

ÍNDICE DE COBERTURA COMO BASE PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DEGRADACIÓN Y AUMENTO DE EXISTENCIAS DE CARBONO

GENERATING A CONSISTENT HISTORICAL TIME SERIES OF ACTIVITY DATA FROM LAND USE CHANGE FOR THE DEVELOPMENT OF COSTA RICA'S REDD PLUS REFERENCE LEVEL



Abril de 2015

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. PROCESO METODOLÓGICO	5
2.1. CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES RAPIDEYE Y OBTENCIÓN DE LA MUESTRA DE COBERTURA ARBÓREA	5
2.1.1. Selección y clasificación de imágenes RapidEye	5
2.1.2. Obtención de información de cobertura arbórea	6
2.1.3. Selección y depuración de puntos de control	6
2.2. ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE COBERTURA ARBÓREA A PARTIR DE LA INFORMACIÓN DE LANDSAT 7	7
2.2.1. Selección de imágenes Landsat	7
2.2.2. Construcción del modelo para la estimación de la cobertura arbórea	8
2.3. ESTIMACIÓN DE COBERTURAS ARBÓREAS Y DEGRADACIÓN FORESTAL ENTRE 2000 Y 2012 10	
2.4. VALIDACIÓN DEL MAPA DE DEGRADACIÓN.....	10
3. RESULTADOS.....	12
3.1. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE COBERTURA FORESTAL EN EL AÑO 2000 Y 2012 ...	12
3.2. ESTIMACIÓN DE LA DEGRADACIÓN FORESTAL ENTRE LOS AÑOS 2000 Y 2012.....	13
3.3. RESULTADOS VALIDACIÓN	14
4. CONSISTENCIA DEL INDICE DE COBERTURA CON LA SERIE HISTÓTIRA .	17
5. IMPLICACIONES PARA EL FUTURO MONITOREO REPORTE Y VERIFICACIÓN (MRV).....	17
6. REFERENCIAS	18

1. INTRODUCCIÓN

Aunque a veces se usan indistintamente, los conceptos de degradación forestal y deforestación son conceptos diferentes. Mientras que la deforestación implica la eliminación del bosque y su sustitución por otra cobertura de la tierra, la degradación se da en bosques que siguen siendo bosques pero que pierden su capacidad de proveer servicios ambientales o sufren cambios importantes en su composición de especies, sobre explotación en su gestión forestal, invasión de especies nativas, polución, fuegos u otros factores (Millennium Ecosystem Assessment 2005; Sasaki y Putz 2009). Tradicionalmente se ha considerado la deforestación como el principal problema relacionado con la conservación de los bosques y su reserva de carbono. No obstante, varios autores han observado cómo la degradación forestal puede suponer un porcentaje significativo de las emisiones de gases de efecto invernadero de un país (Murdiyarso et al. 2008) e incluso otros autores señalan que las emisiones por degradación pueden ser de la misma magnitud a las causadas por deforestación (Sasaki y Putz 2009).

La Conferencia de las Partes (COP 13) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) reconoció en 2007 la gran importancia que la degradación forestal puede adquirir y, de esta manera, incluyó la degradación como una de las causas de emisiones de gases de efecto invernadero que se propone evitar o reducir mediante los mecanismos REDD (Murdiyarso et al. 2008). Sin embargo, dada la complejidad de los factores que inducen normalmente a la degradación forestal, resulta difícil encontrar un consenso acerca de una metodología universal que permita realizar el monitoreo, reporte y verificación de la degradación forestal (Penman 2008). Esto ha generado que la estimación de la degradación en muchos proyectos REDD+ se haga de manera experimental y que incluso en cada proyecto se evalúe de manera diferente, en función de las características propias de la región a analizar. En ese sentido, en el presente proyecto "*Generating a consistent historical time series of activity data from land use change for the development of Costa Rica's REDD plus reference level*", se contemplaba inicialmente la estimación de la degradación como una cuestión experimental, valorándose que se desarrollase una metodología robusta que permitiese ser usada a futuro.

Este trabajo se ha realizado partiendo de la información de imágenes RapidEye de alta resolución que nos permite estimar la cobertura arbórea en una muestra aleatoria de píxeles por todo el país. A partir de esta muestra de píxeles con cobertura arbórea conocida y de la información espectral proveniente de los mosaicos libres de nubes de Landsat 7 ETM+ del proyecto Global Forest Change (Hansen et al. 2013) se han ajustado modelos no paramétricos de regresión para estimar la cobertura arbórea en toda la superficie del país. Se ha generado este índice de cobertura arbórea de forma continua con un píxel de 30 metros en los años 2000 y 2012, ya que son los años que a fecha de realización del presente estudio el proyecto Global Forest Change tenía disponible mosaicos de imágenes libres de nubes. La diferencia de cobertura entre ambos años muestra de forma espacialmente explícita las áreas en las que la cobertura forestal ha disminuido entre el año 2000 y el año 2012, considerándose esta disminución como una estimación de la degradación de los bosques existentes en ambas fechas. De la misma forma un aumento del índice de cobertura en un área de bosque entre dos fechas muestra y se puede traducir en un aumento de existencias de carbono

2. PROCESO METODOLÓGICO

2.1. CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES RAPIDEYE Y OBTENCIÓN DE LA MUESTRA DE COBERTURA ARBÓREA

2.1.1. Selección y clasificación de imágenes RapidEye

Se han clasificado en bosque-no bosque 11 imágenes RapidEye de alta resolución (10 imágenes del año 2012 y una del 2011) repartidas de forma sistemática por todo el país para la obtención de una muestra representativa de puntos de cobertura arbórea en píxeles de 30 metros. Las imágenes RapidEye utilizadas se encuentran localizadas en la figura 1.

Para la clasificación de las imágenes de alta resolución RapidEye se han digitalizado regiones de entrenamiento de bosque, no bosque, nubes y sombras en cada una de las imágenes seleccionadas. La digitalización de las regiones de entrenamiento de bosque se realizó sobre áreas de bosque denso asegurando que todos los píxeles de 5 metros de la imagen RE estuvieran sobre una cobertura completa o casi completa de bosque. De la misma forma la digitalización de las regiones de entrenamiento de no bosque se realizó sobre las diferentes coberturas de no bosque de la imagen RE asegurando, para no generar confusión en el clasificador, que no hubiera cobertura arbórea dentro de las regiones de entrenamiento. Estas regiones de entrenamiento se han digitalizado fotointerpretando sobre las mismas imágenes de alta resolución obteniendo áreas homogéneas representativas de todos los tipos de cobertura de cada escena. De igual forma se han digitalizado nubes y sombras, generándose una muestra representativa de áreas sin datos. Una vez obtenidas las áreas de entrenamiento se ha generado un clasificador RamdonForest (RF) para cada imagen RapidEye diferenciando las clases bosque, no bosque y áreas sin datos (nubes y sombras) para cada imagen de RapidEye seleccionada.



