

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE CIENCIAS
FÍSICO MATEMÁTICAS**



TESIS

**EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE
DIFERENCIA NORMALIZADA MEDIANTE IMÁGENES
SATELITALES, VALLE MUYURINA, DISTRITO TAMBILLO -
AYACUCHO, 2008-2013**

**PRESENTADO POR: Bach. JORGE LUIS LOZANO RODRÍGUEZ
ASESOR: Lic. WILMER ENRIQUE MONCADA SOSA**

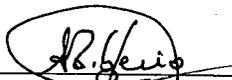
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN
CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS CON MENSIÓN EN FÍSICA**

**AYACUCHO – PERÚ
2015**

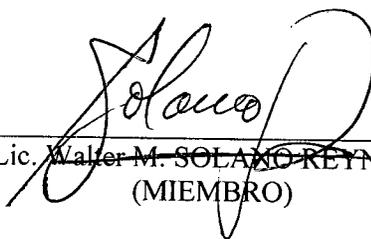
“EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES, VALLE MUYURINA, DISTRITO TAMBILLO – AYACUCHO, 2008-2013”.

RECOMENDADO : 16 DE DICIEMBRE DEL 2015

APROBADO : 30 DE DICIEMBRE DEL 2015



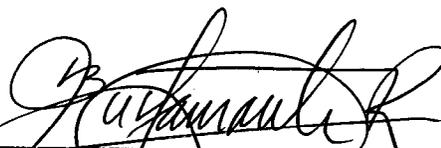
Mg. Lic. Avelino T. PALMA GUTIÉRREZ
(PRESIDENTE (e))



Mg. Lic. Walter M. SOLANO REYNOSOS
(MIEMBRO)



Lic. Raúl CONDORI TIJERA
(MIEMBRO)



Lic. Jaime BUSTAMANTE RODRÍGUEZ
(MIEMBRO)

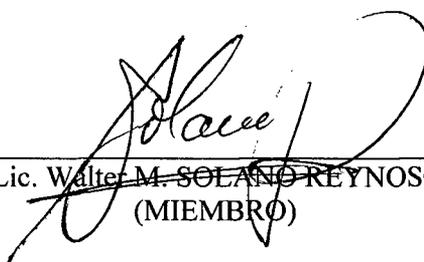


Ing. Darwin ORTEGA CÁCERES
(SECRETARIO DOCENTE (e))

Según el acuerdo constatado en el Acta, levantado el 30 de diciembre del 2015, en la Sustentación de Tesis presentado por el Bachiller en Ciencias Físico Matemáticas Sr. **Jorge Luis LOZANO RODRÍGUEZ**, con la Tesis Titulado “**EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES, VALLE MUYURINA, DISTRITO TAMBILLO – AYACUCHO, 2008-2013**”, fue calificada con la nota de CATORCE (14) por lo que se da la respectiva APROBACIÓN.



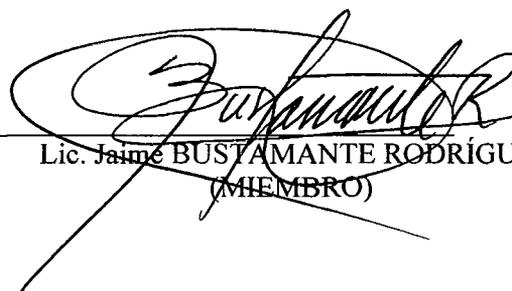
Mg. Lic. Avelino T. PALMA GUTIÉRREZ
(PRESIDENTE (e))



Mg. Lic. Walter M. SOLANO REYNOSOS
(MIEMBRO)



Lic. Raúl CONDORI TIJERA
(MIEMBRO)



Lic. Jaime BUSTAMANTE RODRÍGUEZ
(MIEMBRO)



Ing. Darwin ORTEGA CÁCERES
(SECRETARIO DOCENTE (e))

DEDICATORIA

A mis queridos padres Apolinario y Teófila por su confianza y exigencia.

A mi hermana Marisol y Mercedes por el apoyo y confianza demostrándome con ejemplo lo importante que es tener una profesión.

A mi querida esposa Olga y mis hijos Jorge Antonio y Luis Becker., que son mi apoyo y fortaleza.

JORGE.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor Lic. Moncada Sosa Wilmer, por el asesoramiento y continuo apoyo para la realización de la presente investigación.

Al Programa de Investigación en Teledetección de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga dirigidos por el Dr Yoel Rojas Acuña y Walter Mario Solano Reynoso.

A los profesionales de la Subgerencia de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente del Gobierno Regional por el apoyo en las capacitaciones en Teledetección Espacial Aplicada a la Zonificación Ecológica y Económica.

A mis amigos y colegas del laboratorio de teledetección de la UNSCH, por su incondicional apoyo en el desarrollo del presente trabajo de tesis.

Y a todas las personas que de una u otra manera me han apoyado y colaborado con la presente investigación.

A mi Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga mi alma Mater.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. TELEDETECCIÓN ESPACIAL	9
2.1 SISTEMA DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL	9
2.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	11
2.2.1 Naturaleza de la radiación electromagnética	11
2.2.2 Espectro de las ondas electromagnéticas	11
2.3 SENSORES Y PLATAFORMAS	13
2.3.1 Cualidades de los sensores	14
2.4 SATELITES DE OBSERVACIÓN	14
2.4.1 Descripción general del satélite Terra	15
CAPÍTULO III. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN	17
3.1 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS RADIOMÉTRICOS	17
3.1.1 Ángulo sólido	17
3.2 ECUACIÓN DE TRANFERENCIA RADIATIVA	20
3.2.1 Procesos de interacción de la radiación electromagnética con la materia	20
3.2.1.1 Absorción	20
3.2.1.2 Scattering	21
3.2.1.3 Absorción y scattering	25
3.3 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA SUPERFICIE TERRESTRE	25
3.3.1 Reflectividad	25
3.4 REFLECTIVIDAD ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN, SUELO Y AGUA	28
3.5 ÍNDICE DE VEGETACIÓN	30
3.5.1 Índices basados en la pendiente	30
3.5.1.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	32
3.5.2 Índices basados en la distancia	35
CAPÍTULO IV. MÉTODOS	38
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO	38
4.1.1 Clima	39
4.1.2 Biodiversidad	39
4.1.3 Geomorfología	40
4.1.4 Población y características socioeconómicas	40
4.1.5 Límites del distrito de Tambillo	41
4.2 DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA	42
4.2.1 Parámetros utilizados en el análisis estadístico	42
4.3 OBTENCIÓN DE DATOS MODIS-TERRA (MOD13Q1)	43
4.3.1 Descarga de datos imagen del NDVI MODIS-Terra (MOD13Q1)	43
4.4 PROCESAMIENTO DE DATOS	46
4.4.1 Algoritmo y programas	46

4.4.2 Tratamiento digital de las imágenes MODIS-Terra.....	46
4.4.3 Clasificación de las imágenes descargadas.....	47
4.4.4 Procesamiento las imágenes satelitales MODIS-Terra (MOD13Q1).....	47
4.4.5 Clasificación de la vegetación según el tipo de suelo.....	50
4.4.6 Valoración del tipo de vegetación según el NDVI.....	51
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	52
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.....	65
6.1 CONCLUSIONES.....	65
6.2 SUGERENCIAS.....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
ANEXOS.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Concepto de sensor remoto.....	10
Figura 2.2 Plataforma del satélite artificial Terra.....	16
Figura 3.1 Ilustración del ángulo sólido diferencial representado coordenadas polares.....	17
Figura 3.2 Interpretación geométrica de la radiancia.....	18
Figura 3.3: Definición de extinción	20
Figura 3.4 Patrones angulares de scattering por aerosoles.....	22
Figura 3.5 Función scattering.....	24
Figura 3.6 Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas.....	29
Figura 3.7 Relación de valores de la reflectancia de la banda rojo e infrarrojo.....	31
Figura 3.8 Regresión lineal entre la banda rojo e infrarrojo.....	34
Figura 4.1 Ubicación de la zona en estudio, distrito de Tambillo.....	38
Figura 4.2 Vegetación rio niño Yucaes –Muyurina	39
Figura 4.3. Matorral semiárido con presencia de cactáceas columnares y de árboles de huarango.....	40
Figura 4.4. Límite Político del distrito de Tambillo.....	42
Figura 4.5 Ventana principal para suscribirse creando una cuenta personal.....	44
Figura 4.6 Ubicación de la escena a descargar.....	44
Figura 4.7 Ventana de descarga de del producto MODIS-Terra.....	45
Figura 4.8 Descarga final de imágenes MODIS-Terra.....	45
Figura 4.9 Creación de ventanas para cortar el área de estudio.....	48
Figura 4.10 Resultados del apilado y corte aplicando la paleta de colores ENVI.....	49
Figura 5.1 Tendencia positiva en la evolución temporal del NDVI 2008-2013.....	53
Figura 5.2 Variabilidad del tipo de vegetación en km ² según el NDVI estación de verano.....	54
Figura 5.3 Variabilidad por tipos de vegetación en km ² según el NDVI estación de otoño.....	55
Figura 5.4 Variabilidad por tipos de vegetación en km ² según el NDVI estación de invierno.....	56
Figura 5.5 Variabilidad por tipo de vegetación en km ² según el NDVI estación de primavera.....	57
Figura 5.6 Variabilidad del área de vegetación tipo A en km ² según el NDVI.....	58
Figura 5.7 Variabilidad del área de vegetación tipo B en km ² según el NDVI.....	58
Figura 5.8 Variabilidad del área de vegetación tipo C en km ² según el NDVI.....	59
Figura 5.9 Variabilidad del área de vegetación tipo D en km ² según el NDVI.....	59
Figura 5.10 Variabilidad del área de vegetación tipo E en km ² según el NDVI.....	60
Figura 5.11 Variabilidad del área de vegetación tipo F en km ² según el NDVI.....	60

Figura 5.12 Variabilidad del área de vegetación tipo G en km ² según el NDVI.....	61
Figura 5.13 Variabilidad del área de vegetación tipo H en km ² según el NDVI.....	61
Figura 5.14. Variabilidad del área de vegetación tipo I en km ² según el NDVI.....	62
Figura 5.15 Precipitación máxima, fuente estación meteorológica de Tambillo.....	63
Figura 5.16 Temperatura máxima y mínima, fuente estación meteorológica de Tambillo.....	63
Figura 5.17 Relación entre precipitación-NDVI.....	64
Figura 5.18 Relación entre temperatura-NDVI.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas principales del sensor MODIS.....	16
Tabla 3.1 Nomenclaturas propuestas para diferentes observaciones.....	27
Tabla 3.2 Índices basados en la pendiente.....	31
Tabla 3.3 Índices basados en la distancia.....	35
Tabla 4.1 Clasificación de la cobertura vegetal.....	50

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se realizó el análisis de 115 imágenes satelitales MODIS-Terra (MOD13Q1) con la finalidad de describir, estimar y contrastar la evolución temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y determinar el comportamiento de la cobertura vegetal en el distrito de Tambillo, provincia de Huamanga en la región Ayacucho, ubicado a 3080 m.s.n.m., siendo el punto más bajo la localidad de Muyurina en el valle del niño Yucaes a 2500 m.s.n.m y él más alto la localidad de Pinao a 3600 m.s.n.m., con coordenadas geográficas entre los 13°11'28" latitud sur y 74°06'30" longitud oeste, con un área de extensión territorial de 218.62 Km².

Se aplicó a las imágenes satelitales un análisis multitemporal del promedio del NDVI de seis escenas por estaciones del año, mediante el uso del software ENVI, IDL, ARCGIS y métodos estadísticos como material de trabajo, que permitió describir el comportamiento del área de vegetación por tipo de suelo en verano, otoño, invierno y primavera, obteniendo un resultado de tendencia positiva, en la variabilidad del área de vegetación de suelo agrícola (NDVI de 0.320 a 0.379), bosques de hoja ancha y perenne (NDVI de 0.380 a 0.439) y prado andino con bosque de hoja perenne (NDVI de 0.440 a 0.500), para finalmente contrastar y estimar según datos de precipitación y temperatura del aire registrados en la estación meteorológica de Tambillo, en el periodo 2008 al 2013.

El análisis del NDVI a través del SIG y Teledetección según los parámetros físicos que presenta tiene aplicaciones y utilidades para estudios ambientales.

Palabras Claves: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, Imágenes de satélite, Tambillo.

ABSTRACT

In the present research the analysis was of 115 MODIS-Terra satellite images (MOD13Q1) in order to describe, assess and contrast the temporal evolution of the Index Normalized Difference Vegetation (NDVI) and determine the behavior of vegetative cover was made Tambillo district in the Huamanga province in Ayacucho, located at 3080 meters above sea level, the lowest point being the Muryurina town in the valley of Yucaes child to 2500 m and the highest Pinao the town of 3600 meters, with between the geographical coordinates 13°11'28 " South latitude and 74°06'30 " west longitude, with an area of land area of 218.62 km².

It was applied to satellite images a multi-temporal analysis of average NDVI six scenes seasons, using the ENVI, IDL, ARCGIS software and statistical methods as work material, allowing to describe the behavior of the area of vegetation by type soil in summer, autumn, winter and spring, getting a result of positive trends in the area variability of agricultural land vegetation (NDVI 0.320-0.379), forests and evergreen broadleaf (NDVI 0.380-0.439) and Andean meadow with evergreen forest (NDVI 0.440-0.500), and finally contrast and estimate according to data of precipitation and air temperature recorded at the meteorological station of Tambillo, in the period from 2008 to 2013.

The NDVI analysis through GIS and remote sensing according to the physical parameters that have presented applications and utilities for environmental research.

Keywords: Index Normalized Difference Vegetation, Satellite images, Tambillo.

ACRÓNIMOS

ARVI	Atmospherically Resistent Vegetation Index.
AVHRR	Advanced Very High-Resolution Radiometer.
EOS	Earth Observing System.
EOSDIS	Earth Observing System Data and Information System.
EROS	Earth Resources Observation and Science.
EVI	Enhanced Vegetation Index.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
GPS	Global Position System.
GRA	Gobierno Regional de Ayacucho.
IDL	Interactive Data Lenguaje.
IFOV	Instantaneous Field of View.
IVS	Índices de Vegetación.
LAI	Leaf Area Index.
MINAM	Ministerio del Ambiente (Perú)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.
MSS	Multispectral Scanner.
NASA	National Aeronautics and Space Administration.
NDVI	Normalized Differential Vegetation Index.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration.
PVI	Perpendicular Vegetation Index.
RTE	Radiation of Transference Equation.
RVI	Índice de vegetación de proporción simple.
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index.
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
TM	Thematic Mapper.
TSAVI	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index.
USGS	United States Geological Survey.
UTM	Universal Time Mercator.
WSG	World System Geographic.
ZEE	Zonificación Ecológica Económica.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el distrito de Tambillo valle de Muyurina, provincia de Huamanga se pretende determinar una serie de variaciones en el comportamiento espacio-temporal de la vegetación, por lo que la aplicación de los sistemas de información geográfica y teledetección, constituye la principal herramienta que permite la evaluación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y caracterizar el cambio y evolución de la cobertura vegetal.

La utilización de la teledetección en trabajos relacionados a determinar, estimar y contrastar la evolución temporal del NDVI es amplia, siendo en los últimos años numerosos los estudios realizados a nivel internacional, nacional y regional.

Seevers y Ottmann, estudiaron el NDVI para estimar la evapotranspiración potencial (ETP), que es muy utilizado para realizar estudios de necesidades hídricas en las plantas, concluyeron que existe correlación entre estos dos parámetros, pero indican que deberían realizarse más estudios de aplicación [1].

González et al., estudiaron la comparación de la utilidad y viabilidad de realizar la clasificación de los usos del suelo mediante el empleo de índices de vegetación, y concluyeron que la clasificación obtenida, no es del todo satisfactoria en ninguno de los casos, aunque destacan que lo obtenido a partir de los datos del sensor Mapeador Temático (TM), es mejor que la obtenida a partir de los datos del sistema escáner multiespectral (MSS). Los valores de NDVI permiten establecer una graduación entre los diferentes tipos de cubiertas [2].

Jackson y Huete, estudiaron las características de los índices de vegetación y concluyeron que los índices de vegetación, son útiles evaluando la cantidad y el estado de la vegetación, a partir de imágenes de satélites. Sin embargo, se ven limitados por

condiciones atmosféricas, ángulos cenitales del Sol, así como el tipo de suelo y tipo de vegetación. Para el uso correcto de los índices de vegetación, se requiere tener en cuenta la interacción de todas las condiciones que afectan a sus mediciones, al mismo tiempo [3].

Qi; Chehbouni et al., estudiaron el desarrollo de una línea de suelo autoajutable, de este modo aumenta la sensibilidad del índices de vegetación ajustados a los efectos del suelo (SAVI), reduciendo los efectos del suelo. Así se mejoraría la cantidad de vegetación señal frente al reflejo del suelo [4].

Lammini, A. et al., también han utilizado imágenes del sensor de alta y muy avanzada resolución radiométrica (AVHRR) en aplicaciones de estimación y evaluación de la cobertura vegetal mediante índices de vegetación [5], Delgado, J.A. et al., en estimación de rendimientos de cosechas [6].

Purevdorj et al., estudiaron la relación que pudiera existir entre la cubierta vegetal y los índices de vegetación derivados de la reflectividad espectral, y concluyeron que con datos de la línea de suelo del índices de vegetación ajustados a los efectos del suelo transformado (TSAVI) proporciona mejor estimación de cobertura vegetal. Sin estimación de línea de suelo, NDVI proporciona unos buenos valores de cobertura en densidades bajas de vegetación. La relación obtenida en el estudio entre los índices y el porcentaje de vegetación puede ser aplicada en zonas semiáridas [7].

Schmidt y Karmieli, estudiaron la sensibilidad de los índices de vegetación, evaluándolos en la capacidad de medir en zonas semi-áridas y cobertura vegetal con escasa vegetación. Demostraron que el NDVI es muy sensible al basalto como elemento que compone el suelo, respondiendo con valores elevados, mientras que el Índices de vegetación ajustados a los efectos del suelo (SAVI) y el índice de vegetación perpendicular (PVI) responden a superficies brillantes con mayores valores.

La diferencia en la respuesta entre (SAVI/NDVI), (SAVI/TSAVI) al material es causada por el brillo, mientras que (SAVI/PVI) no muestra la misma dependencia al brillo.

La sensibilidad de los índices de vegetación en zonas áridas está influenciada por el tipo de material que compone el suelo [8].

Al-Bakrio y Suleimon, estudiaron la posible relación entre la lluvia y el NDVI en diferentes zonas en Jordán, facilitando de esta manera el estudio de la ecología del lugar. Obtuvieron una buena correlación entre el NDVI y la lluvia acumulada en 10 días, sobre todo en zonas con climatología mediterránea [9].

Vercher et al., estudiaron la sensibilidad de algunos índices de vegetación frente a la variación en el ángulo cenital solar y concluyeron que todos los índices dependen exponencialmente del índice de área foliar (LAI), pudiendo ser ajustados a una ecuación. Existe anisotropía, la cual produce un error en la medida, el cual no elimina la tendencia mencionada. La dependencia de IVS frente a la geometría de observación e iluminación es más acusada en cubiertas con bajo LAI y cubiertas con poca continuidad [10].

Javzandulan et al., estudiaron la degradación que experimenta la biomasa vegetal en zonas áridas a lo largo de los años. Para ello monitorizaron la biomasa con ayuda de los índices de vegetación. Sus estudios demostraron, que imágenes por satélite pueden ser utilizado como herramienta en el control de la degradación de la vegetación y conocer la cantidad de biomasa en algunas áreas semiáridas [11].

Bisquert et al., compararon ocho índices de vegetación para determinar el más apropiado en determinar el riesgo de incendio en las regiones de Galicia y Asturias, usando una serie de incendios de 6 años en esas mismas regiones. Determinaron que un alto porcentaje de incendios se ajusta a algunos índices de vegetación, siguiendo una distribución lineal. El índice de vegetación mejorado (EVI) se muestra como el más favorable de todos ellos [12].

Wardlow y Egbert, evaluaron en series, las imágenes de Resolución Espectrorradiómetro Moderada (MODIS) de 250 m, con los índices EVI y NDVI con los objetivos de establecer una precisión de clasificación para diferentes cultivos, establecer

similitudes y diferencias de los índices e identificar el índice de vegetación que mejores datos proporciona en estas condiciones [13].

Bart y Sánchez, compararon cinco índices de vegetación (NDVI, SAVI, ARVI, Green NDVI y EVI) determinando sus comportamientos según cubiertas, en dos periodos del año (verano e invierno) de los años 2001, 2003 y 2005. Obtuvieron que las tendencias generales de las mediciones del vigor son semejantes, aunque existen deferencias localizadas que hace evidente la necesidad de elegir correctamente el tipo del Índice de Vegetación (IV), adecuándose al tipo de estudio [14].

Fuming Wang et al., estudiaron el desarrollo de un nuevo índice de vegetación basado en el análisis de las limitaciones del Índice de Vigor Relativo (RVI) y PVI en la estimación del LAI y comparar el rendimiento de este nuevo índice en la estimación de LAI. Concluyeron con la creación de un nuevo índice de vegetación (RMPVI), el cual se demostró que, es menos afectado por las condiciones atmosféricas, además de una relación lineal con el LAI, pudiendo ser utilizado para su estimación [15].

Sancha Navarro, en estudios a partir de índices de vegetación comprobó establecer e identificar diferentes periodos climáticos de sequía y húmedos, cálidos y templados. Concluyendo que los índices de vegetación son instrumentos valiosos tanto en temas de ecología, como en cuestiones climáticas, siendo una base importante de estudios [16].

Delgado, J.A.; Illera. P y Rodríguez. P, a su vez estudiaron en zonas de secano, la estimación de la producción agrícola por medio de la utilización del NDVI, concluyendo que este índice es útil para el seguimiento de etapas en el desarrollo de los cultivos, y obtuvieron buena correlación entre los rendimientos de los cereales y la integral de dicho índice [17].

Mattar; Sobrino; Wignerón, estudios del uso de los índices de vegetación para así poder relacionarlos con la humedad del suelo, concluyeron que NDVI resulta útil para la estimación la humedad del suelo, a través de regresiones semi-empíricas [18].

Isla y López-Lozano, evaluaron la aptitud de diferentes índices de vegetación para la detección de deficiencias nítricas en maíz. Concluyeron que sería posible la detección de grandes cadencias de Nitrógeno, pero no es posible una clara diferenciación entre dosis próximas al óptimo [19].

En el Perú y en la región Ayacucho también existen antecedentes de trabajos realizados por:

Moncada, W. Jiménez, J. Pereda, Alex. Y Masías, M, en la investigación: "Variaciones en el comportamiento de la dinámica del suelo en áreas cercanas al gaseoducto Camisea Ayacucho, 2000 al 2008", determinaron el NDVI en zonas cercanas al gaseoducto Camisea, mostrando un decaimiento de la vegetación en zonas del derrame de gas, las mismas que se modelaron de manera estadística [20].

Moncada, W. Masías, M. Aldana, C. Paiva, D, en la investigación: "Mapeo de nubosidades en la región Ayacucho mediante sistema satelital, 2000 al 2010", encontraron que el cuadrante 3 tiene una gran ausencia de nubes durante la mayor parte del año con respecto a los otros tres cuadrantes que engloban la región Ayacucho [21].

