



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

Aplicación de la teledetección a la certificación forestal en Galicia

ESTEBAN CAVA, J.¹, TOMÉ, J.L.¹, GARCÍA CASTILLO¹, D., SALVADOR, M.². y PÉREZ OLEAGA, A.²

¹ Agresta Sociedad Cooperativa

² PEFC ESPAÑA.

Resumen

Gracias al aumento de la capacidad de computación y a la disponibilidad de datos abiertos la teledetección está suponiendo una gran oportunidad para el seguimiento de nuestros bosques. Galicia es un territorio especialmente difícil de monitorizar debido a su dinamismo forestal y a una estructura de propiedad enormemente fragmentada. Esta situación ha motivado que PEFC seleccionara esta región para un piloto de monitorización de cambios basado en imagen satélite orientado a mejorar su proceso de certificación forestal. Para ello, se generó una cartografía de cambios mediante el análisis de series temporales Landsat. Para la detección de cambios se utilizó el algoritmo de tendencia BFAST (Breaks for Additive Season and Trend), que posteriormente fueron clasificados con random forests. Los resultados demostraron que la metodología utilizada tiene gran capacidad para detectar cambios de más de 0,2 ha, con errores de omisión de entre el 30 y 10 %. Por debajo de esta superficie, el error sube hasta el 80 %. A pesar de los prometedores resultados, se trata de un sistema limitado a la hora de escalarlo a nivel nacional, siendo necesario estudiar posibles alternativas mediante el uso de plataformas de computación en la nube.

Palabras clave

Detección de cambios, auditoría, series temporales, índices de vegetación.

1. Introducción

La Conferencia interministerial de Helsinki en el año 1993 (MCPFE, 1993) definió la Gestión Forestal Sostenible como: “la administración y uso de los bosques de manera y en tal medida que mantengan su biodiversidad, productividad, capacidad de regeneración, vitalidad y su potencial de cumplir, ahora y en el futuro, funciones ecológicas, económicas y sociales relevantes, a escala local, nacional y global, sin causar daño a otros”. Por tanto, la gestión forestal sostenible es un elemento clave para garantizar el abastecimiento de la creciente cantidad de bienes tanto tangibles como intangibles que demanda la sociedad actual (Sheppard et al., 2020). PEFC España es una asociación sin ánimo de lucro que promueve la gestión forestal sostenible y sus productos en el territorio español a través de la certificación forestal PEFC como herramienta que asegura la trazabilidad en toda la cadena de valor. El sistema PEFC es el sistema nacional de certificación elegido por más de 49.000 propietarios forestales públicos y privados que se encuentran agrupados en 38 certificados de gestión forestal sostenible y que dan respuesta a los criterios e indicadores de la Norma nacional UNE 162.002. Es el sistema más implantado en el ámbito nacional (más de 2,48 millones de hectáreas gestionadas de forma sostenible a 31 de diciembre de 2021), además del mundial, ya que se adapta perfectamente a todas las tipologías de montes tanto mediterráneos como atlánticos.

El volumen de datos recopilados de la superficie forestal certificada con más de 100.000 registros es muy elevado por lo que digitalizar los sistemas de certificación e instaurar nuevos

sistemas de computación se hace cada vez más necesario. Desde 2017 se han ido implementando una serie de medidas con el reto de conseguir una transformación digital de la gestión forestal sostenible y la certificación. La tecnología digital es un soporte básico para una gestión forestal sostenible certificada y, también, para garantizar la trazabilidad de los productos de origen forestal, en un contexto en que el consumidor demanda productos y procesos productivos respetuosos con el medio ambiente.

En este proceso de digitalización se ha creado una plataforma de registro online de la superficie certificada, desarrollado a medida de PEFC por INCA Medio, para uso de las entidades de certificación y los gestores de los montes certificados, en la que se han homogenizado los datos capturados, se incluyen mecanismos de minimización de errores y se mejora el control y seguimiento de la certificación forestal.

