



universidad  
de león

**ESCUELA DE INGENIERÍA AGRARIA Y FORESTAL**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOINFORMÁTICA PARA LA GESTIÓN  
DE RECURSOS NATURALES**

**VARIABILIDAD ESPACIOTEMPORAL DE LA COBERTURA FORESTAL A  
PARTIR DE HERRAMIENTAS INTERACTIVAS Y TELEDETECCIÓN**

***SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF FOREST COVER FROM INTERACTIVE  
TOOLS AND REMOTE SENSING***

Estefanía Navarro Monterroza

Tutor: Ramón Álvarez Esteban

Cotutor: Alfredo Fernández Landa

Ponferrada, Septiembre de 2022

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	2
2. OBJETIVOS .....	6
2.1. Objetivo general .....	6
2.2. Objetivos específicos .....	7
3. MATERIAL Y METODOLOGÍA .....	7
3.1. Área de estudio .....	7
3.2. Datos .....	9
3.2.1. Datos satelitales – GFC .....	9
3.2.2. Datos de GFC para la implementación de la herramienta interactiva .....	11
3.2.3. Datos auxiliares .....	12
3.3. Software .....	12
3.3.1. R .....	12
3.3.2. ArcGis .....	13
3.4. Metodología .....	13
3.4.1. Personalización de la zona de estudio .....	13
3.4.2. Descarga de datos de GFC .....	14
3.4.3. Procesamiento de los datos de GFC .....	15
3.4.4. Aplicación Shiny .....	17
4. RESULTADOS .....	18
4.1. Variabilidad espaciotemporal de la deforestación en el PNN Tinigua .....	19
4.2. Variabilidad espaciotemporal de la deforestación en el PNN Los Picachos .....	23
4.3. Comparación con otras aplicaciones de monitoreo de cambios de la cobertura forestal .....	26
4.3.1. Global Forest Watch (GFW) .....	26
4.3.2. EarthMap .....	27

4.4. Comparación de los datos de pérdida de cobertura arbórea de los PNN Tinigua y Los Picachos con los de la plataforma EarthMap .....	29
5. DISCUSIÓN .....	30
5.1. Desarrollo de la herramienta.....	30
5.2. Aplicación de la herramienta .....	31
6. CONCLUSIONES .....	33
7. BIBLIOGRAFÍA .....	35
ANEXOS 1 – 7. Enlace del repositorio de Bitbucket con los Anexos del 1 – 7 .....	40
ANEXO 8. Muestras de los datos descargables de GFC.....	41

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de algunos de los sensores usados históricamente para el análisis de la cobertura forestal a nivel regional y global.....	6
Tabla 2. Bandas empleadas por la aplicación GFC para determinar la pérdida de bosque .....	10
Tabla 3. Ficheros en formato ráster que se descargan de manera automática del sitio web de GFC .....	12
Tabla 4. Funciones creadas en el desarrollo de la herramienta para el análisis de la variabilidad espaciotemporal de la pérdida de bosque.....	17
Tabla 5. Scripts generados en la elaboración de la herramienta para el análisis de la variabilidad espaciotemporal de la cobertura forestal.....	19
Tabla 6. Área total, media y máxima deforestada en el PNN Tinigua en el período 2001-2019	20
Tabla 7. Área total, media y máxima deforestada en el PNN Los Picachos en el período 2001-2019.....	23
Tabla 8. Comparación de las características de las plataformas GFW, EarthMap y la herramienta elaborada .....	28
Tabla 9. Área total deforestada anual de los PNN Los Picachos y Tinigua obtenida de la plataforma EarthMap y a partir de la herramienta creada.....	29

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Áreas definidas para el entrenamiento piloto de la herramienta.....	8
Figura 2. Representación del año de pérdida de bosque descargada de la aplicación GFC en formato raster para el período 2001 – 2019 .....	11
Figura 3. Diagrama de trabajo para calcular la pérdida de bosque anual. En amarillo, la asignación del espacio de trabajo; en negro, la creación de la zona de estudio; en azul, la descarga de datos de GFC; y en verde, el procesamiento de los datos .....	18
Figura 4. Variabilidad anual de la deforestación total en el PNN Tinigua .....	20
Figura 5. Comparación de los escenarios de deforestación en el PNN Tinigua para los años 2003 y 2018.....	21
Figura 6. Visualización en leaflet de la variabilidad espaciotemporal de la deforestación en el PNN Tinigua en el período 2001-2019 .....	22
Figura 7. Acercamiento a una de las zonas internas del PNN Tinigua con mayor deforestación reciente .....	22
Figura 8. Acercamiento de la Figura 6 con filtro aplicado de 50 ha .....	22
Figura 9. Variabilidad anual de la deforestación total en el PNN Los Picachos.....	24
Figura 10. Comparación de los escenarios de deforestación en el PNN Los Picachos para los años 2003 y 2018.....	24
Figura 11. Visualización en leaflet de la variabilidad espaciotemporal de la deforestación en el PNN Los Picachos en el período 2001-2019.....	25
Figura 12. Acercamiento a una de las zonas internas del PNN Los Picachos .....	25
Figura 13. Acercamiento de la Figura 12 con filtro aplicado de 25 ha .....	26
Figura 14. Visualización de los datos de pérdida de cobertura arbórea para un polígono personalizado en la plataforma de GFW .....	26
Figura 15. Visualización de los datos de pérdida de cobertura arbórea en la plataforma de EarthMap para una región definida .....	28

## RESUMEN

Con el objeto de estudiar la variabilidad espaciotemporal de la cobertura forestal en un área global personalizada, se desarrolló la herramienta interactiva que facilita la descarga de los datos en formato ráster de pérdida de bosque disponibles en la plataforma Global Forest Change (GFC) en el período 2001 – 2019 a partir de un polígono definido. Asimismo, la herramienta procesa los datos a través de funciones para la creación de tablas, la elaboración de diagramas y la representación cartográfica de la información. Esta herramienta de libre acceso permite al usuario personalizar variables como la zona de estudio, la proporción de cobertura arbórea de acuerdo con el tipo de bosque evaluado y el panel comparativo de dos o más años de deforestación a partir de la definición de las entradas de las funciones.

Los resultados de este trabajo muestran la utilidad de implementar herramientas de visualización de los escenarios de la deforestación en cualquier área de interés a nivel global a partir de datos adquiridos por teledetección y mediante el uso de softwares libres. En este caso, se implementaron algunas librerías, entre las que están *gfcanalysis* y *leaflet* que permitieron analizar los datos de GFC y desarrollar un panel dinámico con elementos que pueden ser manipulados por el usuario, respectivamente. Además, el carácter de libre acceso del código permite que cualquier usuario lo modifique y aplique las mejoras requeridas.

Con el fin de comprobar la eficacia de la herramienta, se ejecutaron los códigos teniendo en cuenta dos polígonos correspondientes a los Parque Nacionales Naturales (PNN) Tinigua y Los Picachos ubicados en la Amazonía colombiana. Los resultados obtenidos comprueban la crisis de los bosques en algunas áreas protegidas del país, dadas las vastas áreas deforestadas, especialmente en el año 2018. Asimismo, estos resultados aportan mecanismos para la formulación de estrategias de conservación de los bosques.

**Palabras clave:** variabilidad espaciotemporal, herramienta interactiva, bosque, Global Forest Change, deforestación, teledetección.

## ABSTRACT

To study the spatiotemporal variability of forest cover in a customized global area, the interactive tool is developed that facilitates the download of data in raster format of forest loss available on the Global Forest Change (GFC) platform in the period 2001 – 2019 based on defined polygon. Likewise, the tool processes the data through functions for the creation of tables, the elaboration of diagrams and the cartographic representation of the information. This

freely accessible tool allows the user to customize variables such as the study area, the proportion of tree cover according to the type of forest evaluated and the comparative panel of two or more years of deforestation based on the definition of the entries of the functions.

The results of this work show the usefulness of implementing tools for visualizing deforestation scenarios in any area of interest at a global level based on data acquired by remote sensing and through the use of free software. In this case, some libraries were implemented, such as *gfcanalysis* and *leaflet* that allowed to analyze the GFC data and develop a dynamic panel with elements that can be manipulated by the user, respectively. In addition, the freely accessible nature of the code allows any user to modify it and apply the required improvements.

In order to verify the effectiveness of the tool, the codes were executed taking into account two polygons corresponding to the Tinigua and Los Picachos National Natural Parks (PNN) located in the Colombian Amazon. The results obtained prove the crisis of the forests in some protected areas of the country, given the vast deforested areas, especially in 2018. These results also provide mechanisms for the formulation of forest conservation strategies.

**Keywords:** spatiotemporal variability, interactive tool, forest, Global Forest Change, deforestation, remote sensing.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los bosques y los ecosistemas asociados brindan servicios ecosistémicos a escala regional y global, abarcando desde la provisión de materiales esenciales para la supervivencia de las especies hasta la regulación del ciclo hidrológico (Potapov *et al.*, 2008). En 2015 la cobertura forestal a nivel mundial era de 4.000 millones de hectáreas, de las cuales un 44% se encuentra en los países tropicales, 8% en los subtropicales, 26% en los países templados y 22% en la zona boreal, aunque la franja tropical tiene la mayor proporción de bosque, según Keenan *et al.* (2015), en esta zona se produjo la mayor pérdida de cobertura forestal con un 10% del total de los bosques en el período de 1990 a 2015. Geist y Lambin (2002) afirman que la deforestación en el trópico es una de las principales causas del cambio ambiental del planeta, influenciada por causas globales como el desarrollo de la economía de mercado y la expansión de tierras agrícolas, y por causas regionales como los modos distintos de expansión agrícola local y la infraestructura.

Dado el papel trascendental de los bosques para la conservación de la vida en la Tierra, asimismo ante las dinámicas complejas de orden político y económico que los afectan, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) realizó las

primeras evaluaciones periódicas globales del estado de los bosques desde el año 1948 hasta 1963 con una frecuencia quinquenal, luego lanzó una serie en 1980 limitada a los trópicos, y a partir de 1990 la evaluación ha tenido una cobertura global basada en la difusión de datos nacionales presentados por los gobiernos (Keenan *et al.*, 2015; Lanly, 1981; FAO, 1982; 1993). En este orden, también han sido loables y valiosos los esfuerzos de otras organizaciones e instituciones por conocer la dinámica forestal a nivel regional y global a partir de las herramientas disponibles en el tiempo.

Inicialmente, la recopilación de los datos de cobertura forestal a nivel global se realizó a través de un formulario con preguntas esenciales enviado por la FAO a los gobiernos de cada país donde debían reportar las estadísticas más recientes de los recursos forestales (FAO, 1947). Ante este panorama, la FAO publica el informe con los datos recopilados e indica que algunos países brindaban información más detallada que otros, era común la escasez de respuestas, hacían estimaciones provisionales y no todos los países emitían informes oficiales. Posteriormente, a partir de 1980, la FAO complementaba la información recopilada en las encuestas con imágenes satelitales multitemporales que permitían arrojar estadísticas con intervalos de diez años para la zona tropical (FAO, 2002). De manera más reciente, para el año 2014, 112 países que representan el 83% del área forestal global informaron que tenían una evaluación nacional forestal basada en inventarios de campo, sensores remotos o ambos (FAO, 2016).

En las últimas cuatro décadas, los métodos para monitorear la cubierta arbórea han evolucionado de manera consecuente con los avances de los sensores remotos, los cuales permiten obtener resultados con el menor de los costos, en un tiempo reducido en comparación con los métodos tradicionales de campo, y monitorear áreas extensas y de difícil acceso (Santos *et al.*, 2014).

Los primeros polígonos de bosque donde se analizaron los cambios en la cobertura mediante información de sensores remotos corresponden a la Amazonía Brasileña, para los años 1978 y 1988 se midieron las áreas deforestadas y el bosque fragmentado con base en las imágenes de las misiones Landsat Multispectral Scanner (MSS) y Landsat Thematic Mapper en un estudio llevado a cabo por Skole y Tucker (1993). En este orden y dado los avances de Brasil en el análisis de datos de teledetección, surge el primer proyecto de monitoreo anual de deforestación denominado PRODES (Hansen *et al.*, 2010), reportando información desde el año 1988 de la deforestación en la Amazonía Brasileña a partir de las imágenes de los satélites

Landsat 8/OLI, CBERS 4 e IRS-R2 (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales – INPE, 2022).

A nivel global, Hansen *et al.* (2010) realizaron una estimación general del área de la cobertura forestal y de la pérdida bruta de cobertura forestal en el período comprendido entre 2000 a 2005 empleando datos satelitales de los sensores MODIS y Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), lo que complementó los datos forestales de la FAO para ese período, en el sentido que los autores brindaron mayor consistencia de los datos de pérdida de bosque en el espacio y el tiempo por el uso de información global obtenida mediante teledetección; y cuantificaron el área biofísica y de pérdida de bosque partiendo de la cobertura de la tierra en lugar del uso del suelo, lo que brinda mayor exactitud en si la cubierta forestal está presente realmente. Entre las limitaciones que encuentran Hansen *et al.* (2010) de los datos de la FAO está la variación de los métodos entre países para determinar la cobertura forestal, la definición de ‘bosque’ en función del uso del suelo, y los cambios a lo largo del tiempo de la definición de lo que se considera ‘bosque’.

En el año 2013, ante el precipitado avance y sofisticación del registro de la superficie terrestre mediante métodos remotos, Hansen *et al.* (2013) publican anualmente desde el año 2000 los mapas globales del cambio de la cubierta forestal en alta resolución con base en el análisis de las imágenes del satélite Landsat 7 ETM+. Con el propósito de elaborar las actualizaciones anuales, los autores establecieron y unificaron los indicadores para determinar el concepto de cobertura forestal, y para definir la pérdida y ganancia de bosque en sintonía con las herramientas utilizadas. Esta información está disponible y se puede descargar desde la plataforma de Global Forest Change (GFC) (<https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change>). A partir del año 2013 hasta el último registro que corresponde al del año 2021, el procesamiento se realiza con base en las escenas del satélite Landsat 8 Operational Land Imager (OLI), el cual se lanzó en febrero del 2013. Los datos de GFC fueron usados para el presente trabajo, por lo que se describen con mayor detalle en la sesión de *Material y Metodología*.

