

Sensibilidad en la detección de áreas quemadas en tres ecosistemas vegetales de Bolivia, utilizando tres productos regionales.

Armando Rodriguez-Montellano¹
Renata Libonati^{2,3}
Emiliano Melchiori³

¹ Fundación Amigos de la Naturaleza - FAN
Casilla Postal 2241- Santa Cruz, Bolivia
arodriguez@fan-bo.org

² Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
CEP 13416-000 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
renata.libonati@igeo.ufrj.br

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
renata.libonati, emelchiori @cptec.inpe.br

Abstract

To understand the impacts of climate change and alterations in land use on burned areas, it is necessary to have detailed information about their occurrence and the extent. Currently the nationwide appearance and the limited accessibility to peripheric areas in Bolivia constrain the detection of wild fires. To address this problem the application of remote sensing is a technique that allows estimating the extent of these burned areas. This study has evaluated the sensitivity of three remote sensing products (MCD45A1, MCD64A1 and AQM) to the detection of possible burned areas. The results show that there are still limitations in the quantification of burned areas that are mainly caused by differences in the detection of burned areas with specific types of vegetation. The MCD64 is the most accurate in detecting burned areas in forests, while AQM shows better results for burned areas in grassland and scrubland (Cerrado). The sensitivity of the detection can be improved by focusing on the evaluation of the omission error, commission error and the probabilities of detection.

Keywords: Burned areas, fires, MODIS, remote sensing, Landsat.

1. Introduction

Los ecosistemas en Bolivia están amenazados por numerosas presiones, principalmente la deforestación, los incendios forestales, el pastoreo de ganado. La deforestación acumulada entre el periodo 2000-2010 fue de 1.821.153 ha (0,67% por año) (Cuéllar *et al.* 2012). Durante el mismo período, 22.012.910 de hectáreas de vegetación fueron quemadas, de los cuales el 20% correspondió a incendios forestales (Rodriguez-Montellano 2012), por lo tanto representan el 71% de las perturbaciones al bosque.

En la actualidad existen disponibles gratuitamente varios productos de áreas quemadas desarrollados a escala global, derivados de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Existen resultados de validaciones en diferentes partes del mundo con diferente grado de exactitud (Roy *et al.* 2008, Schroeder *et al.* 2008, Archibald *et al.* 2009, Rodriguez-Montellano 2012, Padilla *et al.* 2014) y han sido ampliamente utilizados como referencia en estudios ecológicos (Giglio *et al.* 2006a); (Archibald *et al.* 2013); (Chuvieco *et al.* 2008). En este estudio se analizaron tres productos de áreas quemadas: MCD45A1 (en

adelante MCD45)(Roy *et al.* 2008), MCD64A1 (en adelante MCD64)(Giglio *et al.* 2009) y AQM (Libonati *et al.* 2011). Debido a que los algoritmos en la detección de áreas quemadas (MCD45 y MCD64) están basados en la detección de los fuegos activos (Fraser *et al.* 2000, George *et al.* 2006, Giglio *et al.* 2006b, Loboda *et al.* 2007), pueden repercutir en los valores de omisión, a causa del tiempo de paso del satélite o debido al oscurecimiento de las imágenes por nubes, humo y por los tipos de vegetación.

El objetivo de este trabajo es conocer la sensibilidad de los productos globales (MCD45 y MCD64) y regional (AQM) de áreas quemadas en tres ecosistemas vegetales de Bolivia a través de la aplicación de técnicas de validación apropiados y rigurosos.

2. Métodos

2.1 Área de estudio

Bolivia es un país tropical con una superficie de 1 millón de km² (Figura 1). El clima de Bolivia varía con la altitud, de un húmedo tropical a un clima desértico y frío, con temperaturas del aire superficial medias anuales que oscilan entre 0 y 30°C. Las precipitaciones oscilan entre <300 a> 3500 mm año⁻¹. El verano austral (diciembre-enero-febrero) y el invierno (junio-julio-agosto) coinciden con la estación húmeda y seca, respectivamente (Seiler *et al.* 2014).

