



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES

TRABAJO FINAL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

**“Evaluación de las existencias y cambios de las superficies
implantadas con *Eucalyptus grandis* en la zona de Humaitá,
Departamento de Colón, Entre Ríos.”**

ALUMNO: MARTÍN SANDOVAL
LEGAJO: 24867/9
ESTUDIANTE DE ING. FORESTAL

DIRECTORA: MSC. MIRIAM PRESUTTI
CODIRECTORA: ING. FTAL. SARAH L. BURNS

Evaluación de las existencias y cambios de las superficies implantadas con *Eucalyptus grandis* en la zona de Humaitá, Departamento de Colón, Entre Ríos.

Resumen

Las plantaciones de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) tiene uno de los núcleos principales en el NE de Entre Ríos particularmente en una franja sobre la margen occidental del Río Uruguay. Aunque estas plantaciones son la base que sustenta una de las actividades productivas que caracterizan la región, han sido sometidas a cierta controversia sobre los efectos ambientales que producen. Para conocer la magnitud de estos potenciales riesgos ecológicos y su vinculación con la sustentabilidad de estas plantaciones en una amplia zona, resulta necesario precisar las relaciones entre distintos atributos estructurales de la masa arbórea y los derivados de imágenes satelitales. Para el área de estudio, se realizaron análisis de correlación y regresión considerando como variable predictora la biomasa obtenida de 31 parcelas de muestreo a campo y los valores medios de diferentes índices de vegetación extraídos de una imagen LANDSAT 5 TM de diciembre de 2008. Adicionalmente, se incorporaron a los modelos de regresión las variables categóricas método de repoblación, tratamiento de los residuos postcosecha y unidad cartográfica asociada al tipo de suelo. Se determinó que sólo existe una correlación significativa entre las variables continuas derivadas de los distintos índices de vegetación y la biomasa. Particularmente, los valores digitales de la Banda 5 (Infrarrojo medio) tienen una relación moderadamente alta e inversa con la biomasa ($r=-0,714$). El modelo de regresión lineal logarítmico propuesto utilizando esta variable tiene un ajuste adecuado en términos de R^2 del 79,05%, el sesgo intrínseco de esta función implica la consideración de ciertas restricciones. Por otro lado, el estudio de la distribución espacial de los cambios del uso del suelo en términos de superficie a partir de imágenes LANDSAT 5 TM adquiridas en el período 1985-2008, indica un fuerte reemplazo de la clase pastizal por plantaciones de *Eucalyptus* spp. principalmente en el período 1992-1997, con una tasa de cambio de 137,64ha/año, asociado a algunos procesos económicos relevantes. Se resalta la implementación de los Sistemas de Información Geográfica para estudios de la dinámica del recurso forestal a nivel regional.

Palabras clave: biomasa, índices de vegetación, LANDSAT, cambio de uso del suelo.

Introducción

La provincia de Entre Ríos presenta condiciones climáticas y edáficas, particularmente en una franja sobre la margen occidental del Río Uruguay, favorables para la implantación de especies forestales de gran productividad como *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden), *Eucalyptus globulus* (Labill), *Eucalyptus dunnii* (Maiden), *Pinus elliottii* (Engelm.) y *Pinus taeda* (L.). Los departamentos Concordia, Colón y Federación forman parte de dicha franja costera y albergan casi el 90% de las forestaciones en pie, en marcada asociación con los suelos arenosos característicos de esa región (Brizuela *et al.*, 2004).

La enorme difusión de los eucaliptos se debe a que muchas de sus especies muestran una alta adaptabilidad, un buen crecimiento y son apropiadas para una variedad de usos. Estas virtudes se contraponen con cierta tendencia adversa a la plantación de eucaliptos, debida a los efectos ecológicos supuestamente dañinos que provoca (SAGyP & INTA, 1995). Los efectos ambientales locales de carácter negativo producidos por los monocultivos de eucalipto que más se mencionan en la literatura pueden agruparse en: efectos sobre el ambiente abiótico (reducción de la cantidad de agua disponible en el subsuelo y la pérdida de nutrientes del suelo) y efectos sobre el ambiente biótico (inhibición del crecimiento de la vegetación nativa y reducción de la fauna local) (Ceccon & Martínez-Ramos, 1999). Para conocer la magnitud de estos potenciales riesgos ecológicos y su relación con la sustentabilidad de las plantaciones es necesario realizar estimaciones de parámetros estructurales a distintas escalas espacio-temporales.

Los procesos de crecimiento así como el efecto de las plantaciones sobre el suelo son dependientes de aspectos del manejo, entre otras cosas, resulta relevante si la plantaciones son repobladas por rebrote o por replantación debido a que existen diferencias en las tasas iniciales de crecimiento y en consecuencia en la acumulación de biomasa/volumen (Graciano *et al.*, 2007). Esos diferentes métodos de población pueden implicar la aplicación de distintos tratamientos de los residuos postcosecha, como su quema (SAGyP & INTA, 1995), que pueden incidir en estos procesos. Según Noble & Herbert (1989), citados por Bonomelli *et al.* (2002) y Geldres *et al.* (2006), existe una biomasa óptima que es naturalmente sustentable para cada sitio, lo que depende de la disponibilidad de nutrientes del sitio, del clima, del suelo y de las prácticas de manejo. El análisis de las plantaciones actuales de distintas edades, en suelos con diferente número de cosechas previas y con varios tipos de manejo permitiría estimar la relación de todas esas variables con la biomasa/volumen, para lo cual es necesario desarrollar ecuaciones que consideren estos parámetros. Estas ecuaciones, junto a la utilización de modelos de crecimiento y otras herramientas predictivas, permitirán realizar estimaciones más precisas.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han sido adoptados como herramienta de análisis y presentación de datos por una amplia variedad de disciplinas, sin embargo, su aplicación al estudio del medio ambiente se ha convertido en una herramienta de importancia para la toma de decisiones en diferentes niveles de gestión, por ser considerado el núcleo fundamental de la integración geoinformática (Buzai & Matteucci, 2002). En los últimos años se ha generalizado el uso de imágenes satelitales para la cuantificación del recurso forestal. Brizuela & Milera (2002) propusieron utilizar un método de actualización y seguimiento de la dinámica de plantaciones forestales que incluye el uso de imágenes satelitales y trabajo de campo. Para estimar la biomasa forestal en una amplia zona es necesario precisar las relaciones entre distintos atributos estructurales de la masa arbórea y los derivados de imágenes satelitales (Suganuma *et*

al.; 2006). Varios autores han logrado buenos resultados con el empleo de imágenes LANDSAT para estimar la biomasa, tanto en plantaciones de eucalipto (Baruah *et al.*, 2005, 2006), en particular *E. globulus*, como en bosques nativos (Zheng *et al.*, 2004). En todos los casos, las imágenes deben ser procesadas con el fin de extraer diversos índices de vegetación, cocientes entre dos o más bandas de una imagen satelital, que permiten realzar determinadas características de importancia de la vegetación existente. El diseño de estos índices se apoya en el diferente comportamiento reflectivo de la luz que incide sobre los distintos materiales de la corteza terrestre (Figura 1). Una imagen de satélite puede ser vista como una matriz tridimensional de números que corresponden a los valores de reflectancia para un píxel ubicado en una posición x, y para una banda z. Un valor de reflectancia corresponde a la intensidad de la respuesta obtenida desde la tierra a la señal emitida por el sensor (Hoyos Pineda & Pérez Castillo, 2008). Gilabert *et al.* (1997) indican que la reflectividad de la luz incidente depende de la longitud de onda y de los constituyentes químicos del material que atraviesa, en la vegetación además está determinada por las características ópticas y la distribución espacial de todos sus componentes, incluyendo el suelo sobre el que se asienta. Además, afirman que la reflectividad de la vegetación verde pasa de un mínimo relativo en el rojo, correspondiente a la banda de absorción de la clorofila a un máximo absoluto en el infrarrojo cercano que es consecuencia de las dispersiones múltiples de la radiación por el interior de la estructura celular. Esta propiedad es aprovechada por los sensores para discriminar la vegetación del resto de las variables que no son de interés.

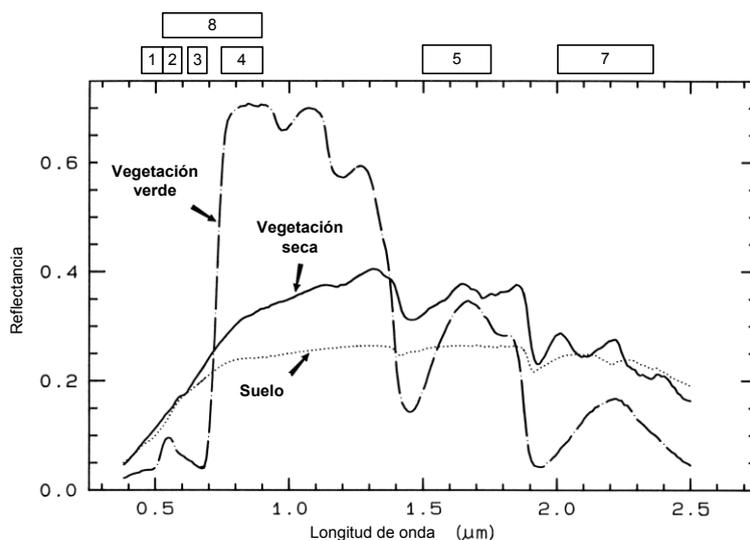


Figura 1. Niveles de reflectancia vs longitud de onda, donde se indican los rangos de longitudes de onda de las bandas que integran las imágenes LANDSAT 5 TM. 1: azul, 2: verde, 3: rojo, 4: infrarrojo cercano, 5: infrarrojo medio, 7: infrarrojo medio y 8: verde- infrarrojo medio. Adaptado de Clark *et al.*, 2003.

El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) integra dos aspectos claves del comportamiento espectral de los tejidos fotosintéticos: la baja reflectancia en longitudes de onda correspondientes al rojo debida a la absorción por parte de la clorofila, y la alta reflectancia en la porción del infrarrojo cercano debida a la estructura del mesófilo de las hojas (Paruolo, 2008). Existe una relación lineal entre los valores digitales (dn) originales obtenidos por la cámara del satélite LANDSAT y la reflectancia, sin embargo, numerosa bibliografía consultada considera que es necesario corregir radiométricamente estos valores con el objetivo de eliminar ruidos en la

imagen compensando las diferencias utilizando modelos atmosféricos y datos de iluminación y altura de observación de la escena (SIB & APN, 2005). Como consecuencia de dicha conversión el índice varía entre -1 y 1, siendo los máximos valores coincidentes con la respuesta espectral de la vegetación sana lo que facilita la interpretación de los resultados. Relacionado con este índice, el $NDVI_{\text{corregido}}$ (NDVIc) incorpora la banda 5 del infrarrojo medio la cual es menos afectada por los efectos atmosféricos (Prananto *et al.*, 2004). El uso de cocientes entre bandas como el SR (Simple Ratio) se presentan como los índices más simples, relacionados con los cambios en la cantidad de biomasa verde, contenido y concentración de pigmentos (Vescovo & Gianelle, 2008). El tNDVI (Transformed Difference Vegetation Index) ha sido empleado principalmente para el estudio de zonas donde el suelo tiene una importante influencia sobre los valores espectrales (Bannari *et al.*, 2002; Pérez Cutillas *et al.*, 2006).

