

## Índices espectrales ASTER para la estimación de parámetros forestales en rodales de *Pinus radiata* D. Don

Eva Sevillano-Marco <sup>1</sup>  
Alfonso Fernández-Manso <sup>2</sup>  
Carmen Quintano <sup>3</sup>  
Yosio Shimabukuro <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Barcelona - UAB  
Bellaterra (Barcelona) - España  
eva.sevillano@uab.cat

<sup>2</sup> Universidad de León - Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria  
Avda. de Astorga, 24400 Ponferrada, España  
alfonso@unileon.es

<sup>3</sup> Instituto de Gestión Forestal Sostenible – Universidad de Valladolid-INIA  
Avda. de Madrid, 44 -- 34004 Palencia, España  
menchu@tele.uva.es

<sup>4</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Av. dos Astronautas, 1758 12.227-010 São José dos Campos – SP., Brasil  
yosio@dsr.inpe.br

**Abstract.** There is a growing need for reliable monitoring of forest biomass, in particular to support requirements related to sustainable forest management and carbon accounting. Forest inventories and remote sensing are the two principal data sources used to estimate carbon stocks and fluxes for large forest regions. In particular, remote sensing also provides information to assess forest attributes and to manage forest resources in a sustainable manner. In this work we evaluate the potential of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data to estimate forest parameters, specifically aboveground biomass over large areas of *Pinus radiata* D. Don plantations in Northwestern Spain. Predictive models based on spectral indexes will allow for undertaking the spatial distribution of stand variables in radiata stands delimited by the National Forestry Map. The study reinforces the potentiality of remote sensing techniques in a cost-effective assessment of forest systems.

**Palabras-clave:** remote sensing, ASTER, biomass, teledetección, ASTER, biomasa

### 1. Introducción

El empleo de imágenes de satélite permite inventariar y estudiar el estado de la vegetación en grandes regiones, reduciendo la necesidad de trabajo de campo. Sin embargo, aunque los datos obtenidos mediante técnicas de teledetección proporcionen parte de la información requerida para la actualización de los inventarios forestales en bosques gestionados (Danson y Curran, 1993; Wulder et al., 2004; Labrecque et al., 2006), la relación entre las reflectancias espectrales y las variables de masa más importantes debe comprobarse para confirmar la utilidad de los datos de imágenes de satélite, para las diferentes especies y localizaciones geográficas y bajo diferentes esquemas de gestión (Lu et al., 2004). Este es el principal objetivo del presente trabajo: la confirmación de la relación entre datos procedentes del Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) y algunos de los principales parámetros forestales relativos a rodales de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) en el noroeste español.

Como objetivos secundarios pueden mencionarse: 1) analizar la significancia de las posibles relaciones entre las variables forestales medidas en campo (biomasa) y datos espectrales ASTER en rodales de pino radiata localizados en El Bierzo (España); y 2) evaluar

el potencial de estimación de sus atributos forestales a partir de modelos derivados de índices espectrales. Los índices espectrales ya han mostrado su utilidad para estimar diversos parámetros forestales a partir de distintos sensores y considerando diferentes tipos de vegetación (por ejemplo, Fernández-Manso et al., 2007; Sevillano-Marco et al., 2009).

## 2. Metodología de trabajo

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio elegida ha sido la comarca de El Bierzo (3000 km<sup>2</sup> aproximadamente), en el noroeste de España. El clima y el declive de la agricultura han favorecido el establecimiento de grandes plantaciones forestales. Aunque recientemente introducido en la región, el pino radiata ocupa actualmente un área aproximada de 150 km<sup>2</sup> (Fernández-Manso et al., 2001) (Figura 1).

