

**PREDICCIÓN DE BIOMASA NATURAL A PARTIR DE SENSORES REMOTOS EN EL VALLE DE LERMA****Silvina Manrique<sup>1</sup>, Virgilio Núñez<sup>2</sup>, Judith Franco<sup>3</sup>, y Lucas Seghezzo<sup>3</sup>**

Instituto de Investigación en Energía No Convencional (INENCO); Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED), Facultad de Ciencias Naturales.

Consejo de Investigaciones de la UNSa. (CIUNSa)

Universidad Nacional de Salta. Avda. Bolivia 5150, A 4408 FVY Salta, Argentina.

Tel.: 0387-4255533 – E-mail: [silmagda@unsa.edu.ar](mailto:silmagda@unsa.edu.ar)**RESUMEN**

El objetivo de este trabajo fue la puesta a punto de una metodología de modelización y mapeo de biomasa aérea leñosa (BAL), a partir de datos de sensores remotos (reflectancia), radiometría de terreno (reflectancia) y mediciones estructurales de la vegetación (biomasa), registrados para idéntica fecha y lugar. Los ambientes estudiados fueron: Chaco, Selva y arbustales del Valle de Lerma (Salta). Las transformaciones realizadas a los datos obtenidos (índices de vegetación), permitieron encontrar el modelo con mejor ajuste, que incluye el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de campo y de satélite. Este modelo arroja valores de biomasa para el Valle que oscilan entre 0 a 200 t/ha, con la mayor superficie ubicada en la categoría de 60 a 130 t/ha de biomasa. Nuevos muestreos son recomendados para mejorar el modelo logrado a partir de las parcelas experimentales, y estimar la biomasa del Valle de Lerma con mayor precisión.

**PALABRAS CLAVE:** biomasa, sensores remotos, espectrorradiometría, Landsat, Valle de Lerma, secuestro de carbono, índices de vegetación.

**1. INTRODUCCION**

La teledetección (*remote sensing*) es la ciencia que se encarga de observar la superficie terrestre, detectando fenómenos y midiendo datos geográficos de objetos a partir de imágenes tomadas desde sensores remotos instalados en cualquier plataforma espacial, ya sea avión o satélite (Medeiros, 1987). La teledetección espacial aplicada a recursos naturales tiene sus comienzos en la primera misión Landsat (land satellite) en el año 1972. Luego de sucesivas misiones en el año 1999 es puesto en órbita el satélite Landsat 7, el último de la serie (Vicente y Rickfelder, 2003).

Con el aumento de la población mundial y la utilización de recursos naturales en escala exponencial, los sensores remotos se han tornado una herramienta indispensable en la actualidad (Gallaun et al., 2009; Anaya et al., 2009; Fernández et al., 2010), permitiendo relevar grandes áreas y reducir la información a un menor volumen realizando transformaciones de los datos multispectrales contenidos en las imágenes. En particular, la necesidad de monitorear la vegetación de manera eficiente y constante, llevó a la comunidad científica a buscar métodos que pudieran relacionar los valores de radiometría de la superficie terrestre con parámetros biofísicos (Roy y Ravan, 1996). Diversos índices fueron desarrollados con la intención de relacionar los valores de reflectancia registrados por los sensores orbitales con el índice de área foliar, biomasa, productividad, actividad fotosintética y porcentaje de cobertura (Qi et al., 1994; Steininger, 2000; Lu et al., 2004; Yang et al., 2005). Estos índices, llamados índices espectrales de vegetación (IV), se basan en la combinación de bandas espectrales en la longitud de onda del rojo (R) y del infrarrojo cercano o próximo (Ip), ya que con el aumento cuantitativo de la vegetación, la reflectancia en el R tiende a disminuir, mientras que el Ip tiende a aumentar. Los contrastes en los valores de reflectancia de estas bandas registradas por el sensor pueden ser asociadas a parámetros biofísicos de la vegetación (Stekoll et al., 2006; Anaya et al., 2009). Estos IV resultan de las diferencias entre el suelo y la vegetación, por el simple hecho de la vegetación sana absorbe la radiación en la banda del R, debido a la presencia de la clorofila y de otros pigmentos en las hojas, y refleja fuertemente en el Ip, debido a la interfase aire/agua entre los espacios intracelulares y las paredes celulares, que causan refracción múltiple (Pereira et al., 1996). La transformación de los números digitales en valores de radiancia o reflectancia para las imágenes Landsat, obtenidas de diferentes satélites, es aconsejable, ya que a través de esto se consigue una normalización de las variaciones entre las características radiométricas de las imágenes generadas por cada una de ellas (Thenkabail et al., 2004).

El estudio de la vegetación natural o biomasa natural, ha cobrado renovada relevancia en la actualidad por dos razones principales: por un lado, existe la inminente amenaza de un cambio climático global, cuyas tendencias pueden ser revertidas a partir de la mitigación de emisiones de gases efecto invernadero (GEI)- por diferentes mecanismos- como por ejemplo el secuestro de carbono de la atmósfera que realiza la vegetación (el 50% de la biomasa es carbono). Por otro lado, los combustibles fósiles tienen pronosticados horizontes de reservas limitados, por lo que nuevas fuentes combustibles y renovables están siendo profusamente estudiadas, entre ellas, la biomasa con fines energéticos (Foody et al., 2003; Hall et al., 2006; Kindermann et al., 2008; Verbesselt et al., 2010).

<sup>1</sup> Becaria Doctoral del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas).

<sup>2</sup> Director Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED).

<sup>3</sup> Investigador Adjunto CONICET. Instituto de Investigación en Energía No Convencional (INENCO).