En este trabajo se han mencionado siete misiones satelitales que han contribuido al monitoreo de la cobertura arbórea desde el año 1978 cuando se limitaba a la Amazonía Brasileña hasta la actualidad donde se cuenta con registros globales, estos son: Landsat 3 MSS, Landsat Thematic Mapper, Landsat 7 ETM+, MODIS, IRS-2, Landsat 8 OLI y CBERS 4, a través de los cuales se ha evolucionado y mejorado la precisión de la información de cobertura arbórea de la Tierra.

El primer satélite usado para conocer el estado biofísico de un polígono de bosque de una región específica fue Landsat 3 MSS (1972-1983), el cual tenía dos bandas en el infrarrojo cercano (NIR) y dos en el espectro visible (USGS, 2022a); luego, se implementaron las imágenes del satélite Landsat 4-5 Thematic Mapper (1982-2012), el cual contaba con tres bandas en el espectro visible, una en el NIR, dos en el infrarrojo de onda corta (SWIR) y una en el infrarrojo térmico (TIR), para un total de siete bandas (USGS, 2022a). La novedosa detección en el espectro de SWIR ofrecida por la misión Thematic Mapper representó avances en el análisis de la cobertura arbórea, dado que la combinación de algunas bandas con SWIR permite discriminar los tipos de bosque (Murakami, 2006) y, de acuerdo con la compañía European Space Imaging, la longitud de onda SWIR tiene la capacidad de penetrar el humo de los incendios para capturar la imagen de la superficie.

En cuanto al sensor CBERS 4, surge de una alianza chino-brasileña ante el interés de ambas naciones de monitorear las extensas áreas de vegetación de Brasil y China, así como los suelos de vocación agrícola (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales – INPE, 2019), por lo que cuenta con sensores específicos para el monitoreo de cierto tipo de cobertura. De este modo, CBERS 4 cuenta con tres bandas en el espectro visible, una en el NIR, dos en el SWIR y una en el TIR, para un total de siete bandas (Satellite Imaging Corporation, 2022). En el caso del sensor IRS-R2 de origen indio, complementa los datos para el monitoreo de la deforestación en la Amazonía brasileña y cuenta con dos bandas en el espectro visible, una en el NIR y una en el SWIR (European Space Agency, 2022). Ambos sensores se encuentran activos.

Para los primeros análisis globales de cobertura arbórea se utilizaron las escenas del satélite Landsat 7 ETM+, el cual se encuentra activo y tiene la misma composición de bandas que Landsat Thematic Mapper más una banda pancromática (USGS, 2022a). Posterior a este satélite, se lanza el Landsat 8 OLI con una composición de tres bandas en el espectro visible, una en el NIR, dos en el SWIR, una pancromática, una para estimar la cantidad de aerosol en la atmósfera, una para la detección de cirros, y dos en el TIR, para un total de once bandas (USGS, 2022c). Estos avances tecnológicos de los sensores Landsat mejoraron la capacidad de detección de los cambios de la superficie terrestre (Hansen *et al.* 2013). Asimismo, para el seguimiento de la dinámica de la cobertura arbórea a nivel global, se han usado desde 1999 hasta la actualidad, los datos del sensor MODIS adquiridos en 36 bandas de los espectros visibles, NIR, SWIR y TIR (USGS, 2022b). La Tabla 1 muestra algunas características de los sensores mencionados, entre las que están las resoluciones espacial, temporal y radiométrica, el número de bandas, el país de origen, el año de lanzamiento y si se encuentra activo o inactivo.

Tabla 1. Características de algunos de los sensores usados históricamente para el análisis de la cobertura forestal a nivel regional y global

	<b>Landsat 3 MSS</b>	<b>Landsat Thematic Mapper</b>	<b>Landsat 7 ETM+</b>	<b>MODIS</b>	<b>IRS-R2</b>	<b>Landsat 8 OLI</b>	<b>CBERS 4</b>
Año de lanzamiento	1978	1982	1999	1999	2011	2013	2014
País de origen	Estados Unidos	Estados Unidos	Estados Unidos	Estados Unidos	India	Estados Unidos	China-Brasil
Condición	Inactivo	Inactivo	Activo	Activo	Activo	Activo	Activo
Número de bandas	4	7	8	36	4	11	7
Resolución espacial (m)	60	30	30 y 60	250 – 500 y 1000	23,5 – 5,8 y 56	15 – 30 y 100	20 y 64
Resolución temporal	18 días	16	16 días	1 – 2 días	24 días	16 días	26 días
Resolución radiométrica	8 bits	8 bits	8 bits	12 bits	7 – 12 bits	12 bits	8 bits

Existe una amplia disponibilidad de datos adquiridos mediante teledetección con diferentes características que se ajustan a las necesidades del usuario, sin embargo, la descarga, el procesamiento y la interpretación de estos datos puede ser complejo para personas no expertas. Por esta razón, se han creado plataformas en línea que ofrecen información de la cobertura terrestre que brindan los datos procesados, asimismo, facilitan el acceso de la información proveniente de sensores satelitales. Una de esas plataformas es GFC, la cual proporciona los datos en formato ráster de pérdida y ganancia de bosque a partir del procesamiento de un conjunto de bandas de los satélites Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI.

En el presente trabajo se desarrolla una herramienta interactiva que facilita la descarga, el procesamiento y la representación cartográfica de los datos ráster de pérdida de cobertura forestal disponibles en la plataforma de GFC a partir de un área personalizada por el usuario. Para lo cual se requiere un conocimiento básico en programación, especialmente del programa R. La herramienta se implementó en dos áreas protegidas de la Amazonía colombiana que presentan niveles alarmantes de deforestación en los últimos años.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

El objetivo del presente trabajo es desarrollar una herramienta interactiva para el análisis espaciotemporal de la dinámica de bosque a nivel global a partir de los datos ráster proporcionados por la plataforma GFC, dada la disponibilidad de información y de recursos de libre acceso en línea. En este sentido, se crea una herramienta a partir del procesador

*RMarkdown* y del paquete *Shiny* de R, que permite extraer los datos de la aplicación GFC para un área determinada por el usuario, procesar los datos de la pérdida de bosque ocurrida en el período 2001-2019, generar las tablas, las gráficas y la representación cartográfica asociada.

## **2.2. Objetivos específicos**

1. Extraer y analizar información de la dinámica de bosque a partir de los datos ráster disponibles en la plataforma de GFC mediante el desarrollo de funciones en el programa R
2. Generar gráficos representativos de tendencia anual de deforestación para un área determinada que permitan analizar la dinámica temporal de la pérdida de bosque
3. Crear una herramienta interactiva para el análisis de la dinámica de bosque de un área personalizada a nivel global mediante el paquete Shiny de R
4. Ensayar la herramienta interactiva en dos áreas piloto y comparar los resultados con las herramientas de análisis de pérdida de bosque existentes

## **3. MATERIAL Y METODOLOGÍA**

Este apartado engloba la descripción del área seleccionada para el entrenamiento piloto de la herramienta, el origen de los datos usados, los softwares utilizados, la metodología empleada y el listado de las funciones creadas. Para el entrenamiento se consideraron dos áreas de bosque protegidas ubicadas en la Amazonía colombiana, debido a las condiciones de alerta que presentan a causa de las vastas áreas deforestadas en los últimos años. Se espera que esta herramienta aporte nuevos elementos para el análisis de la variabilidad espaciotemporal de la cobertura forestal en un área de interés, a partir de datos adquiridos mediante teledetección en las dos últimas décadas.

### **3.1. Área de estudio**

La herramienta se implementó en dos polígonos correspondientes a los Parques Nacionales Naturales (PNN) Tinigua y Los Picachos, ubicadas en el departamento del Meta en la Amazonía colombiana (ver Figura 1). Por la riqueza natural, Tinigua y Los Picachos pertenecen al Área de Manejo Especial La Macarena (AMEM) conformada por otros dos parques nacionales nombrados Sumapaz y Sierra de la Macarena, que se caracterizan por la diversidad biológica dada la confluencia de los ecosistemas andino, orinocense y amazónico (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2022).

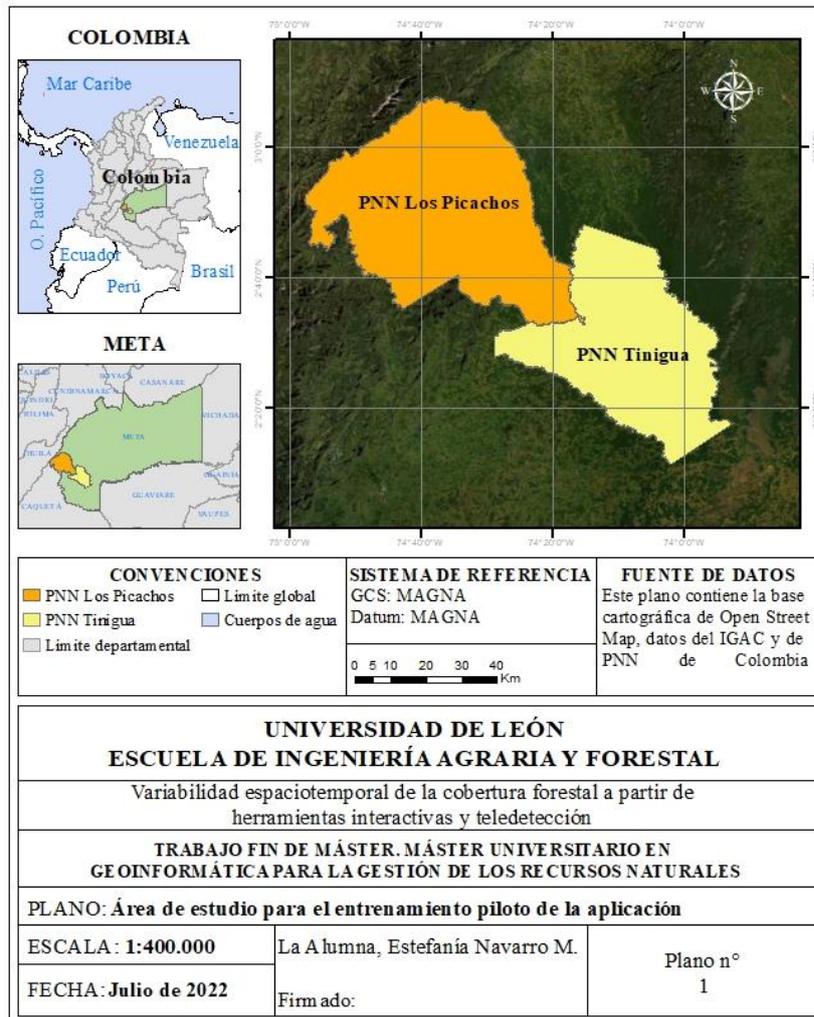


Figura 1. Áreas definidas para el entrenamiento piloto de la herramienta

El área del PNN Tinigua tiene una magnitud de 201.875 ha que corresponden a bosque húmedo tropical con una temperatura de alrededor 25°C y precipitación de 3.000 mm anuales (Colparques, 2022a). De acuerdo con Colparques (2022a), entre las especies de flora presentes están *bombacopsis quinata*, *licania lasserri*, *eschweilera cabrerana*, *eschweilera bracteosa*, *eschweilera sp*, *trattinickia lawrencei*, *trattinickia rhoifolia*, *myroxylon balsamum*, *brosimum alicastrum*, *castilla ulei*, *astrocaryum chambira*, *triparis americana*, *duroia hirsuta*, *cecropia sciadophylla*, *cecropia membranacea* y *garcinia madruno*.

Por otro lado, el área del PNN Los Picachos es de 439.000 ha con precipitación de 4.000 mm anuales en sectores bajos y 5.000 mm en sectores con altura entre 500 y 1.000 m (Colparques, 2022b). Con relación al ecosistema, Colparques (2022b) indica que está constituido por selvas húmedas en el piso térmico cálido hasta páramos en la mayor altitud, conformado con vegetación de sabanas altas, medias y bajas; bosques altos, medios y bajos; herbazales; y bosques aluviales inundables.

Para la implementación de la herramienta se tuvo en cuenta el PNN Tinigua dado que es el área protegida de Colombia que más bosque perdió entre los años 2017 y 2018 de acuerdo con los datos reportados por la Dirección Territorial Orinoquia de PNN. Se estima que para el año 2017 se deforestaron en Tinigua aproximadamente 3.000 ha de bosque, lo que se incrementó en el 2018 a casi 12.000 ha, y en 2019 alcanzaron a deforestar alrededor de 6.500 (Paz, 2021). El factor principal del acaparamiento de tierras ha sido la expansión de la ganadería en el territorio, y en menor medida la agricultura y la siembra de cultivos ilícitos, lo que ha conllevado a la tala masiva y a la quema de bosques (Semana, 2020).

En cuanto al PNN Los Picachos, en el año 2017 ocupó el cuarto lugar en la lista de áreas protegidas más afectadas por la tala de bosque con 1.064 ha deforestadas (IDEAM, 2017), y para el año 2018 se talaron 2.045 ha (Semana, 2019) destinadas a la ganadería, principalmente. La deforestación en Los Picachos no sólo implica la pérdida de flora y fauna que constituyen los ecosistemas de la selva húmeda, sino que afecta la regulación del ciclo hidrológico, debido a que en este parque está el punto de mayor precipitación de la Amazonía y ante la ausencia de vegetación se disminuye la retención de humedad en el suelo y la evapotranspiración (Acuña, 2019).

La crisis de la deforestación en Colombia no se limita a los PNN Tinigua y Los Picachos, para el año 2017 Colombia alcanzó un pico de deforestación de casi 220.000 ha en todo el territorio ante un escenario político complejo, en tanto que en el 2016 fue de aproximadamente 180.000 (IDEAM, 2017). Entre los hechos que han influido en el aumento precipitado de la pérdida de los bosques del país está que en el año 2016 las Fuerzas Revolucionarias Armadas de Colombia (FARC) firmaron el acuerdo de paz con el gobierno saliente, lo que generó riesgos ambientales dado que las FARC en el ejercicio de guerra protegían involuntariamente vastas áreas de bosque usadas como camuflaje (Salazar *et al.*, 2021; Salazar *et al.*, 2018). Ante este panorama, y agravando la situación, el gobierno entrante (2018-2022) sostuvo su política en el desconocimiento de los acuerdos de paz, adicionalmente, la participación del sector de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el Presupuesto General de la Nación en el período 2018-2020 fue de las más bajas en una década (Salazar *et al.*, 2022).