2.2 Áreas quemadas

La información de áreas quemadas fue extraída de los productos MCD45 y MCD64 del sensor MODIS (500 m) además del producto AQM (1 km) desarrollado por Libonati *et al.* (en revisión). El período de evaluación fue de dos años (2007 y 2010). Para la validación se seleccionaron tres regiones, una al norte en la Amazonía y la segunda al sur en la Chiquitanía y la tercera en una transición entre las dos anteriores, para las cicatrices de áreas quemadas de referencia se utilizaron imágenes Landsat 5 (figura 1).

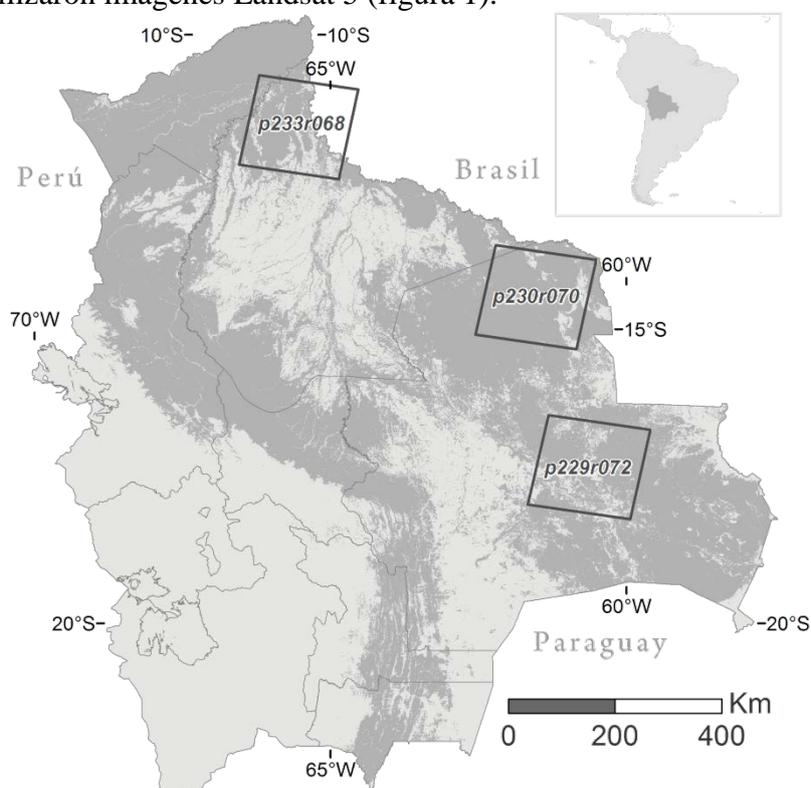


Figura 1. Áreas de estudio, zonas de validación con imágenes Landsat TM, periodos 2007 y 2010.

Las tres zonas de validación se denominaron de la siguiente manera; la zona norte (p233r068) en Bosques siempreverde estacionales y porciones de un Complejo del cerrado, la zona central (p230r070) con Bosques siempreverdes estacionales y Bosques subhúmedos semidecuidos, por lo tanto esta zona es considerada transicional. La tercera zona denominada sur (p229r072) con presencia predominante de Bosque subhúmedo semidecuidos y Chaparrales esclerófilos (Navarro y Ferreira 2007) (figura 1, tabla 1).

Tabla 1. Imágenes Landsat 5, utilizadas para la validación de áreas quemadas, en tres zonas de Bolivia.

Escena Path-Row	Fecha de Inicio	Fecha de Fin	Rango (días)	Ecorregion	Vegetación
p233r68	15/06/2007	03/09/2007	80	Sudoeste de la Amazonía; Cerrado (Ibisch y Merida 2003)	Bosque siempreverde estacional; Complejo del cerrado (Navarro y Ferreira 2007)
	30/06/2010	04/10/2010	96		
p230r70	14/09/2007	30/09/2007	16	Sudoeste de la Amazonía; Bosque Seco Chiquitano (Ibisch y Merida 2003)	Bosque siempreverde estacional; Bosque subhúmedo semidecuidos (Navarro y Ferreira 2007)
	21/08/2010	09/11/2010	80		
p229r72	06/08/2007	23/09/2007	48	Bosque Seco Chiquitano; Cerrado (Ibisch y Merida 2003)	Bosque subhúmedo semidecuidos; Chaparrales esclerófilos (Navarro y Ferreira 2007)
	06/08/2010	07/09/2010	32		

