

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
FACULTAD DE ZOOTECNIA
DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL**



**“USO DE INDICES DE VEGETACION DEL SENSOR MODIS –
TERRA EN LA ESTIMACION DE BIOMASA AEREA DE
PAJONALES ALTOANDINOS”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE INGENIERO
ZOOTECNISTA**

**Presentado por:
MIGUEL ENRIQUE PAREDES CHOCCE**

Lima - Perú

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE ZOOTECNIA

**“USO DE INDICES DE VEGETACION DEL SENSOR MODIS –
TERRA EN LA ESTIMACION DE BIOMASA AEREA DE
PAJONALES ALTOANDINOS”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
INGENIERO ZOOTECNISTA**

Presentada por:

MIGUEL ENRIQUE PAREDES CHOCCE

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ph.D. Enrique Flores Mariazza
PRESIDENTE

Ph.D. Javier Ñaupari Vásquez
PATROCINADOR

Ph.D. Lucrecia Aguirre Terrazas
MIEMBRO

Ing. Mg.Sc Jorge Gamarra Bojorquez
MIEMBRO

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado con todo mi esfuerzo y cariño a la persona que ha sabido guiarme y apoyarme con suma paciencia durante toda mi vida; mi madre Mary

A mi familia y amigos por el infaltable consejo en aquellos momentos donde falta el aliento y las convicciones empiezan tambalearse

A las personas del campo que conocí durante mis viajes y en quienes con sus preguntas e interés en el tema pude ver lo importante que son proyectos como este, que si bien hoy no generaran un impacto directo en su realidad ,sin embargo; son un pequeño paso hacia un horizonte diferente.

Agradecimientos

A Dios por mostrarme día a día que con voluntad, paciencia y humildad todo es posible y por haberme permitido llegar hasta este punto y alcanzar uno de mis objetivos.

A la entidad Innovate Peru por el financiamiento de esta investigación enmarcada en el convenio del proyecto 144-FINCYT-IA-2013: “Desarrollo de un Sistema de Alerta Temprana para Reducir la Vulnerabilidad de Pastores de Puna al Cambio Climático”

Al Ph.D. Javier Ñaupari, por su guía constante, apoyo y asesoramiento en la realización del presente trabajo de investigación

A los ingenieros Marco Gutierrez, Jimmy Nuñez, Bill Yalli, Samuel Pizarro, Lucinda Tafur y Melody Zarria por su apoyo y consejo durante las evaluaciones de campo y durante la fase de gabinete.

A los Doctores Jay Angerer y Jhon All, por el asesoramiento en el análisis de datos de campo e imágenes satelitales.

A los administradores y productores de las Comunidades Campesinas de Canchayllo; San Pedro de Racco y Tomas por su colaboración y apoyo en la realización de esta investigación.

Un agradecimiento especial a mis profesores Enrique Flores, Lucrecia Aguirre, y Javier Ñaupari por sus valiosas enseñanzas y por la motivación a seguir desarrollándome como profesional.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCION	1
II. REVISION DE LITERATURA	3
2.1 Ecosistema de pastizal	3
2.1.1 Tipos de vegetación del pastizal.....	3
2.1.2 Estructura y función	4
2.2 Sensores remotos	6
2.2.1 Principios y bases de los sensores remotos	6
2.2.2 Satélites y sensores pasivos.....	10
2.2.3 Imagen satelital	12
2.2.4 Sensor modis	12
2.3 Biomasa aérea y su relación con índices de espectrales	13
2.3.1 Biomasa.....	13
2.3.2 Índices espectrales.....	16
2.4 Sensores remotos, biomasa y salud de pastizal.....	20
2.4.1 Modelo de Salud del pastizal	20
2.4.2 Sensor MODIS y su relación con evaluaciones de salud de los pastizales..	21
III. MATERIALES Y METODOS	23
3.1 Descripción del area de estudio	23
3.1.1 Zona 1: Canchayllo	24
3.1.2 Zona 2: San Pedro de Racco	25
3.1.3 Zona 3: Tomas.....	26
3.2 Delimitación de áreas de interés	26
3.3 Selección de unidades de muestreo	27
3.4 Muestreo en campo y estimación de biomasa disponible.....	27
3.5 Extracción de datos de NDVI y EVI de imágenes del sensor MODIS.....	30
3.6 Análisis estadístico	31
3.6.1 Curva de calibración para biomasa	31
3.6.2 Curva de calibración entre biomasa verde y NDVI	32
3.6.3 Curva de calibración entre biomasa verde y EVI.....	32
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	34
4.1 Estimación de biomasa aérea en campo.....	34

4.2	Valores de NDVI de MODIS.....	40
4.3	Valores de EVI de MODIS	43
4.4	Análisis de regresión entre NDVI y biomasa	44
4.5	Análisis de regresión entre EVI y biomasa.....	48
V.	CONCLUSIONES	51
VI.	RECOMENDACIONES	52
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
VIII.	ANEXOS	64

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: División principal del espectro electromagnético	8
Tabla 2: Principales satélites utilizados en percepción remota	11
Tabla 3: Métodos directos e indirectos para evaluar biomasa.....	15
Tabla 4: Valores de biomasa estimados para los pixeles de la zona de Canchayllo	38
Tabla 5: Valores de biomasa estimados para los pixeles de la zona de Racco	38
Tabla 6: Valores de biomasa estimados para los pixeles de la zona de Tomas	39
Tabla 7: Valores de NDVI del sensor MODIS para los pixeles de las tres zonas de evaluación.....	41
Tabla 8: Valores de EVI del sensor MODIS para los pixeles de las tres zonas de evaluación.....	43
Tabla 9: Regresión lineal para la relación NDVI – Biomasa de las tres zonas de evaluación.....	45
Tabla 10: Regresión lineal para la relación EVI – Biomasa de las tres zonas de evaluación.....	49

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación de comunidades campesinas en la sierra central	23
Figura 2. Fotografía de vista superior de ranking de biomasa establecido para los registros 1 al 5	29
Figura 3. Esquema de procesamiento del producto MOD13Q1 de MODIS para extraer información de Índices de Vegetación	30
Figura 4. Ecuación de regresión lineal en base a cuadrantes de referencia de la zona de Canchayllo	35
Figura 5. Ecuación de regresión lineal en base a cuadrantes de referencia de la zona de Racco	36
Figura 6. Ecuación de regresión lineal en base a cuadrantes de referencia de la zona de Tomas	36
Figura 7. Imagen del sensor Landsat 8OLI de las zonas de evaluación para las fechas de (a) 20 de marzo y del (b) 5 de abril del 2016	42
Figura 8. Ecuación de regresión entre NDVIy Biomasa para las tres zonas de evaluación	46
Figura 9. Ecuación de regresión entre EVI y Biomasa para las tres zonas de evaluación	50

INDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo I: Niveles de procesamiento de los productos del sensor MODIS	64
Anexo II: Datos tomados en cuadrantes de referencia para las tres zonas de evaluación	66
Anexo III: Peso in situ y en materia seca de cuadrantes de referencia para las tres zonas de evaluación	67
Anexo IV: Valores de NDVI y biomasa verde para las tres zonas de evaluación	68
Anexo V: Análisis de regresión lineal simple para las variables Biomasa verde y NDVI	70
Anexo VI: Valores de EVI y Biomasa verde para las tres zonas de evaluación	71
Anexo VII: Análisis de regresión lineal simple para las variables Biomasa verde y EVI	73
Anexo VIII: Indicadores utilizados para determinar la salud del pastizal	74

RESUMEN

Se condujo un estudio en pajonales alto-andinos de la sierra central del Perú para evaluar la relación entre la biomasa aérea y los índices de vegetación (IV): índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI) e índice de vegetación mejorado (EVI) del sensor MODIS-TERRA. Las evaluaciones se realizaron durante los meses de Abril y Mayo del 2016 en las comunidades de Canchayllo, San Pedro de Racco y Tomas. Se utilizó una grilla de 250 x 250 m (similar a un pixel de una imagen MODIS) y mapas de cobertura vegetal para discriminar pixeles de pajonal de otros tipos de coberturas. La biomasa disponible (Kg MS/a) se midió por el Método de Rendimientos Comparativos de Haydock y Shaw (1975) en cuadrantes de 0.25 m² a lo largo de transectas al paso en cada pixel. Los IV se extrajeron de imágenes del producto MOD13Q1 de MODIS. Los resultados muestran que las relaciones entre las variables NDVI – Biomasa y EVI – Biomasa tuvieron coeficientes de determinación de 0.31 (n =46, p<0.01) y 0.22 (n=46, p<0.01) respectivamente. La variabilidad y la baja correlación encontrada se atribuyó a las diferencias propias de los pajonales de cada una de las tres zonas de evaluación; a lo heterogéneo de la vegetación contenida en un pixel de MODIS (6.25 Ha); al número de observaciones por pixel para el método utilizado para estimar la biomasa disponible; y a la nubosidad propia de la época en la que se adquirió la información. Se recomienda el uso de imágenes satelitales de sensores con una mayor resolución espacial o de otro tipo como imágenes tomadas por DRONES, realizar experimentos similares con otros índices de vegetación e incorporar variables que permitan modelar mejor el comportamiento de la vegetación.

Palabras clave: Pajonales, biomasa, pixel, NDVI, EVI, MODIS

ABSTRACT

A study was conducted in high-Andean tussock grasslands of the central highlands of Peru to evaluate the relationship between above ground biomass and vegetation indices (VI): Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Enhanced Vegetation Index (EVI) of the MODIS-TERRA sensor. The evaluations were conducted between April and May 2016 in the communities of Canchayllo, San Pedro de Racco and Tomas. A grid of 250 x 250 m (similar to a pixel of a MODIS image) and vegetation coverage maps were used to discriminate pixels of tussock grasslands from other types of coverage. Above ground biomass (Kg DM / ha) was measured using the Comparative Yield Method of Haydock and Shaw (1975) in quadrants of 0.25 m² along a step transects in each pixel. VIs were extracted of images of the product MOD13Q1 of MODIS. Results show that the relationship between the NDVI - Biomass and EVI - Biomass had coefficients of determination of 0.31 (n = 46, p <0.01) and 0.22 (n = 46, p <0.01) respectively. The variability and low correlation found were attributed to the differences of the tussock grasslands of each of the three evaluation zones; the heterogeneous vegetation contained in a MODIS pixel (6.25 Ha); the number of observations per pixel for the method used to estimate the available biomass; and the cloudiness of the time in which the information was acquired. It is recommended using satellite images of sensors with a higher spatial resolution or other types, such as images taken by DRONES, performing similar experiments with other vegetation indices, and incorporating variables that allow better modeling of vegetation behavior.

Keywords: Tussock grasslands, biomass, pixel, NDVI, EVI, MODIS

I. INTRODUCCION

Los pastizales son un tipo de recurso terrestre, que se caracteriza por la vegetación nativa no forestal (NRCS, 1997). Este recurso importante ocupa una gran extensión de terreno a nivel mundial, ya que si al área colectiva de los pastizales se incluyen rangos boscosos y vegetación natural en áreas de sabana tropical y tundra, la superficie total de estos puede alcanzar el 47% de la superficie terrestre global (Williams *et al.*, 1968 citado por Tueller, 1989). Pero estos ecosistemas son bastante vulnerables a la influencia de la actividad humana teniendo al pastoreo de ganado y la quema como una de las principales amenazas para los tres tipos de pastizales (Alzérreca *et al.*, 2003).

Modelos climáticos para condiciones de la puna peruana predicen para el año 2050 una disminución de la humedad relativa (6%) y precipitación (15%) y aumento de la temperatura promedio en verano de 1.3°C (Martínez, *et al.*, 2006). Es necesario conocer el comportamiento y la capacidad de respuesta de los ecosistemas altoandinos a través de indicadores como productividad primaria y composición florística frente a estos cambios los cuales pueden repercutir en el ofrecimiento de servicios ambientales y bienes que brindan actualmente estos ecosistemas.

Debido a la naturaleza extensiva de los pastizales y la necesidad reconocida de gestionarlos a bajo costo, se considera que a la teledetección como una promesa significativa para el futuro (Tueller, 1989). La percepción remota de la cobertura vegetal mediante sensores aéreos o satelitales amplía la cobertura espacial y temporal de observaciones de los procesos ecológicos, hidrológicos y biogeoquímicos en una determinada región. (Zorogastua-Cruz *et al.*, 2012).

Uno de estos sensores es el Espectro radiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) del Sistema de Observación de la Tierra (EOS) que tiene atributos únicos que le permiten monitorear la dinámica de la productividad a múltiples escalas. (Reeves *et al.*, 2001). Entre estos productos resaltan los índices de vegetación (IV) que reflejan la actividad fotosintética de la vegetación y, por lo tanto, se utilizan cada vez más para controlar la biomasa de los pastizales (Yunxiang *et al.*, 2014)

Debido a todos estos factores actuales se planteó la presente investigación que tuvo como objetivo evaluar la relación entre la biomasa aérea y los índices de vegetación: índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI) e índice de vegetación mejorado (EVI) del sensor MODIS-TERRA (EOS AM) en pajonales altoandinos de tres comunidades de la sierra central del Perú.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Ecosistema de pastizal

Los pastizales altoandinos son definidos como aquellas áreas en las que domina la vegetación natural y que se desarrolla a partir de los 3,800 m.s.n.m., en suelos con baja aptitud para la agricultura. Las características fisionómicas están conferidas por la proporción relativa de gramíneas, graminoides o pseudo - gramíneas y hierbas. Estas formaciones varían en composición florística, dependiendo principalmente de la topografía, suelo, clima, temperatura y altitud. Estos factores medio ambientales interaccionan entre sí para dar lugar a diferentes tipos de formaciones de pastizal. (Pineda, 1996)

2.1.1 Tipos de vegetación del pastizal

Brack & Mendiola, 2004 citado por Velásquez (2013) menciona que las formaciones vegetales predominantes en la región Puna son los pajonales, los bosques de queñual (*Polylepis tarapacana*), los matorrales, los semidesiertos y las formaciones de plantas almohadilladas. Con respecto a los pastizales, Flores (1991) menciona que se pueden diferenciar hasta cinco tipos en base al color, altura, composición del conjunto de plantas o vegetación que los componen.

- Pajonales. Es el tipo de pastizal que ocupa la mayor extensión. Están agrupadas en matas de gramíneas de hojas duras, en algunos casos punzantes, conocidos con los nombres vulgares de “ichu” o “paja” en todo el territorio andino. Este tipo de pastizal se encuentra dominado por gramíneas altas de los géneros *Festuca*, *Calamagrostis* y *Stipa*.
- Césped de puna. Caracterizado por presencia de plantas de porte almohadillo y arrosetado en su mayor parte. Este tipo de vegetación es semejante a la tundra ártica. Aunque la presencia de líquenes y musgos son de importancia secundaria en este tipo de pastizal. Su apariencia se encuentra definida, principalmente, por

- variaciones en la proporción de los géneros *Achiacne*, *Azorella*, *Liabu*, *Nototriche*, *Opuntia*, *Perezia*, *Picnophyllum* y *Werneria*.
- Bofedales. Se caracterizan por la presencia de especies vegetales de ambientes húmedos, de carácter permanente o temporales, constituyendo la fuente de forraje durante los periodos de sequía. En su composición florística dominan especies de porte almohadillado como *Distichia muscoides*, *Plantago rigida* y *Oxicloe sp.*, entre otros.
- Tolares. Son las comunidades vegetales dominados por la *Parastrephia lepidophylla* y *Diplostephium tacurense*, arbustos de baja aceptabilidad, propios de ambientes secos, logrando alcanzar una altura de hasta 0.70 m. Su característica principal es que contiene resinas, que las protegen del pastoreo excesivo. Asociados a estos arbustos normalmente se encuentran pastos de crecimiento bajo que sirven de alimento a los animales; la presencia del arbusto tola es un indicador de terreno pobre y seco. (Vega & Torres, 2013)
- Canllares. Constituido por especies de bajo valor forrajero, conformado casi en su totalidad por rosáceas espinosas *Margaricarpus pinnatus* y *M. strictus*. Son especies vegetativas leñosas de porte bajo, generalmente prosperan en suelos de condiciones pobres, arenosas y secas. (Vega & Torres, 2013)

2.1.2 Estructura y función

Flores, 1993 citado por Pineda (1996), define “Ecosistema” como un área o unidad ecológica territorial, donde entes bióticos (plantas y animales) y entes abióticos (suelo y medio ambiente) que interaccionan entre sí para dar lugar a una comunidad con estructura y función propias. Estas unidades tienen una dinámica característica, pudiendo subsistir y evolucionar en forma autónoma.

Es decir, los ecosistemas presentan cuatro propiedades básicas a saber: Estabilidad, productividad, eficiencia y sostenibilidad (Flores, 1994 citado por Pineda, 1996)

- Estabilidad: Es la capacidad del ecosistema para recuperarse y retornar a su estatus original. La estabilidad se mide ya sea a través de la variación que experimenta la productividad con respecto al promedio o tiempo que se toma para retornar a su estado de equilibrio después de una catástrofe que puede ser natural o provocada por la actividad humana.
- Productividad: Es el cambio neto en la producción vegetal entre dos puntos en el tiempo usualmente un año. La productividad del pastizal depende del tipo de vegetación, clima, el suelo y el manejo.
- Eficiencia: Es el incremento que experimenta la producción de forraje por unidad de consumo que se añade al sistema. En consecuencia, existen varias medidas de eficiencia como tipos de insumos.
- Sostenibilidad: Es una medida del grado de dificultad que experimenta el administrador de pastizales para mantener a la comunidad vegetal.