## **3.2. Datos**

### *3.2.1. Datos satelitales – GFC*

Las observaciones de la Tierra a partir de sensores remotos ofrecen bases de datos globales de libre acceso que permiten monitorear la superficie a través de un procesamiento

computacional adecuado (Hansen *et al.*, 2022). En el desarrollo de la aplicación para el análisis espaciotemporal de la pérdida de la cobertura forestal en un área determinada se emplearon los datos producidos y publicados en la aplicación GFC (<https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change>) por Hansen *et al.* (2013), que provee los datos y las herramientas para el monitoreo anual de los bosques entre el período 2001 – 2021, en asociación con el laboratorio Global Land Analysis and Discovery (GLAD) de la Universidad de Maryland (<https://glad.umd.edu/>), el cual investiga las causas y los impactos de los cambios de la cobertura de la tierra a partir del desarrollo de métodos automáticos usando datos satelitales (Amani, 2017).

La Versión 1.0 de los datos de la dinámica de bosque que suministra GFC se basan en el análisis de series temporales de imágenes capturadas por el sensor Landsat 7 ETM+ en las bandas 3, 4, 5 y 7 (Hansen *et al.*, 2013), que cuenta con registros a partir del año 1999 hasta el presente. Las versiones posteriores emplean los datos del sensor Landsat 8 OLI a partir del año 2013 en las bandas 4, 5, 6 y 7 (ver Tabla 2), tal como se indica en el sitio web de descarga de datos de GFC. Estos datos corresponden a teselas con resolución espacial de 30 m por píxel, resolución radiométrica de 8 bits y resolución de 10 ° de latitud y 10 ° de longitud.

Tabla 2. Bandas empleadas por la aplicación GFC para determinar la pérdida de bosque

Landsat 7 ETM+		Landsat 8 OLI		Región del espectro	Resolución espacial
Banda	Longitud de onda (µm)	Banda	Longitud de onda (µm)		
3	0,626-0,693	4	0,630-0,680	Rojo	30 m
4	0,776-0,904	5	0,845-0,885	Infrarrojo cercano	30 m
5	1,567-1,784	6	1,560-1,660	SWIR 1	30 m
7	2,097-2,349	7	2,100-2,300	SWIR 2	30 m

El preprocesamiento de las imágenes Landsat en GFC consiste en remuestreo de las imágenes, conversión de valores digitales (DN) a reflectancia en la parte superior de la atmósfera (TOA), detección de elementos que interfieren en el análisis de las imágenes como nubes, sombras y agua, evaluación de la calidad de las imágenes, normalización, y evaluación de la precisión en regiones y continentes (Hansen *et al.*, 2013), lo que facilita el manejo de los datos por el usuario. Luego del preprocesamiento, los autores definen la pérdida de bosque por píxel a través de la pendiente de mínimos cuadrados de la regresión de pérdida de cobertura anual versus año.

Para GFC los árboles se definen como la vegetación con altura superior a 5 m en cada píxel de 30 x 30 m (Hansen *et al.*, 2013), en tanto que para determinar si el píxel es bosque o no, se aplica el ‘umbral de cobertura arbórea’ (Zhang *et al.*, 2020), el cual varía entre 0 y 100 % y se establece de acuerdo con las características del bosque evaluado. Por otro lado, la pérdida de bosque se define como una perturbación de reemplazo de rodales, es decir, áreas libres de vegetación superior a 5 m. Este análisis lo realiza GFC de manera global en un área de 128.8 millones de Km<sup>2</sup>, lo que equivale a 143 mil millones de píxeles Landsat (Hansen *et al.*, 2013).

En este sentido, la aplicación GFC ofrece al usuario la posibilidad de descargar la información en formato ráster con una resolución de 10° en la latitud y 10° en la longitud del año de pérdida de bosque (lossyear); ganancia de bosque (gain); porcentaje de cobertura arbórea por píxel para el año 2000 (treecover2000); una capa con la información de superficie mapeada, área sin datos y cuerpos de agua permanentes (datamask); imagen de referencia sin nubes cercana al año 2000; e imagen de referencia sin nubes del último año de análisis, que en este caso es el 2019.

Para el desarrollo de la aplicación, sólo se ha tenido en cuenta el año de pérdida de bosque, es decir, la capa denominada ‘lossyear’, que se calcula a partir del reemplazo de rodales. La Figura 2 es una muestra de los datos de pérdida anual de bosque con valores en el rango de 0 a 19, es decir, 0 significa que no hay pérdida, en tanto que del 1 al 19 representa los píxeles con reemplazo o pérdida de bosque en el período 2001-2019. En el Anexo 8 se presentan las muestras de los datos descargables de GFC que no fueron consideradas en este estudio, pero que se descargan automáticamente con las líneas del código del Anexo 4.

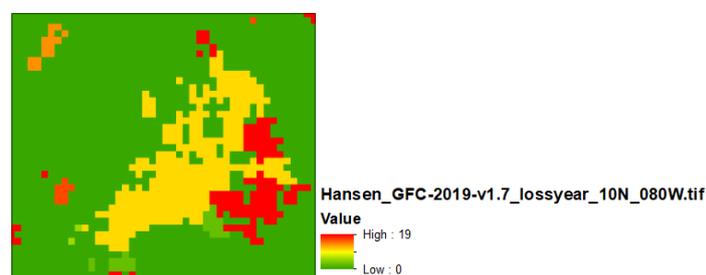


Figura 2. Representación del año de pérdida de bosque descargada de la aplicación GFC en formato raster para el período 2001 – 2019

### 3.2.2. Datos de GFC para la implementación de la herramienta interactiva

Para la implementación de la herramienta se definieron los polígonos de los Parques Nacionales Naturales (PNN) Tinigua y Los Picachos, para determinar la variabilidad espaciotemporal de la cobertura forestal, dado el nivel alarmante de deforestación en los últimos años en ambas áreas protegidas. A estos polígonos les corresponde el mosaico de GFC en el

rango de longitud W80°-W70° y latitud N10°-N0°. En la Tabla 3 se muestran los ficheros ráster que se descargan de manera automática del sitio web de GFC para el área de estudio, en este caso, se usó la capa correspondiente al año de pérdida de bosque, la cual contiene las áreas terrestres que han experimentado reemplazo o pérdida de la cobertura arbórea en un año determinado en el rango 2001 – 2019.

Tabla 3. Ficheros en formato ráster que se descargan de manera automática del sitio web de GFC

<b>Nombre del fichero</b>	<b>Descripción</b>
Hansen_GFC-2019-v1.7_datamask_10N_080W	Superficie mapeada, cuerpos de agua y área sin datos
Hansen_GFC-2019-v1.7_gain_10N_080W	Ganancia de bosque
<b>Hansen_GFC-2019-v1.7_lossyear_10N_080W</b>	<b>Año de pérdida de bosque</b>
Hansen_GFC-2019-v1.7_treecover2000_10N_080W	Porcentaje de cobertura arbórea por píxel - año 2000

### 3.2.3. Datos auxiliares

Los polígonos de los PNN Tinigua y Los Picachos se obtuvieron de la base de datos disponible en el sitio web de Parques Nacionales Naturales de Colombia (<https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/servicio-al-ciudadano/datos-abiertos/>). La definición de estos polígonos constituye el primer paso para el desarrollo de la aplicación, y como se muestra posteriormente, es una de las formas con las que cuenta el usuario para precisar la zona de estudio. Este corresponde a un objeto en formato shapefile georreferenciado al sistema de coordenadas geográficas GCS\_MAGNA, asociado al sistema de referencia oficial de Colombia MAGNA-SIRGAS (Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, 2004).

## 3.3. Software

### 3.3.1. R

La herramienta para el análisis espaciotemporal de la pérdida de cobertura forestal se desarrolló en el software libre R versión 4.1.2 utilizando el interfaz RStudio, permitiendo que el análisis de los datos sea reproducible para la verificación de los resultados por alguien más (Bivand *et al.*, 2008). A través del procesador de texto *RMarkdown* se combinan las líneas del código con el texto narrativo (Boccardo y Ruiz, 2017), sintetizando en un documento el procedimiento con los resultados. Además, para la representación cartográfica se usó el marco de aplicación web *Shiny* de R, el cual facilita la visualización dinámica de los resultados a través de scripts escritos en R (Doi *et al.*, 2016).

### 3.3.2. ArcGis

Las representaciones cartográficas de este trabajo se elaboraron con la aplicación ArcMap del software ArcGis versión 10.7.1, que permite ver, editar, analizar e integrar datos en distintos formatos (Booth y Mitchell, 2001). En ese sentido, se exploró la información relacionada a la zona de estudio, la ubicación geográfica asociada y se diseñó la Figura 1 correspondiente a la ubicación de los polígonos de los PNN Tinigua y Los Picacho.

## 3.4. Metodología

La metodología para el desarrollo de la aplicación de la variabilidad espaciotemporal de la pérdida de bosque se aborda en cuatro etapas principales. La primera consiste en determinar la zona de estudio de acuerdo con los intereses del usuario; la segunda etapa es la descarga de los datos en formato raster de GFC correspondiente al polígono de estudio establecido por el usuario; la tercera es el procesamiento de los datos de GFC hasta la creación del dataframe con los datos requeridos para la aplicación de *Shiny*; finalmente, la cuarta es la representación dinámica de la información de pérdida de bosque mediante la aplicación web interactiva de *Shiny*.

### 3.4.1. Personalización de la zona de estudio

Teniendo en cuenta que la aplicación determina la pérdida anual de cobertura forestal en un área personalizada, el Anexo 2 ('zonaestudio') es un fichero RMarkdown que llama la función denominada *import\_data* del Anexo 1 ('funcion\_zonaestudio'), que conforma tres opciones para asignar el área de estudio (tipo 1, 2 o 3). De esta manera, la primera forma de personalizar el área de estudio es cargando un polígono en formato shapefile que el usuario tenga guardado en la carpeta de entrada, al cual se le asigna el Sistema Geodésico de Coordenadas WGS84 usado mundialmente, tal como se observa en el Anexo 1. En este caso, la entrada de la función está determinada por el tipo 1 y el nombre del archivo.

Para la implementación de la herramienta se usa la primera alternativa teniendo en cuenta los polígonos de los PNN Tinigua y Los Picachos que se guardan de manera anticipada en la carpeta de entrada con sistema de referencia de coordenadas MAGNA. En este sentido, el código transforma las coordenadas de este polígono a WGS84, asimismo se haría con cualquier polígono de otra región que cargue el usuario.

```
source('funcion_zonaestudio.R')
```

```
zonaestudio <- import_data(tipo=1, archivo = "tinigua")
```

La segunda opción permite al usuario descargar desde el sitio web de la Base de Datos de Áreas Administrativas Global (GADM) ([https://gadm.org/download\\_country.html](https://gadm.org/download_country.html)) los datos espaciales de la subdivisión administrativa del país, es decir, se descarga el polígono del municipio o distrito en caso de que el usuario desee analizar una región en específico. El código que corresponde a cada país se obtiene mediante la orden ‘View(getData('ISO3'))’, en tanto que para el nombre de los municipios se ejecuta ‘nom\_municipio <- getData('GADM', country='COL', level = 2)’, ambas incluidas en el código. En este caso, la función descarga la información de acuerdo con las entradas indicadas, esto es, tipo 2, el código del país y el nombre del municipio.

A modo de ejemplo, el código del Anexo 2 muestra que para la segunda opción se descarga el polígono del municipio ‘El Encanto’ ubicado en el departamento del Amazonas al sur de Colombia, con el código ‘COL’ correspondiente a Colombia, asimismo el nombre del municipio o distrito con la letra inicial en mayúscula.

```
zonaestudio <- import_data(tipo=2, pais = "COL", municipio = "El Encanto")
```

La última y tercera alternativa es crear un polígono a partir de coordenadas conocidas en la latitud y en la longitud, e indicando la entrada tipo 3. Como ejemplo se proporcionan cinco puntos de coordenadas en la latitud y en la longitud que conforman los vértices del polígono del cuadro que delimita el PNN Tinigua. De la misma forma, el usuario puede indicar las coordenadas de la zona de interés para crear el polígono de estudio. En este sentido, se presentan tres formas mediante las cuales se obtiene y se guarda en la carpeta de entrada el elemento en formato shapefile ‘zonaestudio’, el cual constituye la entrada principal para la descarga de la información de pérdida de bosque y los análisis posteriores. Los resultados de la segunda y tercera opción se omiten en el presente trabajo.

```
zonaestudio <- import_data(tipo=3, x_coord = c(-74.4837, -73.8800, -73.8800, -74.4837, -74.4837), y_coord = c(2.801316, 2.801316, 2.190806, 2.190806, 2.801316))
```

### 3.4.2. Descarga de datos de GFC

Para la descarga de los datos de GFC y el procedimiento posterior se crea el documento RMarkdown del Anexo 4 (‘bosque\_rmarkdownv2’) que es un llamado del Anexo 3 (‘funciones’), el cual contiene las funciones para la descarga, el procesamiento de los datos en formato ráster y la representación gráfica de los resultados de la pérdida de bosque. En el paso de la descarga de las teselas de GFC es fundamental la librería *gfcanalysis*, creada por la Red

de Monitoreo y Evaluación de la Ecología Tropical (TEAM), la cual soporta el tratamiento de los datos de GFC desde R (Cooper y Zvoleff, 2020).

Luego de personalizar la zona de estudio mediante alguna de las tres opciones disponibles del paso anterior, se crea la función ‘descarga\_gfc’ que integra algunas funciones de la librería *gfcanalysis*, permitiendo identificar el mosaico o mosaicos de GFC requeridos de acuerdo con el polígono definido. La entrada de ‘descarga\_gfc’ está determinada por la proporción de cobertura forestal de la cuadrícula, es decir, es un umbral de 0 a 100, donde 0 representa carencia de cobertura de bosque y 100 significa máxima cobertura. Para el caso del piloto con los PNN Tinigua y Los Picachos, se ha tomado como umbral el 80 dada la recomendación de Cruz *et al.* (2019), quienes determinan ese valor para delimitar los bosques de la Amazonía a partir de datos de GFC.

```
source('funciones.R')  
  
datosGFC <- descarga_gfc(80)  
  
masc_raster <- raster::mask(datosGFC$lossyear, zonaestudio)  
  
save(masc_raster, file = "salida/raster_zestudio.RData")
```

Mediante esta función se descarga y se guarda en la carpeta de salida el mosaico compuesto de cuatro capas nombradas ‘datamask’, ‘gain’, ‘lossyear’ y ‘treecover2000’, descritas previamente. Con base en el polígono de la zona de estudio se delimita la capa ‘lossyear’ y se guarda en la carpeta de salida para los siguientes análisis. Este proceso se ilustra en color azul en la Figura 3 y se detalla en el paso dos del código de los Anexos 3 y 4.

