

Aplicación de series temporales de imágenes satélite a la detección de cambios en coberturas forestales en Asturias en el marco del Grupo Operativo Bosques 3.0

José Luis Tóme Morán¹,
Isabel González González¹,
Marta Salvador del Pozo²,
Marcos Barrio Anta³,
Carlos A. López Sánchez³,
Iyán Teijido-Murias³,
Jessica Esteban Cava¹

¹ AGRESTA, Sociedad Cooperativa

² PEFC, España

³ Grupo de investigación SMartForest, Departamento de Biología de Organismos y Sistemas, Universidad de Oviedo.

La certificación forestal PEFC es un instrumento básico para garantizar una gestión forestal sostenible a través del cumplimiento de los estándares establecidos. Sin embargo, los costes asociados al sistema de auditorías garante de la norma pueden llegar a ser un limitante para que los propietarios privados puedan acceder a esta certificación.

El Grupo Operativo BOSQUES 3.0. Digitalización y teledetección del uso sostenible, biodiversidad y resiliencia de los bosques españoles, tiene por objeto la creación de nuevas herramientas digitales y su puesta en valor para los usuarios de PEFC España. La teledetección es una de las herramientas más prometedoras para la monitorización de cambios en el territorio certificado contribuyendo al sistema de muestreo de auditorías internas y externas. Este artículo presenta cómo se está abordando la necesidad de implementar un sistema de computación en la nube para monitorización de cambios económicamente sostenible para la norma y los primeros resultados del mismo en la zona piloto de Asturias.

INTRODUCCIÓN

PEFC España es una entidad sin ánimo de lucro que tiene como objetivo promover la gestión sostenible de los recursos forestales y sus productos en el territorio español a través de

la certificación forestal PEFC.

El sistema establece un mecanismo de realización de auditorías internas y externas anuales para todos los certificados, incluyendo una componente de auditoría en el terreno que se