El ecosistema de pastizal contiene unidades de manejo con características de estructura, patrón y función particulares que les hacen diferentes de unidades adyacentes. La estructura del pastizal está relacionado a los parámetros estructurales como: composición botánica, forma de la planta y distribución. De otro lado el patrón se refiere a la distribución de la vegetación en el plano horizontal. La función se refiere a la “fisiología” del ecosistema: como es el caso de la sucesión vegetal. El cual es un proceso direccional responsable de los cambios que experimenta la vegetación en el transcurso del tiempo. La intervención del hombre en un ecosistema es capaz de alterar su estructura y/o funcionamiento; ya sea para dañar o mejorar poblaciones o la comunidad de vida. (Pineda, 1996)

Cada tipo de vegetación puede estar compuesto de un gran número de asociaciones vegetales o subtipos dependiendo principalmente del suelo y clima local. Aguirre & Oscanoa (1985) en la Raya en una extensión de 3,466 Ha evaluadas hallaron 18 subtipos, predominando especies como: *Muhlebergia peruviana*, *Festuca dolichophylla*, *Calamagrostis antoniana*, *Distichia muscoides*. Riesco (1972), en la SAIS Cahuide delimitó 38 subtipos en una extensión de 3,304.10 Ha, predominando en ella: *Festuca dolichophylla*, seguido de *Calamagrostis antoniana*, *Stipa brachiphylla*, tanto en época húmeda como en época seca.

2.2 Sensores remotos

2.2.1 Principios y bases de los sensores remotos

La lógica básica de la detección remota es la lógica de la inferencia. Si la causa “C1” existe, entonces se observará el efecto “E1” y si se observa el efecto “E1”, entonces debe existir “C1” (Tueller, 1989). En otras palabras, los intérpretes de detección remota pueden estudiar ciertas características directamente y otras características sólo indirectamente por inferencia o asociación. Es decir, se basa en el concepto de sustitutos en el que se identifican y miden fácilmente mediante observación (a través de la detección a distancia) características que se relacionan con características más complejas o fenómenos que un científico de rango o un administrador desea identificar, medir y juzgar en base a su importancia.

En base a estos principios se utilizó la información proporcionada por satélites como el SPOT (Satélite para la observación de la tierra, por sus siglas en francés), pudiéndose detectar grandes rodales de plantas invasoras en pastizales del sur de Texas, inclusive las infestaciones de estos pudieron ser mapeadas, permitiendo así estimar la superficie de estas hierbas en grandes áreas (Anderson *et al.*, 1993). Otra de sus aplicaciones ha sido la de determinar la productividad de las tierras de pastoreo, estimándola a partir de información de sensores como el Landsat (de land: tierra y sat: satélite) o el AVHRR (Radiómetro Avanzado de muy alta resolución, por sus siglas en inglés), utilizando modelos de producción primaria bruta basados en la eficiencia del uso de la radiación. El valor de esta información generada por la teledetección para el manejo de los pastizales depende en buena parte de la combinación de las imágenes con otros datos espaciales dentro de los sistemas de información geográfica. (Hunt *et al.*, 2003)

Las técnicas de teledetección permiten tomar imágenes de la superficie terrestre en diversas regiones de longitud de onda del espectro electromagnético (EMS) (Tabla 1). La mayoría de los instrumentos de teledetección registran radiación electromagnética que viaja a una velocidad de 3×10^{10} cm / seg desde la fuente, directamente a través del vacío del espacio o indirectamente por la reflexión o reradiación al sensor (Jensen, 2005). Algunas de las imágenes representan la radiación solar reflejada en las regiones visibles y del infrarrojo cercano del espectro electromagnético, otras son las mediciones de la energía emitida por la propia superficie terrestre, es decir, en la región de la longitud de onda del infrarrojo térmico. La energía medida en la región de microondas es la medida del retorno relativo desde la

superficie terrestre, donde la energía se transmite desde la propia plataforma espacial. Esto se conoce como teledetección activa, ya que la fuente de energía es proporcionada por la plataforma de detección remota. Mientras que los sistemas en los que las mediciones de teledetección dependen de la fuente de energía externa, como el sol, se denominan sistemas de teledetección pasivos (Aggarwal, 2004).

Tabla 1: División principal del espectro electromagnético

Longitud de onda	Descripción
Rayos gamma	Rayos gamma
Rayos X	Rayos X
Región Ultravioleta(UV) 0.30 μm - 0.38 μm (1μm = 10⁻⁶m)	Esta región se encuentra más allá del violeta, de ahí deriva su nombre. Algunos materiales de la superficie terrestre principalmente rocas y minerales emiten radiación UV visible. Sin embargo, en su mayoría se dispersa por ende no se utiliza en la teledetección.
Espectro visible 0.4 μm - 0.7 μm Violeta 0.4 μm -0.446 μm Azul 0.446 μm -0.5 μm Verde 0.5 μm - 0.578 μm Rojo 0.62 μm -0.7 μm	Esta es la luz, que nuestros ojos pueden detectar. Esta es la única parte del espectro que puede asociarse con el concepto de color. Azul, verde y rojo son los tres colores primarios del espectro visible. El color de un objeto se define por el color de la luz que refleja.
Infrarrojo(IR) 0.7 μm – 100 μm	Las longitudes de onda más largas que la porción roja del espectro visible se designan como el espectro infrarrojo. Se puede dividir en dos partes según sus propiedades. Para la teledetección se utiliza IR reflejado (.7 μm - 3.0 μm).
Región de las microondas 1nm – 1m	Las longitudes de onda más cortas de este rango tienen propiedades similares a la región infrarroja térmica. La principal ventaja de este espectro es su capacidad de penetración a través de las nubes.

Fuente: Extraído de Aggarwal (2004)

La naturaleza de la obtención de datos mediante percepción remota está influenciada por las interacciones de las diferentes partes constituyentes de un sistema de percepción remota, tales como:

- Fuente de energía: En la cual influyen el ángulo de elevación y la divergencia solar.
- Cubierta terrestre: En la que intervienen las características físicas, químicas y la rugosidad de la superficie en un instante de tiempo.
- Sensor: El cual influye en la geometría de la toma y la calidad de los datos.
- Atmósfera: Especialmente en lo que se refiere a la dispersión selectiva de la radiación electromagnética.

Los datos detectados por los sensores pueden obtener información muy específica sobre un objeto (por ejemplo, el diámetro de una corona de roble) o la extensión geográfica de un fenómeno (por ejemplo, el límite poligonal de un bosque de roble entero). Las características (calidad y cantidad) de la información reportada dependerán del tipo de sensor y la resolución del mismo, teniendo cada sensor en particular una resolución espacial; espectral; radiométrica y temporal específica determinada durante su diseño.

- La resolución espacial es una medida de la menor separación, angular o lineal, entre dos objetos que pueda ser determinada por un sistema de teledetección o sensor remoto
- La resolución espectral es el número y dimensión (tamaño) de intervalos específicos de longitud de onda (referidos como “bandas” o “canales”) en el espectro electromagnético en el cual un instrumento de teledetección o sensor remoto es sensible
- La resolución radiométrica es definida como la sensibilidad de un sensor remoto para diferenciar en la intensidad de una señal cuando registra el flujo radiante reflejado, emitido o dispersado del terreno.
- La resolución temporal en los sistemas de teledetección generalmente se refiere a con qué frecuencia el sensor toma una imagen de un área en particular (Jensen, 2005).

Todos estos factores ponen de manifiesto la complejidad intrínseca de la percepción remota ya que modifican las firmas espectrales de los diferentes tipos de cobertura. Sin embargo, actualmente y debido a su formato estas permiten su manipulación y corrección.

2.2.2 Satélites y sensores pasivos

Se entiende por plataforma de teledetección, los satélites (LANDSAT, METEOSAT, NOAA, SPOT) o aviones que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia, estos últimos son conocidos como sensores. Existen actualmente muchos sistemas satelitales en órbita con sensores a bordo capaces de captar información en la forma de imágenes satelitales en diferentes regiones del espectro electromagnético (usualmente en el infrarrojo cercano, medio y termal) (Tabla 2). Estos sistemas tienen múltiples usos en campos como la agricultura, geología, meteorología, y otras disciplinas en recursos. (Muñoz & Ponce, 2005).

Tabla 2: Principales satélites utilizados en percepción remota

Satélites	Sensor	Coverture	Resolución Espacial	Resolución Temporal	Resolución Espectral	Resolución Radiométrica	Serie histórica
		(Km)	(m)	(Días)	(N° bandas)	(Bits)	
Landsat (1 -3)	MSS	180 x 180	79 x 79	16	5	6*	1972 -1999
Landsat (4 – 5)	TM	185 x 185	30 x 30	16	7	8*	1982 – 2001
SPOT -4	VEGETATION	2200 x 2200	1000 x 1000	1	4	16*	1986 - 2003
NOAA -10	AVHRR	3000 x 3000	1100 x 1100	0.5	5	11*	1986 - 2001
TERRA EOS -AM	MODIS	2330 x 2330	250 x 250	1	36	8*	2000 – presente
TERRA EOS -AM1	ASTER	60 x 60	15 x 15	16	14	8*	1999 - presente
Landsat 8**	OLI	170 x 183	30 x 30	16	9	12	2013 - presente

Fuente: Elaboración propia a partir de ITC y Melesse *et al.*, 2007*, Landsat Science**

2.2.3 Imagen satelital

Es una matriz digital (igual a una fotografía digital) capturada por un sensor que viaja adosado a un satélite en órbita alrededor de la tierra. A medida que el satélite avanza en su órbita, “barre” la superficie con un conjunto de detectores que registran la energía reflejada. La teledetección hace especial uso de las imágenes satelitales como un insumo para extraer información del medio geofísico y geográfico. (Muñoz & Ponce, 2005)

Las imágenes proporcionadas por los sensores están compuestas por píxeles (abreviatura de “picture elements”, utilizando la abreviatura común "pix" para "imágenes") que son puntos individuales en una imagen gráfica. Los píxeles contienen mediciones de ondas electromagnéticas hechas en el nivel del sensor. Estas imágenes se encuentran en formato raster, el cual consiste en una matriz de miles de píxeles, en donde cada píxel tiene un valor digital o de reflectancia; ejemplificando, si la resolución de la imagen es de 30 m, cada píxel muestra un área de la superficie terrestre igual a 30 metros x 30 metros (900 m²), con esto la firma espectral o reflectancia de todos los objetos existentes en una superficie de 900 m² será promediada para darle su valor digital al píxel. La resolución espacial del píxel puede variar de 5 km por 5 km (satélite geoestacionario) a 60 cm (satélite Quickbird). (Muñoz & Ponce, 2005; Ceccato & Dinku, 2010)

2.2.4 Sensor MODIS

MODIS (Espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada, por sus siglas en inglés) es un sensor que viaja a bordo de los satélites Terra (EOS a.m.) y del Aqua (EOS p.m.), recolectando principalmente datos sobre el verdor de la vegetación, pero también ofrece otras capacidades, entre ellas, se encuentra la capacidad de recolectar datos a una resolución de 250 metros, comparada con los 1000 metros de resolución que ofrece el AVHRR(Mas, 2011; Muñoz & Ponce, 2005).

Resolución Temporal de MODIS: Los productos de alto nivel de MODIS distribuidos a partir del LP DAAC (Centro de Archivo Activo de Distribución de Procesos Terrestres, por sus siglas en inglés) se producen en varias resoluciones temporales, basadas en el ciclo orbital de los instrumentos. Estos pasos de tiempo son posibles para la generación de los productos MODIS Land: Diario; cada 8 días; cada 16 días; mensual; trimestral y anual.

Resolución espacial de MODIS: Los instrumentos MODIS adquieren datos en tres resoluciones espaciales nativas: bandas 1-2 (250 metros); bandas 3-7 (500 metros) y Bandas 8-36 (1000 metros). (LPDAAC, 2014)

Niveles de procesamiento

Los productos MODIS son divididos en cinco niveles (0 a 4) en función del grado de procesamiento realizado (Anexo 1). El nivel 1A, nivel 1B, georreferencia y los productos libres de nube, así como los de suelo y atmósfera de más alto nivel son producidos por un sistema de procesamiento adaptable (MODAPS) y posteriormente, son repartidos a tres centros activos de almacenamiento (DAACs por sus siglas en inglés) para su distribución. Los distintos datos derivados de las observaciones de MODIS pueden obtenerse desde diferentes fuentes, MODIS nivel 1 y productos de atmósfera están disponibles en el portal de Nivel 1 y Sistema de Distribución de Archivos de la Atmósfera (LAADS por sus siglas en inglés) <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>. Los productos para aplicaciones terrestres a través del centro de datos EROS de Estados Unidos en el portal <http://daac.gsfc.nasa.gov>, los productos de cobertura de nieve y hielo se obtienen a través del portal del Centro de Vuelos Espaciales Goddard (GSFC por sus siglas en inglés) <http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/index.html>. (Mas, 2011)

2.3 Biomasa aérea y su relación con índices espectrales

2.3.1 Biomasa

Según Bonham (2013) todas las actividades biológicas de plantas y animales dependen de la energía de la productividad primaria bruta. La "producción primaria" se define como la energía fijada por las plantas, y es la característica más fundamental de un ecosistema. Las mediciones de la producción primaria son necesarias para la correcta comprensión de la dinámica de los ecosistemas. La composición de la vegetación, basada en la biomasa, es uno de los mejores indicadores de la dominancia de las especies dentro de una comunidad de plantas.

La terminología asociada con la biomasa de la vegetación está normalmente relacionada con la producción. A continuación, se presentan términos utilizados para describir la biomasa de un pastizal (Coulloudon, 1999):

- La producción primaria bruta o “gross primary production” es la cantidad total de material orgánico producido, tanto por encima del suelo como por debajo del suelo.
- La producción en pie o “standing crop” es la cantidad de biomasa vegetal presente sobre el suelo en cualquier punto dado.
- La producción pico en pie o “peak standing crop” es la mayor cantidad de biomasa vegetal sobre el suelo presente durante un año determinado.
- El forraje total es la biomasa herbácea total y aceptable de plantas leñosas a disposición de los herbívoros.
- El forraje asignado es la diferencia de la cantidad deseada de material residual restado del forraje total.
- El mantillo es la capa orgánica del suelo, formada en gran parte por restos vegetales y por la caída de la vegetación senescente, actuando como protección para el suelo, ya que evita la erosión y le confiere humedad, y asegura el ciclaje de nutrientes mediante su descomposición. (Calvo, 2016)

De acuerdo con Bonham, 2013 el mejor y probablemente el método más comúnmente usado para medir la biomasa herbácea es el corte y cosecha de la biomasa total. Se han desarrollado técnicas y metodologías de muestreo para obtener estimaciones de la biomasa herbácea y estos métodos se agrupan en tres categorías: métodos directos, métodos indirectos y una combinación de métodos directos e indirectos. Todos estos métodos son resumidos en la tabla 3 descrito a continuación.

Tabla 3: Métodos directos e indirectos para evaluar biomasa

Método directo	Descripción
Cosecha manual o recorte	Un cuadrante de dimensiones conocidas se coloca en un área de tierra. La biomasa de la vegetación se cosecha a partir del volumen tridimensional del cuadrado (altura x anchura x longitud).
Estimaciones de peso y doble muestreo	La biomasa se recorta a un número relativamente pequeño de puntos de observación tomados al azar de una gran muestra de puntos visualmente estimados.
Método indirecto	Descripción
Reflectancia espectral	Debido a que las especies de plantas tienen respuestas espectrales diferentes según las concentraciones de biomasa, es posible obtener estimaciones de biomasa a partir de estas respuestas.
Método de cobertura	Las relaciones peso-cobertura se desarrollan midiendo la cobertura y los pesos frescos o secos al horno de las especies en una serie de cuadrados localizados aleatoriamente.
Método de densidad	Se cuentan el total de plantas dentro de un cuadrante para estimar su densidad. La biomasa se calcula entonces mediante la multiplicación del peso medio de la planta por la densidad media.
Método del punto	El método del marco puntual (point – frame) se utiliza para la medida de la cubierta vegetal. Se determina la biomasa por especie y se puede usar una ecuación de regresión para estimar la biomasa.
Predicción de biomasa a partir de múltiples factores	Una combinación de variables suele proporcionar una estimación más precisa de la producción de biomasa que una sola variable.
Método de datos meteorológicos	La precipitación y la temperatura del aire tienen un efecto directo en el crecimiento de la planta.

Fuente: Elaboración propia a partir de Bonham, 2013

Si bien los métodos de campo son muy útiles para el monitoreo de pastizales a escala local y para proporcionar valores para el desarrollo de modelos y la calibración de datos ex situ, son subjetivos, consumen mucho tiempo y solo son factibles (o aplicables) para la evaluación a pequeña escala (Xu *et al.*, 2008). Para los estudios de teledetección, los datos de campo de alta calidad y confiabilidad son de gran importancia para la validación cruzada y el entrenamiento con algoritmos. Todos estos métodos de campo son igualmente aplicables para este propósito, y los datos recolectados usando estos métodos han demostrado ser muy útiles. Por ejemplo, los científicos de teledetección utilizan actualmente los datos de los inventarios forestales, los rendimientos de los cultivos y los pastizales (Xu *et al.*, 2008) recogidos en el pasado para la detección del cambio forestal y el desarrollo de modelos de estimación del rendimiento. (Ali *et al.*, 2016)

2.3.2 Índices espectrales

Con el desarrollo de las tecnologías de detección remota, más y más campos han comenzado a involucrarla en sus acciones (Li *et al.* 2009, 2013). Este desarrollo ha estimulado el incremento de estudios sobre la productividad de la vegetación y biomasa. Debido a los cálculos simples involucrados y, a la alta exactitud del enfoque, los modelos de regresión estadística usando datos de teledetección se han aplicado ampliamente para la estimación de la biomasa de pastizales. La esencia del método es el establecimiento de un modelo de regresión entre las mediciones de biomasa y los datos de sensores remotos de una sola banda o de índice de vegetación, utilizando los datos tomados por satélite como parámetros de entrada para estimar la biomasa. Inicialmente, ya que el uso de información de una sola banda era simple, se utilizaron datos de este tipo para estimar la biomasa de pastizales. Sin embargo, debido a la fuerte interferencia de una serie de factores (por ejemplo, aire, suelo, rendimiento del sensor y el ángulo del sol), la precisión de la estimación resultante se encontró que era pobre (Zheng *et al.*, 2007 citado por Zhao, 2014).

