitudes muy diferentes, desde los rayos X y gamma con longitudes de onda menores de 100 Amstrongs hasta las ondas de televisión y radio con longitudes mayores de un metro.

El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético. Dentro del espectro electromagnético se distinguen una serie de regiones en función de la longitud de onda. Las regiones más utilizadas por las diferentes técnicas de teledetección son:

- ❖ Luz visible.
- ❖ Infrarrojo reflejado.

- ❖ Infrarrojo térmico.

- ❖ Radar.

REFLECTIVIDAD DE LAS SUPERFICIES NATURALES

Según Chuvieco (1995), designa el dominio óptico del espectro a aquel grupo de longitudes de onda directamente dependientes de la energía solar. También se han incluidos en este epígrafe las correspondientes al infrarrojo medio, puesto que mantienen una importante relación con esta fuente de energía, si bien se encuentran a medio camino entre esta y la derivada de la emisión de calor que realizan los objetivos.

Es importante considerar que el flujo de energía recibido por el sensor no solo depende de la reflectividad de la cubierta, sino también de otros factores externos. Los más importantes son: las condiciones atmosféricas, el emplazamiento ambiental de la cubierta y la geometría de observación.

En cuanto a las condiciones de observación, conviene tener presente que la cantidad de energía que llega al sensor depende del ángulo con que la superficie refleje la energía incidente, así como del que formen el haz incidente con la posición del sensor. Esta geometría de observación está estrechamente ligada a la rugosidad que presenta la superficie. Así, pueden distinguirse dos tipos de cubiertas: aquellas que reflejan la energía con el mismo ángulo del flujo incidente (espectaculares), y aquellas que lo reflejan uniformemente en todas las direcciones (lambertianas).

La mayor parte de las cubiertas tienden a comportarse de modo intermedio entre ambas situaciones, en función de sus características y de la longitud de onda en lo que se trabaje. Si la longitud de onda es pequeña, las rugosidades del terreno tenderán a difundir mucho más la energía incidente

que si se trata de longitudes de ondas mayores, en donde esas mismas partículas pueden no impedir un comportamiento especular.

En el espectro visible, por ejemplo, solo el agua en calma presenta un carácter casi especular, mientras el resto de las cubiertas tienden a ofrecer un comportamiento difusor. En longitudes de ondas mayores (micro-ondas), también otras cubiertas puedan actuar de modo especular, siempre que la rugosidad del terreno sea suficientemente pequeña.

En cualquier caso, el ángulo de elevación solar y el ángulo de observación juegan un papel muy destacado en la respuesta finalmente obtenida por el sensor. En pocas palabras, el sensor puede registrar un valor distinto de radiancia espectral para un mismo tipo de cubierta –con la misma o similar reflectividad-, si varían las condiciones de observación o de iluminación. Si a este hecho añadimos que la reflectividad presenta variaciones estacionales, muy notables en el caso de las cubiertas vegetales, se subraya, la complejidad que la observación remota lleva consigo.

En suma, el comportamiento de una cubierta en el espectro visible está influido no solo por sus propias características, sino también por una serie de factores externos que modifican lo que podríamos llamar su comportamiento espectral teórico.

A continuación, se analizan las características de la vegetación según Chuvieco, 1995:

Características de la vegetación en el espectro óptico

La caracterización espectral de las masas vegetales es, sin duda, una de las tareas más interesantes en teledetección. Pese a su gran importancia,

aun ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiancia final detectada por el sensor.

De acuerdo a trabajos realizados, el comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro (en torno a $0.55\ \mu\text{m}$). Por el contrario, en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio.

Estas características espectrales se relacionan, primordialmente, con la acción de los pigmentos foto-sintéticos y del agua que almacenan las hojas. En concreto, la baja reflectividad en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, principalmente las clorofilas, xantofilas y carotenos (65, 29 y 6 %, respectivamente, aunque la proporción puede variar mucho). Todos ellos absorben en la banda del espectro situada en torno a los $0.445\ \mu\text{m}$, mientras la clorofila presenta una segunda banda de absorción en torno a los $0.645\ \mu\text{m}$. Entre ambas porciones del espectro, aparece una banda intermedia, alrededor de los $0.55\ \mu\text{m}$, en donde el efecto absorbente es menor.

Por esta causa aparece un pico relativo de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, y causa el color con el que nuestros ojos perciben la vegetación vigorosa.

Cuando se aproxima la caída otoñal de las hojas, la clorofila ejerce una menor influencia, lo que explica su mayor reflectividad en la banda roja y, en definitiva, su color amarillento (verde + rojo). En algunas especies resulta destacada la acción de otro pigmento, la antocianina, épocas de senescencia.

En cuanto a la elevada reflectividad en el infrarrojo cercano, parece deberse a la estructura celular interna de la hoja. En concreto, la capa esponjosa del mesófilo, con sus cavidades de aire internas, ejerce un papel protagonista, al difundir y dispersar la mayor parte de la radiación incidente en esta banda del espectro.

Por ello, la hoja sana ofrece una alta reflectividad en el infrarrojo cercano (entre 0,7 y 1,3 μm), en claro contraste con la baja reflectividad que ofrece en el espectro visible, especialmente con la banda roja. Puesto que la estructura de la hoja es muy variada según las especies, esta banda también resulta idónea para discriminar entre plantas, incluso entre aquellas que no podrían separarse en el espectro visible.

A partir de 1,4 μm el efecto absorbente del agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el infrarrojo medio. Las curvas de reflectividad pueden modificarse en función de la morfología de la hoja. A radiación si, las hojas aciculares tienden a una mayor absorción a todas las longitudes de onda, mientras las plantas desérticas, de tronco succulento, reflejan una mayor radiación que otras especies mesofíticas (Gates *et al.*, 1965).

Obviamente el sensor no mide hojas aisladas, sino agrupaciones de hojas formando masas de vegetación, por lo que intervienen otros elementos adicionales que complican el esquema previo. Algunos de ellos son: el ángulo de elevación solar, directamente relacionado con la proporción de sombras que detecta el sensor; las características del suelo que sustenta la vegetación; la geometría de la cubierta vegetal; su estado fenológico, etc.

Pese a la complejidad final, es evidente que estas nos sirven para centrar el estudio científico de la vegetación a partir de sensores espaciales. De ellas, resulta evidente que el contraste más nítido en la reflectividad espectral de la vegetación sana se produce entre las bandas visibles, especialmente el rojo (en torno a $0,645\ \mu\text{m}$), y el infrarrojo cercano ($0,7$ a $1,3\ \mu\text{m}$).

De ahí que podemos enunciar, como principio genérico, que cuanto mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor será el vigor de la vegetación, y más clara su discriminación frente a otros tipos de cubiertas. Queda implícito que cualquier fuente de estrés en la vegetación se mostrara en un comportamiento espectral más o menos alejado del anteriormente expuesto.

Este comportamiento espectral teórico de las cubiertas vegetales ha sido la base para obtener una serie de índices de vegetación, que se basan – entre otros factores- en el contraste entre las bandas rojas e infrarrojo cercano del espectro. Se construyen a partir de la combinación lineal entre estas dos bandas, cuando disponemos de una imagen multi-espectral. Muy variados en su desarrollo, todos ellos tienden a presentar de forma más nítida las características de la vegetación, facilitando su aislamiento de otras cubiertas y la detección de su estado vital.

ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Un Índice de Vegetación puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilabert *et al.*, 1997).

Según Díaz (2015) los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Permittiéndonos estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación, en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan.

Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable. Existe una variedad de índices de vegetación que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. La mayoría de estos índices están basados en las interacciones diferentes entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo.

En la siguiente figura, se observa la porción de interés para las aplicaciones agronómicas que va desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR). La mayor parte de la luz solar está en estas bandas y tiene longitudes de onda entre 0.2 y 0.4 micrómetros.

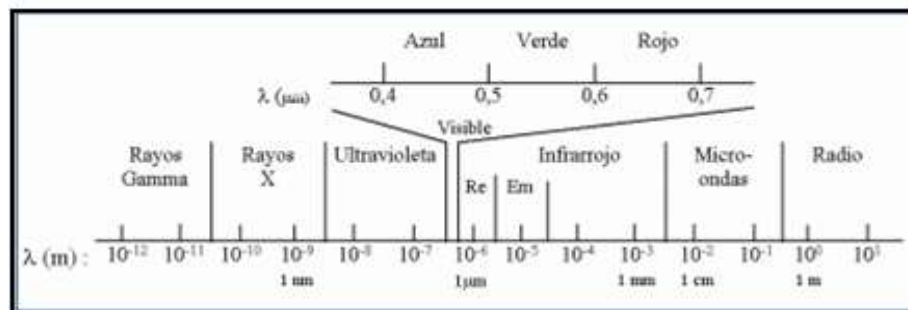


Figura 2. Longitudes de ondas en el Espectro Electromagnético (Martini, 2008).

Para Sebem (2005) se puede descomponer las respuestas espectrales de la vegetación sana en tres regiones, en función de los factores que condicionan su comportamiento:

- 1) Hasta 700 nm, la reflectancia es baja, donde domina la absorción de la radiación incidente por los pigmentos de la planta en 480 nm (carotenos) y en 620 nm (clorofila). En los 56 nm, hay un pequeño aumento del coeficiente de reflectancia, no llegando, sin embargo, a niveles muy altos. Esta reflectancia es la responsable por la percepción del color verde en las plantas.
- 2) De 700 nm hasta 1300 nm, tenemos región dominada por la alta reflectancia de la vegetación, debido a la interferencia de la estructura de las células vegetales.
- 3) De 1300 hasta 2500 nm, la reflectancia de la vegetación está dominada por el contenido de agua en las hojas. En esa región se encuentran dos máximos de absorción por el agua, en los 1400 nm y 1950 nm. Así como también se encuentran en esa región las bandas de absorción atmosférica, por eso los sensores desarrollados tienen sus bandas espectrales desplazadas para regiones sujetas a la atenuación atmosférica.

Según Tan *et al.*, (2003) se utilizan muchos índices de vegetación como el SR (*Simple Ratio*), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), GVI (*Greenness Vegetation Index*), II (*Infrared Index*), PVI (*Perpendicular Vegetation Index*), GRABS (*Greenness Above Bare Soil*), MSI (*Moisture Stress Index*), LWCI (*Leaf Relative Water Content Index*), MidIR (*Middle*

Infrared Index), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), MSAVI (*Modified SAVI*), ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*), SARVI (*Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*), etc.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI)

Para Díaz (2015), el índice de vegetación más conocido y usado es el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (*NDVI Normalized Difference Vegetation Index*). Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo. Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta.

Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana, muestra un claro contraste entre el espectro del visible, especialmente la banda roja, y el Infrarrojo Cercano (NIR).

Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el NIR, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que la reflectividad disminuye el NIR y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica. Esta diferencia

en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas.

Sobrino *et al*, (2000) asegura que el NDVI es sin lugar a dudas, el índice más utilizado en aplicaciones agronómicas de teledetección ya que reúne tres características muy importantes: su sencillez matemática, su fácil interpretación y su poder de normalización de la respuesta espectral de sistemas de vegetación, alcanzando un alto grado de correlación con diversos parámetros de interés agronómico.

Este índice toma valores en el rango de -1.0 a +1.0, donde valores negativos indican superficies sin vegetación, tal como agua, nieve o nubes y valores positivos crecientes indican vegetación creciente, el suelo posee valores bajos, mientras la vegetación se encuentra dentro del rango de 0.2 a 0.8.

Para Díaz (2015), el cálculo del NDVI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, el Infrarrojo Cercano (NIR) y el rojo (RED) como se muestra en la ecuación 1.

$$\text{NDVI} = \frac{\varphi_{\text{NIR}} - \varphi_{\text{RED}}}{\varphi_{\text{NIR}} + \varphi_{\text{RED}}} \quad 1)$$

Donde NIR es la reflectancia espectral del canal infrarrojo cercano y RED representa la reflectancia en el canal rojo del visible. Esta fórmula indica que existe una relación inversa entre el valor de reflectancia de estas

bandas, por lo que es posible su uso para discriminación de cubiertas vegetales. Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1. Diversos estudios y publicaciones señalan que valores por encima de 0.1 indican presencia de vegetación, y cuanto más alto sea el valor de este índice, las condiciones de vigor son mejores.

Índice de Vegetación Verde (GVI)

De acuerdo al manual de GRASS (2017), el GVI denominado Green Vegetation Index utiliza 6 bandas (bluechan, greenchan, redchan, nirchan, chan5chan, chan7chan) y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{GVI} = (-0.2848 * \text{bluechan} - 0.2435 * \text{greenchan} - 0.5436 * \text{redchan} + 0.7243 * \text{nirchan} + 0.0840 * \text{chan5chan} - 0.1800 * \text{chan7chan})$$

2)

Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI)

Por otro lado, el ARVI conocido como Atmospheric Resistant Vegetation Index, es resistente a los efectos atmosféricos (en comparación con el NDVI) y se logra mediante un proceso de autocorrección para el efecto atmosférico en el canal rojo, usando la diferencia en el resplandor entre los canales azul y rojo (Kaufman and Tanre 1996). Utiliza 3 bandas (redchan, nirchan, bluechan) y se calcula de acuerdo a la siguiente formula:

$$\text{ARVI} = (\text{nirchan} - (2.0 * \text{redchan} - \text{bluechan})) / (\text{nirchan} + (2.0 * \text{redchan} - \text{bluechan}))$$

3)

Según Rodríguez (2004) el **ARVI** (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera), se utiliza para minimizar el efecto de la atmósfera. Se puede usar la fórmula del Índice de Vegetación Atmosféricamente Resistente ya que es 4 veces más sensible que el NDVI a los efectos atmosféricos, que tiene en cuenta las diferencias de dispersión entre la banda roja y la banda azul. El ARVI está diseñado con el fin de reducir la dependencia del NDVI a las cambiantes condiciones atmosféricas y se ha propuesto un nuevo índice que ha demostrado estar menos afectado que el NDVI por tales efectos.

Este índice se basa en el proceso de auto-corrección del efecto atmosférico sobre la banda roja (TM3) mediante la inclusión en la expresión matemática de la banda azul (TM1), que es la que más se ve afectada por la dispersión atmosférica.

Aunque según sus autores los resultados son muy buenos, este Índice de Vegetación presenta el inconveniente de no poder utilizarse si el sensor no dispone de una banda en la región azul del espectro, lo cual es muy normal. En realidad, se puede utilizar sólo con Landsat TM porque es el único sensor de uso extendido que cuenta con una banda en la región azul del espectro.

Uso e interpretación de los Índices de Vegetación

La intensidad de reflexión de la vegetación es dependiente en la longitud de onda usada y de los integrantes de los campos de cultivo, la cubierta vegetada, suelo y sombra. La reflexión del suelo depende de su naturaleza, si está compuesta de un suelo mineral de color claro o de un material orgánico oscuro, si existe vegetación senescente o de barbecho, y

de las sombras proyectadas por la cubierta vegetal y otras características tales como la topografía. Todos estos factores necesitan ser considerados en la selección de los índices apropiados, de su uso e interpretación.

Los índices de vegetación se pueden utilizar para medir o para detectar varias características de la cubierta vegetal, que incluyen: análisis de la distribución espacial, detección de sequía (por ejemplo, la respuesta de la vegetación después de las lluvias), índice de área foliar, porcentaje de cubierta vegetal, radiación fotosintéticamente activa absorbida, acción y flujos de carbono, relación con la biomasa y consecuentemente con el rendimiento de los cultivos.

Se pueden detectar tres campos de investigación sobre los índices de vegetación: primero, validación de su utilidad para determinar las características biológicas de plantas, segundo, su papel como herramienta para definir áreas cubiertas de vegetación de otras ocupaciones del terreno, y finalmente el refinamiento de ecuaciones para poder incorporarlas en diversos estudios (Sebem, 2005).

La validación de su utilidad para relacionar las diversas características biológicas de plantas permite establecer el uso de los índices de vegetación para el seguimiento del crecimiento, de la productividad y de las fluctuaciones estacionales de cosechas y de pastos. El índice de área foliar, que es el área que ocupa la superficie de las hojas por la unidad de superficie del suelo, y la cuantificación de biomasa (el peso del tejido de la vegetación) son los dos parámetros biológicos que se han determinado con más éxito en las imágenes de teledetección hasta la fecha (Campbell, 1996).

Según Pérez y Muñoz (2006), las aplicaciones más importantes de los índices de vegetación son:

- ❖ Seguimiento de las condiciones de cubierta vegetal en la superficie terrestre.
- ❖ Fenómenos de desertificación.
- ❖ Deforestación.
- ❖ Incendios forestales.
- ❖ Caracterización de biomasa a escala continental.

PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL

El programa Landsat

Gracias a los brillantes resultados que proporcionaron las primeras fotografías espaciales, la agencia espacial norteamericana diseñó a fines de la década del 60, el primer proyecto exclusivamente a la observación de los recursos terrestres. Fruto de estos trabajos fue la puesta en órbita del primer satélite de la serie ERTS (*Earth Resource Technology Satellite*) el 23 de julio de 1972. Esta familia de satélites, denominada Landsat a partir del segundo lanzamiento, en 1975, ha constituido, sin duda, el proyecto más fructífero de teledetección espacial desarrollado hasta el momento.

La buena resolución de sus sensores, el carácter global y periódico de la observación que realizan y su buena comercialización, explican su profuso empleo por expertos de muy variados campos en todo el mundo (Chuvieco, 1995).

Antes de 1972, la idea de utilizar datos de satélite para la vigilancia terrestre, la cartografía o la exploración era un concepto visionario. Hecho que da origen al Programa Landsat, el cual se constituye en una serie de

misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta. Esta serie de datos, que se inicio en 1972, es la más larga de la historia y continua registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio. Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada; de manera general cada pixel en su imagen tiene un tamaño con el que se podría cubrir un campo de beisbol (Ariza, 2013).

Landsat 8

Asegura Ariza (2013) que en la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada: “Landsat Data Continuity Mission” (LDCM) es el octavo satélite de observación de la serie Landsat y continuará el legado de archivo de los anteriores satélites, convirtiéndose de esta manera en el futuro de los satélites de observación de la tierra de mediana resolución con más historia. Este programa amplía, mejora y avanza en el registro de imágenes multiespectrales, mantenimiento la misma calidad de sus siete predecesores.

Tras el lanzamiento, el satélite LDCM será rebautizado como Landsat 8. Este sistema está compuesto de dos grandes segmentos:

- ❖ **El observatorio**; el cual consta de una plataforma con capacidad de carga de dos de sensores de observación terrestre, el primero de ellos denominado *Operational Land Imager* (OLI) y el sensor térmico infrarrojo *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). OLI y TIRS recogerán los

datos de forma conjunta para proporcionar imágenes coincidentes de la superficie terrestre, incluyendo las regiones costeras, hielo polar, las islas y las zonas continentales. El OLI es un instrumento construido por la empresa Ball Aerospace & Technologies Corporation en Boulder, Colorado y el TIRS es un instrumento que fue construido por la NASA en el centro de vuelo espacial Goddard en Greenbelt, Md. Además, el LDCM seguirá la misma secuencia de trayectoria (también conocida como “paths” o rutas de acceso) como sus antecesores Landsat 4, Landsat 5 y Landsat 7. Esto permitirá que todos los datos del LDCM son referenciados al mismo sistema de coordenadas, continuando con el registro de datos desde hace décadas. El satélite almacena los datos del sensor OLI y TIRS en una grabadora de estado sólido incluida a bordo y transmite los datos a estaciones receptoras terrestres.

- ❖ **El segundo segmento es el sistema terrestre**, el cual proporciona la capacidad necesaria para la planificación y programación de las operaciones del LDCM y todas aquellas necesarias para administrar y distribuir los datos. La plataforma LDCM, fue construida por la empresa Orbital Sciences Corporation en Gilbert, Arizona, tiene una vida útil de 5 años, pero lleva suficiente combustible para 10 años de operaciones. La nave orbitará de norte a al sur durante el día, cruzando el ecuador a las 10 a.m., hora local, con una órbita aproximada de unas 438 millas (705 kilómetros) por encima de la Tierra (USGS, 2013).

Diferencias y semejanzas de Landsat 8

De acuerdo con Ariza (2013) afirma que el satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: *Operational Land Imager* (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado *Thermal Infrared Sensor* (TIRS).

Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a el sensor Landsat 7 ETM +, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. Esto proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve.