2.3 Validación de áreas quemadas

Los productos de áreas quemadas (BA) MCD45, MCD64 y AQM se cruzaron con áreas quemadas de referencia (BAR). La cartografía de áreas quemadas de referencia se calcularon utilizando el método ABAMS (Bastarrika *et al.* 2011). Se empleó la matriz de error como uno de los métodos más comunes para evaluar la exactitud de los mapas temáticos, que genera estadísticas de la exactitud global (OA) del producto y de los errores de omisión y comisión (E_o , E_c) de la detección de área quemada (Congalton 1991).

$$1 - E_c = \frac{D_q + D_{BAR}}{D_q} \qquad 1 - E_o = \frac{D_q + D_{BAR}}{D_{BAR}}$$

Donde, D_q es la detección de área quemada de uno de los tres productos a evaluar; D_{BAR} , es la detección de áreas quemadas de referencia (BAR); $D_q + D_{BAR}$ es la intersección de los productos a evaluar con los datos de referencia, mostrando las áreas correctamente detectadas. En este tipo de estudios, debido al gran número de píxeles no quemados que son analizados, las estimaciones de la métrica de exactitud global mostrarán valores sesgados. En su lugar de esta métrica, se utiliza la probabilidad de detección (P_d) y la probabilidad de falsa alarma (P_f), según lo propuesto por (Giglio *et al.* 2008). Donde los píxeles correctamente clasificados como área quemada (A_{qq}) y área no quemada (A_{nn}) son calculados de la matriz de error, y el área quemada (A_{qn}) y área no quemado (A_{nq}) con píxeles clasificados erróneamente, entonces los indicadores de probabilidad se calculan utilizando las ecuaciones:

$$P_d = \frac{A_{qq}}{A_{qq} + A_{nq}} \qquad P_f = \frac{A_{qn}}{A_{qq} + A_{nn}}$$

El coeficiente Kappa está perdiendo interés en la comunidad científica (Pontius y Millones 2011), lo interesante de este coeficiente es la posibilidad de categorizar el acuerdo global

según (fuerza de concordancia -K') (Landis y Koch 1977), es por esta razón que incluimos este coeficiente en este estudio.

3. Resultados

Como se describe en la sección de validación, el grado de exactitud de los tres productos se valida con un mapa de referencia de cicatrices quemadas derivado de imágenes Landsat TM utilizando medidas de verificación extraídos de matrices de confusión, donde se sigue un enfoque mixto de píxeles que tiene en cuenta la proporción de la áreas quemadas de referencia dentro de cada píxel (Figura 2).

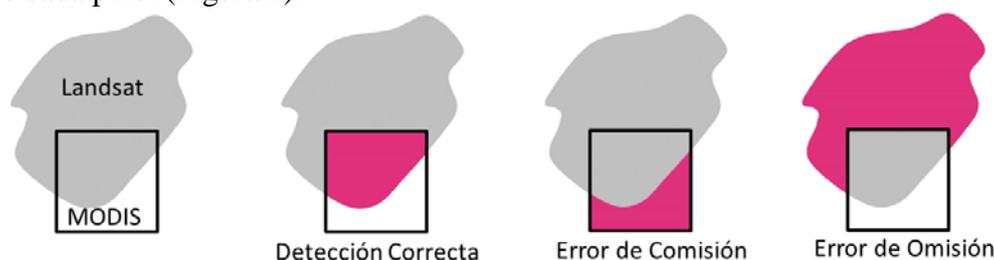


Figura 2. Enfoque mixto de píxeles que tiene en cuenta la proporción de las áreas quemadas de referencia dentro de cada píxel.