### 3.4.3. *Procesamiento de los datos de GFC*

El procesamiento de los datos consiste en determinar las celdas con pérdida de bosque anual entre el período 2001-2019, para lo que se crea la función ‘rasterpunto’ con la entrada iterativa en el rango de 1-19 correspondiente al período de estudio. La función detecta grupos de píxeles con pérdida de bosque conectados para cada año, los selecciona, y crea un dataframe con las coordenadas del punto donde ocurre y el año. Este procesamiento corresponde al paso tres de los códigos de los Anexos 3 y 4.

```
masc_raster[masc_raster == 0] <- NA  
  
res.point <- lapply(1:19, function(i) {rasterpunto(i)})  
  
year <- as.data.frame(do.call(rbind,res.point))
```

```
year_c <- stats::na.omit(year)
```

El paso cuatro del código es la visualización de las zonas deforestadas en la aplicación *leaflet* empleando la función ‘*gfc\_map*’ detallada en el Anexo 3, mediante la cual se le asignan los atributos espaciales al marco de datos de pérdida de bosque y las zonas deforestadas se simbolizan con círculos de colores de acuerdo con el año en el que ocurrió la pérdida de bosque y de distintos tamaños conforme al área deforestada.

```
year_sf <- sf::st_as_sf(year_c, coords = c("x", "y"), crs = 4326)
```

```
mapa <- gfc_map(year_sf)
```

En el paso cinco del código se calcula el área total, el promedio y el área máxima deforestada por cada año, teniendo en cuenta que el tamaño de celda es de 900 m<sup>2</sup> equivalente a 0,09 ha. Asimismo, se representan gráficamente los datos del área total deforestada.

```
k <- 0.09
```

```
datos_abosque <- estado_bosque(year_c)
```

```
write.csv(datos_abosque, file = "salida/areaperdida.csv")
```

De manera complementaria, en el paso seis se comparan los cambios de la distribución de las áreas deforestadas de dos años escogidos por el usuario entre el 2001 – 2019. En tanto que en el paso siete se guarda el dataframe con los datos del número de píxeles catalogados con pérdida de bosque para cada año con la coordenada geográfica en formato ‘*csv*’, el cual será usado en la aplicación de *Shiny*.

```
save(year_c, file = "salida/deforestacion.RData")
```

```
write.csv(year_c, file = "salida/deforestacion.csv")
```

Finalmente, en el paso ocho se calcula la pendiente de Sen que es una alternativa robusta no paramétrica para calcular la pendiente de una serie de tiempo. Una pendiente de  $sen > 0$  indica una tendencia ascendente del área media deforestada anual, en tanto que  $sen < 0$  demuestra que hay una tendencia a la baja durante el período de estudio (Sen, 1968).

En la Tabla 4 se listan las funciones creadas en cada paso en las diferentes etapas, desde la definición de la zona de estudio hasta el procesamiento de los datos, para un total de seis, presentadas en los anexos 3 y 4. Asimismo, se describe brevemente cada función, el tipo de entrada requerida y la salida generada.

Tabla 4. Funciones creadas en el desarrollo de la herramienta para el análisis de la variabilidad espaciotemporal de la pérdida de bosque

Función	Descripción	Entrada	Salida	Etapas	paso
import_data	Importa los datos para crear el objeto de la zona de estudio a partir de tres opciones	tipo: numérico archivo: carácter país: carácter municipio: carácter x_coord: numérico y_coord: numérico	Archivo 'RData' del polígono de la zona de estudio	Zona de estudio	1
descarga_gfc	Descarga y guarda los datos de GFC correspondientes a la zona de estudio	umbral_bosque: numérico	Ráster 'lossyear' guardado en la carpeta de salida	Descarga de datos de GFC	2
rasterpunto	Detecta grupos de píxeles conectados de pérdida de bosque para cada año	i: iteración del 1-19	Dataframe con el número de celdas con pérdida de bosque, año y coordenadas	Procesamiento de datos de GFC	3
gfc_map	Representa las áreas deforestadas en la aplicación leaflet	year_sf: objeto con geometría	Representación de las áreas deforestadas en leaflet	Procesamiento de datos de GFC	4
estado_bosque	Calcula el área total, media y máxima de la deforestación para cada año	year_c: dataframe	Archivo 'csv' con los datos anuales del área de deforestación total, media y máxima	Procesamiento de datos de GFC	5
anual	Representa mediante gráfico de barras el área total deforestada por año	dec: numérico	Representación gráfica del área total de deforestación anual	Procesamiento de datos de GFC	5
escenbosque	Representa el escenario de la distribución de la pérdida de bosque para dos años escogidos por el usuario	escen1: carácter escen2: carácter tit1: carácter tit2: carácter	Representación de la distribución de pérdida de bosque para dos años	Procesamiento de datos de GFC	6

#### 3.4.4. Aplicación Shiny

Para crear la aplicación web interactiva de la variabilidad espaciotemporal de la pérdida de bosque se usa el paquete de R *Shiny*, el cual se conforma de tres bloques denominados 'ui', 'server', y 'global'. En ui se define la interfaz de la aplicación, en server se realizan los cálculos a partir de las interacciones del usuario en la interfaz (Bellosta, 2018), mientras que en global se definen los elementos o datos que se usarán en server y ui. De esta forma, *Shiny* proporciona la herramienta que le permite al usuario detectar las zonas deforestadas en el tiempo y determinar el área afectada de alguna zona de interés, lo que contribuye a priorizar intervenciones para la conservación de los bosques por parte de las autoridades y organizaciones.

En este sentido, se carga en global (Anexo 5) el archivo ‘csv’ generado en el paso siete que contiene las agrupaciones de píxeles de pérdida de cobertura arbórea con las coordenadas; en ui se indica el contenido de la interfaz de la aplicación, la ubicación y el tamaño de los paneles, barras y gráficas (Anexo 6); en tanto que en server se define el tipo de mapa, se agregan algunos elementos accesorios como la opción para medir la distancia de un punto a otro en el mapa, la leyenda, los círculos que representan la pérdida de bosque y el histograma de la pérdida de cobertura forestal de la zona que se observa en el panel del mapa (Anexo 7).

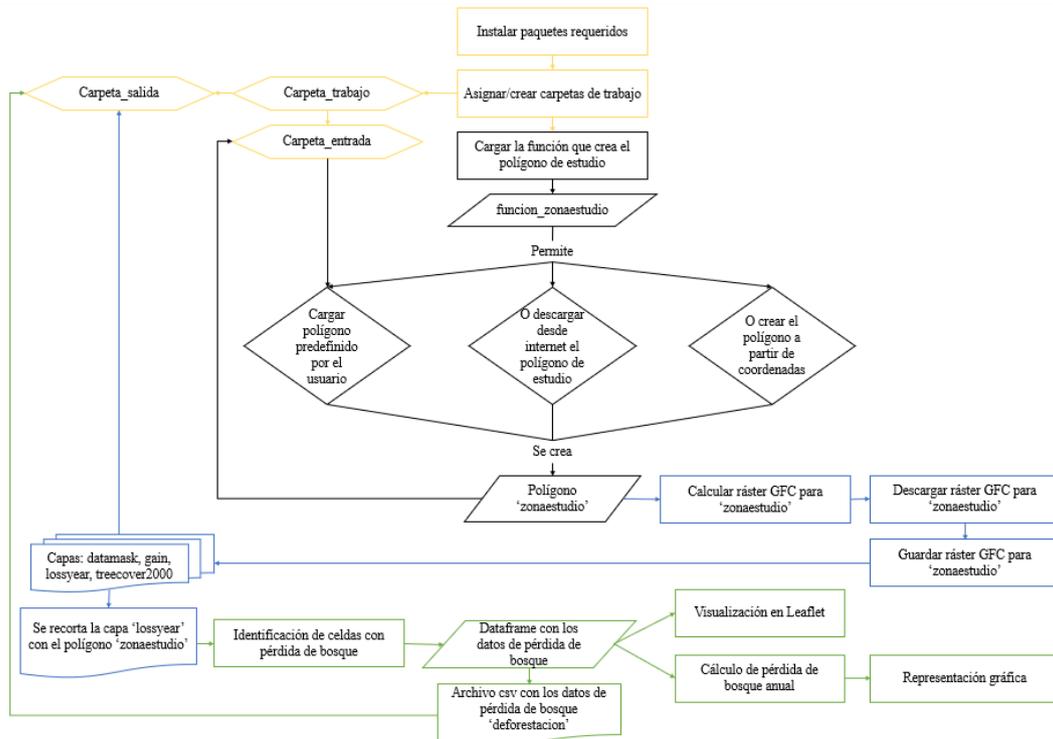


Figura 3. Diagrama de trabajo para calcular la pérdida de bosque anual. En amarillo, la asignación del espacio de trabajo; en negro, la creación de la zona de estudio; en azul, la descarga de datos de GFC; y en verde, el procesamiento de los datos

## 4. RESULTADOS

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos de la implementación de la herramienta para los polígonos piloto correspondientes al PNN Tinigua y PNN Los Picachos. En este sentido, se presentan las tablas con los datos anuales de la pérdida de bosque del área de estudio, los diagramas de barras y la representación cartográfica de la pérdida de bosque generada a través de la librería *leaflet*. Los scripts generados en el proceso constituyen una parte de los anexos de este documento y se describen sucintamente en la Tabla 5.

Tabla 5. Scripts generados en la elaboración de la herramienta para el análisis de la variabilidad espaciotemporal de la cobertura forestal

Nombre del Script	Tipo	Descripción	Anexo
funcion_zonaestudio.R	Script	Contiene la función para determinar la zona de estudio mediante tres opciones	1
zonaestudio.Rmd	R Markdown	Crea las carpetas de trabajo requeridas, corre la función ‘funcion_zonaestudio.R’ para la opción escogida y guarda el archivo generado	2
funciones.R	Script	Contiene las funciones para la descarga y el procesamiento de los datos de GFC	3
bosque_rmarkdownv2.Rmd	R Markdown	Corre las funciones del script ‘funciones.R’ mediante la indicación de los valores de entrada y guarda los archivos generados	4
global.R	Script	Es uno de los bloques de Shiny e indica los datos usados para la ejecución de la aplicación	5
ui.R	Script	Es la parte del paquete Shiny donde se describe la interfaz de la aplicación	6
server.R	Script	Es la parte del paquete Shiny donde se ejecutan los cálculos de acuerdo con las órdenes del usuario	7

#### 4.1. Variabilidad espaciotemporal de la deforestación en el PNN Tinigua

La Tabla 6 se genera en formato ‘csv’ mediante el paso siete del código del Anexo 4 con el nombre ‘areaperdida’ y se guarda en la carpeta de salida. Esta tabla contiene los datos del área total anual de pérdida de cobertura arbórea en el período 2001-2019, indicados en la primera columna del 1-19 para que coincida con la abscisa de las gráficas, además, se presenta el área media anual y el área máxima deforestada al año con la coordenada donde ocurre el evento. En el caso del PNN Tinigua, la mayor pérdida de cobertura forestal se presentó en el año 2018 con casi 14.000 ha, seguido del año 2019 con más de 6.000 ha. Por otro lado, se observa que el valor del promedio anual de deforestación es bajo con relación al área total de pérdida de cobertura arbórea, lo que indica que los puntos de deforestación son múltiples en el territorio del parque.

En cuanto al área máxima deforestada anual, el mayor valor ocurrió en el año 2018 con 236,34 ha, seguido del año 2017 con 116,37 ha y del 2019 con 106,47, de cada valor máximo anual se indica en la Tabla 6 la coordenada en la longitud y en la latitud. De manera complementaria, la herramienta genera el diagrama que representa la variabilidad anual de la pérdida total de cobertura forestal en el PNN Tinigua (ver Figura 4), donde se observa que los años con menor área deforestada en el período de estudio fueron 2003 y 2015.

Tabla 6. Área total, media y máxima deforestada en el PNN Tinigua en el período 2001-2019

Año	Área total deforestada (ha)	Área media deforestada (ha)	Área máxima deforestada anual (ha)	Longitud del área máxima	Latitud del área máxima
1	2041,11	2,55	64,35	-73,989375	2,260875
2	1471,77	2,10	25,74	-74,264625	2,543625
3	313,38	1,09	8,55	-74,259625	2,544125
4	2378,25	1,79	45,63	-74,234125	2,534625
5	2010,51	2,40	22,77	-74,293875	2,546375
6	1790,28	2,77	22,23	-73,988625	2,515625
7	4218,3	2,37	73,53	-74,412875	2,536375
8	2485,35	2,58	38,97	-74,233125	2,436625
9	2171,97	2,42	41,58	-74,161375	2,325125
10	1019,34	1,21	16,92	-74,239375	2,398625
11	1964,88	1,77	27,45	-74,086625	2,338625
12	1830,87	1,45	32,13	-74,211875	2,441125
13	1487,43	1,46	17,46	-74,172125	2,430625
14	2577,87	1,34	26,73	-74,162625	2,559375
15	341,28	6,58	22,77	-74,227875	2,565125
16	1773,00	1,89	34,38	-74,242125	2,781875
17	3052,08	2,87	116,37	-74,182625	2,366875
18	13989,51	5,38	236,34	-74,093625	2,409875
19	6075,99	3,46	106,47	-74,051375	2,381875

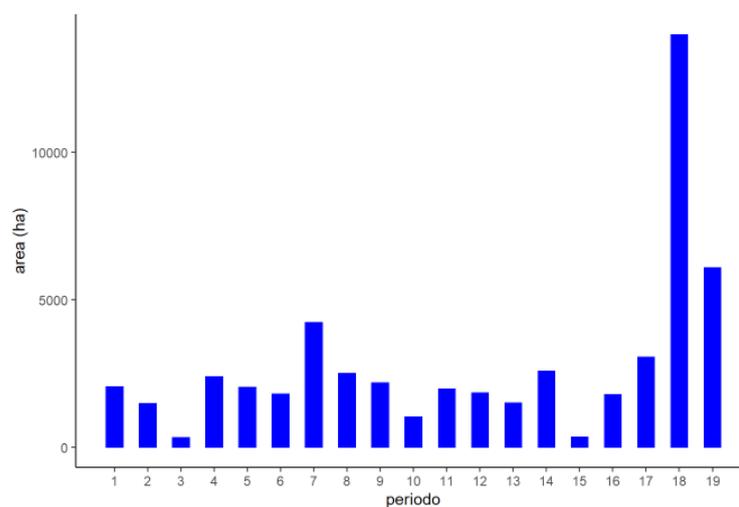


Figura 4. Variabilidad anual de la deforestación total en el PNN Tinigua

La herramienta permite hacer la comparativa visual del grado de deforestación en la zona de estudio para dos años que el usuario puede elegir mediante el paso seis del código del Anexo 4. En el caso del PNN Tinigua, se presenta en la Figura 5 el escenario para el 2003 y el 2018, que corresponden a los años de menor y mayor pérdida de cobertura arbórea, respectivamente. Los puntos amarillos indican menor área deforestada en comparación con los puntos rojos que

señalan áreas superiores a 8 ha. En el año 2003, se observa la tendencia de la deforestación en el sur del parque, lo que se agudiza notoriamente en el 2018. Este escenario lo sustenta el valor de la pendiente de Sen de 0,016, indicando que durante el período estudiado se presenta una tendencia al incremento de las áreas deforestadas.