A pesar de estos avances, todavía se considera que hay diversos aspectos en los que la digitalización puede mejorar el proceso de certificación. Este proceso está basado en auditorías internas y externas anuales de todos certificados, siendo una parte de auditoría en campo que se realiza según una metodología de muestreo. La auditoría interna permite a la entidad que coordina el certificado controlar y hacer el seguimiento de los montes adscritos a su certificado. La auditoría externa la realiza una entidad de certificación acreditada que vigila y garantiza el cumplimiento de los criterios e indicadores de la norma UNE y del Sistema Español de Certificación Forestal reconocido PEFC. Sin embargo, dada la gran fragmentación de la propiedad, especialmente en la cornisa cantábrica, supone un elevado número de parcelas y gestores involucrados que necesita de un control y gestión eficiente. Por consiguiente, es necesario poner al alcance de los usuarios de la certificación forestal, gestores de superficie forestal y entidades de certificación, información concreta y actualizada de las parcelas certificadas y ayudar a focalizar los controles y auditorías en lugares donde se han producido cambios en la masa forestal.

En este sentido, la integración de datos de teledetección podría solventar esta necesidad por su gran potencial para caracterizar las dinámicas de las masas forestales. La mayor disponibilidad de imágenes de satélite junto con el avance de la capacidad de procesamiento y computación ha estimulado el uso generalizado de series temporales (Woodcock et al., 2019; Wulder et al., 2012). El uso de series temporales implica una sucesión de observaciones de la superficie terrestre en el transcurso del tiempo, estableciéndose una línea temporal de análisis. La utilización de observaciones repetidas a lo largo del tiempo recoge una mayor variabilidad espectral mejorando la detección de cambios de distinta intensidad en el contexto de seguimiento de los bosques.

2. Objetivos

Como parte de los retos de mejorar los procesos de auditoría de certificación forestal, PEFC España decidió desarrollar el proyecto piloto “Fomento de la certificación agrupada en Gestión Forestal PEFC mediante el uso de tecnologías de teledetección” de aplicación en Galicia, financiado por PEFC Internacional en la convocatoria: “PEFC Collaboration Fund competition - 2018” con el apoyo técnico de AGRESTA. El objetivo del proyecto desarrollado entre 2018 y 2020 fue mejorar la fiabilidad y capacidad de mejora de las auditorías internas y externas de gestión Forestal, sin incrementar sus costes, mediante técnicas de teledetección que utilizando la información satelital disponible para detectar los cambios y así focalizar las auditorías in situ a dichos lugares.

Con este fin, se intentó desarrollar una metodología de cambios en la cobertura (totales y parciales) vegetal desde 2011 a 2018 usando series temporales de imágenes Landsat. Además, se analizó que dicha metodología pudiese ser actualizada temporalmente en periodos semestrales y se valoró una vez verificada su eficacia la posibilidad de extrapolarla a escala nacional con un coste económicamente viable para el propietario final.

3. Metodología

El área de estudio engloba las masas forestales de la comunidad autónoma de Galicia (Figura 1). La máscara objeto de estudio se obtuvo a partir de información del Mapa Forestal de Galicia (escala 1:25:000), seleccionando aquellas teselas fotointerpretadas como arbolado y matorral.

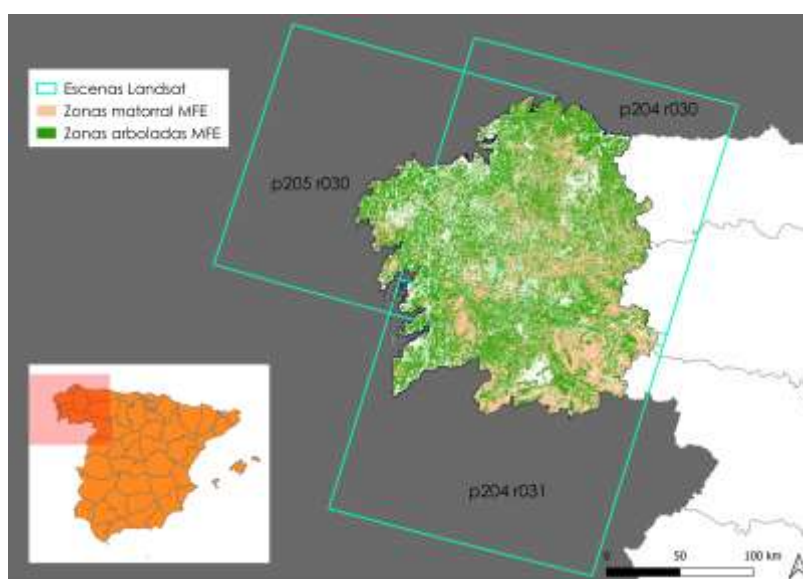


Figura 1. Zona de estudio.