En general, la exactitud global (OA) para MCD64 y MCD45 productos BA es ligeramente mayor que el de AQM (Figura 3, Tabla 2); por el principio de equivalencia este indicador no es suficiente para evaluar el grado de exactitud (Wilks 2011) (figura 2), dado que valora incorrectamente la detección de áreas quemadas de las no quemadas. Ambos productos MCD45 y MCD64 presentan valores muy aproximados en E_c pero se diferencian en los valores de E_o ; mostrando una mejora en la detección de áreas quemadas por el MCD64. El producto AQM presenta una mejor detección de áreas quemadas (P_d) en las dos primeras zonas de evaluación (p233r068; p229r072), mostrando probabilidades de detección de 57.5%, 73.9% para el año 2007 y 43.7% y 55.9% para el año 2010. Las áreas quemadas en estas zonas sucedieron tanto en el cerrado, como también con porciones de áreas boscosas. En cambio en la tercer zona (p230r070), la proporción de bosque quemado era mayor, limitando la detección de los tres productos, mostrando probabilidades de detección muy bajas. El producto que destaca en esta zona es el MCD64 alcanzando probabilidades de detección de 9.9% para el 2007 y 36.2% para el 2010. El producto AQM ha mostrado una leve diferencia con respecto al MCD64, obteniendo un 63.8% de error de omisión, en comparación al 81.9% que reportó el MCD64, con valores más altos (94.5%) quedó atrás el MCD45 (Tabla 2 y Figura 3).

Tabla. 2. Errores de omisión y comisión (E_o , E_c), OA: exactitud global, probabilidad de detección (P_d), la probabilidad de falsa alarma (P_f), Kappa y fuerza de concordancia (K').

	2007	E_o	E_c	OA	Kappa	K'	P_d	P_f
<i>p233r068</i>	MCD45	54.9	58.4	96.3	0.49	Moderada	45.1	1.4
	AQM	42.5	19.5	88.1	0.24	Aceptable	57.5	11.5
	MCD64	67.0	64.0	96.4	0.42	Moderada	33.0	0.8
<i>p229r072</i>	MCD45	72.0	80.4	93.2	0.39	Aceptable	28.0	0.6
	AQM	26.1	33.3	85.0	0.39	Aceptable	73.9	15.0
	MCD64	76.8	90.1	93.1	0.35	Aceptable	23.2	0.2
<i>p230r070</i>	MCD45	97.4	5.1	98.6	0.03	Leve	2.6	0.5
	AQM	92.3	4.6	97.6	0.05	Leve	7.7	1.5
	MCD64	90.1	18.2	98.7	0.12	Leve	9.9	0.4

		<i>Cont.</i>							
		2010	Eo	Ec	OA	Kappa	K'	Pd	Pf
<i>p001r068</i>	MCD45	71.7	72.5	90.5	0.37	<i>Aceptable</i>	28.3	1.4	
	AQM	56.3	63.5	90.6	0.47	<i>Moderada</i>	43.7	3.2	
	MCD64	71.8	76.4	90.7	0.37	<i>Aceptable</i>	28.2	1.1	
<i>p229r072</i>	MCD45	65.5	70.2	94.6	0.44	<i>Moderado</i>	34.5	1.0	
	AQM	44.1	23.5	84.8	0.26	<i>Aceptable</i>	55.9	14.4	
	MCD64	48.5	71.4	95.4	0.57	<i>Moderado</i>	51.5	1.5	
<i>p230r070</i>	MCD45	94.5	40.6	85.4	0.07	<i>Leve</i>	5.5	1.3	
	AQM	81.9	50.5	85.8	0.21	<i>Aceptable</i>	18.1	2.9	
	MCD64	63.8	65.7	88.2	0.41	<i>Moderada</i>	36.2	3.0	