Por otra parte el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+. La calidad de los datos (relación de la señal en función del ruido) y la resolución radiométrica (12 bits) del OLI y TIRS es más alta que los anteriores instrumentos Landsat (8 bits para TM y ETM+), proporcionando una mejora significativa en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre.

Aproximadamente se recogen 400 escenas al día, las cuales son cargadas en el servidor de USGS con el fin de que se encuentren disponibles para su descarga 24 horas después de la adquisición.

Los datos de productos Landsat 8 son totalmente compatibles con todos los datos de los productos estándar a nivel 1 (ortorectificado) creados

usando Landsat 1 al Landsat 7; a continuación se describen algunas de sus especificaciones generales en la figura 3:

Procesamiento:	Nivel 1 T-Corrección geométrica
Tamaño de píxel:	Bandas OLI multiespectrales 1-7,9: 30-metros Banda OLI pancromática 8: 15-metros Bandas TIRS 10-11: tomadas en 100 metros, pero remuestreadas a 30 metros para que coincida con las bandas multiespectrales de OLI
Características de los datos:	• Formato de datos GeoTIFF • Remuestreo por convolución cúbica (CC) • Norte arriba (MAP) de orientación • Proyección cartográfica: Universal Transversal Mercator (UTM) (estereográfica polar de la Antártida) • Datum al Sistema Geodésico Mundial (WGS) 84 • 12 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para OLI • 41 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para TIRS • Los valores de píxel en 16 bits
Entrega de datos:	Archivo comprimido .Tar.gz y de descarga a través de HTTP
Tamaño de archivo:	Aproximadamente 1 GB (comprimido), aproximadamente 2 GB (sin comprimir)

Figura 3. Especificaciones de Productos LDCM a nivel 1 (USGS, 2013).

Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9. Una banda nueva (1) (azul-profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles. La nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución.

El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte-sur por 183 kilómetros de este a oeste (106 km por 114 km).

La resolución espacial (o nivel de detalle) es a menudo el aspecto más interesante de una imagen de satélite, pero menos apreciado y valorado es cómo se utilizan los cambios en la energía por irradiación reflejada por los materiales de superficie con el fin de lograr identificar las características de interés. Estos aspectos pueden identificarse gracias a la respuesta espectral relativa (RSR) de cada banda como se muestra en la figura 4.

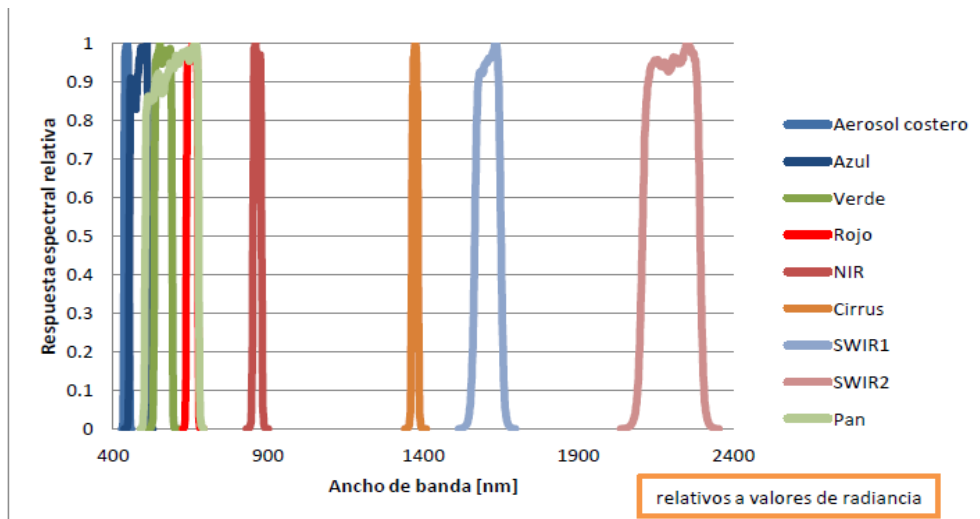


Figura 4. Promedio de la respuesta espectral relativa en LDCM (Ariza, 2013)

El futuro de LDCM (Landsat 8)

El nuevo programa de la plataforma LDCM tiene fundamentalmente tres objetivos (Ariza, 2013):

- ❖ Recopilar y archivar datos de bandas multiespectrales y térmicas de cada superficie de la tierra, cada temporada de cada año en una

resolución que puede distinguir un área del tamaño de un campo de béisbol.

- ❖ Asegurar de que los datos de LDCM sean consistentes con los datos de las misiones Landsat anteriores, en términos de la geometría de adquisición, calibración, características de cobertura, espectral y espacial características, calidad del producto, la producción y la disponibilidad de los datos para permitir estudios de cobertura de la tierra y uso de la tierra cambian en periodos multitemporales.
- ❖ Distribuir productos de datos LDCM estándar sobre una base no discriminatoria y sin costo a los usuarios.

Instrumentos en Landsat 8

Los dos instrumentos a bordo del LDCM, *Operational Land Imager* (OLI) y el sensor térmico infrarrojo (TIRS) representan avances evolutivos en la tecnología de sensores remotos y en su rendimiento. OLI y TIRS miden la superficie terrestre en el visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta, e infrarrojo térmico con una resolución moderada entre 49 y 328 pies (15 y 100 metros) dependiendo de la longitud de onda espectral. La distribución de la energía observada en estas longitudes de onda revela información sobre la reflexión y emisión de superficies.

El OLI fue diseñado para tener una vida útil de cinco años y detectará las mismas bandas espectrales de los anteriores instrumentos del Landsat (es decir sensores, TM y ETM+), con la excepción de una banda en el infrarrojo térmico. Además de las 7 bandas multiespectrales del anterior Landsat (seis de los cuales han sido refinadas) OLI agregará dos nuevas bandas espectrales, una banda azul "costera" (banda 1) y una banda en el infrarrojo de onda corta "cirros" (banda 9).

Estas nuevas bandas, ayudaran a los científicos a medir la calidad del agua y facilitaran la detección de nubes altas y delgadas que previamente han sido difíciles de observar en las imágenes Landsat.

Todas las bandas del sensor OLI se pueden adquirir en 12 bits de resolución radiométrica, 8 bandas serán de 30 metros y 1 de las bandas, la banda pancromática, es de 15 metros como se puede observar en la Figura 5.

Nº Banda	Descripción	Ancho de banda (nm)	Centro Tolerancia ($\pm$ nm)	Mínimo inferior (nm)	Maximo superior (nm)
1	Aerosol costero	443	2	433	453
2	Azul	482	5	450	515
3	Verde	562	5	525	600
4	Rojo	655	5	630	680
5	NIR	865	5	845	885
6	SWIR1	1610	10	1560	1660
7	SWIR2*	2200	10	2100	2300
8	Pancromático	590	10	500	680
9	Cirrus	1375	5	1360	1390

Figura 5. Rangos espectrales y tamaños de pixel de bandas en el sensor OLI (USGS y NASA, 2013.)

El sensor térmico infrarrojo (TIRS) fue añadido a la carga útil del LDCM cuando se hizo evidente que los gestores de los recursos hídricos se basaban en la mediciones de alta precisión de la energía térmica de la tierra obtenidas por los predecesores del LDCM – el TM del satélite Landsat 5 y *Enhanced Thematic Mapper* – Plus ETM+ del Landsat 7 – con el fin de hacer un seguimiento del uso de la tierra y el agua. La decisión de añadir el sensor TIRS se hizo después de que el diseño de la misión se había iniciado. Los

ingenieros tenían menos de cuatro años para diseñar y construir TIRS por lo que recurrieron a una nueva tecnología desarrollada por la NASA llamada *Quantum Well Infrared Photodetectors* (QWIPs).

Los detectores QWIPs están hechos de un material que es compatible con el procesamiento de silicio, lo que significa que son las mismas herramientas que utilizan en las instalaciones para hacer chips de computadora. QWIPs son muy fiables, uniformes, y muy adecuados a las necesidades del sensor TIRS.

Los satélites Landsat anteriores miden la temperatura superficial del suelo utilizando una sola banda térmica para detectar longitudes de onda largas de la luz emitida por la superficie de la tierra. Los QWIPs en el TIRS sin embargo, detectan dos segmentos del espectro infrarrojo térmico, ambos incluidos dentro de una ventana de transmisión atmosférica, con el fin de producir mejores estimaciones de la temperatura superficial.

Al igual que el sensor OLI, el TIRS es también un sensor “Pushbroom” con un 115-millas (185 kilómetros) de campo de visión (Cross-track). Con una resolución espacial de 328 pies (100 metros) de ancho, esta resolución espacial del TIRS está diseñada para captar las mediciones de consumo de agua en los campos riego, particularmente a través de las grandes llanuras de los Estados Unidos.

Una de las diferencias más importantes entre las especificaciones del OLI y el TIRS es que TIRS sólo tiene una vida útil de tres años. Esta característica se especificó con el fin de ayudar a acelerar el desarrollo del TIRS.

IMÁGENES DE SATÉLITES

Para Paco (2003), la imagen de satélite consiste en un conjunto de matrices, una por cada canal del sensor, en la que aparecen números del 0 al 255. El cero indica que no llega nada de radiación desde ese punto y el 255 que llega el valor más alto de radiación. Estos valores se denominan niveles digitales y será necesario transformarlos en algún tipo de variable física. La transformación suele ser a través de una ecuación lineal cuyos parámetros se suministran junto con la imagen.

UNR (2009), define la imagen satelital como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen información reflejada por la superficie de la tierra que luego es enviada a la tierra y que procesada convenientemente entrega valiosa información sobre las características de la zona representada.

Actualmente la imagen satelital constituye una tecnología indispensable para la población y el conocimiento científico debido a las múltiples aplicaciones que ofrece y la diversidad de información que se obtiene con ella, tales como:

- ❖ Medio ambiente (detección de incendios, sequías e inundaciones).
- ❖ Agricultura (índices de vegetación, pasturas, estimación de cosechas).
- ❖ Urbano (obtención de datos que constaten el crecimiento urbano, la detección de bolsones de pobreza, demografía urbana, vías de comunicación).

Al mismo tiempo, este tipo de imagen es posible de ser aplicado a distintas disciplinas, como la oceanografía, la meteorología, la hidrografía, la

ecología, la física y la ecología. Para la interpretación de las imágenes de satélites los programas más acertados serían los de análisis de imagen para el tratamiento visual y los Sistemas de Información Geografía para el análisis numérico y su combinación con otro tipo de información espacial (Paco, 2003).

Corrección atmosférica para imágenes de satélites

Según Chuvieco (1995), la radiación electromagnética se ve notablemente afectada por los distintos componentes de la atmosfera. La presencia de aerosoles y vapor de agua dispersa de una forma selectiva la radiación transmitida entre la superficie terrestre y el sensor. Por ello, la radiancia finalmente detectada por éste no corresponde exactamente a la que parte de la superficie terrestre, sino que cuenta con un porcentaje añadido, a consecuencia del efecto dispersor de la atmosfera.

El principal problema que implica esta dispersión es su carácter heterogéneo, en el espacio y en el tiempo. En otras palabras, la dispersión atmosférica no es constante en la imagen sino, que determinadas zonas pueden haber sido más afectadas que otras, en función de la diversa presencia de aerosoles o vapor de agua. Además, el efecto es dependiente de la longitud de onda, y varía entre imágenes de forma difícil de predecir.

Desgraciadamente, resulta muy complejo abordar una corrección rigurosa de la dispersión atmosférica, por cuanto requiere una serie de medidas simultáneas a la adquisición de la imagen. Pese a estas dificultades, es preciso realizar, al menos, una estimación del efecto atmosférico.

Esta corrección será muy interesante en tres tipos de situaciones: cuando pretendan realizarse combinaciones lineales entre bandas, puesto que el efecto de dispersión, es distinto en función de la longitud de onda; cuando intenten establecerse modelos que pongan en relación los ND (*Digital Number*) con determinados parámetros físicos: temperatura, biomasa, humedad del suelo, clorofila en el agua, etc., y cuando se realicen estudios multi-temporales, puesto que la dispersión sufrida por una imagen no es comparable a la que experimenta otra adquirida en distinta fecha.

Entre los métodos propuestos para corregir el aporte de radiancia atmosférica, uno de los más sencillos es el ideado por Chávez, que se denomina corrección del Histograma por sus valores mínimos (*Histogram Method*). Se asume que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad (agua, zonas en sombra), deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero.

En la práctica, el histograma de los ND de la imagen siempre presenta un mínimo superior a ese valor, que se atribuye al efecto de dispersión atmosférica. La dispersión Rayleigh, la más común, afecta principalmente a las longitudes de onda más cortas, lo que confirma que ese valor mínimo puede corresponder más al efecto de la atmosfera que a la radiancia espectral proveniente de la superficie terrestre.

En consecuencia, una sencilla aproximación a la corrección atmosférica consiste en restar a todos los ND de cada banda el ND mínimo de esa misma banda, situando el origen del histograma en cero:

$$ND_{ijk}' = ND_{ijk} - ND$$

4)

Esto es, el ND del pixel (i,j) en la banda k, se ajusta restándole el ND mínimo de esa misma banda.

Recientemente se ha sugerido un método más avanzado de corrección, basado sobre éste pero teniendo en cuenta que la dispersión tiende a estar correlacionada entre bandas. Se basa en establecer una banda de referencia, la que se supone más afectada por la dispersión (TM-1 ó MSS-4, será lo más habitual). A partir del valor mínimo de esa banda, se calcula una corrección atmosférica para el resto de las bandas teniendo en cuenta dos parámetros: los valores de calibración de cada banda, y una estimación de las condiciones atmosféricas en el momento de adquisición de la imagen.

Chávez aporta cinco modelos atmosféricos: muy claro (*very clear*), claro (*clear*), moderado (*moderated*), brumoso (*hazy*) y muy brumoso (*very hazy*), que son estimados por el usuario sobre información de campo o sobre un examen de la importancia del valor mínimo en cada una de las bandas.

Otro procedimiento dirigido a suprimir la dispersión atmosférica, se basa en una regresión entre bandas. Se parte de delimitar sobre la imagen unas zonas de baja radiancia (sombras, aguas claras y profundas). Posteriormente se obtienen los ND de los pixeles incluidos en esas áreas, para cada una de las bandas que intervienen en el análisis.

A partir de esos valores, se calcula la línea de regresión entre cada banda y una de ellas, en donde la dispersión sea menos intensa (típicamente la banda situada en el infrarrojo medio). Esta recta de regresión debería pasar a través del origen del eje de coordenadas formado por las dos bandas. En caso contrario, se supone que el desplazamiento de la recta es debido a la dispersión, por lo que basta conocer el punto en el que ésta corta

al eje de la banda a corregir. Ese valor se sustrae a todos los ND de dicha banda, de modo similar al método anterior.

Para el caso de estudios multi-temporales, la corrección atmosférica puede abordarse de modo relativo. Esto es, basta normalizar los ND de distintas escenas a otra, que se elige como referencia. El método se basa en determinar la reflectividad aparente para una serie de cubiertas que no cambian entre fechas (asfalto, aguas claras y arena). A partir de esos valores, pueden estimarse los ND entre fechas distintas, soslayando el efecto atmosférico.

Software utilizado para el análisis de imágenes de satélite

El software utilizado para el procesamiento de las imágenes de satélites para este tipo de trabajo se llama *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS). GRASS o Sistema de Soporte de Análisis de Recursos Geográficos es un software SIG (Sistema de Información Geográfica) bajo licencia GPL (software libre). Puede soportar información tanto ráster como vectorial y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes (Hengl & Reuter, 2009).

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON

Para Molares (2011) el coeficiente de correlación r de Pearson expresa en qué grado los sujetos tienen el mismo orden en dos variables. Si los sujetos más altos pesan más y los más bajitos pesan menos, entre peso y altura tendremos una correlación positiva: a mayor altura, mayor peso. Si los de más edad corren más despacio y los más jóvenes corren más deprisa,

entre edad y velocidad tendremos una correlación negativa; a mayor edad, menor velocidad.

Los coeficientes de correlación pueden ser por lo tanto positivos o negativos. Lo que expresan estos coeficientes se entiende bien mediante su representación gráfica, los diagramas de dispersión en los que las dos variables están simbolizadas con las letras X e Y como se muestra en la figura 6.

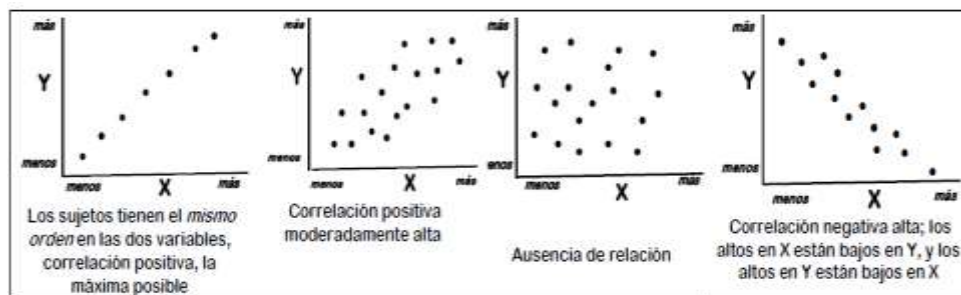


Figura 6. Diagramas de dispersión (Morales, 2011)

El valor del coeficiente de correlación oscila entre 0 y ± 1 ; una correlación igual a 0 significa ausencia de relación. Si de los mejores profesores unos investigan mucho y otros nada o muy poquito y de los profesores que no son tan buenos docentes unos investigan y publican mucho y otros no investigan nada, entre productividad en investigación y calidad de la docencia no hay relación (que no hay que confundir con relación negativa).

Los coeficientes de correlación se calculan con toda facilidad en programas informáticos (como por ejemplo EXCEL).

Por otro lado, Amon (1990) afirma que el coeficiente de correlación de Pearson, pensado para variables cuantitativas (escala mínima de intervalo), es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Adviértase que decimos "variables relacionadas linealmente". Esto significa que puede haber variables fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal, en cuyo caso no procede a aplicarse la correlación de Pearson.

Por ejemplo, la relación entre la ansiedad y el rendimiento tiene forma de U invertida; igualmente, si relacionamos población y tiempo la relación será de forma exponencial. En estos casos (y en otros muchos) no es conveniente utilizar la correlación de Pearson.

Decimos que la correlación entre dos variables X e Y es perfecta positiva cuando exactamente en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra. Esto sucede cuando la relación entre ambas variables es funcionalmente exacta. Difícilmente ocurrirá en psicología, pero es frecuente en las ciencias físicas donde los fenómenos se ajustan a leyes conocidas, Por ejemplo, la relación entre espacio y tiempo para un móvil que se desplaza a velocidad constante.

Se dice que la relación es perfecta negativa cuando exactamente en la medida que aumenta una variable disminuye la otra. Igual que en el caso anterior esto sucede para relaciones funcionales exactas, propio de las ciencias físicas. Por ejemplo, la relación entre presión y volumen se ajusta a este caso.

COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN

Para Mellado (sf) Existen algunos datos que ayudan a explicar el comportamiento de los resultados de un experimento, uno de ellos es el Coeficiente de determinación (R^2). Antes es necesario identificar el modelo en un análisis de Varianza. El modelo son todas las fuentes de variación (factores) que son contemplados en el diseño.

R^2 es el porcentaje de la varianza que es ocasionada por el modelo. Tiene un valor de 0 a 1, cuando es cercano a 1 significa que casi toda la varianza se debe al modelo, y si es cercano a 0 significa que no aporta a la varianza total. La ecuación es:

$$R^2 = 1 - \frac{SC_{error}}{SC_{total}} \quad (5)$$

MARCO METODOLÓGICO

UBICACIÓN DE LA CUENCA EN ESTUDIO

La cuenca hidrográfica del río Areo, se ubica en su mayor parte en el Municipio Cedeño del estado Monagas y una pequeña parte en el Municipio Freites del estado Anzoátegui. La cuenca posee un longitud de 43,71 km aproximadamente y un área de 46.365 ha. Se ubica en las siguientes coordenadas geográficas: Latitud Norte: 09°41'42" y 10°06'05", Latitud Oeste: 63°48'14" y 64°00'00"

Figura 7. Ubicación geográfica del río Areo del Estado Monagas, Venezuela

MATERIALES Y EQUIPOS

- ❖ Computador con Sistema Operativo Windows.
- ❖ Acceso a internet de banda ancha.
- ❖ Software libre Grass Gis.
- ❖ Software “R” para aplicaciones estadísticas.
- ❖ Modelo digital de elevación (ETM+, TM) desde el *Global Land Cover Facility* (GLCF).
- ❖ Imágenes de Satélites Landsat 8 (OLI) desde el *Visualizador Global* (GLOVIS).
- ❖ Materiales de oficina en general.