La propuesta metodológica para el análisis histórico de las variaciones de cobertura vegetal incorpora las siguientes etapas (Figura 2):

1. Procesamiento de las series temporales de imágenes satelitales Landsat y cálculo de índices de vegetación.
2. Análisis de tendencias espectrales y estimación de indicadores de cambios.
3. Delimitación de zonas de cambio para la calibración de los modelos de cambios.
4. Ajuste de los modelos de clasificación a partir de la información procesadas en los pasos 1 y 2.
5. Validación de los resultados con una muestra independiente.
6. Generación de las cartografías de cambios a partir de los modelos anteriores.



Figura 2. Esquema metodológico aplicado.

La zona de estudio engloba tres escenas Landsat (Figura 1) con los siguientes path (p) y row (r): p204r030, p204r031 y p205r030. Para cada una de las escenas se descargaron todas las imágenes Landsat disponibles con una cobertura nubosa inferior al 80% entre 2000 y la mitad de 2018 (lo que supuso alrededor de 1.300 imágenes descargadas). Para cada una de las imágenes se calcularon dos índices de vegetación normalizados: el NDVI y el NBR. Además, para cada año se generaron unos compuestos temporales en base a los valores máximos de los índices calculados (Lück y Van Niekerk, 2016).

La serie temporal de imágenes NDVI y NBR fue analizada de manera independiente con el algoritmo BFAST (Breaks for Additive Season and Trend) desarrollado por Verbesselt et al. (2010). Esta metodología define dos períodos dentro de una serie temporal: un periodo histórico y uno de monitoreo. El periodo histórico es el intervalo de tiempo utilizado para ajustar un modelo de regresión, mientras que el de monitoreo es aquel en el que se detectan los cambios. Posteriormente, el modelo de regresión es extrapolado al periodo de monitoreo para comprobar si las predicciones se ajustan a los nuevos datos o por el contrario se observan puntos de ruptura de la serie temporal. Se considera que ha habido un cambio cuando la diferencia entre el valor observado y el predicho excede un intervalo de confianza del 95% (Verbesselt et al., 2012). Esta metodología se aplicó con el paquete de R *bfastSpatial* obteniéndose información sobre el momento en el que el cambio fue detectado y la intensidad del cambio detectado calculado como la diferencia entre los datos observados y los predichos por el modelo. Valores positivos significan un aumento de la tendencia, mientras que valores negativos están asociados con una disminución.

Para la clasificación de los cambios se digitalizaron zonas de entrenamiento en las que se fotointerpretaron cambios de cobertura total y parcial (cortas a hecho, claras e incendios) a lo largo del horizonte temporal analizado. Para la localización de estas zonas se utilizaron otras fuentes auxiliares como los datos globales de cambios forestales de Hansen et al. (2013) y la cartografía de zonas quemadas monitorizadas con imágenes del satélite MODIS (Regos 2018). El conjunto de datos de entrenamiento constó de 3.583 puntos y se utilizó posteriormente para ajustar diferentes modelos de clasificación basados en la metodología random forests (RF) (Breiman, 2001). Para cada punto se extrajeron las siguientes variables predictoras: el momento del cambio, la intensidad del cambio, los valores anuales de NBR obtenidos a partir de los compuestos temporales (Tabla 1). Además, se calcularon variables de cambio Δ NBR y Δ NDVI calculadas como la diferencia del índice de vegetación entre el año analizado y el anterior.

Se ajustaron distintos modelos de clasificación RF con distintas combinaciones de variables predictoras, seleccionando como modelo final aquel que presentó los mejores resultados de validación interna de la metodología RF.