FIGURA 1. Las superficies seleccionadas en amarillo se corresponden con las imágenes RapidEye utilizadas para la obtención de puntos de control de cobertura arbórea en el año 2012.

2.1.2. Obtención de información de cobertura arbórea

Para cada una de las 11 imágenes RapidEye se ha estimado la cobertura arbórea en 150 píxeles de 900 m² (píxeles de 30 por 30 metros coincidentes con los píxeles de la imagen Landsat). Esta muestra de 150 píxeles por imagen RapidEye fue seleccionada de forma aleatoria. La estimación de la cobertura arbórea en cada uno de los píxeles de 30x30 metros se ha realizado a partir de la clasificación de bosque, no bosque de la imagen RapidEye tal y como se muestra en la figura 2.

2.1.3. Selección y depuración de puntos de control

Una vez obtenida la muestra de 150 puntos (píxeles de 30x30 m) con cobertura arbórea para cada una de las imágenes RapidEye, se ha depurado de forma manual para no incluir puntos en borde de nube o de borde de sombra en la muestra definitiva. La muestra total de puntos de control generada posee 1.263 registros repartidos por todo el país.

La obtención de la muestra de puntos de cobertura arbórea y la estimación de coberturas arbóreas para todo el país ha seguido la guía propuesta por American Museum of Natural History (Horning 2011), basada en métodos de regresión con RF. El proceso completo de obtención de puntos de control para cada una de las imágenes RapidEye se detalla en la figura 3.

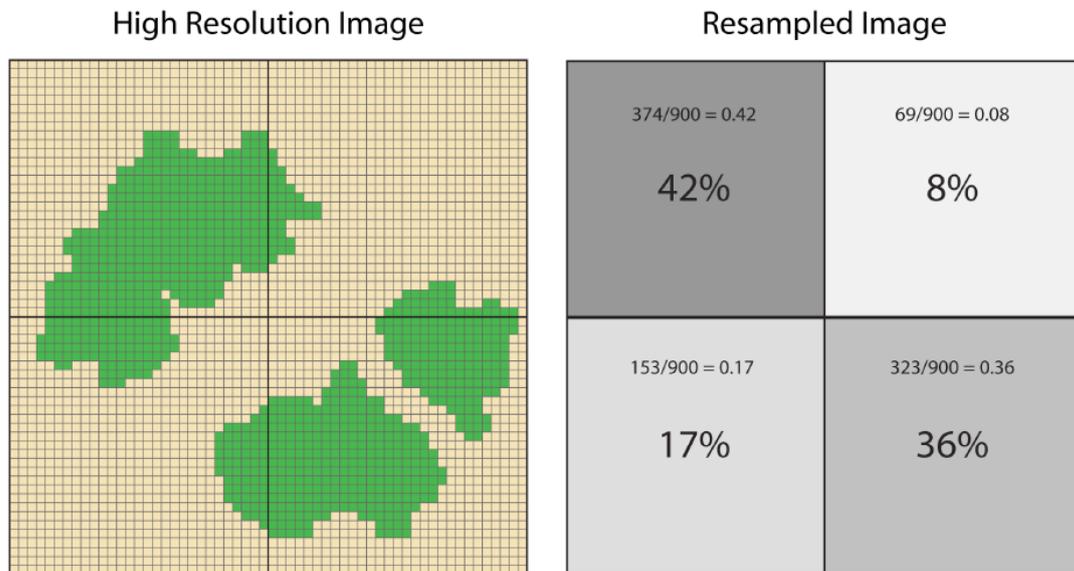


FIGURA 2. Estimación de la cobertura arbórea en los píxeles de Landsat (moderada resolución) a partir de la clasificación de bosque-no bosque de la imagen RapidEye de alta resolución. La resolución de la imagen RapidEye es de 5 metros por lo que para cada pixel de Landsat tendremos 36 píxeles de la imagen RapidEye. Fuente de la imagen Horning 2011.