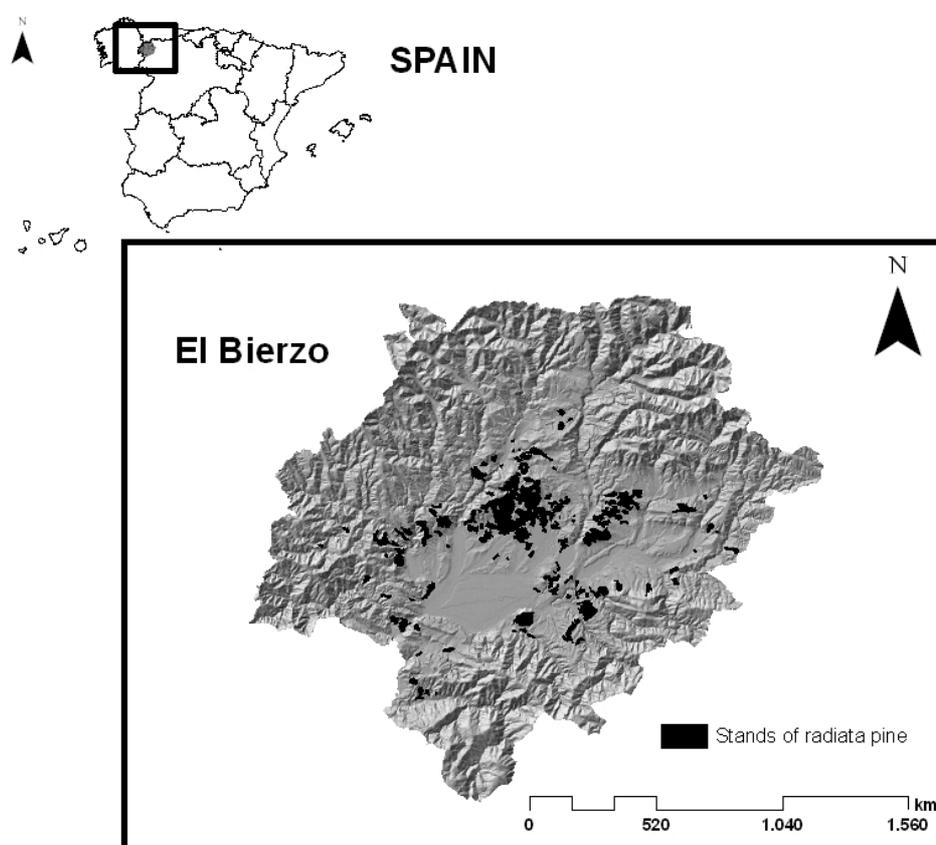


Figura 1. Localización del área de estudio.

### 2.2. Datos

Para llevar a cabo el trabajo, se han utilizado tanto datos de campo como información de satélite. El inventario de campo tuvo lugar durante el verano de 2003, en 45 parcelas permanentes de la red establecida por la Universidad de León (España) en plantaciones puras de pino radiata. Las parcelas, que fueron elegidas para cubrir adecuadamente todo el rango de edades y densidades de rodal, fueron rectangulares con un tamaño comprendido entre 200 y 900 m<sup>2</sup> dependiendo de la densidad del rodal para conseguir un mínimo de 50 árboles por parcela.

La variable forestal elegida para realizar el trabajo fue la biomasa, (aérea total por parcela, de tronco por parcela y de tronco por hectárea, BP, BTP y BTH, respectivamente) cuyos valores se calcularon a partir de las variables medidas sobre las parcelas aplicando las ecuaciones alométricas desarrolladas por Balboa-Murias et al. (2006) para especies en Galicia

(territorio con características muy similares al área de estudio considerado) (Tabla 1). Por otra parte, la altura total de los árboles no fue directamente medida sino que se generó utilizando las relaciones altura-diámetro desarrolladas a escala local por Sevillano-Marco et al. (2009).

Tabla 1. Resumen de datos de variables estimadas en las parcelas consideradas.

