Estimación satelital de variables dasométricas en plantaciones forestales de *Eucalyptus dumnii* en Uruguay

Trabajo final presentado para optar al título de Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio de los recursos naturales y la producción agropecuaria

> Santiago Ihlenfeld Gagliardi Ingeniero Agrónomo - Universidad de la República - 2014

> Lugar de trabajo: Montes del Plata (Stora Enso & Arauco)





Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires

#### TUTOR

Tutor

**Gervasio Piñeiro Guerra** Ingeniero Agrónomo (Universidad de la República) Dr. en Ciencias Agropecuarias (EPG – FAUBA)

#### JURADO DE TRABAJO FINAL

Jurado María Victoria Piazza Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires) Dra. en Ciencias Agropecuarias (EPG – FAUBA)

Jurado Esteban Daniel Borodowski Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires) Especialista en Gestión Ambiental (EP – UNSAM)

Fecha de defensa del Trabajo Final: 01 de Septiembre de 2020

## Agradecimientos:

A todos los que de una forma u otra me ayudaron y acompañaron en esta reconfortante etapa de mi vida.

"Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución."

RESUM	EN					
ABSTR	АСТ					9
1. INTR	ODUCCIÓN	「				10
2. OBJE	TIVOS DEL	, TRABAJ	<b>O</b>			13
	2.1. Objetivo	general				13
	2.2. Objetivo	os específica	98			13
<b>3. MAT</b>	ERIALES Y	MÉTODO	S			14
	3.1 Descripc	ión del área	a de estudio			14
	3.2 Descripc	ión de los I	nventarios fore	stales		16
	3.3 Descripc	ión de la in	formación sate	lital		17
	3.4 Análisis	estadístico.				19
4. RESU	LTADOS					19
	4.1. Series te	emporales d	lel IVM			19
	4.2. Relación y las variable	n entre el IV es dasométi	VM acumulado, ricas	, el IVM promedio I	RFAA acu	<b>mulada</b> 21
	4.3. Evaluac partidos (Jac	ión de los n ckknıfe)	nodelos de RFA	A acumulada medi	ante mues	s <b>treos</b> 24
	4.4. Compa	rativa de n	nodelos lineale	s de IVM y RFAA	1 acumula	idos con
	modelos	que	utilizan	únicamente	la	edad
	acumulada.		27			
	4.5. Evaluac inventarios r	ión de los n realizados a	nodelos lineales 1 los 5 y 8 años (	s de RFAA acumula de forma independi	ıda utilizal ente	ndo 27
5. DISC	USIÓN					
6. CONO	CLUSIÓN					
7 BIBL	IOGRAFÍA					31

# ÍNDICE

#### ÍNDICE DE TABLAS

 Tabla 1. Cantidad de mediciones según edad, tipo de inventario y tecnología de medición
 17

 Tabla 2. Número de rodales que incluyeron uno o varios píxeles MODIS
 18

 Tabla 3. Parámetros de los modelos lineales que relacionan IVM acumulado y RFAA acumulada con las variables dasométricas relevadas en los inventarios, para los 121 píxeles analizados (sin considerar las medidas de inventario repetidas en el tiempo para un mismo píxel)
 22

 Tabla 4. Parámetros de los modelos que relacionan IVM acumulado y RFAA acumulada con las variables dasométricas relevadas en los inventarios, para los 121 píxeles analizados (sin considerar las medidas de inventario repetidas en el tiempo para un mismo píxel)

#### **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 4. Gráficos de modelos lineales que relacionan las variables dasométricas con laRFAA acumulada, utilizando el set de datos completo. Todos los modelos fueronestadísticamentesignificativos

### ÍNDICE DE ECUACIONES

Figura 1. Ecuación	1	18
Figura 2. Ecuación	2	18

#### Estimación satelital de variables dasométricas en plantaciones forestales de *Eucalyptus dunnii* en Uruguay

#### RESUMEN

Las plantaciones forestales han incrementado su área e importancia económica en Uruguay desde la década del 90. La superficie forestada asciende a la fecha a más de 1 millón de hectáreas. La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica son herramientas que ayudan a caracterizar las masas forestales eficientemente. En este trabajo se evaluaron las relaciones (lineales, exponenciales o logarítmicas) que existen entre la radiación fotosintéticamente activa absorbida o el índice verde mejorado con diferentes variables dasométricas medidas a campo en distintos inventarios forestales. Las mejores relaciones se encontraron con la radiación fotosintéticamente activa absorbida acumulada utilizando modelos polinómicos de segundo grado. Los coeficientes de regresión fueron de 89 % con volumen comercial de madera, 89% con altura dominante, 88% con altura total, 83 % con área basal y 80% con diámetro a la altura del pecho. Este trabajo sugiere que el índice verde mejorado y la radiación fotosintéticamente activa absorbida estimada mediante imágenes satelitales son herramientas promisorias para la estimación de distintas variables dasométricas en rodales forestales de *Eucalyptus*.

#### **Palabras claves:**

Forestaciones, sensores remotos, variables dasométricas, inventario forestal, *Eucalyptus dunnii* 

# Relationship between satellite information and different dasometric variables in forest plantations of *Eucalyptus dunnii* in Uruguay

### ABSTRACT

Forest plantation have increased their area and economic importance in Uruguay since the 1990's and the forested area reaches today more than 1 million hectares. Remote sensing and Geographical Information Systems are promising tools that could allow forest stands to be characterized quickly and efficiently. In this work we evaluated linear, exponential and logarithmic relationships between the photosynthetically active absorbed radiation and the enhanced vegetation index, with several dasometric variables measured in different forest inventories. The best models were found using second order polynomials with cumulative absorbed photosynthetically active radiation. Regression coefficients were 89% with commercial wood volume, 89% with dominant height, 88% with total stand height, 83% with basal area and 80% with diameter at breast height. This work suggests that the enhanced vegetation index and photosynthetically active absorbed radiation derived from satellite images are promising tools for estimating dasometric variables in *Eucalyptus* forest stands.

#### Keywords:

Afforestations, remote sensing, dasometric variables, forest inventory, *Eucalyptus dunnii* 

### 1. INTRODUCCIÓN

El Uruguay ha sido testigo de un aumento sin precedentes de la superficie forestada, esta tendencia se ha dado ininterrumpidamente desde la promulgación de la segunda ley de promoción de la actividad forestal en el año 1987 (N° 15.939). Los incentivos que el Estado proporcionaba a los empresarios explican dicho dinamismo (Carámbula y Piñeiro, 2006). En el año 2018 según el Anuario Estadístico Agropecuario (2019) la superficie efectiva y afectada por las forestaciones ascendían a 1.015 mil ha<sup>-1</sup> y 1.243 mil ha<sup>-1</sup>, respectivamente, siendo cerca del 80% del género *Eucalyptus*. Ese mismo año *E. dunnii* fue la especie más plantada con 38 mil ha<sup>-1</sup> (51 %).