Solano .R y Rojas. A., presentaron el proyecto "Evaluación de la vegetación y del estado de suelos de la región Ayacucho mediante datos satelitales, periodo 2000 – 2012", dirigido por la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho y la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, financiado por el Fondo de Desarrollo Socioeconómico del Proyecto Camisea (FOCAM) caracterizando la variabilidad de la vegetación a diferentes pisos ecológicos según el comportamiento de la temperatura del suelo y el NDVI [22].

Moncada W. Jiménez J. Pereda A. Aldana C, en el trabajo "Cuantificación hidrográfica de la cuenca del río Cachi Ayacucho, mediante imágenes satelitales", determinaron modelos de regresión para cada estación anual, según el NDVI promedio con respecto

al índice de precipitación promedio, y concluyeron que la presencia máxima de vegetación se da de manera tardía (un mes) con respecto a la precipitación [23].

Frente a estas investigaciones del número elevado de índices de vegetación se justifica el uso del NDVI porque, casi todos los que hacen mucha teledetección en vegetación usan NDVI, y a menudo es mejor atenerse a lo que la gente conoce y confía. Pues el NDVI es simple y cuenta con el mejor rango dinámico de cualquiera de los índices y tiene la mejor sensibilidad a los cambios en la cubierta vegetal [24].

La motivación principal es pretender describir la variación dinámica de la vegetación del distrito de Tambillo como fuente natural de recursos agrícolas y pecuarias, principal sustento económico familiar y comunal de nuestra región, para lo cual, se pretende responder al problema planteado ¿En qué medida la evolución temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) caracteriza la dinámica de la vegetación del distrito de Tambillo-Ayacucho, en los periodos 2008-2013?, ¿Cómo fue el comportamiento de la vegetación? y ¿Cuál es la evolución del comportamiento fenológico de la vegetación por estaciones del año en el distrito de Tambillo?

El objetivo general del presente trabajo de tesis es, determinar la evolución temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mediante imágenes satelitales del distrito de Tambillo-Ayacucho, durante los años 2008 al 2013, pretendiéndose alcanzar los objetivos específicos planteados como es describir el comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada según estaciones del año mediante imágenes satelitales del sensor MODIS-Terra en el periodo 2008-2013, para finalmente contrastar y estimar los resultados obtenidos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y datos de precipitación y temperatura del aire de la estación meteorológica de Tambillo-Ayacucho, en el periodo 2008-2013.

La técnica de recolección de datos mediante la descarga de imágenes satelitales de la página web, el procesamiento y análisis por estaciones del año nos permitirá interpretar y entender el grado de cambio del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) [25], relacionado con la cobertura vegetal que crece en el distrito de Tambillo.

En este contexto, el presente trabajo de tesis brindará alternativas de fuente de datos a la comunidad científica peruana, gobiernos regionales, municipalidad provincial de Huamanga, municipalidad distrital de Tambillo y demás instituciones, además a estudiantes y docentes de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de las diferentes Escuelas de Formación Profesional de ingenierías y la Escuela de Posgrado.

A continuación comentaremos el contenido de cada uno de los capítulos en que se encuentra dividido el presente trabajo de tesis.

En el capítulo II, se describe el sistema de teledetección espacial basado en la energía electromagnética y el espectro electromagnético como fuente principal de información, para luego describir los sensores y plataformas usadas como es el satélite Terra sensor MODIS.

En el capítulo III, se describe los fundamentos físicos de la teledetección y conocer las características radiativas de la materia y la interacción de la radiación cuantificada con la reflectividad espectral según el sistema de teledetección espacial de acuerdo a los términos radiométricos.

En el capítulo IV, se presentan los materiales y métodos usados, donde se describe la zona de estudio, la descarga de imágenes a través de la página Web, el uso de procesamiento de algoritmos y programas usados como los softwares ENVI-IDL y ARCGIS y dar una valoración del tipo de uso de suelo de la vegetación según el NDVI, y finalmente clasificar el tipo de cobertura vegetal.

En el capítulo V, se presentan figuras de los resultados y discusiones del análisis estadístico de los datos obtenidos de las imágenes satelitales según el NDVI y el proceso de contrastación usando la base de datos de la estación meteorológica de Tambillo.

Finalmente en el capítulo VI, se presentan las conclusiones y sugerencias que incluyen una síntesis de los resultados logrados de acuerdo a los objetivos e hipótesis planteadas, indicando las propuestas para futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

TELEDETECCIÓN ESPACIAL

2.1 SISTEMA DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL

Con el desarrollo de la tecnología computacional , la ciencia avanza hacia un nivel de conocimiento con posibilidades ilimitadas, actualmente la obtención de información en algunos campos de la investigación no requiere la presencia física del hombre, equipos como los satélites demuestran la capacidad humana para desarrollar tecnologías alternativas de solución a problemas en los que existían limitaciones técnicas, la aplicación en procesos de datos actualmente resulta ser una tarea sencilla en la que manejar múltiples variables no es un obstáculo en el momento de obtener resultados instantáneos. La teledetección es una técnica que ha variado en las últimas décadas de una manera progresiva pues el interés de la comunidad científica ha crecido en magnitud tal que los estudios desarrollados gracias a las imágenes satelitales se pueden contar con una serie de proyectos en los que se encuentran el MODIS (Resolución Moderada de Imágenes Espectro radiométricas) del sistema EOS de la NASA objeto de estudio para la presente tesis [26].

Las plataformas geoestacionarias se localizan a unos 36000 km de la tierra proporcionando una imagen completa del planeta desde su ubicación, resulta conveniente utilizar las imágenes en predicciones meteorológicas, facilitando así la visualización de las características y movimientos de las masa nubosas. En definitiva, un sistema de teledetección espacial está constituido por los siguientes elementos [27].

a) Fuente de energía, la más importante es el Sol, como actor externo en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o si la fuente de energía es emitida por el sensor se habla de teledetección activa.

b) Cubierta terrestre, formada por la vegetación, agua, construcciones, suelo, las cuales reflejan la energía generada por la fuente, cada una dependiendo de sus características propias.

c) Sistema de recepción-comercialización, donde se recibe la información enviada por el sensor, se graba en un formato adecuado y luego se distribuye a los usuarios.

d) Usuario final, es el encargado de analizar el documento fruto de la interpretación anterior.

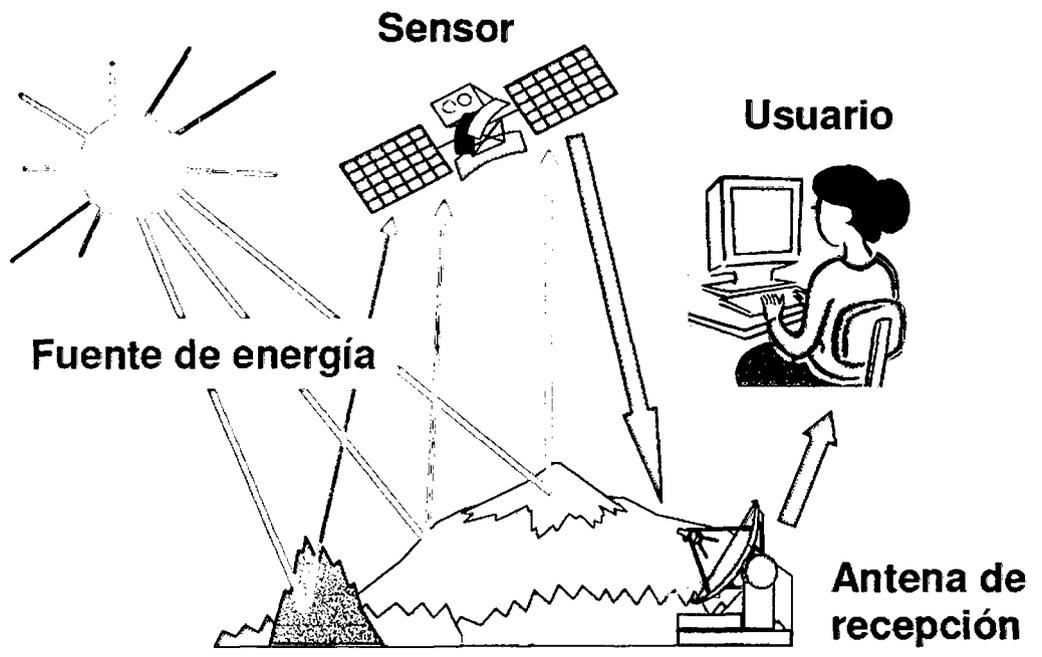


Figura 2.1 Elementos del sistema de teledetección espacial.

(tomado de www.tbars.arizona.edu. día 23/07/2015)

El proceso de la teledetección permite disponer de datos acerca del territorio, algunos en tiempo real por lo que utilizar esta herramienta resulta ser inevitable para el análisis, planeamiento y administración de los recursos naturales.

2.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

2.2.1. Naturaleza de la radiación electromagnética

Dada la importancia de la radiación electromagnética en la adquisición de información por percepción remota, se justifica estudiar su naturaleza con más detalle.

La energía electromagnética o energía radiante es una entidad física que se manifiesta bajo dos aspectos complementarios entre sí: el ondulatorio y el corpuscular. La concepción ondulatoria, que permite explicar ciertos fenómenos como los de difracción e interferencia, interpreta la radiación como un campo eléctrico y uno magnético oscilando en planos perpendiculares en medios homogéneos.

La concepción corpuscular, permite explicar hechos experimentales como el efecto fotoeléctrico y la absorción de la radiación por las moléculas y átomos de la materia, y consiste en concebir la radiación como un haz de corpúsculos llamados cuantos de radiación o fotones que se desplazan en dirección del haz a la velocidad de la luz.

Estas dos concepciones, la ondulatoria y la corpuscular, se concilian en la relación de Planck que permite explicar que un haz de radiación de determinada frecuencia (o longitud de onda) sea interpretado como un flujo de cuantos de determinada energía [28].

2.2.2 Espectro de las ondas electromagnéticas

La radiación electromagnética se presenta como una distribución continua de " λ " o " ν "; estableciendo una serie de bandas con comportamiento similar. La organización de estas bandas se denomina espectro electromagnético cuyas unidades de medida empleadas son distintas según la banda. Para las más cortas se emplea el Angstrom ($1\text{\AA} = 10^{-10}m$), el nanómetro ($1nm = 10^{-9}m$) o el micrómetro ($1\mu m = 10^{-6}m$), para las más largas se usa el centímetro o metro. Las frecuencias más bajas (microondas-radio) se usa el gigahercio ($1GHz=10^9$ Hz). La energía de las bandas se usa $E=h\nu$ ($h=6.626\times 10^{-34}Js$), usándose comúnmente como unidad el electrón voltio ($1\text{ eV}=1.6\times 10^{-19}J$) [29].

La delimitación de las bandas espectrales en orden creciente de λ , es

1. Rayos γ ($\lambda < 0.03 \text{ nm}$): completamente absorbidas por la atmosfera.

2. Rayos X ($0.03 \text{ nm} < \lambda < 30 \text{ nm}$): totalmente absorbidas por la atmosfera.

3. Ultravioleta (UV) ($0.03 \mu\text{m} < \lambda < 0.4 \mu\text{m}$): ondas producidas por átomos y moléculas en descargas eléctricas.

4. Espectro visible ($0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.7 \mu\text{m}$): única radiación que percibe nuestra vista, coincidiendo además con las " λ " donde la radiación solar es máxima. Se subdivide en tres bandas:

Color azul ($0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.5 \mu\text{m}$)

Color verde ($0.5 \mu\text{m} < \lambda < 0.6 \mu\text{m}$)

Color rojo ($0.6 \mu\text{m} < \lambda < 0.7 \mu\text{m}$).

5. Infrarrojo ($0.7 \mu\text{m} < \lambda < 1 \text{ mm}$): estas ondas son producidas por cuerpos calientes y moléculas. En teledetección son fundamentales 3 subdivisiones:

Infrarrojo próximo ($0.7 \mu\text{m} < \lambda < 1.3 \mu\text{m}$)

Infrarrojo medio ($1.3 \mu\text{m} < \lambda < 8 \mu\text{m}$) e

Infrarrojo lejano o térmico ($8 \mu\text{m} < \lambda < 14 \mu\text{m}$).

6. Microondas ($1 \text{ mm} < \lambda < 100 \text{ cm}$): se generan también con dispositivos electrónicos y entre ellas están las ondas de radar usadas en telecomunicación.

7. Ondas de radio ($100 \text{ cm} < \lambda < \text{varios km}$): son las usadas en los sistemas de radio y TV.

2.3 SENSORES Y PLATAFORMAS

La teledetección se lleva a cabo a través de los sensores, instrumentos susceptibles de detectar la señal electromagnética (radiación reflejada o emitida) que les llega de la Tierra y la atmósfera y convertirla en una magnitud física que puede ser procesada. Los sensores convierten la señal electromagnética en un formato digital (imagen). Para llevar a cabo la observación del terreno, los sensores se ubican en plataformas móviles llamados satélites. Las características de la imagen registrada dependen en gran medida de las propiedades del sensor utilizado y de la distancia al suelo desde la cual se realiza la adquisición de datos.

Los sensores se clasifican de acuerdo a la señal captada, sensores pasivos son las que registran la radiación emitida por el sistema observado o la radiación solar reflejada. Sensores activos son aquellos en los que el sensor cumple una doble función ya que actúa activamente produciendo una señal (onda electromagnética) de características conocidas que posteriormente registrará después de interactuar con el sistema observado. La información obtenida procede de la comparación entre la señal emitida y la señal reflejada.

Si tenemos en cuenta la región del espectro electromagnético en que se trabaja, la teledetección y los sensores se pueden agrupar en tres: técnicas en el visible- infrarrojo próximo (englobarían a los sensores que miden la intensidad de la radiación solar reflejada por la tierra en el intervalo espectral de $0.4 \mu\text{m}$ a $2.5 \mu\text{m}$), técnicas en el infrarrojo térmico (sensores que registran la radiación emitida por el sistema radiante en el intervalo espectral de $3-5 \mu\text{m}$ y $8-14 \mu\text{m}$) y técnicas en las microondas (miden la intensidad y polarización de las ondas, entre 0.1 cm - 100 cm).

Dependiendo de la forma en que se registra la señal, los sensores se agrupan en dos familias: los que permiten una adquisición casi instantánea del conjunto de escenas como la cámara electromagnética de barrido y los sensores que ofrecen una adquisición secuencial de elementos de la imagen, con los cuales dato a dato se construye el conjunto de las escenas [30].

2.3.1 Cualidades de los sensores

Cuando se trabaja con información espacial es fundamental el concepto de escala que hace referencia a la relación o proporción existente entre un documento (mapa, foto, imagen) y la realidad, que nos informa de la cantidad de información susceptible de ser extraída del documento; en el caso de imágenes espaciales captadas por radiómetros o radares hablaremos de resolución. La resolución de un sensor implica considerar la calidad de la información aportada en distintos aspectos, por lo que en la práctica se habla de cuatro tipos de resolución: espacial, espectral, radiométrica y temporal [29].

- **Resolución espectral:** Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Un sensor será más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas coberturas (MODIS Terra 36 bandas, posicionadas entre 0.405 μm a 14.385 μm).
- **Resolución espacial:** Este concepto designa al objeto más pequeño que puede distinguir en una imagen. Está determinado por el tamaño del pixel, medido en metros sobre el terreno (MODIS Terra 250 m bandas 1 a 2 de 0.620 μm a 0.875 μm).
- **Resolución radiométrica:** Hace referencia a la sensibilidad de un sensor y expresa su aptitud en una banda espectral dada para diferenciar señales electromagnéticas de energía diferente. Viene condicionada por los intervalos de digitalización de la señal. El número máximo de niveles digitales de la imagen suele identificarse con la resolución radiométrica y oscila entre 64, 128, 256, 1024. Hoy en día la mayoría de los sistemas ofrecen una digitalización de 256 (0-255), con excepción del NOAA que trabaja con 1024 niveles (MODIS Terra de 12 bit de $2^{12} = 4\,096$ niveles digitales).
- **Resolución temporal:** Alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, esto es, periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. Función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación) (MODIS Terra, periodo de revisita dada cada 16 días 10:30 am).

2.4 SATÉLITES DE OBSERVACIÓN

Los satélites artificiales constituyen un objeto artificial situado en el espacio que da vueltas alrededor de la tierra siguiendo una órbita específica. Son las plataformas más adecuadas para obtener una visión de regiones de gran extensión, y a diferencia de los

cohetes, pueden permanecer mucho tiempo en órbita, permitiendo una visión constante de la Tierra.

2.4.1 Descripción general del satélite Terra

El espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada MODIS es un instrumento a bordo de los satélites Aqua y Terra del sistema de observación terrestre de la NASA, la órbita del Terra pasa de norte a sur cruzando el ecuador en horas de la mañana, mientras que el Aqua pasa de sur a norte cruzando el ecuador en la tarde, ambos mediante una trayectoria en órbita polar, el cubrimiento total de la superficie terrestre por parte de estos dos satélites se realiza en un periodo de 1 a 2 días, capturando datos en 36 diferentes bandas espectrales.

El 18 de diciembre de 1999, la NASA lanzó el satélite Terra al espacio, como la nave insignia del Sistema de Observación Terrestre (EOS). En Febrero del 2 000, Terra abrió las puertas de observación terrestre para comenzar una de las más ambiciosas y largas misiones de la ciencia espacial nunca antes realizadas por el hombre. La misión designada para mejorar el conocimiento sobre los ciclos del carbón y energía a través del sistema climático de la Tierra.

El satélite Terra es una misión multidisciplinaria y multinacional gracias a que involucra relaciones con agencias aeroespaciales de Canadá y Japón. El trabajo es administrado por el Centro Aeroespacial GODDARD de la NASA y además es asesorado por el Laboratorio de Propulsión y Centro de Investigación LANGLEY. Este satélite es una parte importante de las misiones científicas de la NASA, ayudando a una mejor comprensión y protección de nuestro planeta.

El sensor MODIS es un espectrómetro en el espectro óptico e infrarrojo con longitud de onda entre 0.4 μm a 14.5 μm es un explorador de barrido que cuenta con un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria con un ángulo de $\pm 55^\circ$ que permite explorar una franja de terreno denominado (swath) a ambos lados de la traza del satélite, cuyo ancho es de 2330 km. El sistema óptico es un telescopio con dos espejos fuera de su eje focal que direcciona la radiancia incidente a cuatro subsistemas ópticos reflectantes, uno para cada región espectral.

El diseño del sensor remoto MODIS se caracteriza por una alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 bandas espectrales. Las bandas se caracterizan de la siguiente manera:

dos poseen una resolución nominal espacial de 250 m, cinco bandas están a 500 m y las otras 29 tiene una resolución de 1 km [31].

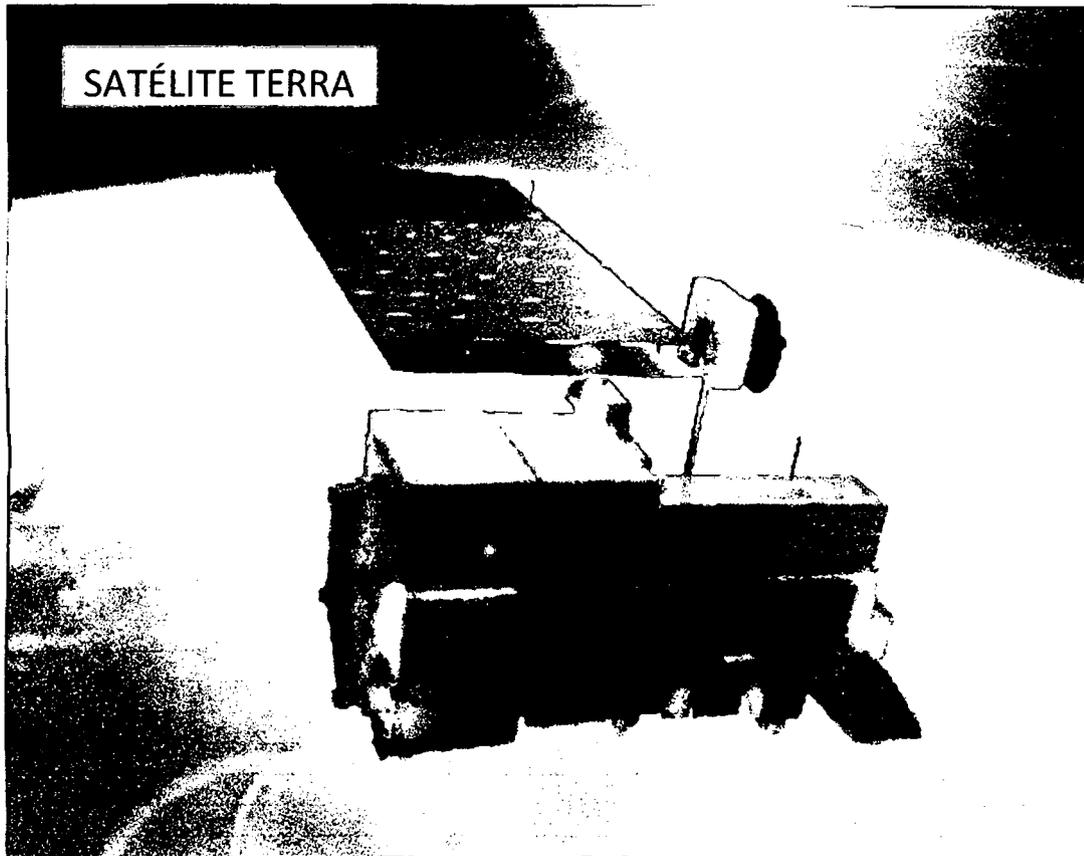


Figura 2.2 Plataforma del satélite artificial Terra (<http://Aqua.nasa.gov>. consultado en 03/08/2014).

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas principales del sensor MODIS

Especificaciones técnicas del sensor MODIS		
Sensor MODIS	Dimensión de la franja escaneada	2330 km por 10 km en el nadir
	Velocidad de barrido o tasa de escaneo	20.3 rpm pista transversal, ortogonal a la órbita
	Cuantificación o codificación o sensibilidad radiométrica	12 bits
	Tamaño de la escena	1200 filas por 1200 columnas
	Resolución espacial	250 m (bandas 1-2); 500 m (bandas 3-7) y 1000 m (bandas 8-36)
	Resolución temporal	1 a 3 días

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN

3.1 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS RADIOMÉTRICOS

3.1.1 Ángulo sólido (Ω). El análisis de un campo de radiación a menudo requiere la consideración de la cantidad de energía radiante confinado a un elemento de ángulo sólido. El ángulo sólido se define como la razón entre el área σ de la superficie esférica interceptado en el centro por el radio r al cuadrado, con notación Ω , cuya unidad es estéreo-radián (sr). Lo cual podemos escribir como [33]:

$$\Omega = \frac{\sigma}{r^2} \quad (3.1)$$

El área diferencial en coordenada esférica, $d\sigma$ se escribe:

$$d\sigma = r \sin\theta d\phi r d\theta = r^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (3.2)$$

Por lo tanto la diferencial del ángulo sólido está dada por la ecuación:

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi \quad (3.3)$$

Para una esfera cuya área de superficie es $4\pi r^2$, el ángulo sólido es 4π sr.