Los índices de vegetación (IV), definidos como la combinación aritmética de dos o más bandas relacionadas con las características espectrales de la vegetación, han sido ampliamente utilizados para el monitoreo fenológico, la clasificación de la vegetación y la derivación biofísica de los parámetros radiométricos y estructurales de la vegetación. Históricamente se han desarrollado en el área de aplicaciones e investigación en teledetección por satélite más de cuarenta índices de vegetación entre 1970 y 1990, desde

Pearson & Miller, 1972 citado por Bannari *et al.* (1996) que desarrollaron los dos primeros índices: el índice ratio de vegetación o RVI (expresado como Banda roja/Reflectancia media del infrarrojo cercano) y el índice número de vegetación o VIN (expresado como Reflectancia media del infrarrojo cercano/ Banda roja) para la estimación y monitoreo de vegetación; pasando por diferentes índices de primera generación como: índice de vegetación verde o GVI, Índice de vegetación diferenciada o DVI, índice de diferencia normalizada o NDI hasta los índices de segunda generación con la postulación de Rouse (1973) y posteriormente Rouse *et al.* (1974) que propusieron el índice de vegetación diferencial normalizada o NDVI. A partir de este último se fueron realizando ajuste y correcciones del mismo creando nuevos índices, como: el índice de vegetación mejorado o EVI, el índice de vegetación perpendicular o PVI, índice de vegetación corregido por suelo o SAVI, sus variaciones como el índice transformado de vegetación corregido por suelo o TSAVI, entre muchos otros.

Estos índices se derivan en muchos casos del NDVI y se desarrollan para corregir efectos como el brillo del suelo (como es el caso del SBI o índice de brillo del suelo); el efecto del suelo desnudo (como es el caso del PVI o índice de vegetación perpendicular); reducir el ruido atmosférico (como el Índice de vegetación resistente a la atmósfera o ARVI); entre otros, con el objetivo de mejorar la precisión en la toma de datos sobre las diferentes coberturas de vegetación.

Muchos científicos han desarrollado índices relacionados con su campo específico de investigación. Algunos índices de vegetación han mostrado una muy buena correlación con diferentes "factores" de interés, entre los cuales la productividad de los campos cultivados o áreas forestales y su contenido de biomasa (Perry & Lautenschlager, 1984 citado por Bannari *et al.*, 1996). Los desacuerdos entre los diferentes autores se refieren a las ventajas y desventajas de uno u otro de los índices de vegetación y se relacionan principalmente con condiciones experimentales y campos de aplicación (Bannari *et al.*, 1996). Entre los índices de vegetación existentes, el Índice de Vegetación Diferenciada Normalizada (NDVI) es el más utilizado y es un índice operacional de vegetación global, en parte debido a sus propiedades de "relación", que permiten al NDVI anular una gran proporción del ruido causada por el cambio de los ángulos del sol, la topografía, las nubes o la sombra, y las condiciones atmosféricas (Matsushita *et al.*, 2007).

a. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El comportamiento típico de la vegetación vigorosa o en pico de producción muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles y una elevada reflectividad en el infrarrojo cercano. Estas características espectrales se relacionan con la acción de pigmentos fotosintéticos y el agua que almacenan las hojas. Los pigmentos de la hoja como la clorofila absorben la radiación de la región espectral alrededor de 645 nm que corresponde a la región roja (Rouse *et al.*, 1974). El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) utiliza esta información espectral para mejorar la señal de la vegetación y reducir los efectos de la transmitancia atmosférica, topografía, elevación solar y azimuth. La diferencia en la respuesta espectral que detecta el NDVI permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas. (Díaz, 2015)

El cálculo del NDVI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, como se muestra a continuación.

$$\text{NDVI} = \frac{(\rho_{Irc} - \rho_{Red})}{(\rho_{Irc} + \rho_{Red})}$$

Dónde “ ρ_{Irc} ” representa el valor de reflectancia en la región del infrarrojo cercano y “ ρ_{Red} ” representa el valor de la reflectancia en la región del rojo. Siendo el valor de “P” la reflectancia superficial corregida atmosféricamente o parcialmente corregida por la atmosfera (absorción de Rayleigh y ozono).

El NDVI es un indicador muy utilizado y debe su éxito como descriptor de las variaciones de la vegetación a pesar de los efectos atmosféricos (Kaufman, 1984) y la degradación radiométrica en las bandas roja e infrarroja cercana (Holben *et al.*, 1990 citado por Bannari *et al.*, 1996) debido a que su normalización lo permite. Cabe señalar también que el NDVI presenta el inconveniente de sobreestimar el porcentaje de cubierta vegetal al inicio de la temporada de crecimiento y de subestimarla al final de la temporada (Cyr, 1993 citado por Bannari *et al.*, 1996).

b. Índice de Vegetación Mejorado (EVI)

El índice de vegetación mejorado (EVI) se propuso en base a un enfoque basado en la retroalimentación que incorpora los conceptos tanto del ajuste de fondo y la resistencia atmosférica en el NDVI (Liu *et al.*, 1995 citado por Matsushita *et al.*, 2007). Por lo tanto, el EVI ha sido considerado un NDVI modificado con sensibilidad mejorada a altas regiones de biomasa y una mejor capacidad de monitoreo de la vegetación a través de un desacoplamiento de la señal de fondo de la canopia y una reducción de las influencias atmosféricas (Huete & Justice, 1999 citado por Matsushita *et al.*, 2007).

El EVI tiene una buena sensibilidad a los densos bosques forestales y áreas agrícolas, mientras que reduce el ruido de fondo de la canopia y las fuentes de aerosoles (Liu & Huete, 1995). Considerando que el NDVI es sensible a la clorofila, EVI es más sensible a las variaciones estructurales del dosel, incluyendo el índice de área foliar (IAF), tipo de dosel, fisonomía de la planta y arquitectura del dosel (Gao *et al.*, 2000).

El EVI se representa bajo la siguiente ecuación (Huete *et al.*, 1994):

$$EVI = G \times \frac{(\rho_{Irc} - \rho_{Red})}{(\rho_{Irc} + C1 \times \rho_{Red} - C2 \times \rho_{Blue} + L)}$$

Donde “ ρ_{Irc} ” dicha reflectancia en el espectro del infrarojo cercano, “ ρ_{Red} ” la reflectancia en el espectro del rojo y “ ρ_{Blue} ” en el azul. Siendo el valor de “P” la reflectancia superficial corregida atmosféricamente o parcialmente corregida por la atmosfera (absorción de Rayleigh y ozono). El factor “L” corresponde a un ajuste de la señal antecedente de la canopia de las plantas. Por último, “C1” y “C2” son los coeficientes de la resistencia a aerosoles, en la que la banda azul se utilizó para corregir las influencias de aerosoles en la banda roja (Kawamura *et al.*, 2005b). El valor de “C1 se ha fijado en 6 y el de “C2” en 7,5. “G” representa un factor de cambio igual a 2,5 y “L” se ha fijado en un valor de 1. (Huete *et al.* 1994, 1997).

c. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

Huete, 1988 citado por Bannari *et al.* (1996), demostró que existía una contradicción entre la forma en que los índices NDVI y PVI tienen de describir el comportamiento espectral de la vegetación y el fondo del suelo. En consecuencia, desarrolló un nuevo índice de vegetación denominado "Índice de Vegetación Ajustada al Suelo" (SAVI), que es como un arreglo entre índices de relación (NDVI) e índices ortogonales (PVI). La originalidad de este índice radica en el establecimiento de un modelo simple que permita describir adecuadamente el sistema suelo-vegetación. El SAVI se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$SAVI = (\rho_{Irc} - \rho_{Red}) \times \frac{(1 + L)}{(\rho_{Irc} + \rho_{Red} + L)}$$

Basado en un modelo simplificado de transferencia radiativa, Huete (1988) ha demostrado que un valor $L = 0,5$ permite el mejor ajuste, es decir, minimizar el efecto secundario de retrodispersión de la radiación reflejada de fondo de suelo transmitido por la canopia. Si el valor de L es cero ($L = 0$), el SAVI es igual al NDVI. (Bannari *et al.*, 1996)

Utilizando las mismas bandas que el NDVI, el índice de vegetación con ajuste de suelo (Soil Adjusted Vegetation Index- SAVI) también representa el vigor y la estructura de la canopia, pero además incorpora un ajuste arbitrario para la cobertura incompleta del terreno. El SAVI parece ser menos afectado por las variaciones en el brillo del suelo y por lo tanto sus valores para una cubierta vegetal dada son más bien independientes al reflejo del suelo (Gilabert *et al.*, 2002 citado por Rodríguez-Moreno & Bullock, 2013)

2.4 Sensores remotos, biomasa y salud de pastizal

2.4.1 Modelo de Salud del pastizal

La salud de los pastizales se define como "el grado en que la integridad del suelo, la vegetación, el agua y el aire, así como los procesos ecológicos del ecosistema, se equilibran y sostienen" (Briske *et al.*, 2005). Los procesos ecológicos incluyen el ciclo del agua (la captura, el almacenamiento y la liberación segura de la precipitación), el flujo de energía (conversión de la luz solar en la planta y luego la materia animal) y el ciclo de nutrientes (ciclo de nutrientes a través de los componentes físicos y bióticos del medio ambiente). Estos

procesos funcionan dentro de un rango normal de variación y soportan a comunidades específicas de plantas y animales. Al combinar los enfoques del NRC y el Task Group de la Sociedad de manejo de pastizales (SRM), y mediante un proceso iterativo de pruebas de campo y revisiones por pares de los administradores de tierras y científicos, identificaron 3 atributos del estado del ecosistema que pueden ser evaluados usando múltiples indicadores (Pyke *et al.*, 2002). Estos indicadores se muestran en el Anexo 8.

Las definiciones de estos tres atributos interrelacionados son: (Pellant *et al.*, 2005)

- Estabilidad del suelo / del sitio: Capacidad de un área para limitar la redistribución y la pérdida de recursos del suelo (incluyendo nutrientes y materia orgánica) por el viento y el agua.
- Función hidrológica: La capacidad de un área para capturar, almacenar y liberar con seguridad el agua de la lluvia, la escorrentía y la deshielo (cuando sea relevante), para resistir una reducción en esta capacidad y para recuperar esta capacidad cuando ocurre una reducción.
- Integridad Biótica: La capacidad de la comunidad biótica para apoyar procesos ecológicos dentro del rango normal de variabilidad esperado para el sitio, para resistir una pérdida en la capacidad de soportar estos procesos y para recuperar esta capacidad cuando se producen pérdidas. La comunidad biótica incluye plantas, animales y microorganismos que ocurren tanto por encima como por debajo del suelo.

2.4.2 Sensor MODIS y su relación con evaluaciones de salud de los pastizales

A pesar de la confusión y de los puntos de vista conflictivos que rodean la salud de los pastizales, las estimaciones de la productividad pueden ser un componente importante para determinar si las prácticas actuales de manejo están mejorando, degradando o manteniendo la integridad ecológica (Breckenridge y col., 1995, Pickup *et al.*, 1994). Algunas formas de degradación del sitio pueden producir patrones temporales y espaciales distintivos de cambio. Estos patrones a gran escala son de particular utilidad cuando se evalúa la condición de los pastizales a partir de datos de sensores remotos. (Pickup *et al.*, 1994).

La productividad se ha sugerido como una medida de la condición del pastizal y no es un indicador universalmente aceptado de salud de pastizal. Por ejemplo, los métodos de evaluación de las condiciones de distribución que se centran en el enfoque clímax no son indicativos de cambios en la producción total de biomasa de la pradera (Frost & Smith, 1991). Whitford *et al.* (1998) encontraron que la biomasa total no es un indicador sensible del estrés. Por otra parte, algunos métodos actuales para determinar la condición de los pastizales ponen más confianza en el cambio en la composición de las especies que en la productividad del sitio. Sin embargo, los productos de productividad del satélite EOS (Earth Observation Service) pueden identificar tendencias de disminución de la productividad a largo plazo, lo que indica una posible degradación del sitio. El número de años necesarios para mostrar una disminución de la productividad vinculada a algún aspecto de la degradación del sitio no puede conocerse sin cierto nivel de incertidumbre y se necesita más investigación para responder a esta pregunta. La investigación que relaciona directamente la degradación del sitio con la productividad decreciente es escasa, pero se puede inferir una relación (Bedunah & Sosebee, 1986; Thompson, 1968; Dodd & Lauenroth, 1979). Así, la dinámica de la productividad podría ser un componente fundamental de los modelos o sistemas de toma de decisiones diseñados para operar con múltiples fuentes de datos simultáneamente con el propósito de evaluar la salud de los pastizales (Reeves *et al.*, 2001).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Descripción del área de estudio

El presente estudio se realizó en las comunidades campesinas de Canchayllo, San Pedro de Racco y Tomas localizadas en la sierra central del Perú de las regiones de Junín, Pasco y Lima, respectivamente (Figura 1). Las comunidades campesinas fueron seleccionadas debido al vínculo existente entre ellas y el Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastizales (LEUP) lo cual permitió contar con información disponible proveniente de estudios previos y tener las facilidades logísticas para el desarrollo de la fase de campo del presente trabajo.

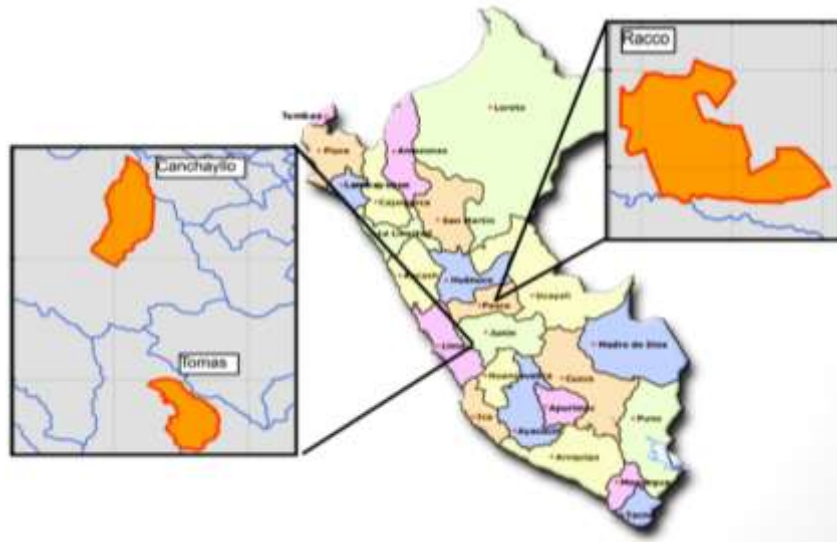


Figura 1. Ubicación de comunidades campesinas en la sierra central

Las comunidades campesinas se encuentran en las siguientes zonas de vida de acuerdo a Holdridge

La **tundra pluvial alpino tropical (tp-AT)** caracterizada por clima muy frío, con temperatura promedio de 3.2 C°. Las temporadas más frecuentes de lluvias son de noviembre a marzo el rango promedio máximo de precipitación total por año varía de 687.9 a 1,020.2 mm. El promedio de evapotranspiración potencial total por año varía entre la octava (0.125) y la cuarta parte (0.25) del promedio de precipitación total por año, por lo que la ubica en la categoría de humedad superhúmeda (ONERN, 1976).

El **páramo pluvial subalpino tropical (pp-SaT)** tiene un clima frío con temperaturas promedio que varían entre 3 a 6 C°. El rango promedio máximo de precipitación total por año varía de 828.7 a 1,342.3 milímetros, y el promedio de evapotranspiración potencial por año varía entre la octava (0.125) y cuarta parte (0.25) del promedio de precipitación total por año, por lo que la ubica en la categoría de humedad superhúmeda (ONERN, 1976).

En el **Páramo muy húmedo subalpino tropical (pmh-SaT)**, el clima es frío, con temperatura promedio que varían entre los 3.8 a 6 °C. Las temporadas más frecuentes de las lluvias son de noviembre a marzo, el rango promedio máximo de precipitación total por año va de 584.2 a 1 254 milímetros. El promedio de evapotranspiración potencial total varía entre la cuarta parte (0.25) y la mitad (0.5) del promedio de precipitación total por año, por lo que la ubica en la categoría de humedad superhúmeda (ONERN, 1976).

3.1.1 Zona 1: Canchayllo

La comunidad de Canchayllo, distrito Canchayllo, Provincia Junín, Región Junín, tiene una extensión de 188.6 km² y una altitud promedio de 3880 m.s.n.m, donde se localizan tres zonas de vida identificadas como Tundra pluvial alpino tropical, páramo pluvial subalpino tropical y páramo muy húmedo sub alpino tropical.

Los pajonales están dominados por *Festuca dolichophylla*, *Calamagrostis vicunarum* y *Calamagrostis recta* y tienen alrededor de un 91% de cobertura vegetal, presentando una cantidad regular mantillo que protege el suelo de diferentes tipos de erosión, siendo su uso principal el pastoreo de vacunos y ovinos. La biomasa disponible en campo se encontró en

un rango entre 579.02 y 3,866.56 Kg de MS/Ha en evaluaciones en los meses de mayo y octubre, respectivamente.

La posición topográfica es una planicie; el paisaje circundante es del tipo ondulado suave con pendientes entre ligeras y fuertemente inclinadas; pedregosidad superficial de 3 a 15% y afloramiento rocoso entre 2 a 15%. Los suelos de estas zonas son de textura franco limosa; con estructura granular; de profundidad efectiva muy superficial y con signos de erosión laminar ligera. No se observaron fuentes de agua cercana, excepto durante el periodo de noviembre a mayo que se presentan las lluvias estacionales.

3.1.2 Zona 2: San Pedro de Racco

La comunidad de San Pedro de Racco, distrito Simón Bolívar, provincia de Pasco, Región Pasco, tiene una extensión de 639.59 km² y una altitud promedio de 4362 m.s.n.m., donde se localizan dos zonas de vida correspondientes al páramo pluvial subalpino tropical y páramo muy húmedo sub alpino tropical.

Los pajonales de la comunidad de Racco están dominados por *Festuca dolichophylla*, *Stipa ichu* y tienen alrededor de 94% de cobertura vegetal, presentando una cantidad regular de mantillo que protege el suelo de diferentes tipos de erosión, siendo su uso principal el pastoreo de alpacas, llamas y ovinos. La biomasa disponible en campo se encontró en un rango entre 2,348.05 y 12,119.92 Kg de MS/Ha en evaluaciones en los meses de mayo y octubre.

La posición topográfica es una pendiente o ladera convexa; paisaje circundante es del tipo ondulado suave a colinado con pendientes fuertemente inclinadas; pedregosidad superficial de 0 a 3%, y afloramiento rocoso menor a 2%. Los suelos de estas zonas son de textura franco limosa; con estructura granular; de profundidad efectiva entre superficial y muy superficial con signos de erosión laminar ligera a moderada. Se observaron fuentes de agua cercana como ojos de agua permanentes o temporales y riachuelos durante el periodo de noviembre a mayo en él también se presentan las lluvias estacionales.