Estimar las variables dasométricas de rodales forestales es clave para tener un control del stock de madera y proyectar la producción futura, ajustar tarifas de trabajos a contratarse y mejorar las ecuaciones de crecimiento disponibles. Actualmente se realizan inventarios forestales que son costosos, insumiendo mucho trabajo de campo y traslados. Ordoñez *et al.* (2012) sugieren que para el manejo y aprovechamiento de las plantaciones es fundamental estimar las existencias y el crecimiento del componente forestal. Según Prodan *et al.* (1997), Ordoñez *et al.* (2012) la dasometría es la ciencia que abarca la medición y estimación de las dimensiones de los árboles y los bosques, caracterizando su crecimiento y sus productos. La dasometría se divide en epidometría, que es la medición propiamente dicha. Mediante sensoramiento remoto se podría generar aproximaciones al crecimiento e incremento de las masas boscosas para ser más eficiente en la planificación y ejecución de Inventarios Forestales clásicos.

La Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) puede ser estimada en tiempo real, con bajos costos y en grandes extensiones a partir de sensores de resolución espacial baja o media a bordo de satélites. Sin embargo, la correcta traducción de la información espectral en información biológica es aún un desafío importante de investigación (Tucker *et al.*, 1985, Box *et al.*, 1989, Hunt, 1994, Gamon *et al.*, 1995, Paruelo *et al.*, 1997, Rassmusen, 1998, Matsushita *et al.*, 2002, Wylie *et al.*, 2002, Awaya *et al.*, 2004, Paruelo *et al.*, 2004, Piñeiro *et al.*, 2006, Baeza *et al.*, 2011). La estimación de la PPNA se basa en índices espectrales que se correlacionan con el desempeño fotosintético de la vegetación. El Índice Verde Normalizado (IVN) es el más usado en la actualidad, su cálculo relaciona la reflectancia en las porciones del rojo (R) y el infrarrojo (IR) del espectro electromagnético (IVN=(IR-R)/(IR+R)). La Absorción por parte de pigmentos fotosintéticos está relacionada con la reflectancia en el R y la estructura foliar con la reflectancia en el IR. Existe fundamentación teórica que apoya el uso del IVN como una medida del flujo de energía en los ecosistemas (Paruelo *et al.*, 1997).

La fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (fRFAA) presenta una fuerte y positiva correlación con el IVN (Baret *et al.*, 1991, Potter *et al.* 1993, Sellers *et al.* 1996, Paruelo *et al.*, 1997, Gower *et al.*, 1999, Piñeiro *et al.*, 2006, Baeza *et al.*, 2011, Vassallo *et al.*, 2012). Paruelo (2008) remarca que el uso de imágenes satelitales otorga datos cuantitativos y espacialmente continuos de la superficie. La fracción de la radiación fotosintéticamente absorbida por la vegetación verde (fRFAA) se puede estimar como una función no lineal del IVN usando la parametrización fRFAA- IVN MODIS desarrollada por Grigera *et al.* (2007) y utilizada en plantaciones forestales (Vassallo *et al.* 2012). Ruimy *et al.* (1994), Piñeiro *et al.* (2006), Paruelo *et al.* (2010) y Baeza *et al.* (2011) proponen al Índice Verde Mejorado (IVM) para calcular la fRFAA. Hilker *et al.* (2008) y luego Vassallo *et al.* (2012)

El Índice Verde Mejorado (IVM o EVI por sus siglas en inglés) ha adquirido importancia en los últimos años. Similar en su concepción al IVN, pero agregando en el cálculo la reflectancia en la porción azul. Sus ventajas radican en una disminución del efecto del suelo y una mejor calidad de las imágenes en condiciones de alta vegetación, situación en la cual el IVN tiende a saturar y por eso se sugiere su uso en canopeos boscosos con elevada área foliar (Baeza *et al.*, 2011). El IVM tiene también una estrecha y positiva correlación con la fRFAA (Huete *et al.*, 2002, Baeza *et al.*, 2011). Esta relación de los índices verdes con la fRFAA permite estimar la PPNA a través de imágenes satelitales que captan información de reflectancia de la cubierta en distintas porciones del espectro electromagnético.

Monteith (1972) concluyó que la PPNA es directamente proporcional a la cantidad de radiación fotosintéticamente absorbida por la vegetación verde (RFAA)

multiplicada por la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR). La EUR es la eficiencia de conversión de Energía en Biomasa, varía entre zonas, explicado por la vegetación presente (composición específica, estructura y metabolismo fotosintético). También presenta variaciones dentro de una misma zona, dependiendo de las condiciones ambientales, siendo el agua disponible y temperatura los principales factores que explican su variación (Nouvellon *et al.*, 2000, Bradford *et al.*, 2005, Baeza *et al.*, 2011).

Podemos concluir entonces que existe una sólida base científica, centrada en el modelo de flujo de la energía, que relaciona la productividad primara de rodales forestales con índices derivados de imágenes satelitales y por ello diversos trabajos han evaluado la relación entre estos índices con variables de estado dasométricas como el volumen de madera y la Altura dominante del rodal. Marsden *et al.* (2010) estudiaron plantaciones clonales de *Eucalyptus* de rápido crecimiento para producción de pulpa de celulosa en el Estado de San Pablo (Brasil), encontrando fuertes relaciones ( $r^2=0,87$ ) entre volumen de madera del rodal y el IVN acumulado entre la plantación y las fechas de los inventarios; 2, 4 y 6 años. A su vez, la edad explicó gran parte de la variabilidad del volumen de madera del rodal en los inventarios ( $r^2=0,78$ ). Mediante un modelo lineal incluyendo la edad y el IVN acumulado durante los primeros dos años lograron explicar 92% de la variabilidad en volumen de madera del rodal en tre la plantación hasta la realización del inventario contiene información sobre el volumen maderero del rodal que no se debió solamente al efecto de la edad.

Por otra parte, Marsden *et al.* (2010) encontraron mayores correlaciones entre el IVN con la altura dominante del rodal, donde la edad del rodal explicó el 87% (p<0,001, n=26) de la variación en la altura dominante del rodal y el IVN acumulado explicó el 93%. En este caso la correlación entre IVN y la altura dominante del rodal con el efecto de la edad eliminado también fue significativo ( $r^2$ = 0,64 y p<0,001), demostrando que también existe parte de la variabilidad que no está explicada por la correlación con la edad. Para esta variable dasométrica utilizando un modelo lineal que incluyera tanto el IVN acumulado durante los primeros 2 años como la edad lograron explicar el 96% de la variabilidad (RMSE = 1,25m). Estos autores también encontraron que la variación en la productividad entre distintos rodales de edades similares también se correlacionó con los valores medios de IVN de los mismos ( $r^2$ =0,75).