El análisis de los distintos índices se realiza mediante la integración de las mediciones a campo, los datos adquiridos por satélite y los que resultan en la generación de modelos matemáticos como analogía de lo observado en el mundo real. En general, estos modelos se escriben como una ecuación que define un valor que se desea predecir (y) a partir de una o más variables (x) que se conocen (Harvey Motulsky, 1995). En ese sentido, Baruah *et al.* (2005, 2006) han demostrado que los valores de reflectancia alrededor del infrarrojo (banda 5 en LANDSAT) seguida de la banda 2, son fuertes predictoras para la estimación del volumen de madera en plantaciones comerciales de *E. globulus* en Chile. Sin embargo, Zheng *et al.* (2004) encontró que las estimaciones para biomasa aérea de bosques de latifoliadas se encuentran fuertemente relacionadas con la edad del rodal y la reflectancia en el infrarrojo cercano (banda 4) en el Norte de Wisconsin, USA. En base a estos resultados, si se pretende desarrollar esta herramienta de estimación de existencias forestales, resulta necesario hacer una evaluación del comportamiento de distintos índices espectrales para casos particulares.

La actividad forestal en la provincia de Entre Ríos está localizada fundamentalmente, en los suelos arenosos de las terrazas del río Uruguay, donde actualmente compite con la citricultura. En el Departamento de Colón, este cultivo reviste poca importancia (Larocca, 1983), por lo que las forestaciones de *E. grandis* han avanzado hacia los suelos ocupados anteriormente por dicha actividad. Si bien estas plantaciones forman parte del paisaje en el noreste de Entre Ríos desde hace más de cinco décadas y son la base que sustenta una de las actividades productivas que caracterizan la región, recientemente han comenzado a ser fuente de preocupación por parte de las comunidades locales debido a los potenciales efectos de estas plantaciones sobre el medio ambiente (Díaz *et al.*, 2006). En el mismo sentido, los cambios en la cubierta de la tierra debidos a los cambios de uso del suelo, han sido identificados como un proceso clave que puede incidir sobre los niveles de carbono atmosférico y el cambio climático global (Carrasco-Letelier *et al.*, 2004). Una aproximación de esta problemática puede realizarse a partir de modelos de cambio de paisaje los cuales sirven para una variedad de propósitos que abarcan desde el análisis de la variación en la interacción de los procesos naturales hasta la evaluación de propuestas de manejo. Los modelos espaciales requieren datos que pueden ser obtenidos a través de la teledetección y pueden manipularse en los sistemas de información geográfica (Baker, 1989). En general los esfuerzos de analizar y modelar los procesos de cambio de uso del suelo se orientan a responder los siguientes interrogantes: ¿por qué ocurre el cambio en el uso del suelo?, ¿dónde? y ¿cuándo ocurre el cambio? (Sandoval & Oyarzun, 2004). Estos tres interrogantes fundamentales, pueden ser abordados a través de la metodología del análisis multitemporal a partir de imágenes satelitales.

El objetivo general del proyecto es desarrollar una metodología basada en el análisis de imágenes satelitales y muestreos a campo, que permita determinar las existencias en Mg/ha de biomasa actuales en plantaciones de *E. grandis*, como así también caracterizar los cambios temporales en el uso del suelo en una zona núcleo del desarrollo forestal del NE de Entre Ríos.

Objetivos.

1. Evaluar distintos índices de vegetación y su correlación con la biomasa/volumen de plantaciones de *E. grandis*.
2. Determinar los cambios históricos en términos de superficie que se han producido en el uso de la tierra (vegetación nativa, cultivos frutales, forestaciones).

Materiales y métodos

Área de estudio

La zona de análisis comprende los establecimientos “Los Monigotes S.A.” e “Ybyraty S.A.” cuyos cascos están situados a 31° 48' 17,23" S y 58° 11' 23,44" O y 31° 46' 54,90" S y 58° 09' 49,36" O respectivamente, ambos en el extremo NE del departamento de Colón. Las plantaciones de *E. grandis* se establecen en buena parte de dicha extensión con una superficie neta de aproximadamente 4100 ha en suelos denominados localmente “mestizos” (Orden Inceptisol y Molisol) principalmente y también sobre arenas rojizas profundas (Orden Entisol) y suelos arcillosos (Orden Vertisol) (SAGyP & INTA, 1995). La estructura de edades de los rodales abarca desde los recientemente implantados hasta aquellos en turno de corta, el cual oscila entre los 12 y 14 años. Estos rodales se han establecido sobre antiguas plantaciones que luego de ser aprovechadas han sufrido quema de los residuos postcosecha en algunos casos, o sobre suelo ocupado anteriormente por pastizales. La superficie observada que ocupan las plantaciones de *Pinus* spp. y de *E. dunnii* es sensiblemente inferior con respecto a la correspondiente a *E. grandis*. Los pastizales naturales son la vegetación dominante en aquellos lugares donde no existen plantaciones, además de una pequeña superficie relativa ocupada por la actividad citrícola.

1. *Estimación de la biomasa por medio de imágenes satelitales LANDSAT.*

1.1. *Estimación de biomasa a campo*

Como parte de la planificación de las actividades se seleccionaron 31 parcelas muestrales las cuales fueron distribuidas dentro del rango de edades al turno, el método de repoblación: plantación, replantación o rebrote, el número de ciclos de cosecha previos y el tipo de tratamiento de los residuos postcosecha: con o sin quema; adicionalmente se determinó a que unidad cartográfica de suelo (INTA, 2002) pertenece (Figura 2).

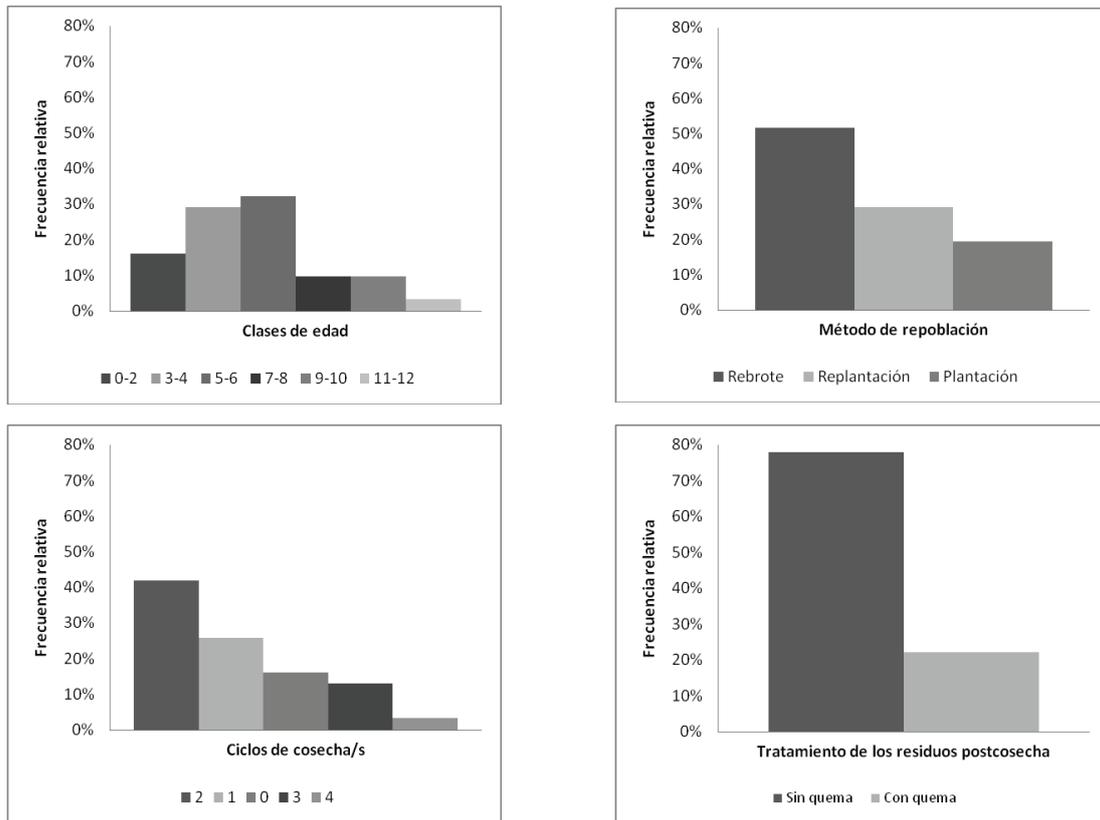


Figura 2. Distribución de frecuencias relativas de las características centrales del conjunto de parcelas muestrales.

En campo, se establecieron parcelas rectangulares previamente georreferenciadas (Figura 3) de 5 x 10 árboles coincidiendo el lado más largo con la línea de plantación. La superficie relevada para cada situación fue variable en función de la densidad de plantación, en general de 2,5 x 2,5m (1500 plantas/ha), la cual se midió con cinta métrica al cm.

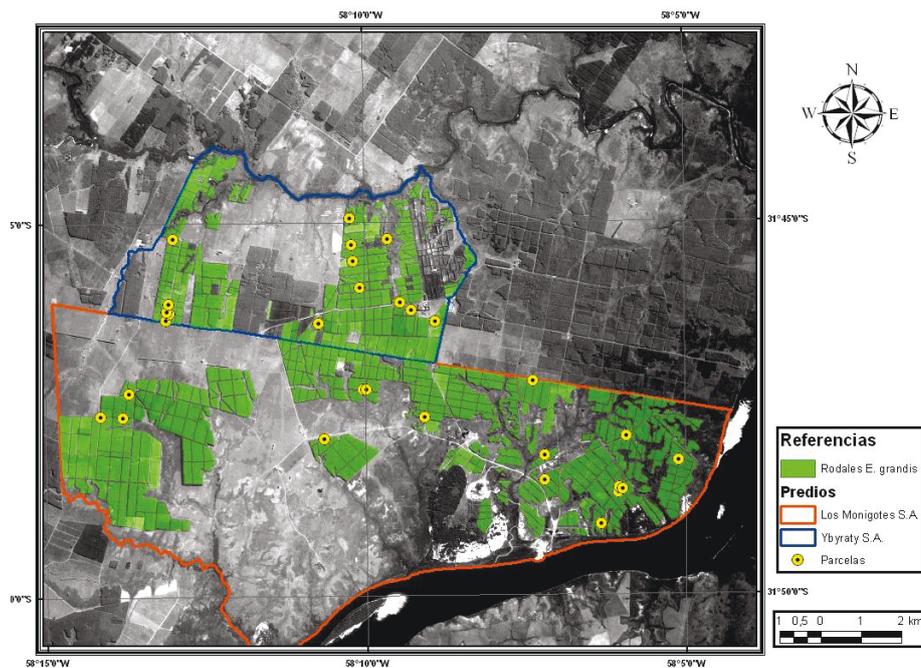


Figura 3. Distribución espacial de las 31 parcelas de muestreo a campo y de los rodales de *E. grandis* existentes sobre una imagen CBERS-2B HRC del 24 de marzo de 2008.

Se determinaron los diámetros a la altura del pecho (DAP) de todos los árboles con DAP mayor a 5cm con cinta diamétrica y las alturas árbol por medio con Vertex láser, al mm y al cm respectivamente. Con estos parámetros estructurales se generaron regresiones locales DAP-altura para estimar la altura de los no medidos. De cada parcela se calculó la densidad de área basal (m²/ha), la densidad de volumen comercial total hasta los 12cm de punta fina (m³/ha), el peso seco total (kg) y la biomasa seca total (Mg/ha) con las ecuaciones para árboles individuales de *E. grandis* propuestas por Goya *et al.* (1997) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Modelos alométricos utilizados para estimar el volumen comercial hasta los 12cm de punta fina y el peso seco total de *E. grandis* propuestos por Goya *et al.* (1997). DAP: diámetro a la altura del pecho (m) y h: altura (m).

