

Análisis del comportamiento temporal de la biomasa en pastos del Departamento de Olancho en el contexto del cambio global – fase II

José David Cáceres

Resumen

Según la guía de buenas prácticas del Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC), las técnicas de teledetección son adecuadas para la estimación de los sumideros de carbono, a partir de la estimación de la biomasa. En este trabajo se ha utilizado una serie temporal de imágenes Landsat para estimar la cantidad de biomasa del pasto en el Departamento de Olancho para los años 2010 y 2012. A partir de las imágenes de biomasa obtenidas se ha analizado la evolución de los stocks de carbono. Se realizaron muestreos de campo de biomasa, así como de radiometría, en una parcela ubicada dentro de la zona de estudio para la calibración del modelo. Se aplicó un modelo de regresión lineal entre los datos de campo e índices espectrales para la estimación de las variables. El índice EVI obtuvo los mejores ajustes para la estimación de biomasa ($R^2=0,87$). Se aplicó un factor de carbono de 50% de la biomasa para la estimación de los stocks de carbono.

Palabras clave: Landsat; pastos; índices espectrales; biomasa; stocks de carbono

Abstract

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change Good Practice Guidance (IPCC GPG), remote sensing techniques are suitable for the estimation of carbon sinks, through the estimation of above ground biomass. In this work we used a Landsat time series to estimate the grass biomass in pasture areas in the Department of Olancho for the years 2010 and 2012. From the results of the estimation of biomass, we analyzed the evolution of carbon stocks. Field sampling of biomass were performed, as well as radiometry, in a plot located within the study site for the model calibration. We applied a linear regression model using field data

and spectral indices for estimating the variable. EVI was the best index for biomass estimation ($R^2=0.87$). A carbon fraction of 50% of the biomass was applied for the carbon stock estimation.

Keywords: Landsat; pastures; spectral indices; biomass; carbon stocks

José David Cáceres,(jccaceres@unah.edu.hn) Departamento de Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, Facultad de Ciencias Espaciales, Universidad Nacional Autónoma de Honduras

Introducción

Las masas vegetales juegan un papel fundamental en el ciclo del carbono, fijándolo de la atmósfera y almacenándolo en su biomasa, y constituyen, por ende, uno de los más importantes sumideros de carbono. Ante los compromisos suscritos por los países, incluido Honduras, para la mitigación del cambio climático en la Convención Marco de Las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la cuantificación del balance de carbono, a través de la estimación de la biomasa, se presenta como uno de los principales desafíos al permitir considerar la fijación de carbono como un objetivo más de la gestión forestal. Esto conlleva la estimación del carbono almacenado en la biomasa, así como el seguimiento de la evolución de estos stocks a diferentes escalas temporales.

La mayoría de los países no cuentan con inventarios expresados en términos de biomasa y usan, en lugar de esto, factores de conversión y/o expansión para estimarla. Por lo tanto, se necesitan métodos que brinden estimaciones precisas de la biomasa vegetal y sus cambios, para incrementar nuestro entendimiento del papel que juega la vegetación en el ciclo del carbono, para la contabilización del carbono contenido en ella. (García, Riaño, Chuvieco, & Danson, 2010).

El departamento de Olancho es una de las zonas del país con mayor cobertura forestal en relación a su territorio, sin embargo, en los últimos años las áreas de bosques se han visto amenazadas, entre otros factores, por el incremento de la actividad agropecuaria en la zona, representando un peligro por la posible liberación de carbono a la atmósfera por la pérdida de cobertura forestal. La implementación de sistemas productivos de tipo silvopastoril, se ha presentado como una posible forma de mitigar la indiscriminada pérdida de cobertura forestal en el departamento de Olancho, por lo cual se pretende poner en relación la capacidad de estos sistemas para el almacenamiento de carbono a través de la estimación de la biomasa.

Las zonas de pastos son generalmente sistemas silvopastorales de larga tradición de gestión sostenible, capaces de producir bienes y servicios de calidad de forma eficiente, que, sin embargo, en un entorno de cambio global pueden variar su dinámica y funcionamiento. La estimación de los stocks de carbono en zonas heterogéneas, como los sistemas silvopastorales, utilizando sensores remotos, representa desafíos únicos debido a la presencia de dos estratos de vegetación con un comportamiento muy diferenciado, el pasto y las encinas (Todd, Hoffer, & Milchunas, 1998), por lo cual resulta fundamental contar con información

recopilada en terreno para construir modelos fiables de predicción del comportamiento multitemporal de esta variable.

Debido a la dificultad que presenta la medición de biomasa para la estimación de capacidad de fijación de carbono de la vegetación, en áreas extensas, tanto en tiempo como en recursos, se ha optado por utilizar radiometría de campo (recolección de firmas espectrales) con mediciones en campo de biomasa en parcelas de muestreo, para construir modelos estadísticos que permitan la extrapolación de los resultados para áreas que presenten similares características. Estos modelos son implementados posteriormente gracias a la percepción remota, utilizando sensores de media o baja resolución espacial, según sea el área de estudio que se desea estimar.