3.1.3 Zona 3: Tomas

La comunidad de Tomas, distrito Tomas, Provincia Yauyos, Región Lima, tiene una extensión de 320.31 km² y una altitud promedio de 3592 m.s.n.m., donde se localiza una sola zona de vida correspondiente a la Paramo muy húmedo subalpino tropical.

Los pajonales de la comunidad de Tomas están dominados por *Festuca humilior*, *Calamagrostis vicunarum*, *Carex ecuadorica* y tienen alrededor de un 80% de cobertura vegetal y una cantidad media de mantillo que protege al suelo de la erosión, siendo su uso principal el pastoreo de vacunos, ovinos y alpacas. La biomasa disponible en campo se encontró en un rango entre 1,903.28 y 11,540.32 Kg de MS/Ha en evaluaciones en los meses de mayo y octubre.

La posición topográfica es una pendiente o ladera convexa; el paisaje circundante es del tipo colinado con pendientes fuertemente inclinada; pedregosidad superficial de 3 a 15% y afloramiento rocoso menor a 2%. Los suelos de estas zonas son de textura entre franco limoso; con estructura granular; de profundidad efectiva superficial con signos de erosión laminar moderada. Se observaron fuentes de agua cercana como riachuelos permanentes y durante el periodo de noviembre a mayo también se presentan las lluvias estacionales.

3.2 Delimitación de áreas de interés

Las áreas de interés de esta investigación fueron los pajonales de las tres comunidades. De acuerdo con Flores (1991) los pajonales tienen las siguientes características: “Presencia de gramíneas altas, de hojas duras entre las que destacan; *Festuca dolichophylla*, *Festuca ortophylla*, *Stipa ichu*, *Calamagrostis antoniana* y *Calamagrostis rigida*, acompañados por vegetación herbácea de tallo simple o ligeramente ramificado.” Las áreas de interés se seleccionaron utilizando mapas de cobertura vegetal elaborados a partir de información de campo recogida por el Laboratorio de Utilización de Pastizales (LUP) en estudios previos y procesada con el software ArcGIS 10.4.

3.3 Selección de unidades de muestreo

Utilizando el software ArcGIS 10.4 y una imagen referencial del sensor MODIS en formato raster se generó una grilla con un tamaño de celda de 250 x 250 metros, de área similar a un pixel de esta imagen para poder delimitar las unidades de muestreo de este estudio. Los mapas de cobertura vegetal y la grilla de MODIS se exportaron fuera de ArcGIS y se superpusieron sobre las imágenes del visor Google Earth para poder discriminar pixeles dentro de áreas de pajonal para las tres comunidades a evaluar. Se descartaron pixeles que presentaban grandes ojos de agua permanente o temporal, áreas rocosas o caminos utilizando el visor de Google Earth como imagen referencial y posteriormente de lo observado en campo durante el muestreo. Utilizando la herramienta de ArcGIS “Extraer por mascara” se recortó de la imagen raster referencial las formas de las áreas de evaluación donde se encontrarán los pixeles seleccionados. Seguidamente usando la herramienta “De Raster a Punto” que extrae la información contenida en un pixel a un punto central. Se seleccionó aquellos puntos centrales de pixeles que se habían ubicado anteriormente con el visor Google Earth. Para cada punto se generó un rotulo de identificación y se crearon sus pares de coordenadas en UTM con la opción “Calcular Geometría” que permite dar una ubicación espacial al objeto sobre el que se esté trabajando. Las coordenadas obtenidas de los puntos centrales seleccionados se guardaron en un GPS Garmin78S para poder ubicar los pixeles en campo durante la fase de muestreo.

Luego de este proceso se obtuvieron 17 pixeles de pajonal para la zona de Canchayllo; 15 pixeles para San Pedro de Racco y 14 pixeles para Tomas. Es decir, las evaluaciones se realizaron en un total de 46 pixeles con vegetación predominante de tipo pajonal altoandino para las 3 zonas incluidas en este estudio.

3.4 Muestreo en campo y estimación de biomasa disponible

Los muestreos de biomasa en campo se realizaron entre el 29 de abril y 23 de mayo del 2016, se utilizó un método de doble muestreo o de estimación de la biomasa. Para realizar esta labor el observador tuvo un entrenamiento previo en dos años anteriores a la fecha de colección de datos. Para la determinación de la biomasa disponible en campo se utilizó el método de “Rendimiento comparativo” de Haydock & Shaw (1975) que se describe a continuación.

Inicialmente se seleccionaron áreas de entrenamiento dentro de un pixel a evaluar o un área considerada homogénea en las cuales, y con ayuda de un cuadrante de 0.25 m² como herramienta de muestreo, se estableció un ranking visual de la cantidad de biomasa en pie contenida en este (en base al tamaño de la biomasa en pie y cobertura vegetal). Dicho ranking se estableció utilizando un registro de números enteros entre 1 y 5, representando 1 a la menor cantidad de biomasa observada en el cuadrante y 5 a la mayor cantidad de biomasa observada dentro del mismo (Figura 2). Para cada registro del ranking se tomaron 2 lecturas con el fin de entrenar al observador y obtener una medida más acertada de la biomasa a estimar durante el muestreo, teniendo así un total de 10 lecturas para establecer el ranking (2 lecturas por cada registro). Se tomaron fotografías de los cuadrantes de entrenamiento, junto con una numeración de referencia, para que el observador tenga una referencia constante a la cual acudir, sin tener que acercarse hasta los mismos durante el muestreo ya que algunos pixeles a muestrear se encontraban a gran distancia de la zona donde se tomaron las referencias.

Seguidamente toda la biomasa contenida en los cuadrantes de referencia se cortó, peso y registro mediante el método de corte y separación manual (A.S.R.M., 1992). Una vez cortada toda la fracción vegetal se guardó en bolsas de plástico de 1 Kg para posteriormente separar el mantillo manualmente en el laboratorio. Una alícuota de material vegetal fue tomada para cada registro (del 1 a 5) como referencia para la determinación del contenido de materia seca en el laboratorio. Estas muestras fueron secadas en una estufa a 105⁰C durante 24 horas para obtener el porcentaje de materia seca para cada registro del ranking.

Para el muestreo de los pixeles, se ubicaron los puntos centrales de cada uno usando un GPS Garmin78S. Haciendo uso de las coordenadas extraídas anteriormente se localizó dentro cada pixel un área representativa de vegetación, similar a la observada en los alrededores, tratando de estar dentro de los límites del mismo. A continuación, se establecieron transectas al paso de 50 metros de largo, en las cuales se realizó una lectura de biomasa cada 5 metros, es decir, un total de 10 lecturas para cada pixel basado en los registros del ranking. Las 10 lecturas tomadas en cada pixel se promediaron para obtener un valor de puntuación individual, puntaje que luego fue transformado a valor de biomasa en materia seca utilizando la ecuación de regresión generada con las muestras tomadas anteriormente.

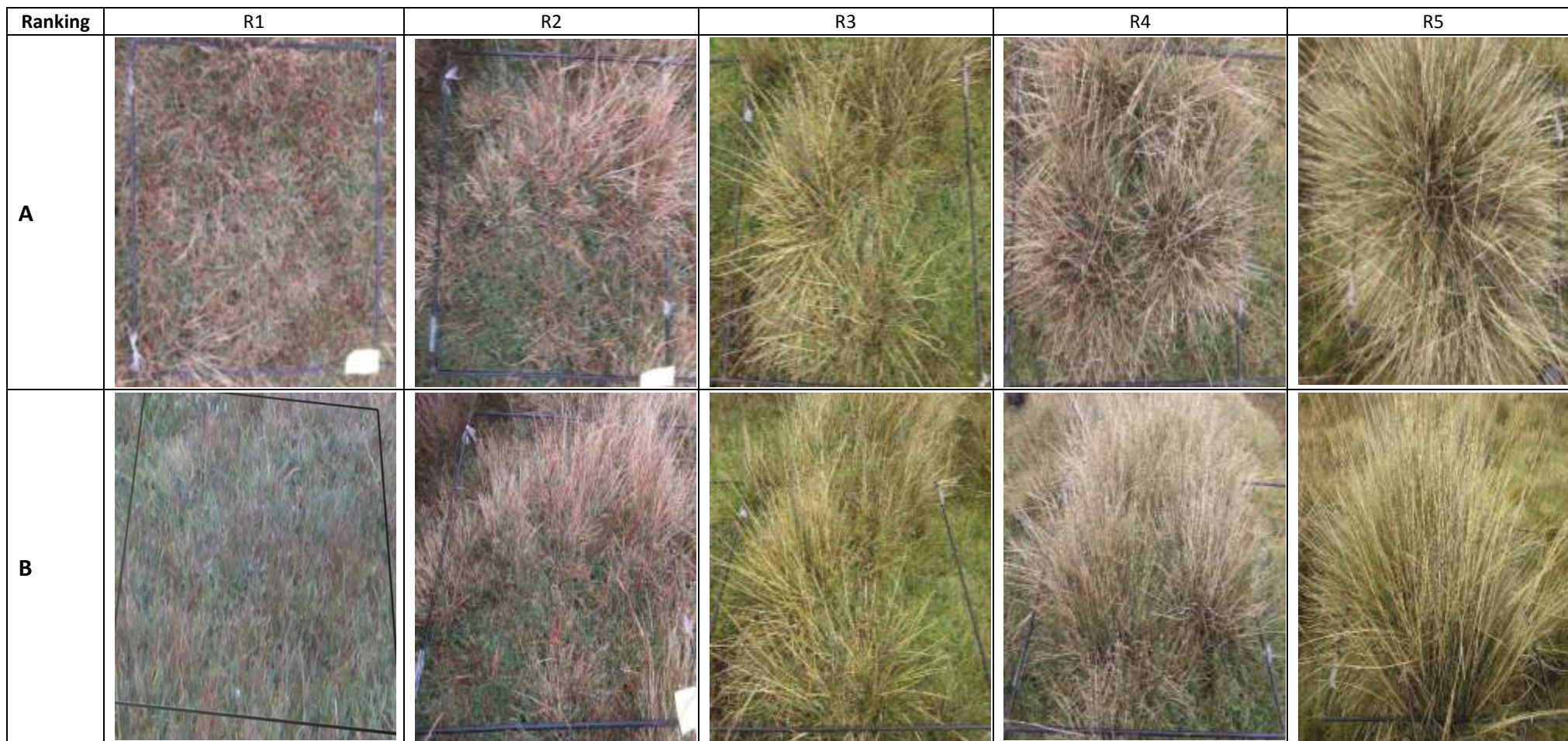


Figura 2. Fotografías de los cuadrantes establecidos como rankings de biomasa para los registros de 1 al 5. (A) Vista superior (B) Vista lateral

3.5 Extracción de datos de NDVI y EVI de imágenes del sensor MODIS

Se procedió a seleccionar y descargar el producto del sensor MODIS más adecuado al tipo de estudio, para este caso, se utilizó el producto compuesto de 16 días MOD13Q1 que tiene una resolución espacial (tamaño de pixel) de 250 x 250 m y expresa valores de índices de vegetación NDVI y EVI. La imagen seleccionada corresponde a la fecha del 08 de abril del 2016, fecha anterior más próxima al momento en el que se realizó la evaluación de campo. Debido a que las imágenes de este producto de MODIS están expresadas en un sistema de coordenadas Sinusoidal fue necesario convertirlas al sistema de coordenadas UTM que se utilizó en este estudio. Esto se hizo mediante la herramienta MODIS Reprojection Tool (MRT) de descarga gratuita. Seguidamente se procesó la imagen con el software ArcGIS 10.4 utilizando en primer lugar la herramienta “Extraer por máscara” para recortar la imagen raster y poder trabajar solo con nuestras áreas seleccionadas. Seguidamente se superpusieron los puntos centrales generados anteriormente para ubicar y poder extraer la información de NDVI y EVI respectiva con la herramienta “Extraer valores a puntos” que extrae la información de un raster a un punto o grupo de puntos seleccionado. Todo el proceso realizado se esquematiza en la Figura 3.

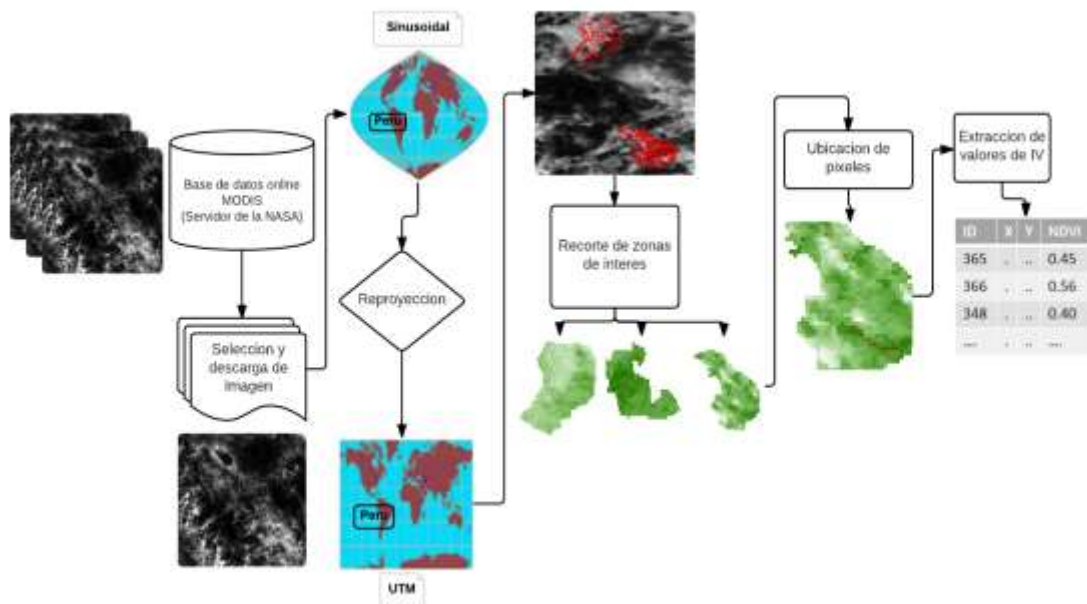


Figura 3. Esquema de procesamiento del producto MOD13Q1 de MODIS para extraer información de Índices de Vegetación

3.6 Análisis estadístico

Para los análisis de regresión lineal simple se utilizaron las herramientas del programa Microsoft Excel 2013, específicamente para el procesamiento de los datos de estimación de biomasa disponible, mientras que se hizo uso del software Econometric Views (EViews 8) para el procesamiento de las regresiones entre las variables en estudio del presente trabajo.

3.6.1 Curva de calibración para biomasa

Se construyeron curvas de calibración mediante una regresión lineal simple para estimar la relación entre el registro del ranking (1 a 5) y la cantidad de biomasa en materia seca, el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) se utilizó para generar la ecuación matemática correspondiente. De acuerdo a recomendaciones de Haydock & Shaw, 1975 la forma de la ecuación y la representación de los datos debe ser lo más parecida a una función lineal, esto nos permite afirmar que se hizo una calibración adecuada. La bondad del ajuste de la curva de calibración debe obtener un coeficiente de determinación alta (por ejemplo: > 0.75). La forma de la ecuación utilizada para transformar los datos de puntaje a materia seca fue la siguiente:

$$Y = \alpha_0 X + \alpha_1$$

Donde:

Y: Valor de biomasa en gramos de materia seca/0.25 m²

α_0 : Pendiente de la grafica

X: Puntaje (escala 1 a 5)

α_1 : Intercepto

Se procedió a promediar los 10 puntajes de cada unidad de muestreo, el valor obtenido para cada pixel fue convertido a materia seca usando las ecuaciones de las curvas de calibración construidas previamente. Finalmente se extrapolaron todos los valores obtenidos multiplicándolos por el factor 40 para obtener el valor de biomasa verde expresado en Kilogramos de Materia Seca/ Hectárea.

3.6.2 Curva de calibración entre biomasa verde y NDVI

Se utilizó el método de regresión lineal simple para evaluar la relación existente entre las variables en estudio, siendo la variable dependiente: cantidad de biomasa verde, expresada en Kg de MS por/Ha; y la variable independiente: Índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI). La ecuación de regresión tendrá la siguiente forma lineal:

$$Y = \beta_0 X + \beta_1$$

Donde:

Y: Valor de biomasa verde en Kg de Materia Seca /Ha

β_0 : Pendiente de la grafica

X: Valor de NDVI

β_1 : Intercepto

La regresión línea se calculó por el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), y para la correlación entre las variables se utilizará el coeficiente de correlación de Pearson (R), finalmente para determinar cuánto de la variabilidad de la biomasa puede ser explicado por el NDVI se utilizará el coeficiente de determinación (R^2).

3.6.3 Curva de calibración entre biomasa verde y EVI

Se utilizó el método de regresión lineal simple para evaluar la relación existente entre las variables en estudio, siendo la variable dependiente: cantidad de biomasa verde, expresada en Kg de MS por/Ha; y la variable independiente: Índice de vegetación mejorado (EVI). La ecuación de regresión tendrá la siguiente forma lineal:

$$Y = \beta_0 X + \beta_1$$

Donde:

Y: Valor de biomasa verde en Kg de Materia Seca /Ha

β_0 : Pendiente de la grafica

X: Valor de EVI

β_1 : Intercepto

La regresión línea se calculó por el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), y para la correlación entre las variables se utilizará el coeficiente de correlación de Pearson (R), finalmente para determinar cuánto de la variabilidad de la biomasa puede ser explicado por el NDVI se utilizará el coeficiente de determinación (R^2).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Estimación de biomasa aérea en campo

Los valores del ranking de biomasa utilizados para la estimación de biomasa en campo se muestran en el Anexo 2 y Anexo 3. Los valores de biomasa verde en cuadrantes de 0.25m² varían de 42 a 520 gr para pajonales de Canchayllo; 111 a 1,028 gr en Racco y entre 242 a 882 gr en Tomas. Las categorías menores, como 1 y 2, corresponden a cuadrantes con plantas de menor altura, pero de abundante cobertura; mientras que las categorías mayores, como 4 y 5, corresponden a cuadrantes con plantas de mayor altura, abundante cobertura y una mayor cantidad de mantillo que categorías menores.