En nuestro país el uso de imágenes satelitales del sistema Landsat se viene desarrollando en los últimos 20 años. Esto ha ocurrido en diferentes áreas de las ciencias, pero sobre todo en aquellas relacionadas al uso de recursos naturales (Ligier et al., 2000), existiendo algunos estudios sobre diversos aspectos y tipos de biomasa (Scolari et al., 2002; Paruelo et al., 2004; Zak et al., 2008; Gasparri et al., 2008; Fabricante et al., 2009; Gasparri et al., 2010). A nivel provincial dichos estudios son más escasos y la capacidad de secuestro de carbono de los bosques nativos hasta recientemente no había sido estudiada (Manrique et al., 2009a,b). El presente trabajo, desarrollado en el marco de una tesis doctoral en curso, se fijó como objetivo modelizar y mapear la biomasa aérea natural y carbono del Valle de Lerma, a partir de sensores remotos y en base a datos de terreno, desarrollando una metodología específica para tal fin. Dicha metodología puede ser utilizada para la planificación del manejo de las masas boscosas de la región y aún de la provincia, que incluyan objetivos de mitigación de GEI y otros aspectos de desarrollo local y conservación de la biodiversidad.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1. Área de estudio

La zona de estudio seleccionada, el Municipio de Coronel Moldes (departamento La Viña, provincia de Salta), se ubica en el sur del Valle de Lerma, valle fértil que concentra más del 54% de la población provincial. Dicho municipio tiene una superficie total de 840 km<sup>2</sup>. La altitud media es de 1.100 y 1.200 m.s.n.m. El clima es templado serrano. La temperatura media anual es de 17,9°C. Trabajos previos en la zona han definido los tres ambientes naturales con mayor representatividad en la zona: bosque chaqueño serrano y de transición (40.000 ha), bosques subhúmedo o selva (2.600 ha, hasta los 1.600 m.s.n.m.) y arbustales y matorrales (6.900 ha) (Manrique et al., 2009a). Las precipitaciones varían desde alrededor de 400-500 mm anuales en arbustales y matorrales, a más de 700 mm anuales en la zona de selva, con una fuerte concentración de las mismas entre los meses de diciembre y marzo.

### 2.2. Adquisición de datos

Tres tipos de datos fueron recabados, a partir del empleo de diferentes metodologías, para idénticos lugares y fecha: a) biomasa aérea leñosa, para los tres ambientes naturales mencionados previamente, mediante estudio de variables estructurales a campo; b) reflectancia vegetal, a partir de espectrorradiometría de campo, y c) reflectancia vegetal, a partir de radiometría satelital, para idéntica fecha y hora de los trabajos de campo anteriores.

#### a) Biomasa aérea leñosa

El trabajo de investigación y ensayo piloto se desarrolló en dos etapas: a campo y en gabinete. La tarea de campo consistió en el trazado aleatorio de 9 parcelas de 100 m<sup>2</sup> en los tres diferentes ambientes naturales reconocidos y delimitados en el municipio. Para todas las parcelas se registraron las coordenadas geográficas mediante GPS (Global Position System). En dichas parcelas se relevaron las siguientes variables estructurales de todos los individuos leñosos presentes  $\geq 1$  cm de diámetro y  $\geq 50$  cm de altura: diámetro a la altura de pecho<sup>4</sup> (dap, en cm) o a la base cuando resultó necesario, altura total (en metros), altura de fuste (metros), especie, condición de la vegetación. En la segunda etapa, los valores registrados fueron ingresados en ecuaciones alométricas desarrolladas para ambientes similares a los de estudio, y que han sido mencionados como de validez para la zona (Manrique et al., 2009a). Dichas ecuaciones alométricas permitieron la estimación de la biomasa leñosa aérea (en t/ha) de cada una de las parcelas y son las que siguen: a) para estimación en bosques subhúmedos o selva

$Y = e^{\{-2.4090 + 0.9522 \times \ln(D^2 \times H \times S)\}}$ ; b) para chaco serrano y transición:  $Y = 0.112 \times (S \times D^2 \times H)^{0.916}$ ; c) para arbustales y matorrales:  $Y = 10^{\{-0.535 + 0.9996(\log_{10} BA)\}}$ . Donde: Y= biomasa del árbol (kg); D= dap (cm); H= altura total (m); S= densidad básica (g/cm<sup>3</sup>); BA= área basal (cm<sup>2</sup>).

#### b) Reflectancia vegetal (radiometría de campo)

En cada una de las parcelas trazadas a campo, se midió la reflectancia vegetal, determinada por la relación entre la radiación reflejada por el dosel y la radiación incidente para el mismo instante de tiempo y lugar (Pinilla, 1995). Para mayores detalles del método consultar Manrique et al. (2009c). El instrumento usado fue un espectrorradiómetro portátil LI-COR 1800, perteneciente al INENCO con una sensibilidad de 0.3 a 1.1  $\mu$ m, lectura hemisférica y resolución de escaneo de 2 nm. El rango de longitudes de onda registrado fue de 400 nm a 1100 nm. Los procesamientos realizados con estos datos y con los del ítem siguiente, se describen en el apartado 2.3.

#### c) Reflectancia vegetal (radiometría satelital)

Por otra parte, la tarea de gabinete implicó asimismo el trabajo con imágenes satelitales, las cuales se adquirieron desde el INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Se trabajó con imágenes Landsat 5, de 30 metros de resolución, proyección UTM (Universal Transverse Mercator Zona 20) y sistema de referencia Datum SAD 69. Para poder cubrir la zona de trabajo (parcelas de muestreo georreferenciadas), debió realizarse un mosaico a partir de dos imágenes de idéntica fecha a la de la realización de los muestreos de campo: las bandas de las escenas 231-077 y 231-078. Posteriormente se georreferenciaron utilizando datos de campo, de imágenes previamente georreferenciadas y del Google Earth<sup>TM</sup>. La georreferenciación se llevó a cabo mediante un re-muestreo por el método de vecino más cercano utilizando 18 puntos de control distribuidos de manera uniforme. El error total fue de 4,59 %. El Sistema de Proyección elegido para todas las escenas satelitales y modelos digitales fue Gauss Krüger Faja 3, Datum Campo Inchauspe, Delta WGS84. Las tareas mencionadas fueron realizadas mediante el software IDRISI<sup>TM</sup>.