Le Maire et al. (2011) también encontraron que el IVN explicaba parte de los cambios observados en variables de estado como el volumen de madera o la altura dominante del rodal, además de la edad del rodal. Utilizando sólo la variable edad los modelos explicaron 82% y 87% de la variabilidad en el volumen de madera o la altura dominante del rodal, respectivamente, pero aumentaron al 86% y 90% cuando se agregaron variables de las series temporales de IVN y a 90% y 92% cuando además se agregaron variables bioclimáticas. Usando regresiones no paramétricas encontraron un resultado similar para volumen de madera o la altura dominante del rodal. En este trabajo el IVN acumulado desde plantación a inventario fue la variable más importante para explicar la variabilidad en volumen de madera o la altura dominante del rodal. La precisión de estas estimaciones fue muy buena con un RMSD cercano al 15% de la media de volumen de madera y 8% de la media de la altura dominante del rodal. Estos trabajos sugieren que, si bien la edad es determinante de variables de estado como el volumen de madera o la altura dominante del rodal, los índices satelitales pueden ser usados para mejorar la precisión en la estimación de estas variables, aunque aún son necesarias calibraciones locales y mas experimentación en el tema. En este sentido, y basándonos en los principios del modelo de Monteith descriptos anteriormente, sería bueno evaluar la relación entre la RFAA, además del IVN, con variables de estado de los rodales. Es probable que la RFAA al incluir también la radiación incidente en los rodales explique mejor el crecimiento de estos.

#### 2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

#### 2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es relacionar información espectral (IVM y RFAA) con variables dasométricas, como la altura total y la altura dominante del rodal, el volumen de madera, el diámetro a la altura del pecho y el área basal, para lograr caracterizar plantaciones comerciales de *Eucalyptus*.

#### 2.2. Objetivos específicos

1-Analizar la evolución del IVM desde la implantación de los rodales forestales.

Hipótesis 1: Los rodales aumentarán el IVM a medida que pasa el tiempo desde la implantación, debido al aumento en el área foliar, pero estos aumentos llegarán a un máximo a los pocos años al cerrar el canopeo en la entrefila.

2-Generar y comparar modelos empíricos de estimación de variables dasométricas a partir del IVM acumulado y de la RFAA acumulada y estimar la precisión de los modelos generados con datos independientes.

Hipótesis 2.1- El IVM y la RFAA acumulados desde la plantación serán buenos estimadores de las variables dasométricas, ya que representan la intercepción de radiación acumulada durante todo el crecimiento del rodal.

Hipótesis 2.2- La RFAA será un mejor estimador de las variables dasométricas que el IVN, al considerar también información sobre la radiación solar incidente cada año.

#### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### 3.1 Descripción del área de estudio

El trabajo se realizó en plantaciones forestales comerciales pertenecientes a la empresa Montes del Plata que desarrolla toda la cadena para producción de pulpa de celulosa en Uruguay. Los rodales afectados abarcan tanto forestaciones, como segundo y tercer ciclo de reforestaciones. Las plantaciones son fustales (no han sufrido cortas intermedias), de origen seminal y se plantaron tanto en otoño como en primavera. En todas ellas se realizaron laboreos para preparar la tierra meses antes de la plantación que incluyen subsolado en algunos casos, la plantación es manual o mecanizada, se realiza en conjunto con la única fertilización. Se controlan las malezas durante el período previo al cierre de copas y se realiza control de hormigas permanentemente. Todas estas tareas silvícolas varían según características bióticas y abióticas del sitio. La cosecha se realiza entre los 9 y 12 años dependiendo del plan estratégico y de abastecimiento de madera para la industria. Se planta en filas, intentando lograr una densidad inicial de entre 1.300 y 1.400 plantas ha<sup>-1</sup> y se realizan reposiciones y replantaciones en las primeras etapas para lograrlo.

El área de estudio comprende 96 rodales puros de *Eucalyptus dunnii* (Figura 1) que suman 2.904 ha. Dentro de cada rodal la composición etaria es homogénea (coetáneo) y todos fueron plantados entre el 2007 y el 2012 y por lo tanto se analizaron en este trabajo rodales desde 2 años y medio hasta casi 10 años y medio. De ellos, 66 corresponden a plantaciones primaverales, llevadas a cabo entre agosto y diciembre, siendo el 1 de octubre la fecha media. Los restantes 30 rodales fueron plantados en otoño, entre marzo y mayo, el 2 de marzo fue la fecha media de plantación de la

estación. Se encuentran geográficamente dispersos en diferentes Establecimientos Forestales ubicados en el Litoral Oeste y el Centro del Uruguay, abarcando los Departamentos de Durazno, Flores, Paysandú, Río Negro, Soriano y Tacuarembó. De la regionalización propuesta por Panario (1987), los rodales abarcan 4 regiones geomorfológicas: Región Centro Sur, Cuenca Sedimentaria del Noreste, Cuenca Sedimentaria del Litoral Oeste y Cuesta Basáltica. Son variables en relieve, pendiente, profundidad y afloramiento rocosos, abarcando una gran heterogeneidad ambiental.



Figura 1. Ubicación de los rodales estudiados y las áreas plantadas con *Eucalyptus dunnii* en Uruguay.

Según la clasificación clásica de Köppen (1936) el Uruguay presenta un único tipo de clima, caracterizado por Clima templado, moderado y lluvioso (tipo "C"), Clima de temperie húmeda (lluvia irregular, tipo: "f") y variedad específica de la Temperatura "tipo a". La temperatura media anual de la zona varía entre 17 °C en el límite sur a 18 °C en el norte. Las precipitaciones promedio históricas se distribuyen homogéneamente a lo largo del año (régimen isohigro) a excepción de un corto período seco en el verano, variando significativamente entre años. Los rodales abarcan zonas con regímenes pluviométricos ligeramente diferentes; aumentando gradualmente de los 1.150 mm al sur a los 1.300 mm al norte. Es normal la ocurrencia de heladas agrometeorológicas entre fines de abril y comienzos de octubre. La humedad relativa del aire media anual es de 70 al 75%. El mes más seco es enero y el más húmedo es julio (valores medios de 65 y 80%, respectivamente) (Ferrer *et al.*, 2012, referencias web: Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) y Red Académica Uruguaya de la Universidad de la República (RAU-UdelaR)).

#### 3.2. Descripción de los Inventarios forestales

Entre 2010 y 2017 se realizaron diversas mediciones sobre los 96 rodales, comprendiendo mediciones del tipo de Inventario Forestal Continuo (IFC: parcelas permanentes), Inventario Temporal (IPT: parcelas para proyectar y modelar el crecimiento) e Inventarios Pre-Cosecha (IPC: estimación de stock y ajuste de tarifas de cosecha). Esta información fue relevada por la empresa Montes del Plata la cual permitió su uso para la realización de este trabajo. Se ejecutaron los inventarios forestales en distintas edades, la mayoría de ellos de forma tradicional, que consisten en relevamientos a campo en parcelas circulares de 300 o 400 m<sup>2</sup> a intensidades de muestreo variables dependiendo del objetivo de medición y de la variabilidad del estrato a inventariarse (Tabla 1). En algunos rodales se realizó un escaneo con láser montado en aeronaves tripuladas: LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), que genera datos precisos para todo el rodal (Tabla 1). En todas las situaciones se disponían de datos relevados o estimados de diámetro a la altura del pecho, área basal, altura total, volumen de madera y la altura dominante del rodal.