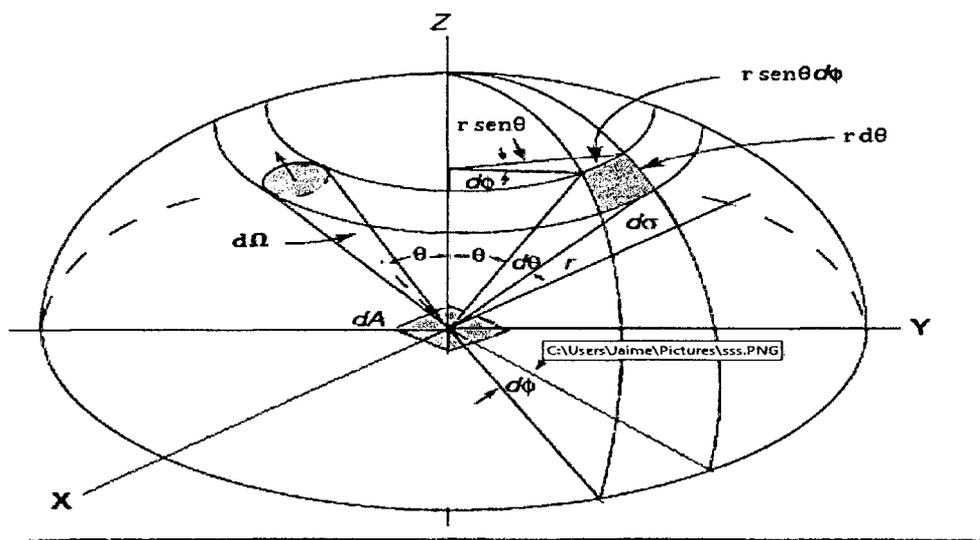


Figura 3.1 Ilustración del ángulo sólido diferencial representado en coordenadas polares esféricas (tomado de Liou, 2002).

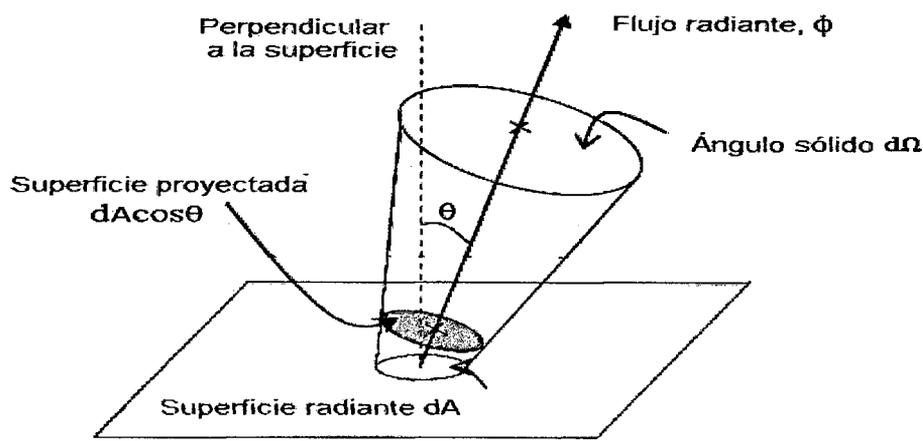


Figura 3.2 Interpretación geométrica de la radiancia (tomado de Mendoza, 2012).

El sensor percibe el flujo energético procedente de la radiación electromagnética. Este flujo tiene una intensidad determinada, dirigida a una unidad de superficie y con una dirección concreta [34].

En teledetección, las unidades de medida más comunes que se usa para adquirir los datos son [29].

1. **Energía radiante (Q):** Energía total radiada en todas las direcciones. Se mide en Joule (J).

2. **Flujo de energía radiante (Φ):** Energía total radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo. Se mide en [J/s=vatio, W].

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (3.4)$$

3. **Irradiancia (E):** Concepto referido a la energía que llega a un cuerpo a través del espacio procedente de otro (que la ha emitido), análogamente puede hablarse también de irradiancia espectral. Se mide en Wm^{-2}

$$E = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (3.5)$$

4. **Intensidad radiante (I):** Energía total radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido (Ω , medido en estereo-radianes: sr) ($I=Q/t\Omega$). Se mide en [W/sr].

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (3.6)$$

5. **Radiancia (L):** Es el flujo radiante (ϕ) que abandona una unidad de área en una dirección particular siguiendo un ángulo sólido particular. Las unidades en que se mide son $Wm^{-2}sr^{-1}$. Su importancia reside en que es la magnitud que detecta el sensor, donde θ es el ángulo formado por la dirección del flujo radiante y el vector perpendicular a la superficie receptora de tamaño A .

$$L = \frac{d^2\Phi}{(d\Omega d\sigma \cos\theta)} \quad (3.7)$$

6. **Radiancia espectral (L_λ):** Cuando la radiancia se refiere a una porción concreta del espectro electromagnético. Se mide en $[W/m^2 \text{ sr } \mu m]$.

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad (3.8)$$

7. **Reflectividad o albedo (ρ):** Es la parte de la irradiancia que refleja la superficie receptora, se mide en tantos por uno y se considera por tanto adimensional, es diferente para cada superficie receptora y para cada cuerpo. Relación entre el flujo incidente (ϕ_i) y el reflejado por una superficie (ϕ_r).

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad (3.9)$$

8. **Absortividad (α):** Relación entre el flujo incidente (ϕ_i) y el absorbido por la superficie (ϕ_a).

$$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i} \quad (3.10)$$

9. **Transmisividad (τ):** Relación entre el flujo incidente (ϕ_i) y el transmitido por una superficie (ϕ_t).

$$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad (3.11)$$

3.2 ECUACIÓN DE TRANSFERENCIA RADIATIVA

3.2.1 Procesos de interacción de la radiación electromagnética con la materia

Cuando la radiación electromagnética atraviesa un medio material se ve atenuada por los procesos de absorción y dispersión. En el caso particular de la atmosfera, estos procesos encuentran su origen en la interacción de la radiación electromagnética con las moléculas y partículas que la componen [35].

3.2.1.1 Absorción

Se define como la transformación energética sufrida por la radiación cuando atraviesa el medio, como resultado de la misma hay una alteración neta de los niveles de energéticos de las moléculas.

Consideremos la propagación de la radiación dentro de un determinado medio y seleccionamos una capa espesor perpendicular a la dirección de propagación de la radiancia L generalmente, dentro de la materia la energía radiante sufre algunas pérdidas debido a su conversión en otras formas de energía (procesos fotoquímicos, calentamiento, etc.), y después de recorrer una longitud dx la radiancia cambiará su magnitud a $aL + dL$, con:

$$dL = \beta_a L dx \quad (3.12)$$

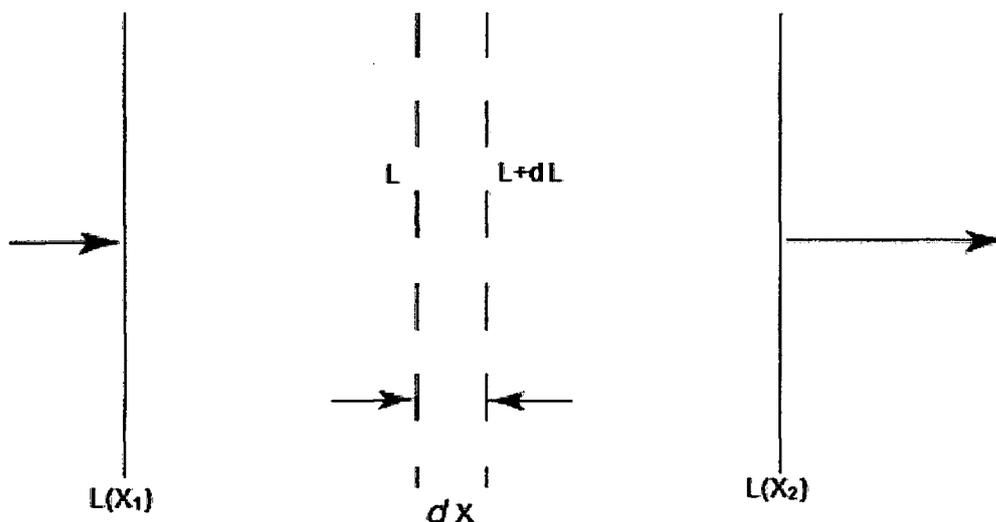


Figura 3.3 Definición de extinción (tomado de Lenoble, 1993)

Esta ecuación nos permite definir el coeficiente de absorción volumétrica, β_a , medido en m^{-1} . Después de recorrido finito entre x_1 y x_2 , la integración de la ecuación (3.12) se obtiene

$$L(x_2) = L(x_1) \exp(-\delta_a) \quad (3.13)$$

Donde

$$\delta_a = \int_{x_1}^{x_2} \beta_a(x) dx \quad (3.14)$$

En la expresión anterior, δ_a , es el espesor óptico entre x_1 y x_2 . Esta es una cantidad adimensional muy utilizada en física de la atmósfera, cobra especial importancia en los estudios de teledetección ya que informa de la opacidad que presenta el medio a la transmisión de la señal [29]. La ecuación (3.13), se conoce como la ley de extinción exponencial de Beer, o simplemente ley de Beer.

La transmisividad de la capa entre x_1 y x_2 a lo largo de la dirección de propagación se define como [32].

$$\tau = \frac{L(x_2)}{L(x_1)} = \exp(-\delta_a) \quad (3.15)$$

A partir de la ecuación anterior, cuando la radiancia se mide en x_1 y en x_2 el espesor óptico de absorción puede ser calculada de la siguiente forma

$$\delta_a = -\ln \tau = \ln \frac{L(x_1)}{L(x_2)} \quad (3.16)$$

La energía radiante que no es transmitida será absorbida, de forma que la absorptividad de la capa comprendida entre x_1 y x_2 se define como

$$\alpha = \frac{L(x_1) - L(x_2)}{L(x_1)} = 1 - \tau \quad (3.17)$$

3.2.1.2 Scattering

Existe otro proceso, además de la absorción, que puede reducir la energía radiante transmitida por una capa de un determinado medio, la dispersión de los fotones debido a inhomogeneidades en el medio, que son en primer lugar las propias moléculas, pero

también partículas mayores compuestas por varias moléculas. Contrariamente al caso de la absorción, en la dispersión la energía radiante permanece en forma de radiación, pero hay una pérdida en la dirección de la propagación de la radiación incidente [36].

En la atmósfera, las partículas son responsables del efecto de scattering por el tamaño de las moléculas de gas ($\sim 10 \mu m - 4 \mu m$), aerosoles ($\sim 1 \mu m$), gotas de agua ($\sim 10 \mu m$), cristales de hielo ($\sim 100 \mu m$), grandes gotas de agua y partículas de granizo ($\sim 1 cm$). El efecto del tamaño de partícula se infiere por un término físico llamado parámetro de tamaño. Para una partícula esférica, se define como la relación de la circunferencia de partículas a la longitud de onda incidente λ , es decir $x = 2\pi a/\lambda$, donde a es el radio de la partícula. Si $x \ll 1$, scattering se denomina scattering de Rayleigh. Un excelente ejemplo de este caso es la scattering de la luz visible ($0.4 \mu m - 0.7 \mu m$) por las moléculas de los gases atmosféricos. Para partículas cuyas tamaños son comparables o mayores que la longitud de onda, es decir, $x \geq 1$ se conoce scattering de Lorenz-Mie. La figura 3.4 ilustra los patrones de scattering de los aerosoles esféricos de tamaño $10 - 4,0.1$ y $1 \mu m$ iluminados por una luz visible de $0.5 \mu m$ [33].

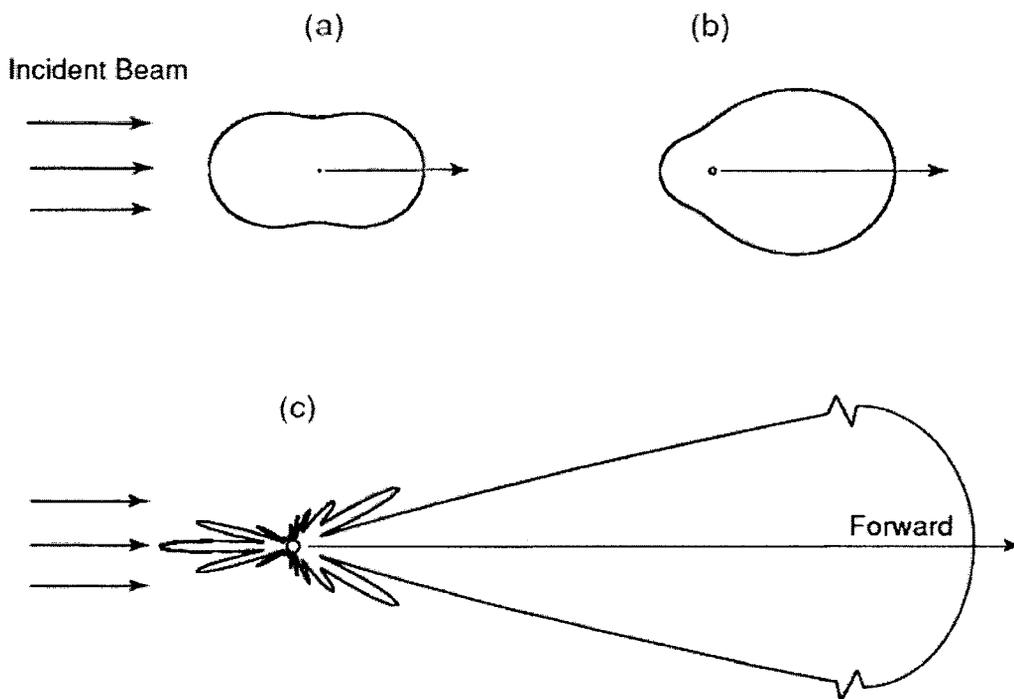


Figura 3.4 Patrones angulares de scattering por aerosoles de tres tamaños iluminados por la luz visible de (a) $0.5 \mu m$, (b) $0.1 \mu m$ y (c) $1 \mu m$ (tomado de Liou, 2002).

De manera análoga al de absorción, se puede realizar el proceso de dispersión, de forma que para una capa dispersora podemos escribir la siguiente relación.

$$dL = -\beta_a L dx \quad (3.18)$$

Que define el coeficiente de dispersión volumétrico $\beta_a (m^{-1})$. También podemos definir el espesor óptico de dispersión, que vendría dado por

$$\delta_a = \int_{x_1}^{x_2} \beta_a(x) dx \quad (3.19)$$

Así mismo se puede definir la transmisividad por la ecuación (3.15), sustituyendo δ_a por δ_a .

Consideremos ahora un elemento diferencial de volumen dispersado por dv (ver fig. 3.5). Caracterizaremos al rayo incidente por su irradiancia E sobre dv . El flujo radiante dispersado por dv en una dirección A , a un ángulo θ con respecto a la dirección de incidencia A_0 dentro de un ángulo sólido $d\Omega$ vendrá dado por

$$d^2\phi = f(\theta) E dv d\Omega \quad (3.20)$$

Donde $f(\theta)$ (en $m^{-1} sr^{-1}$) es la función de dispersión, la cual caracteriza la distribución angular de los fotones dispersados. Se ha asumido implícitamente que las partículas no introducen ninguna asimetría alrededor de la dirección de incidencia, lo que ocurre en muchos de los casos. En caso contrario, la función de dispersión también dependería del ángulo acimutal. El plano definido por la dirección de incidencia A_0 y la dirección de dispersión A se llama plano de dispersión, siendo θ el ángulo de scattering.

El flujo total perdido debido al scattering se puede calcular integrando la ecuación (3.20) sobre $d\Omega$ para todas las direcciones. El flujo incidente ϕ sobre dv cambiará en una cantidad dada por $\phi + d\phi$, donde

$$d\phi = -E dv \iint_{\text{espacio}} f(\theta) d\Omega \quad (3.21)$$

Considerando el elemento de volumen dv formado por un área dA perpendicular a la dirección de incidencia y un espesor dx (de forma que $dv = dA dx$), el flujo incidente sobre dA será $\phi = E dA$. A partir de la ecuación (3.18)

$$d\phi = -\beta_d \phi dx = -\beta_d E dv \quad (3.22)$$

Comparando las ecuaciones (3.21) y (3.22), obtenemos

$$\beta_d = \iint_{\text{espacio}} f(\theta) d\Omega \quad (3.23)$$

Que nos da la relación entre la función de scattering y el coeficiente de scattering.

Sin embargo, es conveniente introducir la función de fase normalizada $p(\theta)$, relacionada con la función de scattering por

$$p(\theta) = \frac{4\pi}{\beta_d} f(\theta) \quad (3.24)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (3.23), la normalización vendría dada por

$$\iint_{\text{espacio}} p(\theta) = 4\pi \quad (3.25)$$

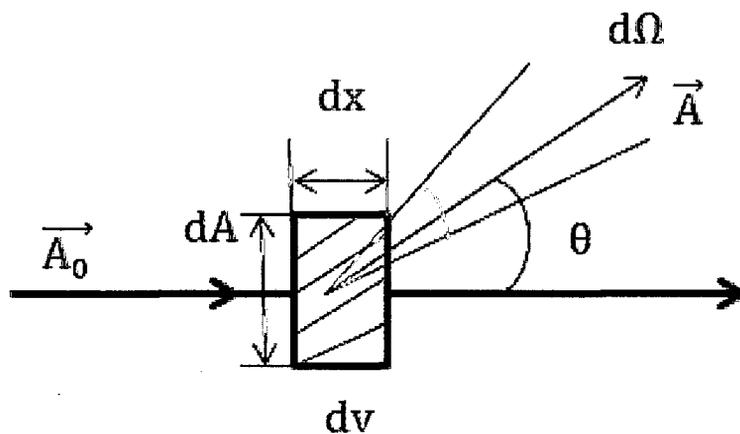


Figura 3.5 Función scattering (tomado de Liou, 2002)

3.2.1.3 Absorción y scattering

En el caso general en el que los procesos de absorción y dispersión ocurran simultáneamente, la atenuación de la energía radiante en un medio puede expresarse a partir del coeficiente de extinción, β_e definido como la suma de los coeficientes de absorción y dispersión:

$$\beta_e = \beta_a + \beta_d \quad (3.26)$$

Análogamente, se puede definir un espesor óptico total, δ dado por

$$\delta = \delta_a + \delta_d \quad (3.27)$$

La importancia relativa de los procesos de scattering y absorción se caracteriza a partir de albedo de scattering simple.

$$\varpi_0 = \frac{\beta_d}{\beta_e}, \quad 1 \geq \varpi_0 \geq 0 \quad (3.28)$$

Lo que lleva a

$$\beta_d = \beta_e \varpi_0 \quad (3.29)$$

$$\beta_a = (1 - \varpi_0)\beta_e \quad (3.30)$$

3.3 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA SUPERFICIE TERRESTRE

3.3.1 Reflectividad

La reflexión puede ser especular, en el límite entre dos medios de índice de refracción distinto, en cuyo caso sigue las leyes de Fresnel. Sin embargo es posible que tal reflexión se produzca tras cierta penetración en el material y como consecuencia de la retrodispersión por sus componentes elementales. En ambos casos se puede considerar englobar el proceso bajo el nombre de reflexión y se define la reflectividad como:

$$\rho = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_i} \quad (3.31)$$

Generalmente, la reflexión, no es especular, presentando un grado de difusión más o menos acentuado dependiendo de la rugosidad de la superficie: perfectamente difusa, difusa, pseudoespecular o especular.

Se dice que un reflector de radiación es completamente difuso o lambertiano cuando refleja igual cantidad de energía en todas las direcciones. Muchas superficies naturales son lambertianas hasta un ángulo cenital próximos a 40°, sin embargo la mayor parte de superficies, discrepan de este comportamiento para ángulos superiores.

La medida de la reflectividad puede hacerse considerando toda la semiesfera superior de una determinada superficie, en este caso se habla de reflectividad hemisférica (ρ_h). De este modo, si se considera una superficie elemental lambertiana (dS), iluminada por una irradiancia (E), el flujo difundido por ella bajo la dirección θ , puede expresarse como:

$$d^2\Phi = Ld\Omega dS \cos\theta \quad (3.32)$$

Para el flujo total hemisférico, difundido por la superficie, se tiene:

$$d\Phi_r = d\Phi_h = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} L dS \cos\theta \sin\theta d\theta = \pi L dS \quad (3.33)$$

En cambio, el flujo incidente puede expresarse a partir de la irradiancia como:

$$d\Phi_i = E dS \quad (3.34)$$

Con todo, se tiene para la reflectividad hemisférica de una superficie lambertiana.

$$\rho_h = \frac{\pi L}{E} \quad (3.35)$$

Sin embargo, en el caso más general la reflectividad es función de los ángulos cenital (θ) y acimutal (φ). En este caso la reflectividad se expresa como:

$$\rho_h = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_i} = \frac{1}{E} \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_0^{2\pi} L(\theta, \varphi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \quad (3.36)$$

En todas las definiciones presentadas puede considerarse el carácter espectral de los flujos energéticos y de este modo se llega a la reflectividad hemisférica espectral de la superficie.

En teledetección, las radiancias espectrales que son reflejadas desde la superficie hacia el sensor dependen de muchos factores. Entre ellos destacan las variaciones de la irradiancia solar, las condiciones atmosféricas (composición atmosférica) y meteorológicas (temperatura y vientos, principalmente), las propiedades reflectivas de la superficie (a nivel espacial y espectral) y las condiciones de observación del sensor.

La reflectividad de la superficie natural, es un parámetro fundamental que nos permite estudiar la interacción de la radiación electromagnética con la superficie terrestre donde se tiene buenas ventanas atmosféricas para las observaciones terrestres por los satélites en el espectro de la banda del rojo ($0,6 \mu m - 0,7 \mu m$) y el infrarrojo cercano ($0,7 \mu m - 1 \mu m$).

Tabla 3.1 Nomenclaturas propuestas para diferentes observaciones [29].

Reflectividad	Notación	Formulación
Bidireccional	$d\rho(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$	$= f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot d\Omega_i$
Direccional-cónica	$\rho(\theta_i, \phi_i; \omega_r)$	$= \int_{\omega_r} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot d\Omega_r$
Direccional-hemisférica	$\rho(\theta_i, \phi_i; 2\pi)$	$= \int_{2\pi} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot d\Omega_r$
Cónica-direccional	$d\rho(\omega_i; \theta_r, \phi_r)$	$= (d\Omega_r/d\Omega_i) \int_{\omega_i} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot d\Omega_i$
Bicónica	$\rho(\omega_i; \omega_r)$	$= (1/\Omega_i) \iint_{\omega_i \omega_r} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot d\Omega_r \cdot d\Omega_i$
Cónica-hemisférica	$\rho(\omega_i; 2\pi)$	$= (1/\Omega_i) \iint_{\omega_i 2\pi} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot d\Omega_r \cdot d\Omega_i$
Hemisférica-direccional	$d\rho(2\pi; \theta_r, \phi_r)$	$= (d\Omega_r/\pi) \int_{2\pi} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot d\Omega_i$
Hemisférica-cónica	$\rho(2\pi; \omega_r)$	$= (1/\pi) \iint_{2\pi \omega_r} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot d\Omega_r \cdot d\Omega_i$
Bihemisférica	$\rho(2\pi; 2\pi)$	$= (1/\pi) \iint_{2\pi 2\pi} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot d\Omega_r \cdot d\Omega_i$

3.4 REFLECTIVIDAD ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN, SUELO Y AGUA

Son representaciones gráficas de la longitud de onda en el eje de la abscisa (x) y la reflectividad en el eje de la ordenada (y), donde podemos observar que cada cubierta se ve representada por una curva característica en él.