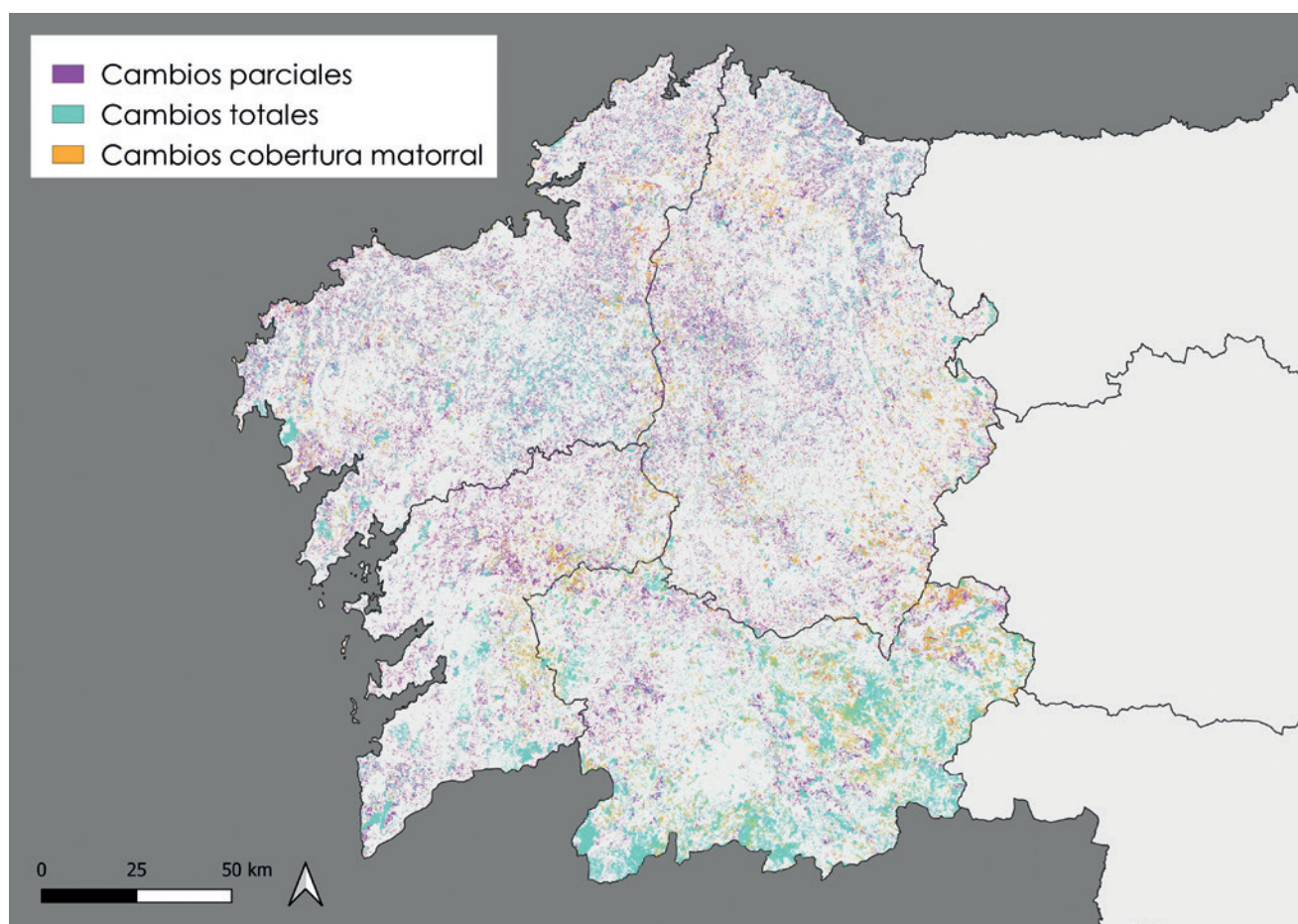


Figura 1. Cartografía de cambios obtenidos mediante técnicas de teledetección en el marco proyecto piloto financiado por PEFC Internacional

lleva a cabo siguiendo una metodología de muestreo. La auditoría interna se realiza por la entidad coordinadora del certificado para supervisar y dar seguimiento a los bosques asociados a dicho certificado. La auditoría externa, por su parte, es realizada por una entidad de certificación acreditada, encargada de vigilar y garantizar el cumplimiento de los criterios e indicadores establecidos en la norma UNE 162.002 y en el Sistema Español de Certificación Forestal reconocido por PEFC Internacional.

El diseño de estos muestreos es francamente complejo debido fundamentalmente a la fragmentación de la propiedad en España, especialmente en la cornisa cantábrica y en concreto en la provincia de Asturias. Por lo tanto, resulta imperativo proporcionar a los usuarios de la certificación forestal, como entidades coordinadoras de los certificados, propietarios y gestores de superficies forestales y entidades de certificación, información concreta y actualizada acerca de las parcelas certificadas. Esto contri-

buirá a incrementar la eficiencia de los controles y auditorías al dirigirlos hacia áreas donde se hayan producido cambios en la cubierta forestal.

PEFC España y Agresta llevan tiempo explorando la posibilidad de usar la teledetección como parte del muestreo en sus sistemas de auditoría. En ese sentido, y usando como zona piloto Galicia, desarrollaron el proyecto piloto de “Fomento de la certificación agrupada en Gestión Forestal PEFC mediante el uso de tecnologías de teledetección”, financiado por PEFC Internacional en la convocatoria: “PEFC Collaboration Fund competition - 2018”. El objetivo del proyecto desarrollado entre 2018 y 2020 fue comprobar la capacidad de mejora de las auditorías internas y externas de gestión forestal mediante la detección automática de cambios en coberturas forestales a través de técnicas de teledetección y así focalizar las auditorías *in situ* a dichos lugares.

Los resultados del proyecto fueron muy prometedores, confirmando la idoneidad del uso de imágenes sate-

lites para la monitorización de cambios en zonas tan dinámicas como Galicia, detectando los cambios en coberturas forestales para superficies mayores de 1 ha, con precisiones superiores al 90 %. Estas precisiones bajaban al 70 % cuando la superficie del cambio se encontraba entre 0,2 y 1 ha, y ya disminuyendo bruscamente al 20 % para superficies por debajo de 0,2 ha (Esteban *et al.*, 2022).

Sin embargo, y a pesar de su capacidad para generar cartografías de detección de cambios en coberturas forestales de cara a la mejora de los procesos de auditoría, los altos costes asociados al procesamiento del gran volumen de datos satelitales necesarios para aplicar la metodología, la hacían económicamente inviable para los actores de la cadena de valor. Por lo tanto, los costes de mantenimiento y escalabilidad a nivel nacional iban a suponer una limitación para su incorporación operativa al sistema de auditorías de PEFC España.