Para los rodales forestales estudiados se utilizaron los datos de inventarios a nivel de parcela o parcelas medidas en el rodal y para los casos medidos con LIDAR a nivel de grilla de volumen LIDAR correspondiente al rodal. En las mediciones tradicionales a campo que componen la mayor parte del set de datos se miden dentro de las parcelas las alturas totales de la mitad dominante de los árboles de cada fila con hipsómetros digitales y los diámetros a la altura del pecho de todos los árboles a dos medidas por fuste con forcípula. Con estos datos se calcula el volumen de madera, el área basal, y las alturas totales no relevadas, con ecuaciones calibradas previamente según la especie y el sitio.

Edad	Tipo de inventario	N° Rodales evaluados	N° Píxeles evaluados	N° Parcelas tradicionales
3	IFC	33	42	33
4	IFC	34	43	34
5	IFC	35	45	35
6	IFC	24	30	24
7	IFC	15	19	15
8	IFC	9	12	9
9	IFC	5	7	5
10	IFC	4	6	4
Subto	tal	159	204	159
5	IPT	82	102	572
8	IPT	27	34	176
5	IPT Lidar	10	13	NC
8	IPT Lidar	1	4	NC
Subto	tal	120	153	748
8	IPC	3	3	37
9	IPC	1	2	17
10	IPC	3	4	74
Subto	tal	7	9	128
Total		286	366	1035

Tabla 1. Cantidad de mediciones según edad, tipo de inventario y tecnología de medición

#### 3.3. Descripción de la información satelital

Se utilizaron imágenes MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) del satélite EOS Terra (NASA), adquiridas entre marzo del 2007 y julio del 2017. Estos satélites ponen a disposición información con elevada resolución temporal, incluso mejor que su análogo AVHRR-NOAA. La elevada revisita del satélite permite desarrollar estudios de largo plazo sobre plantaciones forestales y su comportamiento dasométrico a partir de datos espectrales. Particularmente, se utilizó el producto MOD13Q1 V006 que con una resolución espacial de 250 m y un compuesto cada 16 días permite tener un seguimiento apropiado del IVM e IVN en el tiempo. Existe un algoritmo que selecciona el mejor valor de cada píxel de todas las adquisiciones dentro de ese período. El criterio se basa en baja nubosidad, bajo ángulo de vista y el valor más alto de IVM/IVN (Huete et al., 2002, Marsden et al., 2010). Los índices verdes son generados a partir de valores de reflectancia de superficie corregida por el efecto atmosférico, considerando que la señal registrada por el instrumento en la parte superior de la atmósfera (TOA) se ve afectada por absorción gaseosa, moléculas y dispersión de aerosoles (Vermote *et al.*, 2002, Piñeiro *et al.*, 2006, Marsden *et al.*, 2010). Tanto los índices como la reflectancia son almacenados en 16 bits, con signo y enteros (Didan *et al.*, 2015, información relevada en diciembre de 2017 en el sitio <u>https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/</u>).

Para el manejo de la información espacial se utilizaron los softwares QGIS, ArcGIS y MRT (MODIS *Reprojection Tool*). La superficie promedio de los rodales fue de 30 ha, seleccionados por su tamaño y forma con el objetivo de poder ubicar píxeles MODIS puros de forestación dentro de ellos, o casi puros debido a caminos y desagües que no estuvieran descontados de la cartografía. En los 96 rodales se pudieron ubicar en total 121 píxeles, ya que en algunos rodales se ubicaron más de un píxel, ver tabla 2. Estos 121 píxeles se tomaron como independientes, si bien algunos pertenecían al mismo rodal, para facilitar los análisis estadísticos. A su vez, en los 121 píxeles se contaba con varias mediciones de inventario en distintas fechas, con lo cual se construyó una base de datos de 366 datos de campo y 366 datos de píxeles asociados a las mediciones de inventarios. De los 121 píxeles, 38 píxeles corresponden a plantaciones de otoño y 83 píxeles a primaverales.

N° de píxeles por rodal	N° de rodales
1	96
2	20
3	3
4	2
Total de píxeles.	121

Tabla 2. Número de rodales que incluyeron uno o varios píxeles MODIS

Para todos los píxeles seleccionados se extrajeron los datos de IVM y se estimó la RFAA. Para ello, a partir de la ecuación 1 utilizada por Baeza *et al.* (2011) se transformaron los valores de IVM a la fracción absorbida de la radiación fotosintéticamente activa (fRFAA). Luego con datos de radiación fotosintéticamente activa incidente (Ri) y con los valores estimados de fRFAA se obtiene la RFAA (Ecuación 2). Se utilizaron valores mensuales medios de Radiación incidente en el centroide del sitio de estudio con coordenadas 32°54'22'' de latitud Sur y 57°05'39'' de longitud Oeste, obtenidos del Atmospheric Science Data Center, NASA.

fRFAA=MIN((-0,0913+1,6696\*IVM);0,95)

Ecuación 1 Ecuación 2

#### RFAA=fRFAA \* Ri

#### 3.4. Análisis estadístico

Se construyeron distintos modelos para evaluar la correlación de los datos de: IVM acumulado, RFAA acumulada y promedio IVM, desde plantación hasta la fecha de inventario que correspondiese, con las diferentes variables dasométricas. Se utilizaron modelos lineales, logarítmicos y polinomiales de segundo grado. Primero, se probaron los sets de datos contemplando el último inventario para cada uno de los 121 píxeles MODIS del que se extrajo información de los 96 rodales. De esta forma se evaluó las asociaciones entre las variables, sin considerar las medidas repetidas en el tiempo para cada rodal, lo cual podría generar un efecto espurio en las regresiones. Luego, se realizó el mismo análisis, pero considerando los 366 datos, que incluían las medidas repetidas en el tiempo para un mismo rodal. A continuación, y solamente para el set de datos de RFAA que fue el que logró mejores ajustes, se realizó un muestreo partido (Jackknife), dividiéndose el set de 366 datos en diez sets menores (cada uno con 36 o 37 datos). Para cada uno de los 10 set de datos se estimaron los distintos modelos y luego se evaluaron las estimaciones realizadas con los modelos contra datos independientes (no usados en la construcción del modelo) y se construyeron gráficos de valores observados contra predichos para cada uno de los 10 set de datos. Para evaluar el efecto de la edad se compararon los modelos lineales obtenidos tanto para RFAA e IVM acumulados con modelos que utilizaban únicamente la edad acumulada para el set de datos completo y además se realizaron regresiones múltiples incluyendo a la edad y RFAAacc o IVMacc. Finalmente, se utilizaron modelos lineales para evaluar la correlación entre la RFAA acumulada utilizando los inventarios realizados solamente a los 5 años (102 observaciones) y a los 8 años (34 observaciones). De esta manera, al ser los inventarios realizados a la misma edad de las plantaciones, las relaciones evaluadas no tenían el efecto de la edad de la plantación como un efecto confundido en las regresiones. Se decidió utilizar estas edades (5 y 8) de la plantación, debido a que la cantidad de mediciones con las que se contaba era mayor.

#### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Series temporales del IVM

El IVM mostro una tendencia clara de aumento durante los primeros años luego de la plantación y luego se observaron variaciones principalmente debidas a la estación del año (Figura 2). Durante el aumento del IVM de los primeros años, las plantaciones de otoño llegan al valor máximo de IVM a los dos años mientras que las de primavera lo logran con un año y medio. Mientras que las plantaciones de primavera apenas afrontan una meseta en el IVM durante su primer invierno, las de otoño poco después de cumplir el año comienzan a mostrar su primera depresión invernal, lo que parece postergar la edad de ocurrencia de primer pico de IVM (Figura 2 panales inferiores). Luego de estos primeros años ambos tipos de plantaciones mostraron tendencias similares, asociadas a las variaciones estacionales del clima (Figura 2, paneles superiores). La mayor variabilidad observada en los últimos años de las plantaciones se debe a una reducción en el número de rodales con edades avanzadas (lo que hace disminuir el número de píxeles evaluados). Si se compara estos resultados con los obtenidos por Marsden et al. (2010) y Le Maire et al. (2011) para series temporales de IVN se observa un comportamiento similar pero que difiere en los mínimos y máximos en los que oscila las forestaciones pasados los primeros años de desarrollo. El IVN oscila entre 0,75 y 0,9, mientras que el IVM oscila entre 0,4 y 0,6 (Figura 2).



**Figura 2.** Evolución del IVM, izquierda plantaciones de otoño, derecha de primavera. En los gráficos inferiores se presenta la evolución detallada de los primeros 3 años de

las plantaciones. Las líneas grises representan un desvío estándar de la media (línea negra).

Al evaluar las variaciones estacionales del IVM dentro del año, sin considerar los primeros dos años de las plantaciones, se observa que las plantaciones de otoño y primavera presentan leves diferencias en su curva media de IVM (Figura 3). Las plantaciones de otoño mostraron picos de IVM entre los meses de noviembre y marzo (IVM=0,559 y fecha media de ocurrencia 11 de enero) y las mayores depresiones entre mayo y agosto (IVM=0,448 y fecha media de ocurrencia 26 de junio). Las plantaciones de primavera presentan un comportamiento similar, con picos entre noviembre y marzo (IVM=0,560 y fecha media de ocurrencia 2 de enero), pero estos parecen ser más duraderos que los de las plantaciones de otoño, llegando a extenderse desde finales de verano hasta finales de otoño. Esto parece atrasar los menores valores que ocurren entre mayo y septiembre (IVM=0,454 y fecha media de ocurrencia 27 de julio) (Figura 3).



**Figura 3.** Evolución promedio del IVM a lo largo del año para plantaciones de otoño (panel izquierdo) y de primavera (panel derecho). Se consideran sólo plantaciones mayores a 2 años. Las líneas grises representan un desvío estándar de la media (línea negra).

# 4.2. Relación entre el IVM acumulado, el IVM promedio, la RFAA acumulada y las variables dasométricas

Todas las variables dasométricas estudiadas presentaron una buena correlación con el IVM acumulado y la RFAA acumulada al considerar solamente el ultimo inventario realizado en los 121 píxeles evaluados (sin considerar las mediciones de inventarios repetidas en el tiempo ni el IFC por ser menor su intensidad de muestreo) utilizando tanto modelos lineales (Tabla 3), polinómicos de segundo grado como logarítmicos (datos no mostrados). Por el contrario, el IVM promedio de los píxeles tuvo una baja correlación con las variables dasométricas (datos no mostrados). Utilizando el IVM acumulado y RFAA acumulada se logró explicar una parte importante del comportamiento de las variables (73 a 88%). Los mayores ajustes se observaron para la variable de mayor interés que es el volumen de madera, y utilizando la RFAA acumulada como estimador (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros de los modelos lineales que relacionan IVM acumulado y RFAA acumulada con las variables dasométricas relevadas en los inventarios, para los 121 píxeles analizados (sin considerar las medidas de inventario repetidas en el tiempo para un mismo píxel)\*

	$r^2$	а	b	Modelo
Volumen	0,87	2,8715	-58,26	
Altura dominante	0,80	0,1923	6,90	
Altura total	0,79	0,1547	6,65	y=a x IVMacc + b
Área basal	0,78	0,2557	3,71	
Diámetro al pecho	0,73	0,0765	9,57	
Volumen	0,88	0,1157	-58,48	
Altura dominante	0,82	0,0078	6,80	
Altura total	0,81	0,0063	6,57	y=a x RFAAacc + b
Área basal	0,78	0,0103	3,74	
Diámetro al pecho	0,75	0,0031	9,54	

\*Todos los modelos fueron estadísticamente significativos (p<0,05).

Cuando se consideraron todas las mediciones de inventario disponibles para cada píxel (es decir varios inventarios realizados en el mismo píxel a diferentes edades de la plantación, n=366), también se lograron altas correlaciones y de similar magnitud que las obtenidas en el análisis anterior usando un único inventario forestal por píxel (el realizado a mayor edad de la plantación, Tabla 3), tanto para IVM acumulado y RFAA acumulada, y para todas las variables dasométricas (Tabla 4 y Figura 4). Esto sugiere que no existe un efecto espurio al considerar medidas sucesivas de inventario en un mismo rodal, lográndose explicar una alta proporción del comportamiento de las variables dasométricas. Los modelos lineales lograron explicar entre el 73 a 89% del comportamiento de las variables, los polinómicos de segundo grado entre 79 y 89%, mientras que los logarítmicos de 79 a 88%. Nuevamente, el volumen de madera logró los mayores ajustes, para ambas variables y en los tres tipos de modelos evaluados, y generalmente la RFAA mostró mejores ajustes que el IVM.

Tabla 4. Parámetros de los modelos que relacionan IVM acumulado y RFAA acumulada con las variables dasométricas relevadas en los inventarios, considerando todas las medidas de inventario (algunas repetidas en el tiempo para un mismo píxel)\*

	$r^2$	а	b	с	Modelo
Volumen	0,89	3,00	-60,20		
Altura dominante	0,87	0,22	5,17		
Altura total	0,84	0,18	5,01		] y=a x IVMacc + b
Área basal	0,80	0,28	3,07		
Diámetro al pecho	0,73	0,10	8,12		
Volumen	0,89	-7,10E-03	3,95	-88,15	
Altura dominante	0,88	-1,30E-03	0,39	0,06	
Altura total	0,87	-1,50E-03	0,37	-0,73	$y=a \times IVMacc^{2} + b \times IVMacc + c$
Área basal	0,83	-2,30E-03	0,59	-6,18	
Diámetro al pecho	0,79	-1,10E-03	0,25	3,75	
Volumen	0,86	175,00	-585,28		
Altura dominante	0,87	13,03	-34,20		
Altura total	0,87	10,84	-27,86		$y=a \times \ln(IVMacc) - b$
Área basal	0,83	16,84	-48,04		
Diámetro al pecho	0,79	6,07	-10,43		
Volumen	0,89	1,20E-01	-57,77		
Altura dominante	0,88	8,80E-03	5,29		
Altura total	0,85	7,20E-03	5,12		$y=a \ge a \ge a \le b$
Área basal	0,80	1,11E-02	3,32		
Diámetro al pecho	0,74	3,90E-03	8,18		
Volumen	0,89	-9,00E-06	0,15	-80,37	
Altura dominante	0,89	-2,00E-06	0,02	0,69	
Altura total	0,88	-2,00E-06	0,01	-0,20	$y=a \times RFAAacc^2 + b \times RFAAacc + c$
Área basal	0,83	-4,00E-06	0,02	-5,36	
Diámetro al pecho	0,80	-2,00E-06	0,01	4,03	
Volumen	0,86	170,48	-1113,60		
Altura dominante	0,88	12,76	-73,97		
Altura total	0,87	10,61	-60,93		$y=a \times \ln(RFAAacc) - b$
Área basal	0,83	16,41	-98,94		
Diámetro al pecho	0,80	5,95	-29,00		

\*Todos los modelos fueron estadísticamente significativos (p<0,05).