La posibilidad de contar con inventarios de biomasa a nivel de pastos, sin utilizar los muestreos destructivos tradicionales, abre una puerta hacia la gestión sostenible de los recursos naturales. Siendo las zonas de pastos generalmente utilizadas para la ganadería, la cual ejerce una gran presión sobre las masas forestales, representa un gran valor agregado para los ganaderos de la zona de estudio el contar con información de capacidad de fijación de carbono en pastos, a partir de la biomasa, como una alternativa más de la ganadería sostenible.

Para estimar la biomasa en pastos en la zona centro-Oriental del país se abordarán los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el comportamiento espectral de los pastos.
- Generar variables espectrales derivados de la información radiométrica recolectada.
- Evaluar la disponibilidad de imágenes de satélite de la zona de estudio.
- Correlacionar las firmas espectrales recolectadas con el comportamiento espectral de las zonas identificadas para validar la presencia de pastos.
- Generar un modelo de regresión lineal para la estimación de biomasa en pastos a partir de índices espectrales.

Antecedentes

En la última década, la teledetección ha brindado información esencial sobre la variación espacial y temporal de las cubiertas vegetales. Ha contribuido a la estimación de importantes variables biofísicas y bioquímicas. Hasta ahora, se han

aplicado con éxito enfoques empíricos basados en índices de vegetación que han obtenido un nivel de precisión satisfactorio para estimar importantes parámetros biofísicos de la vegetación. Estos métodos requieren un conjunto de datos de referencia fiables tomados en campo o laboratorio a través de radiometría para calibrar las fórmulas empíricas en las diferentes áreas y también para validar las estimaciones, especialmente aquellas generadas a nivel regional y global.

En este contexto, es necesario maximizar las capacidades en el uso del radiómetro con que cuenta el Departamento de Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, para lo cual es necesario equipar el laboratorio con los medios necesarios y comenzar con el diseño de una biblioteca de firmas espectrales que permita la identificación del comportamiento espectral de diferentes coberturas, comenzando con especies vegetales de pastos y analizar su evolución temporal en el marco del cambio global. Para garantizar la estandarización en la toma de mediciones, ya sea en campo o laboratorio, es necesario que el Laboratorio cuente con protocolos de medición estandarizadas para cada uno de los escenarios anteriormente planteados.

En el ámbito internacional en las últimas décadas la teledetección ha sido utilizada ampliamente para la estimación de biomasa en pasto (Cho, Skidmore, Corsi, van Wieren, & Sobhan, 2007; Edirisinghe, Clark, & Waugh, 2012; Kogan et al., 2004; Malmstrom et al., 2009; Todd et al., 1998). A escala continental, sensores ópticos de baja resolución espacial, tales como NOAA AVHRR (Kogan et al., 2004) y MODIS (Muukkonen & Heiskanen, 2007) han sido muy utilizados debido a la cobertura de cada escena y a la frecuencia en la adquisición. Sin embargo, para cuantificar biomasa a escalas locales, es necesario contar con información obtenida por sensores con una resolución espacial más fina, tal como Landsat TM y ETM+ (Malmstrom et al., 2009; Meng, Cieszewski, Madden, & Borders, 2007; Todd et al., 1998). Un enfoque tradicional ha sido relacionar índices de vegetación con datos de biomasa tomados en campo a través de modelos estadísticos (Cho et al., 2007; Edirisinghe et al., 2012; Malmstrom et al., 2009; Meng et al., 2007; Muukkonen & Heiskanen, 2007; Todd et al., 1998). Todd et al. (1998) utilizaron los componentes de la transformación Tasseled Cap, así como el NDVI y la banda del rojo, de imágenes Landsat TM, para estimar la biomasa en una zona de estepa de pastos cortos al este de Colorado, USA. A partir de mediciones en una zona con dos tratamientos, pastoreo y sin pastoreo, estos autores utilizaron una regresión de mínimos cuadrados para definir los modelos para la estimación de la biomasa en función de uno o más índices. De la misma forma, Malmstrom et al. (2009) utilizan imágenes Landsat TM y ETM+ para la estimación de la biomasa en pastizales