Variable estimada	Ecuación
Volumen (m ³)	$y = e^{(-10,038684+1,836277\ln(DAP-100)+1,081496\ln(h))}$
Peso seco total (kg)	$y = e^{(5,24+0,930\ln(DAP^2 \cdot h))}$

1.2. Demarcación digital de los rodales

Se empleó como base una imagen adquirida por la Cámara de Alta Resolución HRC (Cuadro 2) del satélite CBERS-2B (China Brazilian Earth Resources Satellite) descargada de la página web del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil – INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) del 24 de marzo de 2008, correspondiente a la Órbita/Punto 164-D/135-5 según el sistema de referencia para este satélite. Los polígonos (rodales) fueron definidos a través del software ArcMap 9.2 con el apoyo de imágenes auxiliares (fotografías digitales) georreferenciadas, datos catastrales e información proporcionada por el personal técnico de cada empresa. Se crearon campos adicionales en donde se indicó la edad de cada rodal y se calculó el área ocupada.

Cuadro 2. Características generales de las imágenes adquiridas por los satélites CBERS-2B y LANDSAT 5.

Satélite/Sensor	Banda	Longitud de onda (µm)	Resolución espacial	Resolución temporal	Resolución radiométrica
CBERS-2B HRC	1	0.50 - 0.80 (pancromática)	2,7m	130 días	0-255
	1	0.45 - 0.52 (azul)	30m		
	2	0.52 - 0.60 (verde)	30m		
	3	0.63 - 0.69 (rojo)	30m		
LANDSAT 5 TM	4	0.75 - 0.90 (infrarrojo cercano)	30m	16 días	0-255
	5	1.55 - 1.75 (infrarrojo medio)	30m		
	6	10.4 - 12.50 (infrarrojo térmico)	60m		
	7	2.08 - 2.35 (infrarrojo medio)	30m		
	8	0.52 - 0.90 (verde - infrarrojo cercano)	15m		

1.3. Preprocesamiento de las imágenes satelitales LANDSAT

Se utilizó una imagen LANDSAT 5 TM (Cuadro 2) del 18 de diciembre de 2008 correspondiente al Path/Row 225/82 según el sistema de referencia mundial, adquirida de la página web del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil – INPE, la cual fue seleccionada por su escasa cobertura de nubes y proximidad temporal con la fecha de toma de datos a campo. Las tareas de preprocesamiento se realizaron con el software ERDAS Imagine 9.1 e implicaron la aplicación de distintos índices y cocientes de bandas que según Baruah *et al.* (2004, 2005) y Zheng *et al.* (2004) resultan como buenos predictores de la biomasa/volumen. En consecuencia se obtuvieron cinco imágenes adicionales aplicando estas transformaciones más dos que corresponden a las bandas 2 y 5 originales (Cuadro 3).

Cuadro 3. Ecuaciones para el cálculo de los distintos índices de vegetación empleados. NDVI: Normalized Difference Vegetation Index (1) con los valores digitales originales (2) con los valores de reflectancia, NDVIc: NDVI corregido, SR: Simple Ratio, tNDVI: Transformed Difference Vegetation Index, NIR: Infrarrojo cercano (Near InfraRed), R: Rojo (Red), MIR: Infrarrojo medio (Medium InfraRed) y ρ : valores de reflectancia.

Índice de vegetación	Ecuación
NDVI (1)	$\frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$
NDVI (2)	$\frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R)}$
NDVIc	$\frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R)} \times \left[1 - \frac{(\rho_{MIR_{max}} - \rho_{MIR_{min}})}{(\rho_{MIR_{max}} + \rho_{MIR_{min}})} \right]$
SR	$\frac{\rho_{NIR}}{\rho_R}$
tNDVI	$1,5 \times \left(\frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{\sqrt{(\rho_{NIR})^2 + \rho_R + 0,5}} \right)$
Banda 2	Valores digitales originales alrededor del verde
Banda 5	Valores digitales originales alrededor del MIR

1.4. Análisis estadístico

Se generaron parcelas digitales de muestreo de píxeles (n=31) de tamaño proporcional y ubicadas en la parte central del rodal muestreado a campo, dejando 60m de zona buffer para evitar la interferencia en los valores de reflectancia que puedan provocar los caminos (Figura 4) y se calcularon los estadísticos media, desvío estándar y coeficiente de variación.

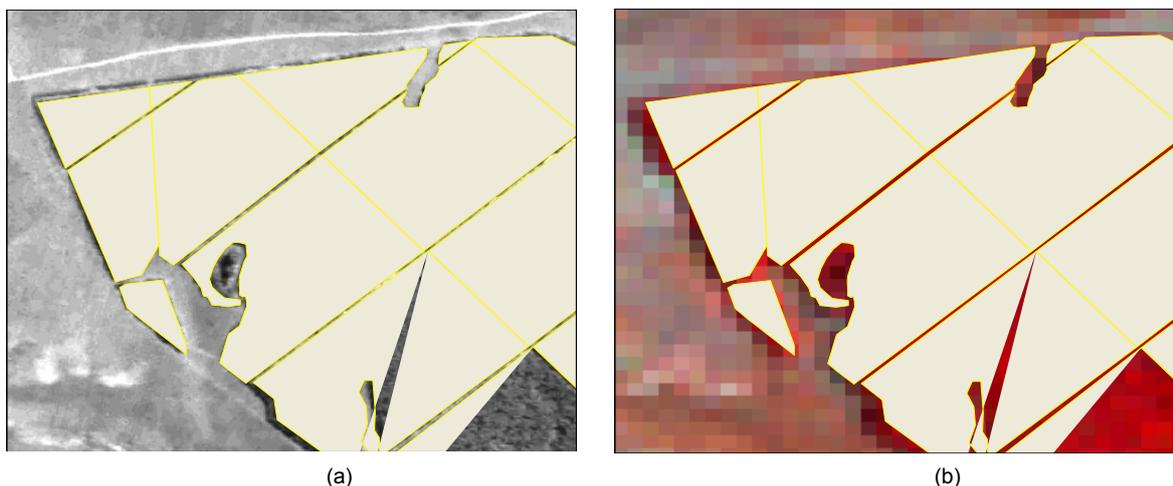


Figura 4. Plantación de *E. grandis* indicando una parcela de muestreo de píxeles (interior del polígono negro), en amarillo límites del rodal, el área rayada corresponde a la zona buffer de 60m no muestreada. (a) Imagen CBERS-2B HRC, (b) LANDSAT 5 TM con combinación en falso color 4-3-2 (rojo, verde y azul, respectivamente).

En primer lugar se realizó un análisis de regresión simple entre la variable dependiente volumen y la independiente biomasa con el fin de corroborar la alta correlación que existe entre estos dos parámetros que menciona numerosa bibliografía y así simplificar la presentación de los resultados. En particular, para la zona de estudio interesan los datos de biomasa puesto que es habitual el uso del peso húmedo por ha en la comercialización de la madera.

Para el análisis estadístico de los datos se consideró entonces como variable respuesta la biomasa observada (Mg/ha), como variables explicatorias continuas: la edad, el número de cosechas previas y los valores medios del muestreo de píxeles para cada índice, y como categóricas: la quema de residuos postcosecha, el método de repoblación y la unidad cartográfica donde se desarrolla la plantación, éstas últimas previamente transformadas en variables dummy o indicadoras (Canavos, 1998); en total se evaluaron 12 variables predictoras. Como medida de la magnitud de la asociación lineal entre dos variables que no depende de las unidades de medida de las variables originales, se determinaron los coeficientes de correlación de Pearson con un nivel de confianza del 95%. Se seleccionaron aquellas variables explicatorias más correlacionadas con la variable respuesta y que a su vez no estén fuertemente asociadas entre sí, ya que el aporte al modelo de regresión no es importante (Sokal & Rohlf, 1980).

Se generaron los modelos de regresión múltiple utilizando el método de mínimos cuadrados (Canavos, 1998), incorporando las variables categóricas y se analizaron para cada uno los coeficientes de determinación ajustados (R^2 aj.), el nivel de significancia de las variables independientes, el error estándar de los residuos y la linealidad de la relación; se graficaron los residuos estudentizados para identificar patrones que indiquen la necesidad de transformar los datos originales. Para estimar los intervalos de confianza del modelo se empleó el método bootstrap, recomendado para muestras relativamente pequeñas, que consiste en crear un gran número de submuestras con reposición de los datos observados, en este caso 2000 muestras, recalculando los coeficientes de determinación (t^*) para cada caso y analizar su distribución de frecuencias (Pla & Matteucci, 2001; Júdez *et al.*, 2002; Ledesma, 2008). Finalmente con el software ERDAS Imagine 9.1 se generó un modelo espacial de biomasa usando como base las imágenes transformadas y los parámetros obtenidos del modelo de regresión múltiple elegido.

2. Análisis de la evolución del área forestada.

Se evaluó cual fue el cambio en el uso del suelo en el área de estudio para el período 1985-2008 a partir de la digitalización de 715 polígonos, en su mayoría rodales de *Eucalyptus* spp., sobre una imagen LANDSAT 5 TM y otra CBERS-2B HRC del 21 y 23 de marzo de 2008, respectivamente. Se establecieron clases de uso del suelo distinguiendo: (0) pastizal/suelo desnudo, (1) plantaciones de *Eucalyptus* spp., (2) plantaciones de *Citrus* spp., (3) plantaciones de *Pinus* spp. La superficie relevada fue de aproximadamente 4100ha. A partir de esta codificación se procedió a identificar la clase de uso que tenía cada polígono con el apoyo de imágenes LANDSAT 5 TM adquiridas en las siguientes fechas: 18 de noviembre de 2000, 27 de junio de 1997, 21 de enero de 1992 y 10 de junio de 1985. Se crearon matrices de cambio de uso del suelo al año en cada período (Chuvieco Salinero, 1985; Sandoval & Oyarzun, 2004) en donde se indicaron las frecuencias relativas de transferencia entre clases y se calcularon las tasas anuales de cambio (ha/año) para cada período como indicadores de la magnitud de la transformación, finalmente se generó un mapa señalando la distribución espacial de las variaciones.

Resultados y discusión

1. Estimación de la biomasa/volumen a campo

El DAP se presenta como un buen parámetro predictor de la altura, tal como lo demuestra el ajuste del modelo de regresión local implementado (Cuadro 4) luego de excluir 5 datos atípicos (con residuo estudentizado mayor a 3), el análisis de residuos no presenta ningún patrón de distribución que indique la necesidad de transformar los datos originales (Figura 5)

Cuadro 4. Modelo de regresión, parámetros y estadísticos para la estimación de la altura a partir del DAP. y: altura (m), x: DAP (cm), r: coeficiente de correlación, MAE: error absoluto medio y R²: coeficiente de determinación (%) (n=546).

Ecuación	r	a	p-value	b	p-value	MAE	R ² ajustado
$y = a + b \cdot x$	0,948175	1,30911	0,0000	1,05712	0,0000	1,85044	89,8851

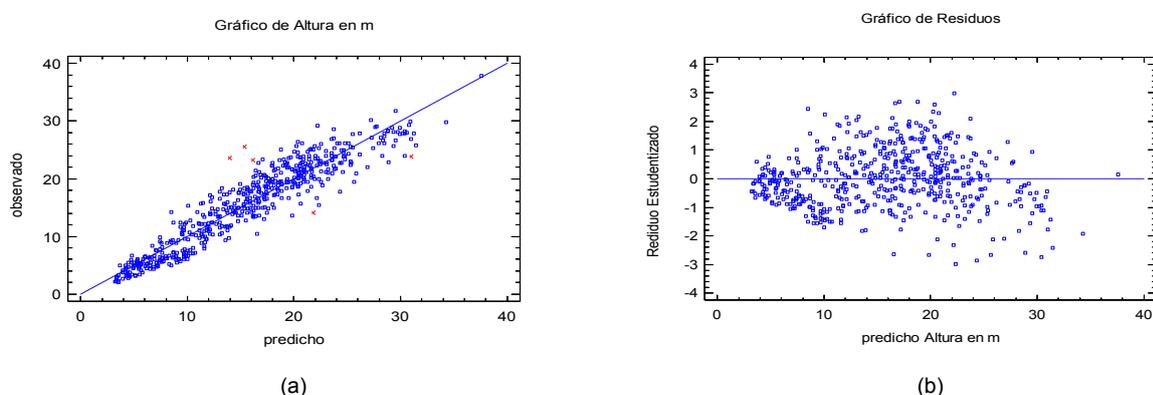


Figura 5. Distribución de (a) valores observados de altura (m) vs predichos por el modelo de regresión a partir del DAP (cm) y (b) de los residuos de los valores predichos (n=546). Se indica con una cruz los datos atípicos excluidos.