VARIABLES	Valor máximo	Valor mínimo	Valor medio	Desviación típica
Biomasa aérea total por parcela (BP) (Mg)	16.0	0.5	4.6	3.3
Biomasa de tronco por parcela (BTP) (Mg)	13.2	0.2	3.5	2.9
Biomasa de tronco por hectárea (BTH) (Mg/ha)	230.6	7.4	93.7	58.6

Para el estudio se empleó una escena ASTER nivel 1B adquirida el 14 de Septiembre de 2003 (Tabla 2). Como información complementaria se dispuso de ortofotografías (0.25 m de resolución espacial) que permitieron extraer puntos de control para una correcta georregistraçión de las parcelas y la imagen de satélite. Además, se dispuso de un modelo digital del terreno (MDT) (50 m de resolución espacial) que asistió en la corrección topográfica de la imagen.

Tabla 2. Bandas de las imágenes ASTER.

Banda	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )
G	0.52-0.60
R	0.63-0.69
NIR	0.76-0.86
SWIR1	1600-1700
SWIR2	2145-2185
SWIR3	2185-2225
SWIR4	2235-2285
SWIR5	2295-2365
SWIR6	2360-2430

G: verde; R: rojo; NIR: infrarrojo cercano; SWIR: infrarrojo de onda corta

### 2.3. Metodología

La metodología seguida puede resumirse en las siguientes etapas: preprocesado de las imágenes de satélite, creación de la base de datos de trabajo, y análisis estadísticos de la base de trabajo creada.

#### Etapas 1: Preprocesado de las imágenes de satélite

La imagen ASTER (Figura 2), fue corregida del efecto *crosstalk*, y atmosférica y topográficamente. El proceso de rectificación resultó en un error cuadrático medio (RMSE) menor de 0.5 píxeles. Además, se aplicó un algoritmo de *pan-sharpening* a las bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR) que permitió que su resolución espacial se elevara a 15 m.

A continuación, se computaron los siguientes índices espectrales para buscar su relación con la biomasa: simple ratio (SR) (Birth y McVey, 1968), normalized difference vegetation index (NDVI) (Rouse et al., 1973), green difference vegetation index (GNDVI) (Lymburner et al. 2000), y normalized difference moisture index (NDMI) (Cibula et al. 1992) (Ecuaciones 1-4, donde G: banda espectral verde; R: banda espectral roja; NIR: banda espectral infrarrojo cercano; y SWIR1: banda espectral infrarrojo de onda corta 1, ver Tabla 2).

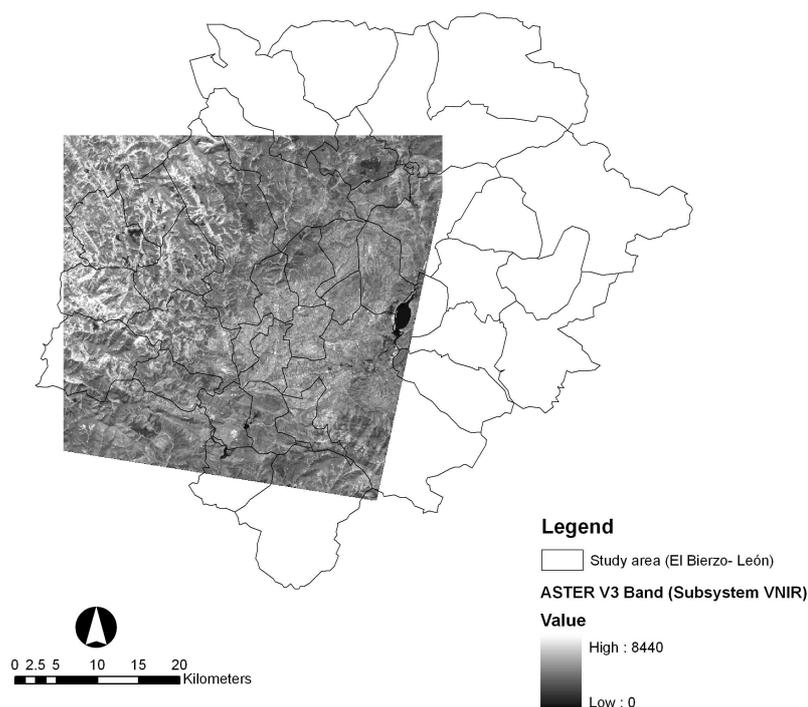


Figura 2. Banda infrarrojo cercano (V3) de la imagen ASTER.