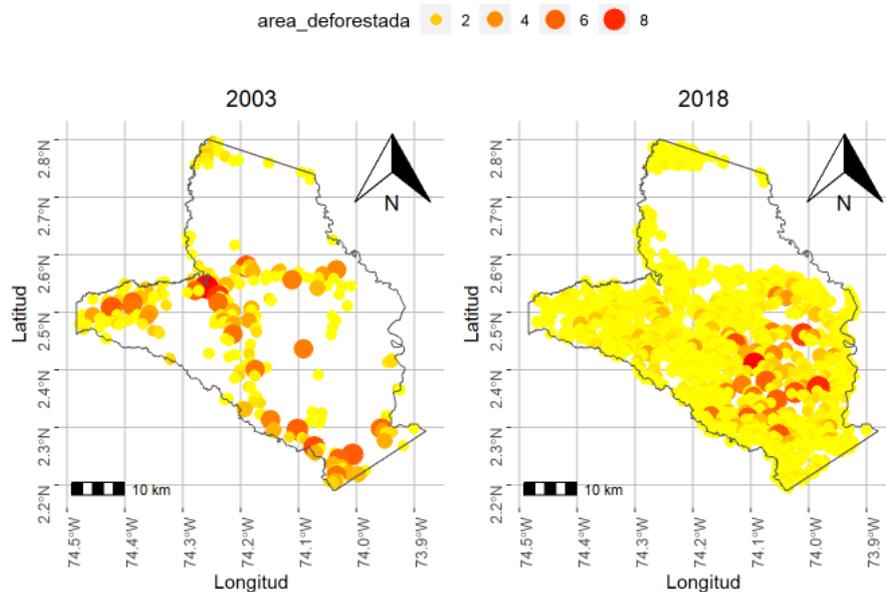


Figura 5. Comparación de los escenarios de deforestación en el PNN Tinigua para los años 2003 y 2018

A partir de la ejecución de los bloques *global*, *ui* y *server* de la librería *Shiny*, se genera el mapa dinámico en *leaflet* que ilustra la variabilidad espaciotemporal de la pérdida de cobertura forestal ocurrida en el PNN Tinigua en el período de estudio. Las zonas deforestadas se indican mediante círculos de colores de acuerdo con el año y varían de tamaño en consecuencia con la magnitud del área de pérdida de bosque, permitiéndole al usuario identificar los puntos más críticos de deforestación. En la parte izquierda del panel se muestra la barra con el color que corresponde al año en el cual sucedió la deforestación, asimismo se disponen las opciones de zoom y la de medir distancia y área en la parte superior izquierda (ver Figura 6). En la parte superior derecha, se incluye un panel móvil con una barra que filtra los círculos de acuerdo con el área deforestada, en este caso, el valor máximo del filtro es de 50 ha por defecto, no obstante, el usuario puede modificarlo con base en las magnitudes halladas en la zona que determine. Asimismo, el panel contiene un diagrama que representa el área total anual deforestada, el cual varía en respuesta al acercamiento que se realice de la zona y al filtro aplicado.

Mediante la Figura 6, se observa que durante los primeros diez años, representados con colores de tonalidades azul y verde, la deforestación se concentró en los límites del parque, lo que permitió que en los años posteriores se extendiera la situación a las zonas más remotas, donde las zonas deforestadas tienden a tener una mayor extensión. Esto se aprecia mejor en el

acercamiento de la Figura 7 y de la Figura 8 que corresponde al cuadro de color rojo de la Figura 6 en el sureste del parque.

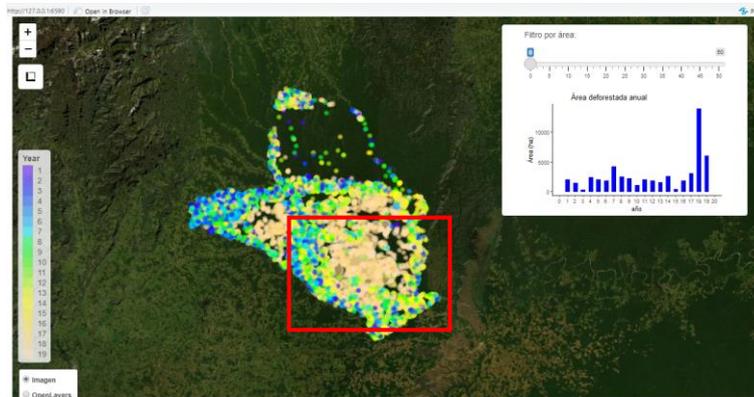


Figura 6. Visualización en leaflet de la variabilidad espaciotemporal de la deforestación en el PNN Tinigua en el período 2001-2019

En el acercamiento de la Figura 8 se observa que la deforestación en esa parte interna del PNN Tinigua ha ocurrido en los últimos cinco años de estudio, principalmente. Para el año 2018 se deforestaron alrededor de 9.000 ha y en el 2019 3.000 ha, aproximadamente. En esta zona se aplica el filtro de 50 ha y se encuentra que los mayores focos de deforestación ocurrieron en los años 2017, 2018 y 2019, con un caso en el año 2001 (ver Figura 8).

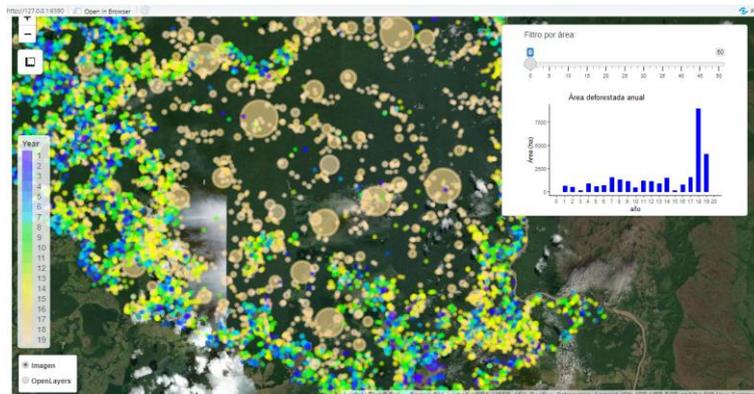


Figura 7. Acercamiento a una de las zonas internas del PNN Tinigua con mayor deforestación reciente

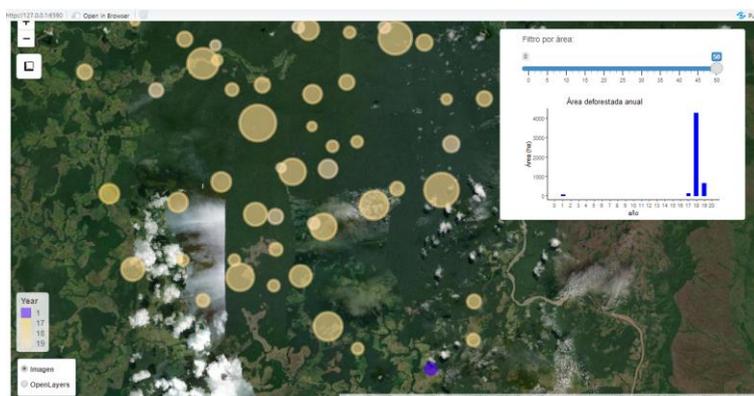


Figura 8. Acercamiento de la Figura 6 con filtro aplicado de 50 ha

#### 4.2. Variabilidad espaciotemporal de la deforestación en el PNN Los Picachos

Al igual que para el PNN Tinigua, en el año 2018 se presentó la máxima deforestación en el PNN Los Picachos con un poco más de 3.000 ha, seguido del año 2007 con más de 2.300 ha, tal como se reporta en la Tabla 7. Con relación al promedio anual del área deforestada, se encuentra que los valores son bajos en comparación con el área total, es decir, que el área total corresponde a la suma de múltiples focos de pérdida de cobertura arbórea. En cuanto al área máxima deforestada, el punto con mayor deforestación ocurrió en el año 2018 con 162 ha, seguido de 93,33 ha que fueron deforestadas en el año 2001 y de 55,71 ha en el año 2007. En la Figura 9 se observa que los años con menor deforestación fueron 2015 y 2003, lo que coincide con lo hallado en PNN Tinigua.

Tabla 7. Área total, media y máxima deforestada en el PNN Los Picachos en el período 2001-2019

Año	Área total deforestada (ha)	Área media deforestada (ha)	Área máxima deforestada anual (ha)	Longitud del área máxima	Latitud del área máxima
1	961,83	3,25	93,33	-74,327125	2,640625
2	716,76	2,23	29,88	-74,439125	2,678875
3	115,56	0,93	7,83	-74,279125	2,568625
4	769,68	1,22	24,12	-74,483125	2,677625
5	957,69	2,10	26,73	-74,355875	2,663375
6	698,85	1,95	18,09	-74,461375	2,782625
7	2324,70	2,56	55,71	-74,385625	2,582125
8	797,13	1,82	26,28	-74,435625	2,678125
9	589,32	1,48	25,20	-74,331875	2,635375
10	453,78	1,00	26,19	-74,459625	2,756125
11	272,43	0,66	9,18	-74,372875	2,696875
12	822,96	1,07	34,83	-74,341625	2,617375
13	600,12	1,48	21,42	-74,382125	2,699125
14	603,99	1,07	23,49	-74,423875	2,659375
15	42,93	0,49	4,14	-74,313625	2,599125
16	153,36	0,61	8,91	-74,432125	2,740625
17	734,31	2,55	33,03	-74,408875	2,601375
18	3014,19	3,80	162,00	-74,333125	2,596125
19	132,30	0,71	19,44	-74,385375	2,723125

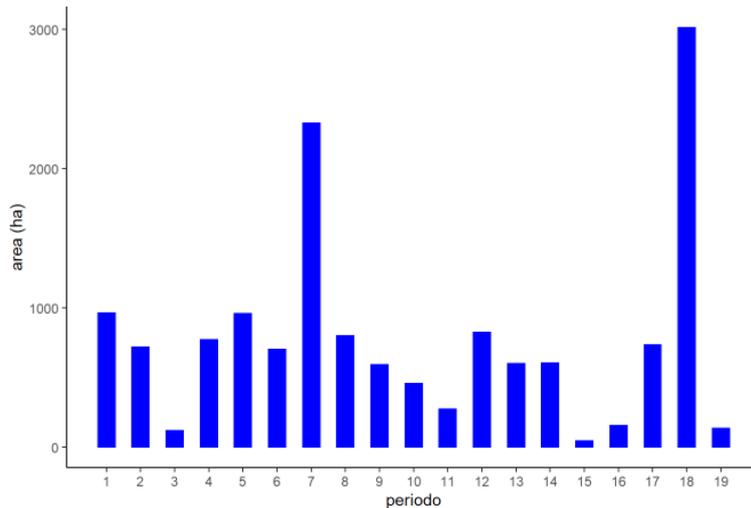


Figura 9. Variabilidad anual de la deforestación total en el PNN Los Picachos

La Figura 10 muestra el escenario de deforestación para el PNN Los Picachos para los años 2003 y 2018, la dimensión del área se simboliza con círculo en tonalidades de amarillo y rojo, donde el rojo representa áreas deforestadas superiores a 6 ha. La Figura indica que la pérdida de cobertura arbórea se ha concentrado principalmente en el sur del parque, en el límite con el PNN Tinigua. Asimismo, se hallan unos focos de deforestación en el este del parque para el año 2003 que se han mantenido hasta el 2018, y adicionalmente se han extendido algunos focos hacia el oeste. A pesar de que el escenario del parque para los años 2003 – 2018 indican una tendencia al incremento de las áreas deforestadas, el valor de la pendiente de Sen para el período 2001 – 2019, fue de  $-0,069$ , revelando una tendencia a la baja de la magnitud de las áreas afectadas.