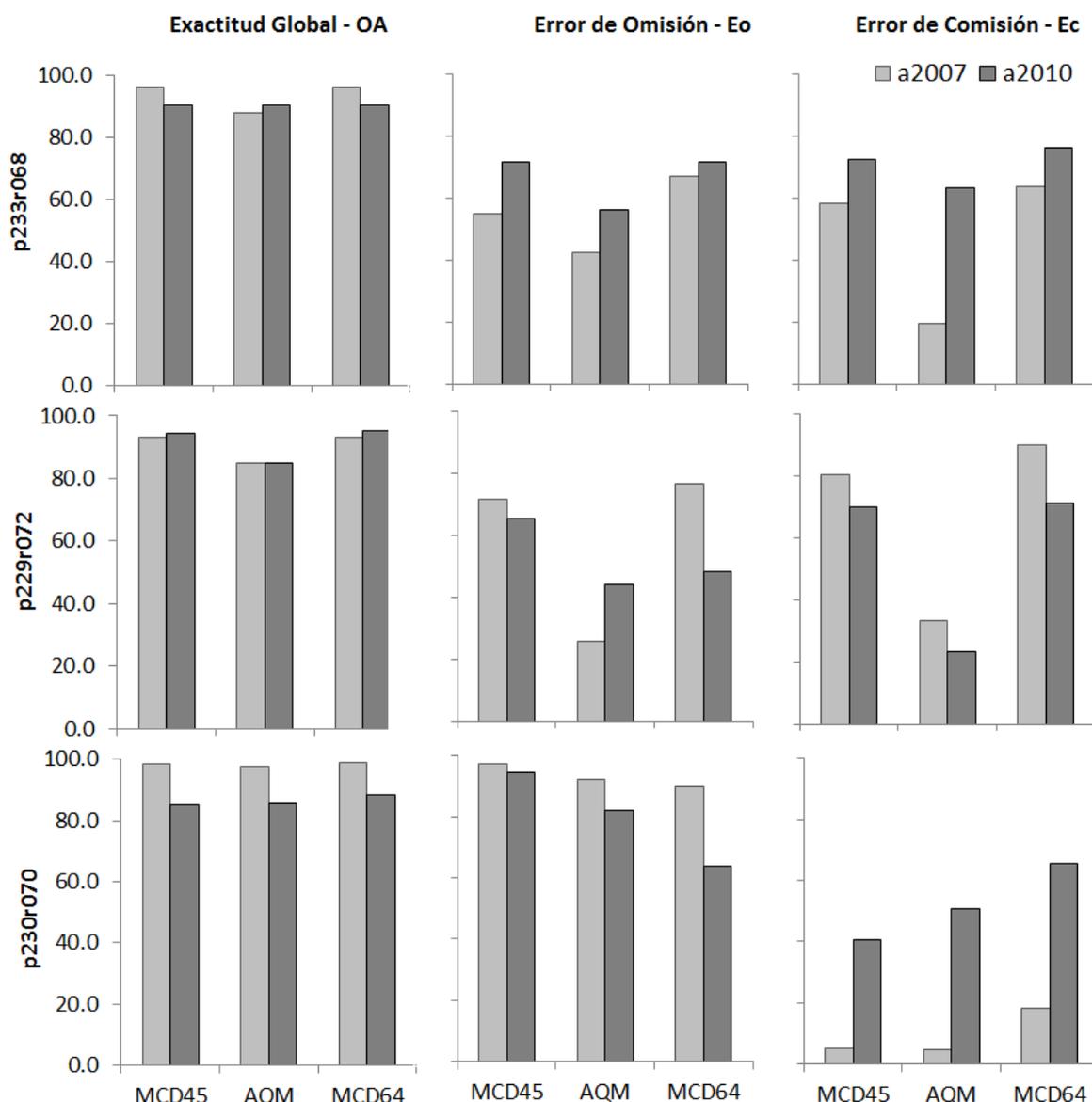


Figure 3. Valores de exactitud y de errores obtenidos a partir de matrices de confusión para los productos de areas quemadas (MCD45, MCD64 y AQM) y las cicatrices de referencia calculados a partir de las imágenes Landsat, para los periodos 2007 y 2010.