En el siguiente cuadro se describen las 15 imágenes que fueron descargadas desde el GLOVIS.

Cuadro 1. Escenas descargadas del Landsat 8 desde el visualizador global (GLOVIS).

IMÁGENES LANDSAT 8		
DÍA	MES	AÑO
31	Julio	2013
28	Marzo	2014
3	Agosto	2014
11	Febrero	2015
2	Mayo	2015
23	Septiembre	2015
26	Noviembre	2015
14	Febrero	2016
18	Abril	2016
20	Mayo	2016
23	Julio	2016
9	Septiembre	2016
14	Diciembre	2016
15	Enero	2017
16	Febrero	2017

METODOLOGÍA

Para la realización de la metodología se inició con la recolección de información preliminar, en la cual se obtuvieron totalmente gratis desde la web tanto el material espectral como el modelo digital de elevación (SRTM) que se descargó desde el Global Land Cover Facility (GLCF) disponible en: <http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>. Por tanto, el material espectral se obtuvo desde el Visualizador Global (GLOVIS) disponible en: <http://glovis.usgs.gov/>, contando con la adquisición de 15 escenas disponibles y con la menor nubosidad posible de acuerdo a la zona de estudio.

Todo el manejo cartográfico de estos datos se desarrolló empleando las facilidades disponibles en el software GRASS-GIS. La creación de localización y mapset en el Grass se realizó tal como lo explicó en su trabajo de investigación Hernández (2010).

Posterior a ello, fue importar el modelo digital de elevación utilizando el módulo ***r.in.gdal*** para posteriormente ajustarse a la paleta de colores del *srtm* mediante la secuencia *Archivo – Importar datos ráster - Formatos comunes para importación [r.in.gdal]*.

Las fallas en los datos de altimetría contenidos en el modelo digital de elevación fueron corregidos utilizando el módulo ***r.fill.dir*** mediante la siguiente secuencia *Ráster – Modelado hidrológico – Mapa sin depresiones y líneas de flujo [r.fill.dir]*.

Por un lado, se utilizó el módulo ***r.watershed*** mediante *Ráster – Modelado hidrológico – Análisis de cuencas hidrográficas [r.watershed]*, en el

cual aparecieron múltiples cuencas pero para la delimitación de la cuenca de interés, se consultó en el visualizador de mapas ráster para saber la número de la cuenca, resultando para ésta, la 154.

Por otro lado, a través del módulo ***r.reclass*** a través de *Ráster – Cambiar valores de categorías y etiquetas – Reclasificar [r.reclass]* se procedió a la reclasificación de la cuenca del rio Areo siendo 154=1.

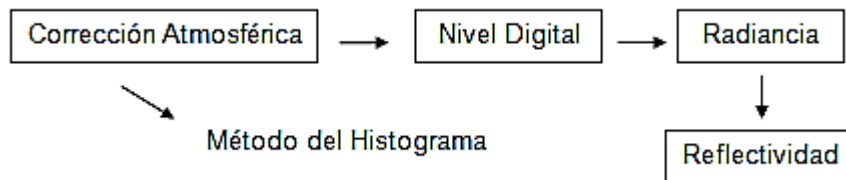
Luego de generada la cuenca hidrográfica, su perímetro fue utilizado mediante una máscara para configurar el área de trabajo mediante el modulo ***r.mask*** mediante *Ráster – Máscara [r.mask]*.

Por consiguiente, se importaron las bandas 2, 3, 4, 5 y 7 las cuales fueron las requeridas según cada índice correspondientes a cada escena mediante el módulo *r.in.gdal*

Para el cálculo de los tres índices de vegetación mediante el Software “R”, se exportaron desde GRASS cada banda corregida a través del módulo ***r.out.xyz*** en formato *txt* a la carpeta de “Datos R” donde se guardó toda la información mediante la secuencia *Archivo – Exportar mapa ráster – Exportar puntos x,y,z ASCII [r.out.xyz]*.

Para poder trabajar en el Software “R” se trabajo con la ayuda de un programa llamado Tinn-R. Inicialmente se abrió el archivo cabecera de cada escena, éste se obtuvo al mismo tiempo de las descargas de las bandas originales desde el portal web ya que de él se obtuvo toda la información necesaria para procesar los datos.

Es importante destacar que para el cálculo de los índices de vegetación, se necesitó conocer de algunas fórmulas cuyos valores fueron obtenidos del archivo cabecera de cada escena y se simplifica a continuación:



La transformación de los valores a niveles digitales se considero utilizando la ecuación 4.

Para el cálculo de radiancia se tomo la ecuación 6 descrita por Ariza (2013):

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (6)$$

Donde:

L_{λ} = Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores de (Watts /m² * srad * μm)

M_L = Banda – Es el factor multiplicativo de escalado especifico obtenido del metadato (*RADIANCE_MULT_BAND_x*, donde x es el número de la banda)

Q_{cal} = Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (ND). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

A_L= Banda – Es el factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato (*RADIANCE_ADD_BAND_x*, donde x es el número de la banda)

Para el cálculo de la reflectancia, se usó la ecuación 7 descrita por Ariza (2013):

$$p\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p \quad (7)$$

Donde:

$p\lambda'$ = Es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar. Note que **$p\lambda'$** no contiene una corrección por el ángulo solar.

M_p = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (*REFLECTANCE_MULT_BAND_x*, donde x es el número de la banda).

Q_{cal} = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (ND). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

A_p = Es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (*REFLECTANCE_ADD_BAND_x*, donde x es el número de la banda).

Los códigos usados para los cálculos de los índices de vegetación se ordenaron de la siguiente manera en la ventana del Tinn-R y que a su vez se mostraron los resultados en la ventana del software R:

❖ Código para solicitar el escritorio actual

```
getwd("C:/Users/Jesus/Desktop/DATOS_R/2013/31_07")
```

❖ **Bandas importadas para crear la base de datos**

```
b2=read.table("b2original.txt")
b3=read.table("b3original.txt")
b4=read.table("b4original.txt")
b5=read.table("b5original.txt")
b7=read.table("b7original.txt")
```

❖ **Códigos para cambiar el nombre de las columnas**

```
names(b2)=c("eb2","nb2","ndb2")
names(b3)=c("eb3","nb3","ndb3")
names(b4)=c("eb4","nb4","ndb4")
names(b5)=c("eb5","nb5","ndb5")
names(b7)=c("eb7","nb7","ndb7")
```

❖ **Acceso a las columnas**

```
attach(b2)
attach(b3)
attach(b4)
attach(b5)
attach(b7)
```

❖ **Transformación de los niveles digitales (ND) a valores de radiancia**

```
b2_reflec=(REFLECTANCE_MULT_BAND_2*ndb2+REFLECTANCE_ADD_BAND_2)/sin(SUN_ELEVATION*pi/180)
b3_reflec=(REFLECTANCE_MULT_BAND_3*ndb3+REFLECTANCE_ADD_BAND_3)/sin(SUN_ELEVATION*pi/180)
b4_reflec=(REFLECTANCE_MULT_BAND_4*ndb4+REFLECTANCE_ADD_BAND_4)/sin(SUN_ELEVATION*pi/180)
```

$$b5_reflec = (REFLECTANCE_MULT_BAND_5 * ndb5 + REFLECTANCE_ADD_BAND_5) / \sin(SUN_ELEVATION * \pi / 180)$$

$$b7_reflec = (REFLECTANCE_MULT_BAND_7 * ndb7 + REFLECTANCE_ADD_BAND_7) / \sin(SUN_ELEVATION * \pi / 180)$$

❖ **Evaluación de los valores de reflectividad sosteniendo que el rango debe ser de 0.00 a 1.00 máximo**

range(b2_reflec)

range(b3_reflec)

range(b4_reflec)

range(b5_reflec)

range(b7_reflec)

❖ **Renombrar las bandas según las fórmulas**

nir=b5_reflec

red=b4_reflec

green=b3_reflec

blue=b2_reflec

swir2=b7_reflec

❖ **Cálculo de los Índices de Vegetación**

ARVI=(nir-(2.0*red-blue))/(nir+(2.0*red-blue))

NDVI=(nir-red)/(nir+red)

GVI=(-0.2848*blue)-(0.2435*green) (0.5436*red)+
(0.7243*nir)+(0.0840*nir)-(0.1800*swir2)

Los índices de vegetación deben arrojar valores mínimos -1 y máximos 1, mediante el módulo *i.vi* de GRASS por “default” se puede hacer pero como mediante R no, es por eso que se configuró el código en R para que valores

menores o mayores a estos sean corregidos. Para este caso, solo fue aplicado al índice ARVI.

❖ **Escalado de ARVI para ajustar su valor mayor a 1**

```
ARVI=ARVI
  for (i in 1:length(ARVI))
  {
    if(ARVI[i]>1){
      ARVI[i] = 1.0;
    }

    else {
      ARVI[i]=ARVI[i];
    }
  }
  summary(ARVI)
```

❖ **Escalado de ARVI para ajustar su valor menor a -1**

```
for (i in 1:length(ARVI))
  {
    if(ARVI[i]<(-1)){
      ARVI[i] = -1.0;
    }

    else {
      ARVI[i]=ARVI[i];
    }
  }
  summary(ARVI)
```

❖ Evaluación Gráfica

```
par(mfrow=c(2,2))
hist(ARVI)
hist(NDVI)
hist(GVI)
```

❖ Tabulación de Resultados

```
write.table(GVI,file="GVI_31_07.txt",row.names=F,col.names=F)
write.table(ARVI,file="ARVI_31_07.txt",row.names=F,col.names=F)
write.table(NDVI,file="NDVI_31_07.txt",row.names=F,col.names=f)
```

Con este último código se envió a guardar los resultados en la carpeta donde se direccionó al principio.

❖ Resumen general

```
resumen=cbind(summary(ARVI),summary(NDVI),summary(GVI))
resumen=data.frame(resumen)
names(resumen)=c("ARVI","NDVI","GVI")
resumen
```

Igualmente se utilizan estos mismos códigos para las 14 escenas restantes correspondientes tanto a su archivo cabecera como para las bandas exportadas desde GRASS.

Una vez finalizada la exploración de los datos (AEDA), se procedió al análisis de la estadística inferencial que se ejecutó mediante el ANAVA o análisis de varianza para comparar las diferencias significativas entre los índices. Se consideró un diseño experimental completamente aleatorizado, donde la unidad experimental fue la cuenca del río Areo, los tratamientos

fueron los índices de vegetación, las repeticiones fueron las escenas consideradas para cada fecha y la variable fue la respuesta espectral reportada por cada índice de vegetación. Con este análisis de varianza se pretendió confirmar la hipótesis nula de igualdad de medias. Los códigos a utilizar fueron los siguientes, tomando como ejemplo solo el Índice ARVI:

❖ **Código para solicitar el escritorio actual**

```
getwd("C:/Users/Jesus/Desktop/INDICES DE VEGETACION/
ESCENAS 2013-2017")
```

❖ **Códigos para importar la base de datos**

```
arvi2013=read.table("ARVI_31_07.txt")
arvi2014=read.table("ARVI_28_03.txt")
arvi2014_2=read.table("ARVI_03_08.txt")
arvi2015=read.table("ARVI_11_02.txt")
arvi2015_2=read.table("ARVI_02_05.txt")
arvi2015_3=read.table("ARVI_23_09.txt")
arvi2015_4=read.table("ARVI_26_11.txt")
arvi2016=read.table("ARVI_14_02.txt")
arvi2016_2=read.table("ARVI_18_04.txt")
arvi2016_3=read.table("ARVI_20_05.txt")
arvi2016_4=read.table("ARVI_23_07.txt")
arvi2016_5=read.table("ARVI_09_09.txt")
arvi2016_6=read.table("ARVI_14_12.txt")
arvi2017=read.table("ARVI_15_01.txt")
arvi2017_2=read.table("ARVI_16_02.txt")
```

❖ **Nombres de las columnas para cada archivo**

```
names(arvi2013)=c("ARVI_1")
```

```

names(arvi2014)<-c("ARVI_2")
names(arvi2014_2)<-c("ARVI_3")
names(arvi2015)<-c("ARVI_4")
names(arvi2015_2)<-c("ARVI_5")
names(arvi2015_3)<-c("ARVI_6")
names(arvi2015_4)<-c("ARVI_7")
names(arvi2016)<-c("ARVI_8")
names(arvi2016_2)<-c("ARVI_9")
names(arvi2016_3)<-c("ARVI_10")
names(arvi2016_4)<-c("ARVI_11")
names(arvi2016_5)<-c("ARVI_12")
names(arvi2016_6)<-c("ARVI_13")
names(arvi2017)<-c("ARVI_14")
names(arvi2017_2)<-c("ARVI_15")

```

❖ Acceso a las columnas

```

attach(arvi2013)
attach(arvi2014)
attach(arvi2014_2)
attach(arvi2015)
attach(arvi2015_2)
attach(arvi2015_3)
attach(arvi2015_4)
attach(arvi2016)
attach(arvi2016_2)
attach(arvi2016_3)
attach(arvi2016_4)
attach(arvi2016_5)
attach(arvi2016_6)

```

```
attach(arvi2017)
attach(arvi2017_2)
```

❖ **Calculo para las medias**

```
arvi=c(mean(ARVI_1),mean(ARVI_2),mean(ARVI_3),mean(ARVI_4),m
ean(ARVI_5),mean(ARVI_6),mean(ARVI_7),mean(ARVI_8),mean(AR
VI_9),mean(ARVI_10),mean(ARVI_11),mean(ARVI_12),mean(ARVI_1
3),mean(ARVI_14),mean(ARVI_15))
```

❖ **Asignación para los tratamientos**

```
ivi=c(arvi,gvi,ndvi)
t_arvi=rep("arvi",15)
t_gvi=rep("gvi",15)
t_ndvi=rep("ndvi",15)
tratamientos=c(t_arvi,t_gvi,t_ndvi)
tratamientos=as.factor(tratamientos)
```

❖ **Organización Índices-Tratamientos**

```
anava=aov(ivi~tratamientos)
summary(anava)
```

❖ **Desviación estándar**

```
sd_arvi=c(sd(ARVI_1),
sd(ARVI_2),
sd(ARVI_3),
sd(ARVI_4),
sd(ARVI_5),
sd(ARVI_6),
```

```
sd(ARVI_7),
sd(ARVI_8),
sd(ARVI_9),
sd(ARVI_10),
sd(ARVI_11),
sd(ARVI_12),
sd(ARVI_13),
sd(ARVI_14),
sd(ARVI_15))
```

```
desviaciones=cbind(summary(sd_arvi),summary(sd_gvi),summary(sd_ndvi))
desviaciones=data.frame(desviaciones)
names(desviaciones)=c("arvi","gvi","ndvi")
desviaciones
```

❖ Plot (ARVI,GVI,NDVI)

```
par(mfrow=c(2,2))
plot(arvi,type="l",col=2)
plot(gvi,type="l",col=2)
plot(ndvi,type="l",col=2)
```

Estos mismos códigos fueron sustituidos por los otros dos índices faltantes, GVI y NDVI.

Una vez terminada la parte estadística, se procedió a la caracterización del comportamiento geoespacial del vigor de la vegetación correspondiente al tercer objetivo de la presente investigación. Todo el manejo geoespacial se

realizó desde GRASS pero importando primero la información contenida en R de la siguiente manera:

❖ **Acceso a los resultados de los índices**

```
ARVI=cbind(eb2,nb2,ARVI)
```

```
GVI=cbind(eb2,nb2,GVI)
```

```
NDVI=cbind(eb2,nb2,NDVI)
```

❖ **Código para guardar el archivo en formato texto**

```
write.table(GVI,file="GVI31_07.txt",row.names=F,col.names=F)
```

```
write.table(ARVI,file="ARVI31_07.txt",row.names=F,col.names=F)
```

```
write.table(NDVI,file="NDVI31_07.txt",row.names=F,col.names=F)
```

Estos resultados fueron guardados en formato *.txt* a una carpeta creada dentro de cada escena en Datos R llamada “Índices para GRASS” los cuales fueron importados a GRASS mediante el módulo *r.in.xyz* donde a cada uno se le añadieron los elementos de mapa resaltando la leyenda del vigor de la vegetación y la identificación de cada escena para luego ser guardados como imagen en formato JPG.

Por otro lado, para la creación del modelo matemático primero se agruparon en una carpeta todos los resultados obtenidos del Software R en formato *txt* del Índice de Vegetación Verde (GVI). Los códigos utilizados se ordenaron de la manera siguiente:

❖ **Código para solicitar el escritorio actual**

```
"C:/Users/Jesus/Desktop/INDICES DE VEGETACION/ESCENAS 2013-2017/GVI"
```

❖ Importación de las bandas

```
B1<-read.table("GVI_02_05.txt")
B2<-read.table("GVI_03_08.txt")
B3<-read.table("GVI_09_09.txt")
B4<-read.table("GVI_11_02.txt")
B5<-read.table("GVI_14_02.txt")
B6<-read.table("GVI_14_12.txt")
B7<-read.table("GVI_15_01.txt")
B8<-read.table("GVI_16_02.txt")
B9<-read.table("GVI_18_04.txt")
B10<-read.table("GVI_20_05.txt")
B11<-read.table("GVI_23_07.txt")
B12<-read.table("GVI_23_09.txt")
B13<-read.table("GVI_26_11.txt")
B14<-read.table("GVI_28_03.txt")
B15<-read.table("GVI_31_07.txt")
```

❖ Nombre para las columnas

```
nombresB1<-c("NDB1")
nombresB2<-c("NDB2")
nombresB3<-c("NDB3")
nombresB4<-c("NDB4")
nombresB5<-c("NDB5")
nombresB6<-c("NDB6")
nombresB7<-c("NDB7")
nombresB8<-c("NDB8")
nombresB9<-c("NDB9")
nombresB10<-c("NDB10")
nombresB11<-c("NDB11")
```

```
nombresB12<-c("NDB12")  
nombresB13<-c("NDB13")  
nombresB14<-c("NDB14")  
nombresB15<-c("NDB15")
```

```
names(B1)<-nombresB1  
names(B2)<-nombresB2  
names(B3)<-nombresB3  
names(B4)<-nombresB4  
names(B5)<-nombresB5  
names(B6)<-nombresB6  
names(B7)<-nombresB7  
names(B8)<-nombresB8  
names(B9)<-nombresB9  
names(B10)<-nombresB10  
names(B11)<-nombresB11  
names(B12)<-nombresB12  
names(B13)<-nombresB13  
names(B14)<-nombresB14  
names(B15)<-nombresB15
```

❖ Acceso a las columnas

```
attach(B1)  
attach(B2)  
attach(B3)  
attach(B4)  
attach(B5)  
attach(B6)  
attach(B7)
```

```
attach(B8)
attach(B9)
attach(B10)
attach(B11)
attach(B12)
attach(B13)
attach(B14)
attach(B15)
```

❖ **Transformación de las bandas importadas a matriz**

```
m1<-as.matrix(NDB1)
m2<-as.matrix(NDB2)
m3<-as.matrix(NDB3)
m4<-as.matrix(NDB4)
m5<-as.matrix(NDB5)
m6<-as.matrix(NDB6)
m7<-as.matrix(NDB7)
m8<-as.matrix(NDB8)
m9<-as.matrix(NDB9)
m10<-as.matrix(NDB10)
m11<-as.matrix(NDB11)
m12<-as.matrix(NDB12)
m13<-as.matrix(NDB13)
m14<-as.matrix(NDB14)
m15<-as.matrix(NDB15)
```


❖ **Vector de nombre “tiempo” que contiene los meses**

```
tiempo<-
c(0,7.93,12.03,18.39,20.99,25.75,28.61,31.07,33.67,35.33,38.09,39.39,
42.85,44.35,45.88)
```

❖ **Organización de las bandas en forma de columnas**

```
todas_bandas<-
cbind(m1,m2,m3,m4,m5,m6,m7,m8,m9,m10,m11,m12,m13,m14,m15)
```

❖ **Matrices que contienen los resultados, en la primera se guarda la predicción para la fecha indicada y en la segunda se origina el coeficiente de determinación para el modelo dado**

```
prediccion5<-matrix(nrow=nrow(todas_bandas),ncol=1)
coefi<-matrix(nrow=nrow(todas_bandas),ncol=1)
```

❖ **Modelo polinómico de grado 5**

```
for (i in 1:nrow(todas_bandas))
{
  fecha<-as.numeric(tiempo)
  indice<-as.numeric(todas_bandas[i,])
```

❖ **Ordenación del cálculo de regresión lineal**

```
modelo5<-
lm(indice~fecha+l(fecha^2)+l(fecha^3)+l(fecha^4)+l(fecha^5))
residual<-modelo5$residuals
residual<-data.frame(residual)
```

- ❖ **Predicción para el modelo polinómico ajustándose el número del mes sobre el cual se quiere la predicción, para este caso se tomó el valor 47**

```
prediccion5[i,]<-predict.lm(modelo5,data.frame(fecha=47))
cuadrado<-
residual[1,]^2+residual[2,]^2+residual[3,]^2+residual[4,]^2+residual[5,]^2
+residual[6,]^2+residual[7,]^2+residual[8,]^2+residual[9,]^2+residual[10,]
^2+residual[11,]^2+residual[12,]^2+residual[13,]^2+residual[14,]^2+resid
ual[15,]^2
coefi[i,]<-1-(cuadrado/(var(todas_bandas[i,])*15))
```

- ❖ **Control del resultado del coeficiente de determinación**

```
for (i in 1:nrow(coefi)){
  if (coefi[i,]<0) {
    coefi[i,] = 1;
  }
  else {
    coefi[i,]=coefi[i,];
  }
}
```

- ❖ **Vector donde se almacena el índice de vegetación sobre el cual se corre la simulación**

```
resultado<-
cbind(m1,m2,m3,m4,m5,m6,m7,m8,m9,m10,m11,m12,m13,m14,m15,pr
ediccion,coefi)
summary(coefi)
```

❖ **Generación de una gráfica donde se plotean los promedios de cada escena**

```
plot(tiempo,c(mean(m1),mean(m2),mean(m3),mean(m4),mean(m5),mean(m6),mean(m7),mean(m8),mean(m9),mean(m10),mean(m11),mean(m12),mean(m13),mean(m14),mean(m15)),type="l")
```

❖ **Visualización de los índices de cada escena junto a su valor simulado para la fecha dada**

```
fix(resultado)
summary(prediccion5)
modelo5
```

Para el aumento del grado polinómico, solo se cambio el valor de 5 por el valor 6 y éste por el valor 7 quedándonos hasta este último grado debido que de él se obtuvieron los valores requeridos para la creación del modelo matemático.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos se muestran a continuación siguiendo la secuencia de los objetivos planteados para este trabajo de investigación.

COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO Y GEOESPACIAL DEL VIGOR DE LA VEGETACIÓN PARA ARVI, NDVI Y GVI EN LA CUENCA DEL RÍO AREO PARA EL PERIODO EN ESTUDIO

Los cuadros 2, 3 y 4 que se muestran a continuación arrojan los valores máximos, mínimos, media, mediana, primer cuartil y tercer cuartil para cada índice de vegetación los cuales fueron obtenidos del programa estadístico R.

Cuadro 2. Resumen general de los resultados estadísticos obtenidos para el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI) para el periodo 2013-2017.

Escena	Mínimo	1er Q	Mediana	Media	3er Q	Máximo
31/07/13	-0,0111	0,4261	0,7272	0,655	0,9298	1
28/03/14	-0,2883	0,3114	0,4464	0,5019	0,6832	1
03/08/14	-0,0217	0,6063	0,8004	0,7478	0,9329	1
11/02/15	0,0077	0,2192	0,5128	0,5068	0,7639	1
02/05/15	-0,0695	0,1416	0,3488	0,3944	0,6026	1
23/09/15	0,0112	0,56	0,7817	0,7231	0,9425	1
26/11/15	0,0022	0,525	0,7544	0,6907	0,9363	1
14/02/16	-0,0069	0,3332	0,568	0,5525	0,7924	1
18/04/16	-0,0892	0,2491	0,3774	0,4442	0,5987	1
20/05/16	-0,0764	0,3617	0,6348	0,5976	0,8717	1
23/07/16	-0,134	0,5693	0,7847	0,72	0,9216	1
09/09/16	-0,1996	0,6756	0,8735	0,8008	0,9829	1
14/12/16	-0,0138	0,6606	0,8664	0,7857	0,9837	1
15/01/17	-0,293	0,6968	0,8759	0,8215	0,9775	1
16/02/17	-0,2843	0,3637	0,6397	0,601	0,8817	1

Cuadro 3. Resumen general de los resultados estadísticos obtenidos para el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para el periodo 2013-2017.

Escena	Mínimo	1er Q	Mediana	Media	3er Q	Máximo
31/07/13	0,033	0,3625	0,5605	0,5188	0,7077	0,8624
28/03/14	-0,1108	0,2975	0,3956	0,4249	0,5344	0,8763
03/08/14	0,0514	0,5614	0,6389	0,6103	0,752	0,8577
11/02/15	0,0307	0,1909	0,3886	0,3897	0,5554	0,8629
02/05/15	0,0207	0,1371	0,2624	0,3134	0,4386	0,8405
23/09/15	0,0518	0,4713	0,6221	0,5933	0,7573	0,8875
26/11/15	0,0274	0,4024	0,5554	0,5304	0,7045	0,8806
14/02/16	0,0136	0,2709	0,4189	0,4239	0,574	0,8665
18/04/16	-0,0144	0,2623	0,3505	0,3944	0,4941	0,8467
20/05/16	-0,0329	0,3121	0,5026	0,4825	0,6817	0,8427
23/07/16	0,0528	0,4771	0,6227	0,59	0,7474	0,8664
09/09/16	-0,2388	0,561	0,7047	0,6593	0,7962	0,8891
14/12/16	-0,0316	0,5122	0,6451	0,6123	0,7546	0,8866
15/01/17	-0,2453	0,5697	0,6948	0,6602	0,7582	0,8859
16/02/17	-0,1775	0,2793	0,4523	0,4407	0,6167	0,8691

Cuadro 4. Resumen general de los resultados estadísticos obtenidos para el Índice de Vegetación Verde (GVI) para el periodo 2013-2017.

Escena	Mínimo	1er Q	Mediana	Media	3er Q	Máximo
31/07/13	-0,2571	0,0423	0,1011	0,1091	0,1958	0,4561
28/03/14	-0,2636	0,0161	0,0544	0,064	0,0986	0,4411
03/08/14	-0,172	0,0778	0,1412	0,1394	0,2047	0,3511
11/02/15	-0,2427	-0,0184	0,0406	0,0403	0,1036	0,5138
02/05/15	-0,2756	-0,0491	0,0059	0,0108	0,0689	0,3807
23/09/15	-0,1918	0,0687	0,1371	0,1361	0,2084	0,4399
26/11/15	-0,2464	0,4405	0,1004	0,0998	0,1685	0,4543
14/02/16	-0,2399	0,0042	0,0573	0,0566	0,1122	0,4018
18/04/16	-0,1934	0,0112	0,0427	0,0561	0,0848	0,8362
20/05/16	-0,2068	0,0261	0,0877	0,0939	0,1749	0,4247
23/07/16	-0,1459	0,0783	0,1495	0,1507	0,2311	0,4306
09/09/16	-0,1551	0,0982	0,1741	0,1653	0,2315	0,458
14/12/16	-0,2142	0,0691	0,1352	0,1298	0,1899	0,446
15/01/17	-0,1672	0,0983	0,144	0,1414	0,1766	0,4503
16/02/17	-0,2622	0,0046	0,0599	0,0595	0,1296	0,4702

El análisis estadístico arrojado por el Índice de vegetación resistente a la atmósfera (ARVI) mostró que, de acuerdo a las medias pertenecientes a cada escena, el valor mínimo resultó ser 0,39 el 2 de mayo del 2015 y el valor máximo de 0,82 el 15 de enero del 2017.

Por consiguiente, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) arrojó de acuerdo a sus medias, un valor mínimo de 0,31 el 2 de mayo de 2015 y un máximo de 0,66 igualmente el 15 de enero de 2017.

Por último, el índice de vegetación verde (GVI) obtuvo un valor mínimo de 0,01 el 2 de mayo de 2015 y un máximo de 0,16 el 9 de septiembre de 2016.

De acuerdo a estos resultados, ARVI obtuvo mayores valores de sus máximos y mínimos en comparación a NDVI y GVI. Por último, GVI resultó obtener los valores más bajos en cuanto a los demás índices de vegetación.

De manera general, ARVI y NDVI se comportaron igual debido que sus valores máximos y mínimos resultaron en las mismas fechas a pesar de ARVI mostrar valores más altos, sin embargo, GVI resultó ser mucho más variable en cuanto a sus valores lo cual puede explicarse a lo complejo de su fórmula.

A razón de estos resultados y en comparación al trabajo realizado por Hernández (2010), los valores de NDVI disminuyeron. En cambio, los valores medios de ARVI aumentaron.

A continuación se muestran los histogramas que explican la distribución de los valores de los píxeles en una comparación de frecuencias para cada Índice de vegetación en relación a las escenas seleccionadas para el comportamiento geoespacial que siguen después de cada histograma.

El siguiente histograma muestra el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013. Los valores arrojados por este índice que están comprendidos entre 0.5 y 1.0 representan el 70,58% de vegetación vigorosa. Por otro lado, los valores comprendidos entre 0.2 y 0.49 significan el 16,60% resultando para este último, una vegetación no vigorosa y un 12,82% representa valores sin vegetación comprendiendo valores negativos hasta 0.19. El valor mínimo para este índice resultó -0.01 y una media de 0.65 enfatizando que todos los valores máximos para ARVI resultaron 1 debido al ajuste explicado previamente en la metodología.

Para el apoyo en cuanto a la interpretación de estos resultados, Sobrino (2000) afirma que valores negativos de índices de vegetación indican superficies sin vegetación, tal como agua, nieve o nubes y valores positivos crecientes indican vegetación creciente, el suelo posee valores bajos, mientras la vegetación se encuentra dentro del rango de 0.2 a 0.8. Por otra parte, los valores positivos representan la vegetación considerando los iguales o superiores a 0.5 como vegetación vigorosa, densa o fotosintéticamente activa.

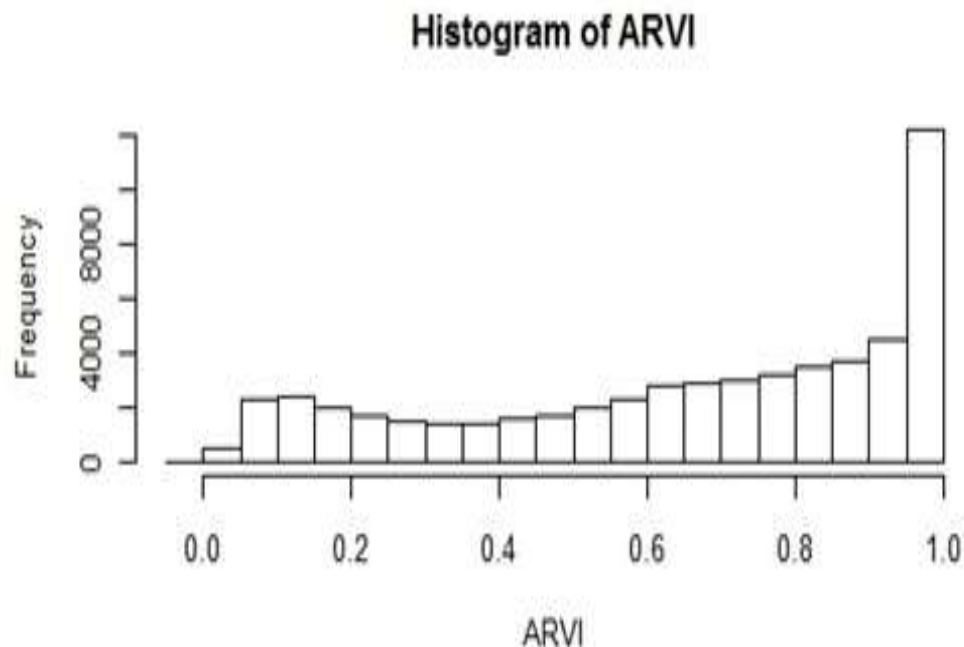


Figura 8. Histograma que muestran la frecuencia para ARVI en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.

A continuación se muestra la gráfica correspondiente al comportamiento geoespacial obtenida del software GRASS GIS donde se observa de acuerdo a la ubicación en el espacio de la cuenca, hacia dónde se sitúa el mayor vigor de la vegetación. Sólo serán descritas la primera, intermedia y última escena de cada índice de vegetación debido que el comportamiento se pudo observar generalmente hacia la misma zona en todas las fechas.

En la figura 9 se muestra el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI) en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013. Se puede apreciar vegetación en toda la cuenca pero la más densa se observa en la parte nor-este y zonas en la parte sur sin vegetación.

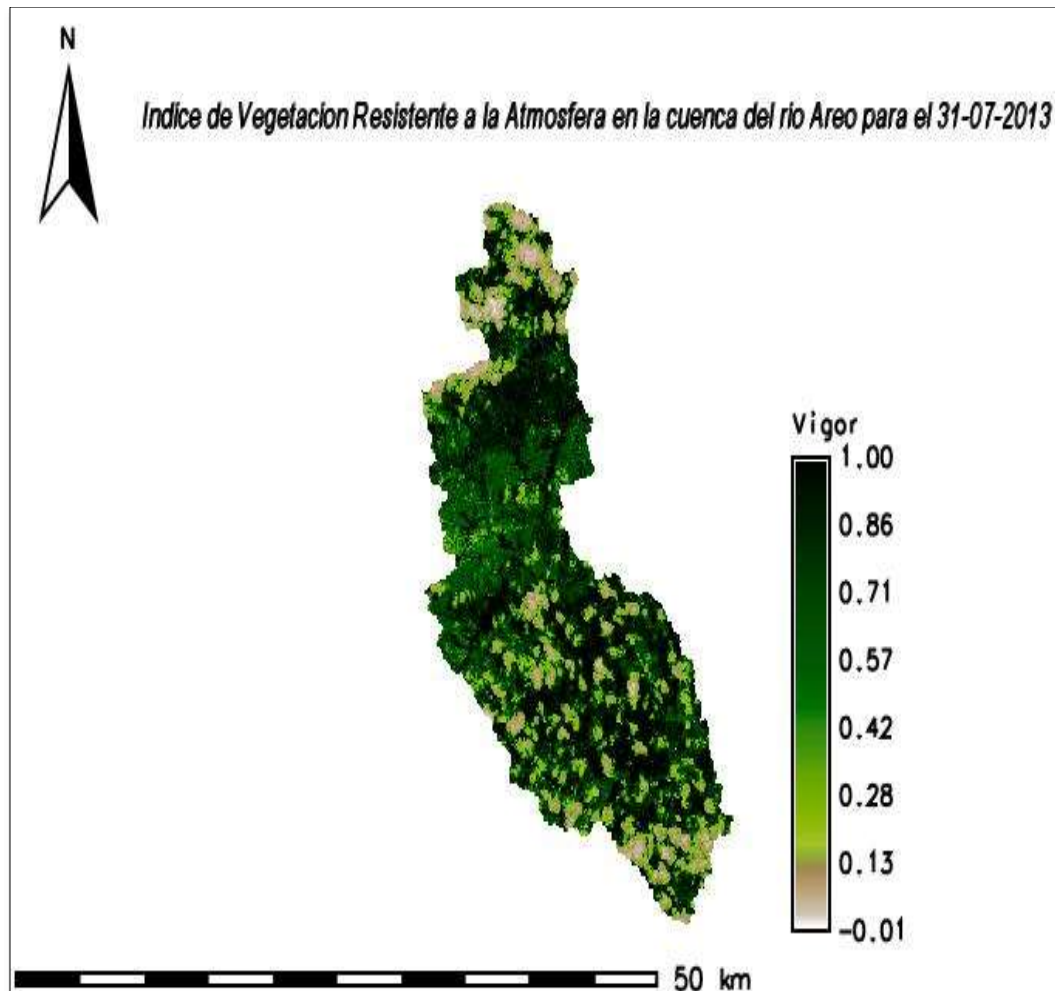


Figura 9. Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.

El siguiente histograma que corresponde al Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013, muestra que el 59,73% representa la vegetación vigorosa cuyos valores van comprendidos entre 0.5 a 0.9. Por otro lado, el 26,59% indica presencia de vegetación que va comprendida desde 0.2 a 0.49 y un 13,67% sin vegetación. El valor máximo resultante fue de 0.86 hacia la zona norte de la cuenca, el valor mínimo resultó 0.03 y una media de 0.51.

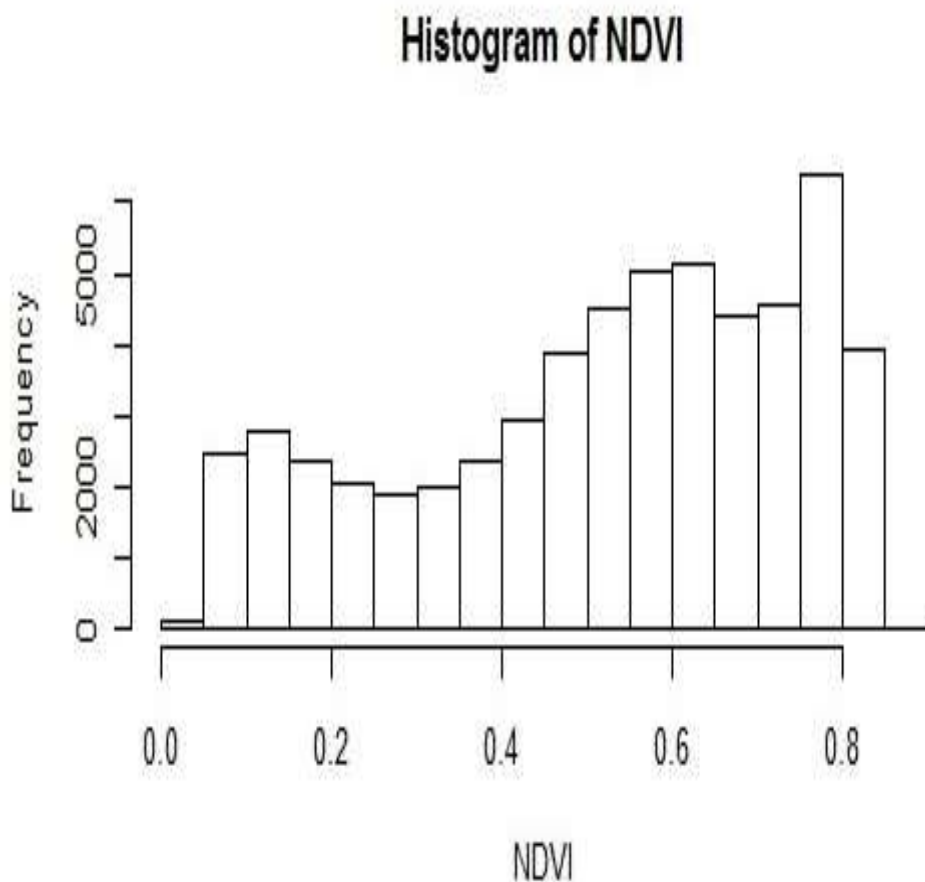


Figura 10. Histograma que muestra la frecuencia para NDVI en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.

En la Figura 11 se muestra el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013. Se puede apreciar vegetación en la mayor parte de la cuenca siendo más densa en la parte nor-este.