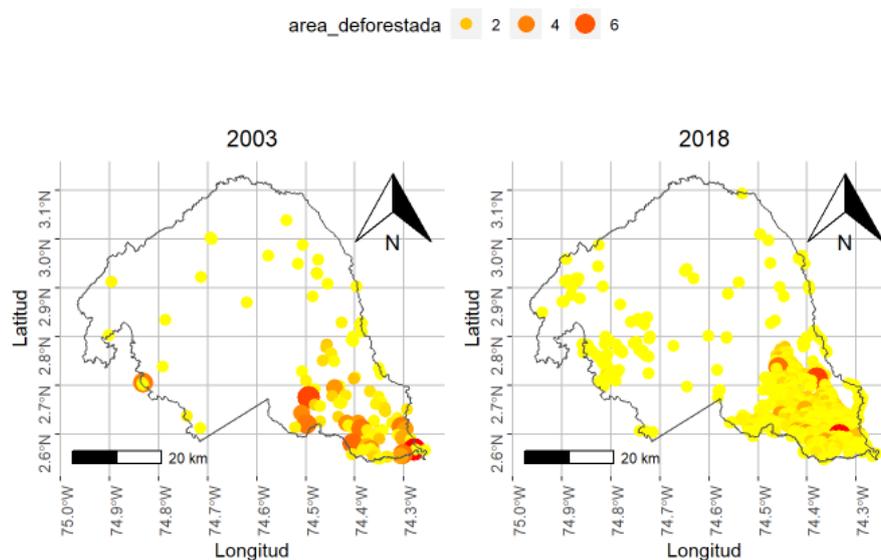


Figura 10. Comparación de los escenarios de deforestación en el PNN Los Picachos para los años 2003 y 2018

La Figura 11 esquematiza la variabilidad de la pérdida de cobertura forestal para el período 2001 – 2019, donde se observa que durante los 19 años de estudio la deforestación se ha distribuido en toda el área del parque dado que se observan puntos en colores de tonalidades azul, verde y amarillo, con un aumento de focos de pérdida de cobertura arbórea en el sur durante los últimos años de estudio.

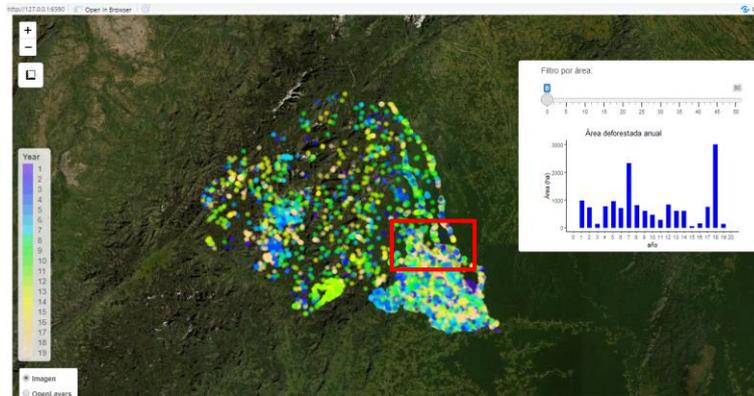


Figura 11. Visualización en leaflet de la variabilidad espaciotemporal de la deforestación en el PNN Los Picachos en el período 2001-2019

La Figura 12 corresponde al acercamiento de la zona delimitada con el cuadro rojo de la Figura 11, donde se observan unas franjas deforestadas definidas que corresponden al margen de los brazos de un río. En esta superficie se encuentran casos de pérdida de cobertura arbórea durante todo el período de estudio. No obstante, el año más alarmante es el 2018 con alrededor 1.000 ha deforestadas. Al aplicar el filtro de 25 ha a la zona delimitada, los años con área deforestada superior a este valor son el 2002, 2007, 2008, 2010 y 2018 (ver Figura 13).

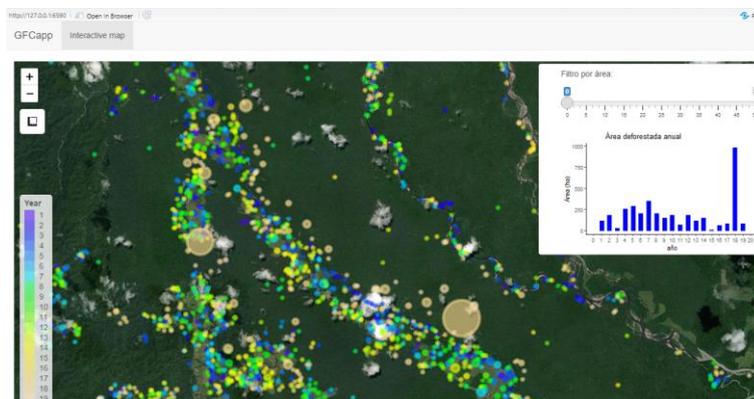


Figura 12. Acercamiento a una de las zonas internas del PNN Los Picachos

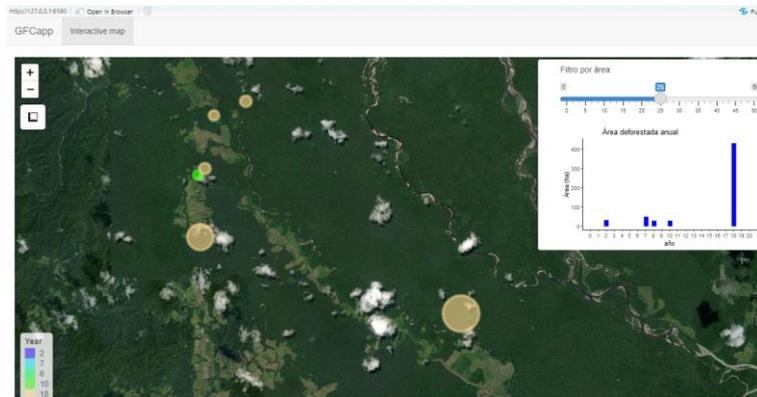


Figura 13. Acercamiento de la Figura 12 con filtro aplicado de 25 ha

### 4.3. Comparación con otras aplicaciones de monitoreo de cambios de la cobertura forestal

#### 4.3.1. *Global Forest Watch (GFW)*

GFW (<https://www.globalforestwatch.org/map>) es una plataforma que incorpora los datos de GFC para brindar información actualizada del monitoreo de los bosques a nivel global a partir del año 2001 hasta la actualidad. Esta iniciativa tiene como investigador principal a Matthew Hansen y como coinvestigadores a Peter Potapov y Svetlana Turubanova (GLAD, 2022). Entre los aliados de este proyecto están el World Resources Institute, Google Earth Engine, la plataforma Carto Location Intelligence y la compañía Planet Labs, entre otros. Además de ofrecer información relacionada a los cambios de la cubierta forestal global y las causas que lo generan, también cuenta con mapas interactivos a nivel global para el monitoreo de los incendios y de datos sobre cambio climático.

Con relación a la cobertura arbórea, GFW ilustra en un mapa interactivos los datos de pérdida y ganancia de bosque, permitiendo al usuario analizar cualquier zona a partir de la división administrativa del país y descargar los datos anuales en formato 'xlsx'; o a partir de un polígono personalizado (ver Figura 14), en este caso no permite descargar los datos, pero los indica mediante un diagrama en la plataforma.

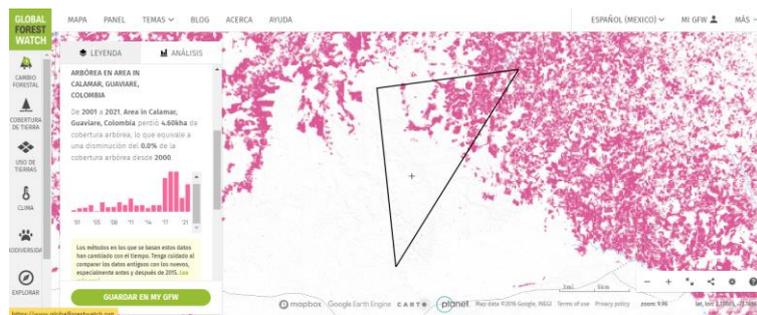


Figura 14. Visualización de los datos de pérdida de cobertura arbórea para un polígono personalizado en la plataforma de GFW

En comparación con la herramienta elaborada en el presente trabajo, GFW ofrece distintos tipos de información que no se limita exclusivamente a la pérdida de bosque, además, los análisis se pueden realizar de manera rápida en la plataforma y la descarga de los datos regionales es rápida y sencilla. En cuanto a la herramienta desarrollada, una ventaja es que esta permite visualizar la variabilidad espaciotemporal de la pérdida de cobertura forestal mediante la plataforma *leaflet*, donde cada año se simboliza con un color distinto y la dimensión del área deforestada se relaciona con el cambio del tamaño de los círculos, además cuenta con un panel que contiene un diagrama con los datos de deforestación anual el cual cambia de acuerdo al acercamiento que se realice de la zona, y se pueden filtrar áreas de acuerdo a la dimensión. Entre las desventajas está que sólo ofrece datos de pérdida de cobertura forestal, y el usuario requiere un conocimiento básico de programación, dado que debe manipular las entradas de las funciones del código para la descarga y el procesamiento de la información, además, el paso de la descarga de los datos toma tiempo, debido a que se descargan cuatro capas de información en formato ‘tif’ descritas anteriormente.

#### 4.3.2. *EarthMap*

EarthMap (<https://earthmap.org/>) es una herramienta interactiva de código abierto desarrollada por la FAO que permite visualizar los datos de pérdida de cobertura forestal anual ofrecidos por GFC de manera sencilla, representando en diferentes colores las áreas afectadas cada año en una misma capa para el período 2001 – 2020 (ver Figura 15), o indicando las zonas deforestadas en capas individuales para cada año. Esta herramienta facilita la descarga de los datos en formato ‘GeoTIFF’ y ‘PNG’ por regiones, además, proporciona los datos de pérdida de cobertura arbórea mediante diagramas con la posibilidad de descargarlos en formato de imagen y ‘CSV’ de manera rápida, lo que constituye una de las ventajas de EarthMap.

La plataforma cuenta con múltiple información entre la que está datos sobre el clima y cambio climático, cobertura del suelo, hidrología y áreas quemadas, por lo que es consultada masivamente, al igual que GFW, a lo que también contribuye que el acceso a la herramienta es fácil, asimismo lo es la navegación y la descarga de la información. Otra ventaja de esta herramienta es que se puede personalizar el área de estudio dibujando un polígono o cargando un archivo de la zona de interés.

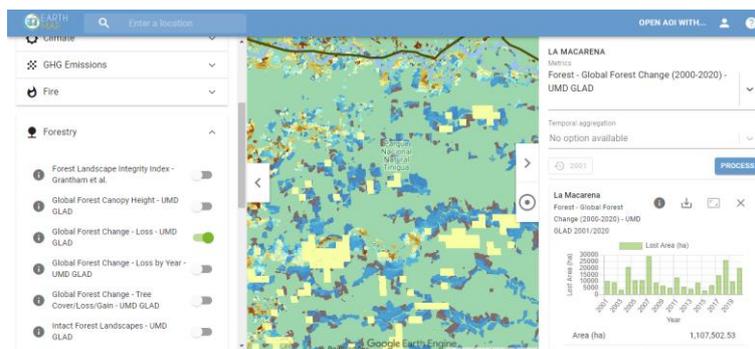


Figura 15. Visualización de los datos de pérdida de cobertura arbórea en la plataforma de EarthMap para una región definida

Tabla 8. Comparación de las características de las plataformas GFW, EarthMap y la herramienta elaborada

Características	GFW	EarthMap	Herramienta propia
Es de libre acceso	X	X	X
Visualiza datos de pérdida de bosque	X	X	X
El análisis es de carácter global	X	X	X
Ofrece información variada como datos sobre cambio climático, incendios...	X	X	
Permite personalizar la zona de estudio	X	X	X
Permite indicar la proporción de cobertura forestal	X		X
Se requiere conocimiento básico de programación			X
Fácil de navegar la plataforma y descarga sencilla	X	X	
Representa la variabilidad temporal de la deforestación (color distinto por cada año)		X	X
Representa la variabilidad espacial de la deforestación	X	X	X
Descarga los datos en formato GeoTIFF		X	X
Descarga los datos en formato xlsx o csv	X	X	X
Filtra las zonas deforestadas de acuerdo con la magnitud del área			X
Cuenta con un diagrama interactivo que actualiza los datos de área deforestada en respuesta a la zona enfocada			X

En comparación con EarthMap, la herramienta interactiva elaborada en este trabajo facilita conocer los datos de pérdida de cobertura arbórea a medida que se acerca alguna zona del polígono analizado dada la dinámica del diagrama que representa la deforestación anual en la plataforma *leaflet*, la cual actualiza los datos de acuerdo con la zona enfocada. Además, el filtro por áreas enfoca las superficies mayormente afectadas sin necesidad de hacer esfuerzos visuales

para determinar qué área posee mayor o menor dimensión. En la Tabla 8 se sintetizan algunas características con las que cuentan las plataformas analizadas y la herramienta desarrollada en el presente trabajo.

#### **4.4. Comparación de los datos de pérdida de cobertura arbórea de los PNN Tinigua y Los Picachos con los de la plataforma EarthMap**

Con el propósito de comprobar los datos de pérdida de cobertura arbórea obtenidos mediante la ejecución de la herramienta, se cargan los polígonos de los PNN Tinigua y Los Picachos en formato ‘kml’ a la plataforma EarthMap de donde se obtiene el área deforestada total anual para ambos parques (ver Tabla 9). Teniendo en cuenta que la base de datos de la que surgen los análisis del presente trabajo, así como la usada por EarthMap, proviene de GFC, Hansen et al. (2013) calculan que los datos de pérdida de bosque de GFC tienen una exactitud general del usuario y del productor superior al 80% para los distintos tipos de bosque.