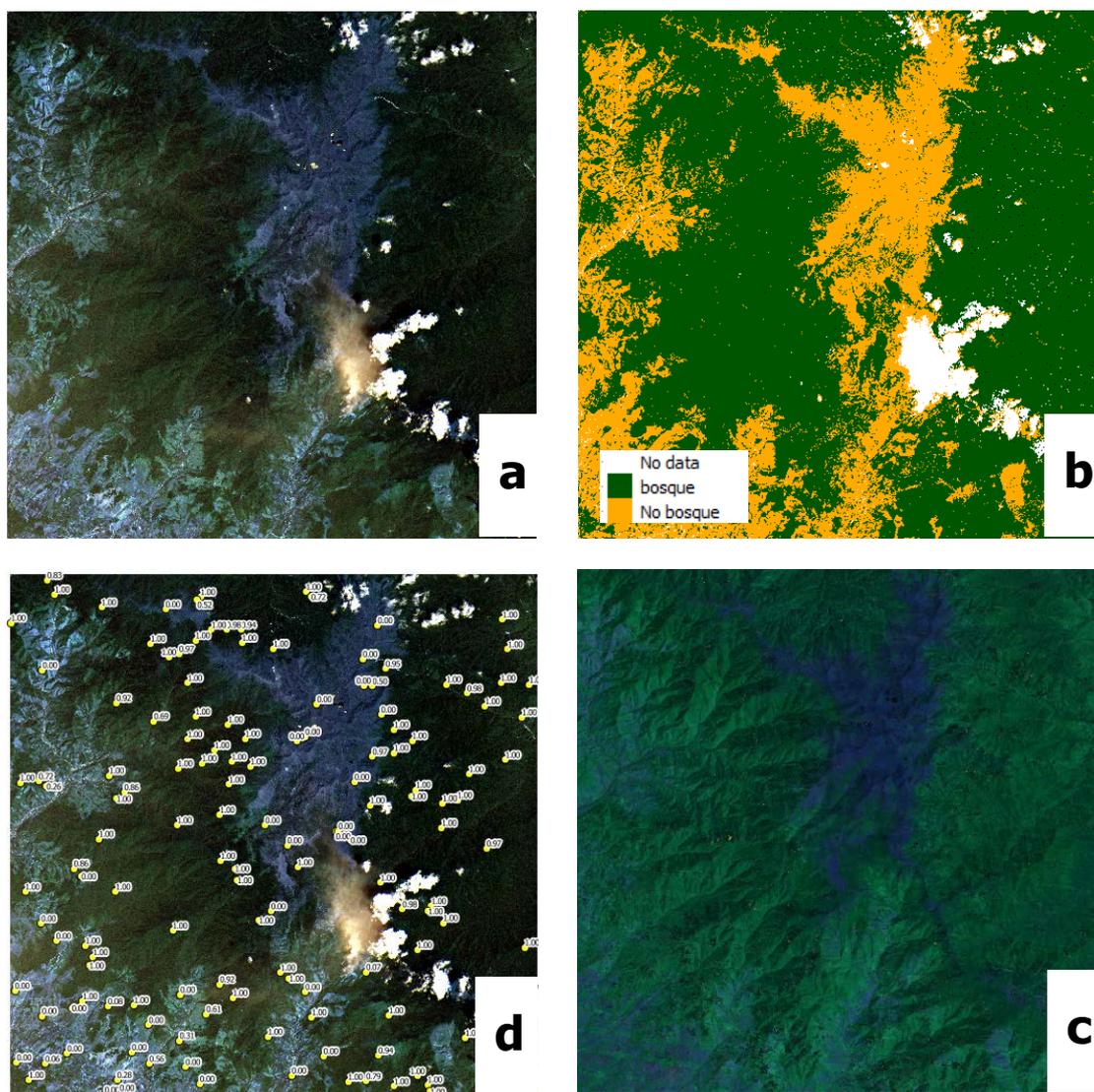


FIGURA 3. Proceso de generación de puntos de control de coberturas arbóreas: a) imagen RapidEye de alta resolución; b) clasificación de la imagen RapidEye en las clases: bosque, no bosque y sin datos; c) imagen Landsat utilizada (30 metros de pixel) visualizada en falso color; d) muestra aleatoria de puntos seleccionados por toda la imagen donde se ha calculado la cobertura arbórea para píxeles de 30 metros de la imagen Landsat a partir de la clasificación de imagen RapidEye de alta resolución.

2.2. ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE COBERTURA ARBÓREA A PARTIR DE LA INFORMACIÓN DE LANDSAT 7

2.2.1. Selección de imágenes Landsat

Se han utilizado los mosaicos de imágenes Landsat 7 libres de nubes del proyecto Global Forest Change 2000–2012 (Hansen et al. 2013) para la estimación, en los dos años mencionados, de la cobertura arbórea de forma continua en todo el país en píxeles de 30 metros. Con una metodología similar sería posible utilizar las mismas imágenes calibradas y normalizadas radiométricamente que han servido de base para la elaboración de los mapas de la serie

histórica. En este caso al tratarse de una prueba experimental de estimación de la degradación se han utilizado los mosaicos libres de nubes disponibles, el elevado número de imágenes que es necesario utilizar en cada año de la serie para reducir los vacíos de información hace mucho más laboriosa y compleja la generación del índice de cobertura sin huecos de forma continua en toda la superficie del país.

Los mosaicos libres de nubes del proyecto Global Forest Change tienen 4 bandas (bandas 3, 4, 5 y 7 de ETM+) cuyo valor de los píxeles representa una media de observaciones de imágenes de las estaciones de crecimiento. En los píxeles sin información disponible para el año de la imagen se asigna información espectral de la fecha más cercana al año considerado. Los valores de reflectancia están normalizados a techo de la atmósfera (TOA) y escalados a 8 bit usando un factor de escala g que es específico de cada banda para tener en cuenta el rango dinámico de cada una de las 4 bandas.

La figura 4 muestra los mosaicos libres de nubes correspondientes a los años 2000 y 2012 del proyecto Global Forest Change (Hansen et al. 2013) utilizados para la estimación de coberturas arbóreas.

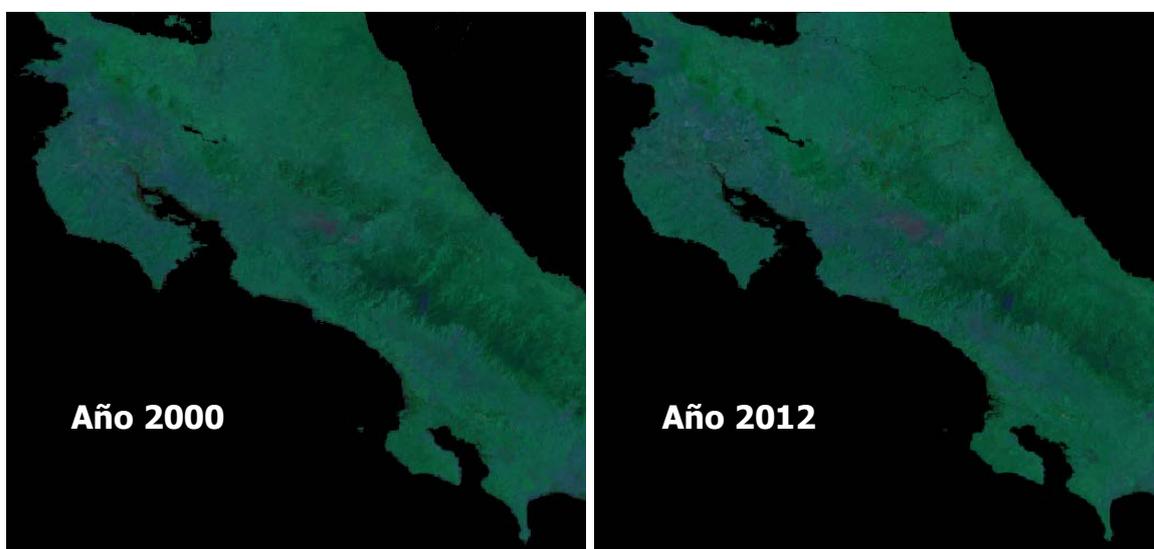


FIGURA 4. Mosaico de las imágenes (bandas espectrales 3, 4, 5 y 7 de ETM+) libres de nubes para los años 2000 y 2012 del proyecto Global Forest Change (Hansen et al. 2013) visualizado en falso color RGB bandas 3, 4 y 5.