Las transectas donde se tomaron las mediciones se ubicaron referencialmente en pajonales representativos en base a una observación del paisaje, teniendo como limite la vista del observador y las consideraciones para seleccionar un área representativa de referencia para el total de una extensión de terreno. Sin embargo, se consideraría que no es lo más adecuado para estudios como este, en el cual se utilizaron pixeles de 6.25 Has de área total como unidades a muestrear (seccionando así las canchas en las que se establecieron las transectas), y generando submuestras con variabilidad propia. Esto puede influir en la precisión al usar un método de doble muestreo para estimar la biomasa disponible en estas muestras del área total, con lo cual se considera el realizar una inspección previa de las zonas a evaluar para determinar la cantidad de calibraciones a realizar en función del total de zonas diferentes. Coulloudon (1999) recomienda que las áreas de estudio deban situarse en un solo tipo de vegetación y en un solo sitio ecológico.

La escala de 5 puntos del ranking fue adecuada para este experimento, ya que el uso de otras escalas como por ejemplo la de 3 puntos no hubiera sido adecuado. Estas escalas se utilizan en situaciones de baja producción (menos de 500 kg / ha) ya que será difícil distinguir entre rankings cuando se usan cuadrantes pequeños, esto debido a que las diferencias entre cuadrantes son sólo de unos pocos gramos. Una solución es utilizar un cuadrante más grande

(Ruyle, 1997). Se pudieron utilizar cuadrantes de 0.5 o hasta de 1 m² pero no se utilizaron en este experimento ya que a medida que se incrementa el tamaño del cuadrante se hace un poco más difícil para el observador poder detectar las diferencias entre cantidades de biomasa a rankear, más aún si existen diferentes tipos de vegetación en el área, como parches de herbáceas o presencia de arbustivas.

Las ecuaciones de regresión para biomasa disponible y observación visual para las zonas de Canchayllo, Racco y Tomas, se muestran en las Figuras 4, 5 y 6 respectivamente. Los coeficientes de determinación de estas ecuaciones son mayores a 0.75, con bastante semejanza a una función lineal, que de acuerdo al método de rendimientos comparativos de Haydock & Shaw (1975) es deseable para asegurar la precisión de las estimaciones posteriores. Correlaciones menores reducen la precisión del método.

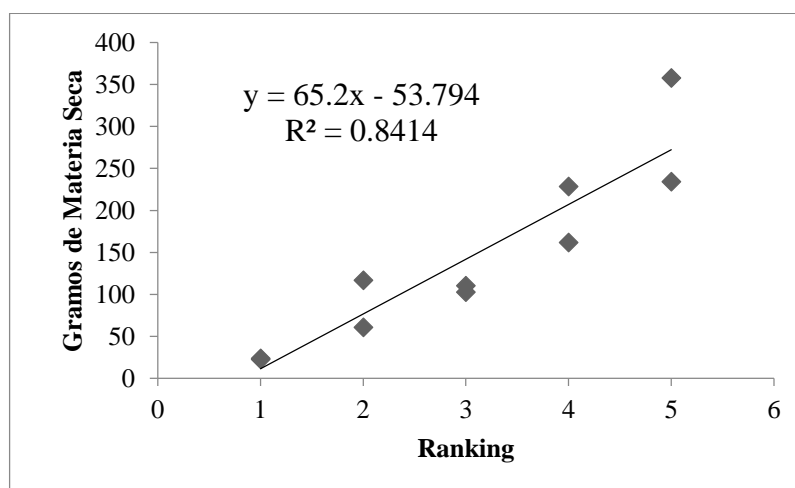


Figura 4. Ecuación de regresión lineal en base a cuadrantes de referencia de la zona de Canchayllo

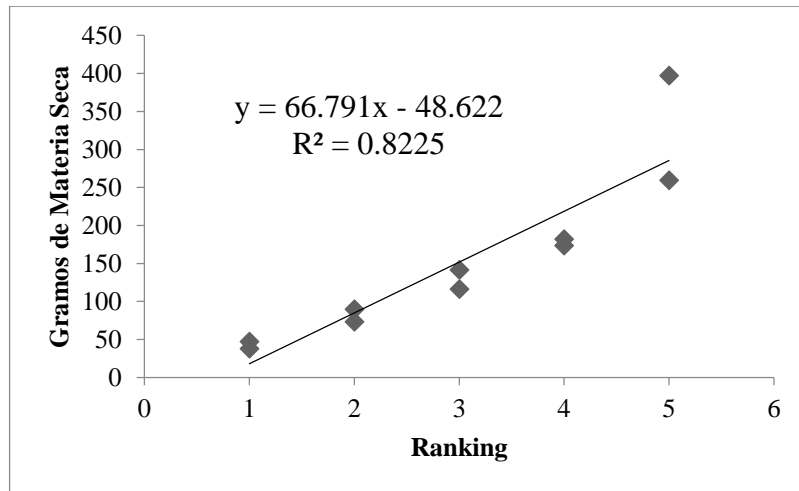


Figura 5. Ecuación de regresión lineal en base a cuadrantes de referencia de la zona de Racco

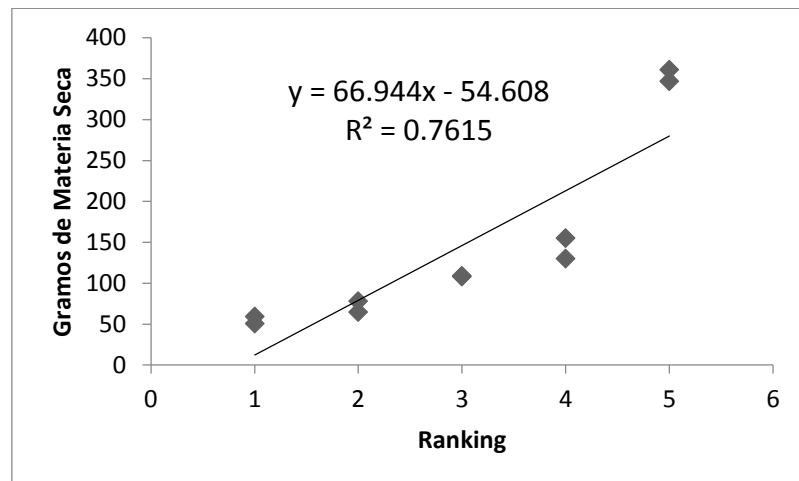


Figura 6. Ecuación de regresión lineal en base a cuadrantes de referencia de la zona de Tomas

Ruyle (1997) encontró que el método de rendimientos comparativos produjo resultados muy similares al corte y separación manual en todas las evaluaciones realizadas y para todos los observadores en campo en cuatro praderas semi áridas del sur de Arizona y en dos arbustales de piñón y *Juniper sp.* del norte de Arizona, utilizando cuadrantes de 40 x 40 cm para estimar de 50 a 100 muestras que luego fueron cortadas. Las estimaciones del método de rendimientos comparativos estaban generalmente dentro del 10% de las estimaciones cortadas con una desviación máxima del 19%. Típico de un muestreo de biomasa, los intervalos de confianza fueron bastante amplios.

Una comparación fue realizada entre el método directo o de corte de pasto con tres métodos indirectos para estimar el peso del forraje: el medidor de pasto por capacitancia (MC), el plato medidor de pastos (PM) y la estimación visual por el método de rendimientos comparativos (EV). El experimento fue conducido en el Centro de Investigación y extensión Agrícola del Valle de Shenandoah (SVAREC), en Steeles Tavern, Virginia, en seis potreros de festuca alta durante 2 años. Se utilizó para el método de EV un cuadrante de 0.25 m² para muestrear el potrero y se construyó su ecuación de calibración con 30 puntos, usando cuadrantes de referencia de 0.25 m². Se obtuvo valores de biomasa disponible en promedio entre 1,558 y 3,559 Kg de MS/Ha para el periodo de evaluación de 2 años. El coeficiente de determinación para la ecuación de calibración del método de EV fue de 0.862. Los contrastes mostraron que el peso del forraje obtenido por el MD fue sobreestimado ($P < 0.01$) por los tres métodos indirectos. La intensidad de muestreo, así como el tamaño, y la forma del cuadrante tienen papeles importantes cuando se usa el método de corte directo mientras que, la exactitud de la ecuación de calibración y el tamaño de muestra son elementos clave cuando se utiliza alguna técnica de doble muestreo (López – Guerrero *et al.*, 2011).

Los resultados de biomasa obtenidos a partir de las ecuaciones de regresión se muestran en las tablas 4, 5 y 6 para las zonas de Canchayllo, Racco y Tomas respectivamente. Teniendo que para los pixeles evaluados dentro de estas zonas los valores de biomasa oscilan en un rango de entre: 1,108 a 6,455; 2,063 a 8,207 y 3,037 a 7,188 Kilogramos de materia seca por hectárea respectivamente. Estos rangos de biomasa disponible se consideran altos debido a una posible sobreestimación del método de rendimientos comparativos (Ruyle, 1997; López – Guerrero *et al.*, 2011). La sobreestimación podría estar asociada al tipo de muestreo, debido al uso de transectas ubicadas dentro de cada pixel y a la cantidad de observaciones que se realizaron por cada pixel para determinar su puntaje. Si bien en este estudio se utilizaron 10 puntos en cada transecta para promediar cada puntaje, estos pudieron no ser suficientes para determinar el valor de biomasa disponible del campo. Una forma de corregir la precisión del método para algunos tipos de vegetación es el uso del método del ranking de peso seco (DWR) de 't Mannetje & Haydock (1963). En este método las proporciones en peso seco de las especies se estiman desde su primer, segundo y tercer ranking en peso seco en cuadrantes simples. La corrección del rendimiento de Haydock & Shaw (1975) se utiliza adicionalmente para resolver el problema de las respectivas subestimaciones y sobreestimaciones de las proporciones de peso seco de especies de alto y bajo rendimiento cuando éstas crecen en parches (Neuteboom *et al.*, 1998).

Tabla 4: Valores de biomasa estimados para los pixeles de la zona de Canchayllo

Pixel	Puntaje	Biomasa (Kg de MS/Ha)
344	2.95	5541.8
369	2.20	3585.8
370	2.95	5541.8
371	2.75	5020.2
396	2.90	5411.4
397	2.60	4629.0
395	3.30	6454.6
399	2.60	4629.0
426	2.90	5411.4
427	2.00	3064.2
453	2.65	4759.4
428	1.50	1760.2
454	1.55	1890.6
455	1.70	2281.8
480	1.70	2281.8
481	2.90	5411.4
482	1.25	1108.2

Tabla 5: Valores de biomasa estimados para los pixeles de la zona de Racco

Pixel	Puntaje	Biomasa (Kg de MS/Ha)
350	2.35	4333.5
351	3.30	6871.5
402	3.45	7272.3
605	2.60	5001.4
625	1.60	2329.7
626	3.80	8207.4
643	1.50	2062.6
165	2.60	5001.4
292	2.85	5669.3
293	3.05	6203.6
325	2.75	5402.1
326	3.50	7405.9
327	3.70	7940.2
357	3.75	8073.8
358	3.45	7272.3

Tabla 6: Valores de biomasa estimados para los pixeles de la zona de Tomas

Pixel	Puntaje	Biomasa (Kg de MS/Ha)
783	1.95	3037.3
800	2.05	3305.1
197	3.20	6384.5
169	2.70	5045.6
170	2.55	4644.0
172	3.05	5982.8
171	3.00	5849.0
191	2.05	3305.1
192	1.95	3037.3
217	3.10	6116.7
242	3.50	7187.8
269	3.20	6384.5
296	2.50	4510.1
268	2.45	4376.2

El rango de valores de biomasa encontrado para la zona de estudio fue mayor a los encontrados en el estudio de Squella *et al.* (1990), que obtuvo valores entre 491 y 4881 Kg de MS/Ha utilizando el método de rendimientos comparativos en praderas de *Phalaris aquatica* y *Trifolium subterraneum* en la zona mediterránea subhúmeda de Chile a 304 m.s.n.m. La diferencia en rendimientos se debería no sólo a la vegetación predominante, sino también al tamaño de cuadrantes de referencia de 1 m² y al número de muestras (40 cuadrantes en total, a diferencia de los 10 cuadrantes rankeados visualmente por pixel. Este esquema de muestreo resultó en un mayor coeficiente de determinación (0.974) y una pendiente de 0.887, indicando que el método de rendimientos comparativos sobreestima la disponibilidad de biomasa de la pradera en un 11% (Squella *et al.*, 1990).

Alonso-Díaz *et al.* (2007) estimó la respuesta productiva de una pradera nativa con dominancia de los géneros *Paspalum*, *Axonopus*, *Cynodon*, *Desmodium* y *Calopogonium*, bajo pastoreo rotacional intensivo, con ganado Cebú Brahman, desde junio de 1994 a mayo de 1997. La disponibilidad de materia seca antes y después del pastoreo se estimó en cada división, por medio de la técnica del rendimiento comparativo (Haydock & Shaw, 1975), usando cinco puntos para la ecuación de calibración de calificación visual vs. Rendimiento de materia seca (RMS), y ochenta calificaciones visuales del RMS por división. El área del

cuadrante utilizado para elaborar la ecuación de calibración y las calificaciones visuales fue de 0.25 m² (0.5 m x 0.5 m). Los muestreos se realizaron en seis divisiones cuya área (por división) estaba en un rango de 2.5 a 3.9 ha. La MS presente, antes y después del pastoreo en sequía (marzo-junio) fue de 2,135 y 1,402 kg/ha respectivamente, mientras que en lluvias (julio-octubre) fue de 2,844 y 1,864 kg/ha respectivamente. Estos valores fueron menores a los encontrados en este estudio, además de tener una menor cantidad de unidades evaluadas, pero una mayor cantidad de cuadrantes rankeados visualmente por unidad experimental. Las diferencias encontradas también pueden deberse al tipo de plantas predominantes en los potreros evaluados, que son diferentes a los géneros encontrados comúnmente en pajonales altoandinos como: *Festuca*, *Calamagrostis*, *Poa*, *Stipa*, etc.

Ordóñez & Bojórquez (2004) realizaron un estudio de establecimiento de 4 niveles de densidad de siembra de Rye Grass italiano y alfalfa de la variedad “Ranger” sobre una pastura degradada de *L. multiflorum*, *L. perenne*, *D. glomerata*, *Trifolium repens* y *T. pratense* en un campo experimental de la estación experimental IVITA- El Mantaro entre marzo y julio del 2002, a una altitud de 3320 m.s.n.m. Se evaluó la disponibilidad de forraje mediante el método de rendimientos comparativos y se obtuvo como resultado a la menor densidad de siembra 556 Kilogramos de materia verde por hectárea y a la mayor densidad de siembra 4831 Kilogramos de materia verde por hectárea. Estos valores son menores a los encontrados en las tres zonas de evaluación, muy posiblemente a una sobreestimación del método, junto con los otros factores ya mencionados anteriormente.

4.2 Valores de NDVI de MODIS

Los valores de NDVI extraídos de las imágenes del sensor MODIS (correspondiente al 08 de abril del 2016) para cada uno de los pixeles de las tres zonas de estudio se muestran en la tabla 7. Se obtuvieron valores de entre 0.470 a 0.578 de NDVI para Canchayllo; 0.557 a 0.608 en Racco y entre 0.415 a 0.590 en Tomas. Valores más cercanos a 1 significan pixeles con mayor verdor debido a una mayor actividad de fotosíntesis de las plantas y a una menor presencia de plantas senescentes o marchitas.

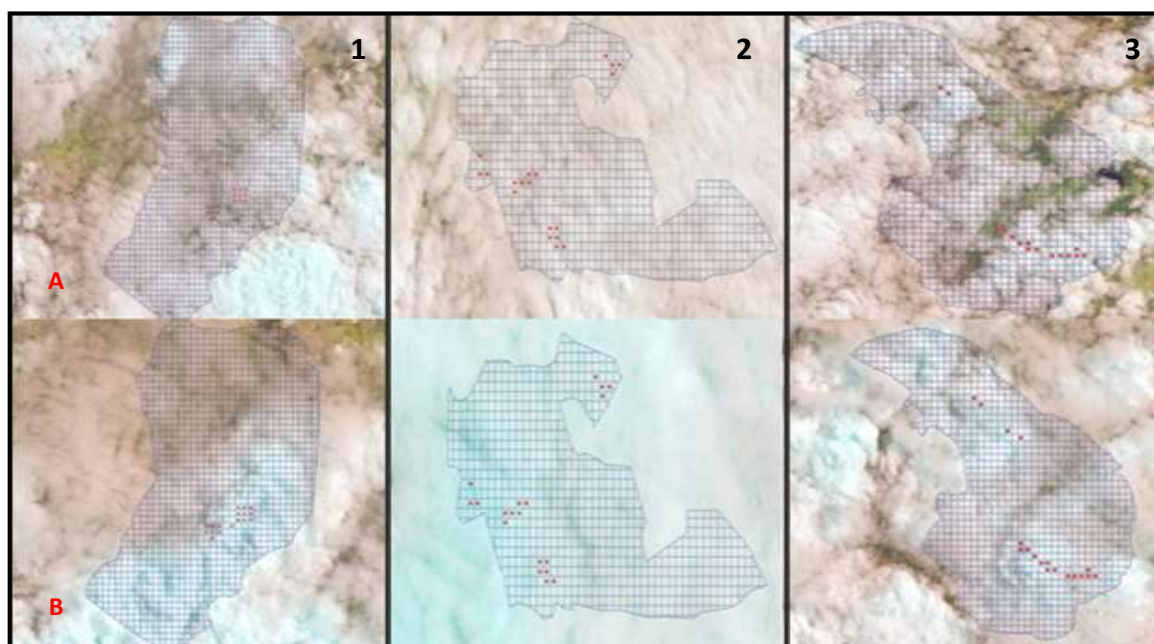
Tabla 7: Valores de NDVI del sensor MODIS para los pixeles de las tres zonas de evaluación

CANCHAYLLO		RACCO		TOMAS	
PIXEL	NDVI	PIXEL	NDVI	PIXEL	NDVI
344	0.578	350	0.605	783	0.415
369	0.525	351	0.605	800	0.455
370	0.561	402	0.608	197	0.559
371	0.504	605	0.557	169	0.563
396	0.561	625	0.557	170	0.585
397	0.490	626	0.557	172	0.597
395	0.528	643	0.557	171	0.592
399	0.469	165	0.577	191	0.499
426	0.468	292	0.595	192	0.535
427	0.470	293	0.595	217	0.495
453	0.514	325	0.598	242	0.527
428	0.524	326	0.599	269	0.547
454	0.481	327	0.585	296	0.590
455	0.523	357	0.596	268	0.539
480	0.478	358	0.608		
481	0.493				
482	0.495				

Valores de NDVI del sensor AVHRR del satélite NOAA correspondiente al periodo octubre 1992 a setiembre 1993, en pastizales del altiplano peruano-boliviano (pajonales y césped de puna), sostenidos solo por lluvias estacionales, variaron entre 0.2 a 0.6 (Zorogastúa-Cruz *et al.*, 2012) durante ese periodo. Los valores del AVHRR son menores a los encontrados en este trabajo debido no sólo a que corresponde a zonas diferentes sino también a que el producto NDVI del sensor MODIS es obtenido a partir del promedio de los datos de 16 días anteriores a la fecha de liberación del producto. Estos promedios consideran datos de pixeles que no tengan mucha interferencia de nubes, en caso de tenerlas, como por ejemplo en caso de dos o tres días nublados consecutivos, los datos del pixel correspondientes a eso días son descartados. Pixeles con pocas nubes o muchas también son una fuente de error en las lecturas del sensor y esto se ve incrementado durante el periodo de lluvias (noviembre a mayo), dentro del cual se encuentran las fechas en las que se llevaron a cabo los muestreos en campo. Por ejemplo, entre el 20 de marzo y el 5 de abril del 2016 se puede observar en imágenes del satélite LANDSAT 8 OLI que existieron capas de nubes bastante grandes sobre los pixeles evaluados (Figuras 7). Al ser el dato del pixel utilizado un promedio, este valor

pierde precisión a mayor cantidad de datos descartados tenga, es decir, mientras más días se presentaron capas de nubes y el sensor tomó la imagen en esos instantes, tendremos una mayor influencia de la nubosidad sobre los valores de promedios de reflectancia de la vegetación del producto MODIS13Q1.