Para superar dichas dificultades, los socios del proyecto tomaron con-

ciencia de la importancia de buscar oportunidades alternativas para implementar un sistema basado en los resultados metodológicos obtenidos, pero que a su vez fuera económicamente sostenible. Con ese objetivo se presenta el Grupo Operativo BOSQUES 3.0. Digitalización y teledetección del uso sostenible, biodiversidad y resiliencia de los bosques españoles, que tras concurrencia competitiva está siendo financiado por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER). Un grupo liderado por PEFC España formado por miembros tecnológicos como la propia Agresta, la Universidad de Oviedo e INCA Ingeniería del Medio S. L., entidades coordinadoras de certificados grupales como PRADIFIR, ARACERT y Entidad Gallega de Certificación Forestal y otros usuarios interesados como el Principado de Asturias y ENCE. El objetivo 2 del proyecto consiste en desarrollar un sistema de identificación de cambios en la cobertura vegetal mediante técnicas de teledetección para mejorar la resiliencia, biodiversidad y uso sostenible de los bosques. Para ello ha sido necesario explorar el uso de plataformas de computación en la nube para superar las dificultades relacionadas con el almacenamiento y procesamiento de datos, así como para implementar métodos de detección de cambios más sofisticados

basados en la inteligencia artificial. El proyecto, iniciado en enero de 2023, se llevará a cabo durante algo más de dos años, implementando una cadena de procesamiento de imágenes satelitales en la nube capaz de generar mapas de cambios a escala nacional testados en las tres áreas piloto seleccionadas Asturias, Huesca y Sevilla, representativas de distintos sistemas forestales nacionales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Desde el punto de vista técnico hay dos retos tecnológicos fundamentales a los que nos enfrentamos para desarrollar un sistema de detección de cambios basado en coberturas forestales basado en teledetección: (i) ser capaz de desarrollar algoritmos de detección de cambios basado en tecnologías *cloud computing* que permitan escalar el proyecto a nivel nacional y (ii) ser capaz de hacerlo con un coste que pueda ser absorbido por los usuarios actuales del sistema PEFC.

Este segundo factor condiciona mucho las tecnologías disponibles para poder abordar el reto establecido, habiendo sido necesario realizar una exploración previa de las principales tecnologías disponibles y sus costes asociados.

En la actualidad, numerosas empresas han adoptado modelos de ne-

gocio innovadores que se centran en la provisión de servicios de procesamiento en la nube escalables en función de las distintas demandas de las organizaciones. Estos modelos permiten a las empresas aprovechar recursos informáticos de alto rendimiento a medida que los necesitan, sin incurrir en los costes asociados derivados de la adquisición y el mantenimiento de infraestructuras de hardware propias. En lugar de depender de una capacidad fija de procesamiento, las empresas pueden acceder a recursos en la nube de manera elástica, lo que les brinda la flexibilidad necesaria para adaptarse a las fluctuaciones en la demanda de procesamiento.

Algunos de los ejemplos más destacados de procesamiento en la nube son empresas como Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure o Google Cloud Platform (GCP). Aunque estos sistemas de *cloud computing* son escalables, el modelo de negocio asociado a su uso debe ser capaz de hacer frente a los costes derivados del procesamiento a gran escala. A modo de ejemplo, solamente para la zona piloto de la provincia de Asturias nos enfrentamos al procesamiento de un gran volumen de imágenes, aproximadamente 2150 escenas Landsat capturadas entre el periodo 1997 y 2022. Esto supone unos costes asociados que descartan este