cuantificando las relaciones entre la biomasa viva medida en campo y los índices espectrales derivados del sensor (cociente simple y NDVI), y usando este modelo calibrado para estimar los valores de biomasa en toda la zona, utilizando las imágenes de satélite disponibles. Destaca la amplia utilización del NDVI en este aspecto, utilizado también por Edirisinghe et al. (2012) derivado de SPOT-4 y SPOT-5 para la predicción de biomasa del pasto en zonas de pastoreo intensivo. Muukkonen and Heiskanen (2007) destacan el potencial de contar con inventarios forestales y relacionarlos con información obtenida de satélites ASTER y MODIS para estimar el volumen en pie y la biomasa sobre grandes áreas de bosque boreal al sur de Finlandia. Estos autores desarrollan modelos de regresión usando información obtenida de los inventarios y relacionándola con información obtenida de satélite de resolución moderada como ASTER, para estimar biomasa sobre áreas de mayor extensión utilizando satélites de menor resolución espacial como MODIS. También los avances obtenidos en la teledetección mediante sensores hiperespectrales han brindado una oportunidad para conocer la potencialidad que brindan este tipo de sensores en la estimación de la biomasa (Cho et al., 2007).

Para la estimación de los stocks de carbono a partir de la biomasa, la FAO propone aplicar una fracción de carbono para convertir la biomasa a carbono (Blackburn, 1998; Marklund & Schoene, 2006). Este valor varía entre el 45% y 53%, utilizándose por defecto, generalmente, un valor de 50%. Cuando se tiene información de la especie sobre la que se quiere estimar el contenido de carbono, se pueden aplicar fracciones más acordes a la mismas (García et al., 2010).

Área de Estudio

El área de estudio abarca las zonas de pastos del Departamento de Olancho (Oriente de Honduras). Y cubren una extensión de 670;749.79, lo que representa aproximadamente un 28% de la extensión total del Departamento (Figura 1).

La climatología de la Región de Olancho es variada, predominando las variantes lluvioso de altura (25.8 %) y muy lluvioso de transición (24.2 %). De acuerdo con la clasificación climática elaborada por el meteorólogo hondureño Edgardo Zúñiga Andrade, la provincia climática "lluvioso de altura" se caracteriza por presentar un período lluvioso de seis meses siendo los más lluviosos junio y septiembre y los más secos febrero y marzo. La humedad relativa es de 72 a 74% con temperaturas de 21°C y 10°C. Por su parte, en la provincia "muy lluvioso de transición" los meses más lluviosos son junio y octubre y los menos lluviosos marzo y abril. La precipitación promedio anual es de 250 a 1200 mm con una humedad relativa de 86% (ANED, 2013).

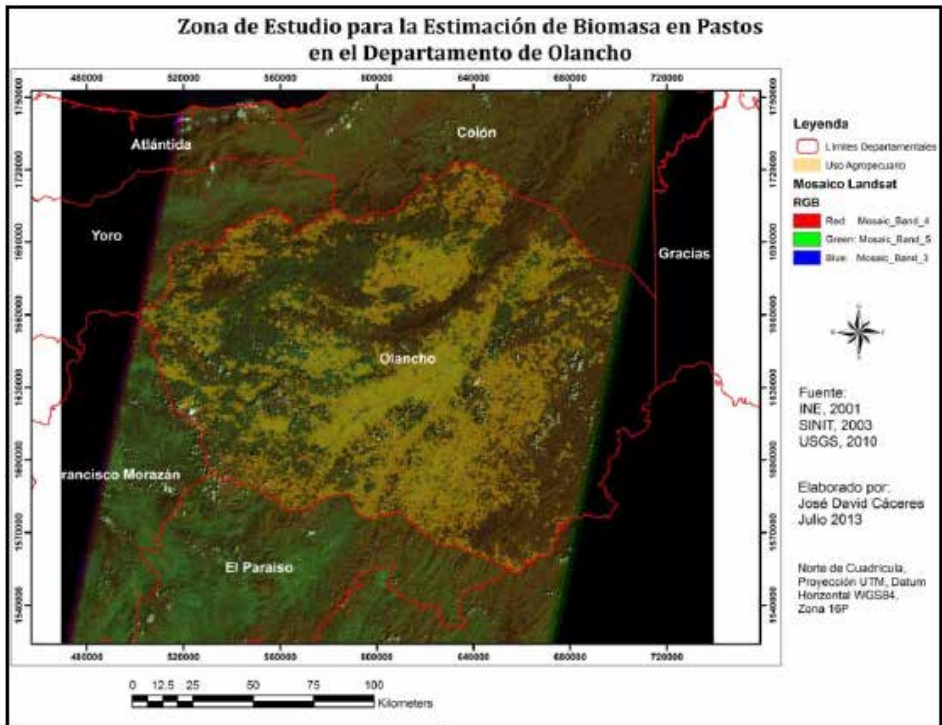


Figura 1. Área de Estudio

Las precipitaciones son muy variadas, el rango extremo de precipitaciones oscila entre 900 mm en los valles occidentales y los 3000 mm de las áreas más orientales. La diferencia estriba en que los primeros están situados en las cuencas intramontañosas a sotavento de los vientos húmedos del este. Por el contrario, las planicies orientales, pertenecientes a las cuencas de los ríos Patuca, Coco o Segovia, están abiertas a la influencia directa del mar Caribe debido a su cercanía y a la ausencia de relieves montañosos apreciables. No obstante el intervalo más común de precipitaciones está comprendido entre los 1300 y los 1700 mm, distribuidos en 8 a 10 meses, siendo Marzo y Abril los meses más secos (ANED, 2013).