$$SR = \frac{NIR}{R} \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

$$GNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + G} \quad (3)$$

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} \quad (4)$$

Los índices espectrales definidos así como las bandas originales, fueron filtradas mediante un filtro bajo 3x3, como paso previo a la extracción de los valores digitales que se corresponden con las parcelas de campo consideradas. De este modo, se minimiza el efecto del error de desplazamiento, pequeño pero existente, entre la imagen de satélite y la red de parcelas.

#### Etapa 2: Creación de la base de datos de trabajo

Se extrajo la información tanto de las bandas originales como de los índices espectrales definidos, previamente filtrados, en las parcelas consideradas. Estos valores se añadieron a la información obtenida en el inventario de campo para formar la base de datos de trabajo.

#### Etapa 3. Análisis estadístico de la base de datos de trabajo

Una submuestra de parcelas de ensayo fue aleatoriamente seleccionada para la estimación del modelo que mejor defina la relación entre BP/BTP/BTH y la información obtenida a partir de la imagen de satélite. Las relaciones estadísticas entre BP/BTP/BTH y los valores de los índices espectrales considerados para cada parcela se analizaron mediante análisis de correlación. Para las pruebas de estimación de parámetros se seleccionaron modelos de regresión lineales y no lineales, entre los propuestos por Heiskanen (2006), Meng et al. (2007), y Mukkonen y Heiskanen (2007).

Una submuestra del 25% de las parcelas de campo fue utilizada para validación independiente. La comparación entre los diferentes modelos ajustados se basó en criterios numéricos, examinándose principalmente el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que muestra la proporción de la varianza de la variable dependiente explicada por el modelo. El error medio cuadrático (RMSE), que determina la precisión de las estimaciones; y el porcentaje medio del error estándar (S%), que indica el tamaño del error como un porcentaje de la media de la distribución de la variable estimada, también fueron tenidos en cuenta. Finalmente, para la validación se utilizaron las parcelas de ensayo restantes.

### 3. Resultados y discusión

Tras probar los modelos predictivos seleccionados, se observó que los modelos de una variable obtuvieron coeficientes de correlación menores que los modelos de dos variables (independientemente de la variable considerada). Al considerar los modelos de predicción de dos variables fue el modelo propuesto por Muukkonen y Heiskanen (2007) (Ecuación 5) el que permitió obtener los mayores valores para  $R^2$  para todas las combinaciones de variables de entrada consideradas en las parcelas de ensayo.

$$y = (1 + x_1)^b x_2^c \exp^{(a+dx_1+ex_2)} \quad (5)$$

La Tabla 3 muestra los coeficientes del modelo finalmente seleccionado para la estimación de BP/BTP/BTH considerando las combinaciones de variables de entrada que permitieron obtener valores de  $R^2$  mayores: banda original NIR y NDMI. Dicho modelo utilizando ambas combinaciones de variables fue satisfactoriamente validado en la submuestra de parcelas aleatoriamente seleccionadas con este fin (Tabla 4).

Tabla 3. Variables y coeficientes empleados en el modelo propuesto por Muukkonen y Heiskanen (2007) (Ecuación 5) para la estimación de las variables dasométricas elegidas.

Variable dasométrica	a	b	c	d	e	X <sub>1</sub> /X <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	RMSE	S%
BP (Mg)	-0.19	2.89	0.56	-0.02	-4.00	NIR/NDMI	0.688	1.67	28.0
BTP (Mg)	3.96	2.31	0.98	-0.02	6.74	NIR/NDMI	0.749	1.40	34.8
BTH (Mg/ha)	-12.85	5.77	-0.06	-0.30	-0.09	NIR/NDMI	0.585	42.30	37.0

BP: biomasa aérea por parcela; BTP: biomasa de tronco por parcela; BTH: biomasa de tronco por hectárea; a. b. c. d. e, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>: coeficientes y variables del modelo propuesto por Muukkonen y Heiskanen (2007); R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio; S%: porcentaje medio del error estándar

Tabla 4. Parámetros de validación de los modelos propuestos en la Tabla 3.