**Figura 4.** Gráficos de modelos lineales que relacionan las variables dasométricas con la RFAA acumulada, utilizando el set de datos completo. Todos los modelos fueron estadísticamente significativos (p<0,05).

# 4.3. Evaluación de los modelos de RFAA acumulada mediante muestreos partidos (Jackknife)

Si se comparan los modelos lineales y los ajustes obtenidos promediando todos los muestreos partidos generados con Jackknife (Tabla 5), los mismos son muy similares a los obtenidos utilizando el set completo de datos (Tabla 4) y similares, pero con ajuste levemente mayor a los obtenidos cuando no se utilizaron las mediciones repetidas en el tiempo (Tabla 3). Tanto para el coeficiente de correlación como para los parámetros del modelo, la variabilidad fue baja entre las distintas aproximaciones. Lo mismo sucedió al compararse los modelos polinomiales y los logarítmicos, donde los ajustes obtenidos promediando todos los muestreos partidos (Tabla 5), fueron nuevamente muy similares a los obtenidos utilizando el set completo de datos (Tabla 4) y similares, pero con ajuste levemente mayor a los obtenidos cuando no se utilizaron las mediciones mediciones repetidas en el tiempo (Tabla 3).

Tabla 5. Parámetros promedio de los modelos que relacionan la RFAA acumulada con las variables dasométricas de inventario, para los 10 set de datos generados mediante Jackknife\*

	$\mathbf{r}^2$	а	b	с	Modelo	
Volumen	0.89	1.20E-01	-57.91			
Altura dominante	0.88	8.80E-03	5.28			
Altura total	0.85	7.22E-03	5.12		y=a x RFAAacc + b	
Área basal	0.80	1.11E-02	3.31			
Diámetro al pecho	0.74	3.96E-03	8.18			
Volumen	0.89	-9.10E-06	1.51E-01	-80.50		
Altura dominante	0.89	-1.90E-06	1.51E-02	0.70		
Altura total	0.88	-2.00E-06	1.46E-02	-0.21	$y=a \times RFAAacc^{2} + b \times RFAAacc + c$	
Área basal	0.83	-3.80E-06	2.31E-02	-5.37		
Diámetro al pecho	0.80	-1.90E-06	9.67E-03	4.03		
Volumen	0.86	170.72	-1115.31			
Altura dominante	0.88	12.77	-74.06			
Altura total	0.87	10.62	-60.99		y=a x ln(RFAAacc) - b	
Área basal	0.83	16.43	-99.04			
Diámetro al pecho	0.80	5.95	-29.00			

\*Todos los modelos fueron estadísticamente significativos (p<0,05).

En todos los casos el volumen de madera fue la variable que mostró el menor RMSD (raíz del error cuadrático medio) que fue de 22,96 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> en los modelos lineales y logro los mejores ajustes de Observados contra Predichos (OP) tanto en los modelos lineales como polinómicos de segundo grado (r<sup>2</sup>=0,90 en ambos casos) (Figura 5). Si bien la altura dominante presentó el menor RMSD con modelos lineales y logarítmicos (1,82 m), los polinómicos de segundo grado mostraron un muy buen ajuste (r<sup>2</sup>=0.88) y bajo RMSD. La altura total presentó el menor RMSD con los modelos logarítmicos (1,54 m) y el mejor ajuste con los polinómicos de segundo grado ( $r^2=0.87$ ). El área basal y el diámetro al pecho se comportan de manera similar, el modelo logarítmico logra tanto menores RMSD como mejores ajustes. El área basal presentó un RMSD de 2,86 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>, con un ajuste de r<sup>2</sup>=0,84, mientras que para el DAP el RMSD fue de 1,12 cm y el ajuste de  $r^{2}=0,77$ . Todos los modelos generados mostraron un buen ajuste al compararse contra datos independientes (no utilizados en la generación del modelo). A modo de ejemplo se presentan en la Figura 5, los valores observados y predichos para el volumen de madera usando modelos cuadráticos, evaluando los modelos generados con los 10 set de datos generados por Jackknife contra datos independientes.



**Figura 5.** Gráficos de valores observados y predichos para volumen de madera usando modelos cuadráticos de RFAA acumulada, evaluando el modelo contra datos independientes. Cada grafico muestra la relación para uno de los 10 sets de datos generados, se presenta el  $r^2$  y RMSD obtenido con cada set de datos.

# 4.4. Comparativa de modelos lineales de IVM y RFAA acumulados con modelos que utilizan únicamente la edad acumulada

Debido a que al acumular valores de índices en el tiempo intrínsecamente se está acumulando la edad de las plantaciones, es posible que la edad sea un factor que explique una buena parte de los cambios en las variables dasométricas, más allá que los índices por sí mismos. Para evaluar este efecto se compararon los modelos lineales obtenidos entre RFAA e IVM con las variables dasométricas, con modelos lineales entre estas últimas y la edad acumulada en días desde la plantación considerando todas las mediciones de inventario disponibles (Tabla 6). Si bien todos los modelos lograron explicar en buena medida el comportamiento de las variables dasométricas, los modelos que obtienen información por sensoramiento remoto aportan información más allá de la edad, siempre mejorando la estimación de las variables dasométricas, logrando explicar un 4% más en promedio el comportamiento de las variables de interés forestal (modelos lineales de Tabla 4). Los modelos de regresión múltiple que incluyeron a la edad acumulada además del IVM o RFAA si bien fueron significativos no mejoraron la precisión de las estimaciones, ya que mantuvieron igual el coeficiente de regresión de las estimaciones (datos no mostrados).

 Tabla 6. Modelos lineales de edad acumulada para estimar las variables

 dasométricas sin inclusión de información derivada de sensoramiento remoto

	$r^2$	а	b	Modelo
Volumen	0.86	9.89E-02	-79.48	
Altura dominante	0.83	7.20E-03	3.75	
Altura total	0.80	5.90E-03	3.92	$y=a \times Edad_acc + b$
Área basal	0.75	9.10E-03	1.54	
Diámetro al pecho	0.70	3.20E-03	7.52	

\*Todos los modelos fueron estadísticamente significativos (p<0,05).