Las temperaturas medias progresan paulatinamente de oeste a este de la Región Valles de Olancho, desde los 23,4° C hasta alcanzar los 27° C. Las zonas más calientes son las áreas del valle de Azacualpa y Patuca. Las zonas más frías corresponden con las áreas montañosas de Agalta, y sierra de Patuca. El descenso estacional es de pocos grados pero suficientes para generar brumas y nieblas en áreas elevadas y para generar bosques nublados en los principales sistemas montañosos (ANED, 2013).

La evapotranspiración sigue un patrón inverso a las temperaturas anuales, las zonas montañosas, especialmente en la Sierra Agalta, tienen la evapotranspiración más baja, con valores inferiores a los 1100 mm anuales, mientras que las cuencas bajas de los ríos Patuca y Segovia en la región Biosfera, tienen los valores más altos, con más de 1800 mm anuales. Salvo en áreas orientales muy localizadas, la evapotranspiración en los meses secos supera claramente los valores de precipitación, ocasionando un déficit hídrico estacional. La vegetación en este caso también presenta una estacionalidad en sus formas de vida con una marcada diferenciación fenológica (floración y fructificación en los meses de verano) (ANED, 2013).

El relieve de la Región Valles de Olancho se caracteriza por presentar áreas planas asociadas a valles fluviales de relativa poca altitud, con pendientes menores del 3%, así como zonas onduladas (3 a 60 %) y escarpadas (mayores del 60%). Las áreas con mayor pendiente se encuentran en la franja norte de la región, específicamente en la sierra de Agalta, mientras que las zonas onduladas se ubican en su mayoría hacia el oriente de la región (ANED, 2013).

La altitud de la Región de Olancho oscila entre los 100 msnm de las partes más bajas de las cuencas de los ríos Coco y Patuca, en el extremo oriental del municipio de Catacamas hasta los 2590 msnm de las cumbres de la sierra de Agalta. Se puede observar un promedio de altura por municipio decreciendo desde Guaimaca hasta Catacamas en su parte sur y central (penetrando en el Valle de Olancho) y creciendo según el mismo eje en la franja norte (Sierra de Agalta). A pesar de su relieve montañoso, no se encuentran mesetas ni altiplanos excepto en la parte central de Guaimaca (ANED, 2013).

Metodología

Para la consecución de los objetivos planteado, nuestro análisis se estructuraron en cuatro fases (Figura 2). En primer lugar, aunque en paralelo con las dos siguientes fases, se procedió a la selección y preprocesamiento de las imágenes Landsat, así como al cálculo de diversos índices espectrales. La segunda y tercer fase incluyen el trabajo de campo en el que se realizaron mediciones de la variable biofísica de interés (biomasa), así como de la radiometría de la cubierta de pasto. En la cuarta fase, se generaron modelos empíricos para la estimación de la biomasa a partir de ajustes de regresión lineal entre índices espectrales obtenidos de la radiometría de campo y los valores de las variables medidas en terreno en las mismas fechas. Utilizando estos modelos empíricos, se estimó la cantidad de biomasa a partir de los índices espectrales obtenidos con las imágenes Landast.

Esta cuarta fase se concluye con la estimación de los stocks de carbono a partir de los valores de biomasa.