Sin embargo, este producto de MODIS sigue siendo muy útil para análisis multitemporales, es decir; análisis de imágenes que cubren un rango de tiempo amplio, de varios años o incluso décadas como por ejemplo el estudio de Garcia & Otto, 2015 que realizó un análisis multitemporal basado en imágenes de satélite para determinar patrones espaciotemporales vinculados a las características ecohidrológicas de los Humedales Alto Andinos. La delimitación de los HAA dentro de la zona de estudio se basó en el Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI). Como resultado, se determinó que la cubierta de HAA representa el 25% de la superficie y que la varianza en la extensión espacial de los HAA perennes puede ser explicada por la varianza de la cubierta de nieve entre los años 2000 y 2009.



(1) Canchayllo, (2) Racco y (3) Tomas

Figura 7. Imagen del sensor Landsat 8OLI de las zonas de evaluación para las fechas de (A) 20 de marzo y del (B) 5 de abril del 2016

4.3 Valores de EVI de MODIS

Los valores de EVI extraídos de las imágenes sensor MODIS (correspondiente al 08 de abril del 2016) para cada uno de los pixeles se muestran en la tabla 8. Se obtuvieron valores de entre 0.275 a 0.341 de EVI para Canchayllo; 0.427 a 0.481 en Racco y de entre 0.250 a 0.469 en Tomas. Al ser el EVI un índice modificado a partir del NDVI, sus valores tienen el mismo rango (de -1 a +1), teniendo este índice la ventaja de no saturarse cuando se encuentran grandes cantidades de biomasa. Estos valores mientras más cercanos a 1 significan que existe una mayor cantidad de plantas saludables y verdes, con poca presencia de plantas senescentes o muertas.

Tabla 8: Valores de EVI del sensor MODIS para los pixeles de las tres zonas de evaluación

CANCHAYLLO		RACCO		TOMAS	
PIXEL	EVI	PIXEL	EVI	PIXEL	EVI
344	0.322	350	0.481	783	0.250
369	0.341	351	0.480	800	0.325
370	0.288	402	0.473	197	0.423
371	0.319	605	0.444	169	0.420
396	0.288	625	0.444	170	0.419
397	0.297	626	0.444	172	0.430
395	0.334	643	0.427	171	0.429
399	0.286	165	0.451	191	0.361
426	0.278	292	0.457	192	0.361
427	0.275	293	0.458	217	0.361
453	0.238	325	0.450	242	0.341
428	0.338	326	0.451	269	0.437
454	0.285	327	0.445	296	0.469
455	0.337	357	0.458	268	0.445
480	0.296	358	0.473		
481	0.319				
482	0.322				

De la misma forma que para los valores de NDVI del sensor MODIS, el EVI proporcionado por este también es un compuesto de 16 días y tiene la misma influencia de factores climáticos, pero por sus características (coeficientes de resistencia de aerosoles, uso de la banda azul) puede dar un valor más acertado y “limpio” de la reflectancia de las plantas dentro del pixel. Un estudio realizado por Heemann *et al.*, 2016 encontró valores que tuvo como objetivo el analizar el uso potencial de los índices de vegetación para discriminar las intensidades de pastoreo en pastizales naturales en el bioma Pampa en Brasil. Se encontraron que los valores de los perfiles temporales de EVI estuvieron entre 0.34 y 0.41 para las unidades experimentales de pastizales naturales manejadas bajo alta moderada y baja intensidad de pastoreo durante el periodo de imágenes evaluado (2000 – 2013), utilizando el producto MODIS13Q1 del sensor MODIS. Si bien estos valores son menores a los encontrados en el presente estudio, esto se debe a la diferencia en el tipo de vegetación asociada al régimen climático de la zona. Otros productos de MODIS como el producto MOD3A3 utilizado por Lin, 2012 se presenta como un conjunto de datos global con 1 km de resolución espacial y un mes de resolución temporal, siendo extraídos para estudiar la dinámica de los cambios de la vegetación en 7 regiones de China en el periodo del 2001 al 2011, se extrajeron valores mensuales de EVI que fue de 0,3275 a 0,3408, con un mínimo de 0,3275 en 2001 y un máximo de 0,3408 en 2006. Se utilizaron pixeles de todas las regiones teniendo diferentes tipos de coberturas vegetales evaluadas (como arbustales, praderas cultivadas, cultivos agrícolas, bosques y fuentes de agua).

4.4 Análisis de regresión entre NDVI y biomasa

Utilizando los datos recabados para cada zona se correlaciono la variable independiente NDVI con la variable dependiente de biomasa aérea verde expresada en Kg de MS/Ha. Los datos utilizados para construir la gráfica y ecuación se muestran en el Anexo 4 y los resultados de la prueba estadística para determinar el coeficiente de determinación se muestran en el Anexo 5.

Tabla 9: Regresión lineal para la relación NDVI – Biomasa de las tres zonas de evaluación

Zona de evaluación	Unidades de muestra	Ecuación de regresión lineal	Coefficiente de Determinación (R ²)
CANCHAYLLO	17	$y = 421.99x - 113.8$	R ² = 0.1205
RACCO	15	$y = 1166x - 535.56$	R ² = 0.2348
TOMAS	14	$y = 319.06x - 47.342$	R ² = 0.2404

En la tabla 9 se observan coeficientes de correlación de 0.120; 0.235 y 0.240 para la relación NDVI – Biomasa aérea verde en las zonas de Canchayllo, Racco y Tomas respectivamente. Estos coeficientes al ser menores de 0.75 expresan que existe una correlación baja entre ambas variables, además nos indican que la variabilidad del NDVI solo puede explicar de entre el 12 al 24% de la variabilidad de la biomasa encontrada en campo. Esta correlación baja puede deberse también a la poca cantidad de muestra por cada zona de evaluación, teniendo entre 14 y 17 unidades de muestreo estas no fueron significativas, ya que se considera que se requiere un tamaño mínimo de muestra de 30 unidades.

Teniendo en cuenta el criterio estadístico de tener un tamaño de muestra no menor a 30 unidades, toda la data obtenida por zona fue unificada para realizar el análisis. La gráfica de correlación y el coeficiente de determinación de la relación entre ambas variables se muestran en la Figura 8. En esta se muestra la cantidad de muestra utilizada, la ecuación de regresión en forma de una función lineal y la correlación para dicha ecuación que tiene un coeficiente de determinación de 0.31 ($p < 0.01$). Es decir, la variable predictora (NDVI) solo puede explicar un 31% de la variabilidad de los datos de la variable biomasa verde y al ser el valor de este coeficiente menor a 0.75 se considera que existe una relación baja entre ambas variables.

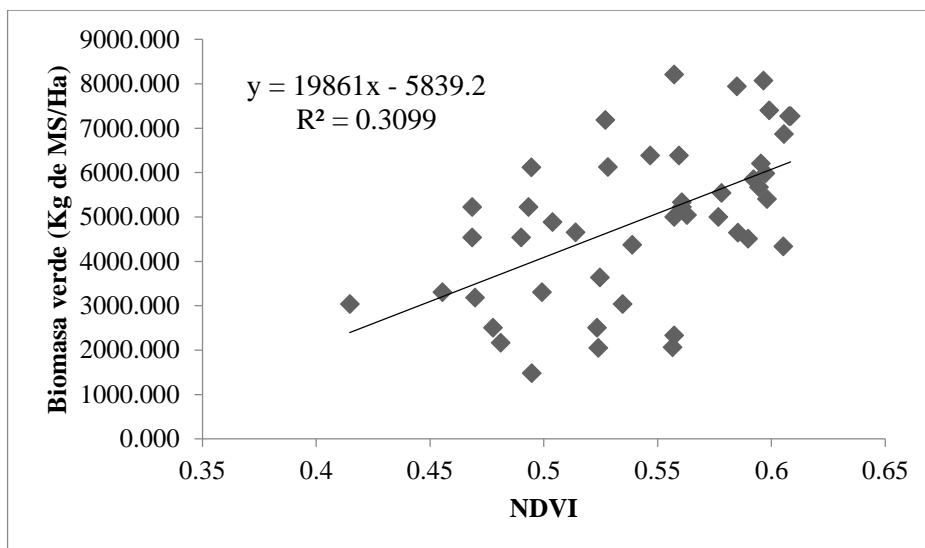


Figura 8. Ecuación de regresión entre NDVI y biomasa para las tres zonas de evaluación

Se probaron diferentes funciones matemáticas para determinar cuál presenta el coeficiente de determinación más alto para la relación entre las variables en estudio. Si bien todas las formas matemáticas de los modelos para la relación NDVI – Biomasa verde fueron significativas ($p < 0.01$), los coeficientes de determinación estuvieron entre 0.277 y 0.328, siendo la forma matemática con menor coeficiente de determinación la forma doble logarítmica o potencial y la mayor fue la forma cuadrática.

EL resultado obtenido en este estudio fue superior al encontrado por Sekiyama *et al.* (2013) realizado en praderas de Mongolia Central, que obtuvo un coeficiente de determinación de 0.23 ($p < 0.05$). Esta diferencia puede deberse a que en cuadrantes de 50 metros en cada zona de muestreo se cortó al azar 3 cuadrantes de 1 m^2 para tomar el dato de biomasa verde en pie, lo cual pudo reducir la precisión con la que se determinó el valor de biomasa disponible de las zonas de muestreo, subestimando o sobreestimando su valor real, reduciendo así el valor del coeficiente de determinación obtenido.

Otros estudios como el realizado por Kawamura *et al.* (2005a) en praderas de la región semiárida de la estepa del Xilingol en Mongolia Interior, encontraron que la relación entre los valores de NDVI de MODIS y la biomasa vegetal observada (gramos de Materia Seca/ m^2) mostraron una correlación significativamente positiva ($R^2 = 0.447$, $P < 0,01$). Esta correlación más alta a la encontrada en la presente investigación puede deberse a que se realizaron 5 cortes por cada sitio de evaluación (siendo 12 sitios en total) y estos fueron

promediados para obtener un solo valor de biomasa disponible, es decir se determinó la relación entre ambas variables con 12 unidades de muerte, además la forma de la ecuación matemática que explica la relación entre ambas variables fue de tipo exponencial, diferente a la forma lineal que se encontró en este estudio.

Evaluaciones similares se realizaron con información de sensores de menor resolución espacial (1 Km) como el NOAA o el AVHRR. Por ejemplo: Kawamura *et al.* (2003) reveló un coeficiente de determinación similar ($R^2 = 0,414$, $P < 0,01$) al encontrado por Kawamura *et al.* (2005a) utilizando información del sensor MODIS al relacionar valores de NDVI del NOAA y la biomasa total de un área mayor (13.000 km²) en Mongolia Interior. Kawamura *et al.* (2003) informaron que los valores de NDVI obtenidos del satélite AVHRR representaron el 36% de la variación en la biomasa total en 2001 en la misma área de estudio de la estepa de Mongolia interior. Kawamura *et al.* (2005b) reportan también que, a partir de una comparación adicional, probaron los valores de NDVI obtenidos del satélite AVHRR en 2002 utilizando este estudio de datos y el mismo método. Como resultado, el NDVI de AVHRR explicó el 62% ($p < 0.001$) de la biomasa viva, 32% ($p < 0.001$) en la biomasa muerta, 65% ($p < 0.001$) en la biomasa total.

Wylie *et al.* 1995 citado por Kawamura *et al.* (2005a), informaron que el NDVI extraído del satélite del NOAA representó el 67-80% de la variación de la biomasa en tres de cada cuatro años de su estudio en Nigeria. Esto se debe a que su área experimental estaba situada al pie de una montaña en una pequeña área (aproximadamente 20 km²) y contenía algunos árboles. Según Thoma *et al.* (2002), los valores de NDVI de AVHRR representaron el 63% de la variación de la biomasa viva y total, 18% de la variación en la biomasa muerta en el norte y sur de los pastizales de Montana.

Medina *et al.* (2009) obtuvieron un modelo de regresión múltiple para praderas del estado de Zacatecas, México en una evaluación de 3 años (2002, 2003 y 2004), en la cual se levantó la información de producción del estrado herbáceo y su correspondiente información de NDVI a partir de las imágenes “SPOT Vegetation”. Se obtuvo un valor de R^2 de 0.66 ($P < 0.01$). Utilizando este modelo se estimó la producción de forraje para áreas de pastizal aplicando el modelo generado obteniendo que más del 60 % de la superficie de pastizal tuvo una producción entre 500 y 1,500 Kg/Ha, lo cual concuerda con los datos de producción obtenidos en campo para ese año.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) derivado de la teledetección y aplicado a pastizales mixtos (conformados por especies de gramíneas, hierbas y arbustivas), no es adecuado para estimaciones mixtas de biomasa de estos ecosistemas, teniendo un coeficiente de correlación no significativo para el total de biomasa (Guo *et al.* 2005). El coeficiente de determinación para la relación de las variables biomasa verde expresado en Kg de Materia seca/Ha y NDVI encontrado en diferentes estudios realizados en praderas de diferentes países oscila en un rango de entre 0.23 hasta 0.66, con esto se puede considerar aceptable el resultado obtenido en este estudio, ya que se encuentra dentro de este rango. La variabilidad y la baja correlación encontrada pudo deberse a las diferencias propias de los pajonales de cada una de las tres zonas de evaluación utilizadas en este estudio, así también el uso de un método de doble muestreo para estimar la biomasa disponible en campo y la influencia de la nubosidad sobre los valores de reflectancia captados por el sensor MODIS.

La relación entre biomasa y NDVI del satélite AVHRR para la estepa de Xilingol, Mongolia Interior (13 910 Km²) durante el verano de 2001, fue estimada en 1189 Kg/ha (Kawamura *et al.*, 2003). Este resultado fue 40% menor que el de Xiao *et al.* (1997), obtenido con Landsat TM para un área mayor de la estepa del Xilingol (29 440 Km²) en el año 1987 que estimaron que la biomasa aérea era de 1780 Kg/ha. Estas estimaciones nos indican que las cantidades de biomasa disponible en promedio son diferentes a las encontradas en pastizales de la puna peruana, esta diferencia en niveles de producción de biomasa pueden ser también un motivo por el cual la relación encontrada fue muy baja. Con niveles de producción similares podría esperarse una correlación similar, el cual no fue el caso en este estudio.

4.5 Análisis de regresión entre EVI y biomasa

Utilizando los datos recabados para cada zona, se correlaciono la variable independiente EVI con la variable dependiente de biomasa aérea verde expresada en Kg de MS/Ha. Los datos utilizados para construir la gráfica y ecuación se muestran en el anexo 6 y los resultados de la prueba estadística para determinar el coeficiente de determinación se muestran en el anexo 7.

Tabla 10: Regresión lineal para la relación EVI – Biomasa de las tres zonas de evaluación

Zona de evaluación	Unidades de muestra	Ecuación de regresión lineal	Coefficiente de Determinación (R ²)
CANCHAYLLO	17	$y = -257.41x + 179.33$	R ² = 0.0308
RACCO	15	$y = 1148.5x - 374.9$	R ² = 0.1301
TOMAS	14	$y = 244.04x + 28.139$	R ² = 0.1713

En la tabla 10 se observan coeficientes de correlación de 0.030; 0.130 y 0.171 para la relación EVI – Biomasa aérea verde en las zonas de Canchayllo, Racco y Tomas respectivamente. Estos coeficientes al ser menores de 0.75 nos indican una relación baja entre ambas variables, además este coeficiente nos indica que la variabilidad del EVI solo puede explicar de entre el 3 al 17% de la variabilidad de la biomasa encontrada en campo. Y de forma similar que la relación con NDVI esta correlación baja puede deberse a la poca cantidad de muestra por cada zona de evaluación, teniendo entre 14 y 17 unidades de muestreo estas no fueron significativas, ya que se requiere un tamaño mínimo de muestra de 30 unidades.