Variable dasométrica	R <sup>2</sup> val	RMSEval	S%val
BP (Mg)	0.799	6.8	66.8
BTP (Mg)	0.589	6.8	72.4
BTH (Mg/ha)	0.589	88.7	47.7

BP: biomasa aérea por parcela; BTP: biomasa de tronco por parcela; BTH: biomasa de tronco por hectárea; R<sup>2</sup>val: coeficiente de determinación en las parcelas de validación; RMSEval: error cuadrático medio en las parcelas de validación; S%val: porcentaje medio del error estándar en las parcelas de validación

En el trabajo de Muukkonen y Heiskanen (2007) las variables empleadas para estimar la biomasa fueron las bandas roja e infrarrojo cercano de imágenes MODIS y/o ASTER, sin embargo en nuestro caso de estudio la sustitución de la banda roja por el índice NDMI permitió obtener estimadores más precisos.

Una vez validado, el modelo propuesto podrá ser aplicado a la superficie de las masas de radiata existentes y permitir determinar la biomasa existente en la zona de estudio. La

superficie ocupada por la especie puede ser delimitada mediante fotografías aéreas y el Mapa Forestal Nacional, de forma fiable y evitando posibles problemas de resolución espacial en la identificación de la especie utilizando únicamente la imagen de satélite con este fin. En este sentido, los resultados obtenidos coinciden con las conclusiones de trabajos previos (Hyypya et al., 2000; Fernández-Manso et al. 2005, 2006, 2007, 2009; entre otros) que afirman que, a pesar de ciertas limitaciones, las imágenes multiespectrales de satélite (en nuestro caso imágenes ASTER) son válidas para estimar los parámetros forestales a una escala regional.

#### 4. Conclusiones

Estos resultados preliminares muestran que los datos proporcionados por las imágenes ASTER son útiles en la estimación de variables de masa biofísicas. Los datos procedentes de imágenes de satélite han permitido la obtención de un modelo de regresión estadísticamente significativo que constituye una herramienta útil para la gestión forestal sostenible, especialmente considerando el interés actual en el secuestro y emisiones de carbono y la lucha contra el cambio climático.

La especie objeto de estudio, y el marco de su introducción en la zona considerada, apuntan a que podría ser de especial interés en cuanto al secuestro de carbono: las plantaciones se localizan principalmente en campos anteriormente agrícolas de áreas rurales marginales, donde sería muy recomendable el cambio de uso hacia los usos forestales.

#### Referencias bibliográficas

Balboa-Murias, M.A.; Rodríguez-Soalleiro, R.; Merino, A.; Álvarez-González, J.G. Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. **Forest Ecology Management**, v. 237, p. 29-38, 2006.

Birth, G.S.; Mcvey, G.R. Measuring the colour of growing turf with a reflectance spectrophotometer. **Agronomy Journal**, v. 60, p. 640-643, 1968.

Cibula, W.; Zetka, E.; Rickman, D. Response of thematic mapper bands to plant water stress. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, p. 1869-1880, 1992.

Danson, B.A.; Curran, P.J. Factors affecting the remotely sensed response of coniferous forest plantations. **Remote Sensing of Environment**, v. 43, p. 55-65, 1993.

Fernández-Manso, A.; González, J.M.; Ramírez, J. Radiata pine in El Bierzo county: situation and management proposals. En: **Proceedings** del III Spanish Forestry Congress, Granada, v. 5, p. 766-771, 2001.

Fernández-Manso, A., Quintano, C., dos Santos, J.R., Fernández, O. Estimación de la biomasa arbórea a partir modelos de mezclas espectrales en imágenes de resolución espacial media. En: **Anais** del XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR). Goiânia - GO - 16 a 21 de abril de 2005. ISBN: 85-17-00018-8. p. 1525-1527, 2005.