Tabla 9. Área total deforestada anual de los PNN Los Picachos y Tinigua obtenida de la plataforma EarthMap y a partir de la herramienta creada

Año	PNN Los Picachos			PNN Tinigua		
	ATD (ha) EarthMap	ATD (ha) Herramienta propia	Estimación del ATD Earthmap vs ATD Herramienta propia (%)	ATD (ha) EarthMap	ATD (ha) Herramienta propia	Estimación del ATD Earthmap vs ATD Herramienta propia (%)
1	829,73	961,83	86,27	1775,19	2041,11	86,97
2	626,79	716,76	87,45	1295,90	1471,77	88,05
3	92,88	115,56	80,37	274,71	313,38	87,66
4	689,11	769,68	89,53	2133,43	2378,25	89,71
5	837,30	957,69	87,43	1734,88	2010,51	86,29
6	604,40	698,85	86,48	1538,94	1790,28	85,96
7	2011,03	2324,70	86,51	3691,88	4218,3	87,52
8	685,88	797,13	86,04	2132,40	2485,35	85,80
9	511,40	589,32	86,78	1871,58	2171,97	86,17
10	417,79	453,78	92,07	902,60	1019,34	88,55
11	242,22	272,43	88,91	1708,46	1964,88	86,95
12	704,30	822,96	85,58	1573,13	1830,87	85,92
13	514,52	600,12	85,74	1280,52	1487,43	86,09
14	526,10	603,99	87,10	2237,60	2577,87	86,80
15	46,02	42,93	107,20	320,77	341,28	93,99
16	141,65	153,36	92,36	1546,68	1773,00	87,24
17	649,52	734,31	88,45	2651,10	3052,08	86,86
18	2585,89	3014,19	85,79	12010,80	13989,51	85,86
19	118,19	132,30	89,33	5211,51	6075,99	85,77
<b>Total</b>	<b>12834,72</b>	<b>14761,89</b>	<b>88,39**</b>	<b>45892,08</b>	<b>52993,17</b>	<b>87,27**</b>

\* ATD: Área Total Deforestada

\*\* Promedio

En la Tabla 9 se listan los resultados del área total deforestada obtenidos mediante EarthMap y los del presente trabajo, asimismo el porcentaje de la estimación de ambos valores. De

acuerdo con EarthMap el área deforestada en el PNN Los Picachos en el período 2001-2019 es de 12.834,72 ha, en tanto que la herramienta indica un área de 14.761,89 ha. Para el caso del PNN Tinigua, estos valores corresponden a 45.892,07 ha y 52.993,17 ha, respectivamente. De este modo, se encuentra que los datos derivados de la herramienta se asemejan a los datos de la plataforma EarthMap, con una estimación promedio de 88,39 % para el polígono de Los Picachos y de 87,27% para el de Tinigua, con una sobrestimación de la magnitud generada por la herramienta propia, excepto para el año 2015 en el PNN Los Picachos, donde la estimación es de 107,2 %.

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1. Desarrollo de la herramienta

Los elementos implementados facilitan el entendimiento y la aplicación de la herramienta a usuarios con algún nivel de conocimiento en el programa utilizado. Por un lado, el procesador de texto *RMarkdown* fue ideal para combinar formato de texto con las líneas de código, mediante lo que se han generado los Anexos 2 y 4, donde se explicó cada función, así como las entradas y salidas correspondientes. Asimismo, se implementó el paquete *gfcanalysis*, el cual es un soporte de los datos de GFC que permitió la descarga de las teselas. En cuanto a la librería *Shiny*, fue idónea para el desarrollo de la interfaz interactiva donde se visualizan los datos de pérdida de bosque a través de *leaflet*, permitiendo al usuario personalizar el acercamiento de la zona analizada y el área deforestada.

Entre las ventajas de la herramienta está que permite visualizar en un mismo panel la deforestación para dos años del período de estudio, lo que contribuye a realizar comparativas visuales de los cambios en la superficie a causa de la deforestación, constituyendo un complemento de los valores reportados en las tablas de datos. En este caso, a partir de pequeñas modificaciones en el código, se pueden representar más de dos años en un mismo panel, de acuerdo con las necesidades del usuario.

La herramienta presenta otra alternativa para la visualización de la variabilidad espaciotemporal de la pérdida de la cobertura forestal a través de la librería *leaflet*, la cual facilita y dinamiza el análisis de la información, especialmente porque contiene el diagrama dinámico que ilustra el área deforestada de la superficie enfocada, es decir, a medida que el usuario realiza un acercamiento a una zona de interés dentro del polígono analizado, observa la magnitud de la deforestación ocurrida cada año. Asimismo, el filtro por área contribuye a

visualizar el escenario de la superficie de acuerdo con la magnitud de la pérdida de cobertura arbórea.

Mencionando otras ventajas, la herramienta realiza la descarga y el procesamiento de los datos GFC de pérdida de bosque de manera automática; indica la tendencia de la deforestación mediante el método robusto no paramétrico de la pendiente de Sen, lo que es un elemento para la toma de decisiones; y ofrece la interactividad en el panel de *Shiny* mediante la representación en *leaflet* que contribuye a identificar zonas críticas de deforestación, lo cual orienta las intervenciones en campo para mitigar las afectaciones. Además, esta herramienta de libre acceso constituye un elemento de análisis para los usuarios, quienes pueden interactuar y editar los códigos de acuerdo con las necesidades.

En cuanto a las desventajas, es necesario que el usuario cuente con conocimientos en programación para la manipulación de la herramienta; el tiempo de espera para la descarga y el procesamiento de los datos de GFC puede ser largo, lo que puede impacientar al usuario; adicionalmente, está conformada por tres fases principales que son la personalización de la zona de estudio, descarga y procesamiento, y representación en el panel de *Shiny*, por lo que el usuario debe manipular el script correspondiente a cada fase. En este sentido, con el propósito de orientar el proceso de ejecución de la herramienta, se incluyen textos explicativos que facilitan la comprensión del script de los Anexos 2 y 4, correspondientes a las funciones con las entradas editables para determinar la zona de estudio, y para la descarga y el procesamiento de los datos, respectivamente.

## **5.2. Aplicación de la herramienta**

A partir de la ejecución de la herramienta para el análisis de la variabilidad espaciotemporal de la pérdida de cobertura forestal se obtuvieron la Tabla 6 y la Tabla 7 que contienen los datos anuales del área promedio y total deforestada en los polígonos piloto de los PNN Tinigua y Los Picachos, lo que demuestra que la deforestación ocurrida en el año 2018 ha sido la más crítica para ambos parques, tal como lo han manifestado los medios de información nacionales.

Además de listar los datos de la pérdida total de bosque, la Tabla 6 y la Tabla 7 indican el área máxima deforestada anual con el punto de referencia para los PNN Tinigua y Los Picachos, respectivamente, lo que permite orientar y priorizar las intervenciones por parte de las autoridades ambientales a las zonas más críticas, además de jerarquizar cualquier validación en campo a que haya lugar dirigida a comprobar el estado del bosque y las causas asociadas a la afectación.

Los valores de pérdida de bosque obtenidos se compararon con los datos nacionales de deforestación en ambos parques hallados en la literatura, y se encontró que los datos de deforestación del PNN Tinigua para los años 2017, 2018 y 2019 reportados en el artículo periodístico de Paz (2021) concuerdan con los resultados obtenidos a través de la implementación de la herramienta elaborada. Paz (2021) encuentra que para estos años se deforestaron aproximadamente 3.000, 12.000 y 6.500 ha, respectivamente, para un total de 22.500 ha deforestadas en ese período de tres años, en tanto que la Tabla 6 lista los valores de 3.052, 13.989 y 6.075 ha para los años 2017, 2018 y 2019, respectivamente, para un total de 23.116 ha.

Al comparar los resultados del área deforestada del PNN Tinigua hallados en la literatura y el de la herramienta con los de EarthMap, se encuentra que para el año 2017 el dato de la literatura y el obtenido en este estudio presentan mayor concordancia en comparación con el reporte de EarthMap, lo mismo ocurre para el año 2019. No obstante, para el 2018 el dato de área deforestada de la literatura y el de EarthMap son básicamente el mismo, esto es, 12.000 ha y 12.010, respectivamente, encontrándose mayor diferencia con el valor hallado con la herramienta (13.989 ha).

En cuanto al PNN Los Picachos, se encontraron en la literatura los datos de deforestación para el año 2017 con 1.064 ha (IDEAM, 2017) y el 2018 con 2.045 ha (Semana, 2019), para un total de 3.109 ha deforestadas, en tanto que mediante la herramienta se obtuvieron los datos de 734 y 3.014 ha (ver Tabla 7), respectivamente, para un total de 3.748 ha. En este caso, los resultados difieren un poco, por lo que se comparan los datos con los de la plataforma EarthMap, donde se encuentra que para el año 2017 hay mayor similitud entre el valor encontrado en la literatura con el de la herramienta creada. Por otro lado, para el 2018, el dato de EarthMap es, aproximadamente, un valor medio entre lo obtenido con la herramienta y lo hallado en la literatura.

Las gráficas de la variabilidad anual de la deforestación de la Figura 4 y la Figura 9 facilitan la lectura de los cambios de la cobertura forestal de los polígonos piloto durante el período de estudio, de esta forma, se encontró que el 2003 y el 2015 fueron los años donde se presentó menor área deforestada en ambos parques. Con relación a este comportamiento de la deforestación, y en general, al del período 2001 – 2019, se analizarán en estudio posteriores todas las áreas boscosas protegidas del país, para reconocer la tendencia en el resto del territorio, especialmente porque el valor de la pendiente de Sen reveló una tendencia en el aumento de las

áreas deforestadas para el PNN Tinigua, en tanto que para el PNN Los Picachos la tendencia fue a la baja.

La representación cartográfica de la variabilidad espaciotemporal de la pérdida de cobertura forestal mostró que la dinámica de la deforestación ha sido distinta para los PNN Tinigua y Los Picachos, por un lado, en Tinigua se observa que durante los primeros años evaluados la deforestación se centró en los límites del parque y fue avanzando con el tiempo hacia el interior. En tanto que, en Los Picachos la deforestación tiene un comportamiento homogéneamente distribuido en todo el polígono durante el período 2001 – 2019, con mayor concentración en el sureste en los últimos años. Entre las hipótesis de este comportamiento está que el acceso a Los Picachos ha sido más fácil para los acaparadores de tierra desde los primeros años de estudio, caso distinto a Tinigua donde se abrieron paso a partir de la frontera del parque; también puede ser que las zonas deforestadas responden a la disponibilidad de servicios ecosistémicos, como el recurso hídrico.

Aunque el área del PNN Los Picachos duplica al área del PNN Tinigua, la pérdida de cobertura forestal total y anual fue mayor en Tinigua que en Los Picachos, aún cuando en una zona de menor dimensión es probable ejercer mayor control y seguimiento que en una zona más grande por parte de las autoridades ambientales. En este aspecto, se destaca la valiosa y riesgosa labor de los guardaparques de Parques Nacionales Naturales de Colombia, así como de los líderes ambientales presentes en esta región del país, quienes constantemente son amenazados por los grupos armados que han agudizado la presencia en el territorio, atemorizando e impidiendo que los funcionarios ejerzan su labor (Luque, 2019).

## 6. CONCLUSIONES

Se desarrolló la herramienta interactiva para el análisis de la variabilidad espaciotemporal de la deforestación en un área personalizada mediante las librerías del programa R que facilitaron la descarga de los datos de la plataforma GFC, el procesamiento, así como la representación gráfica y cartográfica de los resultados. Entre las librerías empleadas están *gfcanalysis*, *leaflet* y *Shiny*.

*gfcanalysis* permitió descargar la información en formato ráster de GFC a partir del polígono de la zona de estudio y de la proporción de la cobertura forestal de la cuadrícula; mediante *leaflet* se ilustró cartográficamente la información de manera dinámica y sencilla; en tanto que en *Shiny* se ofreció un panel donde el usuario puede filtrar datos de acuerdo con la magnitud del área y precisar la pérdida de cobertura forestal en una zona enfocada.

Mediante el desarrollo de funciones en el programa R se descargaron y analizaron los datos de pérdida de bosque en formato ráster disponibles en la plataforma GFC, a partir de los cuales se generaron tabla de datos anuales de pérdida de bosque en una zona determinada, gráficos de tendencia anual de deforestación y representaciones visuales que ilustran la variabilidad espaciotemporal de la pérdida de bosque.

La herramienta creada para el análisis de la variabilidad espaciotemporal de la pérdida de cobertura forestal ofrece elementos que facilitan la personalización del área y de los datos que se desean observar, no obstante, la desventaja principal de la herramienta es que el usuario requiere conocimiento en programación o del programa implementado.

A pesar de las plataformas existentes, el desarrollo de nuevas herramientas para el monitoreo de los cambios de la cobertura arbórea es esencial, dado que pueden aportar elementos que complementan y facilitan el análisis, en este caso, la interfaz creada mediante la librería *leaflet* ofrece mayor dinamización de la información procesada.

El código de la herramienta es de libre acceso ([https://bitbucket.org/estefania58/anexos\\_tfm/src/master/gfc\\_app/](https://bitbucket.org/estefania58/anexos_tfm/src/master/gfc_app/)), por lo que el usuario de manera colaborativa puede modificarlo, mejorarlo y reproducirlo. Además, de manera autónoma, se adquiere el compromiso de actualizar el período de estudio de acuerdo con la disponibilidad de los datos en la plataforma GFC, asimismo, implementar métodos estadísticos para conocer y mejorar la exactitud de los datos de deforestación obtenidos mediante la herramienta.

La herramienta ofrece el método robusto no paramétrico de la pendiente de Sen que indica la tendencia de la deforestación en el polígono estudiado, constituyendo un insumo para la toma de decisiones. En este sentido, para complementar la herramienta se implementarán métodos estadísticos que calculen la predicción de la deforestación, ofreciendo mecanismos que contribuyan a ejercer acciones que eviten la pérdida acelerada de cobertura arbórea.

La herramienta funcionó de manera correcta en el ensayo piloto con los polígonos de los PNN Tinigua y Los Picachos, asimismo se aplicó la opción dos del Anexo 2 que corresponde a la descarga del polígono de acuerdo con la división administrativa global, y la opción tres que crea el polígono mediante los puntos de coordenadas, con lo que se obtuvieron resultados positivos en cuanto al funcionamiento que se omiten en este trabajo.

La herramienta permitió detectar vastas áreas deforestadas en los PNN Tinigua y Los Picachos comprobando la crítica situación de Colombia en cuanto a la conservación de los

recursos forestales y la condición de víctima de los ecosistemas del país a causa de los distintos escenarios de conflicto que no han cesado hoy en día. Se espera que al reconocer el problema de la deforestación a través de los distintos mecanismos disponibles, el presente gobierno y los posteriores, refuercen las estrategias y los recursos para mitigar el acaparamiento de tierras en zonas de conservación.