Estas trazas singulares a modo de rúbricas, personalizan su comportamiento espectral frente al de otras cubiertas. A dichas curvas se las denomina espectros, firmas o firmas espectrales. Su diferente trazado permite distinguir entre varias cubiertas o entre estados diferentes de una misma cubierta [29].

VEGETACIÓN

Las curvas de reflectividad espectral para la vegetación casi siempre manifiestan los picos-valles que se muestran en la figura (promedio). Los valles en la región del visible vienen dados por los pigmentos en las hojas de las plantas. La clorofila por ejemplo absorbe energía fuertemente en las bandas centradas en $0,45 \mu\text{m}$ y $0,67 \mu\text{m}$ por ello nuestros ojos perciben la vegetación sana con color verde, debido a la gran absorción en azul y rojo por las hojas y la alta reflexión en el verde. Cuando la vegetación no está sana disminuye la clorofila y el resultado es una absorción en el rojo y el azul, a menudo incrementando la reflectividad espectral en el rojo por lo que vemos las hojas con tono amarillento (mezcla de verde y rojo). Al llegar al infrarrojo próximo la reflectividad de la vegetación sana aumenta drásticamente. La región $0,7 \mu\text{m} - 1,3 \mu\text{m}$ refleja entre el 40% a 50 % de la energía incidente, el resto de la energía es casi toda transmitida, ya que en esta región la absorción es menor que el 5%. La reflectividad de $0,7 \mu\text{m}$ a $1,3 \mu\text{m}$ se debe a la estructura interna de las hojas. Como estas son distintas nos permite diferenciar los tipos de vegetación, aunque en el visible sean muy similares.

Esta región también sirve para detectar estrés en la vegetación más allá de $1,3 \mu\text{m}$, la reflectividad de las hojas es aproximadamente inversamente proporcional al contenido del agua total presente en las hojas.

SUELO

Casi sin variación espectral, los principales factores que afectan a la reflectividad espectral de los suelos son: humedad, textura (proporción de arena), rugosidad, presencia de óxidos de hierro y materia orgánica. Por ejemplo, la presencia de humedad

hace decrecer la reflectividad espectral, al igual que la rugosidad, materia orgánica y la presencia de óxidos de hierro, estos últimos principalmente en el visible.

AGUA

Esta transmite la mayor parte de la energía visible que incide en ella, absorbiendo más cuanto mayor es la longitud de onda de la radiación incidente. La mayor reflectividad del agua clara está entorno al azul, disminuyendo cuando se alcanza el infrarrojo próximo. De ahí la facilidad a estas longitudes de onda de distinguir la línea de la costa. La variabilidad del agua se detecta mejor en longitudes de onda más cortas (azul y verde) y está relacionada con la profundidad, el contenido de materiales en suspensión (clorofila, nutrientes) y rugosidad de la superficie. Así, la reflectividad espectral aumenta en aguas poco profundas.

NIEVE

La elevada reflectividad espectral de la nieve en el visible se reduce drásticamente en el infrarrojo cercano. La reflectividad espectral es inversamente proporcional al tamaño de los cristales de hielo.

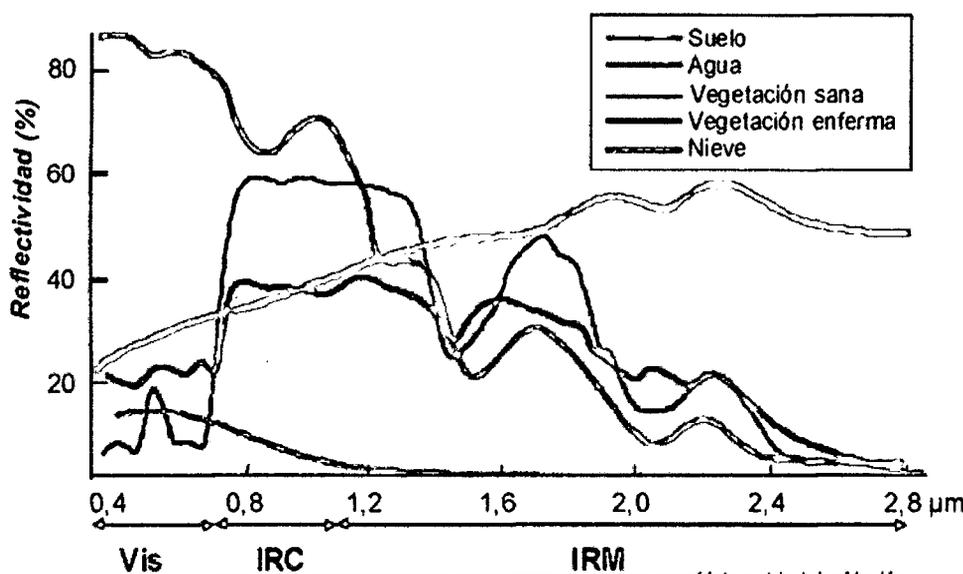


Figura 3.6 Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas (tomado de Chuvieco, 1996)

3.5 ÍNDICE DE VEGETACIÓN

La cobertura vegetal fue uno de los primeros focos de la investigación de la evaluación y manejo de recursos naturales, usando imágenes de satélites. Para lograr ello, la información satelital entregada a través de una imagen multibanda, debe ser categorizada y agrupada, para permitir discriminar un área con características particulares de otra. Una forma de expresar esta categorización o agrupamiento es mediante la elaboración de índices [37].

Al hablar de índices nos referimos a un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena.

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 que es particularmente sensible a la cubierta vegetal. También, corresponde a un número generado por alguna combinación de bandas espectrales y que puede tener alguna relación con la cantidad de la vegetación presente en un píxel dado. Estos índices, son utilizados para mejorar la discriminación entre el suelo y la vegetación, reduciendo el efecto del relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas [38].

Los valores resultantes de estos índices son adimensionales, e indican el vigor de la clorofila, donde los valores bajos indican vegetación poco vigorosa, enferma o simplemente ausencia de vegetación, mientras que los valores altos, indican vegetación muy vigorosa o sana. Sin embargo, en algunos casos (como los índices RVI y NRVI) el valor del índice de vegetación es inversamente proporcional a la cantidad de vegetación presente en el área, por lo que se recomienda poner atención al momento de interpretar alguno de ellos.

3.5.1 Índices basados en la pendiente

Estos, usan el cociente de la reflectancia de una banda con otra, (usualmente rojo e IR cercano, debido al alto contraste o diferencia en la reflectancia, que presenta la clorofila en ambas bandas). El término 'basado en la pendiente' se refiere a que, al analizar los valores resultantes del índice de vegetación, se comparan esencialmente las pendientes

de las líneas que pasan a través del origen y de los pixeles representados en un gráfico, con la reflectancia de una banda en el eje de las X y la reflectancia de la otra en el eje Y [39]. (ver figura 3.7)

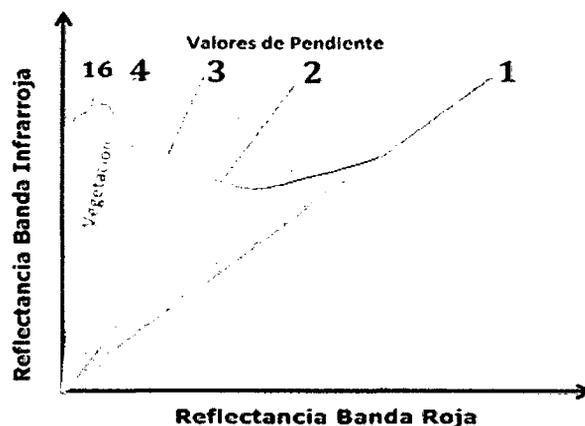


Figura 3.7 Relación de valores de la reflectancia de la banda Infrarroja y roja (tomado de Muñoz).

Este gráfico, muestra las líneas que convergen en el origen y que representan diversas concentraciones de vegetación o niveles de vigor de la misma. Este diagrama, grafica en el eje X los valores de reflectancia de la banda roja y el eje Y los valores de la banda infrarroja. En la medida que los valores se alejan de la línea de suelos, los valores graficados, corresponden cada vez más vegetación.

Tabla 3.2 Índices basados en la pendiente

En la siguiente tabla, se exponen diversos índices basados en la pendiente [39].

Nombre del índice	Fórmula	Características	Autor y año
NDVI Diferencia normalizada	$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$	<p>Minimiza efectos topográficos y produce escala lineal de medición. La escala va de -1 a 1 con el valor cero representando el valor aproximado donde empieza la ausencia de vegetación. Los valores negativos representan superficies sin vegetación.</p> <p>La normalización que realiza, reduce el efecto de la degradación de calibración del sensor y la influencia de los efectos atmosféricos. Gran sencillez matemática.</p>	Rouse et al. 1974

TVI Transformado	$TVI = \sqrt{\frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}} + 0.5$	0,5 evita valores negativos. La raíz cuadrada, intenta corregir los valores que se aproximan a una distribución de Poisson e introduce una distribución normal. No elimina todos los valores negativos.	Autor no encontrado
TTVI Transformada de Thiam	$TTVI = (ABS(NDVI + 0.50))^{0.5}$	Corrige la sobreestimación del verde del TVI.	Thiam
RVI² Cociente simple	$RVI = \frac{\rho_{IRC}}{\rho_R}$	Poco sensible a las condiciones de iluminación, pero mucho a las propiedades ópticas de la Tierra.	Pearson y Miller 1972
NRVI³ Cociente simple normalizado	$NRVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1}$	El resultado del NRVI es normalizado. Es similar al NDVI, reduce los efectos de la topografía, la iluminación y los efectos atmosféricos, además de crear una distribución normal estadísticamente deseable.	Perry y Lautenschlager 1984
NDWI Diferencial de agua normalizado	$NDWI = \frac{\rho_{IRC} - SWIR}{\rho_{IRC} + SWIR}$ ρ_{IRC} = Infrarrojo Cercano $SWIR$ = Infrarrojo medio	Este índice se utiliza para medir la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Los valores que se obtienen oscilan entre -1 y 1, para las zonas con menos humedad	Clevers (1988).

3.5.1.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizado, es el más conocido de todos, y es el más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental su sencillez de cálculo y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes.

- Valores muy bajos de NDVI, del orden de 0.1, corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas.
- Valores de 0.2 a 0.3 pueden corresponder a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales.

A partir de estos valores tendremos los niveles correspondientes a praderas, cultivos, forestaciones etc. dependiendo el valor alcanzado.

El índice de vegetación se define 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. Estos índices no miden directamente productividad ni disponibilidad vegetal, pero tienen una estrecha relación con estas variables, lo que permite utilizarlos para análisis regionales. Es decir, que los cambios del índice de vegetación permiten decir si un determinado mes o año es mejor o peor respecto al valor histórico.

El utilizar estos índices tiene su fundamento en el particular comportamiento radiométrico de la vegetación. Una cubierta vegetal en buen estado de salud, tiene una firma espectral que se caracteriza por el contraste entre la banda del rojo (entre 0,6 μm y 0,7 μm .), la cual es absorbida en gran parte por las hojas, y el infrarrojo cercano (entre 0,7 μm y 1,1 μm .), que es reflectada en su mayoría. Esta cualidad de la vegetación permite la realización de su valoración cualitativa mediante la reflectividad en el infrarrojo cercano (*IRC*) y la reflectividad en el rojo (*R*).

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R} \quad (3.37)$$

El rango de valores de las reflexiones espectrales se encuentra entre el 0 y el 1; ya que, la reflectividad del infrarrojo cercano como la del rojo, son cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral. El NDVI varía su valor entre -1 y 1, teniendo gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación. Además permite la comparabilidad entre datos obtenidos por diferentes investigadores. Por otro lado tiene el inconveniente de que posee poca capacidad de minimizar la influencia del suelo y de la atmósfera [36].

El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial así como la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas.

La interpretación del índice debe asimismo considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anuales para distinguir oscilaciones naturales de la vegetación de los cambios en la distribución temporal y espacial causados por otros factores. El agua tiene reflectancia $R > IRC$, por lo tanto valores negativos de NDVI. Las nubes presentan valores similares de R y IRC , por lo que su NDVI es cercano a 0. El suelo descubierto y con vegetación rala presenta valores positivos aunque no muy elevados. La vegetación densa, húmeda y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI.

Sin embargo, tiene el inconveniente de ser sensible a la reflectividad del suelo sobre el que se sitúa la planta, lo que limita su potencial de discriminación. Por ejemplo, en una zona con baja densidad de vegetación, la reflectividad de un pixel en la banda infrarroja y en la banda roja, vendrían determinados fundamentalmente por el suelo, con una pequeña variación debida a la presencia de vegetación. El resultado, es que un índice de vegetación de esa zona, daría resultados muy similares a los del suelo desnudo y sería imposible detectar la presencia de vegetación. De hecho, este problema es bastante grave cuando la cubierta vegetal es menor del 50%, lo que ocurre bastante a menudo, incluso en zonas cultivadas, siendo su uso poco aconsejable en esas condiciones [37].



Figura 3.8 Regresión lineal entre la banda roja e infrarroja (tomado de Muñoz).

Para resolver este problema y poder estudiar la vegetación, incluso en zonas de baja densidad, se han desarrollado diversos índices de vegetación, que se describen a continuación.

3.5.2 Índices basados en la distancia

Los valores de reflectancia registrados por el sensor, para cada pixel, constituyen una reflectancia promedio de todos los tipos de coberturas que están dentro de ese pixel. Cuando en zonas áridas y semiáridas la vegetación es dispersa, la reflectancia recibida pertenece tanto a vegetación como suelo. Estos índices, que tratan de separar la información entre la vegetación y el suelo, se basan en el uso de una línea del suelo y las distancias desde ella. Una línea de suelo, es una ecuación lineal que describe la relación entre los valores de reflectancia de la banda roja e infrarrojo cercano para los pixeles que representan suelo. Esta línea se genera ajustando una regresión lineal entre la banda roja e IR cercano para una muestra de pixeles de suelo desnudo.

Otra forma de hacerlo, es generar un mapa de dispersión entre la banda IR, eje Y y la banda roja, eje X, como se aprecia en la figura 10 y trazar la línea que mejor se ajusta a la base de los puntos graficados, representada en amarillo. Con esto se puede obtener la pendiente y la distancia al origen.

Una vez establecida esta relación, todos los pixeles desconocidos que tienen la misma relación en los valores de reflectancia de las bandas roja e infrarroja son asumidos como suelo desnudo. Los que caen lejos de la línea de suelo, porque tienen mayor respuesta de reflectancia en el IR cercano, se consideran vegetación. Aquellos que aparecen lejos de la línea de suelo, porque su reflectancia roja es más alta, se asumen como agua (la respuesta espectral del agua es mayor en el rojo que en el IR).

Tabla 3.3 Índices basados en la distancia

En la siguiente tabla, se exponen diversos índices basados en la distancia a la línea de suelo [39].

Nombre del Índice de Vegetación	Fórmula	Características	Autor y año
PVI Perpendicular	$PVI = \frac{(bNIR - RED + a)}{\sqrt{b^2 + 1}}$ <p> <i>NIR</i> = reflectancia en la banda infrarroja cercana <i>RED</i> = reflectancia en la banda roja visible <i>a</i> = ordenada al origen de la línea del suelo <i>b</i> = pendiente de la línea del suelo </p>	Usa la distancia perpendicular de cada pixel a la línea del suelo.	Richard-son y Wiegand 1974

DVI De diferencia	$DVI = bNIR - RED$	Un valor de cero indica suelo desnudo, los menores de cero, agua y los mayores de cero, vegetación.	Richard-son y Everitt 1992
SAVI De suelo ajustado	$SAVI = \frac{NIR - R}{[NIR + R + L]}(1 + L)$	Incorpora una constante de suelo, la cual se usa de acuerdo con vegetación de baja, intermedia o alta densidad. Considera la influencia de la luz y del suelo oscuro en el índice.	Huete 1988
TSAVI De suelo ajustado transformado	$TSAVI = \frac{b(NIR - bRED - a)}{RED + bNIR - ab + X(1 + b^2)}$ X=parámetro a determinar para minimizar, la influencia del suelo.	Considera la pendiente y el intercepto de la línea de suelo. Mucho efecto del suelo de fondo. Tiene varias modificaciones de transformaciones.	Baret y Guyol 1991
MSAVI De suelo ajustado, transformado	$MSAVI = SAVI$ con $L = 1 - 2 * s * NDVI * WDV$ $s =$ Pendiente de la línea de suelo $WDVI = IRC - s * R$	Índice de gama limitada: $-1 < MSAVI < 1$. L no es a priori, sino que calculada. Reduce la incerteza del SAVI +2.5% a +-1.6%. Es similar al WDV en la reducción del ruido del suelo, pero sus valores de índice de vegetación son mayores.	Qi, Kerr, Chehbouni, Huete 1994
MSAVI2 2° de suelo ajustado transformado	$MSAVI2 = \frac{2NIR + 1 - \sqrt{[(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - RED)]}}{2}$	Es la segunda modificación del SAVI. Es como una repetición del MSAVI que básicamente utiliza procesos iterativos y sustituye el factor L del MSAVI por $1 - MSAVI$ (n-1). En el proceso, se elimina la necesidad de pre calcular WDV, NDVI y encontrar la línea de suelo.	Qi et al. 1994
WDVI De diferencia Ponderada	$WDVI = NIR - bRED$ b = Pendiente de la línea de suelo	Es matemáticamente más simple. Como el PVI, el WDV es muy sensible a las variaciones atmosféricas.	Clevers 1988

Ante el elevado número de índices de vegetación, es inevitable preguntarse ¿Qué índice de vegetación se debe usar? Según opina Ray Terril, lo siguiente:

“NDVI. Casi todos los que hacen mucha teledetección en vegetación usan NDVI, y a menudo es mejor atenerse a lo que la gente conoce y confía. NDVI es simple, cuenta con el mejor rango dinámico de cualquiera de los índices y tiene la mejor sensibilidad a los cambios en la cubierta vegetal”.

CAPÍTULO IV MÉTODOS

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO

La presente investigación se desarrolló en el distrito de Tambillo provincia de Huamanga región de Ayacucho, ubicado en la parte sur oriental de la sierra central del Perú, con coordenadas geográficas de 13°11'28" latitud Sur y 74°06'30" longitud Oeste, teniendo como capital al distrito de Tambillo que se encuentra a 3080 m.s.n.m., con una extensión territorial de 218.62 km².

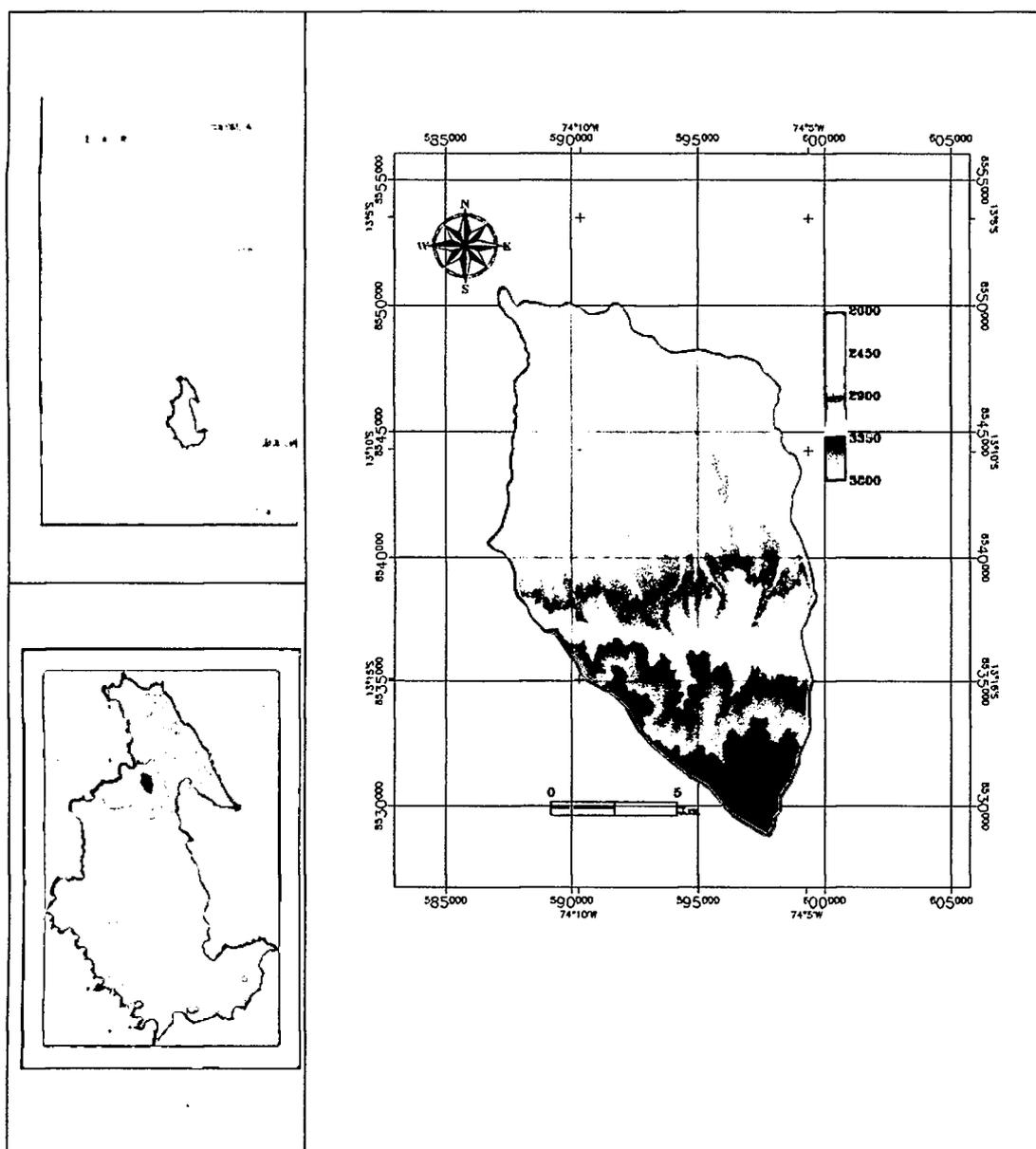


Figura 4.1 Ubicación de la zona en estudio, distrito de Tambillo (elaboración propia)

El territorio del distrito de Tambillo está situado desde altitudes de 2150 m.s.n.m. hasta los 3600 m.s.n.m, que abarca varios pisos ecológicos o regiones naturales (definición elaborado por el Dr. Javier Pulgar Vidal en las “Ocho Regiones Naturales del Perú”) que van desde la región yunga, quechua y suni, comprendido entre las cuencas del río Huatatas y el río niño Yucaes en la parte Norte, y el río Palccayacu en la parte Este, teniendo como principal afluente al río Pampas, donde buena parte de su población y sus comunidades están situados en las partes bajas del distrito, como el valle de Muyurina y el niño Yucaes.

4.1.1 Clima

El distrito de Tambillo perteneciente al departamento de Ayacucho posee una diversidad de climas debido a la variación altitudinal que van desde el cálido al frígido, siendo las temperaturas diurnas relativamente altas, el distrito presenta una temperatura media del aire de 17°C y con oscilación o amplitud térmica ligera en el periodo de un día. En los valles interandinos, el clima es frío boreal seco por encima de los 3000 m.s.n.m, con veranos lluviosos e inviernos secos con fuertes vientos en ciertas horas del día y con presencia de heladas en horas de la noche, cabe recalcar que el clima en esta región de estudio es predominante y acondiciona a las actividades agrícolas y pecuarias.