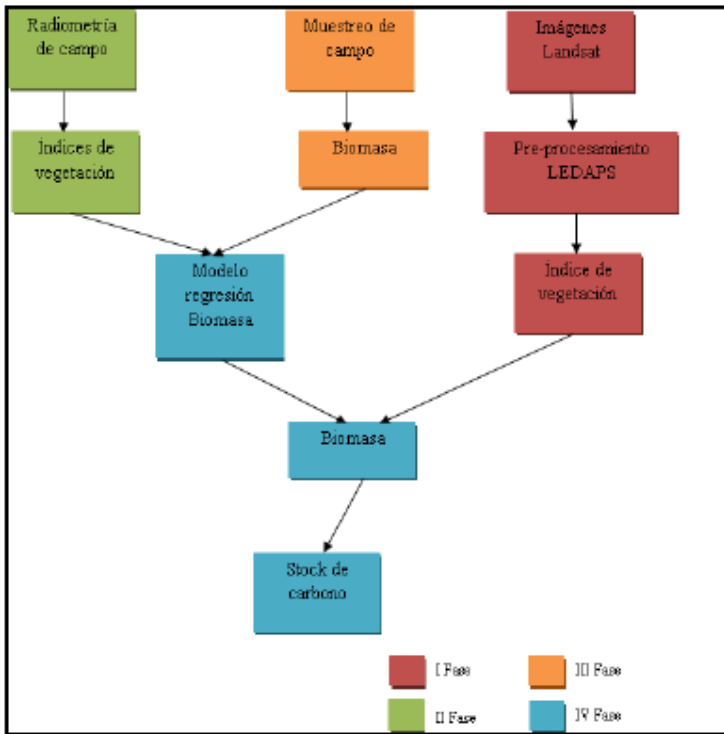


Figura 2. Descripción general del proceso de estimación de biomasa y carbono

- *Selección y pre-procesamiento de Imágenes Landsat*

Para este estudio se utilizó una serie histórica de las escena 017-049 y 017-050 adquiridas por los sensores Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y Thematic Mapper (TM) a bordo del satélite Landsat. Las escenas fueron descargadas del servidor gratuito de imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://glovis.usgs.gov/>). (Tabla 1)

Sensor	Fecha de Adquisición
ETM+	2010
ETM+	2012

Tabla 1. Listado de Escenas Landsat

Una vez obtenidas las escenas a utilizar se procedió a realizar el pre-procesamiento de las imágenes, esto incluye la transformación de los niveles digitales (ND) originalmente captados por el sensor a valores de radiancia y reflectividad, incluyendo las oportunas correcciones del efecto atmosférico. Para este fin se utilizó la herramienta desarrollada por el Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS) (<http://ledaps.nascom.nasa.gov/>).

LEDAPS es un proyecto de la NASA cuyo objetivo es cartografiar las perturbaciones, la regeneración y la conversión forestal permanente en Norteamérica (Masek et al., 2006). Entre las herramientas desarrolladas en el proyecto para el tratamiento y análisis de imágenes de satélite se encuentra el software LEDAPS preprocessing (<http://ledaps.nascom.nasa.gov/tools/tools.html>), originalmente desarrollado en la NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) por Eric Vermote, Saleous Nazmi, Kutler Jonathan y Robert Wolfe. Esta herramienta se ha utilizado para el pre-procesamiento de todas las imágenes Landsat utilizadas en este trabajo.

- *Mediciones de Campo de Variables Biofísicas.*

Con el propósito de calibrar un modelo empírico para la estimación del contenido en biomasa del pasto a partir de las imágenes Landsat, se utilizaron los datos de terreno recopilados mediante giras de campo. Estos datos se refieren a una parcela de 25x25 m localizadas en el área objeto de estudio. Esta parcela fue muestreada en seis ocasiones de febrero a mayo de 2014.. El objetivo de esta selección fue el de obtener datos de biomasa en parcelas/periodos con escasa o nula presencia de material senescente y suelo descubierto que pudieran interferir en la relación entre el dato de biomasa medido en terreno y la respuesta espectral de la vegetación captada por el sensor (Malmstrom et al. 2009).

Las medidas de biomasa se realizaron mediante muestreo destructivo. Se muestrearon 3 cuadrantes de 25x25 cm distribuidos aleatoriamente en la parcela. En cada cuadrante se recogió toda la vegetación cortándola a ras de suelo y se introdujo en una bolsa con cierre hermético. El contenido de biomasa del pasto se calculó como peso de la muestra dividido por el área del cuadrante.

- *Mediciones de radiometría de campo*

En cada una de las parcelas en las que se tomaron muestras de biomasa de la vegetación, se realizaron también mediciones de radiometría sobre el terreno utilizando un espectro-radiómetro ASD FieldspecFR3 que recoge información entre 400 y 2500 nanómetros. Se realizaron dos transectos por parcela, uno NW-SE y

otro NE-SW. Estas mediciones se realizaron en una franja horaria de ± 2 horas respecto al mediodía solar, utilizando una óptica de 25° y a una distancia aproximada de 1 metro sobre el dosel vegetal. Por cada transecto se tomaron una media de 10 mediciones, por lo que se contó finalmente con unos 20 espectros por parcela.

Sin embargo, debido a que la batería del radiómetro no funcionó como se esperaba, las mediciones de radiometría se realizaron en el laboratorio, tomando las mediciones de las muestras recolectadas para la estimación de la biomasa.

Los valores de reflectividad obtenidos con el ASD Fieldspec FR3, disponibles en intervalos de 1 nm, fueron remuestreados a las bandas Landsat-TM utilizando el software ENVI que considera la función de respuesta espectral de cada banda. Con esta información se calcularon diversos índices espectrales propuestos en la literatura para estimar el contenido en biomasa de la vegetación.