Tabla 1. Resumen de las variables predictoras analizadas para el ajuste de modelos de clasificación de cambios

Variables predictoras	Origen
Momento de cambio	BFAST
Intensidad de cambio NDVI	BFAST
Intensidad de cambio NBR	BFAST
Máximo NBR desde 2011 a 2018	Imágenes Landsat
Máximo NDVI desde 2011 a 2018	Imágenes Landsat
Δ NBR y Δ NDVI	Imágenes Landsat

Para comprobar la calidad de los productos de cambios generados se diseñó un proceso de validación mediante matrices de confusión construidas a nivel de píxel utilizando un conjunto de datos independiente (Figura 3). Se proporcionan tres indicadores 1) la exactitud del productor, 2) el error de omisión y 3) error de comisión. La exactitud del productor es el porcentaje de cambios que han sido correctamente clasificados, el error de omisión es el porcentaje de cambios que no están siendo detectados. El error de comisión es el porcentaje de cambios clasificados como cambios que en realidad no lo son. Este conjunto de datos de validación independiente fue proporcionado por entidades solicitantes y por la Xunta de Galicia, consistiendo en 83 áreas de cambio de diferentes tamaños en las que se observó una pérdida total de la cobertura. Además, la clase de cambio de cobertura arbórea total sirvió como estrato para asignar 100 puntos aleatorios, que se validaron visualmente con imágenes de alta resolución, y comprobar la detección de falsos cambios positivos.

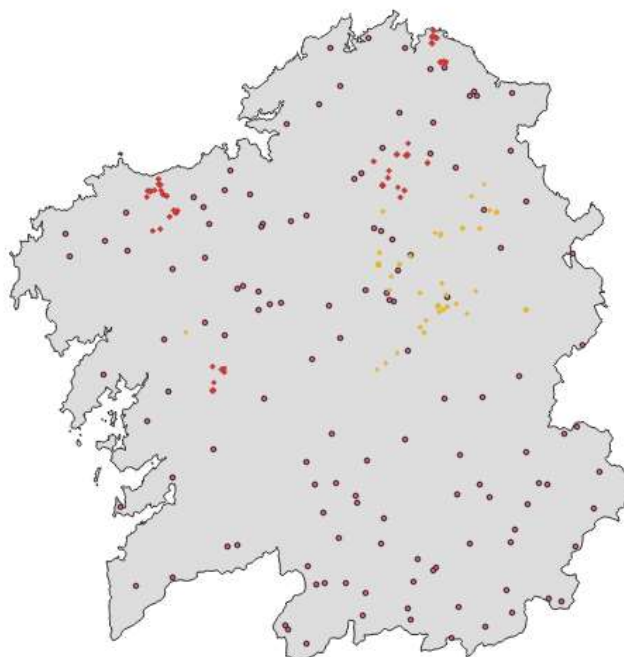


Figura 3. Distribución de la base de datos de validación utilizada.

4. Resultados

El modelo de clasificación final se generó utilizando como variables predictoras el momento del cambio, la intensidad del cambio de los índices NDVI y NBR y los valores máximos de cada año de NBR. Este modelo se aplicó a toda la superficie del proyecto piloto obteniéndose una cartografía espacialmente explícita con una resolución espacial de 30 m (Figura 4).

Los resultados de validación de los cambios de pérdidas totales de cobertura muestran que a medida que el tamaño de la superficie de cambio aumenta disminuyen los errores. La exactitud del productor para los cambios de más de 1 ha fue del 90%, mientras que para los cambios de 0,2 a 1 ha se alcanzó una exactitud del 70%. Sin embargo, solamente el 20% de las zonas de cambio menores a 0,2 ha son detectadas correctamente. En cuanto al error de comisión, se determinó que había un 15% de cambios detectados que en realidad no eran.

A pesar de la baja exactitud para las áreas de cambio menores de 0,2 ha, es importante tener en cuenta que este tipo de propiedades no tienen una mayoría de representación en el total de propiedades forestales certificadas por PEFC España en la zona de estudio. De hecho, las fincas forestales certificadas menores de 0,2 ha representan el 38,12% del total de fincas registradas (Tabla 2). La metodología desarrollada alcanza unos resultados muy satisfactorios para las superficies mayores del 0,2 ha, las cuales representan más del 62% de las fincas certificadas de Galicia. Además, si consideramos el porcentaje que representan las fincas inscritas (menores de 0,2 ha) sobre el total de la superficie certificada, podemos observar que prácticamente tienen una representación insignificante inferior al 2% del total (

Tabla 3). En el 98% de la superficie certificada por PEFC España predominan las fincas mayores de 0,2 hectáreas, para las que se obtuvieron resultados más satisfactorios.