4.1.2 Biodiversidad

La unidad de mayor superficie es la vegetación arbustiva que se encuentra en los valles cuyas laderas o vertientes predominantes son, desde moderadamente empinadas hasta fuertemente empinadas, de 2425 m.s.n.m. a 3000 m.s.n.m.



Figura 4.2 Vegetación en el río niño Yucaes –Muyurina (13°07'01"S 74°11'13"W)

Esta vegetación, se caracteriza por la presencia de asociaciones arbustivas de hasta 1.5 m de alto, las cuales se encuentran siguiendo un patrón de distribución espacial irregular, donde las especies se encuentran muy dispersas. Como vegetación de piso, se encuentra un tapiz herbáceo de vida efímera, conformada mayormente por gramíneas.



Figura 4.3 Matorral semiárido con presencia de cactáceas columnares y de árboles de huarango (13°9'7.08''S 74°5'3.86''W)

En algunas porciones de las laderas se encuentran agrupaciones de especies arbóreas espinosas de porte muy achaparrado (hasta 2.5 m de alto), debido probablemente a las condiciones de extrema sequía que existen durante la mayor parte del año. Entre las especies se tiene tara, cabuya, cactus y huarango.

4.1.3 Geomorfología

La zona de estudio presenta una geomorfología accidentada, con presencia de laderas altas y escarpadas erosionales y denudativas, piedemonte con pendientes moderadas y topografía ondulada, también presenta pequeños lugares planos y una diferencia altitudinal que oscila entre los 2150 m.s.n.m. en la parte más baja, hasta los 3600 m.s.n.m. en la parte más alta según la Zonificación Ecológica y Económica (ZEE), elaborado por el Gobierno Regional de Ayacucho en el año 2012.

4.1.4 Población y características socioeconómicas

El distrito de Tambillo tiene una población aproximada de 7118 habitantes y su densidad habitacional de 17.67 hab./km². Cuenta con veintisiete comunidades campesinas y dos anexos en su jurisdicción territorial según la Zonificación Ecológica y Económica (ZEE), elaborado por el Gobierno Regional de Ayacucho en el año 2012.

La principal actividad económica es la agricultura de autoconsumo y en menor proporción orientada al mercado local con productos de tallo corto, y la actividad pecuaria que complementa la economía familiar, principalmente mediante la crianza de ganado vacuno y animales menores.

El distrito de Tambillo, en los últimos años tiene la necesidad de establecer políticas de ordenamiento territorial que parte de aspectos básicos como, resolver problemas críticos relacionados con la ocupación y uso agrícola del territorio, y ello articular a las diversas políticas sectoriales. Es así que busca orientar el accionar del Municipio de Tambillo en el cumplimiento eficiente de sus funciones, para el bienestar de sus pobladores y estar en armonía con las condiciones ambientales y la seguridad física.

Según el ZEE de la Región Ayacucho, el 80 % de los pequeños productores del total del distrito, son considerados como productores de subsistencia, donde su principal actividad es la agricultura y ganadería, es así que al realizar el mal uso del suelo y malas prácticas agrícolas, tienen como consecuencia la desertificación y erosión de los suelos agrícolas. Frente a esta problemática del pequeño productor, el distrito de Tambillo fue intervenido por muchas instituciones, los cuales no han podido generar tecnologías adecuadas que permitan incrementar la producción y productividad de los pequeños productores. Las razones son variadas, desde la carencia de políticas institucionales, sectoriales y planificación territorial, que prioricen a los pequeños productores quienes deben ser orientados de acuerdo a la aptitud de su recurso suelo [40].

4.1.5 Límites del distrito de Tambillo

El distrito de Tambillo tiene como límites a los siguientes distritos de la provincia de Huamanga:

- Por el Norte, con los distritos de Quinua y Jesús Nazareno.
- Por Sur, con los distritos de Acocro y Chiara.
- Por Este, con los distritos de Acocro y Acosvinchos.
- Por Oeste, con los distritos de Ayacucho, Chiara y San Juan Bautista.

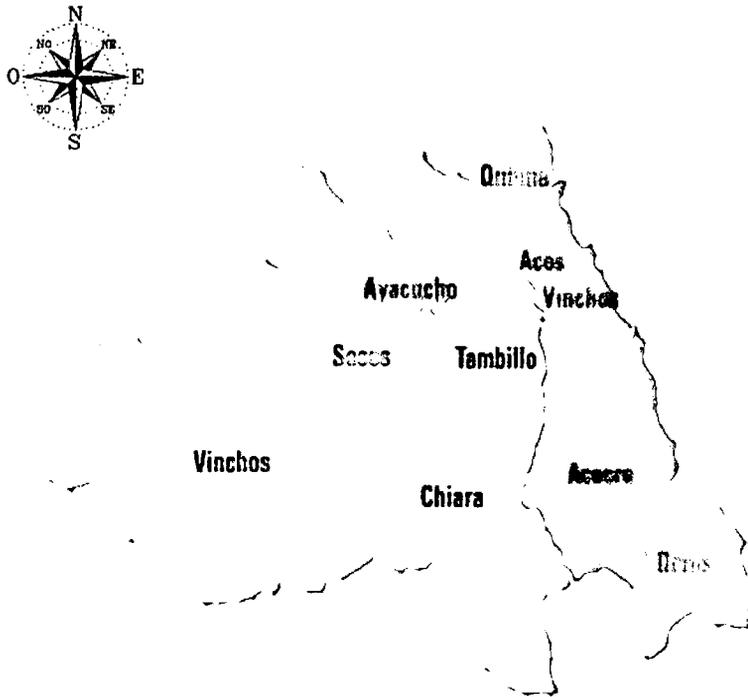


Figura 4.4 Limite Político del distrito de Tambillo (elaborado por el Gobierno Regional de Ayacucho)

4.2 DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Los datos de la estación meteorológica de Tambillo fueron proporcionados por la Oficina de Operaciones y Mantenimiento (OPEMAN) que pertenece al Gobierno Regional de Ayacucho. Cuyos datos diarios contienen los parámetros de precipitación y temperatura máxima y mínima del aire desde enero 2008 a diciembre del 2013.

4.2.1 Parámetros utilizados en el análisis estadístico

Series de tiempo

La serie temporal del presente trabajo de tesis es una secuencia de observaciones, medidos en determinados momentos del tiempo, ordenados cronológicamente y, espaciados entre sí de manera uniforme, así los datos usualmente son dependientes entre sí. El principal objetivo de una serie de tiempo del $NDVI_t$, donde $t=1,2, \dots, n$ es su análisis para hacer pronóstico en la evolución del NDVI por meses y estaciones del año, según el área por tipo de cobertura vegetal del suelo durante el periodo del 2008 al 2013.

Regresión lineal

Es una técnica que permite cuantificar la relación que puede ser observada cuando se grafica un diagrama de puntos dispersos correspondientes a dos variables, cuya tendencias general es rectilínea, relación que cabe resumir mediante una ecuación del mejor ajuste de la forma:

$$y = ax + b \quad (4.1)$$

Así la ecuación 4.1, es la forma general de representar una relación; la constante a puede ser positivo o negativo, se le denomina pendiente o coeficiente de regresión y la constante b puede ser cero, positivo o negativo.

Coeficiente de correlación (r)

Es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. Mide el grado de intensidad de ésta posible relación entre las variables, el coeficiente de correlación lineal se aplica cuando la relación que puede existir entre las variables es lineal. En una distribución bidimensional puede ocurrir que dos valores guarden algún tipo de relación entre sí $0 < r < 1$ si $r > 0$, la correlación lineal es positiva, o sea, (si sube el valor de una variable, sube el de la otra también), así la correlación es tanto más fuerte cuando más se acerca a 1.

$$r = \frac{\text{covarianza}}{\text{desviación típica}} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4.2)$$

La desviación estándar o típica

Es una medida de dispersión que nos indica cuanto puede alejarse los valores respecto a la media o promedio, se define como la raíz cuadrada de la varianza, denotado por σ es una medida de grado de dispersión de datos con respecto al valor promedio, cuanto es menor es mucho mejor.

4.3 OBTENCIÓN DE DATOS MODIS-TERRA (MOD13Q1)

4.3.1 Descarga de datos imagen del NDVI MODIS-Terra (MOD13Q1)

Los datos imagen del NDVI fue descargado de la unidad de servicios geológicos USGS-MODIS Reprojection tool web interface, éste servidor pertenece a la EOS y forma parte

de las instituciones de la NASA [41]. Para descargar los datos en forma de imágenes, primero se tiene que suscribirse creando una cuenta personal.

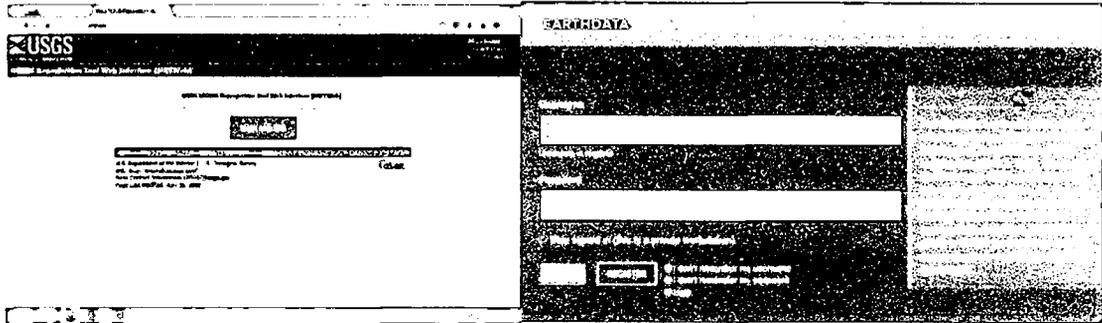


Figura 4.5 Ventana principal para suscribirse creando una cuenta personal o poner su contraseña

Una vez ingresado a la ventana de la plataforma de imágenes, se escoge el nombre del satélite para activar el producto a descargar que aparece en códigos, la resolución de la imagen, sensor de día y la fecha de la imagen, a continuación seleccionar la versión y adjuntar a la ventana de descarga como se muestra en la figura 4.6 y 4.7

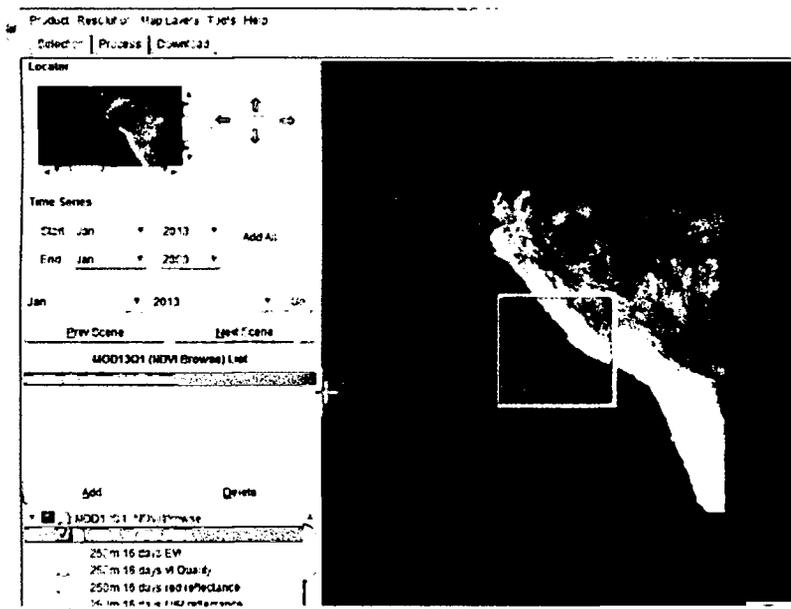


Figura 4.6 Ubicación de la escena a descargar

Producto a descargar: producto-MODIS -Terra/ MOD13Q1 (NDVI Brouse) de 250 m cada 16 días NDVI y la fecha.

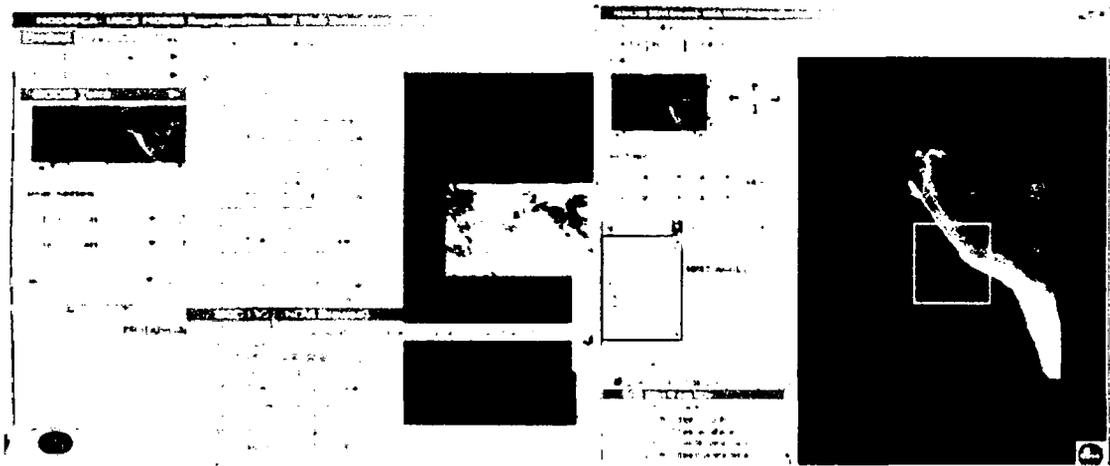


Figura 4.7 Ventana de descarga del producto MODIS Terra (noviembre 2013)

Finalmente en la ventana de procesos, introducimos los datos de proyección geográfica (WGS 18) tipo de archivo GEOTIFF del área de interés:

Upper Left: latitud -12 y longitud -76

Lower Right: latitud -16 longitud -71

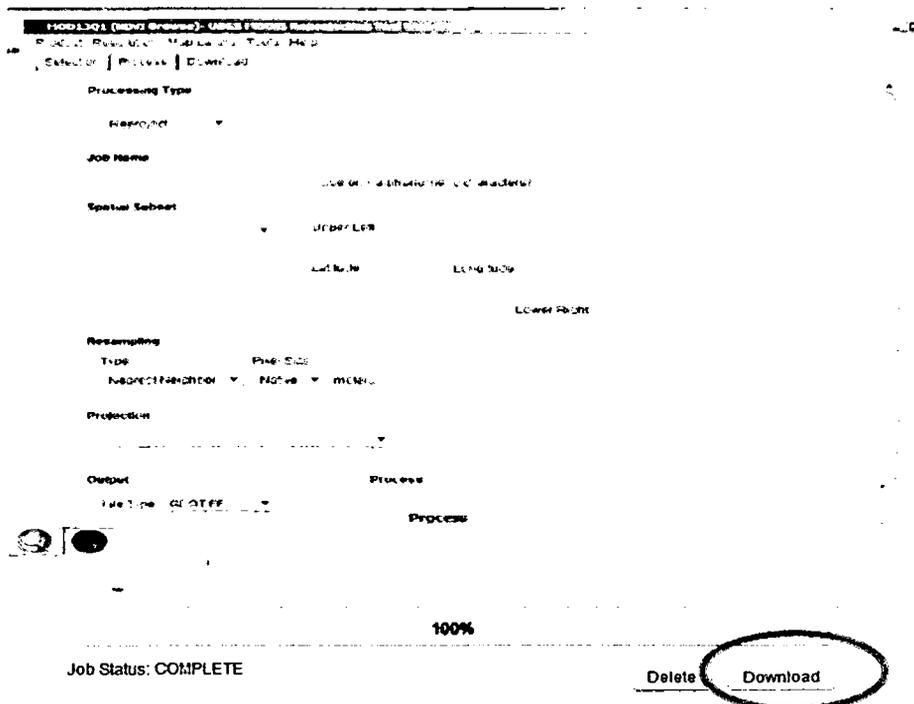


Figura 4.8 Descarga final de imágenes MODIS-Terra (noviembre 2013)

4.4 PROCESAMIENTO DE DATOS

4.4.1 Algoritmo y programas

Software ENVI. El software ENVI (Ambiente para Visualizar Imágenes), es el software ideal para la visualización y análisis, de datos científicos e imágenes satelitales. El programa de proceso de imágenes digitales incluye herramientas avanzadas para el análisis espectral, corrección geométrica, análisis de terreno, análisis de radar, y capacidades de Sistema de Información Geográfica (SIG) vectorial, apoyo amplio para acceder a imágenes de una amplia variedad de fuentes.

El programa está completamente escrito en **IDL** (siglas en inglés de Interactive Data Lenguaje).

Sistema de Información Geográfica (SIG). Sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente georreferenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión.

Software ARCGIS. Los productos ArcGIS son un conjunto de aplicaciones utilizadas para compilar información geográfica, crear mapas, realizar análisis y llevar a cabo proyectos importantes. Es utilizada a través de tres aplicaciones ArcMap, ArcCatalogo y ArcToolbox.

Con la utilización de estos softwares y realizando la sintaxis del algoritmo se obtuvo el NDVI a partir de imágenes MODIS Terra, para ello se ha elaborado el algoritmo en ENVI-IDL (ver anexo 02), para el mosaico de las 115 imágenes y realizar el corte según el vector del área en estudio y obtener el promedio espacial.

4.4.2 Tratamiento digital de las imágenes MODIS Terra

El tratamiento digital de imágenes se realiza mediante el uso de software ENVI, IDL y ARCGIS de las cuentas digitales contenidas en una imagen para los propósitos de su corrección, perfeccionamiento y/o extracto del rasgo. La unidad visual más pequeña que se puede visualizar en una imagen se denomina pixel; el sensor detecta la radiancia media de una parcela de terreno equivalente al tamaño del pixel.

El proceso de grabación de la energía electromagnética que conforman una imagen se realiza mediante unos sistemas fotoelectrónicos específicos que generan una señal de corriente eléctrica cuya intensidad es directamente proporcional a la radiancia detectada en un determinado rango de longitud de onda, ángulo y en un determinado instante.

Cada pixel tiene un valor numérico entero o real, que corresponde al nivel digital percibido, el cual se traduce en un valor de gris en la pantalla o nivel visual. El arreglo de varios píxeles genera la imagen que se puede interpretar como una matriz con coordenadas, la columna, cuyo valor (o valores) de celda corresponden a la dimensión espectral. El valor del pixel se traduce a un valor numérico al que llamamos nivel digital (ND), que están comprendidos entre 0 y $k-1$ valores, siendo k el margen dinámico del sistema determinado a su vez por su resolución radiométrica. Cada pixel se define por un byte y éstos están descritos con arreglos de 12 bits asignado con 4096 niveles digitales posibles ($k=2^{12}$, o sea de 0 a 4095 niveles de grises) para las imágenes MODIS. A partir de la cual se realiza el tratamiento digital de las imágenes.

4.4.3 Clasificación de las imágenes descargadas

Una vez descargadas las 115 imágenes satelitales MODIS-Terra (MOD13Q1) (ver anexo 01), se han agrupado seis imágenes por estaciones del año (dos por mes). La clasificación de las imágenes para verano comprende los meses de diciembre, enero y febrero, para otoño comprende marzo, abril y mayo, para invierno los meses de junio, julio, agosto y para la estación de primavera los meses de setiembre, octubre y noviembre, desde enero del 2008 a diciembre del 2013.

4.4.4 Procesamiento las imágenes satelitales MODIS-Terra (MOD13Q1)

El área de interés del presente trabajo de tesis es el distrito de Tambillo, por tanto, se va a trabajar con datos imagen en archivo GEOTIFF y vectorial que pertenecen a ésta región.

Para ello elaboramos códigos y/o algoritmos en lenguaje de programación IDL; la cual nos facilita en automatizar el procesamiento de un conjunto de imágenes obtenidas que deben estar en el mismo formato, pixeles del mismo tamaño, parámetro de estudio a escala grises, excluir los valores extremos de las imágenes georreferenciados, y las escenas deben tener las mismas dimensiones y correcciones mínimas exigidas según

el nivel de procesamiento. Teniendo en cuenta los datos anteriores se calcula el NDVI promedio estacional.

En la figura 4.9 se muestra el corte mediante el software ENVI.

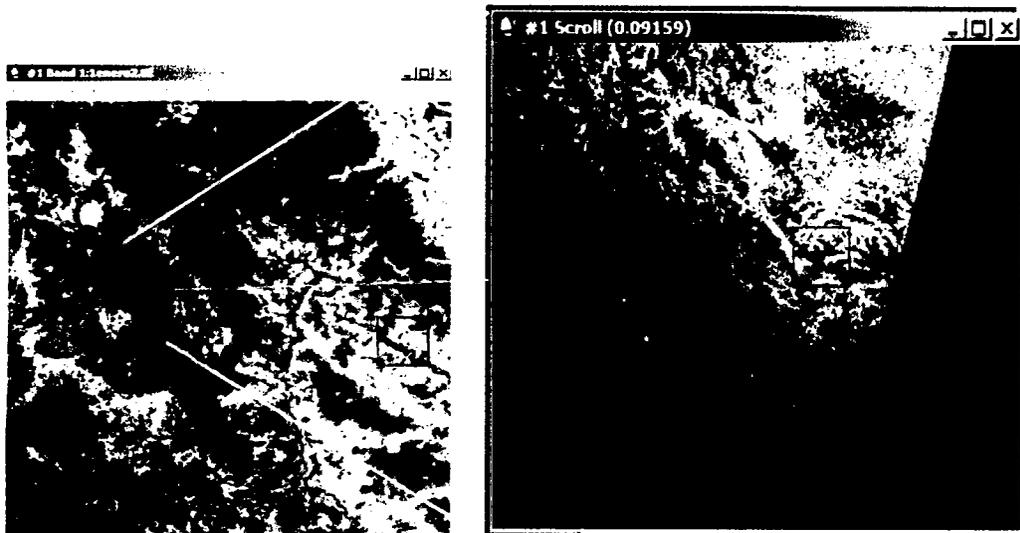


Figura 4.9 Creación de ventana para corte del área de estudio (vector Tambillo elaboración propia)

Con el Software ENVI (Ambiente para Visualizar Imágenes), se realizó el procesamiento de las 115 imágenes MODIS Terra (MOD13Q1) apiladas y cortadas teniendo como máscara al mapa vectorial del distrito de Tambillo para ser clasificados por estaciones del año de acuerdo a su banda espectral y longitud de onda obteniéndose el NDVI clasificados por colores representativos [0.0000-0.0799 (negro)], [0.0800-0.1390 (gris)], [0.1400-0.1990 (azul)], [0.2000-0.2590 (amarillo)], [0.2600-0.3190 (rojo)], [0.3200-0.3790 (naranja)], [0.3800-0.4390 (verde claro)], [0.4400-0.5000 (verde oscuro)], tal como se observa en la figura 4.10.