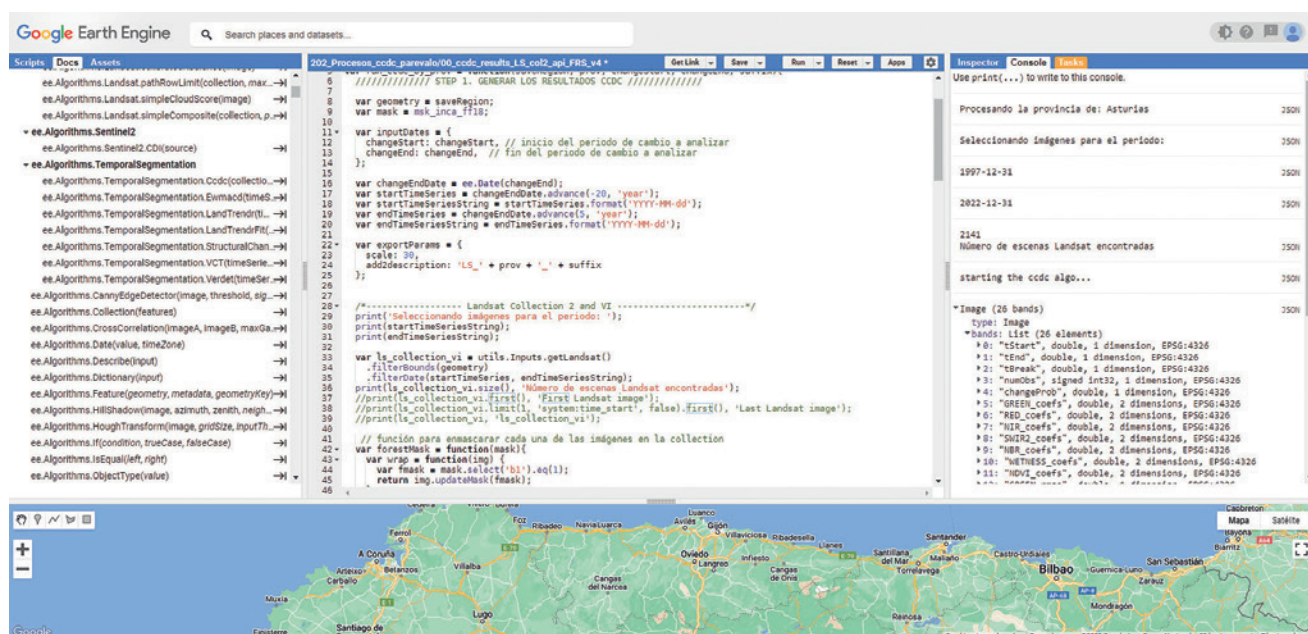


Figura 2. Entorno de desarrollo integrado (IDE) de GEE

tipo de soluciones para los usuarios del sistema PEFC, que sin embargo pueden suponer una alternativa muy interesante desde el punto de vista técnico cuando el modelo de negocio pueda soportarlos.

Tras analizar las soluciones de procesamiento en la nube de las principales empresas del mercado, nos decantamos por trabajar directamente en la Plataforma de Google Earth Engine (GEE) (Gorelick *et al.*, 2017). GEE es una plataforma en la nube creada para realizar análisis y visualización de datos geoespaciales a escala planetaria, que aprovecha la enorme capacidad de computación de Google para abordar una variedad de cuestiones sociales de alto impacto. La plataforma cuenta con un vasto repositorio de datos geoespaciales abiertos en continuo crecimiento y con un servicio de computación de alto rendimiento. Entre los conjuntos de datos disponibles encontramos, entre otros, datos climáticos, socioeconómicos, topográficos y catálogos de datos satelitales entre los que destacan las colecciones de imágenes de libre acceso de las principales constelaciones de media resolución espacial, como la americana Landsat y la europea Sentinel. El acceso a este entorno por parte de los usuarios se lleva a cabo mediante una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) basada en JavaScript y Python a través de servicios web que contiene un entorno de desarrollo interactivo (IDE) que permite la rápida creación de aplicaciones y visualización de resultados. GEE integra una amplia gama de herramientas, funciones y algoritmos que nos permiten analizar series temporales de imágenes de satélite u obtener estadísticas espaciales, entre otras (Figura 2).

Las principales ventajas que han motivado la selección de este entorno de desarrollo integrado (IDE) son las siguientes: (i) permite a los usuarios procesar, analizar y visualizar grandes cantidades de datos geoespaciales de forma rápida y eficiente; (ii) es gratuito para las organizaciones sin ánimo de lucro como PEF España; y (iii) el objetivo del proyecto es obtener datos semestrales, los cuales no necesariamente deben estar disponibles

Tabla 1. Comparativa de algoritmos de detección de cambios en coberturas vegetales analizados

Algoritmo	Ventajas	Inconvenientes
LandTrendR	Estimaciones precisas de las tendencias y los cambios de cobertura. Capaz de detectar cambios sutiles, graduales y abruptos.	Requiere de gran cantidad de datos de imágenes satelitales para proporcionar resultados precisos. Trabaja con cambios anuales.
BFAST	Robusto frente a la presencia de "ruido". Detecta fecha e intensidad del cambio. Cambios por periodos menores al año.	Limitaciones para trabajar con cambios sutiles. Parametrización compleja. Implementación en GEE compleja. Requiere serie histórica larga. Tiempos de procesados largos.
CCDC	Capaz de detectar cambios abruptos. Detecta fecha e intensidad del cambio. Parametrización sencilla. Cambios por periodos menores al año. Para encontrar diversos tipos de cambios en la cobertura del suelo, utiliza varios índices/bandas espectrales.	Efectividad moderada en cambios sutiles. Requiere serie histórica larga. Tiempos de procesados largos.
3I3D	Creado para vegetación mediterránea. Implementado para Sentinel-2. Rapidez de procesado, emplea 3 imágenes.	No detecta cambios en tiempo real. Solo testado con cambios abruptos.

en tiempo real. Por lo tanto, el tiempo de procesamiento no constituye una limitación en este contexto.