Tabla 2. Resultados de la validación interna en función del tamaño de superficie y número de registros según los datos de PEFC España en Galicia a 9 de junio de 2020.

Tamaño de las zonas de validación	Número de registros	Porcentaje de registros	Exactitud productor (%)
< 0,2 ha	34.144,00	38,12	20
0,2 – 1 ha	39.918,00	44,57	70
> 1ha	15.505,00	17,31	90
TOTAL	89.567,00	100,00	

Tabla 3. Resultados de la validación interna en función del tamaño de superficie y la superficie certificada según los datos de PEFC España en Galicia a 9 de junio de 2020.

Tamaño de las zonas de validación	Superficie (ha)	Porcentaje de registros	Exactitud productor (%)
< 0,2 ha	3.434, 60	1,75	20
0,2 – 1 ha	18.601,38	9,50	70
> 1ha	173.795,59	88,75	90
TOTAL	195.831,57	100,00	

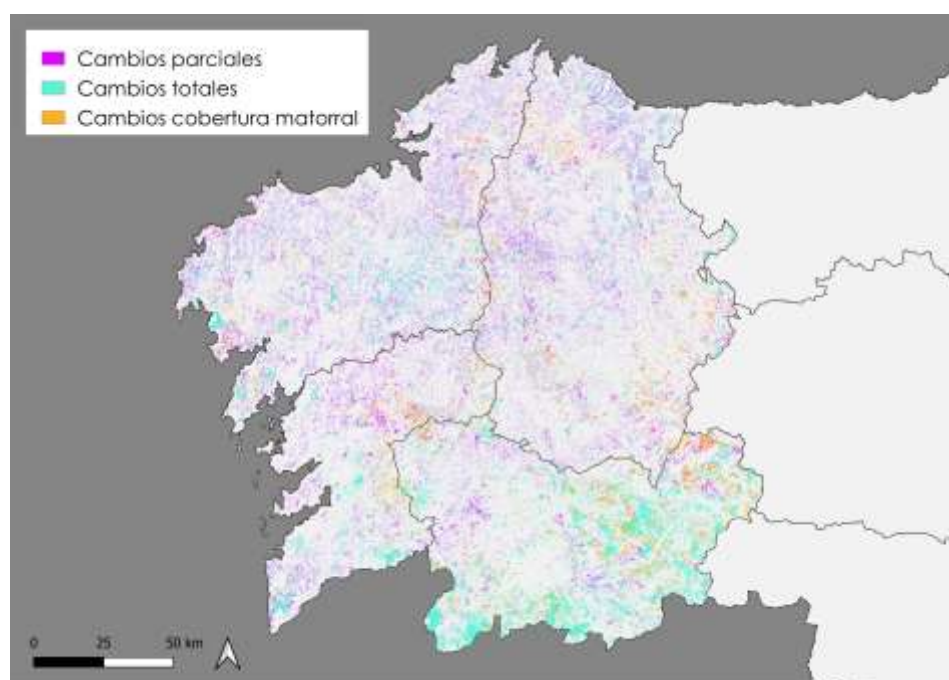


Figura 4. Cartografía de cambios obtenidos mediante técnicas de teledetección.

5. Discusión

A excepción de los resultados para las zonas más pequeñas, los valores de validación cumplen los requerimientos necesarios para la certificación PEFC, demostrando el potencial del uso de las series temporales de imágenes Landsat para la generación de cartografías de cambios. La