Prácticamente, el 70% de las plantaciones de *E. grandis* están ubicadas sobre las unidades cartográficas 21 y 23 correspondientes a suelos Hapludoles fluvénticos: arenosos pardos o "mestizos" con subsuelo denso, y casi un 26% en la UC 17 perteneciente a los Haplumbreptes fluvénticos: suelos aluviales antiguos con subsuelo denso (Anexo: Cuadro 8), esta distribución espacial es similar a la observada en la totalidad de los rodales en la zona de estudio (Figura 6).

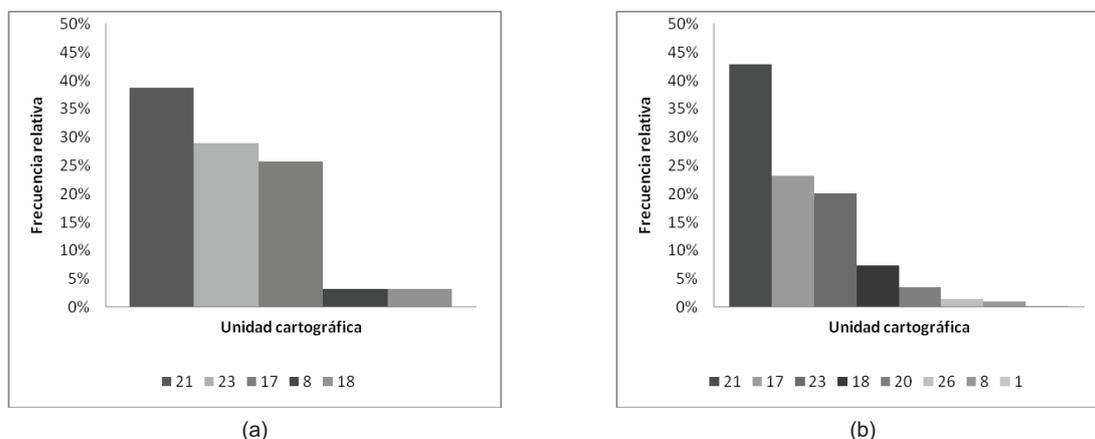


Figura 6. Frecuencias relativas de las unidades cartográficas donde están ubicadas (a) las parcelas de muestreo a campo y (b) el conjunto de todos los rodales.

Los resultados del muestreo a campo (Figura 7) señalan que casi el 75% de las parcelas relevadas se encuentran en las clases de biomasa seca total menores a 120Mg/ha, considerada como media con respecto a la que se obtiene al turno en sitios de calidad promedio (SAGyP & INTA, 1995). Esta distribución se refleja en el volumen debido a la alta correlación entre estos parámetros dasométricos.

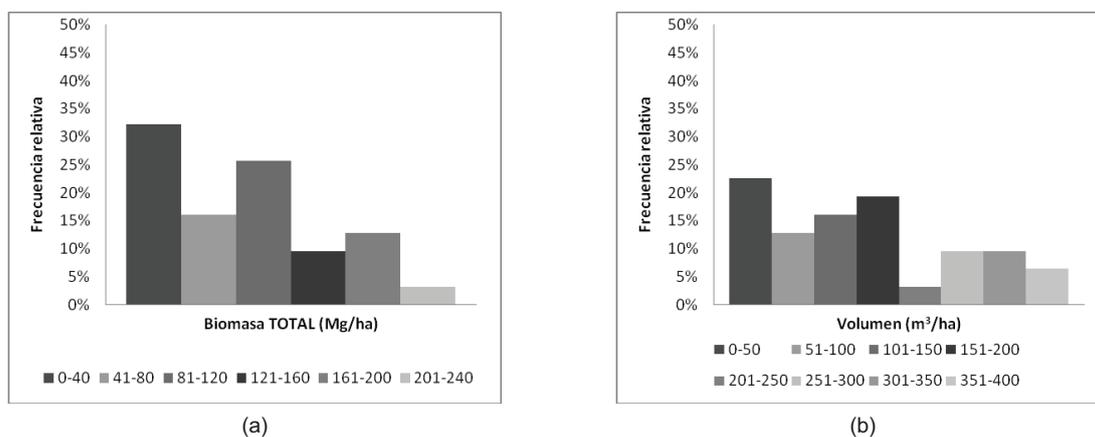


Figura 7. Frecuencias relativas de (a) clases de biomasa seca total (Mg/ha) y (b) clases de volumen comercial hasta los 12cm de punta fina (m³/ha).

Los datos completos del muestreo a campo se pueden ver en el Anexo (Cuadro 9).

2. Análisis estadístico de los modelos de regresión de biomasa/volumen

Existe una relación relativamente fuerte entre el volumen hasta los 12 cm de punta fina y la biomasa seca total ($r=0,999582$). El modelo de regresión que predice el volumen a partir de la

biomasa registra un muy buen ajuste en términos de R^2 del 99,9135% (Cuadro 5). El gráfico de residuos (Figura 8) indica una distribución aleatoria de los mismos, además no se observan valores atípicos (residuo estudentizado mayor a 3).

Cuadro 5. Modelo de regresión, parámetros y estadísticos para la estimación del volumen a partir de la biomasa. y: volumen (m^3/ha), x: biomasa seca total (Mg/ha), r: coeficiente de correlación, MAE: error absoluto medio y R^2 : coeficiente de determinación (%) (n=31).

Ecuación	r	a	p-value	b	p-value	MAE	R^2 ajustado
$y = a + b \cdot x$	0,999582	-4,17282	0,0004	1,84435	0,0000	2,86828	99,9135

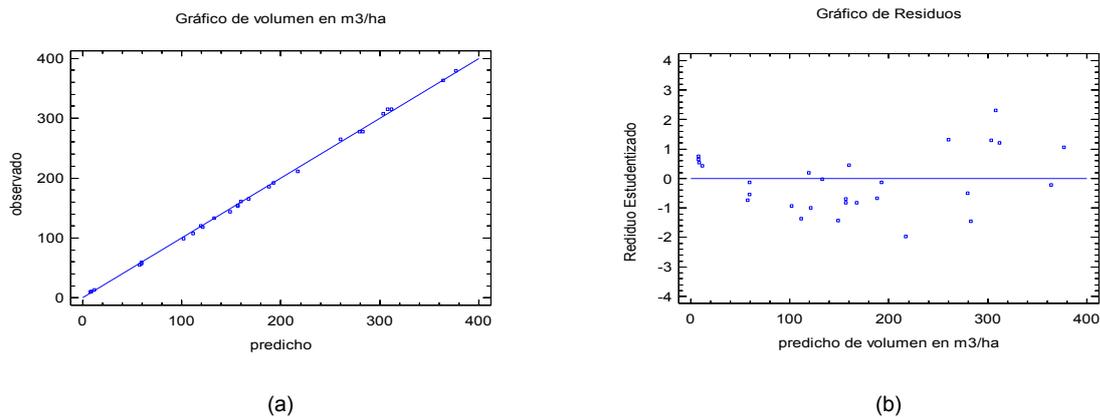


Figura 8. Distribución de (a) valores observados de volumen (m^3/ha) vs predichos por el modelo de regresión a partir de la biomasa seca total (Mg/ha) y (b) de los residuos de los valores predichos (n=31).

La matriz de correlación (Cuadro 6) indica una clara asociación entre la edad y la variable respuesta biomasa ($r=0,8843$) y moderadamente alta con las predictoras Banda 5, NDVIc y Banda 2, en ese orden. Estas últimas presentan también una fuerte correlación entre sí y consecuentemente la inclusión de más de una de ellas al modelo de regresión tendrá escaso aporte. En todos los casos se suprimió el valor correspondiente a la parcela MO9, que se presenta como un dato atípico (residuo estudentizado mayor a 3) debido a que en la fecha de adquisición de la imagen el rodal fue aprovechado y por ende la respuesta espectral que refleja la imagen no corresponde con la biomasa observada en el muestreo a campo.

Cuadro 6. Matriz de correlación mostrando por encima de la diagonal principal ($r=1$) los coeficientes de correlación (r) y por debajo los valores de probabilidad asociados (p-value) entre las variables continuas estudiadas con un nivel de confianza del 95% (n=30).

	Biomasa	Edad	Cosecha/s	Banda 2	Banda 5	NDVI (1)	NDVI (2)	NDVIc	SR	tNDVI
Biomasa	1	0,884	-0,124	-0,647	-0,714	0,548	0,551	0,668	0,562	0,560
Edad	0,000	1	0,033	-0,678	-0,700	0,525	0,532	0,634	0,515	0,537
Cosecha/s	0,514	0,865	1	0,040	0,071	-0,065	-0,049	-0,040	0,040	-0,086
Banda 2	0,000	0,000	0,835	1	0,972	-0,926	-0,930	-0,959	-0,875	-0,931
Banda 5	0,000	0,000	0,710	0,000	1	-0,924	-0,925	-0,976	-0,880	-0,925
NDVI (1)	0,002	0,003	0,732	0,000	0,000	1	0,999	0,974	0,965	0,997
NDVI (2)	0,002	0,003	0,799	0,000	0,000	0,000	1	0,975	0,966	0,997
NDVIc	0,000	0,000	0,836	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0,960	0,971
SR	0,001	0,004	0,834	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0,954
tNDVI	0,001	0,002	0,653	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1

Para la construcción de los modelos de regresión se descarta la incorporación de la variable Edad debido a que demandaría conocer este parámetro de cada rodal para estimar la biomasa, con la consiguiente dificultad en la implementación del modelo de regresión en una amplia zona de estudio. De todos modos, Zheng *et al.* (2004) la incluyen junto a la banda 5 obteniendo un buen ajuste en términos de R^2 del 95% para latifoliadas del Norte de Wisconsin, USA. Por otro lado, Lencinas & Mohr-Bell (2007) encontraron que la banda 4 de LANDSAT 5 tiene una correlación moderada con la edad ($r=-0,58$) de *Eucalyptus* spp. en el extremo NE de Corrientes, esto indica que se podría utilizar un mapa de edad, complementario al de biomasa, para mejorar la estimación de este parámetro a escala de paisaje.

El análisis de los modelos de regresión simple indica que para todas de las variables, el patrón de distribución de los datos en las gráficas valores observados vs predichos y residuos estudentizados vs predichos no es aleatoria por lo que se realizó una transformación logarítmica con base e de los datos originales (Cuadro 7).

Los modelos de regresión analizados asumen como no significativa la inclusión de las variables predictoras categóricas método de repoblación y Unidad Cartográfica. El comportamiento de esta última es coincidente con lo expresado por Goya *et al.* (1997) quienes concluyen que no hay diferencias significativas en los valores de biomasa entre suelos denominados localmente arenosos, mestizos y arcillosos en plantaciones de *E. grandis* de la zona de Concordia, Entre Ríos. La variable quema de residuos postcosecha es significativa para los rodales replantados ($n=9$), pero el relativamente pequeño tamaño de la muestra indica la necesidad de tomar más datos a campo.