Las imágenes procesadas por banda de colores son las siguientes:

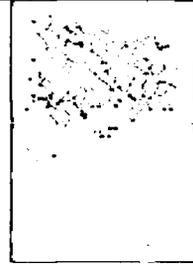
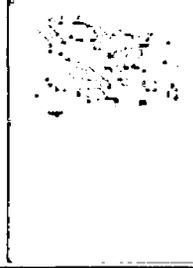
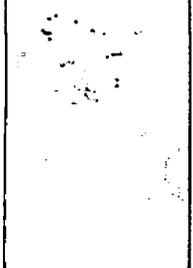
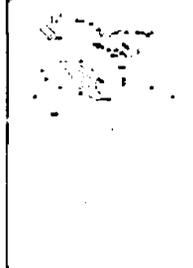
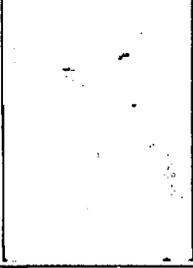
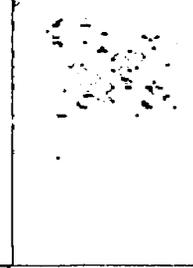
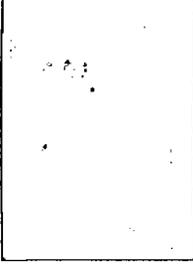
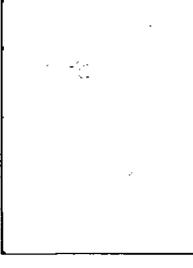
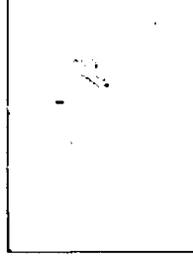
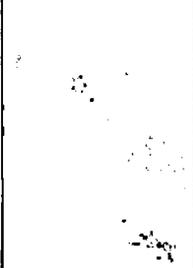
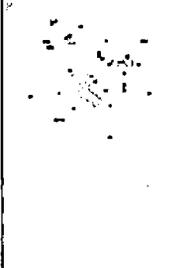
AÑOS	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
2008				
2009				
2010				
2011				
2012				
2013				

Figura 4.10 Resultados NDVI, del apilado y corte aplicando la paleta de colores ENVI

Siendo las 115 escenas MODIS Terra (MOD13Q1) apiladas y cortadas teniendo como mascara al mapa vectorial del distrito de Tambillo para ser clasificados por estaciones del año.

4.4.5 Clasificación de la vegetación según el tipo de suelo

La clasificación de los tipos de cobertura vegetal se tomó como fuente la clasificación de INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales del Perú) conjuntamente con los resultados obtenidos del estudio de la cobertura del suelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) [42], que son las siguientes:

Tabla 4.1 Clasificación de la cobertura vegetal.

Tipo	FAO	INRENA
A	Suelos escasamente vegetados	Comprende la zona de matorrales, retamas.
B	Bosque seco tropical abierto	Bosque seco ralo y de llanura eólica.
C	Puna	Terreno abierto y llano, de clima subglacial y subsuelo helado, falta de vegetación arbórea.
D	Bosque caduco seco estacional tropical	Bosque seco ralo de lomadas y colinas.
E	Montaña degradada de bosques caduco bajo con arbustos caducos	Bosque Seco ralo de superficies disecadas.
F	Suelos agrícolas	Bosque seco semidenso de colinas.
G	Bosque de hoja ancha y perenne	Bosque seco ralo de llanura aluvial.
H	Prado andino con bosque de hoja perenne:	Follaje anual, son porciones de suelo donde se encuentra agricultura o prado.
I	Suelo con vegetación vigorosa	Vigor fotosintético de la vegetación óptima.

4.4.6 Valoración del tipo de vegetación según el NDVI

Los valores de NDVI definidos por la NASA (Goddard Space Flight Centre) y utilizados en el procesamiento la clasificación de la FAO de las imágenes GAC (Global Area Cobertura) y con criterio respecto a la zona en estudio son las siguientes [43]:

Tipo A: Suelo escasamente vegetado [0.0000-0.0799 (rojo)]

Tipo B: Bosque seco tropical abierto [0.080-0.139 (verde)]

Tipo C: Puna [0.140-0.199 (azul)]

Tipo D: Bosque caduco seco estacional tropical [0.200-0.259 (amarillo)],

Tipo E: Montaña degradada [0.260-0.319 (celeste)]

Tipo F: Suelos agrícolas [0.320-0.379 (magenta)]

Tipo G: Bosque de hoja ancha y perenne [0.3800-0.4390 (marrón)]

Tipo H: Prado andino con bosque de hoja perenne: [0.4400-0.5000 (negro)]

Tipo I: Vegetación vigorosa > 0.5

Una vez realizado la clasificación del tipo de vegetación por km² según datos del NDVI, se obtuvieron los valores representativos por pixel de las características de los cuerpos vegetativos, para cada una de las estaciones del año, cuyos resultados son representados en serie temporal según el área de cobertura vegetal a escala de colores en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados y discusiones obtenidas de la evolución temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) cuyo seguimiento de la cobertura vegetal y uso actual del suelo a través del tiempo se observan en las figuras, siguiendo la siguiente estructura. Primeramente se muestra en la figura 5.1 el resultado estadístico de la evolución temporal de la variable dependiente, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) por meses durante el periodo 2008 al 2013. En segundo lugar las figuras 5.2 al 5.5 muestran la estimación en km² de la evolución temporal de los nueve tipos de cobertura vegetal por estaciones del año, según el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). En las figuras 5.6 al 5.14 se muestran la evolución temporal por cada tipo de cobertura vegetal, según la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). Por último con los resultados de las figuras 5.15 y 5.16 donde se muestra la evolución temporal de la precipitación y temperatura del aire con datos obtenidos de la estación meteorológica de Tambillo y resultados de la evolución temporal del NDVI que se muestran en la figura 5.1, se contrasta los resultados que son mostrados en las figuras 5.17 y 5.18.

Evolución temporal del NDVI en el periodo 2008-2013

En la figura 5.1 se muestran los valores del NDVI por meses del año donde se observa una tendencia de crecimiento positivo llegando a un NDVI de valor máximo de 0.48997482 en el mes de junio del 2013. Teniendo en cuenta que se utilizó el promedio del NDVI de dos imágenes por mes. En el resultado se observa que meses donde hay escases de lluvias el NDVI es mínimo y meses después de las lluvias el NDVI es máximo.

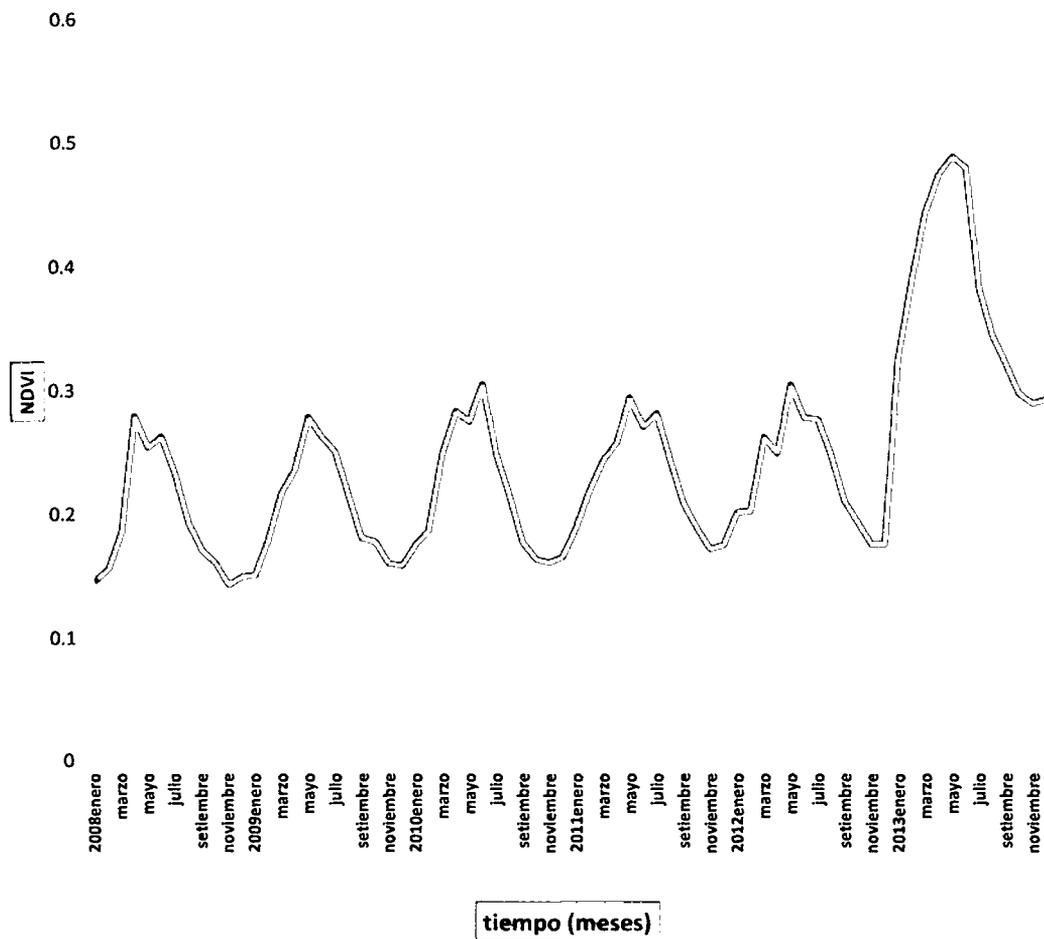


Figura 5.1 Tendencia positiva en la evolución temporal del NDVI 2008-2013.

Evolución temporal del área de cobertura vegetal según el NDVI por estaciones del año.

Verano: En la figura 5.2 se observa que en la estación de verano, (época de lluvias), la cobertura vegetal tipo D: bosque caduco seco según el NDVI 0.200 - 0.259, hubo un área de mayor extensión de 65.17 km² en el 2008, disminuyendo progresivamente el 2013 a 10.96 km². Contrariamente la cobertura vegetal tipo F: suelo agrícola según el NDVI 0.320- 0.379, hubo un área de menor extensión de 15.15 km² en el 2008, incrementándose significativamente el 2012 a 55.63 km², teniendo un ligera disminución el 2013 a 46.73 km². Otros tipos de vegetación también tienen un comportamiento similar.

Esto nos indica que del 2008 al 2013 las áreas donde había escasa vegetación se comenzaron a incrementar significativamente.

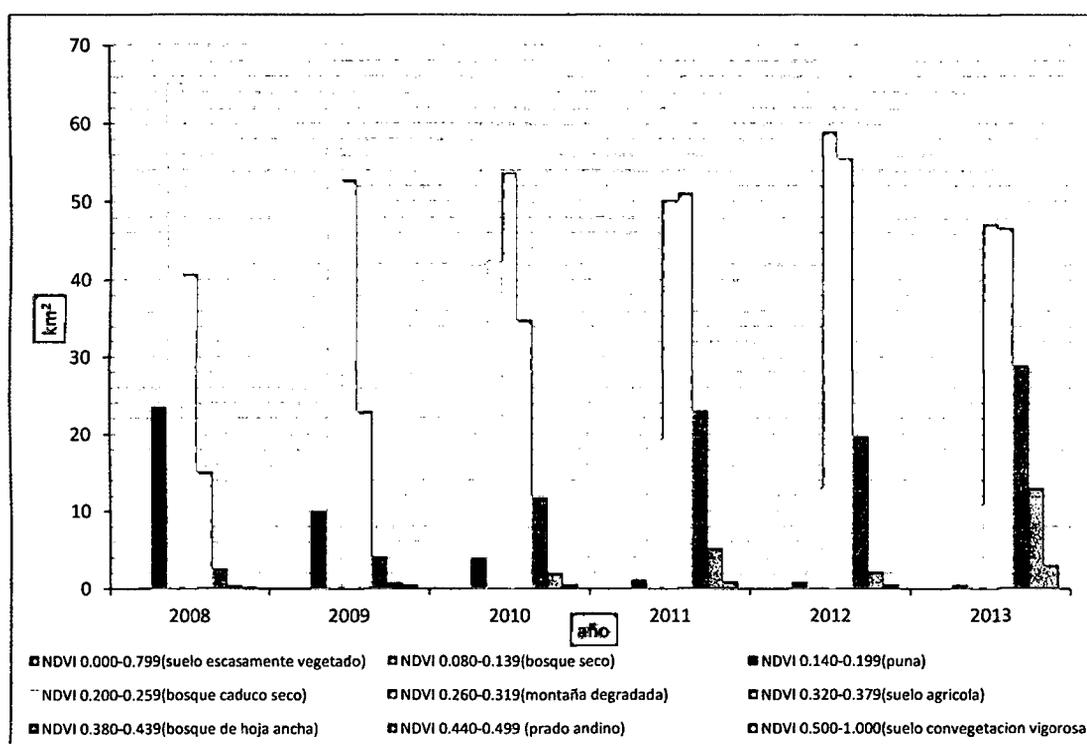


Figura 5.2 Variabilidad del tipo de vegetación en km² según el NDVI, estación de verano.

Otoño: En la figura 5.3 se observa que en la estación de otoño (época de incremento de vegetación), la cobertura vegetal tipo E: montaña degradada de bosque caduco bajo con arbustos caducos seco, según el NDVI 0.260 - 0.319, hubo un área de mayor extensión de 54.59 km² en el 2008, disminuyendo progresivamente el 2013 a 5.84 km². Contrariamente la cobertura vegetal tipo F: suelo agrícola según el NDVI 0.320- 0.379, hubo un área de menor extensión de 28.28 km² en el 2008, incrementándose significativamente el 2013 a 50.62 km². Otros tipos de vegetación también tiene una ligera variabilidad similar.

Esto nos indica que del 2008 al 2013 las áreas donde había un bosque seco ralo de superficies disecadas se incrementaron la vegetación significativamente.

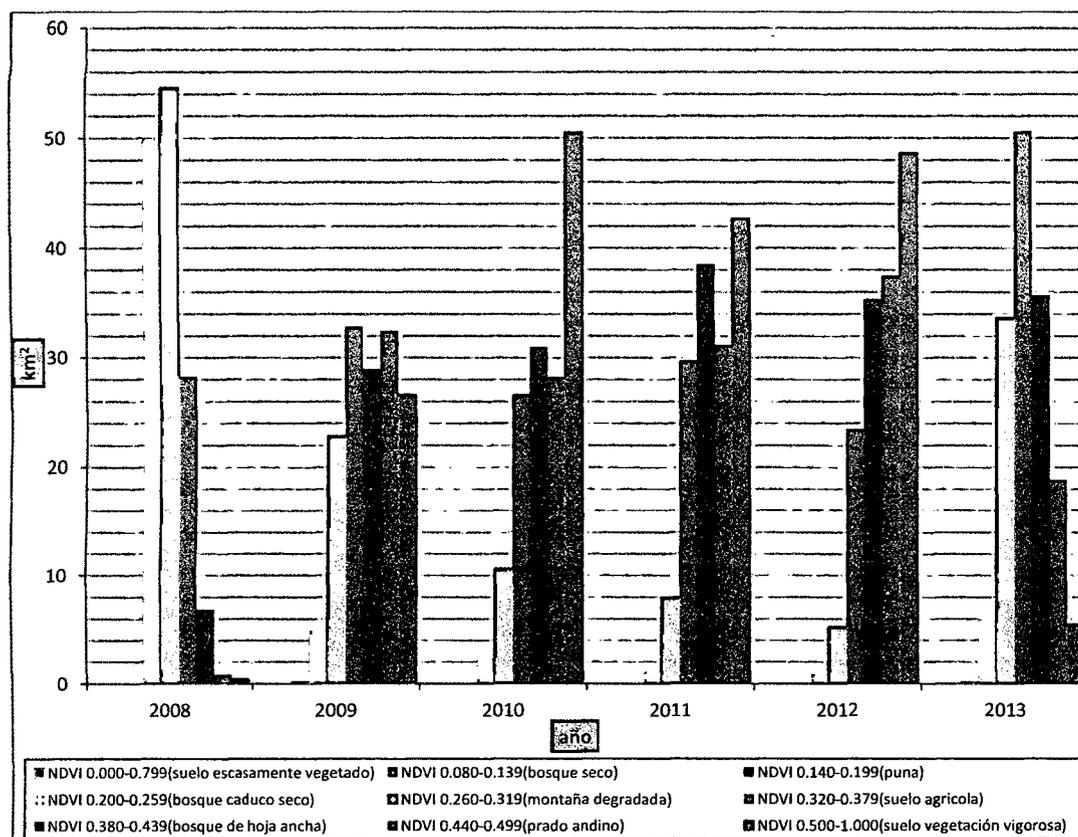


Figura 5.3 Variabilidad por tipos de vegetación en km² según el NDVI, estación otoño.

Invierno: En la figura 5.4 se observa que en la estación de invierno (época de escasas de lluvias), la cobertura vegetal tipo E: montaña degradada de bosque caduco bajo con arbustos caducos seco según el NDVI 0.260 - 0.319, hubo un área de mayor extensión de 32.98 km² en el 2008, disminuyendo progresivamente al 2012 a 6.67 km², observándose un ligero incremento a 28.13 km² el 2013. Contrariamente la cobertura vegetal tipo F: suelo agrícola según el NDVI 0.320- 0.379, hubo un área de extensión menor de 31.46 km² en el 2008, observándose una variabilidad en los años siguientes para luego incrementarse significativamente el 2013 a 52.3 km². Otros tipos de vegetación también tienen una ligera variabilidad similar, como es el tipo H: prado andino con bosque de hoja perenne, según el NDVI 0.440 - 0.499, donde se observa un área de extensión menor de 24.27 km² en el 2008 y una variabilidad en los años siguientes para luego incrementarse significativamente el 2011 a un máximo de 47.51 km², teniendo un descenso al 2013 de 20.74 km².

Esto nos indica que del 2008 al 2013 las áreas de vegetación tuvieron una variabilidad en esta estación del año pero manteniendo a incrementar la vegetación de suelo agrícola y bosque de hoja ancha y perenne a las riveras del río niño Yucaes.

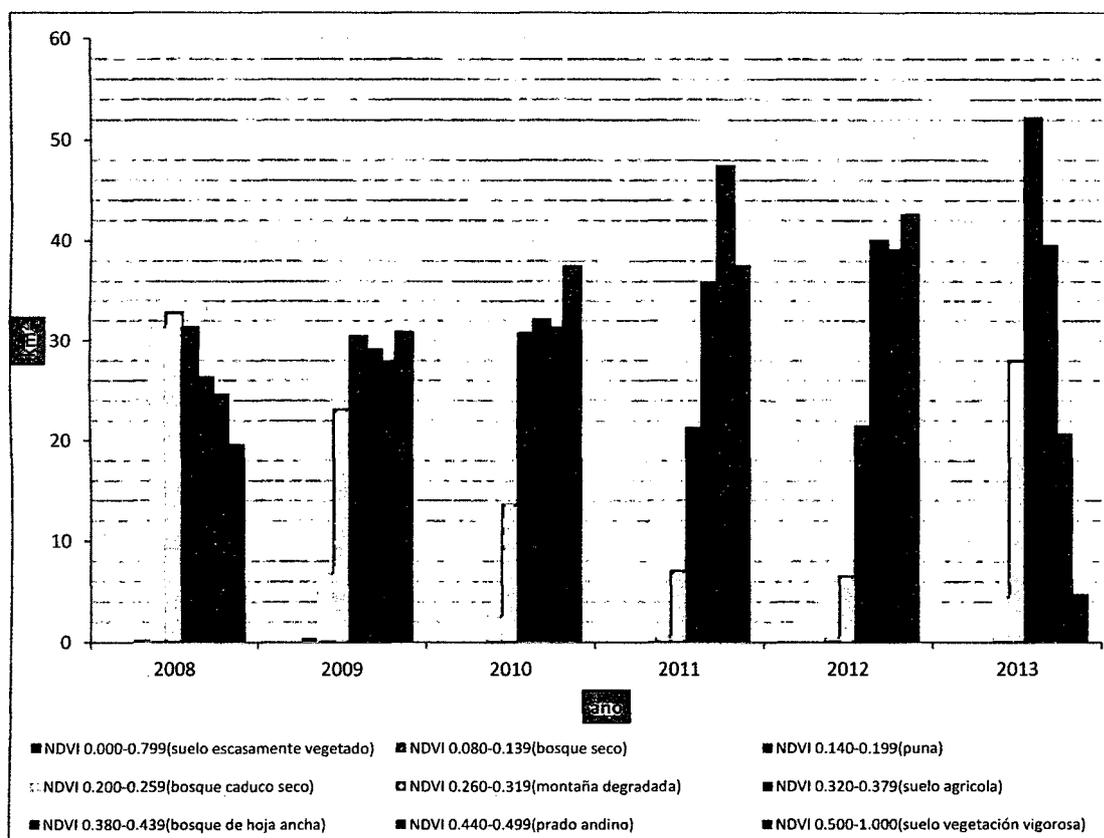


Figura 5.4 Variabilidad por tipos de vegetación en km² según el NDVI, estación invierno.

Primavera: En la figura 5.5 se observa que en la estación de primavera (época de escasas de lluvia), la cobertura vegetal tipo D: bosque caduco seco estacional tropical según el NDVI 0.200 - 0.259, hubo un área de mayor extensión de 60.76 km² en el 2008, disminuyendo progresivamente al 2013 a 8.98 km². Contrariamente la cobertura vegetal tipo F: suelo agrícola según el NDVI 0.320- 0.379, hubo un área de extensión menor de 24.98 km² en el 2008, incrementarse significativamente el 2013 a 50.97 km². Otros tipos de vegetación también tienen una ligera variabilidad similar, como es el tipo E: montaña degradada de bosques caduco bajo con arbustos caducos, según el NDVI 0.260 - 0.319, donde se observa un área de extensión mediana de 40.78 km² en el 2008 y una variabilidad en los años siguientes para luego incrementarse significativamente el 2012 a un máximo de 58.92 km², teniendo un descenso al 2013 de 47.19 km².

Esto nos indica que del 2008 al 2013 las áreas de vegetación varían en esta estación del año porque en dicha zona de estudio empiezan la época de cosecha pero manteniéndose un incrementar ligero la vegetación de suelo agrícola y bosque de hoja ancha y perenne a las riveras del río niño Yucaes.