2.2.2. Construcción del modelo para la estimación de la cobertura arbórea

Para el ajuste de los modelos de regresión se han utilizado 6 bandas: las 4 bandas espectrales (3, 4, 5 y 7 de ETM+) correspondientes al producto del Global Forest Change (Hansen et al. 2013), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el índice CWD, Climatic Water Deficit (Chave et al. 2014) (Tabla 1). Este índice CWD se mide en mm/año y muestra la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración sólo durante los meses secos y es por definición negativo. Este índice ayuda a mejorar las estimaciones en las zonas del país pobladas por bosques deciduos. El índice NDVI se calcula en función a la información de las bandas espectrales y es uno de los índices espectrales más usados.

TABLA 1. Variables predictoras utilizadas en la estimación de la cobertura arbórea

Banda	Denominación	Descripción
1	CWD	Climatic Water Deficit en mm/año
2	NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
3	RED	Banda 3 Landsat 7 ETM+
4	NIR	Banda 4 Landsat 7 ETM+
5	SWIR	Banda 5 Landsat 7 ETM+
6	SWIR	Banda 7 Landsat 7 ETM+

Para el ajuste del modelo RF de regresión se ha utilizado el paquete de R "RandomForest: Breiman and Cutler's Random Forests for classification and regression" (Liaw and Wiener 2002), siguiendo la guía de uso del mismo propuesta por Horning (2013). Se ha ajustado un modelo RF de regresión con la muestra 1.263 puntos de coberturas generados a partir de las imágenes RapidEye. El modelo se ha ajustado con $n=500$ y $m=4$, siendo "n" el número de árboles de decisión que se ensamblan y "m" el número de variables que se eligen aleatoriamente entre las predictoras para cada nodo de cada uno de los árboles de decisión independientes. La importancia de las variables predictoras se ha evaluado usando como criterio el incremento de la pureza de los nodos, según las recomendaciones de Liaw and Wiener (2002).

Tal y como se aprecia en la figura 5 el modelo de regresión RF tiende a sobrestimar cuando las coberturas son bajas y subestimar cuando son altas, tendencia que suele observarse normalmente en este tipo de análisis (Horning 2011). Para corregir este efecto se ha realizado un ajuste con un modelo lineal según las recomendaciones de American Museum of Natural History (Horning, 2011).

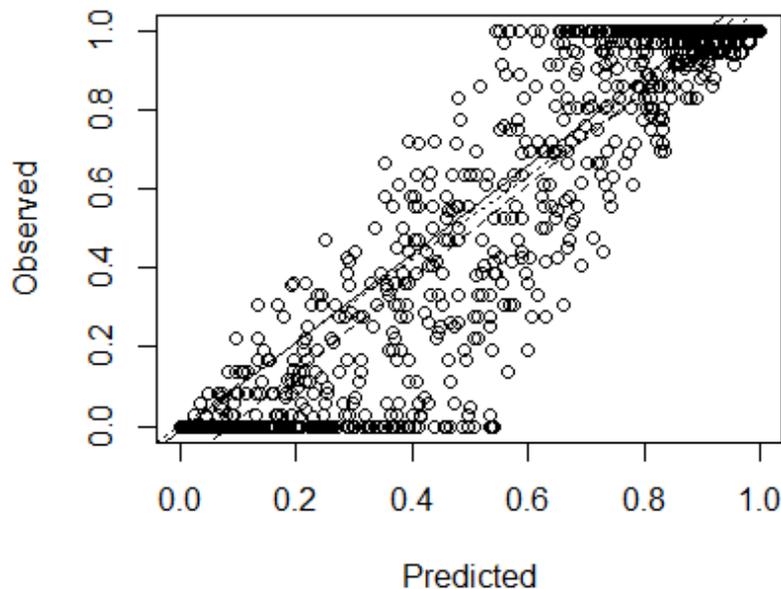


FIGURA 5. Gráfico de valores observados frente a predichos del modelo RF ajustado para la estimación de cobertura arbórea.

La bondad de ajuste del modelo ha sido evaluada con los siguientes estadísticos:

- El sesgo, o promedio de los residuos¹.
- El error absoluto medio (EAM), o promedio de los residuos en valor absoluto.
- La varianza de los residuos, Mean Squared Error (MSE) en inglés.
- La raíz cuadrada de la varianza de los residuos, Root Mean Squared Error (RMSE)
- La pseudo R^2 definida como $1 - \frac{MSE}{VAR(y)}$ siendo $VAR(y)$ la varianza de la cobertura arbórea observada en las imágenes RapidEye.

2.3. ESTIMACIÓN DE COBERTURAS ARBÓREAS Y DEGRADACIÓN FORESTAL ENTRE 2000 Y 2012

La aplicación del modelo RF a las dos imágenes permite generar información continua de cobertura arbórea para el año 2000 y el año 2012. Se han calculado diferencias de cobertura arbórea entre el año 2000 y el 2012 para el píxel de 30 metros de las imágenes Landsat y se ha aplicado un filtro de media de 3 píxeles de radio para reducir el ruido generado por el modelo.

La degradación forestal únicamente se produce sobre áreas de bosque que se mantienen como bosque ("Forest Land Remaining Forest Land") por ello, para realizar el análisis de la degradación, se seleccionaron únicamente las áreas mapeadas (en la serie histórica de actividad de cambio de uso del suelo) como bosque en el año 2000 y que continúan siendo bosque en 2012. Además, la variable continua de pérdida de cobertura forestal se categorizó para convertirla en tres clases y poder así estimar la degradación:

1. *Bosque no degradado*: Bosque en el que hay un aumento en la cobertura forestal o una pérdida de cobertura menor a 15%.
2. *Bosque levemente degradado*: Bosque en el que hay una pérdida de cobertura forestal entre 15 y 35%
3. *Bosque muy degradado*: Bosque en el que hay una pérdida de cobertura forestal mayor a 35%

Como se puede ver en el apartado de resultados (apartado 3.1) el modelo posee un error asociado, en este caso el modelo RF de regresión posee un error cuadrático medio (RMSE) de 13,5 % de cobertura arbórea, este error hace difícil distinguir entre una reducción real de menos del 15 % de cobertura arbórea y el ruido que produce el modelo, por ello, los rangos de cobertura propuestos están en consonancia con la bondad de ajuste del modelo.