Cuadro 7. Variables independientes, parámetros y estadísticos calculados para el modelo de regresión simple $\ln(y) = a + b \cdot \ln(x)$ con un nivel de confianza del 95%. y: biomasa (Mg/ha), x: variable predictora, MAE: error absoluto medio y R^2 : coeficiente de determinación (%) ($n=30$).

Variable predictora	a	p-value	b	p-value	MAE	R^2 ajustado
Banda 5	30,79340	0,0000	-6,17740	0,0000	0,510300	79,0510
Banda 2	41,60720	0,0000	-11,30260	0,0000	0,540814	74,3760
NDVIc	7,84083	0,0000	4,50233	0,0000	0,611853	66,4977
tNDVI	3,38394	0,0000	24,83870	0,0000	0,746758	50,8011
NDVI (2)	7,42204	0,0000	7,34330	0,0000	0,767303	49,4764
NDVI (1)	7,36823	0,0000	5,57580	0,0000	0,770409	49,1200
SR	0,00000	0,0788	4,81689	0,0000	0,807216	47,3755

El modelo elegido emplea los valores medios obtenidos en el muestreo de píxeles para la Banda 5, con un error de $\pm 1,67$ Mg/ha. La relación inversa entre los valores digitales de la banda 5 está asociada a que la reflectancia en el infrarrojo medio tiende a disminuir cuando aumenta el Índice de Área Foliar (IAF) producto de la intercepción de humedad por el canopy (Prananto *et al.*, 1994).

La tendencia lineal del modelo logarítmico (Figura 9) difiere de la estudiada por Zheng *et al.* (2004) que aplican una función sigmoide o de Baruah *et al.* (2006) que implementan una función exponencial para la estimación del volumen. El sesgo intrínseco que presenta esta función implica que para su aplicación se consideren el rango de valores digitales utilizados para la construcción del modelo (Anexo: Cuadro 10), de 53 a 153, para la generación del mapa de distribución espacial de la biomasa.

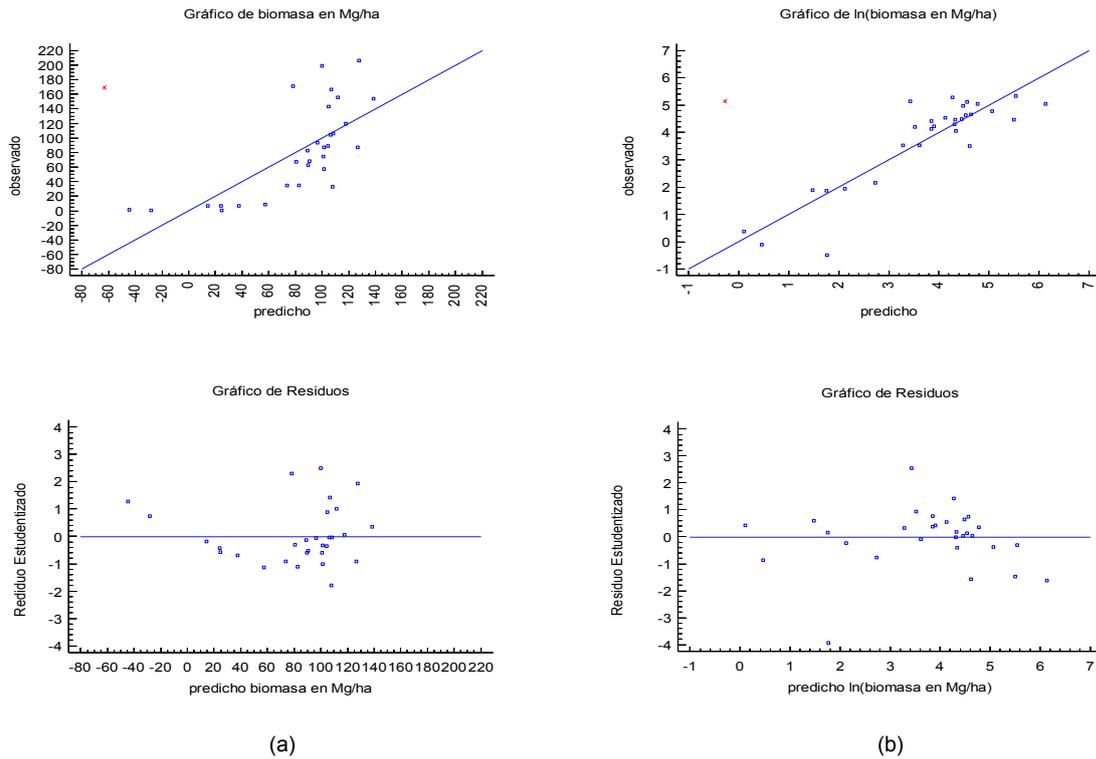


Figura 9. Valores observados vs calculados por el modelo de regresión y gráficos de residuos para (a) los datos originales y (b) luego de la transformación logarítmica (n=30). Se indica con una cruz el dato atípico excluido.

Los intervalos de confianza obtenidos por el método de bootstrap indican que en el 90% de los casos para un remuestreo con reposición (n=30) repetido 2000 veces los valores de R^2 recalculados para el modelo propuesto se encuentran entre 49,73 y 92,55% (Figura 10).

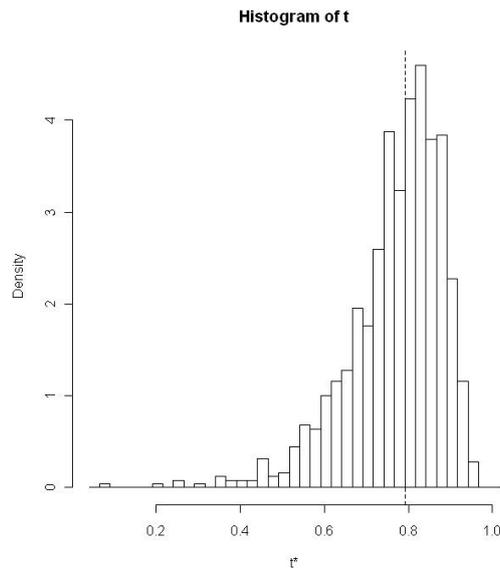


Figura 10. Informe de salida del software R 2.10.0 que muestra la distribución de frecuencia de t^* (estimador del R^2) para el modelo de regresión $\ln y = a + b \cdot \ln(x)$ para un remuestreo con reposición de 2000 muestras de los datos originales (n=30). y: biomasa (Mg/ha), a: 30,7934, b: -6,1774, x: niveles digitales de la banda 5 de LANDSAT 5 TM.

El mapa de distribución espacial de la biomasa (Figura 11) señala que los máximos valores de biomasa seca total calculados por el modelo de regresión se encuentran hacia el extremo Este, asociados principalmente a la edad de esas plantaciones, el otro foco se ubica sobre la parte Oeste del establecimiento Los Monigotes S.A., en este caso vinculado a sitios de alta productividad.

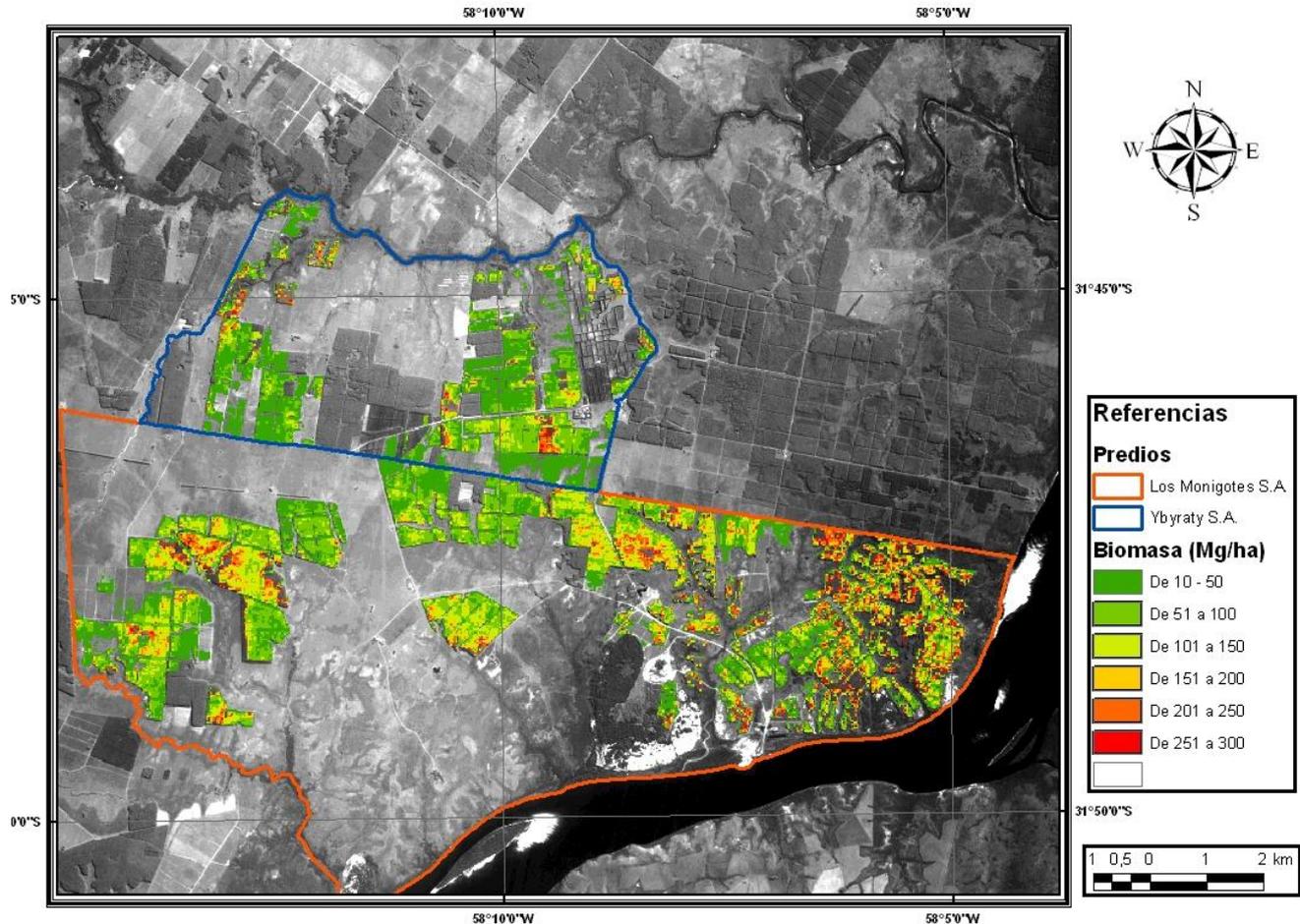


Figura 11. Distribución espacial de la biomasa seca total de *E. grandis* (Mg/ha) resultante de la aplicación del modelo de regresión $\ln(y) = a + b \cdot \ln(x)$ para el 13 de diciembre de 2008 sobre una imagen CBERS 2B – HRC del 24 de marzo de 2008. y: biomasa (Mg/ha), a: 30,7934, b: -6,1774, x: niveles digitales de la banda 5 de LANDSAT 5 TM.

3. Análisis de la evolución del área forestada.

Para las 4135,84ha relevadas se pueden observar que para los períodos considerados existe un aumento considerable de la superficie ocupada por plantaciones de *Eucalyptus* spp., una merma importante del porcentaje de ocupación de los pastizales y un área aproximadamente constante de plantaciones de *Pinus* spp. y *Citrus* spp. a partir de 1997, con una reducción en el período 1992-1997 (Figura 12).