En el mismo proceso de la transformación geométrica se definieron los límites de la imagen resultante que cubre la totalidad del Valle de Lerma. Luego de realizadas las correcciones geométricas de seis de las siete bandas del satélite LANDSAT, se

<sup>4</sup> Por convención se mide a 1,3 metros desde el suelo.

procedió a su corrección atmosférica mediante el modelo Cos(t) (Chávez, 1996) o método de ganancia (gain)-compensación (offset). Los parámetros utilizados son los siguientes:

GMT(hh.h)	Banda	$\lambda$ central ( $\mu\text{m}$ )	Ganancia ( $\text{mW} / \text{cm}^2 \cdot \text{sr} \mu\text{m}$ )	Compensación ( $\text{mW} / \text{cm}^2 \cdot \text{sr} \mu\text{m}$ )	Elevación del sol
19.4	1	0.485	-0.1520000	0.0762824	49.8837
19.4	2	0.56	-0.2840000	0.1442510	49.8837
19.4	3	0.66	-0.1170000	0.1039880	49.8837
19.4	4	0.83	-0.1510000	0.0872588	49.8837
19.4	5	1.65	-0.0370000	0.0119882	49.8837
19.4	7	2.215	-0.0150000	0.0065294	49.8837

Tabla 1. Parámetros utilizados para las correcciones atmosféricas. Referencias: GMT, Greenwich Mean Time;  $\lambda$ , longitud de onda;  $\mu\text{m}$ , micrómetro; mW: milli Watts; sr, stereo radian.

### 2.3. Transformaciones orientadas

Completados los pasos anteriores, dos tipos de transformaciones orientadas (con un objetivo definido) fueron realizadas con los datos de reflectancia: *índices de vegetación* (para el ítem b: espectrorradiometría, y c: imágenes satelitales) y transformación *tasseled cap* (ítem c).

Entre los IV, se calcularon los siguientes: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index). El NDVI se obtuvo como:  $(\text{IRc}-\text{R})/(\text{IRc}+\text{R})$ , donde las bandas de R e IRc se corresponden con los intervalos espectrales 630-690 nm y 760-900 nm, respectivamente. En el caso del SAVI, fue estimado como:  $(\text{IRc}-\text{R}/(\text{IRc}+\text{R}+L)) \cdot (1+L)$ , donde L es un parámetro en función de la cobertura vegetal. En este caso, se asignaron los siguientes valores a L: L=1 para densidades de vegetación bajas (arbustales y matorrales); de L=0.5 para valores intermedios (ambiente de chaco) y de L=0.25 para alta densidad (ambiente de selva). En el caso de las imágenes satelitales, para obtener el NDVI se procedió a calcular el valor absoluto de las bandas de radiancias (usando la calculadora de imágenes, función ABS), se aplicó una ampliación (stretch) lineal a las imágenes de valores absolutos, obteniéndose las escenas en formato byte binario. Finalmente, se generó el NDVI con las bandas 3 y 4 del LANDSAT TM, convertidas en el paso anterior. Para evitar la ingerencia de la reflectancia de los cultivos sobre el IV de las coberturas nativas, se enmascararon las zonas agrícolas en las bandas del R e IRc, previo a la generación del NDVI.

Por otra parte la transformación *tasseled cap* (realizada para las imágenes satelitales) supone pasar de las 6 bandas de Landsat a 3 bandas con un claro sentido físico que representan el brillo de la imagen (albedo), el verdor y la humedad. Estas nuevas bandas se obtienen mediante:

$$\text{brillo} = \sum_{k=1}^6 Ckb \times pk \quad \text{verdor} = \sum_{k=1}^6 Ckv \times pk \quad \text{humedad} = \sum_{k=1}^6 Ckh \times pk$$

Los coeficientes Ckb, Ckv y Ckh de estas ecuaciones aparecen en la Tabla 2.

Componente	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Brillo	0,3037	0,2793	0,4743	0,5585	0,5082	0,1863
Verdor	-0,2848	-0,2435	-0,5436	0,7243	0,0840	-0,1800
Humedad	0,1509	0,1973	0,3279	0,3406	-0,712	-0,4572

Tabla 2. Coeficientes de la transformación *tasseled cap*.

### 2.4. Procesamiento de datos

Diferentes tratamientos fueron realizados a fin de encontrar las mejores relaciones entre las diferentes clases de datos: biomasa, reflectancia de terreno y reflectancia satelital. Los índices obtenidos desde espectrorradiometría de campo y desde sensores remotos fueron relacionados, como así, se observaron las relaciones entre estos datos y los de biomasa, hallados a campo. En la búsqueda de obtener valores positivos de NDVI, y luego de observados diferentes tratamientos sobre las imágenes, los datos de NDVI absoluto para los sitios con registro de biomasa, fueron correlacionados para encontrar la función que permitiera estimar la biomasa aérea para toda el área de estudio. Una vez hallado el mejor ajuste, y obteniendo la ecuación correspondiente, dicha ecuación fue aplicada a las imágenes, a fin de expandir y estimar la información de biomasa al resto del Valle de Lerma. Valores negativos en sitios de escasa o nula reflectancia vegetal fueron enmascarados (altas cumbres con nieve, cuerpos de agua, caminos), y nuevas estimaciones fueron realizadas. La validez del modelo hallado se verificó a partir del test estadístico no paramétrico de Mann-Whitney, con un valor de significancia de  $p=0,05$  (datos estimados versus datos observados en terreno).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSION

### 3.1. Biomasa aérea leñosa en los diferentes ecosistemas

Las estimaciones de biomasa aérea leñosa muestran grandes disparidades entre ambientes. El ambiente de selva presenta una biomasa acumulada en las parcelas de estudio (600 t/ha) que es 11 veces superior a la del ambiente con menor biomasa acumulada (arbustales y matorrales, con tan sólo 56 t/ha). El ambiente de chaco, se ubica en una posición intermedia, con una biomasa acumulada de 197 t/ha. En promedio, la biomasa para cada sitio es de cerca de 19 t/ha para arbustales, 66 t/ha para chaco y 200 t/ha para selva.