Por otro lado, el principal inconveniente de esta plataforma frente a otras plataformas de procesamiento en la nube es que presenta una limitación en cuanto a la capacidad de procesamiento, la cual depende del tipo de cuenta de usuario utilizada. Los recursos que se ponen a servicio del cliente son finitos, aunque suficientes para trabajar a escala provincial en España, incluso con la cuenta de usuario gratuita.

Una vez seleccionado GEE como entorno de trabajo (IDE), ha sido necesario adaptarse a la disponibilidad de algoritmos de detección de cambios en coberturas forestales a partir de series temporales de imágenes satelitales en el citado entorno. El proceso comienza con la selección de imágenes Landsat de la colección 2, las cuales ya han sido sometidas a correcciones geométricas radiométricas, atmosféricas y topográficas para proporcionar valores de reflectividad de superficies. Una vez enmascara-

dos los píxeles correspondientes a nubes y proyección de sombras calculamos, para cada una de las imágenes de la serie temporal, una serie de índices espectrales (NBR, WETNESS y NDVI) que ayudarán a mejorar los análisis posteriores ya que ponen en realce determinada información espectral contenida en las bandas espectrales originales de la imagen.

Generadas estas series temporales a partir de índices espectrales se han analizado y comparado los principales algoritmos de detección de cambios en coberturas vegetales disponibles en GEE (tabla1); siendo el *Continuous Change Detection and Classification* (CCDC) (Zhu *et al.*, 2014) el más adecuado para nuestros fines por su capacidad para detectar cambios bajo cualquier frecuencia temporal y su facilidad de implementación en GEE. Además, según los primeros ensayos realizados, se observa que el CCDC ofrece los mejores resultados, considerando el equilibrio entre la calidad de los resultados y el coste de procesamiento en la nube.

En cuanto al funcionamiento del

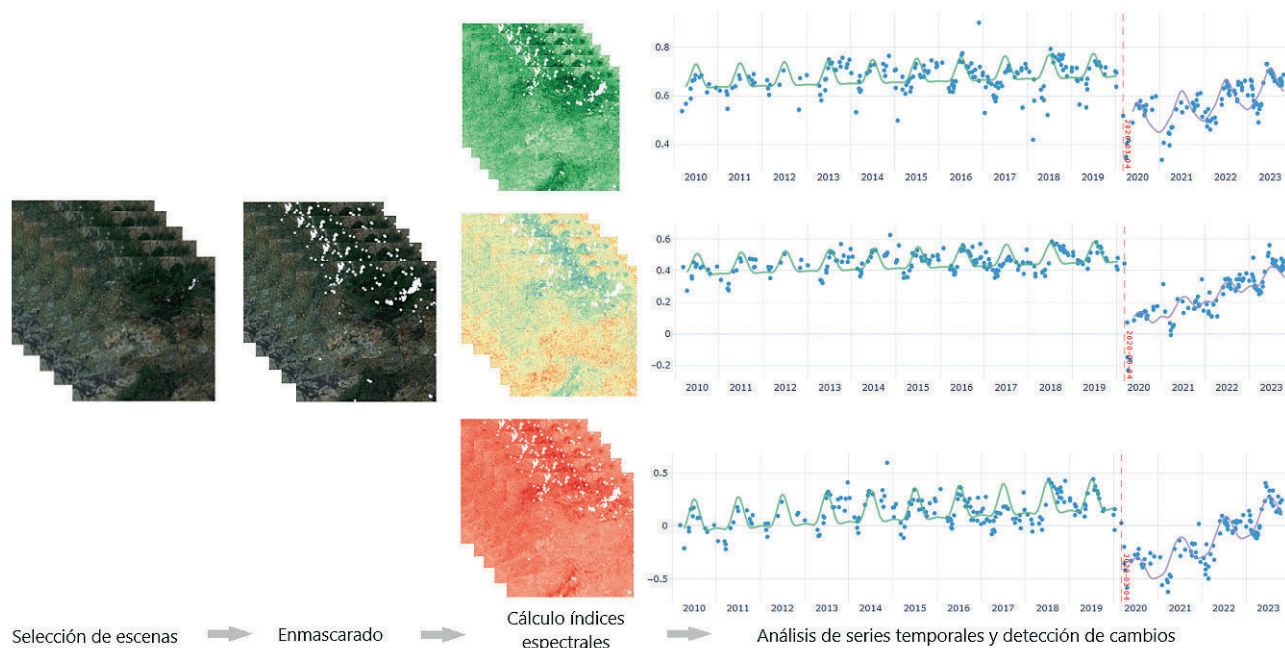


Figura 3. Esquema de funcionamiento del algoritmo CCDC

algoritmo CCDC, utiliza una serie temporal de imágenes, ya pertenezcan a la constelación Landsat o Sentinel, para iniciar el ajuste de las observaciones y crear el modelo. El algoritmo requiere de al menos 15 observaciones sin nubes para su funcionamiento. Las primeras doce observaciones sin nubes contribuyen a una estimación robusta y precisa del modelo, mientras que las tres últimas observaciones se utilizan para determinar si han existido cambios en los píxeles afectados; por lo tanto, tres observaciones son suficientes para que el modelo de series

temporales pueda detectar los cambios en las coberturas vegetales de la superficie terrestre.