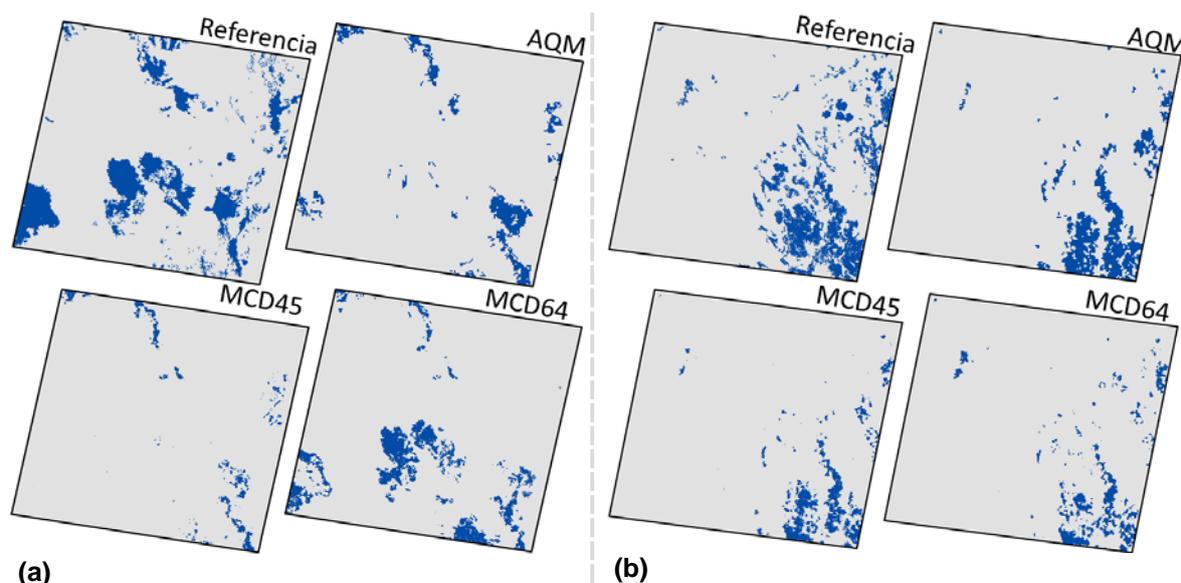


Figura 4. Ejemplo de comparación entre los niveles de detección de áreas quemadas de referencia Vs. MCD45, MCD64 y AQM; (a) p230r070, (b) p233r068 del periodo 2010, las áreas de color azul representan las áreas quemadas, el color gris muestran las áreas no quemadas.

La superficie detectada en Bolivia con el producto AQM en ambos periodos, supera enormemente las estimaciones de áreas quemadas con MCD45 y MCD64. Para el 2007 reportan un 2.0 millones de hectáreas para el MCD45; 2.5 millones de hectáreas para el MCD64 y 9.3 millones de hectáreas para el AQM. Para el año 2010 la estimación del AQM (13.6 millones de hectáreas), supera la estimación del MCD64 en 55% (7.5 millones de hectáreas) (figura 5).

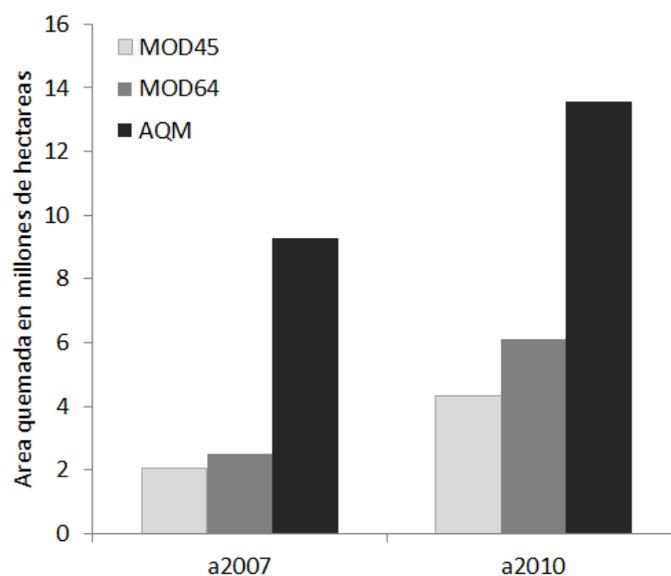


Figura 5. Cuantificación de áreas quemadas totales para Bolivia, periodos 2007 y 2010.

4. Conclusiones

Este estudio ha mostrado existe limitaciones en la detección de áreas quemada con productos globales. Algunos productos detectan mejor áreas quemadas en coberturas de pastos y arbustos o Cerrados como el AQM y MCD45. Otros como el MCD64 tienen una mejora en la detección en coberturas más densas como Bosques en desmedro de la posibilidad de detectar en otras coberturas.

La exactitud global no es un estadístico apropiado para discriminar la sensibilidad de la detección de áreas quemadas. Una mejor interpretación es posible evaluando los errores de omisión, comisión y las probabilidades de detección.

5. Agradecimientos

El estudio fue realizado gracias a los fondos otorgados a la Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN-Bolivia) por Fundación MacArthur y la Embajada del Reino de los Países Bajos en Bolivia. Las opiniones expresadas en este documento son las de los autores y no necesariamente reflejan el criterio institucional de los financiadores. Un agradecimiento especial a Jan Spickenbom, por su apoyo y revisión del texto.