La producción de biomasa vegetal o la productividad primaria neta (PPN) es definida como la cantidad de carbono asimilado por el proceso de fotosíntesis (PPB, productividad primaria bruta), descontada la cantidad carbono perdido durante los

procesos de respiración. La biomasa vegetal es producida a partir de la fijación de CO<sub>2</sub> atmosférico, utilizando como fuente de energía la radiación solar (Clark et al., 2001). El agua tiene un papel fundamental en la fotosíntesis por ser la dadora de electrones para la reacción química que inicia el proceso de fijación de carbono. La disponibilidad de agua para la vegetación condiciona las tasas de fotosíntesis del dosel, siendo regulada por la precipitación pluvial, por la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y por la demanda evaporativa de la atmósfera (Landsberg y Waring, 1997). En este caso, puede observarse claramente que los sitios de mayor humedad y mayores registros pluviométricos (selva) muestran valores superiores de biomasa que los otros ambientes.

Por otra parte, otro factor determinante para las tasas fotosintéticas es la cantidad de radiación solar incidente sobre un dosel. Aproximadamente 28% del total de radiación solar incidente en la superficie de la Tierra está comprendida entre los 400 y 700 nm, siendo esta radiación denominada radiación fotosintéticamente activa (RFA) (Larcher, 1977). La cantidad de RFA interceptada por un dosel es función de la estructura del dosel y de los estados fitosanitario y nutricional de la vegetación. La eficiencia en el uso de la radiación por las plantas depende de la interacción entre la vegetación y el ambiente, que define cómo los procesos de fotosíntesis y transpiración son afectados por los elementos climáticos y cómo la estructura del dosel afecta la cantidad de radiación incidente que llega a las diferentes capas del mismo (Ducati et al., 2000; Filella et al., 2004; Fonseca, 2005). Los ambientes de estudio muestran fisonomías arquitectónicas diferentes, con mayor o menor cantidad de estratos y densidad poblacional, como así, diferentes asociaciones vegetales. A esto cabe sumarse el efecto de los factores de índole antrópico que se pueden observar en la zona: signos de actividades de extracción forestal, de ganadería extensiva con sobrepastoreo y ramoneo de vegetación, quemadas (intencionales o no), apertura de picadas y vías de saca, entre otros. Estos últimos -con signos evidentes de operación en la zona- posiblemente ejerzan una gran influencia en la biomasa final registrada por ambiente, como así otros factores de índole geográfico, orográfico, climático, entre otros (Laurance et al., 1999; Weaver, 2000; Jaramillo et al., 2003; Boletta et al., 2006; Sierra et al., 2007).

### 3.2. Relaciones entre índices de vegetación (IV)

Los índices de vegetación estimados (NDVI y SAVI) a partir de registros de espectrorradiometría y de sensores remotos, muestran las relaciones que se observan en las Fig.1 y 2. Para el caso de la vinculación entre NDVI (de la imagen y de terreno) (Fig.1a), la relación hallada es de tipo polinómica de segundo grado, con un alto ajuste ( $r^2=0,95$ ). Este índice es uno de los más mencionados en la literatura científica internacional, donde se reconoce que empíricamente presenta correlaciones significativas con las variables biofísicas de la vegetación, tales como biomasa verde e índice del área foliar (Gleriani, 1994; Almeida et al., 2007).

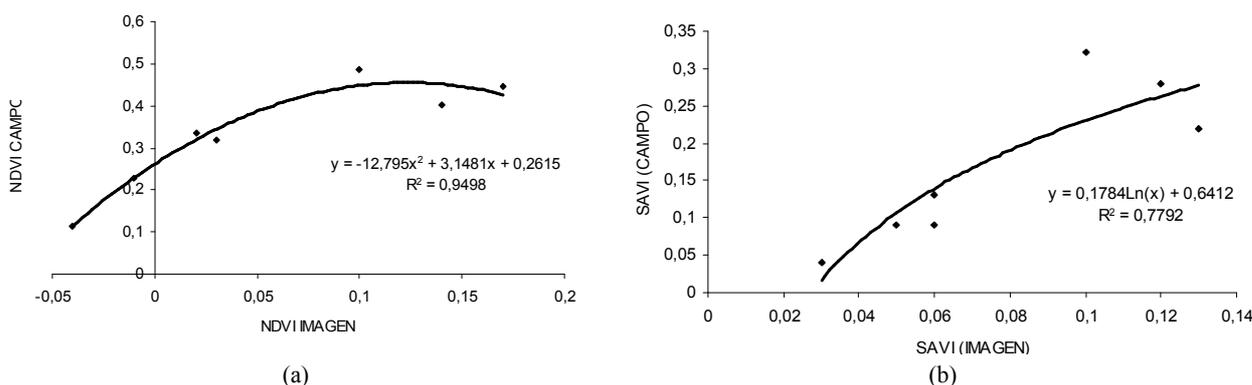


Figura 1. Relación entre el NDVI (campo e imagen)(a) y entre SAVI (campo e imagen)(b).