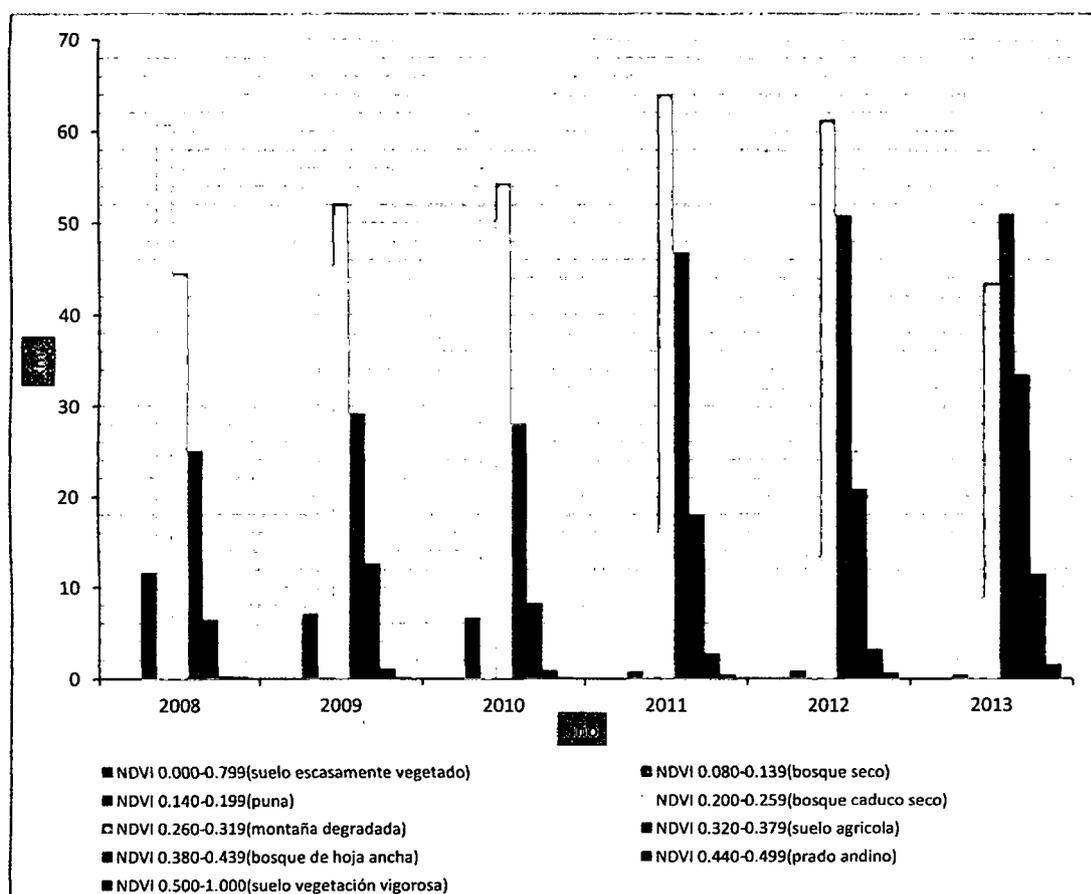


Figura 5.5 Variabilidad por tipo de vegetación en km² según el NDVI, estación primavera.

Evolución temporal del tipo de cobertura vegetal por km²

Vegetación tipo A (NDVI 0.000-0.799)

La figura 5.6 muestra la información estadística donde no se aprecia área de cobertura vegetal alguna para esta cobertura vegetal, según los resultados del NDVI de los datos de las imágenes satelitales 2008-2013.

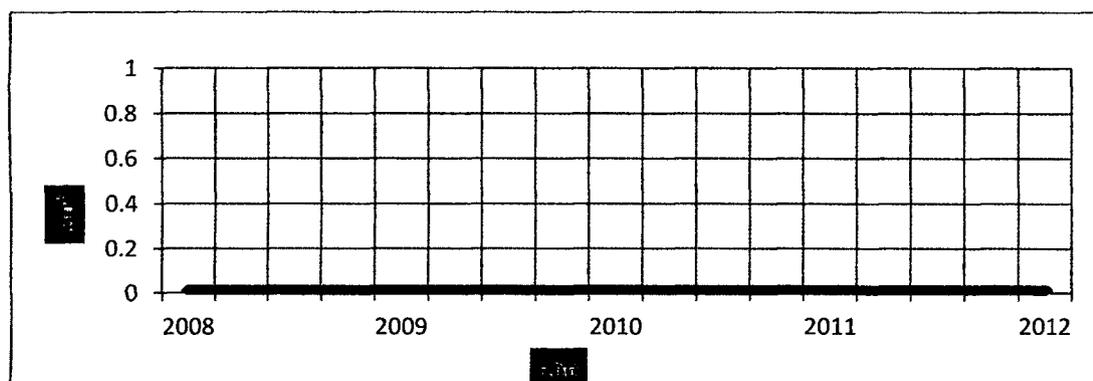


Figura 5.6 Variabilidad del área de vegetación tipo A según el NDVI.

Vegetación tipo B (NDVI 0.080-0.139)

La figura 5.7 muestra la información estadística sobre el caso de la cobertura vegetal por estación del año, donde la mayor área de extensión se dio el año 2008, decayendo a mediados de otoño, para luego del 2009 al 2013 no hubo extensión alguna.

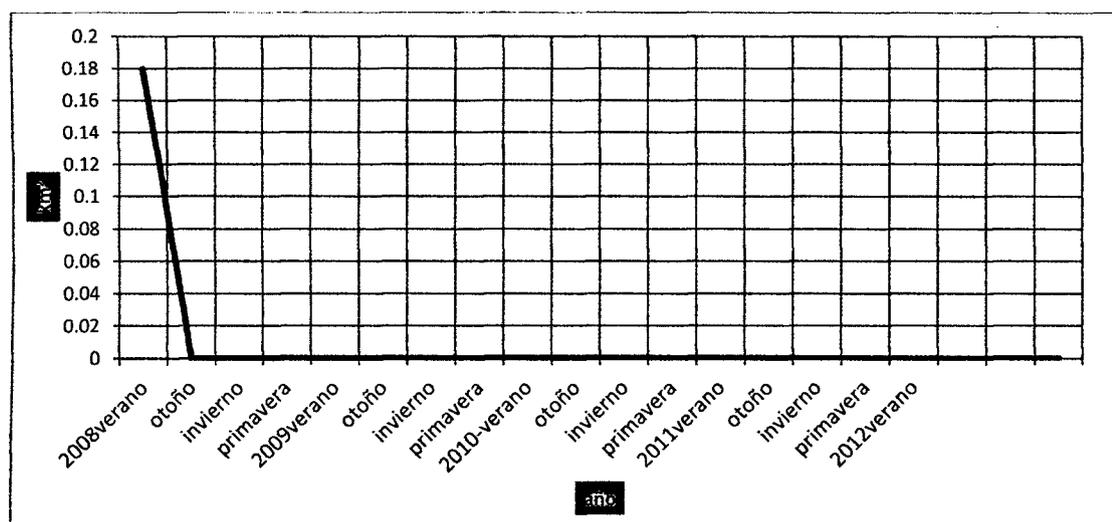


Figura 5.7 Variabilidad del área de vegetación tipo B según el NDVI.

Vegetación tipo C (NDVI 0.140-0.199)

La figura 5.8 muestra la información estadística sobre el área con mayor extensión de cobertura de vegetación, fue en la estación de verano 2008 de 23 km² y decayendo progresivamente hasta la estación de invierno del 2013 a 0.1 km². Esto nos indica que en las partes más altas del distrito la vegetación por estaciones del año disminuyó progresivamente.

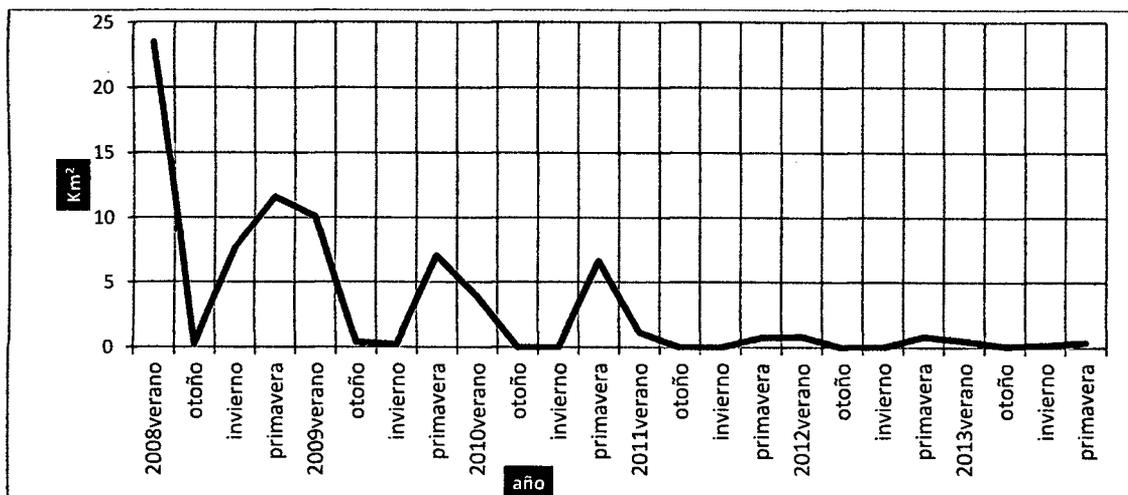


Figura 5.8 Variabilidad del área de vegetación tipo C según el NDVI.

Vegetación tipo D (NDVI 0.200-0.259)

La figura 5.9 muestra la información estadística sobre la cobertura del área con mayor extensión de cobertura de vegetación, fue en la estación de verano del 2008 con 67.17 km² y decayendo progresivamente hasta el invierno del 2013 a 4.57 km².

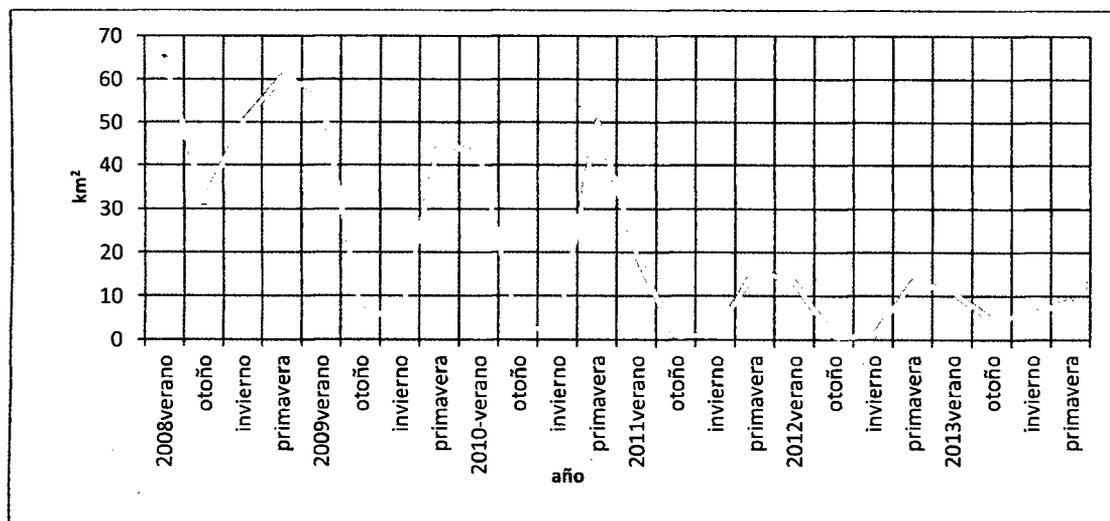


Figura 5.9 Variabilidad del área de vegetación tipo D según el NDVI.

Vegetación tipo E (NDVI 0.260-0.319)

La figura 5.10 muestra la información estadística sobre el área con mayor extensión de cobertura de vegetación tipo E, fue en la estación de primavera del 2011 con 63.95 km² y el pico más bajo fue en la estación de otoño del 2012 con 5.27 km². Observándose una ligera disminución a partir de la estación de primavera del 2011 hasta estación de otoño del 2012.

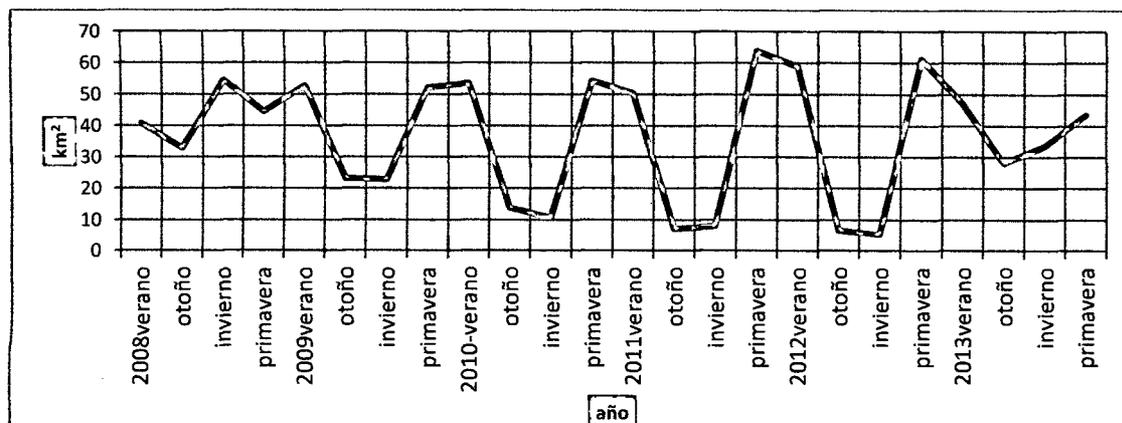


Figura 5.10 Variabilidad del área de vegetación tipo E en km² según el NDVI.

Vegetación tipo F (NDVI 0.320-0.379)

La figura 5.11 muestra la información estadística sobre el área con extensión menor de cobertura de vegetación tipo F, fue en la estación de verano del 2008 con 15.15 km² y el pico más alto fue en la estación de verano del 2012 con 55.63 km². En este caso se nota un marcado aumento de vegetación a partir de la estación de verano del 2008 y verano del 2012, observándose una tendencia positiva y manteniéndose casi constante todo el año 2013 con un área de extensión promedio de 50 km².

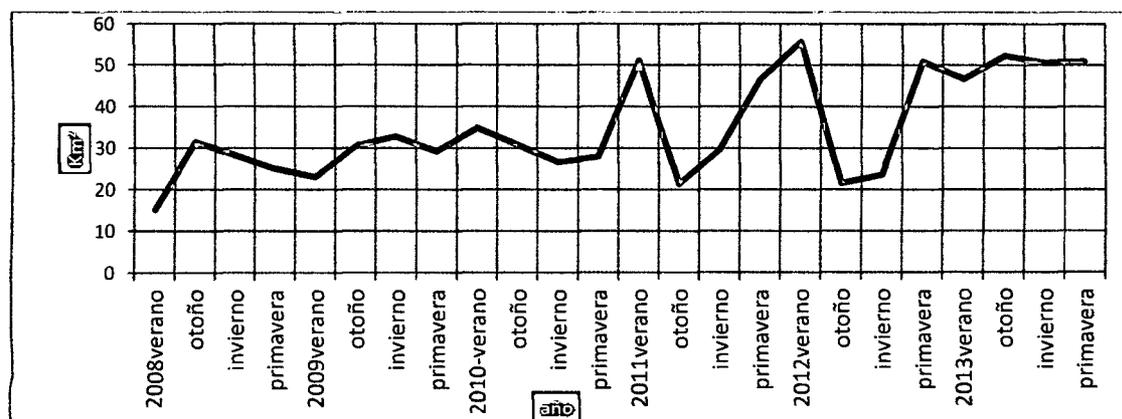


Figura 5.11 Variabilidad de vegetación tipo F en km² según el NDVI.

Vegetación tipo G (NDVI 0.380-0.439)

La figura 5.12 muestra la información estadística sobre el área con menor extensión de cobertura de vegetación tipo G, fue en la estación de verano del 2008 con 2.65 km² y el pico más alto fue en la estación de otoño del 2012 con 40.16 km². En este caso se nota un marcado aumento en la extensión a partir de la estación de verano del 2008 a otoño e invierno del 2013, con lo cual se puede afirmar un incremento de bosques de hoja ancha y perene.

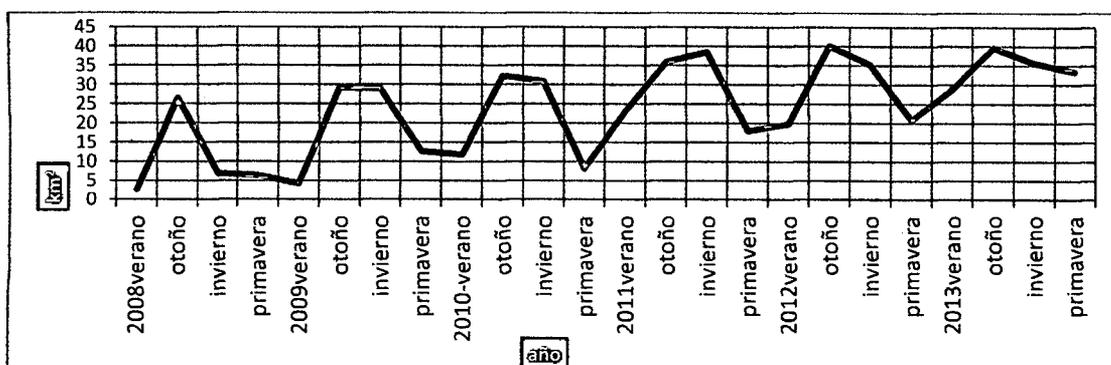


Figura 5.12 Variabilidad del área de vegetación en km² según el NDVI.

Vegetación tipo H (NDVI 0.440-0.499)

La figura 5.13 se observa la información estadística sobre la evolución del área con menor extensión de cobertura vegetal tipo H, donde se encuentra agricultura o prado andino, fue en la estación de primavera del 2008 con 0.28 km² y el pico más alto fue en la estación de otoño del 2011 con 47.51 km². Ello muestra un marcado aumento en la extensión a partir de primavera del 2008 e invierno del 2012, pero una ligera disminución en el 2013 donde en otoño e invierno solo llegó a una extensión promedio de 20 km² de área de vegetación.

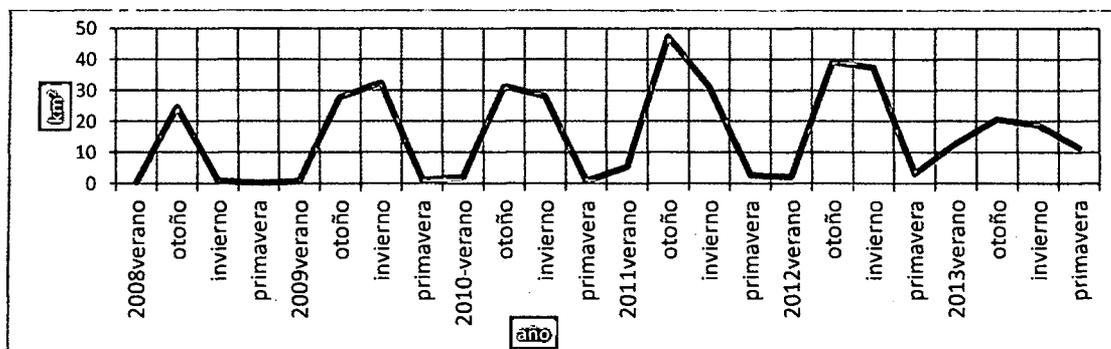


Figura 5.13 Variabilidad de vegetación tipo H en km² según el NDVI.

Vegetación tipo I (NDVI 0.500-0.1.00)

La figura 5.14 muestra la información estadística sobre el área con menor extensión de cobertura de vegetación tipo I, fue en la estación de otoño del 2010 (0.14 km²) y con mayor extensión, fue en primavera del 2010 (50.51 km²). Se observa un marcado aumento en la extensión a partir del 2008 hasta el año del 2012 con un decaimiento el 2013, según la línea de tendencia es ligeramente positiva.

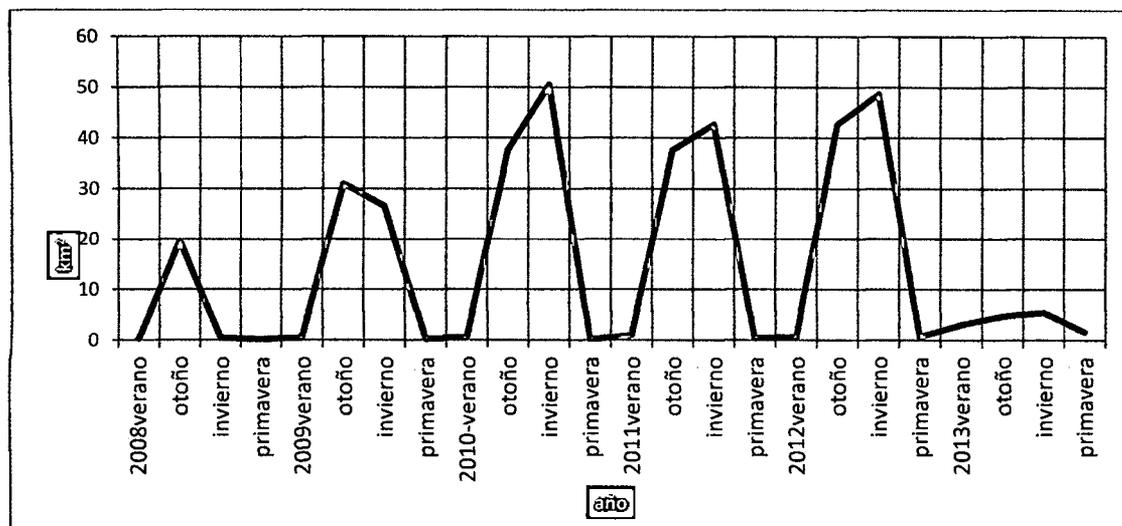


Figura 5.14. Variabilidad de vegetación tipo I en km² según el NDVI.

Contrastación de los resultados con datos de estación meteorológica de Tambillo

Los cambios producidos diariamente, en las temperaturas del aire y precipitación pueden beneficiar o perjudicar algunos tipos de cultivos según el uso de suelo. Los cambios en la temperatura pueden afectar positiva o negativamente la producción (aumentar o disminuir el rendimiento de las parcelas) y eventualmente, posibilitar la aparición de plagas, enfermedades y, en algunos casos, pérdida de cosechas.

Con la finalidad de tener un mejor conocimiento de las variaciones térmicas anuales, fue necesario contar con mayor información de la temperatura y precipitación de la estación meteorológica del distrito de Tambillo.

Serie temporal de la precipitación y temperatura del aire con datos registrados en la estación meteorológica de Tambillo.

En la figura 5.15 muestra la información estadística en series de tiempo sobre las precipitaciones máximas registradas por la estación meteorológica de Tambillo.

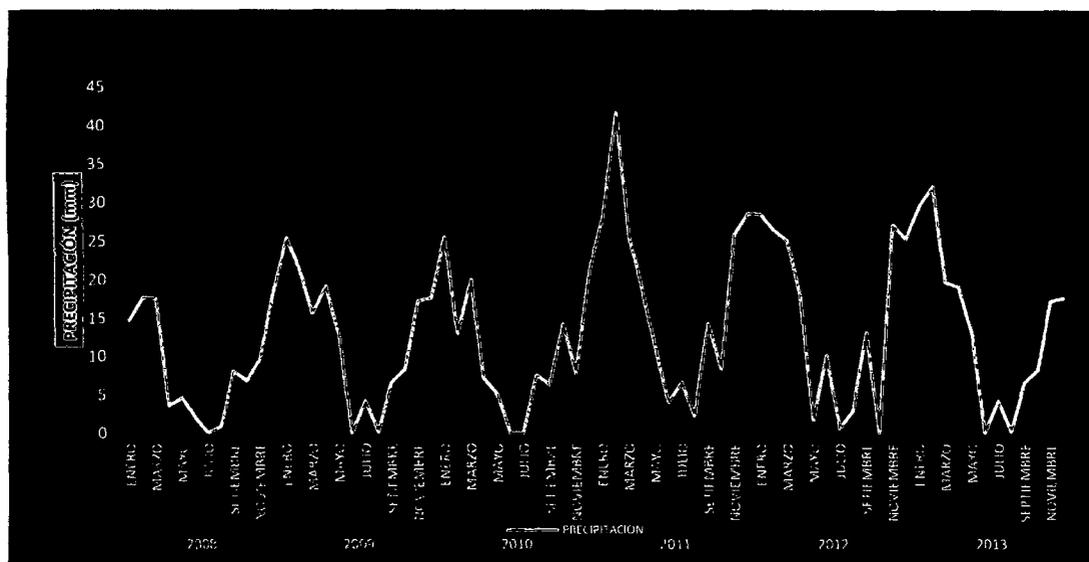


Figura 5.15 Precipitación máxima: Fuente estación meteorológica de Tambillo.