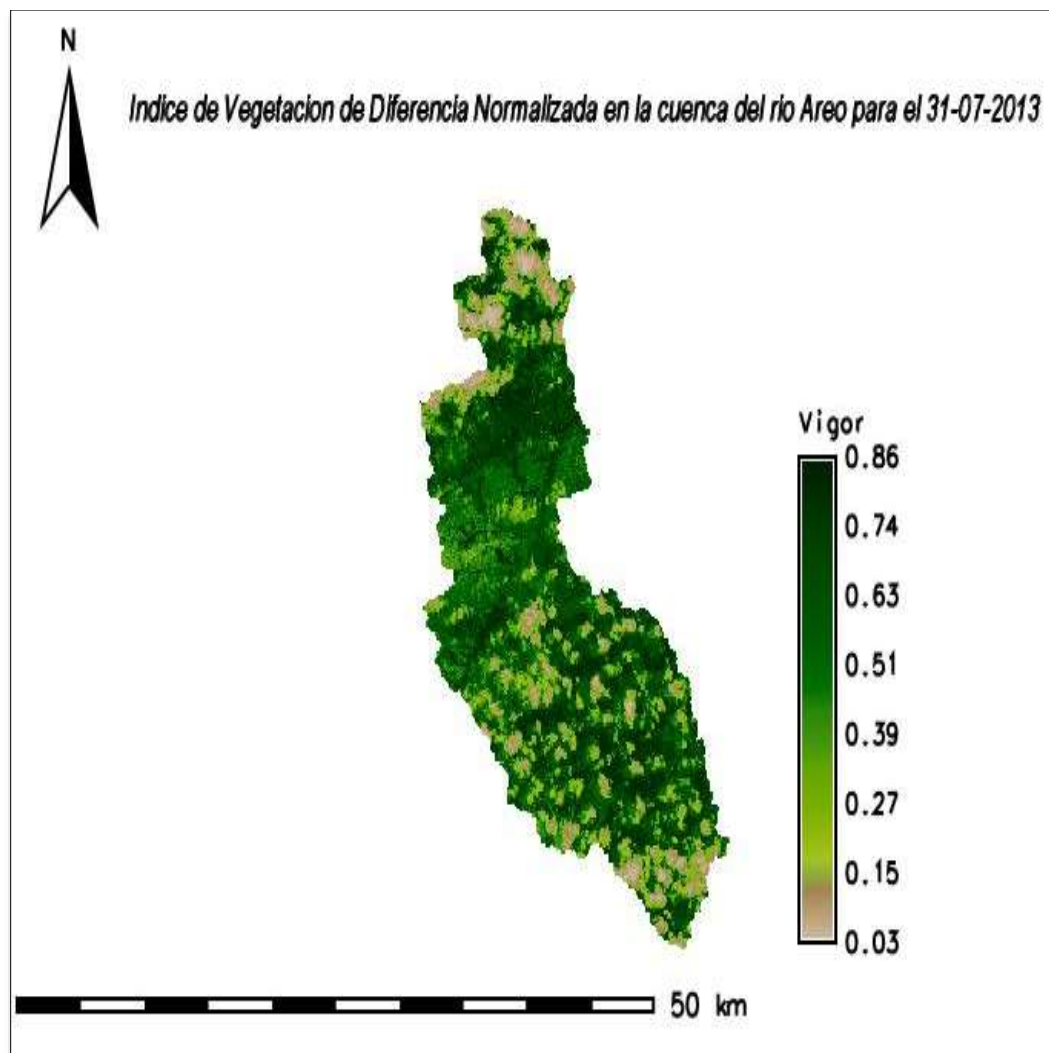


Figura 11. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.

El siguiente histograma muestra que para el Índice de Vegetación Verde en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013 el 75,91% representa ausencia de vegetación incluyendo los valores negativos mientras que el 24,09% indica la presencia de vegetación pero siendo esta no vigorosa. El valor máximo para este índice resultó 0.45, un valor mínimo de -0.25 y una media de 0.10.

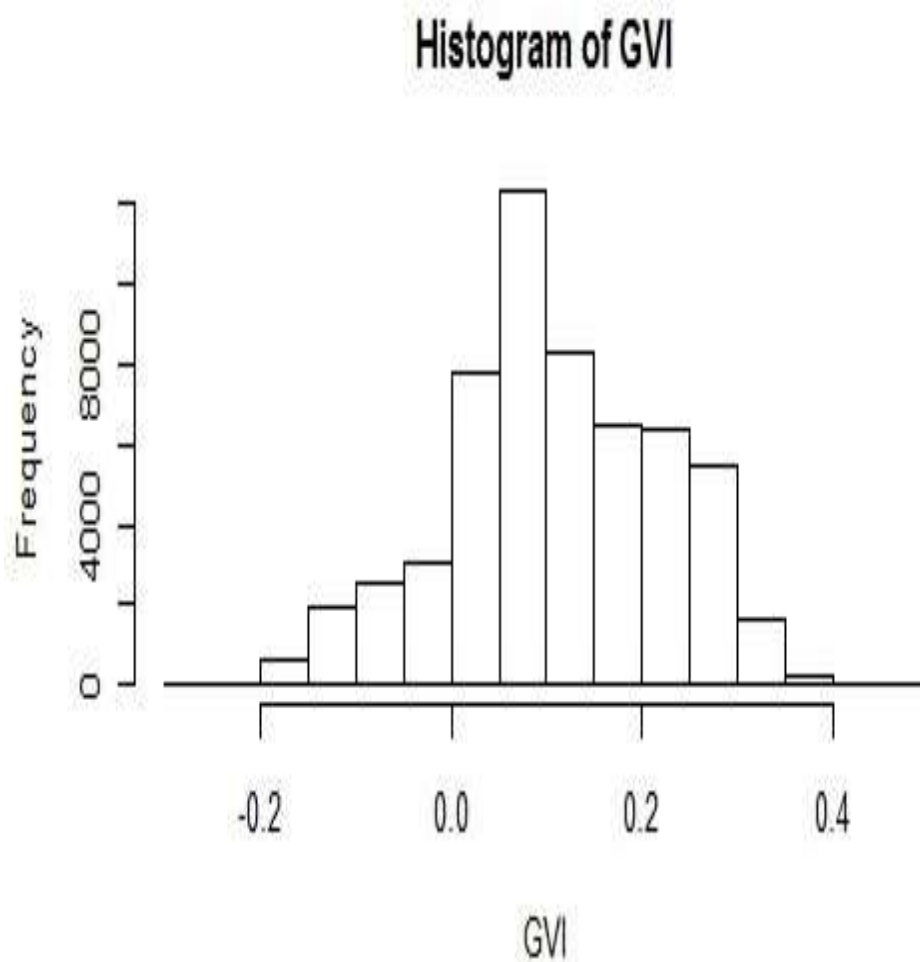


Figura 12. Histograma que muestra la frecuencia para el GVI en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.

En la figura 13 se muestra el Índice de Vegetación Verde (GVI) en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013. Se puede apreciar de manera general poca vegetación en el área de la cuenca.

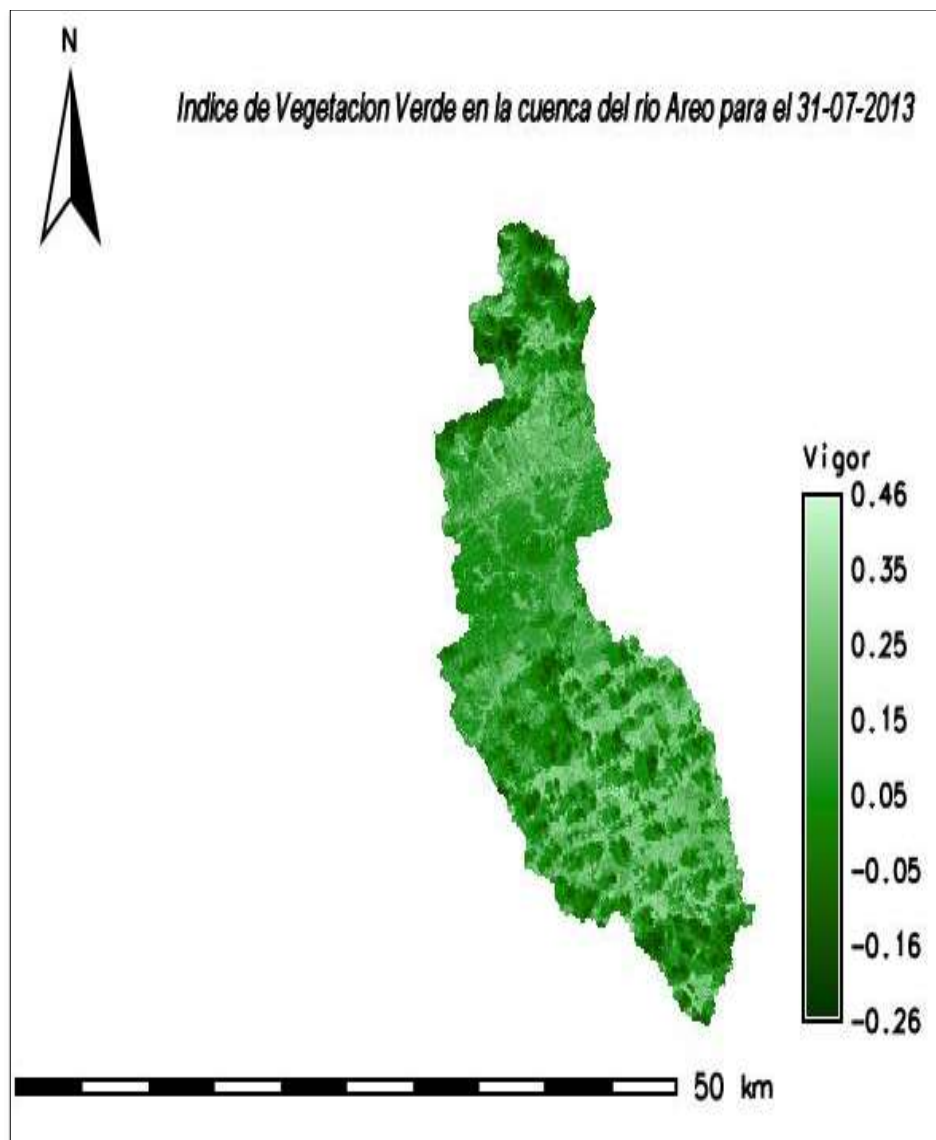


Figura 13. Índice de Vegetación Verde en la cuenca del río Areo para el 31 de julio del 2013.

El siguiente histograma muestra el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015. Valores por encima de 0.5 resultaron el 76,93% y valores con vegetación 13,69%, por tanto, el 9,37% por debajo de 0.2. El valor mínimo resultó 0 y una media de 0.69.

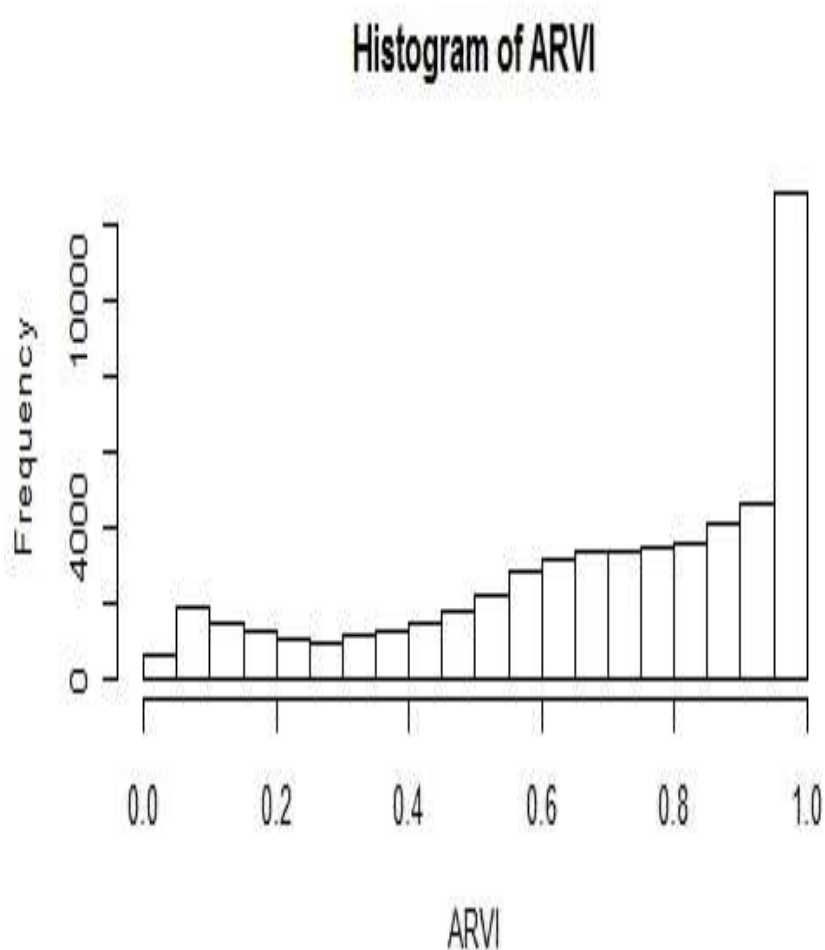


Figura 14. Histograma que muestra la frecuencia para ARVI en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.

La figura 15 muestra el Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015. La cuenca cuenta con mucha vegetación, la más densa se observa al norte.

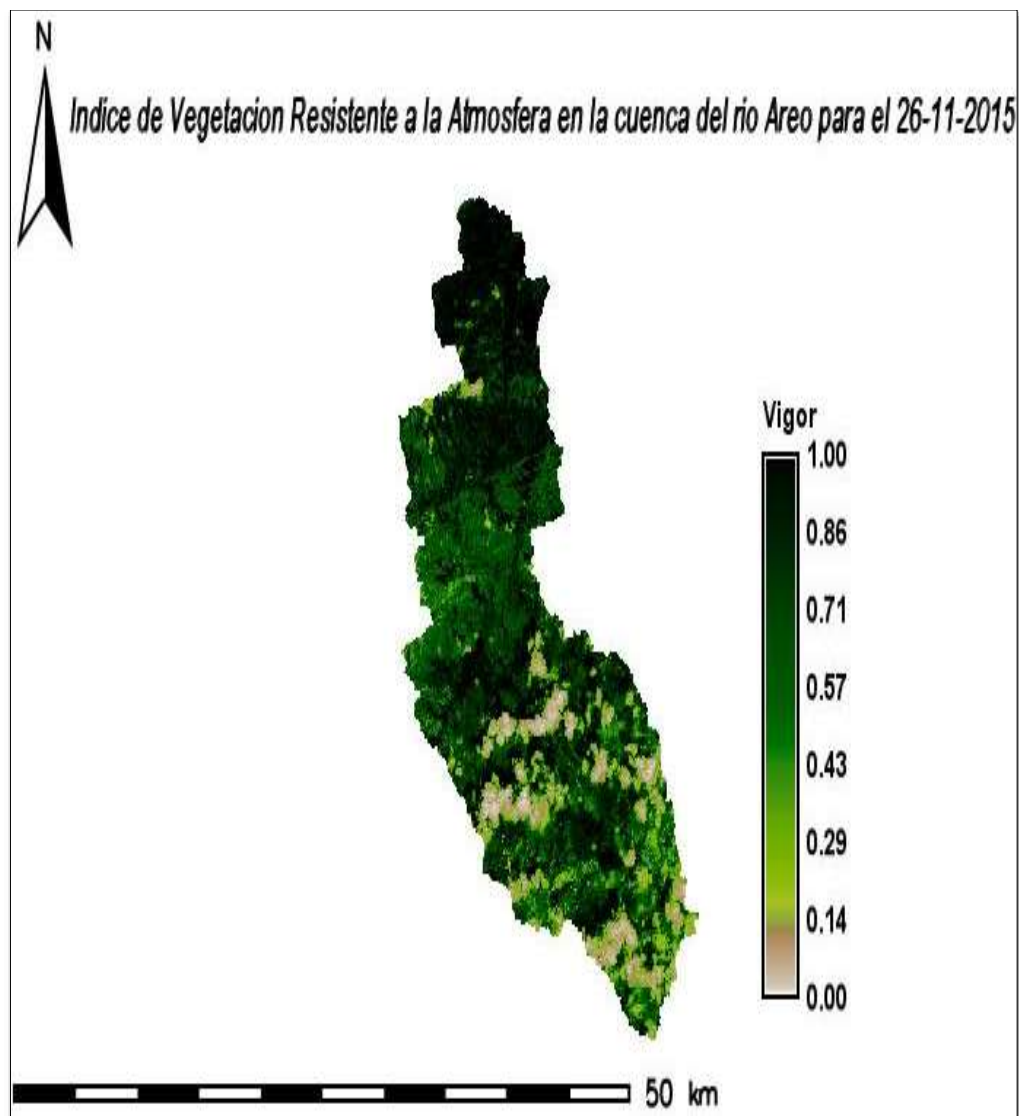


Figura 15. Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.

El siguiente histograma muestra el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015. El 60,04% por encima de 0.5 mientras que el 29,70% vegetación no vigorosa y el 10,26% ausencia de vegetación. El valor máximo resultante fue de 0.88 hacia la parte norte, el valor mínimo fue de 0.03 y una media de 0.53.

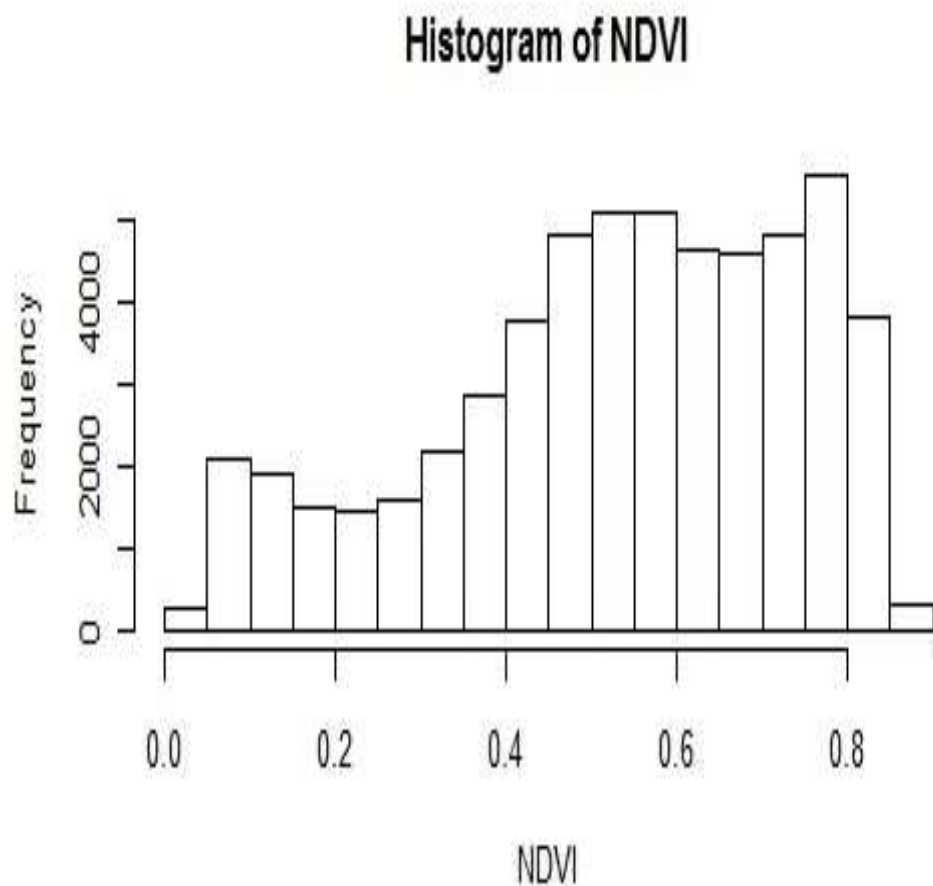


Figura 16. Histograma que muestra la frecuencia para el NDVI en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.

La figura 17 muestra el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015. Se observa vegetación fotosintéticamente activa en la parte norte y vegetación uniforme en el área de la cuenca exceptuando algunas zonas del sur.