En el caso de la vinculación entre SAVI (desde radiometría de campo y satelital -imagen-), si bien se encuentra también un alto nivel de ajuste ( $r^2=0,78$ ), éste es menor que para el NDVI, analizado anteriormente. En este caso la relación es de tipo logarítmica (logaritmo neperiano), cuando el factor L del índice toma un valor de general de 1 (Fig.1 b). Ante la variación del factor L como descrito en la metodología (Fig.2), la relación aumenta levemente su nivel de ajuste, logrando un  $r^2=0,83$ . Sin embargo, aún el ajuste es inferior al encontrado para los NDVI.

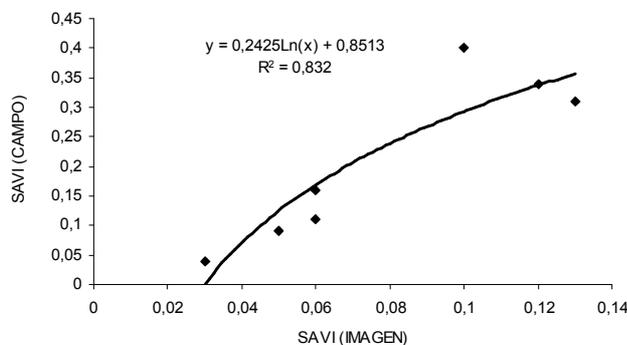


Figura 2. Relación hallada entre el SAVI de radiometría de campo y satelital (para L=1, 0,5 y 0,25).

### 3.3. Relaciones entre datos de biomasa e índices de vegetación desde satélite

Las asociaciones entre los datos de biomasa aérea leñosa y los índices de vegetación estimados a partir de las imágenes muestran muy débiles relaciones. Esto implica que su utilización introduciría en el modelo un alto grado de error haciendo que las estimaciones de biomasa resulten imprecisas. En efecto, el coeficiente de correlación hallado entre los datos de biomasa y los datos de NDVI estimados desde la imagen muestran un  $r^2=0,47$  en una relación de tipo exponencial. Para el caso de la relación biomasa-SAVI, el  $r^2=0,38$ , mientras que el mejor ajuste se observa para el TSA, con  $r^2=0,69$ . Sin embargo, el tipo de relación hallada (lineal) como así los valores estimados para este último índice (negativos), no permiten hallar un modelo satisfactorio de biomasa para el Valle.

### 3.4. Selección de la función más adecuada

La relación con el mejor nivel de ajuste encontrado, es la que vincula los índices NDVI –terreno, sensores remotos. Sin embargo, al trabajar sobre las imágenes con valores negativos, se observan algunas perturbaciones, dado que no pueden asociarse valores de biomasa negativos con estos índices. De esta forma, el NDVI de las imágenes se trabajó en valores absolutos, y realizando una filtración de aquellas muestras que se alejaban de la tendencia general. Las muestras utilizadas en el análisis de correlación son las siguientes:

Sitio	Estrato	Nombre	NDVI	Biomasa (t/ha)
A3	A	Arbustal y matorral	0.0256	20.41
A2	A	Arbustal y matorral	0.0575	30.72
B6	B	Chaco semiárido	0.1	69.28
C8	C	Bosque subhúmedo	0.2683	137.33

Tabla 3. Datos de las parcelas utilizadas en las correlaciones.

La función de correlación encontrada entre los pares de datos es un logaritmo neperiano:  $y=51,551 \ln(x)+195,11$ , con un coeficiente muy próximo a uno ( $r^2=0,92$ ), lo que indica la fuerte relación entre ambas variables analizadas. Dicha correlación permite estimar la biomasa aérea a partir del NDVI calculado de la manera indicada anteriormente. Correlacionando los valores de las parcelas para las cuales existen datos de estimaciones de biomasa aérea, y su valor de biomasa estimado por imagen a partir de la relación anterior, se encuentra la siguiente relación de logaritmo neperiano, con un  $r^2 = 0,90$ :  $y=44,402 \ln(x)-95,19$ . Para la comprobación de los resultados obtenidos, se procedió a chequear para las 9 parcelas de campo, los valores medidos (a campo) versus los valores estimados (por el modelo), aplicando el test no paramétrico de Mann Whitney. Los análisis indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de biomasa estimada y observada. Los estadísticos son  $p=0,37$  y  $U=1860$ . Dicho modelo se aplica, por tanto, para la generación del mapa de biomasa del Valle de Lerma.

### 3.5. Predicción de biomasa aérea leñosa para el Valle de Lerma

El modelo aplicado a la imagen satelital del Valle de Lerma, permitió estimar la superficie ocupada por cada clase de biomasa aérea leñosa, que se muestran en el histograma a continuación (Fig. 3):

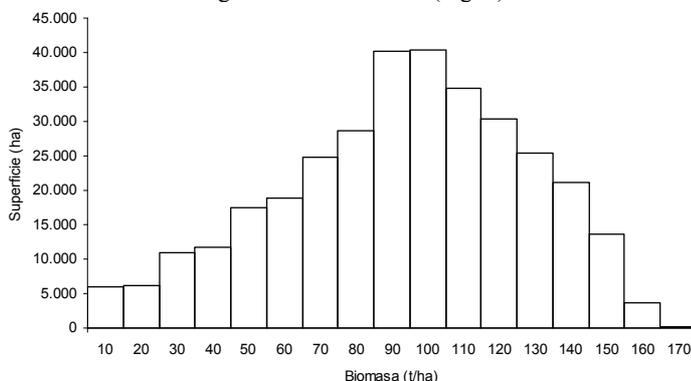


Figura 3. Superficie ocupada por cada clase de biomasa en el Valle de Lerma.