Para probar el funcionamiento del algoritmo CCDC en la zona piloto de la provincia de Asturias se ensamblaron dos conjuntos de resultados de detección de cambios. Por un lado, las pérdidas detectadas a lo largo de 2019 y, por otro, todas las pérdidas detectadas por el algoritmo en el periodo 2018-2022.

Para validar las pérdidas de cobertura detectadas en 2019 se utilizó la base de datos correspondiente a

los perímetros de incendios forestales proporcionada por el Principado de Asturias, prestando especial atención a aquellos incendios que habiendo ocurrido en 2019 han sido también identificados por el Sistema EFFIS (European Forest Fire Information System). En este caso, hemos contrastado los perímetros de los incendios con un ensamblado anual de los resultados del CCDC, ya que tenemos una doble certeza de que estos cambios debido a incendios forestales se han producido efectivamente en 2019.

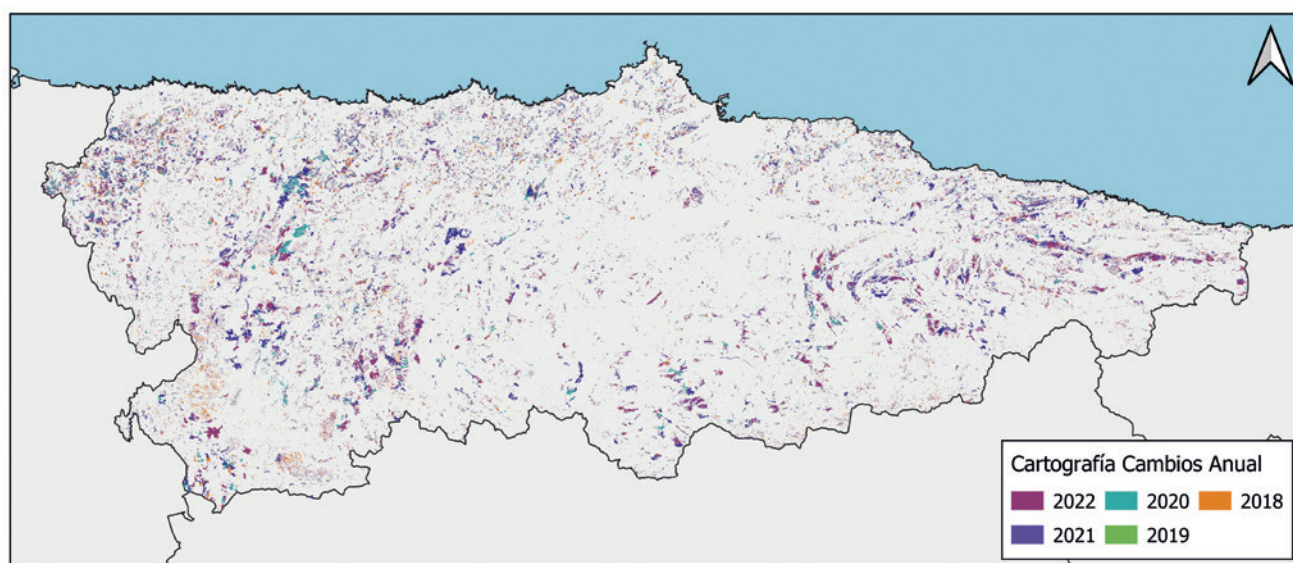


Figura 4. Cartografía de detección de cambios en coberturas forestales obtenidas mediante el algoritmo CCDC 2018-2022 en Asturias