2.4. VALIDACIÓN DEL MAPA DE DEGRADACIÓN

Para la validación de este producto como método de detección y evaluación de áreas de degradación forestal se ha realizado un muestreo aleatorio de 292 puntos en las áreas clasificadas como bosque tanto en 2000 como en 2012: 202 puntos en áreas de bosque no degradado, 43 en áreas de bosque levemente degradado y 47 en áreas de bosque muy degradado. Sobre esta muestra aleatoria de puntos se han analizado cambios en cobertura

¹ Los residuos son la diferencia, para cada uno de los valores de la muestra de ajuste del modelo, entre el valor de cobertura arbórea observado en las imágenes Rapideye y el estimado con el modelo RF.

arbórea a partir de las imágenes de alta resolución disponibles para posteriormente evaluar la precisión y desviaciones de las diferencias de cobertura arbórea estimadas. Para la validación de este producto se siguieron las recomendaciones sugeridas por Oloffson et al. (2014), las cuales permiten, además de estimar la exactitud de los resultados, calcular una serie de estadístico de exactitud y calcular las áreas ajustadas en función a los errores observados en la validación.

3. RESULTADOS

3.1. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE COBERTURA FORESTAL EN EL AÑO 2000 Y 2012

La metodología propuesta ha permitido ajustar un modelo estadístico con una bondad de ajuste relativamente alta (**pseudo-R² = 0,903**; Sesgo = 0,00028; MSE = 0,018; RMSE = 0,135) que permite estimar de forma espacialmente explícita la cobertura arbórea de Costa Rica en 2000 y 2012. En la Figura 6 puede observarse la importancia relativa en el ajuste de dicho modelo de las variables predictoras. La figura 7 muestra los resultados de la estimación de cobertura arbórea para los años 2000 y 2012 de forma continua en todo el país.

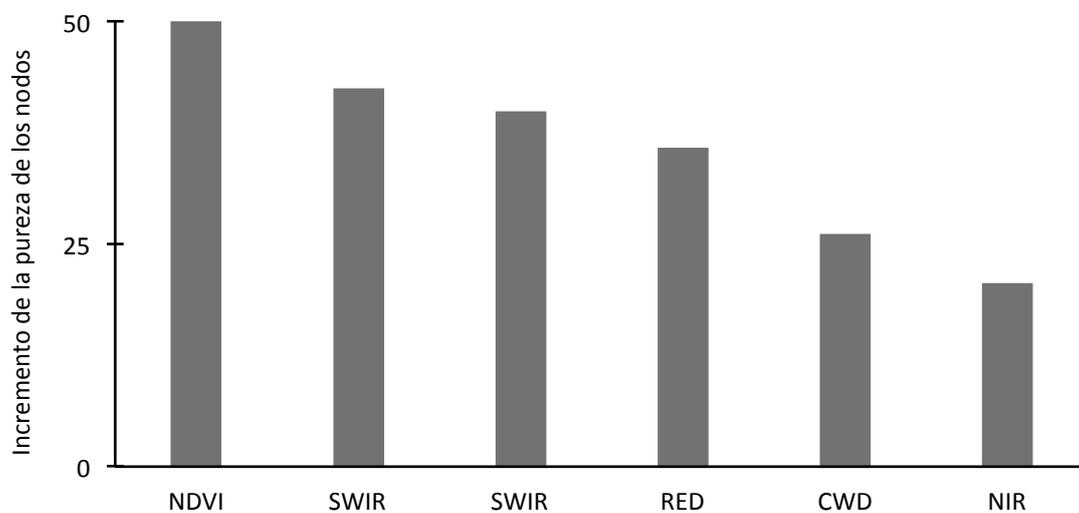


FIGURA 6. Importancia relativa de las variables predictoras en el ajuste del modelo para la estimación de la cobertura arbórea de Costa Rica

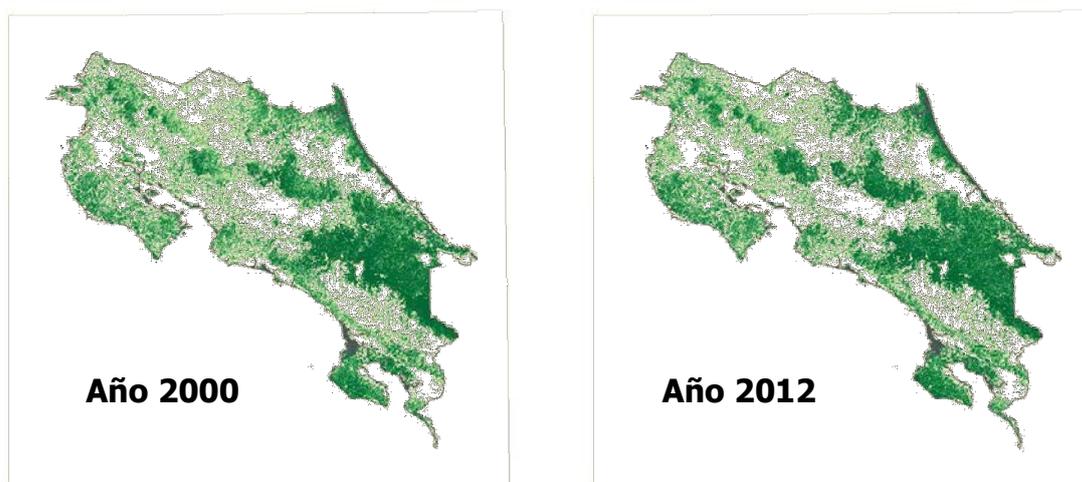


FIGURA 7. Raster de cobertura arbórea para los años 2000 y 2012

3.2. ESTIMACIÓN DE LA DEGRADACIÓN FORESTAL ENTRE LOS AÑOS 2000 Y 2012

Según la metodología utilizada, se estima la degradación forestal entre los años 2000 y 2012 como una disminución de la cobertura arbórea en las áreas de bosque en el año 2000 que continúan siendo bosque en 2012. Así, se utilizan los mapas que se observan en la figura 7 para calcular la degradación forestal (Figura 8). Según los resultados obtenidos, se estima que de las 2.793.603 ha de bosque en el año 2000 que continúan siendo bosque en 2012, el 90,2% (2.521.004 ha) se considera como bosque no degradado, mientras que el 8,5% (238.541 ha) se considera como levemente degradado y sólo el 1,2% (34.058 ha) se considera como muy degradado. La figura 9 muestra dos ejemplos de lugares en los que se ha detectado degradación forestal entre los años 2000 y 2012.