Puede apreciarse que de la superficie total del Valle (500.500 ha aproximadamente), la mayor frecuencia de valores de biomasa se encuentra en el rango de 60 a 130 t/ha. En particular, la categoría de 101 a 111 t/ha de biomasa ocupa una superficie en el Valle cercana a 800 km<sup>2</sup> u 80.000 ha. Es interesante señalar que los valores de biomasa estimados podrían verse superados en toda la superficie del Valle, si planes de manejo y medidas de control de las masas boscosas son implementados.

El mapeo de biomasa en base a la función hallada se muestra en la Fig. 4. Los sitios que se muestran en color blanco, de biomasa nula, incluyen categorías de uso del suelo como: caminos y rutas, embalses, diques y cursos de agua, urbanizaciones, altas cumbres nevadas o heladas, y cultivos agrícolas -que para el propósito de este estudio fueron enmascarados. Los sitios rojizos, anaranjados y amarillos, son los que reflejan un contenido de biomasa de entre 1 a 90 t/ha de biomasa aproximadamente, abarcando las siguientes categorías de coberturas vegetales: vegetación rala de laderas, pastizales serranos y matorrales (con un promedio de 20 t/ha) y chaco serrano y de transición (con un promedio de 65 t/ha). Los sitios de color verde, claramente señalan los mayores registros de biomasa, que se corresponden con diferentes facetas de los bosques húmedos o selva de Yungas. El promedio de biomasa leñosa para el piso de selva estudiado ronda en las 200 t/ha, por lo que los sitios más oscuros están señalando valores próximos a éste.

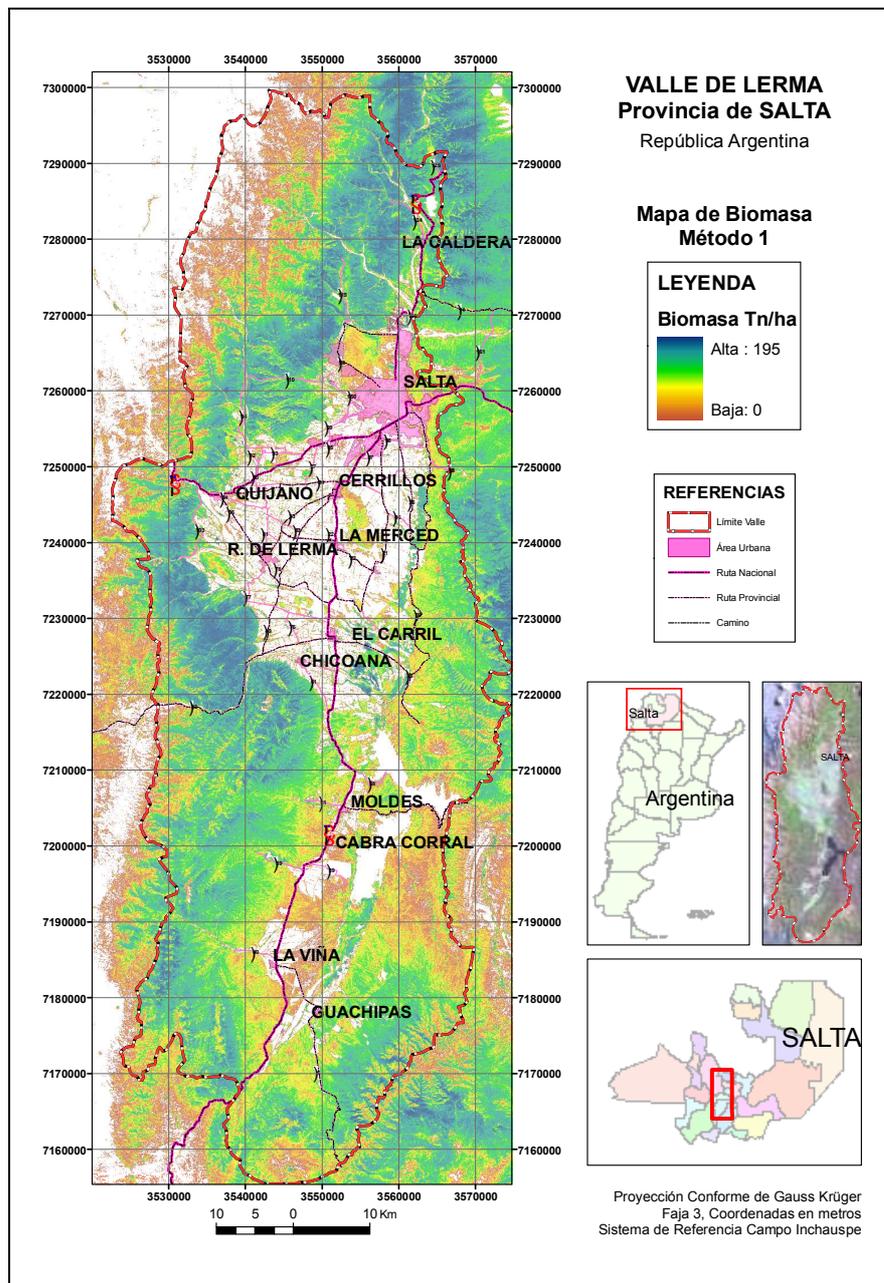


Figura 4. Biomasa aérea leñosa (t/ha) en el Valle de Lerma, estimada desde el modelo logrado.

El conocimiento de la distribución de la biomasa del Valle, resulta fundamental para la estimación de proyectos de secuestro de carbono, como así, para la implementación de planes de ordenamiento territorial que permitan la conservación de las masas boscosas y su biodiversidad, permitiendo a la par satisfacer necesidades y demandas locales. Mayores estudios de biomasa y datos espectrales son necesarios para mejorar y precisar los modelos y resultados preliminares obtenidos en el presente trabajo. Este es el objetivo próximo de los autores.