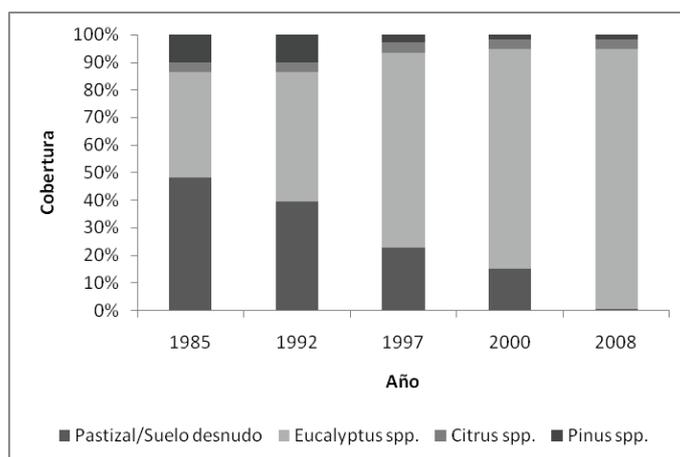


Figura 12. Porcentajes de cobertura del suelo para cada año de las diferentes clases de uso observadas.

El balance porcentual de superficie que indica la matriz de cambio de uso del suelo (Anexo - Cuadro 11) posibilita la cuantificación del traspaso entre cada clase para cada época. En general se reconoce una transferencia neta importante de las clases de uso pastizal y *Pinus* spp. hacia *Eucalyptus* spp., para el primer caso en los períodos 1992-1997 y 2000-2008 del 16,64% y 12,56%, respectivamente, y para el segundo entre los años 1992 y 1997 del 6,59%, en el mismo sentido, para el período 2000-2008 se registra un avance del 1,5% del pino sobre los pastizales (Figura 13). Se observa también que no hay cambios significativos en la superficie ocupada por *Citrus* spp.

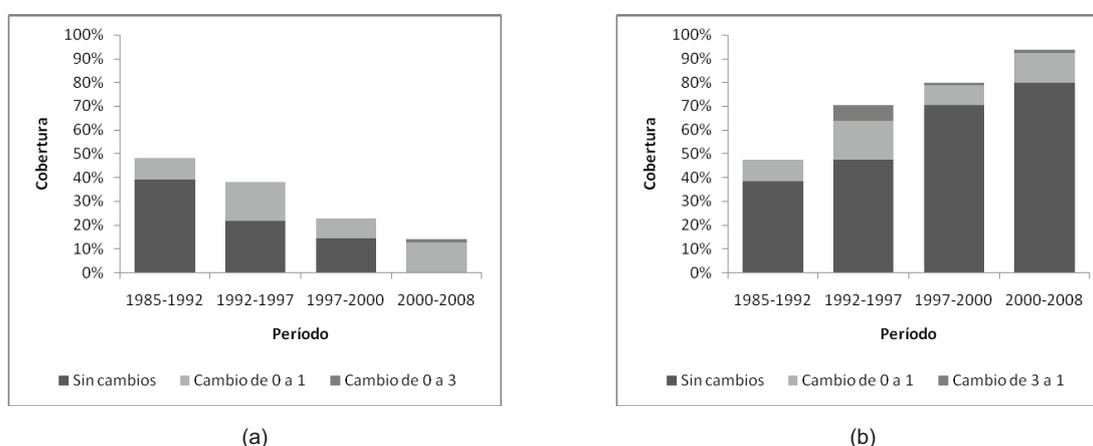


Figura 13. Porcentajes de cambio mayores al 1% de cobertura de las clases de uso del suelo (a) pastizales y (b) *Eucalyptus* spp. para cada período. 0: Pastizal, 1: *Eucalyptus* spp. y 3: *Pinus* spp.

Como medida de magnitud de la transferencia entre clases, las tasas de cambio en ha/año señalan al período 1992-1997 como el de mayor progreso de las plantaciones de eucalipto sobre los pastizales y el pino con valores de 137,64 y 54,48ha/año respectivamente (Figura 14).

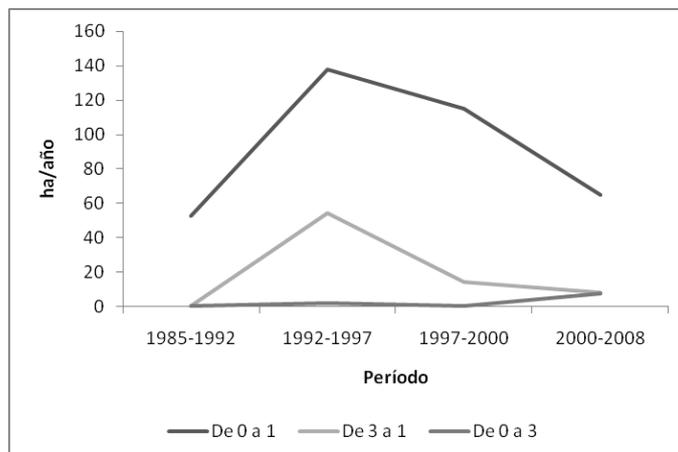
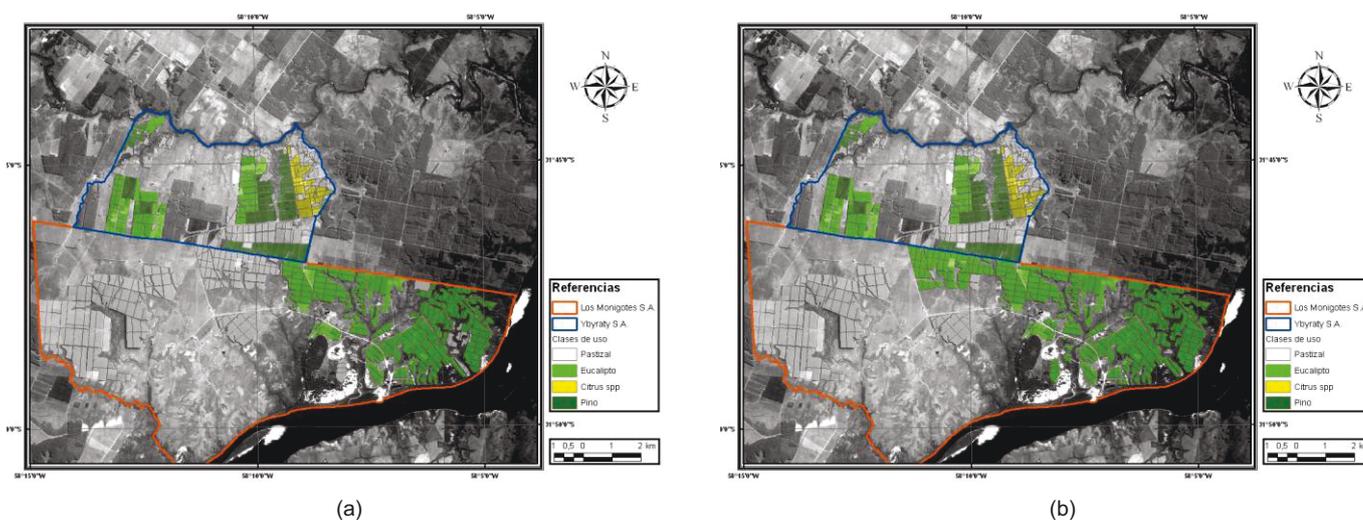


Figura 14. Tasas de transferencia (ha/año) de las clases de uso del suelo 0: Pastizal, 1: *Eucalyptus* spp. y 3: *Pinus* spp.

Al representar la evolución de las clases de uso del suelo espacialmente (Figura 15) se advierte que para el predio de Los Monigotes S.A. se produce un claro proceso de ocupación de las plantaciones de *Eucalyptus* spp. hacia el Oeste asociado principalmente al desplazamiento de la actividad ganadera (Paruelo *et al.*; 2006) preservando una amplia zona en el Este con esta especie. En cambio, en Ybyraty S.A. el reemplazo ocurre dentro de la actividad forestal pasando de plantaciones de *Pinus* spp. a eucalipto, manteniendo prácticamente constante la superficie destinada a la citricultura.

Una primera aproximación sobre las causas de este fenómeno viene dada por Díaz *et al.* (2006) quienes señalan que de los 121 aserraderos que existían en la zona en 2001, el 83% procesaban exclusivamente madera de eucalipto, además afirman que en los años posteriores al relevamiento realizado por estos autores, el sector industrial ha crecido, no sólo en lo que respecta al número de establecimientos, sino también a través de la inversión en tecnología de aserrado y secado, y en la instalación de líneas de remanufactura, agregando valor a la cadena forestal.



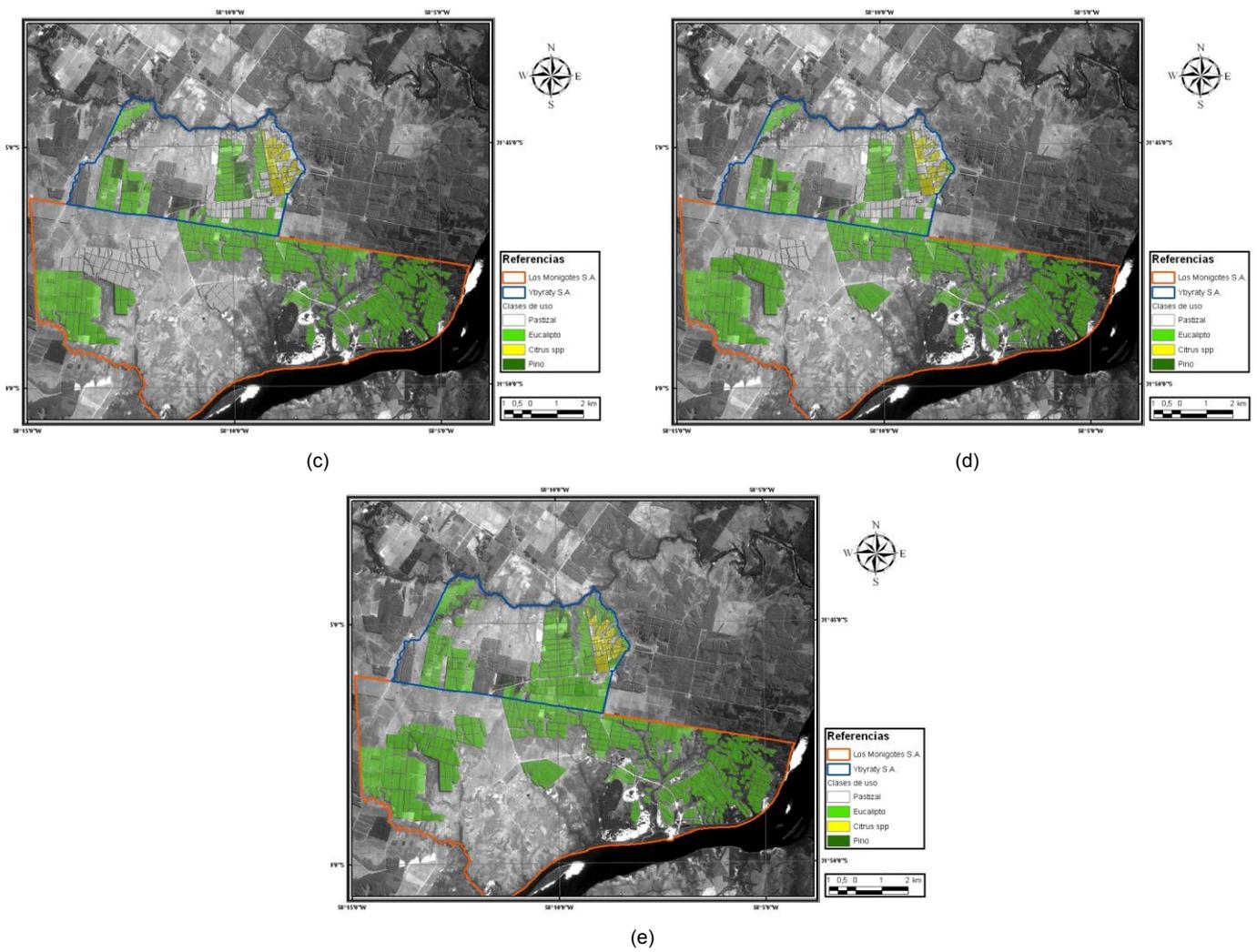


Figura 15. Evolución de la distribución espacial de las clases de uso del suelo en la zona de estudio para los años (a) 1985, (b) 1992, (c) 1997, (d) 2000 y (e) 2008, sobre una imagen CBERS-2B HCR del 24 de marzo de 2008.