Fernández-Manso, A., Quintano, C., Fernández-Manso, O. Remote sensing and estimation of the carbon in Spanish forests. Methodology and examples. En: **Anais** del VII Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal. Curitiba-PR, Brasil, 17-19-octubre-2006. ISBN 978-85-60020-01-0. p. 459-465, 2006.

Fernández-Manso, O.; Quintano, C.; Fernández-Manso, A.; Dos Santos, J.R. Cuantificación de parámetros forestales en masa de pino resinero sobre dunas continentales a nivel tranzón usando imágenes del sensor ASTER. En: **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto -SBSR- 21-26 April 2007**, Florianópolis, Brasil, p. 1663- 1665, 2007.

Fernández-Manso, O., Fernández-Manso, A., Quintano, C. Estimación de biomasa forestal usando imágenes del sensor ASTER en masas de pino. En: **Proceedings del V Congreso Forestal Español**. 21-25 Septiembre 2009, Ávila. Actas del V Congreso Forestal Español. Montes y sociedad: saber qué hacer. Ed.: Sociedad Española de Ciencias Forestales (SECF) - Junta de Castilla y León. ISBN CD-ROM: 978-84-936854-6-1. Ref.: 5CFE01-560, 11 p., 2009.

Heiskanen, J. Estimating aboveground tree biomass and leaf area index in a mountain birch forest using ASTER satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, p. 1135–1158, 2006.

Hyypä, J.; Hyypä, H.; Inkinen, M.; Engdahl, M.; Linko, S.; Zhu, Y.H. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. **Forest Ecology and Management**, v. 128, p. 109–120, 2000.

Labrecque, S.; Fournier, R.A.; Luther, J.E.; Piercey, D. A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland, **Forest Ecology and Management**, v. 226, p. 129–144, 2006.

Lu, D.; Batistella, M.; Moran, E.; Mausel, P. Application of spectral mixture analysis to amazonian land-use and land-cover classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, p. 5345-5358, 2004.

Lymburner, L.; Beggs, P.J.; Jacobson, C.R. Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 66, p. 183–191, 2000.

Meng, Q.; Cieszewski, C.J.; Madden, M.; Borders, B. A linear mixed-effects model of biomass and volume of trees using Landsat ETM+ images. **Forest Ecology and Management**, v. 244, p. 93-101, 2007.

Muukkonen, P.; Heiskanen, J. Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, p. 617–624, 2007.

Padrón, E.; Navarro-Cerrillos, R.M. Aboveground biomass in *Prosopis pallida* (Humb and Bonpl Ex Willd) H B K ecosystems using Landsat 7 ETM+ images. **Revista Chilena de Historia Natural**, v. 80, p. 43 –53, 2007.

Rouse, J.W.J.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En: **Proceedings of Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**, 10–14 December 1973, Washington DC, p. 309–317, 1973.

Sevillano-Marco, E., Quintano, C.; Fernández-Manso, A., Shimabukuro, Y.E. Estimación de biomasa en *Pinus Radiata* (D. DON) a partir de índices derivados de imágenes CCD-CBERS.

En: **Proceedings** del XIII Congreso Nacional de Teledetección. 23-26 Septiembre 2009, Calatayud (Aragón). En "Teledetección. Agua y Desarrollo sostenible". Ed.: Montesinos, S. y Fernández, L. ISBN: 978-84-613-4257-0. p. 329-332, 2009.

Sevillano-Marco, E.; Fernández-Manso, A.; Castedo-Dorado, F. Development and applications of a growth model for *Pinus radiata* D. Don plantations in El Bierzo (Spain). **Forest Systems**, v.18, n.1, p. 64-80, 2009.

Wulder, M.A.; Skakun, R.S., Kurz, W.A.; White, J.C. Estimating time since forest harvest using segmented Landsat ETM+ imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, p. 179–187, 2004.