- *Calibración de los modelos para la predicción de biomasa.*

Para la estimación de biomasa a partir de los datos de radiometría de campo y de las imágenes Landsat se emplearon en este trabajo los siguientes índices espectrales: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), cociente simple (SR), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) e Índice de Vegetación Mejorado (EVI). Los índices se calcularon utilizando las siguientes expresiones:

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3} \quad (1)$$

$$SR = \frac{TM4}{TM3} \quad (2)$$

$$SAVI = \left(\frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3 + 0.5} \right) * (1 + 0.5) \quad (3)$$

$$EVI = 2.5 * \left(\frac{TM4 - TM3}{TM4 + 6 * TM3 - 7.5 * TM1 + 1} \right) \quad (4)$$

Una vez calculados los índices a partir de los datos de radiometría de campo se realizó un análisis de correlación entre éstos y los datos de biomasa medidos en la parcela para las siguientes fechas: 16 de febrero, 2 de marzo, 22 de marzo, 5 de abril, 20 de abril y 10 de mayo de 2014. El dato de campo para cada parcela fue un promedio de los 3 cuadrantes muestreados en cada una de ellas.

A partir del dato de la medición de biomasa en campo y del valor del índice de vegetación seleccionado se procedió a realizar un análisis de regresión lineal para obtener la ecuación de ajuste del modelo para la estimación de la biomasa. El modelo resultante se aplicó a las escenas Landsat seleccionadas para obtener los valores de biomasa para la serie temporal. Con este valor de biomasa se procedió

a estimar el contenido de carbono aplicando una fracción de carbono del 50% del total de la biomasa.

Resultados y Discusión

Los cuatro índices de vegetación utilizados para la estimación de la biomasa ofrecieron buenas correlaciones con la variable dependiente, con valores superiores a 0,78 (Tabla 2) y con un p-valor < 0,0001. La mejor correlación se obtuvo con el EVI, con un $R^2 = 0,87$, por lo cual fue éste el seleccionado para la estimación de la biomasa.

Indice	R^2
NDVI	0,8299
SR	0,7844
SAVI	0,8599
EVI	0,8739

Tabla 2. Coeficientes de Correlación entre los valores de biomasa medidos en terreno y los índices espectrales calculados a partir de radiometría de campo

Los resultados obtenidos en nuestro estudio son similares a los obtenidos por Malmstrom et al. (2009) para la estimación de biomasa en una zona de pastizales en el valle de Sacramento, California. Los autores obtuvieron un $R^2 = 0,79$ y $0,83$ para el SR y el NDVI respectivamente, realizando las mediciones durante marzo y abril. Todd et al. (1998) obtuvieron correlaciones algo inferiores utilizando modelos de regresión para zonas de pastoreo en un centro experimental en Colorado, estimando la biomasa mediante la aplicación de cuatro índices: GVI ($R^2=0,67$), NDVI ($R^2=0,66$), RED ($R^2=0,64$) y WI ($R^2=0,62$). Kogan et al. (2004) también obtuvieron correlaciones inferiores ($R^2=0,658$) al utilizar el vegetation health (VH), índice derivado del NDVI y la temperatura de brillo, para imágenes NOAA-AVHRR.

La ecuación de ajuste del modelo para la estimación de la biomasa a partir de los valores del EVI aparece en la Figura 3. Esta función fue aplicada a las imágenes EVI calculadas a partir de la serie temporal Landsat, obteniéndose el valor de biomasa para cada uno de los años de estudio (Figura 4).