# 4.5. Evaluación de los modelos lineales de RFAA acumulada utilizando inventarios realizados a los 5 y 8 años de forma independiente

Finalmente, para evaluar el poder predictivo del IVM o la RFAA para una edad fija se generaron también modelos para la predicción de las variables dasométricas a partir RFAA, pero sólo utilizando inventarios temporales medidos tradicionalmente (IPT) realizados a los 5 y 8 años de forma independiente, sin considerar mediciones repetidas en el tiempo sobre los píxeles (Tabla 7 y Figura 6). Como era de esperar, los modelos lineales explicaron una porción menor de la variación de las variables dasométricas, pero fueron significativos para todas las variables a los 5 años y para todas exceptuando el diámetro a la altura del pecho y la altura dominante a los 8 años. Los modelos explicaron mejor todas las variables dasométricas a los 5 años que a los 8 años. Es importante recordar que el volumen de datos a los 5 años (102 píxeles) es el triple que a los 8 años (34 píxeles). En los modelos IPT5, la variable que obtuvo una mayor correlación con la RFAA fue el área basal y la de menor correlación el diámetro a la altura del pecho.

Tabla 7. Parámetros de los modelos que relacionan RFAA acumulada con las variables dasométricas relevadas en los inventarios a los 5 y 8 años de forma independiente

	r <sup>2</sup>	а	b	Modelo
Volumen (IPT5)*	0.46	1.47E-01	-98.82	
Altura dominante (IPT5)*	0.28	9.47E-03	4.62	
Altura total (IPT5)*	0.34	9.33E-03	2.69	y=a x RFAAacc + b
Área basal (IPT5)*	0.47	1.99E-02	-8.39	
Diámetro al pecho (IPT5)*	0.27	4.63E-03	7.59	
Volumen (IPT8)*	0.19	7.64E-02	29.05	
Altura dominante (IPT8)	0.05	2.21E-03	19.99	
Altura total (IPT8)*	0.14	3.01E-03	14.33	y=a x RFAAacc + b
Área basal (IPT8)*	0.18	7.05E-03	10.37	
Diámetro al pecho (IPT8)	0.10	1.72E-03	12.77	

\*Todos los modelos fueron estadísticamente significativos (p<0,05), excepto la altura dominante y el diámetro a la altura del pecho considerando los inventarios realizados a los 8 años.

![](_page_28_Figure_0.jpeg)

**Figura 6.** Gráficos de modelos lineales que relacionan las variables dasométricas con la RFAA acumulada, utilizando solamente los inventarios realizados a los 5 años. Todos los modelos fueron estadísticamente significativos (p<0,05).

#### 5. DISCUSIÓN

Las variaciones temporales en el IVM obtenidas en este trabajo son similares a las observadas por Marsden *et al.* (2010) y Le Maire *et al.* (2011) para IVN en plantaciones forestales de *Eucalyptus*. En estos trabajos se observaron variaciones intra e interanuales del IVN similares, las cuales se explican por el incremento del índice de área foliar (IAF) que ocurre en los primeros dos años luego de realizadas las plantaciones y luego por la variabilidad climática entre los años. Sin embargo, a diferencia de lo expuesto en estos trabajos, la inexistencia de una estación seca marcada en la zona de estudio sugiere que las variaciones intra-anuales del IVM podrían estar determinadas por la radiación incidente o la temperatura y no por las precipitaciones.

Si bien el IVM medio de la serie no parece ser un buen estimador de las variables dasométricas, sería interesante en un siguiente trabajo evaluar el IVM medio de los primeros 2 años (o 4 años en Uruguay debido al menor crecimiento de los Eucalyptus) tal como lo hicieron Marsden et al. (2010), generando información que pueda confirmarlo localmente. Una ventaja de esta aproximación sería que al utilizar la media del período y no la sumatoria se podría analizar datos provenientes de satélites de mayor resolución espacial y por lo tanto bases de datos de mayor tamaño. Tanto el IVM acumulado como la RFAA acumulada se presentan como promisorios para estimar variables dasométricas, incluso sin considerar las mediciones repetidas en el tiempo sobre un mismo rodal. Los resultados muestran una tendencia similar entre las distintas variables dasométricas y el IVM o la RFAA al igual que lo observado en otros trabajos realizados en la región (Marsden et al., 2010, Le Maire et al., 2011). Los modelos que presentan mayores ajustes son los que estiman volumen, seguidos por los de altura dominante, altura total, área basal y por último los de diámetro a la altura del pecho. Esto es favorable ya que el volumen comercial es la variable de mayor interés para estimar remotamente. Al igual que en otros trabajos los modelos no lineales, presentaron mejores coeficientes de regresión que los lineales (Ruimy et al., 1994, Piñeiro et al., 2006). Sin embargo, los modelos lineales presentaron ajustes muy similares y excelentes para la mayoría de las variables dasométricas, por lo que se recomienda su uso, evitando los sobreajustes que modelos de mayor complejidad generan.

Al evaluarse el ajuste de los modelos que acumulan simplemente la edad se aprecia que los mismos explican en menor proporción el comportamiento de las variables dasométricas (-4% promedio para las 5 variables dasométricas), esto reafirma los resultados obtenidos en Brasil por parte de Marsden *et al.* (2010) y Le Maire *et al.* (2011) en el ámbito local. El agregado de información climática a los modelos podría mejorar aún más los resultados. Si bien un aumento de 4 o 6 % podría parecer menor, para las empresas forestales mejorar las estimaciones en estos porcentajes representa un avance importante en la planificación de las cosechas y la estimación del volumen de madera a trasladar. En este sentido, la inclusión de la edad acumulada en modelos de regresión múltiple tampoco mejoró las estimaciones para una edad fija se observó que la RFAA (o el IVM) igualmente explicaron una porción importante de la variación en las variables dasométricas, aunque no en todas y esta correlación disminuyó a edades más avanzadas. Estos resultados sugieren que los sensores remotos aportan información valiosa para la determinación de variables dasométricas en rodales forestales de *Eucalyptus* en Uruguay. Sin embargo, aún resta avanzar en separar el efecto de la edad e incorporar otras variables ambientales que ayuden a mejorar las estimaciones. Finalmente, también se podrían explorar otras propiedades de las "curvas temporales" de IVM o RFAA de las forestaciones durante su desarrollo, como podrían ser las fechas de los máximos valores cada año, momentos de inicio o final de la estación de crecimiento cada año, valores máximos alcanzados cada año, etc.

### 6. CONCLUSIÓN

Este trabajo evaluó la estimación remota de variables dasométricas, para posibles usos en el rubro forestal, a partir de índices y variables derivadas de imágenes tomadas por sensores pasivos. Los resultados muestran que es posible generar estimaciones robustas y precisas de distintas variables dasométricas a bajo costo, logrando así estratificar y realizar inventarios forestales tradicionales con menores intensidades de muestreo. En el futuro, modelos similares podrían ser utilizados con información derivada de satélites con mayor resolución espacial, lo que mejoraría aún más las estimaciones y potenciaría el uso de estas herramientas en la producción forestal. Sin embargo, resta aún estudiar los efectos de la edad y potenciales variables climáticas que mejoren estas estimaciones.