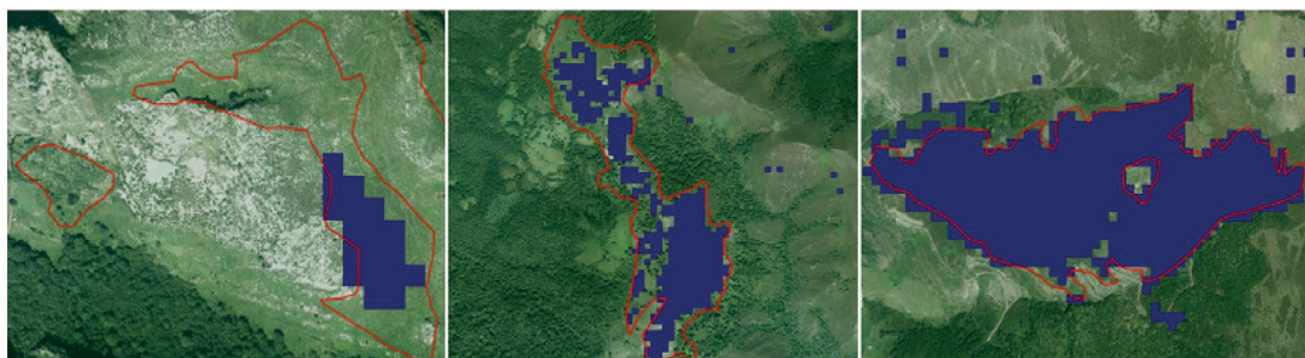


Figura 5. Ratio de detección de izquierda a derecha: 0,2, 0,5 y 0,96. Superficie afectada de izquierda a derecha según la base de datos: 6,6 ha, 64,6 ha y 53 ha.

Para validar las pérdidas de cobertura detectadas entre 2018 y 2022 se empleó una base de datos geoespacial en formato vectorial proporcionada por el Servicio de Montes del Principado de Asturias y revisada por la Universidad de Oviedo. Esta base de datos contiene polígonos correspondientes a expedientes que fueron autorizados administrativamente entre 2015 y 2022, y que están relacionados con actividades de cortas, claras y roturaciones. Dado que la aprobación administrativa de un expediente no garantiza que llegara finalmente a ejecutarse, fue necesario depurar esta base de datos verificando los realmente ejecutados mediante fotointerpretación de los expedientes autorizados en 2018 empleando imágenes de alta resolución espacial correspondientes al Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) y a Google Earth. Cabe destacar que únicamente fueron considerados como “verdad-terreno” aquellos polígonos en los que se pudieron identificar cambios entre 2018 y 2022.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado principal se generaron las cartografías de detección de cambios en coberturas forestales para 2019 y el periodo 2018-2022 (figura 4).

Desde el punto de vista de la capacidad de cómputo, GEE ha sido capaz de obtener estas cartografías de detección de cambios mediante el algoritmo CCDC a nivel provincial. Los primeros resultados en Asturias muestran que las cartografías de detección de cambios anuales pueden obtenerse con tiempos de procesamiento de entre 0,5 y 1 hora, mientras que

provincias de mayor tamaño como Cáceres pueden llegar a tardar hasta 5 horas. Sin embargo, teniendo en cuenta que pueden ejecutarse dos productos en paralelo, los tiempos de procesamiento para trabajar a escala nacional pueden situarse entre las 19 y 24 horas, garantizándonos una metodología válida para abordar el trabajo a escala nacional.

Validación del ensamblado de la detección de cambios para el año 2019

Para evaluar este primer producto se emplearon 201 polígonos que presentan los perímetros aproximados de incendios forestales ocurridos en 2019. En el caso de los incendios de pastos, que fueron las zonas mayormente afectadas en 2019, hemos detectado una rápida recuperación de parte de la zona quemada, que supone una diferencia entre los polígonos de superficie quemada y la superficie de detección del cambio. Para evaluar la tasa de éxito en la detección de cambios hemos establecido el concepto de ratio de detección de cambios. Esta ratio está definida como la relación entre la superficie detectada como cambio y la superficie total del polígono de la base de datos. Tras revisar visualmente los cambios detectados por fotointerpretación hemos establecido que las detecciones son

válidas si la ratio es superior a 0.4. En cualquier caso, este aspecto necesitará un análisis en mayor profundidad, ya que se ha observado variabilidad en la detección en función de la cobertura afectada y de la severidad del incendio, pudiendo ser necesario ajustar a futuro esta ratio. La figura 5 muestra 3 incendios con distinta ratio de detección en zonas de pastizal.

Teniendo en cuenta esta ratio, el porcentaje de éxito de las parcelas analizadas en la base de datos de incendios de 2019 es del 69,15 % (tabla 2)

Validación del ensamblado de la detección de cambios para el periodo 2018-2022

Para validar este producto se emplearon 241 polígonos en donde, mediante fotointerpretación, se había verificado que las cortas, claras o roturaciones autorizadas en 2018 se habían llevado a cabo entre los años 2018 y 2022. Los polígonos de las autorizaciones delimitan la zona donde teóricamente se debería haber producido el cambio, no obstante, no en todos los casos la pérdida de vegetación afecta a la totalidad del polígono. En la figura 6 se muestra en naranja un ejemplo de cambio parcial detectado con el algoritmo CCDC que discrepa con el polígono del expediente autorizado.