La figura 5.16 muestra la información estadística sobre las temperaturas máximas y mínimas registradas por la estación meteorológica del distrito de Tambillo.

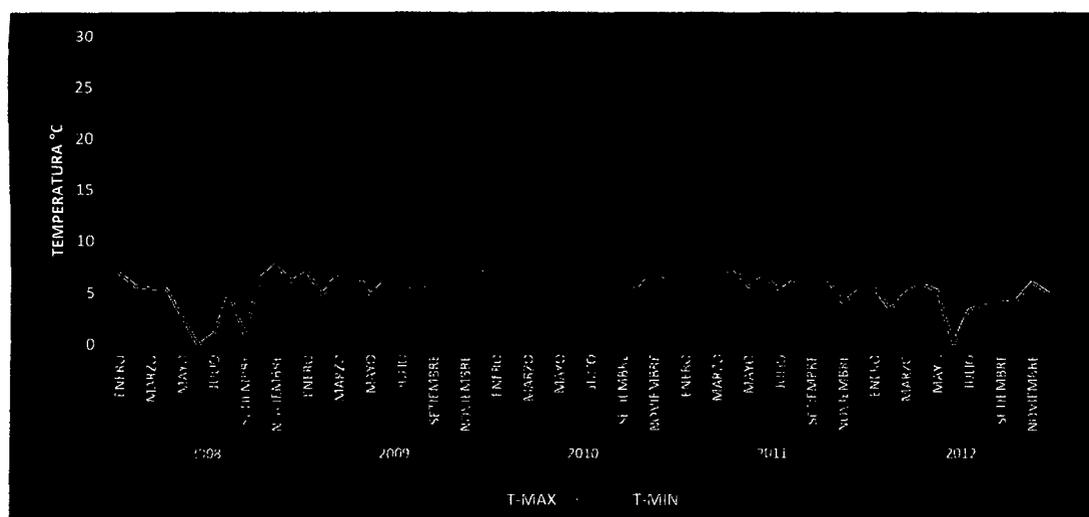


Figura 5.16 Temperatura máxima y mínima. Fuente: Estación meteorológica Tambillo.

Contrastación de datos precipitación del aire y datos de imágenes satelitales NDVI

La figura 5.17 muestra la relación estadística en series de tiempo sobre las precipitaciones máximas y el NDVI, como resultado se observa que al tener una máxima precipitación promedio entre diciembre, enero y febrero (intensas lluvias), en el mes de marzo abril y mayo observamos una máxima cobertura vegetal.

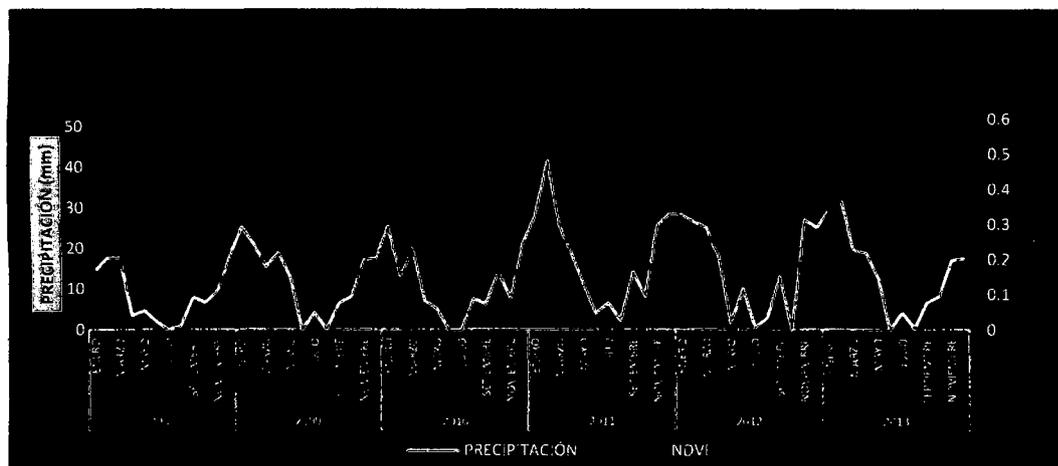


Figura 5.17 Relación entre precipitación – NDVI. Fuente: Estación Tambillo (precipitación) y datos satelitales (NDVI).

Contrastación de datos temperatura del aire y datos de imágenes satelitales NDVI

La figura 5.18 muestra la relación estadística en series de tiempo sobre la temperatura máximas y el NDVI. Observamos que al tener una máxima temperatura en promedio entre los meses de agosto, setiembre, octubre y noviembre, se tiene un mínimo de NDVI en estos mismos meses. La consecuencia del aumento de la temperatura del aire hace que disminuya la cobertura vegetal.

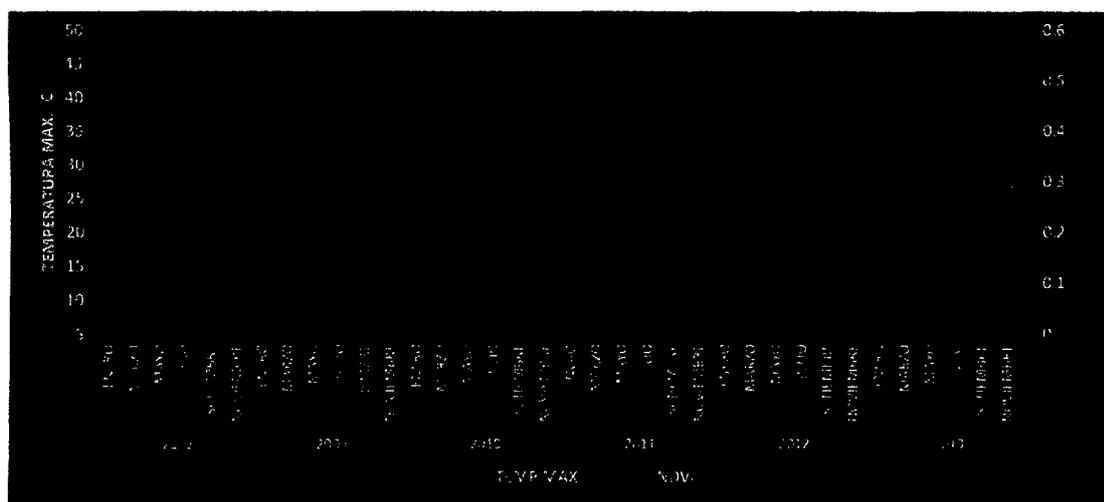


Figura 5.18 Relación entre temperatura –NDVI. Fuente: estación Tambillo (temperatura) y datos satelitales (NDVI).

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

6.1 CONCLUSIONES

1. Se describió el comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), por estación anual a partir de la cobertura vegetal en km² y los tipos de cobertura vegetal de suelos en series de tiempo, los cuales muestran tendencia positiva del suelo agrícola y un decaimiento en el tipo de vegetación de bosque caduco seco, debido al incremento de áreas de suelo agrícola.
2. Se estimó y contrastó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), a partir de los datos de precipitación y temperatura del aire de la estación meteorológica de Tambillo, en el periodo 2008-2013, donde se muestra un efecto tardío del NDVI con respecto a la precipitación, además de una escasa vegetación cuando la temperatura es alta.
3. Se determinó la evolución del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en series de tiempo, durante el periodo 2008 al 2013 con información generada por las imágenes satelitales MODIS-Terra del distrito de Tambillo, mostrando un leve incremento en los últimos dos años, tal como se muestra en la figura 5.1, logrando así el objetivo general planteado.
4. Las causas directas e indirectas de la mejora del comportamiento fenológico de la vegetación en el distrito de Tambillo se deben a las actividades propuestas en el plan anual de manejo de áreas de cultivo por las entidades pertenecientes al Gobierno Regional de Ayacucho (irrigación por aguas del proyecto especial río Cachi), gracias a ello se presentó un aumento en el número de individuos vegetales, lo que causó una disminución en las zonas de suelo desnudo, lo cual es satisfactorio debido a que indica la mejora de la calidad de vida de la biota, negando de ésta manera la hipótesis general planteada.

6.2 SUGERENCIAS

1. En la técnica teledetección utilizada, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), es simple y cuenta con el mejor rango dinámico que cualquiera de los índices y tiene la mejor sensibilidad a los cambios en la cubierta vegetal. Es moderadamente sensible a un segundo plano de suelo y a la atmósfera, excepto en la baja cubierta o densidad vegetal, por lo que se recomienda trabajar para mejoras del estudio con el producto del Índice de Vegetación Mejorado (EVI).
2. Dar mayor énfasis en el estudio de las magnitudes físicas involucradas en la transmisión de la señal, a través de las ondas electromagnéticas utilizadas en teledetección, por ser muy importante para analizar la ecuación de transferencia radiativa.
3. Contar con un banco de datos de firmas espectrales de especies vegetales de nuestra región mediante el uso de equipos de medición como es el espectroradiómetro de campo y sistemas de posicionamiento global, para una mejor clasificación del uso de suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SEEVERS. P.M.; OTTMANN. R.W. (1994). Evapotranspiration estimation using a normalized difference vegetation index transformation of satellite data. ice, Boulder City, Nevada 89005, USA.
- [2] GONZÁLEZ. F.; DAUDEN. M. y UREÑA. J.M. (1986). Clasificación de imágenes a partir de índices de vegetación. Universidad Pública de Navarra Francia.
- [3] JACKSON. RAY D. y HUETE. ALFREDO R. (1991). Interpreting vegetation indices. Department of Soil and Water Science, University of Arizona, Tucson, USA.
- [4] QI, J., CHEHBOUNI A., HUETE, A. R., KERR, Y. H. y SOROOSHIAN. S. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index.. Remote Sens. Environ. 48:119-126 Arizona, USA.
- [5] LAMMINI, A.; CASNOVA, J.L. y RODRÍGUEZ, M.P. (1997). Estudio de la evolución de diversas áreas mediante imágenes NOAA-AVRR. Teledetección usos y aplicaciones 53-57. Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid.
- [6] DELGADO, J.A.; ILLERA, P.; GONZÁLEZ F. y TERRAB, R. (1997). Utilización de imágenes NOAA para la estimación de rendimientos de cosechas en Castilla y León. Teledetección usos y aplicaciones 31-38. Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid.
- [7] PUREVDORJ. TS.; TATEISHI. R.; ISHIYAMA. T.; HONDA. Y. (1998). Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. International Journal of Remote Sensing, Mongolia and Japan.
- [8] SCHMIDT. H.; KARMIELI. A. (2001). Sensitivity of vegetation indices to substrate brightness in hyperarid environment: the Makhtesh Ramon Crater, case study. int. j. remote sensing, vol.22. Israel.

[9] AL-BAKRIO. J.T. y SULEIMAN. A.S. (2004). NDVI response to rainfall in different ecological zones in Jordán.

[10] VERCHER. A., GILABERT. M. A., CAMACHO DE COCA. F. y MELIÁ. J. (2005). Influencia del ángulo cenital de iluminación en los índices de vegetación. Revista AET :Barrax,Albacete. México.

[11] JAVZANDULAN. T.; TATEISHI. R. y SANJAA. T. (2005). Analysis of vegetation indices for monitoring vegetation degradation in semi-arid and arid areas of Mongolia.

[12] BISQUERT. M., SÁNCHEZ. J. M., CASELLES. V., PAZ ANDRADE. M. I. y LEGIDO. J. L. (2009). Los índices de vegetación como indicadores del riesgo de incendio con imágenes del sensor TERRA-MODIS. Revista AET. España.

[13] BRIAN D., WARDLOW y STEPHEN. L., EGBERT. A. (2009). Comparison of MODIS 250-m EVI and NDVI data for crop mapping: a case study for southwest Kansas.

[14] CARBACHO BART, L. y SANCHEZ MARTINEZ, M. (2010). Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del libertador Bernardo O'Higgins.

[15] FUMING WANG; JINGFENG HUANG y LA CHEN. (2010). Development of a vegetation index for estimation of leaf area index based on simulation modeling. Universidad Pública de Navarra: Francia.

[16] SANCHA NAVARRO, E.F. (2010). El estudio de los índices de vegetación como base para conocer las relaciones entre la vegetación y el clima. Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 1.095-1.108. ISBN: 978-84-472-1294-1: España.

[17] DELGADO. J.A.; ILLERA. P. y RODRIGUEZ. P. (1991). Clasificación de imágenes a partir de índices de vegetación. Aplicación en una zona piloto de la Comunidad Autónoma de Cantabria.

[18] MATTAR C., SOBRINO J. A., WIGNERON. J. P., JIMÉNEZ-MUÑOZ J. C y KERR. Y. (2011). Estimación de la humedad del suelo a partir de índices de vegetación y microondas pasivas: España.

[19] ISLA. R. y LÓPEZ-LOZANO. R. (2013). Comparación de distintos índices de vegetación para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz. Andalucía España.

[20] MONCADA, W. JIMÉNEZ, J. PEREDA, ALEX. Y MASIAS, M. (2009). Variaciones en el comportamiento de la dinámica del suelo en áreas cercanas al Gaseoducto Camisea, 2000 al 2008. Informe Final de Investigación 2014, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.

[21] MONCADA, W. MASÍAS, M. ALDANA, C. PAIVA, D. (2011). Mapeo de nubosidades en la región Ayacucho mediante sistema satelital, 2000 al 2010. Informe Final de Investigación 2014, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.

[22] SOLANO. R y ROJAS. A. (2013). Evaluación de la vegetación y del estado de suelos de la Región Ayacucho mediante datos satelitales, periodo 2000 – 2012”, informe final de investigación 2013, dirigido por la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho. Financiamiento: Fondo de Desarrollo Socioeconómico del Proyecto Camisea (FOCAM).

[23] MONCADA W. JIMENEZ J. PEREDA A. ALDANA C. (2014). Cuantificación hidrográfica de la cuenca del Rio Cachi Ayacucho, mediante imágenes satelitales. Informe Final de Investigación 2014, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.

[24] TARPLEY, J. D., SCHNEIDER, S. R. & MONEY, R. L. (1984). Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite. J. Clim. Appl. Meteorol. 23: 491-494.

[25] RUNNING, S.W. (1989). Estimating Terrestrial Primary Productivity by Combining Remote Sensing and Ecosystem Simulation. In Hobbs, R.J. and Mooney, H.A. (eds). Remote Sensing of Biosphere Functioning. Ecological Studies 79. Springer-Verlag, Berlin.

[26] CAMPBELL, J. B. (1996). Introduction to Remote Sensing. 2da Edición New York: The Guilford Press.

ANEXOS

ANEXO 01

CÓDIGOS DE DESCARGA DE LAS 115 IMÁGENES SATELITALES MODIS-TERRA (MOD13Q1)

2008	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2009177.h10v10.005	2011017.h10v10.005	2012209.h10v10.005
2008001.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2009193.h10v10.005	2011033.h10v10.005	2012225.h10v10.005
2008017.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	200209.h10v10.005	2011049.h10v10.005	2012241.h10v10.005
2008033.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2009225.h10v10.005	2011065.h10v10.005	2012257.h10v10.005
2008049.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2009241.h10v10.005	2011081.h10v10.005	2012273.h10v10.005
2008065.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2009257.h10v10.005	2011097.h10v10.005	2012289.h10v10.005
2008081.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2009273.h10v10.005	2011113.h10v10.005	2012305.h10v10.005
2008097.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2009289.h10v10.005	2011129.h10v10.005	2012321.h10v10.005
2008113.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2009305.h10v10.005	2011145.h10v10.005	2012337.h10v10.005
2008129.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2009321.h10v10.005	2011161.h10v10.005	2012353.h10v10.005
2008145.h10v10.005	2010	MOD13Q1.A	2013
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011177.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008161.h10v10.005	2010001.h10v10.005	MOD13Q1.A	2013001.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011193.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008177.h10v10.005	2010017.h10v10.005	MOD13Q1.A	2013017.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011209.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008193.h10v10.005	2010033.h10v10.005	MOD13Q1.A	2013033.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011225.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008209.h10v10.005	2010049.h10v10.005	MOD13Q1.A	2013049.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011241.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008225.h10v10.005	2010065.h10v10.005	MOD13Q1.A	2013065.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011257.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008241.h10v10.005	2010081.h10v10.005	MOD13Q1.A	2013081.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011273.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008257.h10v10.005	2010097.h10v10.005	MOD13Q1.A	2013097.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011289.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008273.h10v10.005	2010113.h10v10.005	MOD13Q1.A	2013113.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011305.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008289.h10v10.005	2010129.h10v10.005	MOD13Q1.A	2013129.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011321.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008305.h10v10.005	2010145.h10v10.005	MOD13Q1.A	2013145.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011337.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008321.h10v10.005	2010161.h10v10.005	MOD13Q1.A	2013161.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2011353.h10v10.005	MOD13Q1.A
2008337.h10v10.005	2010177.h10v10.005	2012	2013177.h10v10.005
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
2008353.h10v10.005	2010193.h10v10.005	2012001.h10v10.005	2013193.h10v10.005
2009	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2010209.h10v10.005	2012017.h10v10.005	2013209.h10v10.005
2009001.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2010225.h10v10.005	2012033.h10v10.005	2013225.h10v10.005
2009017.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2010241.h10v10.005	2012049.h10v10.005	2013241.h10v10.005
2009033.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2010257.h10v10.005	2012065.h10v10.005	2013257.h10v10.005
2009049.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2010273.h10v10.005	2012081.h10v10.005	2013273.h10v10.005
2009065.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2010289.h10v10.005	2012097.h10v10.005	2013289.h10v10.005
2009081.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2010305.h10v10.005	2012113.h10v10.005	2013305.h10v10.005
2009097.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2010321.h10v10.005	2012129.h10v10.005	2013321.h10v10.005
2009113.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A
MOD13Q1.A	2010337.h10v10.005	2012145.h10v10.005	2013337.h10v10.005
2009129.h10v10.005	MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	
MOD13Q1.A	2010353.h10v10.005	2012161.h10v10.005	
2009145.h10v10.005	2011	MOD13Q1.A	
MOD13Q1.A	MOD13Q1.A	2012177.h10v10.005	
2009161.h10v10.005	2011001.h10v10.005	MOD13Q1.A	
		2012193.h10v10.005	

ANEXO 02

CÓDIGOS IDL UTILIZADO EN EL PROCESAMIENTO DE LAS 115 IMÁGENES SATELITALES MODIS-TERRA (MOD13Q1)

PRO APILADO_TIF

```
; propósito: apilar las 115 imágenes, que se cortaron en MRTWEB, en
formato .tif
files = FINDFILE ('D:\NDVI_MODIS_250\imagenes_modis_2013\*.tif',
count=count)
; direccionar a la carpeta donde están los archivos cortados
fid =lonarr(count); la función lonarr devuelve un array de números
long de puros ceros
pos = lonarr(count)
dims = lonarr(5,count)
out_bname=strarr(count)
ssl=strarr(count)
n=23
for i=0,count-1 DO BEGIN
ssl[i]=STRMID(STRMID(files(i),-1,STRPOS(STRMID(files(i),1),'.tif')),n)
endfor
;print, ssl
FOR i=0, count-1 DO BEGIN
envi_open_data_file, files (i), r_fid=layer_fid
ENVI_FILE_QUERY, layer_fid, NS = ns, NL = nl, NB = nb, sname=sname
;sname es el nombre completo de la imagen
fid[i] = layer_fid ;tenemos un conjunto de identificadores
pos[i] = 0 ; el valor cero indica que es solo una banda
dims[0,i] = [-1,0,ns-1,0,nl-1]
Endfor
out_name = 'D:\NDVI_MODIS_250\imagenes_modis_2013\API'+ 'APILADO.tif'
; inicialmente estaba asi: 'E:\Imagenes del SPOT\algo'+ 'APILADO.tif' ;
para lals imágenes .tif
out_dt = 2 ; Tipo de salida = doble precisión de punto flotante
out_proj = envi_get_projection(fid=layer_fid, pixel_size=out_ps);

envi_doit, 'envi_layer_stacking_doit', fid=fid, pos=pos, dims=dims, $
out_dt=out_dt, out_name=out_name, $
out_bname = ssl, $
interp=0, out_ps=out_ps, $
out_proj=out_proj, r_fid=r_fid
END
```

PRO CORTE_TIF

```
; propósito: cortar las 115 imágenes con el vector Tambillo.
RawFiles =
FILE_Search('D:\NDVI_MODIS_250\imagenes_modis_2013\2013APILADO.tif');
FileCount = N_ELEMENTS(RawFiles)
IF FileCount EQ 0 THEN RETURN
FOR NX =0,FileCount -1 DO BEGIN
  FileName = RawFiles[NX]
  envi_open_file, FileName , r_fid=fid
  if (fid eq -1) then begin
  envi_batch_exit
  return
  endif
  PRINT, 'fid=',fid
  ENVI_FILE_QUERY,fid,DIMS=dims,NS=ns,NL=nl,NB=nb, B NAMES= B NAMES
  t_fid=LONARR(nb)+fid
  pos=LINDGEN(nb)
  indexstr = strpos(FileName, '.tif')
  out_name = strmid(FileName,0,indexstr) + '_CUT.tif'
  evf_file = 'D:\NDVI_MODIS_250\NDVI\TTBLL. evf'
  evf_id=ENVI_EVF_OPEN(evf_file)
  ENVI_EVF_INFO, evf_id, num_recs=num_recs,data_type=data_type,
  projection=projection, layer_name=layer_name
  roi_ids = LONARR(num_recs)
  FOR i=0,num_recs-1 DO BEGIN
    record = ENVI_EVF_READ_RECORD(evf_id, i)
    ENVI_CONVERT_FILE_COORDINATES,fid,xmap,ymap,record[0,*],record[1,*]
    roi_id = ENVI_CREATE_ROI(color=1,ns = ns , nl = nl)
    ENVI_DEFINE_ROI, roi_id, /polygon, xpts=REFORM(xMap),
    ypts=REFORM(yMap)
    roi_ids[i] = roi_id

  IF i EQ 0 THEN BEGIN
    xmin = ROUND(MIN(xMap,max = xMax))
    ymin = ROUND(MIN(yMap,max = yMax))
  ENDIF ELSE BEGIN
    xmin = xMin < ROUND(MIN(xMap))
    xmax = xMax > ROUND(MAX(xMap))
    ymin = yMin < ROUND(MIN(yMap))
    ymax = yMax > ROUND(MAX(yMap))
  ENDELSE
  ENDFOR
  xMin = xMin >0
  xmax = xmax < ns-1
  yMin = yMin >0
  yMin=yMin-3
  ymax = ymax < nl-1
  ymax=ymax+5;

  ENVI_MASK_DOIT,AND_OR =1,/IN_MEMORY,ROI_IDS= roi_ids,ns = ns, nl =
  nl,/inside,r_fid = m_fid
  out_dims = [-1,xMin,xMax,yMin,yMax]
  ENVI_MASK_APPLY_DOIT, FID = fid, POS = INDGEN(nb), DIMS =
  out_dims,M_FID = m_fid, M_POS = [0], VALUE = 0,out_name = out_name,
  R_FID = r_fid
  ENVI_FILE_MNG, id =m_fid,/remove
  ENDFOR
ENVI_BATCH_EXIT
END
```