La validación de estos resultados muestra una precisión general relativamente alta (0,89), aunque la exactitud en la estimación de las clases de bosque levemente degradado y muy degradado (0,67 y 0,68 respectivamente) es mucho menor a la del bosque no degradado (0,99). Los resultados de esta validación (resumidos en las Tablas 2 y 3) están detallados en el archivo Excel que se acompaña en esta entrega.



FIGURA 8. Estimación de la degradación forestal en Costa Rica entre los años 2000 y 2012 en las áreas de bosque del año 2000 que continúan siendo bosque en 2012. Bosque no degradado (color verde) es en el que hay un aumento en la cobertura forestal o una pérdida menor a 15%. Bosque levemente degradado (color naranja) es en el que hay una pérdida de cobertura forestal entre 15 y 35%. Bosque muy degradado (color rojo) es en el que hay una pérdida de cobertura forestal mayor a 35%.

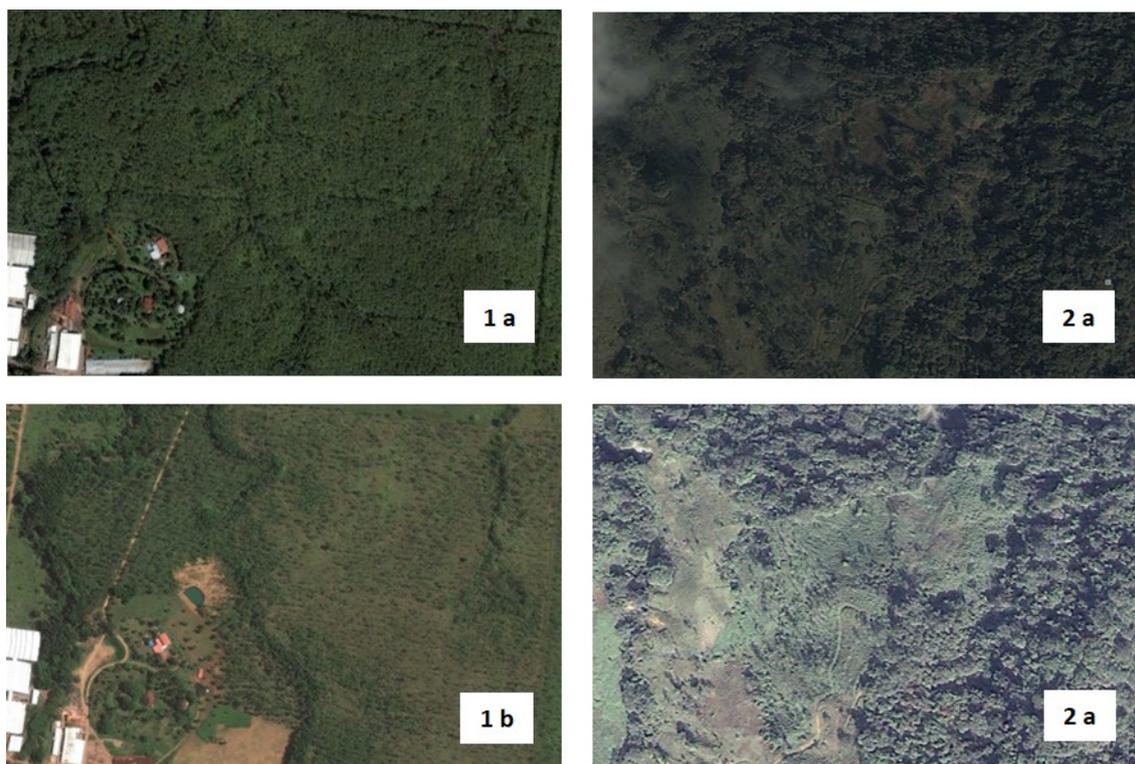


FIGURA 9. Detalle de dos ejemplos en los que se observa degradación forestal entre los años 2000 y 2012. La fotografía 1a muestra una plantación forestal en noviembre de 2003 mientras que la 1b se corresponde con el mismo lugar en abril de 2010. Las fotografías 2a y 2b se corresponden también con el mismo lugar aunque la primera fue tomada en febrero de 2002 y la segunda en enero de 2013. Las fotografías de alta resolución espacial Digital Globe han sido tomadas de Google Earth.

3.3. RESULTADOS VALIDACIÓN

La validación de las estimaciones realizadas de la degradación forestal (Tablas 2 y 3) muestra como el modelo tiende a sobreestimar ligeramente las áreas de bosque degradado (especialmente la clase de bosque muy degradado). Así, siguiendo las recomendaciones propuestas por Oloffson et al. (2014) se ha calculado el área ajustada de cada una de las tres clases de degradación en función del área estimada inicialmente por el modelo y un coeficiente de ajuste que depende de la exactitud de cada una de las clases según la validación realizada. De este modo, **el área ajustada de bosque no degradado sería un 92%** (2.569.924 ha, con un intervalo de confianza al 95% entre 2.515.419 y 2.624.429), **el de bosque levemente degradado de un 7,2%** (200.491 ha, con un intervalo de confianza al 95% entre 144.206 y 256.776) **y el de bosque muy degradado de un 0,8%** (23.188 ha, con un intervalo de confianza al 95% entre 18.393 y 27.983) (Tabla 4).

Durante el proceso de validación de los resultados, se han observado varias causas que podrían estar afectando al modelo y que podrían explicar esta ligera sobreestimación de los valores de degradación: (1) Se observan pequeñas manchas en las imágenes globales libres de nubes correspondientes al producto del Global Forest Change (Hansen et al. 2013). Estas manchas son debidas a problemas con el bandedo de las imágenes Landsat 7 off, pero también probablemente se deban a pequeñas nubes (o zonas de neblina) que no han sido correctamente limpiadas en el proceso de construcción de ese mosaico de imágenes. (2) De forma similar, han podido afectar en algunas zonas las peculiaridades estacionales del bosque en la zona de Guancaste. Así, en la figura 10 pueden observarse dos ejemplos en los que se

detalla como imágenes de alta resolución espacial tomadas en meses diferentes pero en el mismo año evidencian el efecto que esta estacionalidad puede tener en la estimación de la cobertura boscosa; i.e. el mismo bosque en la época seca parece tener una cobertura forestal mucho menor que en la lluviosa (Figura 10). Ambos problemas provienen del uso de un mosaico libre de nubes producido para todo el mundo. Por lo tanto, para futuros casos puede resultar interesante permitir que existan áreas sin información debido a zonas de nubes (ya que esto permitiría ganar precisión en el resto de las zonas), así como trabajar con imágenes Landsat analizadas sólo para el área de estudio y, por lo tanto, que éstas puedan ser analizadas con mayor detalle. No obstante, se considera que la metodología propuesta usando las imágenes globales libres de nubes correspondientes al producto del Global Forest Change (Hansen et al. 2013) como variables predictoras en el modelo de estimación de la degradación forestal ha resultado un éxito y se propone su uso en otros casos similares en el futuro.