resolución espacial de las imágenes de este satélite (30 m) no es suficiente para detectar pequeños cambios tal y como se desprende de los resultados obtenidos. Además, la resolución temporal de los datos Landsat es de 16 días por lo que en condiciones óptimas de nubosidad en un mes es posible contar con dos observaciones consecutivas. El lanzamiento de nuevas misiones como la familia de constelaciones Sentinel-2 plantea nuevos retos y oportunidades en los que la puesta en uso de sus datos puede mejorar la exactitud de los resultados (Claverie et al., 2018). El satélite Sentinel-2 aumenta la resolución temporal, con una cadencia mínima de paso de 5 días en el Ecuador y una resolución espacial que varía entre los 10 y 20 m, dependiendo de la región espectral analizada, lo que contribuiría a capturar perturbaciones de menor tamaño. Además, ya existen proyectos de fusión de datos armonizados de los satélites Landsat y Sentinel-2 que proporcionan series temporales más densas (Claverie et al., 2018), esta constelación virtual supone un intervalo de revisita global promedio de 2,9 días (Li and Roy, 2017). La mayor densidad de datos mejora la caracterización de los cambios (Reiche et al., 2018), pero además supone una oportunidad de seguimiento en zonas, con mayor concurrencia de nubes como Galicia en las que la probabilidad de tener imágenes libres de nubes es menor. La integración de datos de distintos sensores para la creación de series temporales más densas ha creado un nuevo campo de investigación que se prevé que condicione el diseño de los futuros satélites para que sus características sean más fácilmente integrables con satélites en órbita (Wulder et al., 2019). Además, dado que la superficie terrestre está cambiando constantemente, las necesidades de disponer de información sobre dichos cambios hace necesario contar con información en tiempo real (Francini et al., 2020).

A pesar de los altos porcentajes de exactitud alcanzados, la escalabilidad de la metodología tal como se ha aplicado a nivel nacional no es posible dado el enorme volumen de datos de Landsat que se necesita y las exigencias de procesamiento que conlleva y sus costes derivados. Para la realización de este estudio, se han descargado más de 3 TB para el almacenamiento de los datos brutos de Landsat. Esta estimación se incrementa con el procesamiento de los datos a ingerir en el algoritmo BFAST. A medida que aumenta la cantidad de datos que hay que procesar y evaluar, es esencial utilizar un sistema basado en la ejecución de múltiples núcleos de computación en paralelo. Sin embargo, en el caso de áreas más grandes, la intensidad computacional asociada a la metodología podría llegar a ser prohibitiva, lo que haría necesario recurrir a plataformas basadas en la nube.

La metodología utilizada en este proyecto podría mejorarse utilizando nuevos servicios de computación en la nube, como Google Earth Engine o Copernicus DIAS. Estos servicios permiten el acceso directo en línea al archivo completo de datos de teledetección sin necesidad de descargar las imágenes al almacenamiento local fuera de línea. Además, el algoritmo de tendencias usado en este proyecto ya ha sido implementado posteriormente a la finalización de este trabajo en algunas plataformas en la nube como Google Earth Engine (Hamunyela et al., 2020). Por tanto, la selección de nuevas mejoras metodológicas en el futuro priorizará el uso de plataformas basadas en la nube. Los beneficios derivados del uso de esta plataforma impulsarían la mejora de la metodología desarrollada, haciéndola más asequible y sostenible a largo plazo.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio confirman la idoneidad de las series temporales Landsat y el algoritmo BFAST para la detección de cambios, siempre y cuando supongan un cambio

superior a 0,2 ha. El uso de la tecnología de teledetección permite generar cartografías de cambio y por tanto mejorar los procesos de auditoría para la certificación forestal, reduciendo los costes asociados a estos procesos. Sin embargo, la replicabilidad de la metodología desarrollada a escala nacional requeriría del uso de sistemas de computación en la nube.

7. Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por PEFC Internacional. Los autores de la presente comunicación agradecen su colaboración en el trabajo a la Xunta de Galicia, PEFC Galicia, a todas las entidades solicitantes y auditoras que trabajan con el sistema PEFC en Galicia y en especial a Enxeñería Forestal Asefor S.L. y a la Entidade Galega Solicitante da Certificación Forestal (EGS) por su contribución con parcelas de corta al proceso de validación del sistema. A Stéfano Arellano Pérez por sus aportaciones a la hora de buscar posibles fuentes a usar para la validación de zonas quemadas. A INCA Medio por su apoyo con la gestión de las referencias catastrales y el trabajo colaborativo desarrollado durante el proyecto y al resto de compañeros de Agresta y PEFC España que habiendo participado en el mismo no han podido contribuir a la redacción de la misma.

8. Bibliografía

BREIMAN, L., 2001. Random Forests. *Mach. Learn.* 45, 5–32.