$$\text{Biomasa} = 44.7944 + 143.685 \cdot \text{EVI}$$

$$R^2 = 0,87$$

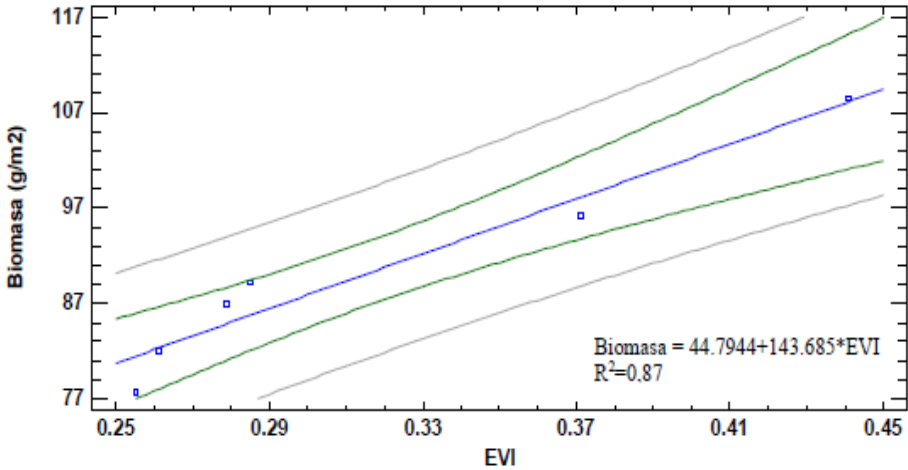


Figura 3. Gráfica del Modelo Ajustado para la Estimación de la Biomasa

Los valores de biomasa obtenidos a nivel de píxel para los dos años analizados presentaron rangos desde valores muy cercanos a cero hasta 5,087.34 Kg/ha, este valor máximo de la serie se registró en el año 2012. En general el valor medio de biomasa para cada píxel los años analizados fue de 1,191.71 Kg/ha. Malmstrom et al. (2009) obtuvieron valores bastante cercanos elevados, registrando valores de hasta 3.640 Kg/ha para su zona de estudio y Kogan et al. (2004) obtuvieron un valor medio anual de 1.400 Kg/ha. En cambio Todd et al. (1998) obtuvieron valores inferiores, registrando un valor máximo de 1.600 Kg/ha.

En general se observa una distribución espacial bastante uniforme de la biomasa en la zona de estudio, aunque aparece un sector al sur del área de estudio en el que se registran valores más altos a lo largo de los años analizados, existiendo una mayor variación en la parte central de la misma. En el ámbito temporal también se observa un patrón homogéneo, con la clara excepción de la parte central de la zona de estudio, en la cual se observa una mayor existencia de biomasa en el año 2012 en comparación con la existente en el 2010.

A partir de los valores de biomasa medios anuales calculados anteriormente, se procedió a aplicar la fracción de carbono del 50% del total de biomasa, para estimar el comportamiento de los stocks de carbono en el pasto en la zona de estudio. Los resultados se muestran en la Tabla 3, teniendo en cuenta que la relación es directa entre la biomasa y el contenido de carbono, la tendencia en el

comportamiento anual de las dos variables es exactamente la misma.

Año	Biomasa Promedio (Kg/ha)	Contenido Carbono (Kg/ha)
2010	1,101.81	550.90
2012	1,281.60	640.80

Tabla 3. Cantidad promedio de biomasa y carbono estimado para la temporada de primavera en cada uno de los años analizados

Para el período de estudio, el contenido de carbono en el pasto osciló entre 550.90 Kg/ha para el año 2010 y 640.80 Kg/ha para el 2012. El valor medio de contenido de carbono para toda los dos años analizados fue de 595.85 Kg/ha. La mayoría de los estudios realizados en la estimación de los stocks de carbono se realizan sobre masas forestales ya que son sumideros con mayor capacidad y mayor estabilidad temporal que las zonas de pastos, por lo cual resulta difícil comparar los valores obtenidos del contenido de carbono en nuestro ecosistema ya que será bastante menor a las cantidades presentes en masas boscosas.

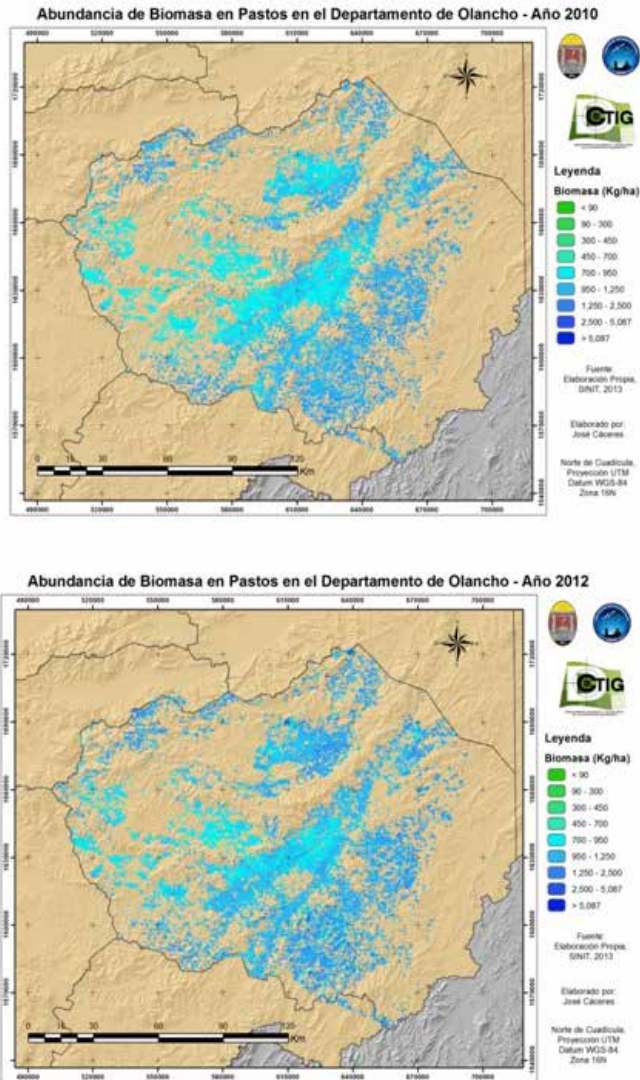


Figura 4. Estimaciones de Biomasa del pasto obtenida a partir de imágenes Landsat para la zona de estudio, 2010 y 2012.