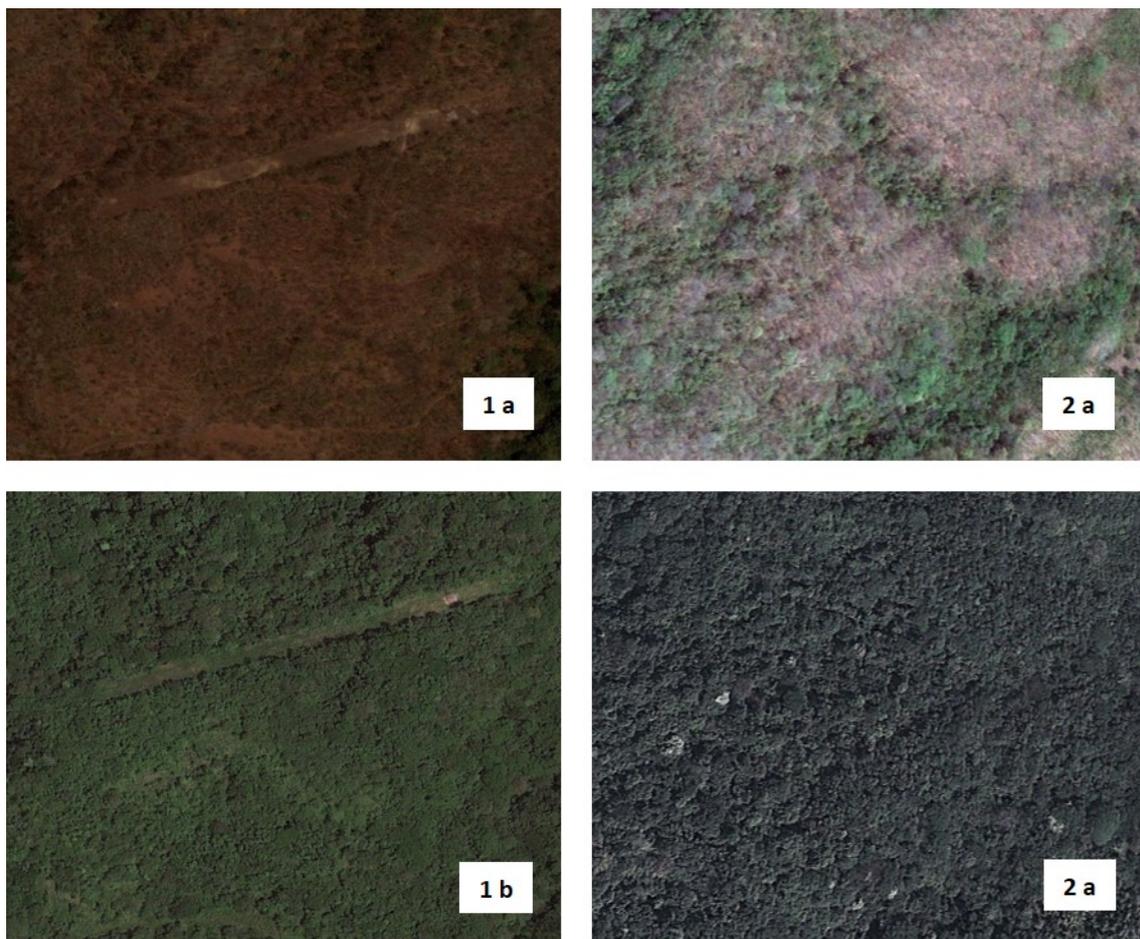


FIGURA 10. Detalle de dos ejemplos en los que se observan variaciones estacionales en las coberturas forestales que pueden estar provocando errores en la estimación de la degradación. Las fotografías 1a y 1b se corresponden con el mismo lugar aunque la primera fue tomada en marzo de 2010 y la segunda en noviembre de ese mismo año. De igual manera, las fotografías 2a y 2b se corresponden con el mismo lugar aunque la primera fue tomada en enero de 2010 y la segunda en diciembre de ese mismo año. Las fotografías de alta resolución espacial Digital Globe han sido tomadas de Google Earth.

TABLA 2. Resultados de la validación de la degradación forestal estimada en Costa Rica entre los años 2000 y 2012. "No degradado" es el bosque en el que hay un aumento en la cobertura forestal o una pérdida de cobertura menor a 15%. "Levemente degradado" es en el que hay una pérdida de cobertura forestal entre 15 y 35%. "Muy degradado" es en el que hay una pérdida de cobertura forestal mayor a 35%.

Clase	No degradado	Levemente degradado	Muy degradado	Total	Exactitud Usuario	Error Usuario (comisión)
No degradado	199	3	0	202	0.99	0.01
Levemente degradado	14	29	0	43	0.67	0.33
Muy degradado	12	3	32	47	0.68	0.32
Total	225	35	32	292		
Exactitud Productor	0.88	0.83	1.00			
Error Productor (omisión)	0.12	0.17	0.00			
Exactitud total (Overall Accuracy)						0.89

TABLA 3. Cálculo de los estadísticos de la exactitud de la validación de la degradación forestal estimada en Costa Rica entre los años 2000 y 2012, según las recomendaciones de Oloffson et al. (2014). "No degradado" es el bosque en el que hay un aumento en la cobertura forestal o una pérdida de cobertura menor a 15%. "Levemente degradado" es en el que hay una pérdida de cobertura forestal entre 15 y 35%. "Muy degradado" es en el que hay una pérdida de cobertura forestal mayor a 35%.