CLAVERIE, M., JU, J., MASEK, J.G., DUNGAN, J.L., VERMOTE, E.F., ROGER, J., SKAKUN, S. V., JUSTICE, C., 2018. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sens. Environ.* 219, 145–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>

FRANCINI, S., MCROBERTS, R.E., GIANNETTI, F., MENCUCCI, M., MARCHETTI, M., SCARASCIA MUGNOZZA, G., CHIRICI, G., 2020. Near-real time forest change detection using PlanetScope imagery. *Eur. J. Remote Sens.* 53, 233–244. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1806734>

HAMUNYELA, E., ROSCA, S., MIRT, A., ENGLE, E., HEROLD, M., GIESEKE, F., VERBESSELT, J., 2020. Implementation of BFAST monitor Algorithm on Google Earth Engine to Support Large-Area and Sub-Annual Change Monitoring Using Earth Observation Data. *Remote Sens.* 12, 2953.

LI, J., ROY, D.P., 2017. A global analysis of Sentinel-2a, Sentinel-2b and Landsat-8 data revisit intervals and implications for terrestrial monitoring. *Remote Sens.* 9. <https://doi.org/10.3390/rs9090902>

LÜCK, W y VAN NIEKERK, A. 2016. Evaluation of a rule-based compositing technique for Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 47, Pages 1-14. ISSN 0303-2434, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.11.019>.

MCPFE, 1993. Segunda Conferencia Ministerial sobre la Protección de Bosques en Europa. Helsinki, Finland.

REICHE, J., HAMUNYELA, E., VERBESSELT, J., HOEKMAN, D., HEROLD, M., 2018. Improving near-real time deforestation monitoring in tropical dry forests by combining dense Sentinel-1 time series with Landsat and ALOS-2 PALSAR-2. *Remote Sens. Environ.* 204, 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.034>

REGOS, A. 2018. Cartografía de áreas queimadas en Galicia no século XXI: presentación do produto e aplicación web mapping. *Nova Acta Científica Compostelana*, Vol. 25: 45-53. <http://dx.doi.org/10.15304/nacc.25.5150>.

SHEPPARD, J.P., CHAMBERLAIN, J., AGÚNDEZ, D., BHATTACHARYA, P., CHIRWA, P.W., GONTCHAROV, A., SAGONA, W.C.J., SHEN, H. LONG, TADESSE, W., MUTKE, S., 2020. Sustainable Forest Management Beyond the Timber-Oriented Status Quo: Transitioning to Co-production of Timber and Non-wood Forest Products—a Global Perspective. *Curr. For. Reports* 6, 26–40. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00107-1>

VERBESSELT, J., HYNDMAN, R., NEWNHAM, G., CULVENOR, D., 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite images time series. *Remote Sens. Environ.* 114, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014>

VERBESSELT, J., ZEILEIS, A., HEROLD, M., 2012. Near real-time disturbance detection using satellite image time series: Drought detection in Somalia. *Remote Sens. Environ.* 123, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.022>

WOODCOCK, C.E., LOVELAND, T.R., HEROLD, M., BAUER, M.E., 2019. Transitioning from change detection to monitoring with remote sensing: A paradigm shift. *Remote Sens. Environ.* 111558. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111558>

WULDER, M.A., MASEK, J.G., COHEN, W.B., LOVELAND, T.R., WOODCOCK, C.E., 2012. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sens. Environ.* 122, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010>

WULDER, M.A., LOVELAND, T.R., DAVID P. ROY, CRAWFORD, C.J., MASEK, J.G., WOODCOCK, C.E., ALLEN, R.G., ANDERSON, M.C., BELWARD, A.S., COHEN, W.B., DWYER, J., ERB, A., GAO, F., GRIFFITHS, P., HELDER, D., HERMOSILLA, T., HIPPLE, J.D., HOSTERT, P., JOSEPH HUGHES, M., HUNTINGTON, J., JOHNSON, D.M., KENNEDY, R.E., KILIC, A., LI, Z., LYMBURNER, L., MCCORKEL, J., PAHLEVAN, N., SCAMBOS, T.A., SCHAAF, C., SCHOTT, J.R., SHENG, Y., STOREY, J., VERMOTE, E., VOGELMANN, J.E., WHITE, J.C., WYNNE, R.H., ZHU, Z., 2019. Current status of Landsat program , science , and applications. *Remote Sens. Environ.* 225, 127–147.