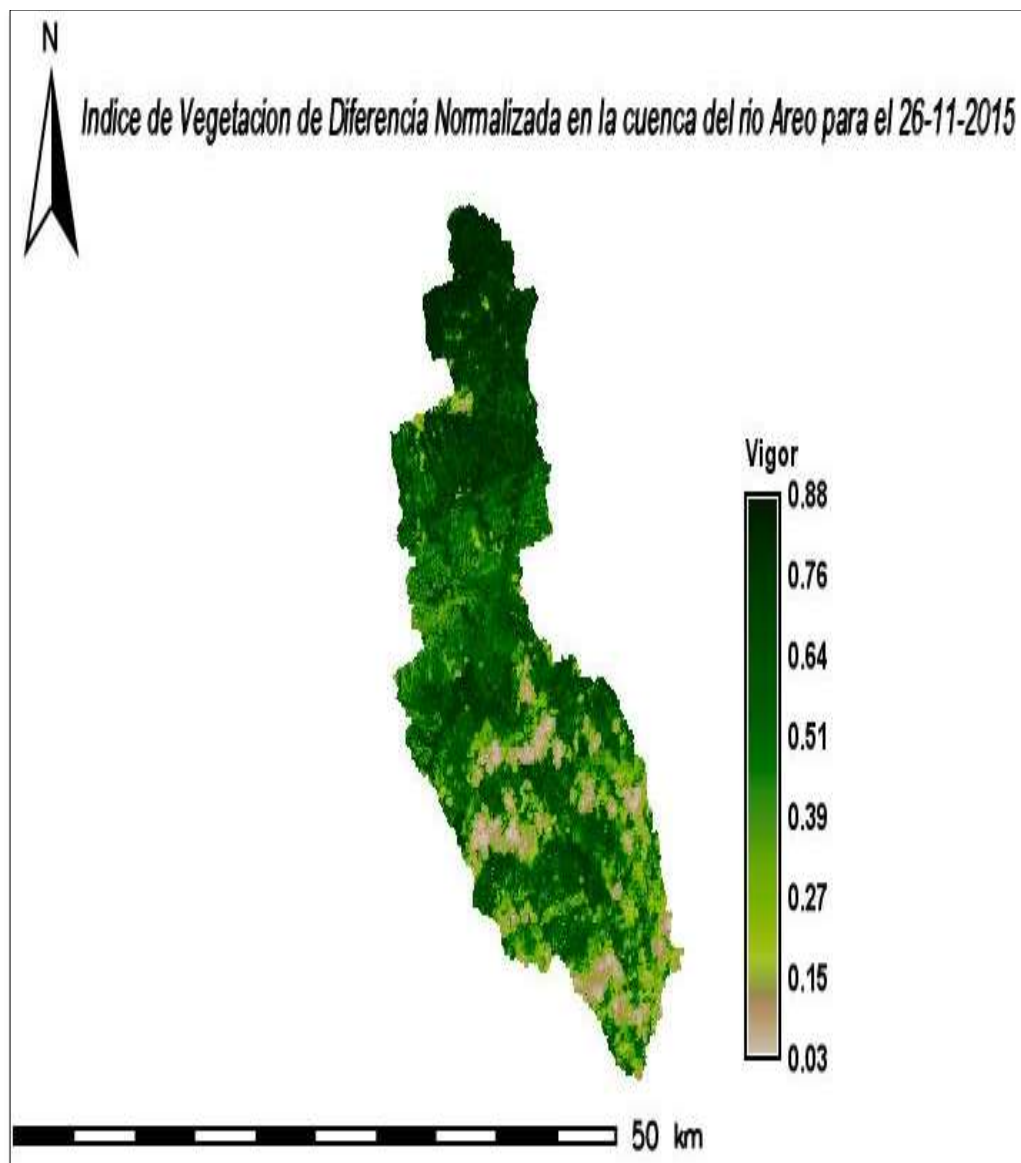


Figura 17. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.

El siguiente histograma muestra el Índice de Vegetación Verde en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015. Los valores sin vegetación representan el 84,50% y la vegetación no vigorosa el 15,50%. El valor máximo fue de 0.45, el valor mínimo de -0.25 y una media 0.10.

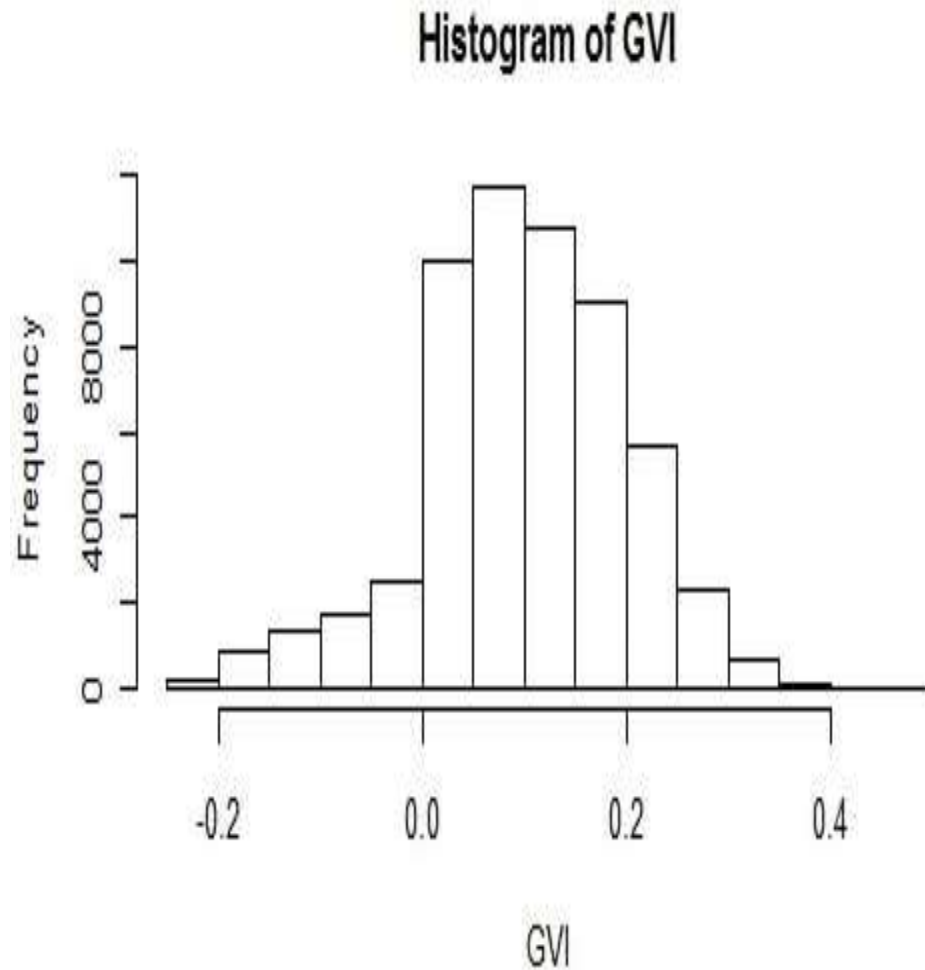


Figura 18. Histograma que muestra la frecuencia para el GVI en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.

En la figura 19 se muestra el Índice de Vegetación Verde en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015. La mayor parte de la cuenca cuenta con vegetación no vigorosa, solo al norte se observa la mayor vegetación.

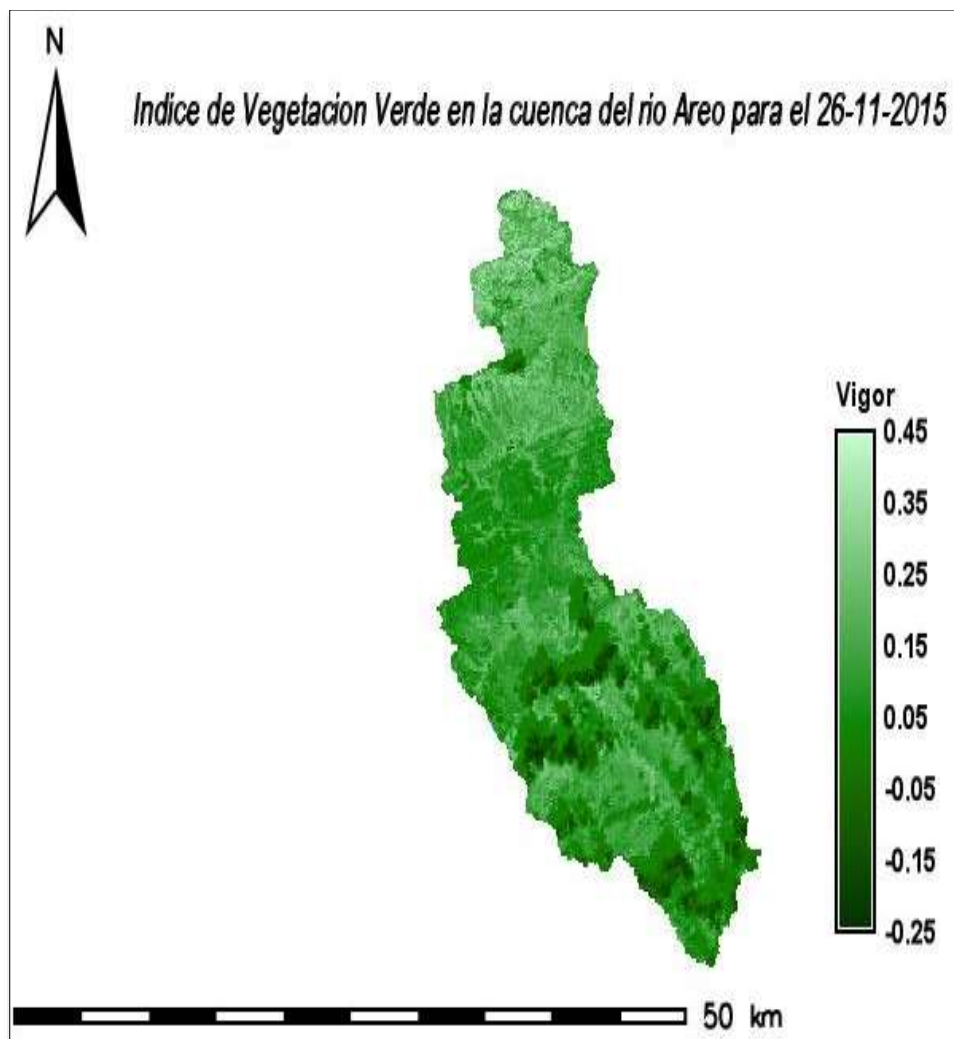


Figura 19. Índice de Vegetación Verde en la cuenca del río Areo para el 26 de noviembre del 2015.

El siguiente histograma muestra el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017. La vegetación vigorosa representa el 64,01% mientras que el 20,16% son valores sin vigor y el 15,83% por debajo de 0.2. El valor mínimo resultante fue de -0.28 hacia el sur de la cuenca y una media de 0.60.

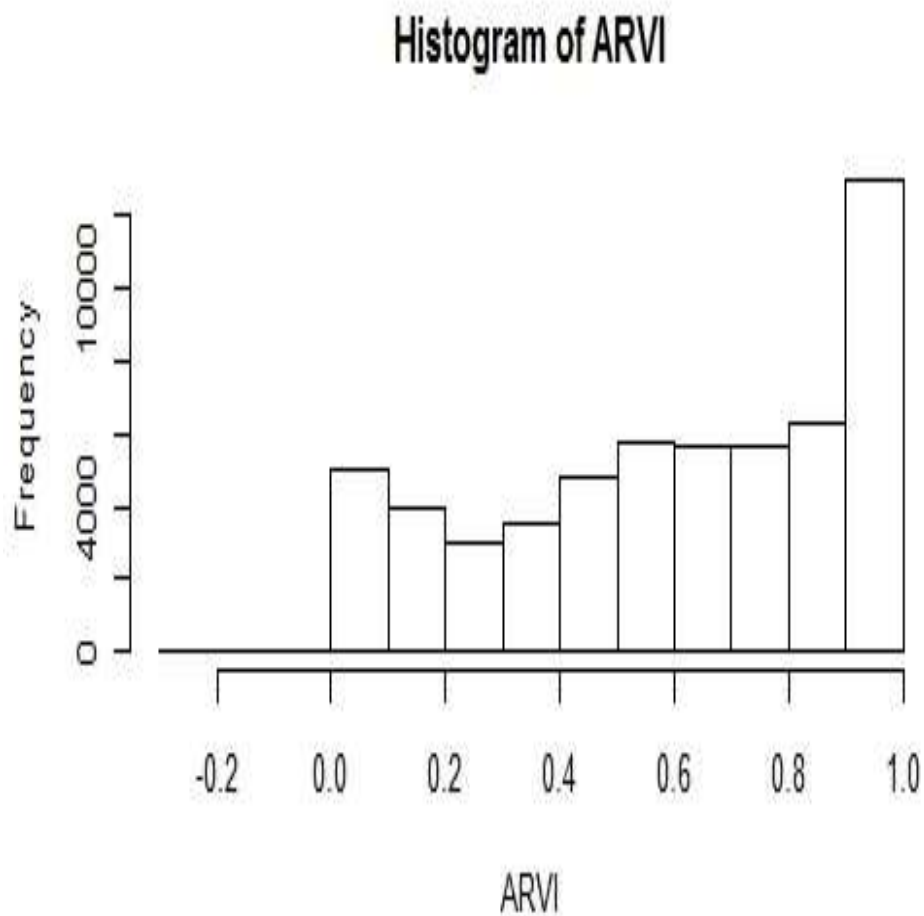


Figura 20. Histograma que muestra la frecuencia para ARVI en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017.

La figura 21 muestra el Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017. La vegetación más densa se sitúa al norte. Varias zonas de la parte sur no presentan vegetación.

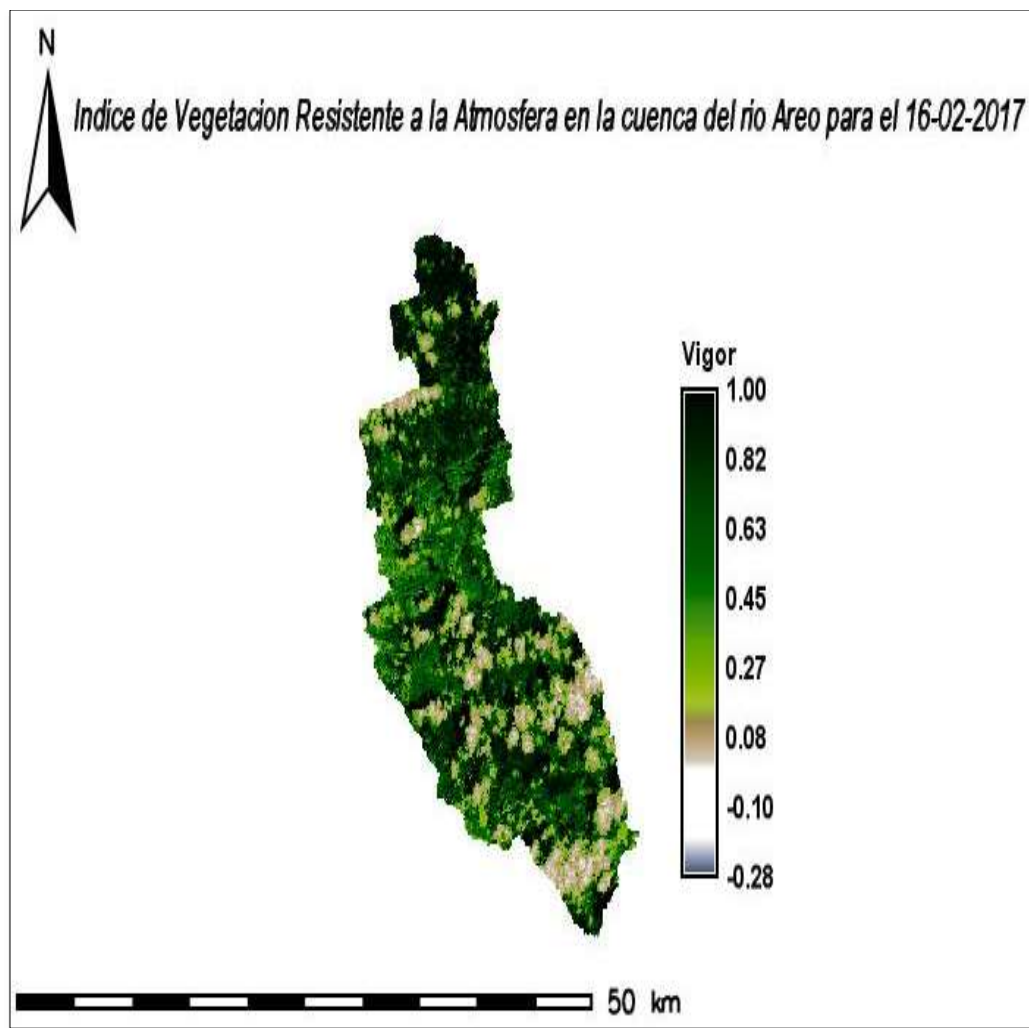


Figura 21. Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017.

El siguiente histograma muestra el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017. El 41,91% son valores por encima de 0.5 y el 39,89% indica la vegetación sin vigor mientras que los valores por debajo de 0.2 son el 18,19%. El valor máximo resultó 0.87 hacia la zona norte, el valor mínimo fue de -0.18 y una media de 0.44.

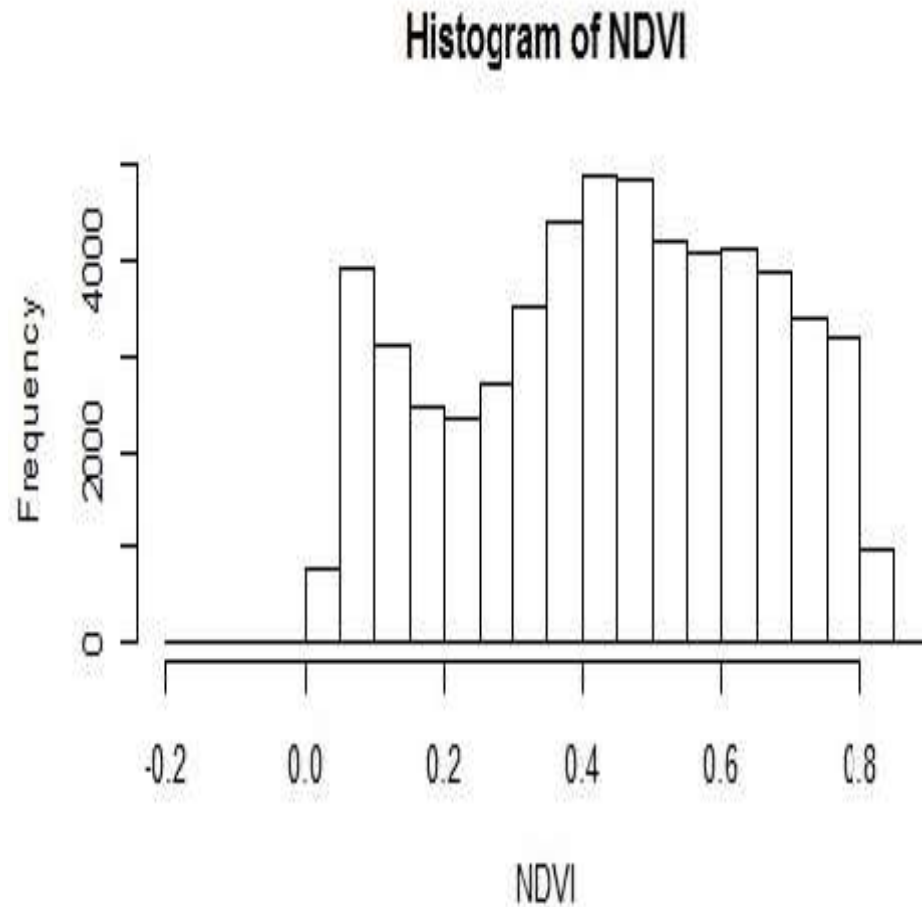


Figura 22. Histograma que muestra la frecuencia para el NDVI en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017.

La figura 23 muestra el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017. En parte del norte se observa la vegetación más vigorosa mientras que en muchas zonas del sur presenta solo vegetación.