6. Referencias

- Archibald, S., C. E. R. Lehmann, J. L. Gómez-Dans, and R. A. Bradstock. 2013. Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **110**:6442-6447.
- Archibald, S., D. P. Roy, V. WILGEN, W. Brian, and R. J. SCHOLE. 2009. What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Global Change Biology* **15**:613-630.
- Bastarrika, A., E. Chuvieco, and M. P. Martin. 2011. Automatic Burned Land Mapping From MODIS Time Series Images: Assessment in Mediterranean Ecosystems. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* **49**:3401-3413.
- Congalton, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*:37.
- Cuéllar, S., A. Rodríguez-Montellano, J. Arroyo, S. Espinoza, and D. Larrea. 2012. Mapa de deforestación de las Tierras Bajas y los Yungas de Bolivia 2000-2005-2010. Fundación Amigos de la Naturaleza.
- Chuvieco, E., L. Giglio, and C. Justice. 2008. Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data. *Global Change Biology* **14**:1488-1502.
- Fraser, R. H., Z. Li, and J. Cihlar. 2000. Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): A New Technique for Burned Area Mapping over Boreal Forest. *Remote Sensing of Environment* **74**:362-376.
- George, C., C. Rowland, F. Gerard, and H. Balzter. 2006. Retrospective mapping of burnt areas in Central Siberia using a modification of the normalised difference water index. *Remote Sensing of Environment* **104**:346-359.
- Giglio, L., I. Csiszar, and C. O. Justice. 2006a. Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **111**:G02016.
- Giglio, L., I. Csiszar, Á. Restás, J. T. Morissette, W. Schroeder, D. Morton, and C. O. Justice. 2008. Active fire detection and characterization with the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment* **112**:3055-3063.

- Giglio, L., T. Loboda, D. P. Roy, B. Quayle, and C. O. Justice. 2009. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment* **113**:408-420.
- Giglio, L., G. R. van der Werf, J. T. Randerson, G. J. Collatz, and P. Kasibhatla. 2006b. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmos. Chem. Phys.* **6**:957-974.
- Ibisch, P. L. and G. Merida. 2003. Biodiversidad: la riqueza de Bolivia: estado de conocimiento y conservación. Editorial FAN, Santa Cruz de la Sierra - Bolivia., Ministerio de Desarrollo Sostenible.
- Landis, R. and G. Koch. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* **33**:159-174.
- Libonati, R., C. C. DaCamara, J. M. C. Pereira, and L. F. Peres. 2011. On a new coordinate system for improved discrimination of vegetation and burned areas using MIR/NIR information. *Remote Sensing of Environment* **115**:1464-1477.
- Loboda, T., K. J. O'Neal, and I. Csiszar. 2007. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data. *Remote Sensing of Environment* **109**:429-442.
- Navarro, G. and W. Ferreira. 2007. Mapa de vegetación de Bolivia a escala 1:250.000. The Nature Conservancy (TNC). Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- Padilla, M., S. V. Stehman, and E. Chuvieco. 2014. Validation of the 2008 MODIS-MCD45 global burned area product using stratified random sampling. *Remote Sensing of Environment* **144**:187-196.
- Pontius, R. G. and M. Millones. 2011. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing* **32**:4407-4429.
- Rodriguez-Montellano, A. 2012. Cartografía multitemporal de quemas e incendios forestales en Bolivia: Detección y validación post-incendio. *Ecología en Bolivia* **47**:53-71.
- Roy, D. P., L. Boschetti, C. O. Justice, and J. Ju. 2008. The collection 5 MODIS burned area product -- Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. *Remote Sensing of Environment* **112**:3690-3707.
- Schroeder, W., E. Prins, L. Giglio, I. Csiszar, C. Schmidt, J. Morissette, and D. Morton. 2008. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data. *Remote Sensing of Environment* **112**:2711-2726.
- Seiler, C., R. W. A. Hutjes, B. Kruijt, J. Quispe, S. Añez, V. K. Arora, J. R. Melton, T. Hickler, and P. Kabat. 2014. Modeling Forest Dynamics along Climate Gradients in Bolivia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*:2013JG002509.
- Wilks, D. S. 2011. Chapter 8 - Forecast Verification. Pages 301-394 in S. W. Daniel, editor. *International Geophysics*. Academic Press.