Conclusiones

En este estudio hemos investigado el uso de índices espectrales derivados de los sensores TM y ETM+ a bordo del satélite Landsat para la estimación de biomasa y stocks de carbono del pasto en departamento de Olancho, así como la importancia de contar con información medida en campo para calibrar los modelos de estimación a partir de regresiones simples. Las imágenes Landsat fueron procesadas antes del cálculo de los índices espectrales y se obtuvo que para la predicción de biomasa en pastos, la utilización de un índice como el EVI brinda un modelo más robusto ($R^2=0,87$) frente a otros índices más tradicionales como el NDVI, siendo este valor comparable con resultados obtenidos por otros autores con metodología similar ((Cheng, Zarco-Tejeda, Riaño, Rueda, & Ustin, 2006; Malstrom et al., 2009; Science, Education, & Affairs, 2003; Todd et al., 1998). Estos datos ponen de manifiesto el interés de utilizar imágenes de satélite para la estimación de variables biofísicas, que de otra manera requerirían de costosos muestres de campo, inabordables para medios y grandes territorios.

Resalta el hecho de que los cambios estacionales para los años estudiados, siendo necesaria la incorporación de otras variables para poder determinar que otros factores pueden contribuir a las fluctuaciones de la biomasa a lo largo del tiempo, principalmente variables climatológicas.

Bibliografía

- ANED (2013). *Plan de Desarrollo Regional con Enfoque de Ordenamiento Territorial de la Región Valles de Olancho*. In SEPLAN (Ed.). Honduras
- ANED. (2013). *Plan de Desarrollo Regional con Enfoque de Ordenamiento Territorial de la Región Valles de Olancho*. Honduras.
- Blackburn, G. A. (1998). Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales; an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, 6(3), 273-285.
- Cheng, Y.-B., Zarco-Tejeda, P., Riaño, D., Rueda, C., & Ustin, S. (2006). Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*, 105, 354-366.

- Cho, M. A., Skidmore, A., Corsi, F., van Wieren, S. E., & Sobhan, I. (2007). Estimation of green grass/herb biomass from airborne hyperspectral imagery using spectral indices and partial least squares regression. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(4), 414-424. doi: 10.1016/j.jag.2007.02.001
- Edirisinghe, A., Clark, D., & Waugh, D. (2012). Spatio-temporal modelling of biomass of intensively grazed perennial dairy pastures using multispectral remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 16, 5-16. doi: 10.1016/j.jag.2011.11.006
- García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., & Danson, F. M. (2010). Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment*, 114(4), 816-830. doi: 10.1016/j.rse.2009.11.021
- Kogan, F., Stark, R., Gitelson, A., Jargalsaikhan, L., Dugrajav, C., & Tsooj, S. (2004). Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices. *International Journal of Remote Sensing*, 25(14), 2889-2896. doi: 10.1080/01431160410001697619
- Malmstrom, C. M., Butterfield, H. S., Barber, C., Dieter, B., Harrison, R., Qi, J., . . . Wirka, J. (2009). Using *Remote Sensing to Evaluate the Influence of Grassland Restoration Activities on Ecosystem Forage Provisioning Services*. *Restoration Ecology*, 17(4), 526-538. doi: 10.1111/j.1526-100X.2008.00411.x
- Marklund, L. G., & Schoene, D. (2006). Global assessment of growing stock, biomass and carbon stock. In FAO (Ed.), *Forest resources assessment programme 2005*. Working paper 106. Rome (Italy): Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Masek, J. G., Vermote, E., Saleous, N., Wolfe, R., Hall, F., Huemmrich, K., . . . Lim, T.-K. (2006). A Landsat Surface Reflectance Dataset for North America, 1990-2000. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3, 68-72.
- Meng, Q., Cieszewski, C. J., Madden, M., & Borders, B. (2007). A linear mixed-effects model of biomass and volume of trees using Landsat ETM+ images. *Forest Ecology and Management*, 244(1-3), 93-101. doi: 10.1016/j.foreco.2007.03.056

- Muukkonen, P., & Heiskanen, J. (2007). Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), 617-624. doi: 10.1016/j.rse.2006.10.011
- Science, R. C. f. S., Education, T., & Affairs, U. N. O. f. O. S. (2003). *Remote Sensing and the Geographic Information System: Education Curriculum*: United Nations, Office for Outer Space Affairs.
- Todd, S. W., Hoffer, R. M., & Milchunas, D. G. (1998). *Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices*. *International Journal of Remote Sensing*, 19(3), 427-438. doi: 10.1080/014311698216071