### 7. BIBLIOGRAFÍA

- Atmospheric Science Data Center, NASA Langley Research Center, Hampton, VA. (2019). Recuperado de http://eosweb.larc.nasa.gov.
- Awaya, Y., Kodani, E., Tanaka, K., Liu, J., Zhuang, D., Meng, Y. 2004. Estimation of the global net primary productivity using NOAA images and meteorological data: changes between 1988 and 1993. International Journal of Remote Sensing, 25:9, 1597-1613, DOI: 10.1080/0143116031000139782.
- Baeza, S., J.M. Paruelo, and W. Ayala. 2011. Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay. Agrociencia Uruguay, 15(2), 48-59. Recuperado de http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S2301-15482011000200006&lng=es&tlng=es. 28 de febrero de 2018.

- Baret, F., Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, Remote Sensing of Environment, Volume 35, Issues 2–3, Pages 161-173, ISSN 0034-4257.
- Box, E.O., Holben, B.N., Kalb, V. 1989. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO2 flux. Vegetation 80, 71– 89.
- Bradford, J.B., Hiche, J.A., Lauenroth, W.K. 2005. The relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity. Remote Sensing of Environment, Volume 96, Issue 2, Pages 246-255.
- Carámbula, M., Piñeiro, D. 2006. La Forestación en Uruguay: Cambio demográfico y empleo en tres localidades. Agrociencia. Volumen X, Nro. 2 63-74. Recuperado de: < <u>http://164.73.52.4/agrociencia/index.php/directorio/article/view/257/188</u>>. 1 de agosto de 2020.
- Didan, K., Barreto, A., Solano, R., Huete, A. 2015. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Recuperado de: <u>https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006.</u>
- DIEA. 2019. Anuario Estadístico Agropecuario (2019). Dirección de Investigaciones Económicas y Agropecuarias (DIEA). Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca- Montevideo, Uruguay.
- Ferrer, M., Pedocchi, R., Gonzáles, G., Echeverría, G. 2012. Delimitación climática de las regiones vitícolas del Uruguay: Clima, zonificación y tipicidad del vino en regiones vitivinícolas Iberoamericanas. Pag. 365-387.
- Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Griffin, K.L., Hartley, A.E., Joel, G., Penuelas, J. and Valentini, R. 1995. Relationships Between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types. Ecological Applications, 5: 28-41.
- Gower S.T., Kucharik C.J., Norman J, M. 1999. Direct and Indirect Estimation of Leaf Area Index, fAPAR, and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. Remote Sensing of Environment, Volume 70, Issue 1, Pages 29-51.
- Grigera, G., M. Oesterheld and F. Pacín. 2007. Monitoring forage production for farmers' decision making. Agricultural Systems 94: 637–648.

- Hilker, T., N.C. Coops, M.A. Wulder, T.A. Black, and R.D. Guy. 2008. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: a review of current status and future requirements. Science of the Total Environment 404: 411–423.
- Huete, A., Didan, K., Miura T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, Remote Sensing of Environment, Volume 83, Issues 1–2, Pages 195-213.
- Hunt, E.R. (1994) Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI, International Journal of Remote Sensing, 15:8, 1725-1729.
- Köppen, W. 1936. Das geographisca System der Klimate, in: Handbuch der Klimatologie, edited by: "Köppen, W. and Geiger, G., 1. C. Gebr, Borntraeger, 1–44.
- Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). 2018. NASA EOSDIS. USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota. Recuperado de: https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/.
- Le Maire, G., C. Marsden, Y. Nouvellon, C. Grinand, R. Hakamada, J.L. Stape, and J.P. Laclau. (2011). MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. Remote Sensing of Environment, 115(10), 2613-2625.
- Marsden, C., G. Le Maire, J.L. Stape, D.L. Seen, O. Roupsard, O. Cabral, D. Epron, A. Lima, and Y. Nouvellon. 2010. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. Forest Ecology and Management, 259(9), 1741-1753.
- Matsushita, B., Tamura, M. 2002. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia, Remote Sensing of Environment, Volume 81, Issue 1, Pages 58-66.
- Monteith JL. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology, 9:747-766.
- Nouvellon, Y., Bégué, A., Moran, S., Lo Seen, D., Rambal, S., Luquer, D., Chehbouni, G., Inoue, Y. 2000. PAR extinction in shortgrass ecosystems: effects of clumping, sky conditions and soil albedo. Agricultural and Forest Meteorology, Volume 105, Issues 1–3, Pages 21-41.

- Ordoñez, Y., Andrade H., Quirós D., y Venegas G. 2012. Dasometría y cubicación de la madera. *En*: Detlefsen, G. y E. Somarriba (Eds.). Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica. CATIE. Turrialba, Costa Rica. pp. 27-67.
- Panario D. 1987. Geomorfología del Uruguay. Facultad de Humanidades y Ciencias, Uruguay. 44 pp.
- Paruelo, J.M., Epstein, H., Lauenroth, W. and Burke, I. 1997. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. Ecology 78, 953– 958.
- 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.
- Paruelo, J.M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. Ecosistemas 17(3):4-22.
- Paruelo, J. M., G. Pineiro, G. Baldi, S. Baeza, F. Lezama, A. Altesor, and M. Oesterheld. 2010. Carbon stocks and fluxes in rangelands of the Rio de la Plata basin. Rangeland Ecology & Management, 63(1), 94-108.
- Piñeiro, G., M. Oesterheld, and J.M. Paruelo. 2006. Seasonal variation in aboveground production and radiation use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. Ecosystems 9:357–373.
- Potter, C.S., J.T. Randerson, C.B. Field, P.A. Matson, P.M. Vitousek, H.A. Mooney and S.A. Klooster. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles 7: 811–841.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., Real, P. 1997. Mensura Forestal (No. 1). Agroamerica.
- Rassmusen, P.E., Goulding, K.W.T., Brown, J.R., Grace, P.R., Janzen H.H., Körschens,
  M. 1998. Long-Term Agroecosystem Experiments: Assessing Agricultural Sustainability and Global Change. Science Vol. 282, Issue 5390, pp. 893-896.
- Ruimy A, B. Saugier, and G. Dedieu. 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. Journal of Geophysical Research, 99: 5263-5283.
- Sellers, P., S. Los, C. Tucker, C. Justice, D. Dazlich, G. Collatz, and D. Randall. 1996. A revised land surface parameterization (Sib2) for atmospheric GCMS. Part II:

the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. Journal of Climate 9: 706–737.

- Tucker, C.J., Vanpraet, C.L., Sharman, M.J., Van Ittersum, G. 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the senegalese sahel: 1980– 1984, Remote Sensing of Environment, Volume 17, Issue 3, Pages 233-249.
- Vassallo, M. M., H. D. Dieguez, M. F. Garbulsky, E.G.Jobbagy, and J. M. Paruelo. 2012. Grassland afforestation impact on primary productivity: a remote sensing approach. Applied Vegetation Science 16:390–403.
- Vermote, E., El Saleous, N., Justice, C. 2002. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. Remote Sensing of Environment 83, 97–111.
- Wylie, B.K., Meyer, D.J., Tieszen, L.L., Mannel, S. 2002. Satellite mapping of surface biophysical parameters at the biome scale over the North American grasslands: A case study. Remote Sensing of Environment, Volume 79, Issues 2–3, Pages 266-278.