Teniendo en cuenta el criterio estadístico de tener un tamaño de muestra no menor a 30 unidades, toda la data obtenida por zona fue unificada para realizar el análisis. A continuación, se presentan la gráfica de correlación y el coeficiente de determinación de la relación entre ambas variables en la Figura 9. En esta se muestra la cantidad de muestra utilizada, la ecuación de regresión en forma de una función lineal y la correlación para dicha ecuación que tiene un coeficiente de determinación de 0.22 ($p < 0.01$), esto nos indica que la variable predictora (EVI) solo puede explicar un 22% de la variabilidad de los datos de la variable biomasa verde y al ser un coeficiente menor a 0.75 se considera que existe una relación baja entre ambas variables.

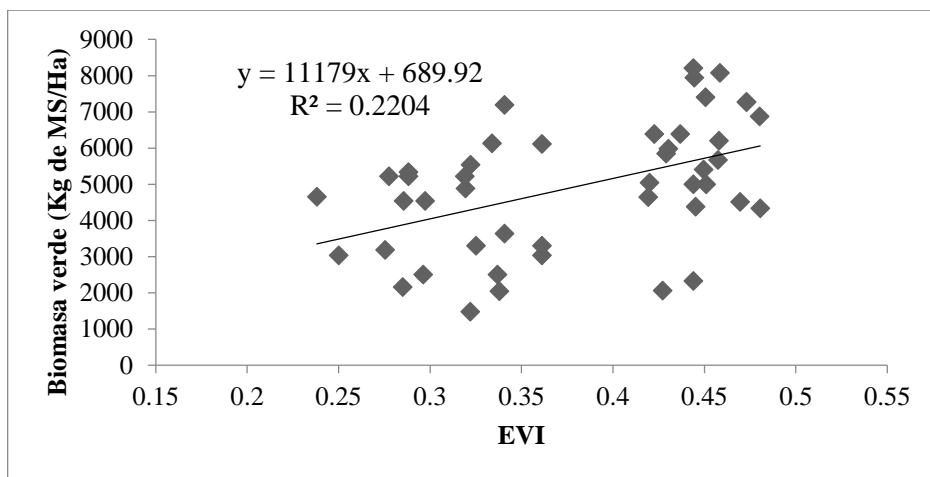


Figura 9. Ecuación de regresión entre EVI y biomasa para las tres zonas de evaluación

Se probaron diferentes funciones matemáticas para determinar cuál presenta el coeficiente de determinación más alto para la relación entre las variables en estudio. Si bien todas las formas matemáticas de los modelos para la relación EVI – Biomasa verde fueron significativas ($p < 0.01$), los coeficientes de determinación estuvieron entre 0.168 y 0.241, siendo la forma matemática con menor coeficiente de determinación la forma doble logarítmica y la mayor fue la forma cuadrática.

Kawamura *et al.* (2005b) utilizó la biomasa viva, biomasa muerta, biomasa total, concentración de proteína bruta (PB) y la CP en pie para estimar la cantidad de biomasa a partir de principios de abril hasta finales de octubre utilizando los valores del índice de vegetación mejorada (EVI) de imágenes de Terra (píxeles de 500 metros). Aplicando modelos de regresión, el EVI representó el 80% de la variación de la biomasa viva, el 42% de la biomasa muerta, el 77% de la biomasa total, el 11% de la concentración de CP y el 74% de la CP permanente. Este coeficiente fue mucho mayor al encontrado en este estudio muy posiblemente debido al tipo de muestreo utilizado en este estudio, además del uso de un método de doble muestreo para la estimación de biomasa que incluye un cierto nivel de error y al efecto de la nubosidad sobre el valor de reflectancia que capta el sensor para producir los valores de EVI de cada píxel. Se esperaría una mejor correlación entre ambas variables, ya que el EVI fue generado a partir de correcciones al NDVI, este también es un compuesto de 16 días con las mismas fechas a partir de los datos de reflectancia de las imágenes tomadas diariamente, es decir a pesar de que sea corregido, se sigue teniendo la influencia del error por efecto de la capa de nubes.

V. CONCLUSIONES

- Los valores de biomasa estimados por el método de rendimiento comparativo oscilaron entre 1,108 y 8,207 Kg de Materia seca/Ha con un coeficiente de determinación en promedio de 0.81, esto permitió estimar la biomasa disponible de forma rápida en una gran cantidad de áreas sin perturbar negativamente el ecosistema con el corte de pasto en pie.
- Los valores de NDVI y EVI del MODIS (MODIS13Q1), correspondientes a los meses de Abril y Mayo expresan valores altos de hasta 0.60 y 0.48 respectivamente mostrando la existencia de abundante cobertura vegetal y gran actividad fotosintética asociada al crecimiento propio de la época.
- La relación entre las variables NDVI – Biomasa verde y EVI – Biomasa verde tuvieron coeficientes de determinación de 0.31 ($p < 0.01$) y 0.22 ($p < 0.01$) respectivamente, debido a la heterogeneidad de la cobertura dentro de pixeles (aproximadamente 6,25 ha por pixel), la variabilidad de cada zona y a la nubosidad propia de la época de muestreo.

VI. RECOMENDACIONES

- Validar el método de rendimientos comparativos en diferentes coberturas vegetales, así como otras metodologías de estimación, incrementando el número de observaciones por cada unidad experimental con el objetivo de mejorar la precisión de la estimación.
- Utilizar imágenes de satélites con mayor resolución espacial como el PERU-SAT; ASTER; LANDSAT o imágenes de DRONES para diferenciar mejor los tipos de vegetación y poder excluir mejor píxeles anómalos o cubiertos por nubes.
- Realizar ensayos similares sobre otros tipos de vegetación, con un incremento del número de píxeles empleados de muestra para mejorar la precisión de la regresión lineal del modelo, así también incluir diferentes índices de vegetación y otras variables que permitan modelar el comportamiento de la biomasa.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.S.R.M. (American Society of Range Management and Agriculture Board). 1962. Basic Problems and Techniques in Range Research. Report of a Joint Committee of the American Society of Range management and Agriculture Board. Pub. N°. 890. Washington D.C. 45-81.
- Ali, I.; Cawkwell, F.; Dwyer, E.; Barrett, B.; Green, S. 2016. Satellite remote sensing of grasslands: from observation to management. *Journal of Plant Ecology* 9(6): 649-671.
- Aggarwal, S. 2004. Principles of remote sensing. *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*, 23 – 38.
- Aguirre, L.; Oscanoa, L. 1985. Mapeo de Sitios, Determinación de la Condición y Estimación de la Soportabilidad Ganadera en la Estación Experimental de Camélidos Sudamericanos La Raya Puno – Perú.
- Alonso-Díaz, M.A.; Castillo-gallegos, E.; Basurto-Camberos, H.; Jarillo-Rodríguez, J.; Valles de la Mora, B. 2007. Respuesta productiva de una pastura de gramas nativas bajo pastoreo rotacional intensivo en clima cálido húmedo. *Avances en Investigación Agropecuaria* 11(2).
- Alzérreca A.H.; Luna Ch.D.; Prieto C.G.; Céspedes E.J. 2003. Estudio de la Capacidad de Carga en Bofedales para la Cría de Alpacas en el Sistema Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salar de Coipasa (T.D.P.S.), Asociación Integral de Ganaderos en Camélidos de los Andes Altos (AIGACAA), La Paz. 290 pp.

- Anderson, G.L.; Everitt J.H.; Richardson A.J.; Escobar D.E. 1993. Using satellite data to map false broomweed (*Ericameria austrotexana*) infestations on south Texas rangelands. *Weed Technology* 7:865–871.
- Bannari, A.; Morin, D.; Bonn, F.; Huete, A.R. 1995. A review of vegetation indices. *Remote sensing reviews* 13(1-2): 95-120.
- Bedunah, D. J.; Sosebee, R.E. 1986. Influence of mesquite control on soil erosion on a depleted range site. *Soil and Water Conservation*
- Bonham, C.D. 2013. *Measurements for Terrestrial Vegetation*, Chapter 8: Biomass. Second Edition. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA, John Wiley & Sons. 239p.
- Breckenridge, R.P.; Kepner, W.G.; Mouat, D.A. 1995. A process for selecting indicators of rangeland health. *Environmental Monitoring and Assessment*. 36:45-60.
- Briske, D.D.; Fuhlendorf, S.D.; Smeins, F.E. 2005. State-and-Transition Models, Thresholds, and Rangeland Health: A Synthesis of Ecological Concepts and Perspectives. *Rangeland Ecology & Management* 58:1 – 10.
- Calvo, V. 2016. “Marco Conceptual y Metodológico para Estimar el Estado de Salud de Bofedales de Alta Montaña”. Tesis para optar el grado de Magister Scientiae en Producción Animal. Lima, Perú, Escuela de Post grado, UNALM. 91 p.
- Ceccato, P.; Dinku, T. 2010. Introduction to remote sensing for monitoring rainfall, temperature, vegetation and water bodies. IRI Technical Report 10-04. Palisades. New York: International Research Institute for Climate and Society.15 pp.

- Coulloudon, B.; Eshelman, K.; Gianola, J.; Habich, N.; Hughes, L.; Johnson, C.; Pellant, M.; Podborny, P.; Rasmussen A.; Robles, B.; Shaver, P.; Spehar, J.; Willoughby, J. 1999. Sampling vegetation attributes (En línea). BLM Technical Reference, 1734-4. Consultado 17 marzo. 2017.
Disponible en:
<https://www.blm.gov/nstc/library/pdf/samplveg.pdf>
- Díaz, J. J. 2015. Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión (en línea). Trabajo de fin de Master, Master en Tecnologías de la información Geográfica. Madrid, España, Facultad de Geografía e Historia, Universidad Complutense de Madrid. Consultado el 05 set. 2017.
Disponible en:
http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Dodd, J.L.; Lauenroth, W.K. 1979. Analysis of the Response of a Grassland Ecosystem to Stress. In: Perspectives in Grassland Ecology. Kendall Hunt Publishing Co. Dubuque, Iowa.
- Dyksterhuis, E.J. 1949. Condition and management of rangeland based on quantitative ecology. *Journal of Range Management* 2 (3): 104 -115.
- Ellenberg, H. 1979. Man's influence on tropical mountain ecosystems in South America. The second Tansley Lecture. *Journal of Ecology* 67: 401-416.
- Flores, E.R. 1991. "Manejo y utilización de pastizales". en: Avances y Perspectivas del Conocimiento de los Camélidos Sud Americanos. Fernández-Baca, S. (ed). Santiago. Chile. FAO. 191-212 pp.
- Flores, E. 1997. Proyectos Tambos Alpaqueros I – Manejo y conservación de praderas naturales. Convenio Laboratorio de Utilización de Pastizales – Pro Defensa de la Naturaleza (PRODENA) Arequipa, Perú. 11 pp.

- Flores, E. 2009. Balanceando Requerimientos de Forraje en Ovinos Bajo Régimen Extensivo. Boletín Técnico Laboratorio de Utilización de Pastizales. Lima. Perú. UNALM. 10 pp.
- Frost, W.E. & Smith, E.L. 1991. Biomass productivity and range condition on range sites in southern Arizona. *Journal of Range Management*. 44: 64-67
- Garcia, E.; & Otto, M. 2015. Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del Río Santa, Ancash, Perú. *Ecología Aplicada*, 14(2): 115-125.
- Gao, X; Huete, AR; Ni, W; Miura, T. 2000. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environment* 74: 609–620.
- Guo, X.; Zhang, C.; Wilmshurst, J. F.; Sissons, R. 2005. Monitoring grassland health with remote sensing approaches. *Prairie Perspectives* 8: 11-22.
- Haydock, K.P.; Shaw, N.H. 1975. "The comparative yield method for estimating the dry matter yield of pasture." *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry* 15: 663-670.
- Heemann, A.; Bremm, C.; Cybis, D.; Oliveira, C.; Schaparini, Pigatto, L.; Carvalho, P.C. 2016. Temporal profiles of vegetation indices for characterizing grazing intensity on natural grasslands in Pampa biome. *Scientia Agricola*, 73(4): 332-337.
- Huete, A; Justice, C; and Liu, H. 1994. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment* 49: 224–234.

- Huete, A.R.; Liu, H.Q.; Batchily, K.; Van Leeuwen, W.J. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 59: 440–451.
- Hunt Junior, E.R.; Everitt, J.H.; Ritchie, J.C.; Moran, M.S.; Booth, D.T.; Anderson, G.L.; Clark, P.E.; Seyfried, M.S. 2003. Applications and Research Using Remote Sensing for Rangeland Management. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69: 675-693.
- ITC (Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente). 2017. ITC's Database of satellites and sensors (en línea, sitio web). Consultado 01 Julio. 2017.
Disponible en <https://www.itc.nl/Pub/sensordb/AllSensors.aspx>
- Jensen, J. R. 2005. *Introductory digital image processing 3rd edition*. In Upper saddle river: Prentice hall.
- Kaufman, Y. J. 1984. Atmospheric effects on remote sensing of surface reflectance. *SPIE Remote Sensing* 475: 20-33.
- Kawamura, K; Akiyama, T; Yokota, H; Tsutsumi, M; Yasuda, T; Watanabe, O; Wang, S. 2005a. Quantifying grazing intensities using geographic information systems and satellite remote sensing in the Xilingol steppe region, Inner Mongolia, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 107(1): 83-93.
- Kawamura, K; Akiyama, T; Yokota, H; Tsutsumi, M; Yasuda, T; Watanabe, O; Wang, G; Wang, S. 2005b. Monitoring of forage conditions with MODIS imagery in the Xilingol steppe, Inner Mongolia. *International Journal of Remote Sensing* 26(7): 1423-1436.
- Landsat Science. 2017. Landsat 8 (en línea, sitio web). Consultado 07 Setiembre.2017.

- Li, Z.L.; Tang, R.L.; Wan, Z.M.; Bi, Y.Y.; Zhou, C.H.; Tang, B.H.; Yan, G.J.; Zhang, X.Y. 2009. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors* 9(5): 3801–3853.
- Li, Z.L.; Wu, H.; Wang, N.; Qiu, S.; Sobrino, J.A.; Wan, Z.M.; Tang, B.H.; Yan, G.J. 2013. Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 34: 3084–3127.
- Lin, Q. 2012. Enhanced vegetation index using moderate resolution imaging spectroradiometers. In *Image and Signal Processing (CISP), 2012 5th International Congress on* (pp. 1043-1046). IEEE.
- Liu, H.Q.; Huete, A.R. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33: 457–465.
- López-Guerrero, I.; Fontenot, J.P.; García-Peniche, T.B. 2011. Comparaciones entre cuatro métodos de estimación de biomasa en praderas de festuca alta. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 2(2): 209-220. Revisado el 21 de junio de 2017.
 Disponible en:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242011000200008&lng=es&tlng=es.
- LPDAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center). 2014. Data discovery - MODIS Overview (en línea, sitio web). Consultado 10 marzo. 2017. Disponible en https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis
- Martínez, A.; Nuñez, E.; Silva, Y.; Takahashi, K.; Trasmonte, G.; Mosquera, K.; & Lagos, P. 2006. Vulnerability and adaptation to climate change in the Peruvian Central Andes: Results of a pilot study. *Proceedings of the 8th*

International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. pp 297-305.

- Matsushita, B; Yang, W; Chen, J; Onda, Y; Qiu, G. 2007. Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors* 7(11): 2636-2651.
- Mas, JF. 2011. Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio (en línea). Primera edición. México, D.F. 313 p. Consultado 22 abril. 2017. Disponible en:
http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/aplicacionesMODIS.pdf.
- Medina, G; Gutiérrez R; Echavarría, F; Amador, M; Ruiz, J. 2009. Estimación de la producción de forraje con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas. *Técnica pecuaria en México* 47(2): 135 – 144.
- Melesse, A. M.; Weng, Q.; Thenkabail, P. S.; Senay, G. B. 2007. Remote sensing sensors and applications in environmental resources mapping and modelling. *Sensors* 7(12): 3209-3241.
- Muñoz, JM; Ponce, AD. 2005. Percepción remota. “Fundamentos de teledetección especial (en línea). México. 62p. Consultado 5 marzo. 2017. Disponible en:
<http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledeteccion%20especial.PDF>.
- Neuteboom, J. H.; Lantinga, E. A.; Struik, P. C. 1998. Evaluation of the dry weight rank method for botanical analysis of grassland by means of simulation. *NJAS wageningen journal of life sciences*. 46(3): 285-304.

- NRCS. 1997. National Range and Pasture Handbook. Grazing Lands Technology Institute, Natural Resource Conservation Service, United States Department of Agriculture. Washington, D.C. 448 p.
- ONERN. 1976. Mapa ecológico del Perú, Guía explicativa. Primera edición. Perú, Lima. 145p.
- Ordóñez, J. & Bojórquez, C. 2004. Establecimiento del *Lolium multiflorum* con cinco densidades sobre pasturas degradadas como una alternativa a la siembra de cultivos agrícolas. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú* 15(2): 87-91.
- ORNL DAAC. 2008. MODIS Collection 5 Land Products Global Subsetting and Visualization Tool. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Accessed September 29, 2016. Subset obtained for MOD13Q1 product at 11.907S, 75.7189W, and time period: 2000-02-18 to 2016-08-28, and subset size: 0.25 x 0.25 km. <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1241>
- Pellant, M; Shaver, P; Pyke, D.A. ; Herrick, J. E. 2005. Interpreting indicators of rangeland health, version 4. Technical Reference 1734-6. US Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Science and Technology Center, Denver, CO. BLM/WO/ST-00/001+ 1734/REV05.
- Pickup, G.; Bastin, G.N., Chewings, V.H. 1994. Remote Sensing based condition assessment for non-equilibrium rangelands under large scale commercial grazing. *Ecological Applications* 4(3):497-517.
- Pineda, EJ. 1996. Ecología del a vegetación y delimitación de sitios de los pastizales de Chacchan – Huaraz. Tesis para optar el grado de Ingeniero Zootecnista. Lima, Perú, UNALM. 190 p.