Conclusiones

Basado en los resultados obtenidos se afirma que existe una correlación significativa entre los distintos índices de vegetación extraídos de imágenes LANDSAT 5 TM y la biomasa seca total de *E. grandis* por lo que su implementación resulta adecuada para estimar este parámetro en la zona de estudio. Los valores correspondientes a los niveles digitales de la banda 5 presentan un mayor ajuste en términos de R^2 del 79,05% para los modelos de regresión estudiados. Por el sesgo intrínseco que presenta la función lineal logarítmica aplicada se debe restringir su uso al rango de valores utilizados para construirlo. Las alternativas para lograr un mejor ajuste serían (1) recurrir a métodos expeditivos de medición de estructura e incorporar más variables al modelo para considerar su implementación en un área más extensa y (2) ajustar a una función sigmoidea como mejor representación de fenómenos biológicos.

En cuanto al cambio del uso del suelo en el período 1985-2008 se observa un importante avance de la superficie implantada con *Eucalyptus* spp. sobre los pastizales y las plantaciones de *Pinus* spp. en particular entre los años 1992-1997 con tasas de traspaso de 137,64 y 54,48ha/año respectivamente. La modelización de la distribución espacial de las transformaciones del paisaje puede derivar en un análisis detallado de los mecanismos que las determinan y de las consecuencias que puedan tener sobre diferentes procesos biológicos y/o socio-económicos.

La vinculación de los datos derivados de sensores multispectrales con información obtenida de la medición de parámetros de terreno, encuentra en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) una plataforma de desarrollo que la configura como una herramienta eficaz para el abordaje de estudios a nivel regional de las derivaciones involucradas en la ejecución de las diferentes estrategias de manejo que se aplican, o no, sobre el recurso forestal.

Comentarios finales

Este trabajo final de carrera no se podría haber logrado sin el apoyo de las diferentes actividades optativas desarrolladas. En primer lugar, el curso de Introducción a la Geoinformación ofreció un amplio panorama de la potencialidad del uso de Sistemas de Información Geográfica en el manejo del recurso forestal, estos conocimientos adquiridos lograron encontrar su aplicación en la Beca de Experiencia Laboral: "Detección y mapeo de incendios forestales en la eco-región de los bosques andino patagónicos durante el período 1987-2001", donde se combinaron el empleo de imágenes satelitales con técnicas de inferencia estadística. Finalmente, el Curso de Diseño experimental y Modelos multivariados terminó consolidando el marco de teórico para la modelización y comprensión de los fenómenos observados en la realidad. En definitiva, estas actividades optativas se presentan como un complemento sustancial, y necesario, de los cursos obligatorios de grado ya que tienen un aporte significativo para el abordaje y comprensión de la dinámica cada vez más compleja del sector forestal.

Bibliografía

Baker, W.L.; 1989. A review of models of landscape change. *Landscape Ecology* Vol. 2, Nro. 2: pp. 111-133.

Bannari, A.; Asalhi, H. & Teillet, P.M.; 2002. Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS '02. IEEE International* Vol. 5: pp. 3053 - 3055.

Baruah, P.J.; Endo, T.; Katsura, T. & Yasuoka, Y.; 2006. Estimating timber-volume in a commercial *Eucalyptus globulus* plantation: results from two approaches [on-line]. *Proceedings of the 27th Asian Conference on Remote Sensing - ACRS 2006, Ulaanbaatar, Mongolia. Section 15: Forest*, 6pp. Disponible en web: http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2006/Papers/F-1_F14.pdf [Consultado: 9 de marzo de 2010].

Baruah, P.J.; Endo, T.; Katsura, T.; Setojima, M. & Yasuoka, Y.; 2005. Estimating timber volume in a multi-age *Eucalyptus* plantation using temporal Landsat ETM+ imagery [on-line]. *Proceedings of the 26th Asian Conference on Remote Sensing - ACRS 2005, Hanoi, Vietnam. Section 1: Forestry*, 8pp. Disponible en web: <http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2005/Papers/FRR1-5.pdf> [Consultado: 9 de marzo de 2010].

Bonomelli, C.; Peña, I. & Suarez, D.; 2002. Contribución de las hojas en el proceso de reciclaje de N y P en *Eucalyptus* sp.. *Revista Bosque* Vol. 23, Nro. 1: pp. 61-77.

Brizuela, A.B. & Milera, S.; 2002. Actualización y seguimiento de la dinámica de plantaciones forestales en Entre Ríos, Argentina [En CD]. XVII Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia. *Actas Jornadas Forestales de Entre Ríos 1986-2003*. 10pp.

Brizuela, A.B.; Milera, S. & Mestres, J.; 2004. Plantaciones de eucaliptos y pinos en los Departamentos del Este de Entre Ríos. *Temas de la Biodiversidad del Litoral Fluvial Argentino I – Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO), Miscelánea* Nro. 12: pp. 153-160.

Buzai, G.D. & Matteucci, S.D.; 2002. Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta para el análisis del medio ambiente. *Gerencia Ambiental* Año 8, Nro. 81: pp. 919-923 y 996.

Canavos, G.C.; 1998. *Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos*. McGraw-Hill/Editorial Interamericana de México, S.A. de C.V. ISBN 968-451-856-0, 667 pp.

Carrasco-Letelier, L.; Eguren, G.; Castiñeira, C.; Parra, O. & Panario, D.; 2004. Preliminary study of prairies forested with *Eucalyptus* sp. at the northwestern Uruguayan soils. *Environmental Pollution* Vol. 127, Issue 1: pp. 49–55.

Ceccon, E. & Martínez-Ramos, M.; 1999. Aspectos ambientales referentes al establecimiento de plantaciones de eucalipto de gran escala en áreas tropicales: aplicación al caso de México. *Interciencia* Vol 24, Nro. 6: pp. 352-359.

Chuvieco Salinero, E.; 1985. Aportaciones de la Teledetección espacial a la cartografía de ocupación del suelo. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* Vol. 5: 20pp.

Clark, R.N.; Swayze, G.A.; Livo, E.; Kokaly, R.F.; Sutley, S.J.; Dalton, J.B.; McDougal, R.R. & Gent, C.A.; 2003. Imaging Spectroscopy: Earth and Planetary Remote Sensing with the USGS Tetracorder and Expert System. *Journal of Geophysical Research* Vol. 108, Nro. E12: 61pp.

Díaz, D.; Tesón, N. & García, M.Á.; 2006. Efectos ambientales de las forestaciones de eucaliptos en el noreste de Entre Ríos. XXI Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, Entre Ríos. 15pp.

Geldres, E.; Gerding, V. & Schlatter, J.E.; 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. *Revista Bosque* Vol. 27, Nro. 3: pp. 223-230.

Gilbert, M.A.; González-Piqueras, J. & García-Haro, J.; 1997. Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección* Nro. 8: 10pp.

Goya, J.F.; Frangi, J.L. & Dalla Tea, F.; 1997. Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el NE de la provincia de Entre Ríos. XII Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, Entre Ríos. 19pp.

Graciano, C.; Goya, J.F. & Frangi, J.L.; 2007. *Eucalyptus grandis* plantations in Argentina in the context of sustainable silviculture. En: *Forest Ecology Research Horizons*. Nova Science Publishers, Inc., 2007, 248pp. pp. 39-76.

Harvey Motulsky, M.D.; 1995. *Intuitive biostatistics*. Oxford University Press, Inc. New York. ISBN 0-19-508606-6, 404pp.

Hoyos Pineda, J.G. & Pérez Castillo, J.N.; 2008. GICS-GA servicio GRID de clasificación de imágenes LANDSAT que utiliza el sistema clasificador inteligente XCS [on-line]. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* Vol. 18, Nro. 2: 14pp. Disponible en web: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=91100203> [Consultado: 09 de marzo de 2010].

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); 2002. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Colón, Provincia de Entre Ríos. Plan Mapa de Suelos (Acuerdo complementario del Convenio INTA – Gobierno de Entre Ríos). EEA Paraná. Serie de Relevamiento de Recursos Naturales N° 21: 276pp.

Júdez, L.; Ibáñez, M.; Pérez Hugalde, C.; De Andrés, R.; Urzainqui, E. & Fuentes-Pila, J.; 2002. Valoración del uso recreativo de un humedal español. Tests y comparación de diferentes métodos de valoración. Estudios Agrosociales y Pesqueros Nro. 192: pp. 83-104.

Larocca, L.H.; 1983. Plantaciones forestales en la Región de Concordia. En: Carpeta de Información Forestal. Estación Experimental Agropecuaria INTA Concordia, 1983, 326pp. pp. 217-226.

Ledesma, R.; 2008. Introducción al Bootstrap. Desarrollo de un ejemplo acompañado de software de aplicación. Tutorials in Quantitative Methods for Psychology, Vol. 4, Nro. 2: pp. 51-60.

Lencinas, J.D. & Mohr-Bell, D.; 2007. Estimación de clases de edad de las plantaciones de la provincia de Corrientes, Argentina, con base en datos satelitales Landsat. Revista Bosque Vol. 28, Nro. 2: pp. 106-118.

Noble, A. & Herbert, M.; 1989. Estimated nutrient removal in a short rotation *Eucalyptus grandis* crop on a Fernwood soil. Institute for Commercial Forestry Research, University of Natal. Annual Report, pp.139-150.

Paruelo, J.M.; 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. Ecosistemas Vol. 17, Nro. 3: pp. 4-22.

Paruelo, J.M.; Guerschman, J.P.; Piñeiro, G.; Jobbágy, E.G.; Verón, S.R.; Baldi, G. & Baeza, S.; 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. Agrocienca Vol. 10, Nro. 2: pp. 47-61.

Pérez Cutillas, P.; Vicente Albaladejo, M.; Juanes Prats, F. & Rojo Nuñez, I.; 2006. Metodología aplicada para la estimación del número de pies de *Periploca angustifolia* mediante técnicas de teledetección. Papeles de Geografía Vol. 43: pp. 93-104.

Pla, L. & Matteucci, S.D.; 2001. Intervalos de confianza bootstrap del índice de biodiversidad de Shannon. Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ) Nro. 18: pp. 222-234.

Prananto, A.K.; Gilkes, B. & Mengler Faron, C.; 2004. The use of remotely sensed data to analyse spatial and temporal trends in patchiness within rehabilitated bauxite mines in the Darling Range. Supersoil 2004: Proceedings of the 3rd Australian New Zealand Soils Conference, University of Sydney, Australia. 8pp.

Sandoval, V. & Oyarzun, V.; 2004. Modelamiento y prognosis espacial del cambio de uso del suelo. Quebracho: Revista de Ciencias Forestales Nro. 11: pp. 9-21.