#### 4. CONCLUSIONES

La metodología desarrollada, vinculando datos de terreno (biomasa aérea leñosa y espectrorradiometría) con datos obtenidos desde sensores remotos (imágenes satelitales) permitió realizar la modelización y mapeo de biomasa aérea leñosa del Valle de Lerma. Dificultades de procesamiento de datos fueron superadas y su pulido y organización permitieron lograr resultados claros y concretos que son de interés para la zona.

El rango de valores de biomasa representado en el Valle abarca desde 1 a 200 t/ha, con una mayor superficie de coberturas vegetales conteniendo de 60 a 130 t/ha de biomasa.

El conocimiento de la distribución de la biomasa del Valle, resulta fundamental para la estimación de proyectos de secuestro de carbono, como así, para la implementación de planes de ordenamiento territorial que permitan la conservación de las masas boscosas y su biodiversidad, permitiendo a la par satisfacer necesidades y demandas locales. Nuevos muestreos y procesamientos son recomendados a fin de ajustar los valores hallados a partir de las parcelas experimentales, y estimar la

biomasa del Valle de Lerma con mayor precisión. Esto posibilitará, por otra parte, su empleo en diferentes regiones y condiciones de la provincia. Éste es el objetivo próximo de los autores.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se desarrolló con el soporte de una beca doctoral otorgada por el CONICET a la autora principal del presente, en el marco de los proyectos CIUNSA N° 1.345, 1.643 y 1.955 y un proyecto de adscripción desarrollado en la cátedra de Física de la Facultad de Ciencias Naturales. Un sincero agradecimiento a los estudiantes adscriptos al proyecto de tesis doctoral, por las colaboraciones con los muestreos y toma de datos en campo. Al sr. Ricardo Echazú, quien colaboró gentil y pacientemente con el procesamiento de los registros radiométricos. A la municipalidad de Coronel Moldes, por el apoyo logístico en la zona. Al Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, por las imágenes satelitales facilitadas.

## ABSTRACT

The aim of this work was the design of a methodology of estimation and mapping of aboveground woody biomass (AGB). That included information of remote sensing (reflectance), field radiometric (reflectance) and structural measurements of the vegetation (biomass), registered for identical date and place. The studied environments were: Chaco, Selva and shrublands of Lerma's Valley (Salta). The transformations realized to the information obtained (indexes of vegetation), allowed to find the model with better adjustment, which includes the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) of field and of satellite. This model shows values of 0 to 200 t/ha of biomass for the Valley, with the major surface in the category from 60 to 130 t/ha of biomass. New samplings are recommended to improve the model achieved from the experimental plots, and to estimate the biomass of Lerma's Valley with major precision.

## REFERENCIAS

- Anaya, J.A., Chuvieco, E., Palacios-Orueta, A. (2009). Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management* 257: 1237–1246.
- Boletta PE, Ravelo AC, Planchuelo AM, Grilli M. (2006). Assessing deforestation in the Argentine Chaco. *Forest Ecology and Management* 228: 108–114.
- Chávez, P.S. (1996). "Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62 (9): 1025-1036.
- Clark, D.A., Brown, S., Kicklighter, D.W., Chambers, J.Q., Thomlinson, J.R. y Ni, J. (2001). Measuring Net Primary Production In Forests: Concepts And Field Methods. *Ecological Applications*, 11(2): 356–370.
- Ducati, J.R., Semmelmann, F.R., Guasselli, L.A., Deppe, F., Martins, R.L., Kreling, M.T., Cauduro, G. (2000). Clasificação e Quantificação de Áreas de Florestas no Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. IX Simpósio Latinoamericano de Percepção Remota, Puerto Iguazú.
- Fabricante, I., Oesterheld, M. y J.M. Paruelo. (2009). Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia. *Journal of Arid Environments* 73:745–753.
- Fernández, N., Paruelo, J.M., Delibes, M. (2010). Ecosystem functioning of protected and altered Mediterranean environments: A remote sensing classification in Doñana, Spain. *Remote Sensing of Environment* 114: 211–220.
- Filella, I.; J. Peñuelas; L.Llorens; M. Estiarte. (2004). Reflectance assessment of seasonal and annual changes in biomass and CO<sub>2</sub> uptake of a mediterranean shrubland submitted to experimental warming and drought. *Remote Sensing of Environment* 90: 308-318.
- Fonseca, E.L. (2005). Desenvolvimento De Modelo Da Disponibilidade De Fitomassa Aérea Para Formações Campestres Naturais A Partir De Dados Espectrais Orbitais E Agrometeorológicos. Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto. Inpe-12969-Tdi/1017.
- Footy, G.M., Boyd, D.S., ME.J. Cutler. (2003). Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment* 85: 463–474.
- Gallaun, H., et al.. (2009). EU-wide maps of growing stock and above-ground biomass in forests based on remote sensing and field measurements. *Forest Ecol. Manage.* doi:10.1016/j.foreco.2009.10.011.
- Gasparri, et al. (2010). Assessing multi-temporal Landsat 7 ETM<sub>+</sub> images for estimating above-ground biomass. *Journal of Arid Environments* doi:10.1016/j.jaridenv.2010.04.007.
- Gasparri, N.I., Grau, H.R. y Manghi, E. (2008). Carbon Pools and Emissions from Deforestation in Extra-Tropical Forests of Northern Argentina Between 1900 and 2005. *Ecosystems* 11: 1247–1261. DOI: 10.1007/s10021-008-9190-8.
- Gleriani, J.M. (1994). Influência Do Solo De Fundo E Da Geometria Da Radiação Na Resposta Espectral Da Cultura Do Feijão. Mestrado Em Sensoriamento Remoto. Inpe-5632-Tdi/556. São José Dos Campos. Brasil.
- Hall, R.J., Skakun, R.S., Arsenault, E.J. y B.S. Case. (2006). Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management* 225: 378–390.
- Jaramillo VJ, Kauffman JB, Renteria-Rodriguez L, Cummings DL, Ellingson LJ. (2003). Biomass, Carbon, And Nitrogen Pools In Mexican Tropical Dry Forest Landscapes. *Ecosystems* 6: 609–629.
- Kindermann, G.E., McCallum, I., Fritz, S y Obersteiner, M. (2008). A Global Forest Growing Stock, Biomass and Carbon Map Based on FAO Statistics. *Silva Fennica* 42(3) research articles. www.metla.fi/silvafennica.
- Landsberg, J.J. y R.H. Waring. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95:209–228.
- Larcher, W. (1977). *Ecofisiología vegetal*. Ediciones Omega, Barcelona. 305 pp.
- Laurance WF, Fearnside PM, Laurance SG, Delamonica P, Lovejoy TE, Merona JMR, Chambers JQ, Gascon C. (1999). Relationship Between Soils And Amazon Forest Biomass: A Landscape-Scale Study. *Forest Ecology And Management* 118:127–38.