Clase	Exactitud Usuario	Intervalo de confianza 95%	Exactitud Productor	Intervalo de confianza 95%	Exactitud Total	Intervalo de confianza 95%
No degradado	0.99	0.97 - 1	0.97	0.95 - 0.98		
Levemente degradado	0.67	0.53 - 0.82	0.80	0.62 - 0.98		
Muy degradado	0.68	0.54 - 0.82	1.00	1 - 1		
Total					0.95	0.94 - 0.97

TABLA 4. Cálculo del área ajustada (y su intervalo de confianza) de las clases de degradación forestal en Costa Rica entre los años 2000 y 2012, modificando las estimaciones originales en función de la exactitud calculada en la fase de validación, según las recomendaciones de Oloffson et al. (2014).

Clase	Área estimada (ha)	Área ajustada (ha)	Error relativo al 95% de nivel de significación (%)	Intervalo de confianza al 95% (ha)
Bosque no degradado (< 15%)	2.521.004	2.569.924	2%	2.515.419 – 2.624.429
Bosque levemente degradado (15-35%)	238.541	200.491	28%	144.206 – 256.776
Bosque muy degradado (> 35%)	34.058	23.188	21%	18.393 – 27.983
Total	2.793.603	2.793.603		

4. CONSISTENCIA DEL INDICE DE COBERTURA CON LA SERIE HISTÓTIRA

La definición de bosque para el presente trabajo se basa en la definición de bosque en Costa Rica, según se ha consensado en las reuniones que se realizaron con FONANFIFO y otros expertos del país. Así, se considera 30 % de cobertura de copas como límite de cobertura arbórea para diferenciar bosque de otras formaciones con presencia de árboles.

Usando esta definición de bosque como base, es posible analizar la consistencia del índice de cobertura (diseñado para la estimación de la degradación) con las áreas clasificadas como bosque en la serie histórica. De esta manera, a pesar de que el proceso de clasificación de imágenes y la estimación del índice de cobertura siguen metodologías diferentes, se ha comprobado que el 92% de la superficie clasificada como bosque en el año 2011 de la serie (2.663.130 ha de las 2.897.832 ha totales de bosque) posee una índice de cobertura por encima del 30%. Este alto valor de coincidencia entre las dos estimaciones realizadas de forma independiente se considera como una validación cruzada de ambos productos.

5. IMPLICACIONES PARA EL FUTURO MONITOREO REPORTE Y VERIFICACIÓN (MRV)

La generación y actualización de este índice de cobertura arbórea en el futuro requiere de una muestra de imágenes de alta resolución. Es posible utilizar la cobertura de imágenes RapidEye del año 2012 disponible en el país para ajustar el modelo en ese año y aplicarlo tanto a años anteriores al 2012, tal y como se ha realizado en este trabajo, como a fechas posteriores dentro del proceso MRV. En caso de que el país tenga acceso a imagen de alta resolución en el futuro es recomendable utilizarlas dentro de un proceso continuo de mejora y validación del índice de cobertura. En este caso la nueva muestra de imágenes de alta resolución deberá cubrir toda la variabilidad de tipos de bosque y zonas de vida del país. RapidEye podría ser una opción interesante para este monitoreo posterior ya que permitiría conservar la coherencia metodológica con el índice calculado para los años 2000 y 2012, si no hubiera disponibilidad de imágenes RapidEye en el futuro se podría analizar la posibilidad de usar otras fuentes de imágenes de alta resolución disponibles.. Así, si por ejemplo se trabajase en un futuro con RapidEye, bastaría con 11 ó 12 escenas repartidas de la misma forma que se observa en la Figura 1 para cubrir la variabilidad necesaria para construir un modelo robusto y consistente en todo el país.

Este índice de cobertura se ha generado utilizando la información global disponible en el proyecto Global Forest Change (Hansen et al, 2013) por lo que la actualización de este proyecto es importante para poder replicar en el futuro el índice de cobertura en Costa Rica. Recientemente el proyecto Global Forest Change ha sido actualizado de 2012 a 2013 incorporando imágenes provenientes del satélite Landsat 8 e incorporando a su vez varias mejoras importantes. Esta actualización hace pensar que el proyecto va a tener continuidad en el futuro. En caso de no tener acceso a estos datos globales se podría construir un índice de cobertura con la misma metodología pero utilizando las mismas imágenes Landsat calibradas y normalizadas radiométricamente que se utilizan en la generación de los mapas de uso del suelo.

6. REFERENCIAS

Chave J., Réjou-Méchain M., Burquez A., Chidumayo E., Colgan M.S., Delitti W.B.C., Duque A., Eid T., Fearnside P.M., Goodman R.C., Henry M., Martinez-Yrizar A., Mugasha W.A., Muller-Landau H.C., Mencuccini M., Nelson B.W., Ngomanda A., Nogueira E.M., Ortiz-Malavassi E., Pelissier R., Ploton P., Ryan C.M., Saldarriaga J.G., Vieilledent G. Improved allometric models to estimate the above ground biomass of tropical trees. 2014. *Global Change Biology* , 20, 3177-3190.

Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* 342, 850–853.

Horning N. 2011. Training Guide for Creating Percent Cover Images. American Museum of Natural History - v10, Center for Biodiversity and Conservation. Available from <http://biodiversityinformatics.amnh.org/>.

Horning N. 2013. Training Guide for Using Random Forests to Classify Satellite Images - v9. American Museum of Natural History, Center for Biodiversity and Conservation. Available from <http://biodiversityinformatics.amnh.org/>

Liaw A., Wiener M. 2002. Classification and Regression by randomForest. *R News* 2(3), 18--22.

Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington, DC

Murdiyarmo D., Skutsch M., Guariguata M., Kanninen M., Luttrell C., Verweij P., Stella O. 2008; Measuring and Monitoring forest degradation for REDD: Implications of country circumstances. *CIFOR infobrief* 16: 1-6.

Oloffson P., Foody G.M., Herold M., Stehman S.V., Woodcock C.E., Wulder M.A. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment* 148: 42–57.

Penman J. 2008 An exploration by the EU on methodological issues relating to reducing emissions from forest degradation in developing countries. UNFCCC Informal Meeting of Experts. Bonn, 20-21 October 2008. http://unfccc.int/methods_science/redd/items/4579.php

Sasaki N., Putz F.E. 2009. Critical need for new definitions of "forest" and "forest degradation" in global climate change agreements. *Conservation Letters* 2 (5): 226-232.