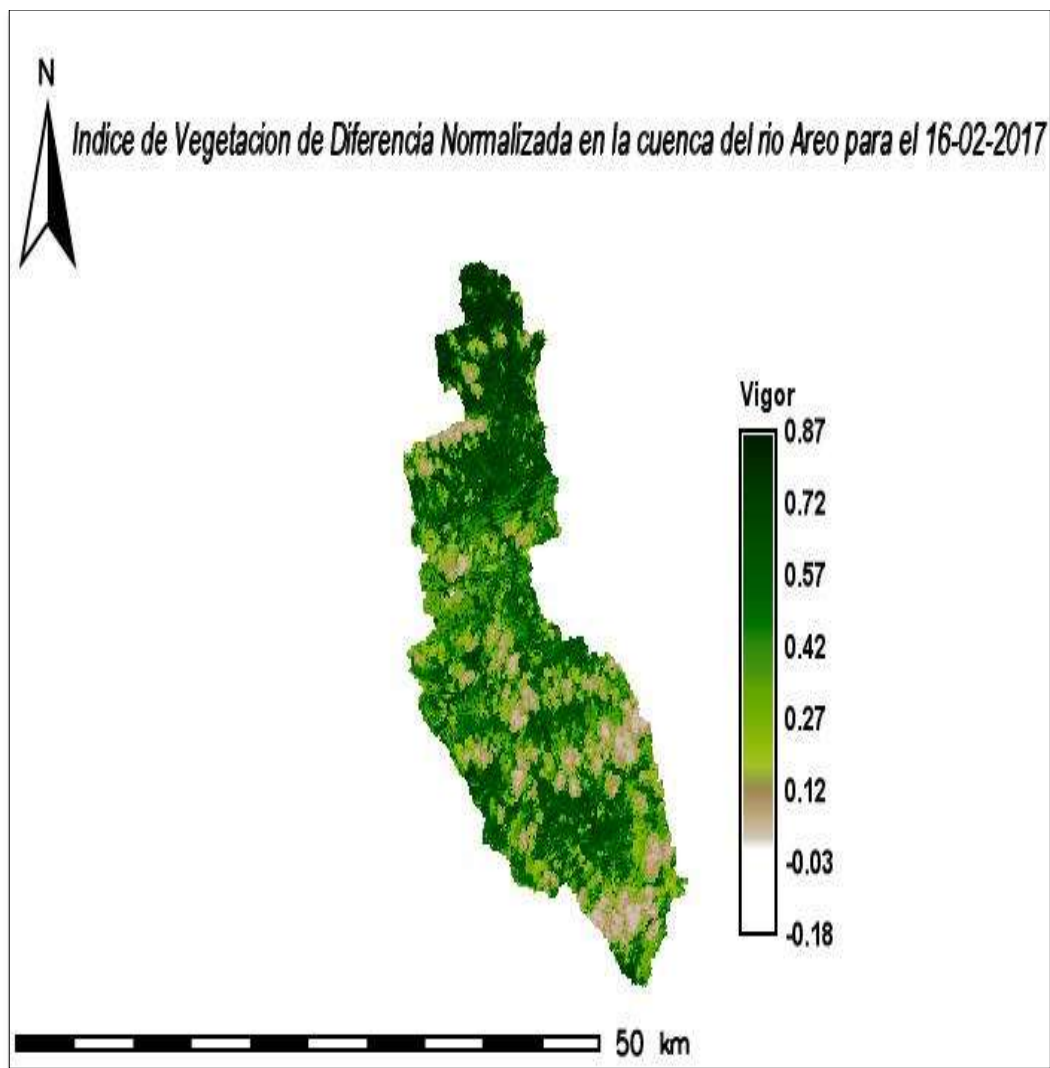


Figura 23. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017.

El siguiente histograma muestra el Índice de Vegetación Verde en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017. La vegetación no vigorosa corresponde al 7,10% y las áreas sin vegetación representan el 92,90%. El valor máximo resultó de 0.47, el valor mínimo de -0,26 y una media 0.06.

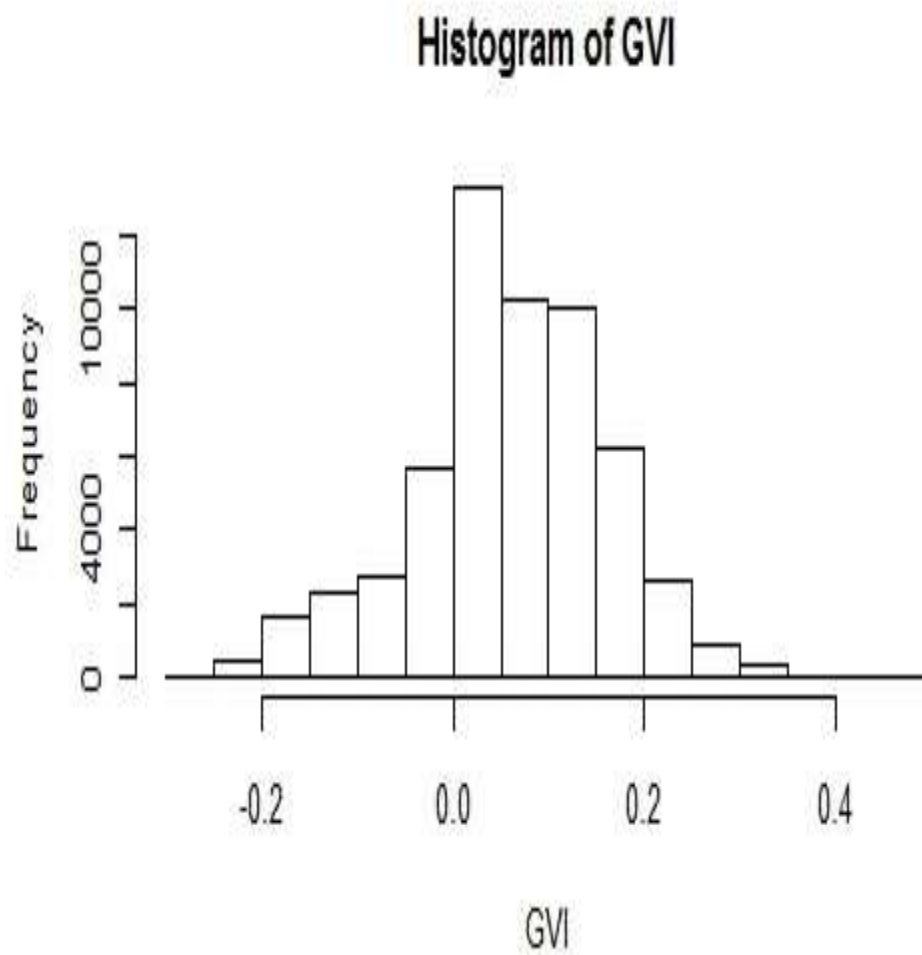


Figura 24. Histograma que muestra la frecuencia para el GVI en la cuenca del río para el 16 de febrero del 2017.

La figura 25 muestra el Índice de Vegetación Verde en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017. Se observa poca presencia de vegetación en la cuenca, la mayor parte se localiza al nor-este de la misma.

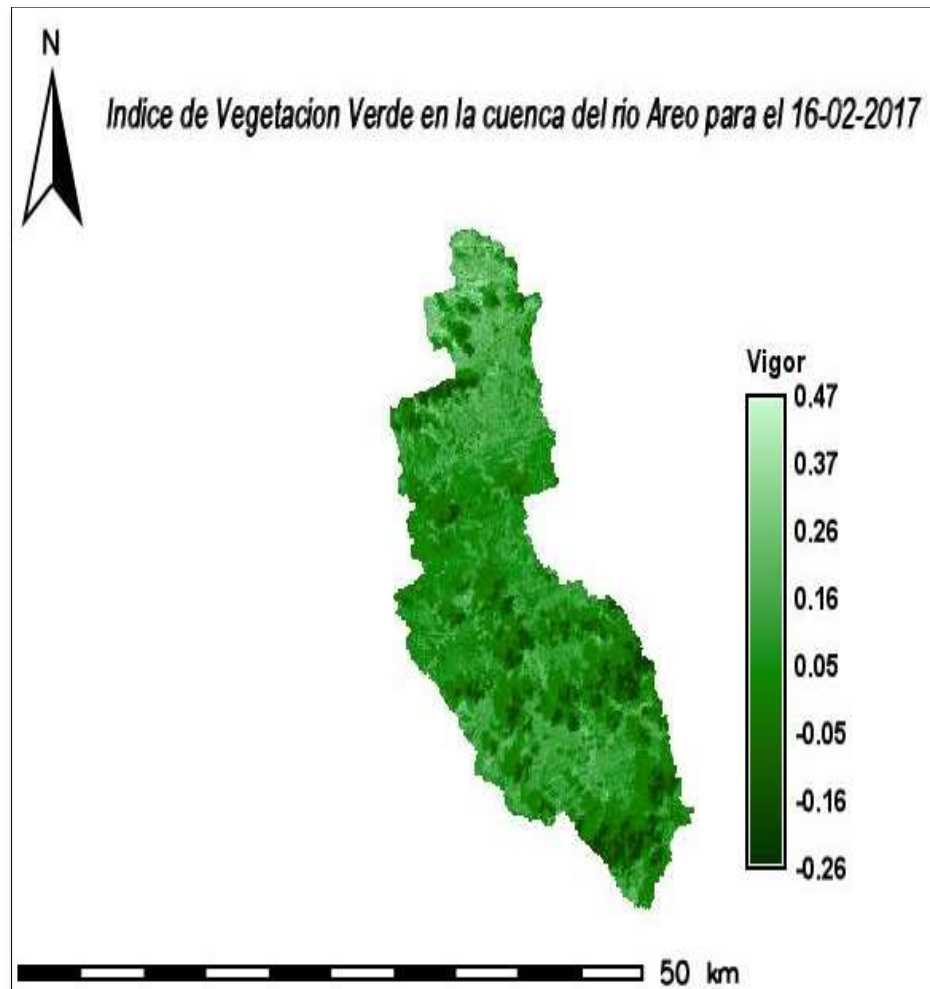


Figura 25. Índice de Vegetación Verde en la cuenca del río Areo para el 16 de febrero del 2017.

De acuerdo a los resultados arrojados por las gráficas del comportamiento geoespacial, ARVI mostró un aumento en cuanto a sus valores para la escena intermedia los cuales disminuyeron en la última. Igualmente sucedió con NDVI.

Por otro lado, GVI se mantuvo igual en la primera e intermedia escena y disminuyendo igualmente sus valores en la última.

DETERMINACIÓN DE DIFERENCIAS ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS TRES ÍNDICES DE VEGETACIÓN

La figura 26 muestra el resultado obtenido del análisis estadístico para los tres índices de vegetación indicando diferencias estadísticamente significativas entre los índices de acuerdo al nivel de significancia para rangos p-values mostrados en la figura 27.

```
> summary(anava)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
tratamientos  2 2.38632  1.19316   111.25 < 2.2e-16 ***
Residuals    42  0.45045  0.01072
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0
```

Figura 26. Resumen del Análisis de Varianza.

Descripción común	Rango p-value	Estrellas de significancia
Extremadamente significativa	0	***
Altamente significativa	.001	**
Estadísticamente significativa	.01	*
Pudiera ser significativa	.05	.
No significativa	.1	

Figura 27. Nivel de Significancia para rangos p-values (Verzani, 2005)

Por tanto, mediante los resultados obtenidos de la desviación estándar, se escogió el índice con menor variabilidad resultando para este el GVI o Índice de Vegetación Verde por presentar entre los valores mínimos el valor menor, entre los valores máximos el valor menor y entre las medias la menor media cuyos valores se observan en la figura 28.

```

> desviaciones
      arvi      gvi      ndvi
Min.    0.1761 0.06286 0.1264
1st Qu. 0.2354 0.08089 0.1765
Median  0.2566 0.09180 0.1846
Mean    0.2591 0.09082 0.1908
3rd Qu. 0.2881 0.10160 0.2160
Max.    0.3081 0.11270 0.2230

```

Figura 28. Resultados que muestran la desviación estándar para los tres índices de vegetación.

Diferencias estadísticamente significativas también las obtuvo en su trabajo de investigación Hernández (2010) entre los índices de vegetación ARVI, NDVI, SAVI y EVI en la cuenca del río Areo mediante el análisis estadístico en el software R y donde fue seleccionado SAVI como el de menor desviación estándar.

Para este trabajo de investigación, a diferencia del trabajo citado, el índice de vegetación verde (GVI) fue utilizado para la creación del modelo matemático de tipo polinómico correspondiendo al cuarto y último objetivo de esta investigación.

MODELO DE REGRESIÓN LINEAL PARA LA SIMULACIÓN DEL VIGOR DE LA VEGETACIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los modelos matemáticos corridos por el Software R.

En la figura 29 se puede observar un R^2 con valor de 0,219 para el modelo de grado 5. Mientras que, la figura 30 para la predicción muestra valores comprendidos entre el rango aceptable que va de -1 a 1.

```

> summary(modelo5)

Call:
lm(formula = indice ~ fecha + I(fecha^2) + I(fecha^3) + I(fecha^4) +
    I(fecha^5))

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.178176 -0.028583  0.005893  0.050855  0.128575

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.692e-02  9.878e-02   0.273   0.791
fecha        2.274e-02  5.670e-02   0.401   0.698
I(fecha^2)  -1.204e-03  8.780e-03  -0.137   0.894
I(fecha^3)   1.926e-05  4.984e-04   0.039   0.970
I(fecha^4)   1.463e-08  1.188e-05   0.001   0.999
I(fecha^5)  -2.043e-09  1.010e-07  -0.020   0.984

Residual standard error: 0.09893 on 9 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.219,    Adjusted R-squared:  -0.2149
F-statistic: 0.5047 on 5 and 9 DF,  p-value: 0.7664

```

Figura 29. Resumen para el modelo polinómico de grado 5.

```

> summary(prediccion5)
      V1
Min.   :-0.38154
1st Qu.: 0.01318
Median : 0.09001
Mean   : 0.09322
3rd Qu.: 0.18763
Max.   : 0.64015

```

Figura 30. Resumen numérico del modelo polinómico de grado 5 para la predicción de la fecha dada.

En la figura 31 se da un aumento mínimo para el valor de R^2 que corresponde al modelo 6. Por otro lado, la figura 32 muestra un aumento para los valores de la predicción, afirmando así, que la vegetación va en aumento.

```
> summary(modelo6)

Call:
lm(formula = indice ~ fecha + I(fecha^2) + I(fecha^3) + I(fecha^4) +
    I(fecha^5) + I(fecha^6))

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.161243 -0.010170  0.003428  0.047446  0.126750

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.373e-02  1.025e-01   0.231   0.823
fecha        9.181e-02  1.269e-01   0.724   0.490
I(fecha^2)  -1.748e-02  2.801e-02  -0.624   0.550
I(fecha^3)   1.395e-03  2.298e-03   0.607   0.561
I(fecha^4)  -5.350e-05  8.798e-05  -0.608   0.560
I(fecha^5)   9.742e-07  1.593e-06   0.612   0.558
I(fecha^6)  -6.768e-09  1.102e-08  -0.614   0.556

Residual standard error: 0.1025 on 8 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2542,    Adjusted R-squared:  -0.3052
F-statistic: 0.4544 on 6 and 8 DF,  p-value: 0.8239
```

Figura 31. Resumen para el modelo polinómico de grado 6.

```
> summary(prediccion6)

      V1
Min.   :-0.74268
1st Qu.: -0.02016
Median :  0.08465
Mean    :  0.08113
3rd Qu.:  0.20419
Max.    :  0.73035
```

Figura 32. Resumen numérico del modelo polinómico de grado 6 para la predicción de la fecha dada.

En la figura 33 aumenta igualmente de manera mínima el valor de R^2 . De otro modo, la figura 34 muestra un resumen numérico con valores altos y aceptables llegando a valores idóneos permitidos en lo que es el rango de vegetación que va de -1 a 1 lo que nos permite llegar hasta este modelo 7.

```
> summary(modelo7)

Call:
lm(formula = indice ~ fecha + I(fecha^2) + I(fecha^3) + I(fecha^4) +
    I(fecha^5) + I(fecha^6) + I(fecha^7))

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.168627 -0.025245  0.000772  0.049434  0.114861

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.238e-02  1.074e-01   0.208   0.841
fecha        2.270e-01  2.846e-01   0.798   0.451
I(fecha^2)   -5.665e-02  7.860e-02  -0.721   0.494
I(fecha^3)    5.702e-03  8.373e-03   0.681   0.518
I(fecha^4)   -2.880e-04  4.462e-04  -0.645   0.539
I(fecha^5)    7.731e-06  1.269e-05   0.609   0.562
I(fecha^6)   -1.055e-07  1.842e-07  -0.573   0.585
I(fecha^7)    5.762e-10  1.073e-09   0.537   0.608

Residual standard error: 0.1074 on 7 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2837,    Adjusted R-squared:  -0.4326
F-statistic: 0.3961 on 7 and 7 DF,  p-value: 0.8776
```

Figura 33. Resumen para el modelo polinómico de grado 7.

```
> summary(prediccion7)
      V1
Min.   :-0.89716
1st Qu.: -0.06395
Median :  0.07382
Mean    :  0.06158
3rd Qu.:  0.20415
Max.    :  0.95582
```

Figura 34. Resumen numérico del modelo polinómico de grado 7 para la predicción de la fecha dada.

La figura 35 muestra el resumen numérico para el grado polinómico 8 en la cual se puede observar valores fuera de rango, los cuales no están permitidos porque sobrepasan su valor máximo que sería 1.


```

> summary(prediccion8)
      V1
Min.   :-1.0610
1st Qu.: 0.1260
Median : 0.2800
Mean    : 0.3015
3rd Qu.: 0.4963
Max.    : 1.4871

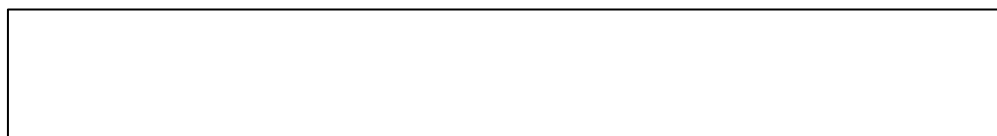
```

Figura 35. Resumen numérico del modelo polinómico de grado 8 para la predicción de la fecha dada que muestra valores fuera de rango.

Con respecto a los valores arrojados por la predicción del modelo polinómico de grado 8, se tomo el de grado 7 para la construcción del modelo matemático para la simulación del vigor de la vegetación por ser éste quien mostrara la predicción con rangos idóneos permitidos por los índices de vegetación.

Para la construcción del modelo matemático se utilizó la técnica de regresión lineal, en la cual la variable a estimar (denominada dependiente) se calcula a partir de otra auxiliar (denominada independiente) como una ecuación del siguiente tipo: $y = bx + a$, donde “a” es el intercepto de la recta de regresión con el eje “y” y “b” es la pendiente de la recta que agrupa la nube de puntos en la gráfica.

Del modelo matemático se extrajeron los coeficientes de las variables independientes que fueron los valores de las *fechas* y el *Intercept* para darle forma a la ecuación, tomados del modelo de grado 7 y expresada de siguiente manera:



$$y = 2,270 \times 10^{-1}X - 5,665 \times 10^{-2}X^2 + 5,702 \times 10^{-3}X^3 - 2,880 \times 10^{-4}X^4 + 7,731 \times 10^{-6}X^5 - 1,055 \times 10^{-7}X^6 + 5,762 \times 10^{-10}X^7 + 2,238 \times 10^{-2}$$

Dónde:

y= índice de vegetación

X= tiempo

Entonces, considerando el coeficiente de determinación R^2 como aquel que mide la confiabilidad del modelo de regresión usado, este arrojó un valor de 0,2837 siendo igual a:

$$R^2 = 28,37\%$$

Este coeficiente de variación indica que el 28,37% de la variación observada en la variable dependiente *índice de vegetación* es explicada por la variable independiente *tiempo*. Sin embargo, se considero el carácter predictivo del modelo como bajo.

Un coeficiente de determinación bajo también lo obtuvo en su trabajo de investigación Suárez (2018) a través de un modelo polinómico de grado 5 para la predicción del régimen de precipitación en la cuenca del río Guarapiche del estado Monagas.

Las gráficas mostradas a continuación representadas en las figuras 36, 37 y 38 muestran el comportamiento multitemporal de los índices de vegetación para el periodo en estudio, igualmente indican con respecto a la línea de tendencia que en términos promedios cada índice de vegetación tiende a aumentar y por tanto, es posible afirmar que la salud de la vegetación tiende a ser cada vez mejor y con el paso del tiempo mayor será

el vigor de la vegetación haciendo énfasis en que estos promedios son de escenas que fueron escogidas al azar por la menor presencia de nubosidad posible y sin considerar las fechas en algún periodo estacional de las épocas del año.

Por consiguiente, Gandia (sf), afirma que existe una estrecha relación entre los índices de vegetación y la precipitación, por lo que puede servir ésta como predictor de la vegetación luego de un periodo de lluvias.

Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación ARVI para el periodo 2013-2017

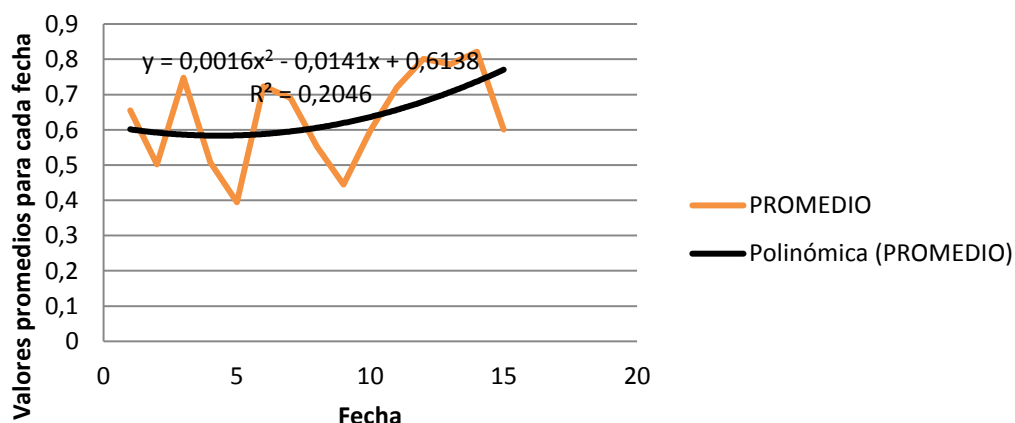


Figura 36. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera para el periodo 2013-2017.

Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación NDVI para el periodo 2013- 2017

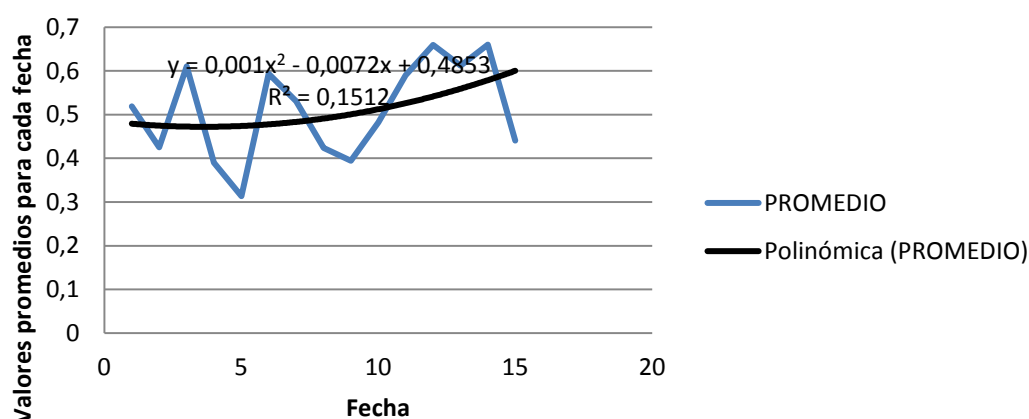


Figura 37. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para el periodo 2013-2017.

Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación GVI para el periodo 2013- 2017

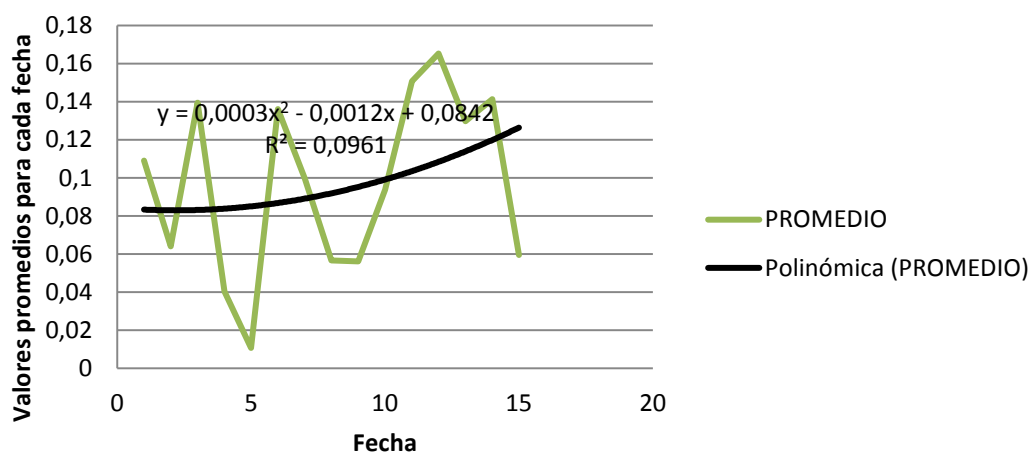


Figura 38. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación Verde para el periodo 2013-2017.

CONCLUSIONES

El comportamiento estadístico del vigor de la vegetación presente en la cuenca del río Areo para el periodo 2013-2017 arrojó de acuerdo a los promedios de todas las fechas bajo estudio que tanto el índice de vegetación ARVI como NDVI obtuvieron sus valores mínimos y máximos para el mes de mayo del 2015 y enero del 2017 respectivamente. Por otro lado, GVI obtuvo su valor mínimo igualmente para el mes de mayo de 2015 pero su valor máximo resultó en el mes de septiembre del 2016.

De acuerdo al resultado del ANAVA si hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tres índices de vegetación resultando menor variabilidad para GVI mientras que ARVI y NDVI tuvieron un comportamiento similar.

El comportamiento geoespacial del vigor de la vegetación se vió representado en su mayoría hacia la parte norte de la cuenca del rio Areo mientras que la parte sur mostró poca vegetación vigorosa. Por tanto, el resto de la cuenca manifestó una vegetación relativamente uniforme.

El modelo matemático de tipo polinómico resultó ser de grado 7. De acuerdo a la predicción, el vigor de la vegetación debió aumentar en meses siguientes de acuerdo a la fecha dada.

REFERENCIAS

- AGUILAR, C. (2014). Aplicación de Índices de Vegetación derivados de imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona Centro de la Provincia de Loja. [Documento en línea]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/34487/Documento_completo.pdf?sequence=1. Última Consulta: 15/02/17.
- AMON, J. (1990). Estadística para psicólogos (2). Probabilidad. Estadística Inferencial. [Documento en línea]. Disponible en: <https://personal.us.es/vararey/adatos2/correlacion.pdf>. Última Consulta: 17/01/18.
- ARIZA, A. (2013). Productos LDCM-Landsat 8. [Documento en línea]. Disponible en: <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>. Última Consulta: 17/02/17.
- BARET, F. (1995). Use of Spectral reflectance variation to retrieve canopy biophysical character en Danson.
- BAUTISTA, *et al.*, (2004). Técnicas de Muestreo para Manejadores de Recursos Naturales. (Primera ed.). México: UNAMPOSGRADO. [Documento en línea]. Disponible en: <http://books.google.co.ve/books?id=iChhyOsktnMC&printsec=frontcover&lr=&client=firefox-a#PPA6,M>. Última Consulta: 26/11/16.
- BENSE, (2007). Tutorial - Introducción a la percepción remota. [Documento en línea]. Disponible en: <http://www.teledet.com.uy/>: <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/aplicaciones-percepcion-remota.htm>. Última Consulta: 14/01/17.
- BOIX, L. (2015). Integración de sensores y uso de índices de vegetación para evaluar la producción en plantaciones de cítricos en Málaga. [Documento en línea]. Disponible en: <https://www.google.co.ve/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1>

&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi01-b807PVAhUM4SYKHbalCq8QFggIIMAA&url=https%3A%2F%2Friuma.uma.es%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F10630%2F11250%2FTD_Boix.pdf%3Fsequence%3D1&usg=AFQjCNGzPPpID2H8f3DNqENIW98NXIBZgg. Última Consulta: 27/01/17.

CAMPBELL, J. (1987). Introduction of Remote Sensing. The Guilford Press, New York.

CARVACHO, L. & SANCHEZ, M. (2010). Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. [Documento en línea]. Disponible en: http://www.age-geografia.es/tig/2010_Sevilla/ponencia3/CARVACHO.pdf. Última Consulta: 22/02/17.

CHAVEZ, P. (1986). Digital merging of Landsat TM and digitalized NHAP data for 1:24.000- scale image mapping, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 52. pp 1637-1646.

CHUVIECO, E. (1995). Fundamentos de Teledetección. [Documento en línea]. Disponible en: <http://files.especializacion-tig.webnode.com/200001110-8750e88486/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>. Última Consulta: 17/01/17.

CLAS. (2006). El Centro de levantamientos aeroespaciales y aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales. Sistemas de Información Geográfica como Herramienta [Documento en línea] Disponible: <http://www.clas.umss.edu.bo/general/sig.htm#bdat> Última Consulta: 22/02/17.

DIAZ, C. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. [Documento en línea]. Disponible en: http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf. Última Consulta: 10/02/17.

- GANDIA, La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: Agricultura, curso de postgrado. Universitat de Valencia Estudi General Departament de Termodinámica. Unidad de investigación de teledetección. [Documento en línea] Disponible en: http://books.google.co.ve/books?id=t8ZLSpM20m8C&printsec=frontcover&source=gbs_v2_summary_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false. Última consulta: 25/02/18.
- GARCIA, A. (S/F). Landsat. [Documento en línea] Disponible en: <https://www.google.co.ve/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&sqi=2&ved=0ahUKEwi9gfOlnIfVAhXMPz4KHRc7CJ4QFggoMAE&url=http%3A%2F%2Fkimerius.com%2Fapp%2Fdownload%2F5784863998%2FLANDSAT.pdf&usg=AFQjCNHeoxFzUvOscu5Yrlc hWFis4iY-HA>. Última Consulta: 13/02/17.
- GATES, G. *et al.*, (1965). Spectral properties of plants, "Applied Optics". Vol. 4. pp 11-20.
- GILABERT, M. *et al.*, (1997). Acerca de los Índices de Vegetación. [Documento en línea]. Disponible en: http://www.aet.org.es/revistas/revista8/AET8_4.pdf. Última Consulta: 17/11/16.
- GEOGRAPHIC RESOURCES ANALYSIS SUPPORT SYSTEM, (2017). Manual GRASS GIS. Software libre.
- GONZÁLEZ, J. (2012). Comparación de los Índices de Vegetación en su capacidad para describir la evolución del vigor de la vegetación de la cuenca del río Aragua. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente.
- HENGL, T. & REUTER, H. (2009). Geomorphometry: concepts, software and applications. Primera edición. Amsterdam - Reino de los Países Bajos.
- HERNANDEZ, M. (2010). Evaluación del comportamiento del vigor de la vegetación en la cuenca del río Areo a través de técnicas de teledetección para el periodo 1985 – 2001. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente.

- KAUFMAN, Y. y TANRÉ, D. (1996). Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30:261-270.
- MARTINI, A. (2008). Percepción Remota - Proyecto Agricultura de Precisión INTA Manfredi. [Documento en línea] Disponible en: <http://www.agriculturadeprecision.org/percrem/PercepcionRemota.htm> Última Consulta: 28/01/17.
- MELLADO, J. (sf). Coeficiente de Determinación. [Documento en línea] Disponible: www.uaaam.mx/jmelbos/disexp/deapu41.pdf. Última Consulta: 15/01/18.
- MORALES, P. (2011). Universidad Rafael Landivar El coeficiente de Correlación. [Documento en línea] Disponible: ice.unizar.es/sites/ice.unizar.es/files/users/leteo/materiales/01_documento_1_correlaciones.pdf. Última Consulta: 15/01/18.
- NOVO, E. (1992). Sensoramiento Remoto. Principios y Aplicaciones. Editora Edgar Bucher Ltda. Sao Pablo. pp 308.
- ORDOÑEZ, J. (2011). Aguas subterráneas – Acuíferos. [Documento en línea] Disponible: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf. Última Consulta: 15/01/18.
- PACO, A. (2003). Universidad de Murcia. Fotointerpretación y Teledetección. [Documento en línea] Disponible: <http://www.um.es:8080/geograf/sig/teledet/>. Última Consulta: 15/02/17.
- PÉREZ, C. Y MUÑOZ, A. (2006). Teledetección: Nociones y Aplicaciones. Universidad de Salamanca. España.
- PNUMA (2002). Perspectivas del medio ambiente mundial 2002 (GEO-3): Pasado, presente y futuro. Grupo Mundi-Prensa, Madrid. pp 446.

RODRÍGUEZ (2004). I Curso de experto Universitario en Sistemas de Información Geográfica. Entrada de datos y edición ráster. Análisis ráster y tratamiento digital de imágenes de satélite. Universidad Internacional de Andalucía Sede Iberoamericana Santa María de la Rábida [Documento en línea] Disponible en: 200.0.31.72/sigutpl/biblioteca/manuales/teoria%204.pdf. Última Consulta: 16/11/16.

SEBEM, E. (2005). Aportaciones de la Teledetección en el desarrollo de un sistema metodológico para la evaluación de los efectos del cambio climático sobre la producción de las explotaciones agrarias. [Documento en línea]. Disponible en: http://oa.upm.es/78/1/TesisDoctoral_ElodioSebem_Acrobat_6.pdf. Última Consulta: 10/01/17.

SOBRINO, J. (2000). Teledetección. (Primera ed) Valencia – España. [Documento en línea]. Disponible en: <http://books.google.co.ve/books?id=Yb6xIldfoT0C&printsec=frontcover&lr=&client=firefox-a#PPA464,M1>. Última Consulta: 12/12/16.

SUÁREZ, O. (2018). Simulación matemática del régimen de precipitación pluvial de la cuenca hidrográfica del río Guarapiche. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente.

TAN, Q. *et al.*, (2003). Wetland vegetation biomass estimation using Landsat-7 ETM+ Data. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vol. 4. pp. 2629-2631.

UNR, (2009). Programa de Comunicación Institucional. Imágenes satelitales: Tecnología de múltiples aplicaciones. . Periódico Virtual. Dirección de Comunicación UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO–ARGENTINA. [Documento en línea]. Disponible en: <http://www.unr.edu.ar/periodico/secciones/2006/julio/fceia-imagsat.Htm>. Última Consulta: 10/02/17.

VERZANI, J. (2005). Using Introductory statistic. CRC Pres. Florida USA.

HOJAS METADATOS

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 1/6

Título	Evaluación multitemporal del vigor de la vegetación presente en la cuenca del río areo del estado Monagas para el período 2013-2017 mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes de satélites
---------------	--

El Título es requerido. El subtítulo o título alternativo es opcional.

Autor(es)

Apellidos y Nombres	Código CVLAC / e-mail	
Roxana Catalina Bravo Astudillo	CVLAC	C.I: 22706943
	e-mail	roxanabravo18@gmail.com

Se requiere por lo menos los apellidos y nombres de un autor. El formato para escribir los apellidos y nombres es: "Apellido1 InicialApellido2., Nombre1 InicialNombre2". Si el autor esta registrado en el sistema CVLAC, se anota el código respectivo (para ciudadanos venezolanos dicho código coincide con el numero de la Cedula de Identidad). El campo e-mail es completamente opcional y depende de la voluntad de los autores.

Palabras o frases claves:

índice de vegetación
modelo de regresión
vigor
landsat 8
tesis de grado

El representante de la subcomisión de tesis solicitará a los miembros del jurado la lista de las palabras claves. Deben indicarse por lo menos cuatro (4) palabras clave.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 2/6

Líneas y sublíneas de investigación:

Área	Sub-área
Tecnología y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Agronómica

Debe indicarse por lo menos una línea o área de investigación y por cada área por lo menos un subárea. El representante de la subcomisión solicitará esta información a los miembros del jurado.

Resumen (Abstract):

La evaluación multitemporal del vigor de la vegetación con tres índices de vegetación (ARVI, NDVI y GVI) realizado durante un periodo determinado en la cuenca hidrográfica del río Areo perteneciente en su gran parte al estado Monagas, se realizó mediante las técnicas de procesamiento digital de imágenes obtenidas del satélite Landsat 8 y procesadas con el software libre GRASS para el análisis gráfico y el software R para análisis estadísticos conjuntamente con un paquete llamado Tinn-R. Como resultado se obtuvo que para los tres índices de vegetación el valor mínimo se presentó el 2 de mayo de 2015 mientras que el valor máximo para ARVI y NDVI resultó el 15 de enero de 2017 y por consiguiente, GVI lo obtuvo el 9 de septiembre de 2016. Existió diferencia estadísticamente significativa entre los tres índices de vegetación tanto ARVI como el NDVI tuvieron un comportamiento similar, en cambio GVI resultó un índice con menor variabilidad. En la representación gráfica la mayor vegetación se situó hacia el norte de la cuenca. Con la obtención de los resultados se creó un modelo matemático de tipo polinómico para predecir el vigor de la vegetación en años siguientes. La expresión para el modelo matemático resultó de grado 7: $y = 2,270 \times 10^{-1}X - 5,665 \times 10^{-2}X^2 + 5,702 \times 10^{-3}X^3 - 2,880 \times 10^{-4}X^4 + 7,731 \times 10^{-5}X^5 - 1,055 \times 10^{-7}X^6 + 5,762 \times 10^{-10}X^7 + 2,238 \times 10^{-2}$. El comportamiento multitemporal del vigor de la vegetación de acuerdo a la línea de tendencia indicó que este va aumentando a través del tiempo, lo que indica que la salud de la vegetación será mejor y por ende mayor vigor.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 3/6

Contribuidores:

Apellidos y Nombres	Código CVLAC / e-mail			
MSc. Ing. Víctor Malavé	ROL	CA ☐	AS ☒	TU ☐ JU ☐
	CVLAC	C.I. 8.895.244		
	e-mail	vmalave@udo.edu.ve		
MSc. Ing. Luis Andérico	ROL	CA ☐	AS ☐	TU ☐ JU ☒
	CVLAC	C.I 4.619.571		
	e-mail	luisda5777@hotmail.com		
Dr. Alexander Gil	ROL	CA ☐	AS ☐	TU ☐ JU ☒
	CVLAC	C.I 8.469.845		
	e-mail	jalexgil2005@hotmail.com		

Se requiere por lo menos los apellidos y nombres del tutor y los otros dos (2) jurados. El formato para escribir los apellidos y nombres es: "Apellido1 InicialApellido2., Nombre1 InicialNombre2". Si el autor esta registrado en el sistema CVLAC, se anota el código respectivo (para ciudadanos venezolanos dicho código coincide con el numero de la Cedula de Identidad).. La codificación del Rol es: CA = Coautor, AS = Asesor, TU = Tutor, JU = Jurado.

Fecha de discusión y aprobación:

Año	Mes	Día
2018	04	20

Fecha en formato ISO (AAAA-MM-DD). Ej: 2005-03-18. El dato fecha es requerido.

Lenguaje: spa Requerido. Lenguaje del texto discutido y aprobado, codificado usando ISO 639-2. El código para español o castellano es spa. El código para ingles en. Si el lenguaje se especifica, se asume que es el inglés (en).

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 4/6

Archivo(s):

Nombre de archivo
NMOTTG_BARC2018

Caracteres permitidos en los nombres de los archivos: **A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 _ - .**

Alcance:

Espacial: _____ (opcional)
Temporal: _____ (opcional)

Título o Grado asociado con el trabajo:

Ingeniero Agrónomo

Dato requerido. Ejemplo: Licenciado en Matemáticas, Magister Scientiarum en Biología Pesquera, Profesor Asociado, Administrativo III, etc

Nivel Asociado con el trabajo: Ingeniería

Dato requerido. Ejs: Licenciatura, Magister, Doctorado, Post-doctorado, etc.

Área de Estudio:

Tecnología y Ciencias Aplicadas

Usualmente es el nombre del programa o departamento.

Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado:

Universidad de Oriente Núcleo Monagas

Si como producto de convenciones, otras instituciones además de la Universidad de Oriente, avalan el título o grado obtenido, el nombre de estas instituciones debe incluirse aquí.

Hoja de metadatos para tesis y trabajos de Ascenso- 5/6



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
CONSEJO UNIVERSITARIO
RECTORADO

CUN°0975

Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano
Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ
Vicerrector Académico
Universidad de Oriente
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda **"SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009"**.

Leído el oficio SIBI - 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.



Comunicación que hago, a usted a los fines consiguientes.

Cordialmente,

JUAN A. BOLANOS CUNEL
Secretario



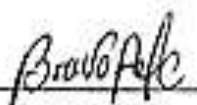
C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Teleinformática, Coordinación General de Postgrado.

JABC/YOC/mayla

Hoja de metadatos para tesis y trabajos de Ascenso- 6/6

De acuerdo al Artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado:

Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién deberá participarlo previamente al Consejo Universitario, para su autorización.


Roxana Bravo
Autor


Prof. Víctor M. M. Sc.
C.I.: 8.895.244