- Ligier, Héctor D., Kurtz, D.B., Perucca, R.A. (2000). Relevamiento arrocero 2000/2001, con apoyo de escenas landsat, en la provincia de Corrientes. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) - E.E.A. Corrientes: Recursos Naturales. [www.pagina.de/recursosnaturales](http://www.pagina.de/recursosnaturales).
- Lu, D., Mausel, P., Brondi'zio, E., Moran, E. (2004). Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management* 198: 149–167.
- Manrique, S.; Franco, J., Núñez, V. y L. Seghezzo. (2009a). Estimación De Densidad De Biomasa Aérea En Ecosistemas Naturales De La Provincia De Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente AVERMA* 13 (6): 37-45. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Manrique, S.; Franco, J.; Núñez, V y L. Seghezzo. (2009b). Stock De Biomasa Y Carbono En Una Zona Del Chaco Occidental En El Departamento De La Viña, Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente AVERMA* 13 (6): 155-164. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Manrique, S.; Núñez, V.; Franco, J.; R. Echazú y L. Seghezzo. (2009c). Caracterización de fisonomías vegetales del Valle de Lerma -provincia de Salta- a partir de espectrorradiometría de campo. Trabajo seleccionado para su presentación oral en XIII Congreso Forestal Mundial, del 18 al 25 de octubre de 2009 en Buenos Aires, Argentina, con publicación de trabajo completo.
- Medeiros, J.S. (1987). Desenvolvimento Metodológico Para A Detecção De Alterações Da Cobertura Vegetal Através Da Análise Digital De Dados Mss Landsat. *Dissertação De Mestrado Em Sensoriamento Remoto, Inpe-4123-Tdl/262*. São José Dos Campos.
- Paruelo, J.M., Golluscio, R.A., Guerschman, J.P., Cesa, A., Jouve, V.V., Garbulsky, M.F. (2004). Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning. The case of the Patagonian steppes. *Global Ecology and Biogeography* 13: 385–395.
- Pimilla, C. (1995). Elementos de teledetección. RA-MA Editorial. Madrid, España. 313 pp.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48: 119– 126.
- Roy, P.S. y Ravan, S.A. (1996). Biomass estimation using satellite remote sensing data—An investigation on possible approaches for natural forest. *J. Biosci.*, 21 (4): 535-561.
- Scolari, R., Romero, M., Curto, E., Romero, A. y J. Vivas. (2002). Utilización Práctica De Las Imágenes Satelitales Landsat Manejo Sitio Específico En Zona De Montes En La Eco Región Chaco Seco. Tercer Taller Internacional de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América, Carlos Paz, Córdoba, Argentina. Organizado por PROCISUR (Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur).
- Sierra CA, del Valle JI, Orrego SA, Moreno FH, Harmon ME, Zapata M, Colorado GJ, Herrera MA, Lara W, Restrepo DE, Berrouet LM, Loaiza LM, Benjumea JF. (2007). Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *Forest Ecology and Management* 243: 299–309.
- Steininger, M.K. (2000). Satellite estimation of tropical secondary forest aboveground biomass: data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing* 21: 1139–1157.
- Stekoll, M.S., L. E. Deysher y M. Hess. (2006). A remote sensing approach to estimating harvestable kelp biomass. *Journal of Applied Phycology* 18: 323–334. DOI: 10.1007/s10811-006-9029-7.
- Thenkabail, P.S., Enclona, E.A., Ashton, M.S. y Van Der Meer, B. (2004). Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. *Remote Sensing of Environment* 91: 354–376.
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G. y Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment* 114:106–115.
- Vicente, R. y R. Rickfelder. (2003). Clasificación digital de imágenes Landsat y su aplicación en la identificación de especies forestales. Cátedra de Sensores Remotos. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de la Plata.
- Weaver PL. (2000). Environmental Gradients Affect Forest Structure In Puerto Rico's Luquillo Mountains. *Interciencia* 25 (5): 254-259.
- Yang, Z., M.N. Rao, N.C. Elliott, S.D. Kindler, T.W. Popham. (2005). Using ground-based multispectral radiometry to detect stress in wheat caused by greenbug (Homoptera: Aphididae) infestation. *Computers and Electronics in Agriculture* 47: 121–135.
- Zak, M.R., Cabido, M., Cáceres, D. y Díaz, S. (2008). What Drives Accelerated Land Cover Change in Central Argentina? Synergistic Consequences of Climatic, Socioeconomic, and Technological Factors. *Environmental Management* 42:181–189. DOI 10.1007/s00267-008-9101-y.