Para compensar esta situación y así poder determinar si los cambios

Tabla 2. Porcentaje de éxito en la detección de cambios producidos por incendios forestales.

Ensamblado para el año 2019 (índices espectrales: NDVI, NBR, WETNESS)			
Ratio	Nº detecciones	Nº de polígonos en la BBDD	Porcentaje de éxito en la detección
0.4	139	201	69.15



Figura 6. Izq.: Imagen antes del cambio PNOA 2017. Centro: Imagen después del cambio PNOA 2020. Dcha.: Corta parcial detectada por el algoritmo CCDC después del cambio.

han sido o no detectadas por el algoritmo hemos establecido un umbral asociado a la ratio de detección igual a 0.4, lo que nos da una tasa de éxito de 87,14 % (tabla 3) para los 241 polígonos analizados. Se estableció el mismo umbral que para el caso de los incendios forestales tras verificar su validez comparando el cambio detectado por algoritmo CCDC con los cambios observados en los polígonos de la base de datos del Principado de Asturias mediante fotointerpretación.

A modo de resumen, destacar que ambos resultados son prometedores ya que el porcentaje de acierto en la detección de cambios derivados de cortas, claras, roturaciones e incendios forestales es superior al 77 %. Sin embargo, seguimos trabajando fundamentalmente en tres líneas de mejora en el proyecto: (i) en la depuración de los resultados obtenidos estableciendo diferentes umbrales de intensidad de la detección de cambio para cada uno de los índices espectrales ensayados, de cara a disminuir el número de falsos positivos; (ii) intensificación del proceso de validación para poder evaluar tanto los cambios como los no cambios a partir de bases de datos externas; y (iii), desarrollo de un sistema de clasificación correspondiente al tipo de cambio con el fin de distinguir entre pérdidas de vegetación provocadas por cortas, claras, desbroces e incendios forestales.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos hasta la publicación del presente artículo confirman la hipótesis de que es posible desarrollar un sistema de bajo

Tabla 3. Porcentaje de éxito en la detección de cambios producidos por cortas, claras y roturaciones.

Ensamblado para el periodo del 2018 - 2022 (índices espectrales: NDVI, NBR, WETNESS)		
Nº detecciones Ratio ≥ 0.4	Nº de polígonos en la BBDD	Porcentaje de éxito en la detección
203	241	87.14

coste basado implementado en el entorno de desarrollo (IDE) de GEE, que permita trabajar a escala nacional en la detección de cambios sin incrementar sustancialmente los costes del proceso de certificación forestal PEFC.

Estas cartografías de detección de cambios en coberturas forestales tienen aplicación directa como parte del sistema de muestreo de la superficie certificada aplicable en auditorías internas y externas de la misma, pero además pueden tener múltiples aplicaciones para monitorización continua de los bosques.

Los primeros resultados obtenidos muestran que el algoritmo de detección de cambios CCDC presenta unos porcentajes de éxito por encima del 77 % frente a casos reales para distintos tipos de cambios de coberturas forestales en la provincia de Asturias, siendo necesario profundizar en el estudio de su funcionamiento en el resto de sistemas forestales nacionales para garantizar que la metodología aquí desarrollada es exportable a todo el territorio nacional.

AGRADECIMIENTOS

Desde el equipo redactor de este artículo queremos dar las gracias a los técnicos de Google AI for Nature and Society por su apoyo técnico en

la búsqueda de soluciones en Cloud óptimas para el desarrollo de la algoritmia necesaria para este proyecto.

Los autores quieren asimismo agradecer el apoyo financiero recibido para la realización de este trabajo al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación a través del programa de proyectos de Innovación para Grupos Operativos. El grupo operativo “Bosques 3.0” va a recibir para el desarrollo de innovación una subvención de 352 139,20 euros. El importe del proyecto es cofinanciado al 80 % por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) “Europa invierte en las zonas rurales” y al 20 % por fondos de la Administración General del Estado (AGE).

BIBLIOGRAFÍA

- Esteban, J.; Tomé, J.L.; García, D.; Salvador, M.; Oleaga, A. (2022). Aplicación de la teledetección a la certificación Forestal en Galicia. 8º Congreso Nacional Forestal Español. Lleida.
- Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote. Sens. Environ.* 2017, 202, 18–27
- Zhu, Z.; Woodcock, C.E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sens. Environ.* 2014, 144, 152–171.