Sandoval, V. & Real, P.; 2005. Modelamiento y prognosis estadística y cartográfica del cambio en el uso de la tierra. Revista Bosque Vol. 26, Nro. 1: pp. 55-63.

Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGyP) & Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); 1995. Manual para productores de eucaliptos de la Mesopotamia argentina. Editores: Carpineti, L.A.; Dalla Tea, F.; Glade, J.E. & Marco, M.A. Estación Experimental Agropecuaria INTA Concordia. 171 pp.

Sistema de Información de Biodiversidad (SIB) & Administración de Parques Nacionales (APN); 2005. Protocolo para el preprocesamiento de imágenes satelitales LANDSAT para aplicaciones de la Administración de Parques Nacionales [on-line]. 22pp. Disponible en web: http://www.sib.gov.ar/archivos/Protocolo_img_Landsat.pdf [Consultado: 9 de marzo de 2010].

Sokal, R.R. & Rohlf, F.J.; 1980. Introducción a la Bioestadística. Editorial Reverté, S.A. ISBN 84-291-1862-4, 362 pp.

Suganuma, H.; Abe, Y.; Taniguchi, M.; Tanouchi, H.; Utsugi, H. Kojima, T. & Yamada K.; 2006. Stand biomass estimation method by canopy coverage for application to remote sensing in an arid area of Western Australia. *Forest Ecology and Management* Nro. 222: pp 75-87.

Vescovo, L. & Gianelle, D.; 2008. Using the MIR bands in vegetation indices for the estimation of grassland biophysical parameters from satellite remote sensing in the Alps region of Trentino (Italy). *Advances in Space Research* Vol. 41: pp. 1764-1772.

Zheng, D.; Rademacher, J.; Chen, J.; Crow, T.; Bresee, M.; Le Moine, J. & Ryu, S.; 2004. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 93, Nro. 3: pp. 402-411.

Anexo

Cuadro 8. Características de los perfiles de suelos representativos donde se desarrollan las plantaciones de *E. grandis* en la zona de estudio (INTA, 2002) indicando los porcentajes y rasgos principales de las series que los componen.

Nombre	Yerúa	Asociación Puerto Yerúa II	Asociación Yuquerí Grande	Asociación Los Charrúas	Asociación Mandisoví III
Unidad Cartográfica	8	17	18	21	23
Paisaje	Peniplanicie ondulada con gilgai.	Terrazas arenosas antiguas onduladas del río Uruguay.	Terrazas arenosas antiguas onduladas del río Uruguay.	Terrazas arenosas antiguas suavemente onduladas del río Uruguay.	Terrazas arenosas antiguas suavemente onduladas del río Uruguay.
Serie 1	Yerúa (100%)	Puerto Yerúa (50%)	Yuquerí Grande (40%)	Mandisovi (50%)	Mandisovi (50%)
Clasificación	Peludertes argiacuólicos	Haplumbreptes fluvénticos	Cuarzisamentos óxicos	Hapludoles fluvénticos	Hapludoles fluvénticos
Descripción	Imperfectamente drenados, en el bajo del microrrelieve tienen un epipedón mólico profundo, franco-limoso a franco-arcillo-limoso y un horizonte B2 argílico.	Moderadamente bien drenados; franco-arenosos a arenofranco, sobre materiales gleizados a 40-60 cm de profundidad, muy densos y poco permeables.	Muy arenosos de característico color rojizo o rojo amarillento que yacen sobre materiales más arcillosos que se encuentran a más de 120 cm de profundidad.	Suelos moderados a imperfectamente drenados, de textura areno-franca sobre materiales gleizados a 40-50 cm muy densos y poco permeables, franco-arcillo-arenosos y franco-arcillosos a francos.	
Serie 2		Yuquerí Chico (30%)	Yuquerí Chico (40%)	Los Charrúas (30%)	Puerto Yerúa (20%)
Clasificación		Udifluventes óxicos	Udifluventes óxicos	Argiudoles vérticos	Haplumbreptes fluvénticos
Descripción		Arenosos a arenofrancos, rojizos, sobre materiales arcillo-arenosos rojizos a 65-85 cm, generalmente con cantos rodados.		Profundos y de colores oscuros. Los materiales originales están constituidos por una mezcla de los sedimentos arcillosos, redepositados con materiales arenosos característicos de las terrazas del Río Uruguay.	

Cuadro 9. Denominación, métodos de repoblación y edad de las parcelas de muestreo a campo. Los valores calculados fueron: tamaño de parcela (m²), área basal (m²/ha), volumen hasta los 12cm de punta fina (m³/ha) y biomasa seca total (Mg/ha).

Parcela	Método de repoblación	Edad (años)	Tamaño de parcela (m ²)	Área basal (m ² /ha)	Volumen (m ³ /ha)	Biomasa seca TOTAL (Mg/ha)
YB4	Replantación	1	262,4	0,51	0,86	0,61
1YB	Rebrote	1	328,7	0,51	1,34	0,89
2YB	Rebrote	1	328,7	0,82	2,23	1,47
MO16	Rebrote	2	353,4	2,68	10,35	6,50
YB1	Replantación	3	321,1	3,34	10,30	6,67
5YB	Plantación	1	328,7	4,07	10,53	7,00
YB2	Replantación	3	243,4	4,51	13,39	8,74
A	Rebrote	3	322,5	11,22	54,74	33,29
YB3	Replantación	4	262,4	9,08	58,86	34,43
YB9	Replantación	3	225,0	10,60	57,67	34,50
MO15	Rebrote	4	371,0	14,87	98,71	57,48
YB10	Rebrote	3	246,0	16,79	107,30	62,87
3YB	Rebrote	5	328,7	13,19	120,05	66,98
8YB	Replantación	4	311,5	16,55	117,81	67,97
MO2	Rebrote	6	366,8	14,98	133,00	74,41
B	Rebrote	5	353,8	19,92	144,19	83,01
F	Rebrote	5	358,6	19,02	153,56	87,03
MO8	Rebrote	5	309,8	18,60	154,56	87,32
4YB	Rebrote	6	309,7	16,22	161,26	88,84
MO5	Rebrote	5	321,1	19,80	164,97	93,20
6YB	Plantación	5	386,3	21,23	185,54	104,08
G	Replantación	8	295,7	20,34	191,88	106,55
MO7	Rebrote	5	461,0	26,99	210,81	119,98
7YB	Plantación	4	328,7	23,90	264,25	143,18
MO6	Replantación	8	310,8	28,79	277,74	153,76
C7	Plantación	6	363,9	31,32	277,90	155,49
C9	Plantación	9	368,4	27,51	307,66	166,82
MO9	Plantación	12	301,4	26,49	315,10	169,29
9YB	Replantación	9	372,5	28,38	315,33	171,11
MO1	Rebrote	9	365,6	36,08	363,18	199,55
C	Rebrote	7	351,7	34,90	379,72	206,35

Cuadro 10. Valores de biomasa obtenidos a partir del muestreo a campo y los estadísticos media, desvío estándar (d.e.) y coeficiente de variación (c.v.) derivados de las parcelas de muestreo de píxeles de la banda 5 de LANDSAT 5 TM.

Parcela	Biomasa seca TOTAL (Mg/ha)	Banda 5 (media)	Banda 5 (d.e.)	Banda 5 (c.v.)
YB4	0,61	109,80	4,76	4,3%
1YB	0,89	135,85	5,89	4,3%
2YB	1,47	143,86	3,84	2,7%
MO16	6,50	110,09	9,69	8,8%
YB1	6,67	115,06	10,79	9,4%
5YB	7,00	103,67	10,02	9,7%
YB2	8,74	94,00	12,06	12,8%
A	33,29	69,24	9,00	13,0%
YB3	34,43	85,88	5,51	6,4%
YB9	34,50	81,50	10,48	12,9%
MO15	57,48	72,35	7,40	10,2%
YB10	62,87	78,33	2,58	3,3%
3YB	66,98	82,64	4,34	5,2%
8YB	67,97	77,62	5,85	7,5%
MO2	74,41	72,70	4,23	5,8%
B	83,01	78,39	7,23	9,2%
F	87,03	72,50	6,57	9,1%
MO8	87,32	60,03	3,64	6,1%
4YB	88,84	71,00	10,10	14,2%
MO5	93,20	74,91	16,10	21,5%
6YB	104,08	70,07	1,98	2,8%
G	106,55	68,95	6,01	8,7%
MO7	119,98	64,43	6,98	10,8%
7YB	143,18	70,71	13,57	19,2%
MO6	153,76	54,20	2,13	3,9%
C7	155,49	67,44	3,91	5,8%
C9	166,82	69,84	3,32	4,8%
MO9	169,29	152,94	2,86	1,9%
9YB	171,11	83,88	6,15	7,3%
MO1	199,55	73,23	2,57	3,5%
C	206,35	59,60	5,44	9,1%

Cuadro 11. Matriz de cambio de uso del suelo. Se muestran los porcentajes de traspaso entre clases (en negrita: sin cambios) para cada uno de los períodos considerados.

Clases de uso	Pastizal/Suelo desnudo	<i>Eucalyptus</i> spp.	<i>Citrus</i> spp.	<i>Pinus</i> spp.	Total 1985
Pastizal/Suelo desnudo	39,01%	8,94%	0,10%	0,04%	48,09%
<i>Eucalyptus</i> spp.	0,00%	38,34%	0,00%	0,00%	38,34%
<i>Citrus</i> spp.	0,24%	0,00%	3,21%	0,00%	3,45%
<i>Pinus</i> spp.	0,00%	0,00%	0,00%	10,12%	10,12%
Total 1992	39,25%	47,28%	3,31%	10,16%	100,00%

Clase de uso	Pastizal/Suelo desnudo	<i>Eucalyptus</i> spp.	<i>Citrus</i> spp.	<i>Pinus</i> spp.	Total 1992
Pastizal/Suelo desnudo	21,45%	16,64%	0,97%	0,19%	39,25%
<i>Eucalyptus</i> spp.	0,00%	47,28%	0,00%	0,00%	47,28%
<i>Citrus</i> spp.	0,36%	0,00%	2,95%	0,00%	3,31%
<i>Pinus</i> spp.	0,91%	6,59%	0,00%	2,67%	10,16%
Total 1997	22,72%	70,50%	3,93%	2,85%	100,00%

Clase de uso	Pastizal/Suelo desnudo	<i>Eucalyptus</i> spp.	<i>Citrus</i> spp.	<i>Pinus</i> spp.	Total 1997
Pastizal/Suelo desnudo	14,19%	8,35%	0,17%	0,00%	22,72%
<i>Eucalyptus</i> spp.	0,13%	70,38%	0,00%	0,00%	70,50%
<i>Citrus</i> spp.	0,63%	0,00%	3,30%	0,00%	3,93%
<i>Pinus</i> spp.	0,06%	1,03%	0,00%	1,77%	2,85%
Total 2000	15,01%	79,76%	3,47%	1,77%	100,00%

Clase de uso	Pastizal/Suelo desnudo	<i>Eucalyptus</i> spp.	<i>Citrus</i> spp.	<i>Pinus</i> spp.	Total 2000
Pastizal/Suelo desnudo	0,16%	12,56%	0,79%	1,50%	15,01%
<i>Eucalyptus</i> spp.	0,00%	79,76%	0,00%	0,00%	79,76%
<i>Citrus</i> spp.	0,25%	0,41%	2,81%	0,00%	3,47%
<i>Pinus</i> spp.	0,00%	1,57%	0,00%	0,20%	1,77%
Total 2008	0,41%	94,30%	3,60%	1,69%	100,00%