- Pyke, DA; Herrick, JE; Shaver, P; Pellant, M. 2002. Rangeland Health Attributes and Indicators for Qualitative Assessment. *Journal of Range Management* 55: 584–597.
- Reeves, M. C.; Winslow, J. C.; Running, S. W. 2001. Mapping weekly rangeland vegetation productivity using MODIS algorithms. *Journal of Range Management* 54: 90 -105.
- Riesco, AG. 1972. Evaluación Agrosto – edafológica de las Praderas de la SAIS Cahuide: Unidad << Ingahuasi>>. Tesis para optar el grado de Ingeniero Zootecnista. Lima. Perú. UNALM. pp
- Rodríguez-Moreno, Víctor M., & Bullock, Stephen H. 2013. Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(4), 611-623. Revisado el 22 de abril de 2017.
Disponible en:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013000400010&lng=es&tlng=es.
- Rouse, J. W. 1973 Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFCT Type II Report, Greenbelt, MD, USA.
- Rouse, JW; Haas, RH; Schell, JA; Deering, DW. 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS Proceeding. Third Earth Reserves Technology Satellite Symposium, Greenbelt: NASA SP-351. 3010-3017
- Ruyle, G. B. (Ed.). 1997. Some methods for monitoring rangelands and other natural area vegetation. Cooperative Extension, College of Agriculture, University of Arizona.

- Sekiyama, A; Takeuchia, W; Onob, A; Shimadac, S. 2013. Investigation of grasslands biomass in mongolia with MODIS and ICESAT/Glas measurements (En linea, poster). Institute of Industrial Science, University of Tokyo. LCLUC Science Team Meeting South India. Coimbatore. India. Consultado 1 abril. 2017. Disponible en: http://lcluc.umd.edu/sites/default/files/lcluc_documents/lclucmeeting_coimbatore_sekiyama_0.pdf
- Squella, F.; Maequez, C.; Silva, M.; Mansilla, A. 1990. Validación del método Botanal en una pastura de *Phalaris aquatica* y *Trifolium subterraneum*. I. Evaluación del método del rendimiento comparativo en la estimación de la disponibilidad de la materia seca. *Agricultura Técnica (Chile)* 50(3): 200-207.
- Thoma, DP; Bailey, DW; Long, DS; Nielsen, GA; Henry, MP; Breneman, MC; Montagne, C. 2002. Short-term monitoring of rangeland forage conditions with AVHRR imagery. *Journal of Range Management* 55: 383-389.
- Thompson, J.R. 1968. Effect of grazing on infiltration in a western watershed. *Journal of Soil Water Conservation* 23(2): 63-69.
- Tueller, PT. 1989. Remote sensing technology for rangeland management. *Journal of Range Management* 42(6):442 – 453.
- Vega, E. & Torres, D. 2013. Manejo y conservación de pasturas naturales y cultivos temporales. *Prácticas de adaptación al cambio climático*. Arequipa: DESCO y MINSUR. Arequipa, Perú. 81 p. Consultado 07 de setiembre del 2017. Disponible en: <http://www.descosur.org.pe/wp-content/uploads/2014/12/Manual008.pdf>
- Velásquez, F. 2013. Inventario y uso sostenible de pastizales en la zona colindante a los depósitos de relavera de Ocroyoc - Comunidad San Antonio de Rancas – Pasco. Tesis para optar el grado de Magister en Desarrollo

Ambiental. Lima, Perú, Escuela de Posgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú. 161 p.

- Whitford, W.G.; De Soyza, A.G.; Van Zee, J.W.; Herrick, J.E.; Havstad, K.M. 1998. Vegetation, soil and animal indicators of rangeland health. *Environmental Monitoring and Assessment*. 51:179-200
- Xiao, X.M.; Ojima, D.S.; Ennis, C.A.; Schimel, D.S.; Chen, Z.Z. 1997. Estimation of aboveground biomass of the Xilin River Basin, Inner Mongolia, using Landsat TM imagery. In *Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Center, Research on Grassland Ecosystems (Ed.)*. 130–138.
- Xu, B.; Yang, X.C.; Tao, W.G. 2008. MODIS-based remote sensing monitoring of grass production in China. *International Journal of Remote Sensing* 29:5313–27.
- Yunxiang J; Xiuchun Y.; Jianjun Q.; Jinya L.; Tian G.; Qiong W.; Fen Z.; Hailong M.; Haida Y.; Bin Xu. 2014. Remote Sensing-Based Biomass Estimation and Its Spatio-Temporal Variations in Temperate Grassland, Northern China. *Remote Sensing* 6(2): 1496 – 1513.
- Zhao, F; Xu, B; Yang, X; Jin, Y; Li, J; Xia, L; Chen, S; Ma, H. 2004. Remote Sensing Estimates of Grassland Aboveground Biomass Based on MODIS Net Primary Productivity (NPP): A Case Study in the Xilingol Grassland of Northern China. *Remote Sensing* 6: 5368 – 5386.
- Zorogastúa-Cruz, P.; Quiroz, R.; Garatuza-Payan, J. 2012. Dinámica de los bofedales en el altiplano peruano boliviano. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 8(2): 63-75.

VIII. ANEXOS

Anexo I: Niveles de procesamiento de los productos del sensor MODIS

- Nivel 0: Son los datos brutos sin ningún tratamiento, sólo los artefactos de comunicación han sido eliminados, como por ejemplo los paquetes de sincronización y los encabezados de comunicación entre el satélite y la estación de recepción.
- Nivel L1: Son los datos de geolocalización (identificados como MOD03) que contiene coordenadas geodésicas, información sobre la elevación del terreno, máscara de tierra/agua, ángulo de elevación, cenit y azimut del satélite y del sol.
- Nivel 1A: Son los productos utilizados para la geolocalización, la calibración y el procesamiento. Contienen los niveles de radiancia (MOD01) de las 36 bandas, junto con datos auxiliares del sensor y del satélite como coeficientes de calibración radiométrica y corrección geométrica, parámetros de georreferenciación (efemérides de la plataforma).
- Nivel 1B: Son los productos que contienen las radiancias calibradas y con geolocalización (MOD02) para las 36 bandas generadas por el nivel 1A. Es por lo tanto una imagen radiométricamente corregida y calibrada a unidades físicas. Datos adicionales incluyen estimaciones de calidad, del error y datos de calibración.
- Nivel L2G: Son los productos que contienen variables geofísicas proyectadas en una malla uniforme. Los datos adquiridos durante un periodo fijo de tiempo (12 o 24 horas) son agrupados en una cuadrícula de 1,200 x 1,200 km, llamado tile, en la proyección sinusoidal de igual área.
- Nivel L2: Son los productos que contienen variables geofísicas. Estos productos se generan a partir del producto nivel L1B aplicando correcciones atmosféricas y algoritmos bio-ópticos. Algunos de estos productos se

- presentan en el capítulo a continuación. Estos productos generados pueden ser almacenados en gránulos, que corresponden a 5 minutos de datos colectados por MODIS, de tal forma que cada gránulo es de aproximadamente 2,340 x 2,330 km.
- Nivel 3: Son productos de valor agregado derivados de variables geofísicas mapeadas. En algunos casos, se realiza un remuestreo a una menor resolución espacial que las bandas originales y se elaboran compuestos de intervalos de tiempo establecidos (1, 8, 16 y 30 días). Algunos productos de este nivel son; reflectancia (MOD09), índices de vegetación (MOD13), temperatura y emisividad de la superficie terrestre (MOD11) y puntos de calor e incendios (MOD14).
- Nivel 4: Son los productos generados por la incorporación de los datos MODIS en modelos para así estimar variables geofísicas. Estos productos se generan usando productos nivel L2 y datos auxiliares. Algunos ejemplos de estos productos que se presentan en el capítulo siguiente son el índice de área foliar / fracción de radiación activa fotosintética (MOD15), las coberturas del suelo (MOD12) y la producción primaria (MOD17). Los productos de nivel 0, 1 y 2 son presentados en “gránulos”, que corresponden a los datos sin proyectar tomados durante el paso del sensor durante cinco minutos, lo cual representa un área de aproximadamente 2,340 x 2,330 km. Los datos de niveles 2G, 3, y 4 son distribuidos en mosaicos en proyección sinusoidal llamados “tiles” de aproximadamente 10 x 10 grados. (Mas, 2011)

Anexo II: Datos tomados en cuadrantes de referencia para las tres zonas de evaluación

Zona 1: Canchayllo

FECHA	29/04/2016	SITIO	Puyhuan - T5	PIXEL (Código)	373
CATEGORIA	1	2	3	4	5
%CV M1	70	85	90	98	80
%CV M2	45	90	97	96	92
PESO MUESTRA 1(GR/0.25)	42	106	180	410	520
PESO MUESTRA 2(GR/0.25)	44	204	194	290	340
PROMEDIO(GR/0.25)	43	155	187	350	430
MANTILLO M1(G)	5	9	13	80	185
MANTILLO M2(G)	4	60	28	44	220

Zona 2: Racco

FECHA	01/05/2016	SITIO	Puyhuan - T5	PIXEL (Código)	350
CATEGORIA	1	2	3	4	5
%CV M1	96	97	93	96	99
%CV M2	93	95	94	94	99
PESO MUESTRA 1(GR/0.25)	138	138	230	408	672
PESO MUESTRA 2(GR/0.25)	111	169	280	428	1028
PROMEDIO(GR/0.25)	124.5	153.5	255	418	850
MANTILLO M1(G)	10	19	20	60	70
MANTILLO M2(G)	9	40	30	62	80

Zona 3: Tomas

FECHA	22/05/2016	SITIO	Puyhuan - T5	PIXEL (Codigo)	269
CATEGORIA	1	2	3	4	5
%CV M1	98	99	99	96	98
%CV M2	98	99	96	95	98
PESO MUESTRA 1(GR/0.25)	283	261	375	356	882
PESO MUESTRA 2(GR/0.25)	242	315	378	425	848
PROMEDIO(GR/0.25)	262.5	288	376.5	390.5	865
MANTILLO M1(G)	5	9	13	80	185
MANTILLO M2(G)	4	60	28	44	220

Anexo III: Peso in situ y en materia seca de cuadrantes de referencia para las tres zonas de evaluación

Zona	Ranking	Peso in situ (gr. de biomasa verde/0.25 m²)	Peso en materia seca (gr. de MS/0.25m²)
CANCHAYLLO	R1	42	22.5
		44	23.6
	R2	106	60.7
		204	116.8
	R3	180	102.3
		194	110.3
	R4	410	228.4
		290	161.5
	R5	520	357.9
		340	234.0
RACCO	R1	138	47.1
		111	37.9
	R2	138	73.1
		169	89.6
	R3	230	116.2
		280	141.5
	R4	408	173.5
		428	182.0
	R5	672	259.5
		1028	397.0
TOMAS	R1	283	59.2
		242	50.6
	R2	261	64.6
		315	78.0
	R3	375	108.0
		378	108.9
	R4	356	129.9
		425	155.0
	R5	882	361.0
		848	347.1

Anexo IV: Valores de NDVI y biomasa verde para las tres zonas de evaluación

ZONA	NDVI	Biomasa (Kg MS/Ha)
TOMAS	0.415	3037.312
TOMAS	0.455	3305.088
TOMAS	0.559	6384.512
TOMAS	0.563	5045.632
TOMAS	0.585	4643.968
TOMAS	0.597	5982.848
TOMAS	0.592	5848.960
TOMAS	0.499	3305.088
TOMAS	0.535	3037.312
TOMAS	0.495	6116.736
TOMAS	0.527	7187.840
TOMAS	0.547	6384.512
TOMAS	0.590	4510.080
TOMAS	0.539	4376.192
RACCO	0.605	4333.474
RACCO	0.605	6871.532
RACCO	0.608	7272.278
RACCO	0.557	5001.384
RACCO	0.557	2329.744
RACCO	0.557	8207.352
RACCO	0.557	2062.580
RACCO	0.577	5001.384
RACCO	0.595	5669.294
RACCO	0.595	6203.622
RACCO	0.598	5402.130
RACCO	0.599	7405.860
RACCO	0.585	7940.188
RACCO	0.596	8073.770
RACCO	0.608	7272.278

(continuación)...

CANCHAYLLO	0.578	5541.840
CANCHAYLLO	0.525	3635.464
CANCHAYLLO	0.561	5334.754
CANCHAYLLO	0.504	4881.610
CANCHAYLLO	0.561	5221.468
CANCHAYLLO	0.490	4541.752
CANCHAYLLO	0.528	6127.756
CANCHAYLLO	0.469	4541.752
CANCHAYLLO	0.468	5221.468
CANCHAYLLO	0.470	3182.320
CANCHAYLLO	0.514	4655.038
CANCHAYLLO	0.524	2049.460
CANCHAYLLO	0.481	2162.746
CANCHAYLLO	0.523	2502.604
CANCHAYLLO	0.478	2502.604
CANCHAYLLO	0.493	5221.468
CANCHAYLLO	0.495	1483.030

Anexo V: Análisis de regresión lineal simple para las variables biomasa verde y NDVI

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-5839.242	2433.596	-2.39943	0.0207
NDVI	19860.76	4467.651	4.445458	0.0001
R-squared	0.309935	Mean dependent var	4935.219	
Adjusted R-squared	0.294252	S.D. dependent var	1769.932	
S.E. of regression	1486.899	Prob(F-statistic)	0.000059	
F-statistic	19.7621			

Anexo VI: Valores de EVI y biomasa verde para las tres zonas de evaluación

ZONA	EVI	Biomasa (Kg MS/Ha)
TOMAS	0.250	3037.312
TOMAS	0.325	3305.088
TOMAS	0.423	6384.512
TOMAS	0.420	5045.632
TOMAS	0.419	4643.968
TOMAS	0.430	5982.848
TOMAS	0.429	5848.960
TOMAS	0.361	3305.088
TOMAS	0.361	3037.312
TOMAS	0.361	6116.736
TOMAS	0.341	7187.840
TOMAS	0.437	6384.512
TOMAS	0.469	4510.080
TOMAS	0.445	4376.192
RACCO	0.481	4333.474
RACCO	0.480	6871.532
RACCO	0.473	7272.278
RACCO	0.444	5001.384
RACCO	0.444	2329.744
RACCO	0.444	8207.352
RACCO	0.427	2062.580
RACCO	0.451	5001.384
RACCO	0.457	5669.294
RACCO	0.458	6203.622
RACCO	0.450	5402.130
RACCO	0.451	7405.860
RACCO	0.445	7940.188
RACCO	0.458	8073.770
RACCO	0.473	7272.278

(continuación)...

CANCHAYLLO	0.322	5541.840
CANCHAYLLO	0.341	3635.464
CANCHAYLLO	0.288	5334.754
CANCHAYLLO	0.319	4881.610
CANCHAYLLO	0.288	5221.468
CANCHAYLLO	0.297	4541.752
CANCHAYLLO	0.334	6127.756
CANCHAYLLO	0.286	4541.752
CANCHAYLLO	0.278	5221.468
CANCHAYLLO	0.275	3182.320
CANCHAYLLO	0.238	4655.038
CANCHAYLLO	0.338	2049.460
CANCHAYLLO	0.285	2162.746
CANCHAYLLO	0.337	2502.604
CANCHAYLLO	0.296	2502.604
CANCHAYLLO	0.319	5221.468
CANCHAYLLO	0.322	1483.030

Anexo VII: Análisis de regresión lineal simple para las variables biomasa verde y EVI

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	689.9192	1225.926	0.562774	0.5764
EVI	11179	3169.34	3.527234	0.001
R-squared	0.22043	Mean dependent var		4935.219
Adjusted R-squared	0.202713	S.D. dependent var		1769.932
S.E. of regression	1580.389	Prob(F-statistic)		0.000996
F-statistic	12.44138			

Anexo VIII: Indicadores utilizados para determinar la salud del pastizal

Nro	Indicador	Descripción	Atributos		
			Suelo y estabilidad de sitio	Función hídrica	Diversidad biótica
1	Riachuelos	La frecuencia y distribución espacial de la erosión linear de los riachuelos	X	X	
2	Patrones de flujo de agua	La cantidad y distribución de los caminos de flujo de tierra que se identifican por la distribución del mantillo y la evidencia visual del movimiento del suelo y de la grava.	X	X	
3	Pedestales y /o terracetas	La frecuencia y distribución de rocas o plantas donde el suelo ha sido erosionado y de su base (pedestales) o áreas de deposición de suelos detrás de obstáculos.	X	X	
4	Suelo desnudo	Tamaño y conectividad entre áreas de suelo no protegidas por vegetación, costras biológicas del suelo, basura, vegetación muerta, grava o rocas.	X	X	
5	Cárcavas	Cantidad de cortes o cárcavas en el suelo y la cantidad y distribución de vegetación en el canal.	X	X	

(continuación)...

6	Erosión eólica	Frecuencia de las áreas donde el suelo se quita de debajo de la corteza física o biológica del mismo o alrededor de la vegetación. Frecuencia de las áreas de acumulación del suelo asociadas con objetos estructurales grandes, a menudo plantas leñosas.	X		
7	Movimiento del mantillo	Frecuencia y tamaño del mantillo desplazado por el viento y el flujo de agua por tierra.		X	
8	Resistencia superficial del suelo a erosión	Erosión mediante la incorporación de material orgánico en los agregados del suelo. Se evalúa usando una prueba de slake modificada.	X	X	X
9	Pérdida superficial del suelo	Frecuencia y tamaño de las áreas en las que faltan todos o partes de los horizontes superiores del suelo que normalmente contienen la mayoría del material orgánico del sitio.	X	X	X
10	Composición y distribución de comunidad vegetal en relación con la infiltración y escurrimiento	Composición o distribución comunitaria de especies que restringen la infiltración de agua		X	

(continuación)...

11	Capa de compactación	Espesor y distribución de la estructura del suelo cerca de la superficie (= <15 cm)	X	X	X
12	Grupos Funcionales / Estructurales	Número de grupos, número de especies dentro de los grupos, o el rango de orden de dominancia de los grupos.			X
13	Mortalidad / Decadencia de Plantas	Frecuencia de plantas muertas o en proceso de senescencia			X
14	Cantidad de mantillo	Desviación en la cantidad de mantillo		X	X
15	Producción de biomasa aérea anual	Cantidad relativa al potencial para ese año basado en el clima.			X
16	Plantas Invasoras	Abundancia y distribución de plantas invasoras independientemente de si son malas hierbas nocivas, especies exóticas o plantas nativas cuyo dominio excede en gran medida el esperado en el sitio ecológico			X
17	Capacidad Reproductiva de las Plantas Perennes	Evidencia de las inflorescencias o de la producción de tallos vegetativos en relación al potencial basado en el clima actual.			X

Modificado de Pyke *et al.*, (2002)