La comparación de los resultados de pérdida de bosque obtenidos mediante la herramienta con los arrojados por las plataformas existentes, revelan que en todo caso es primordial la validación de la información en campo o con elementos de mayor precisión (ortofotos) para tener mayor exactitud en las estimaciones.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Acuña, N. (2019) *Página web de Mongabay*. Disponible en: <https://es.mongabay.com/2019/11/parque-nacional-picachos-colombia-operativo-militar-aumenta-el-peligro/> (Accedido: 22 Julio 2022)

Amani, P. K. (2017) "Building National Capacity To Implement National Forest Monitoring System In Africa By GLAD", *American Geophysical Union*, p. GC11F-04

Bellosta, C. (2018) *Página web de datanalytics*. Disponible en: [https://datanalytics.com/libro\\_r/shiny.html](https://datanalytics.com/libro_r/shiny.html) (Accedido: 22 Julio 2022)

Bivand, R., Pebesma, E. y Gómez-Rubio, V. (2008) *Applied Spatial Data Analysis with R*. Nueva York: Springer

Boccardo, G. y Ruiz, F. (2017) *Página web de Bookdown*. Disponible en: <https://bookdown.org/gboccardo/manual-ED-UCH/introduccion-al-uso-de-rmarkdown-para-la-compilacion-de-resultados-de-rstudio-en-diferentes-formatos.html> (Accedido: 4 Junio 2022)

Booth, B. y Mitchell, A. (2001) *Getting Started with ArcGIS*. Nueva York: ESRI

Colparques (2022a) *Página web de Colparques*. Disponible en: <http://www.colparques.net/TINIGUA> (Accedido: 22 Julio 2022)

Colparques (2022b). *Página web de Colparques*. Disponible en: <http://www.colparques.net/PICACHOS#aceptar> (Accedido: 22 Julio 2022)

Cooper, M. y Zvoleff, A. (2020) "Package 'gfcanalysis'". Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/gfcanalysis/gfcanalysis.pdf> (Accedido: 4 Agosto 2022)

Cruz, K., Leite, C., Shimabukuro, Y., Arai, E., Oliveira, L., Silva, C. y Marshall, P. (2019) "Determining a Threshold to Delimit the Amazonian Forests from the Tree Canopy Cover 2000 GFC Data", *Sensors*, 19 (22), p. 5020

Doi, J., Potter, G., Wong, J., Alcaraz, I. y Chi, P. (2016) "Web Application Teaching Tools for Statistics Using R and Shiny", *Technology Innovations in Statistics Education*, 9 (1), pp. 1-33

European Space Agency (2022) *Página web de Earth Online*. Disponible en: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/resourcesat-2> (Accedido: 30 Julio 2022)

European Space Imaging (2018) *Página web de European Space Imaging*. Disponible en: <https://www.euspaceimaging.com/wp-content/uploads/2018/06/EUSI-SWIR.pdf> (Accedido: 30 Julio 2022)

FAO (1947) *Página web de FAO*. Disponible en: <https://www.fao.org/3/x5345e/x5345e03.htm#preparations%20for%20the%20forest%20inventory,%201947> (Accedido: 4 Julio 2022)

FAO (1982) *Tropical Forest Resources*, Roma: FAO Forestry Paper

FAO (1993) *Forest Resources Assessment 1990: Tropical Countries*, Roma: FAO Forestry Paper

FAO (2002) *PAN - TROPICAL SURVEY OF FOREST COVER CHANGES 1980-2000*, Roma: Forest Resources Assessment Programme

FAO (2016) *Global Forest Resources Assessment 2015*, Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations

Geist, H. y Lambin, E. (2022) "Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation" *BioScience*, 52 (2), pp. 143-150

GLAD (2022) *Página web de Global Land Analysis and Discovery*. Disponible en: <https://glad.umd.edu/projects/global-forest-watch> (Accedido: 31 Julio 2022)

Hansen, M., Stehman, S. y Potapov, P. (2010) "Quantification of global gross forest cover loss" *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (19), pp. 8650-8655

Hansen, M., Potopov, P., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S., Goetz, S., Loveland, T., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. y

Townshend, J. (2013) "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change" *Science*, 342 (850), pp. 850-853

Hansen, M., Potapov, P., Pickens, A., Tyukavina, A., Hernández-Serna, A., Zalles, V., Turubanova, S., Kommareddy, I., Stehman, S., Song, X. y Kommareddy, A. (2022) "Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data" *Environmental Research*, 17 (3), p. 034050

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2017) *Página web de IDEAM*. Disponible en: [http://www.ideam.gov.co/documents/24277/72115631/Actualizacion\\_cifras2017+FINAL.pdf/40bc4bb3-370c-4639-91ee-e4c6cea97a07](http://www.ideam.gov.co/documents/24277/72115631/Actualizacion_cifras2017+FINAL.pdf/40bc4bb3-370c-4639-91ee-e4c6cea97a07) (Accedido: 23 Julio 2022)

IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2004) *Página web de IGAC*. Disponible en: <https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/adopcion.pdf> (Accedido: 14 Junio 2022)

INPE - Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (2019) *Página web de INPE*. Disponible en: <http://www.cbers.inpe.br/sobre/cameras/cbers3-4.php> (Accedido: 31 Julio 2022)

INPE - Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (2022) *Página web de INPE*. Disponible en: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes> (Accedido: 30 Julio 2022)

Keenan, R., Reams, G., Achard, F., De Freitas, J., Grainger, A. y Lindquist, E. (2015) "Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015" *Forest Ecology and Management*, 352, pp. 9-20.

Lanly, J. (1981) *Tropical Forest Resources Assessment Project (GEMS): Tropical Africa, Tropical Asia, Tropical America*. 4 ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Luque, S. (2019) *Página web de Rutas del Conflicto*. Disponible en: <https://rutasdelconflicto.com/especiales/parques-objetivo-guerra/tinigua.html> (Accedido: 23 Julio 2022)

Murakami, T. (2006) "How is Short-wave Infrared (SWIR) Useful to Discrimination and Classification of Forest Types in Warm Temperate Region?" *Journal of Forest Planning*, 12 (2), pp. 81-85

Parques Nacionales Naturales de Colombia (2018) *Página web de Parques Nacionales Naturales de Colombia*. Disponible en: <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/se-adelantan-acciones-para-frenar-deforestacion-en-el-parque-nacional-natural-tinigua/> (Accedido: 23 Julio 2022)

Parques Nacionales Naturales de Colombia (2022) *Página web de Parques Nacionales Naturales de Colombia*. Disponible en: <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/parques-nacionales/parque-nacional-natural-tinigua/> (Accedido: 22 Julio 2022)

Paz, A. (2021) "Parque Tinigua: solo en la última semana de marzo las alertas de deforestación superaron las 50 mil", *Mongabay*, Disponible en: <https://es.mongabay.com/2021/04/colombia-deforestacion-en-el-parque-tinigua/> (Accedido: 23 Julio 2022)

Potapov, P., Yaroshenko, A., Turubanova, S., Dubinin, M., Laestadius, L., Thies, C., Aksenov, D., Egorov, A., Yesipava, Y., Glushkov, I., Karpachevskiy, M., Kostikova, A., Manisha, A. y Tsybikova, E. (2008) "Mapping the World's Intact Forest Landscapes by Remote Sensing" *Ecology and Society*, 13 (2)

Salazar, A., Salazar, J., Sánchez, S., Sanchez, A., Lasso, E., Villegas, J., Arias, P., Poveda, G., Rendón, Á., Uribe, M., Pérez, J. y Dukes, J. (2021) "Undermining Colombia's peace and environment" *Science*, 373 (6552), pp. 289-290

Salazar, A., Sanchez, A., Dukes, J., Salazar, J., Clerici, N., Lasso, E., Sánchez-Pacheco, S., Rendón, Á., Villegas, J., Sierra, C., Poveda, G., Quesada, B., Uribe, M., Rodríguez-Buriticá, S., Ungar, P., Pulido-Santacruz, P., Ruiz-Morato, N. y Arias, P. (2022). "Peace and the environment at the crossroads: Elections in a conflict-troubled biodiversity hotspot" *Environmental Science & Policy*, 135, pp. 77-85

Salazar, A., Sanchez, A., Villegas, J., Salazar, J., Ruiz, D., Sitch, S., Restrepo, J., Poveda, G., Feeley, K., Mercado, L., Arias, P., Sierra, C., Uribe, M., Rendón, Á., Pérez, J., Murray, G., Mercado-Bettin, D., Posada, J., Zhuang, Q. y Dukes, J. (2018) "The ecology of peace: preparing Colombia for new political and planetary climates" *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16 (9), pp. 1-7

Santos, J., Soares, L., Oliveira, L. y Aragao, C. (2014) "Remote sensing of amazonian forests: monitoring structure, phenology and responses to environmental changes" *Revista Brasileira de Cartografia*, 3 (66/7), pp. 1413-1436

Satellite Imaging Corporation (2022) *Página web de Satellite Imaging Corporation*. Disponible en: [satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/cbers-4/](https://satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/cbers-4/) (Accedido: 30 Julio 2022)

Semana (2019) "197.159 hectáreas se deforestaron en 2018 en Colombia" *Semana*, Disponible en: <https://www.semana.com/197159-hectareas-se-deforestaron-en-2018-en-colombia/44952/> (Accedido: 9 Julio 2022)

Semana (2020) "Incendio consume 30 hectáreas del Parque Nacional Natural Tinigua" *Semana*, Disponible en: <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/incendio-consume-30-hectareas-del-parque-nacional-tinigua/48667/> (Accedido: 9 Julio 2022)

Sen, P. (1968) "Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau" *Journal of the American Statistical Association*, 63 (324), pp. 1379-1389

Skole, D. y Tucker, C. (1993) "Tropical Deforestation and Habitat Fragmentation in the Amazon: Satellite Data from 1978 to 1988" *Science*, 260 (5116), pp. 1905-1910

USGS (2022a) *Página web de USGS Science for a changing world*. Disponible en: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-best-landsat-spectral-bands-use-my-research> (Accedido: 30 Julio 2022)

USGS (2022b) *Página web de USGS Science for a Changing World*. Disponible en: <https://lpdaac.usgs.gov/data/get-started-data/collection-overview/missions/modis-overview/#top> (Accedido: 30 Julio 2022)

USGS (2022c) *USGS Science for a Changing World*. Disponible en: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (Accedido: 30 Julio 2022)

Zhang, D., Wang, H., Wang, X. y Lü, Z. (2020) "Accuracy assessment of the global forest watch tree cover 2000 in China" *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 29, p. 105238

## ANEXOS

### ANEXOS 1 – 7. Enlace del repositorio de Bitbucket con los Anexos del 1 – 7

En el enlace [https://bitbucket.org/estefania58/anexos\\_tfm/src/master/](https://bitbucket.org/estefania58/anexos_tfm/src/master/) se encuentran los anexos que complementan el presente trabajo. Además, se incluyen las carpetas de los datos de entrada y la de los archivos de salida generadas en el ejercicio de la implementación de la herramienta con las dos áreas piloto. Para efectos prácticos, también se incluyen en la carpeta de entrada los polígonos creados mediante coordenadas y el polígono descargado de GADM, con los cuales también se puede comprobar la herramienta. De esta manera, en el repositorio se encuentran los siguientes anexos:

**Anexo 1.** Fichero R de la función para personalizar la zona de estudio

**Anexo 2.** Fichero RMarkdown que hace el llamado al archivo del Anexo 1

**Anexo 3.** Fichero R de las funciones para la descarga, el procesamiento y la representación de datos de GFC

**Anexo 4.** Fichero RMarkdown que hace el llamado a las funciones del Anexo 3

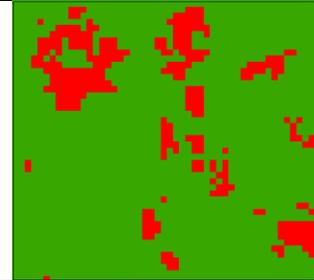
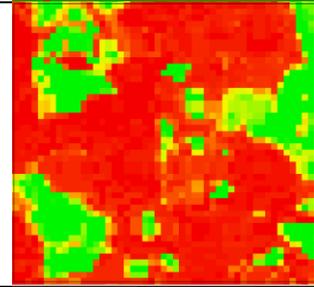
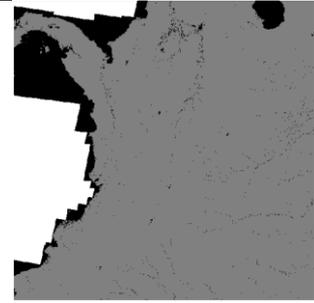
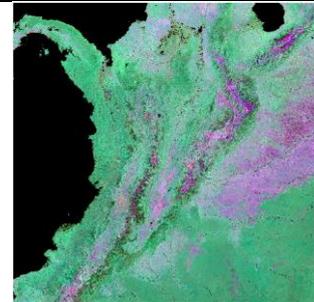
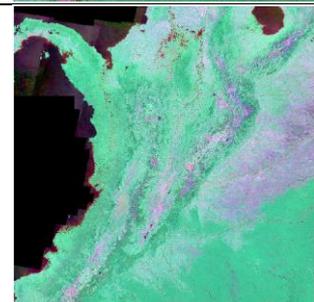
Los archivos para la aplicación de Shiny reposan en la carpeta ‘gfc\_app’ del mismo repositorio. En esta carpeta se encuentran los siguientes archivos:

**Anexo 5.** Fichero R con el bloque Global

**Anexo 6.** Fichero R con el bloque Ui

**Anexo 7.** Fichero R con el bloque Server

**Anexo 8. Muestras de los datos descargables de GFC: ganancia de bosque (gain); porcentaje de cobertura arbórea por píxel para el año 2000 (treecover2000); capa con la información de superficie mapeada, área sin datos y cuerpos de agua permanentes (datamask); imagen de referencia sin nubes cercana al año 2000; e imagen de referencia sin nubes del último año de análisis (2019)**

 <p>Hansen_GFC-2019-v1.7_gain_10N_080W.tif Value 0 1</p>	<p>Ganancia de bosque, donde: 0: no hay ganancia 1: pixeles con ganancia de bosque</p>
 <p>Hansen_GFC-2019-v1.7_treecover2000_10N_080W.tif Value High: 100 Low: 0</p>	<p>Cobertura de bosque en el año 2000, donde: 0-100: porcentaje de cobertura de vegetación de más de 5 m de altura por píxel</p>
 <p>Hansen_GFC-2019-v1.7_datamask_10N_080W.tif Value 0 1 2</p>	<p>Imagen de superficie mapeada, área sin datos y cuerpos de agua permanentes, donde: 0: sin datos 1: superficie mapeada 2: cuerpos de agua</p>
 <p>Hansen_GFC-2019-v1.7_first_10N_080W.tif RGB Red: Band_1 Green: Band_2 Blue: Band_3</p>	<p>Imagen de referencia sin nubes del año 2000</p>
 <p>Hansen_GFC-2019-v1.7_last_10N_080W.tif RGB Red: Band_1 Green: Band_2 Blue: Band_3</p>	<p>Imagen de referencia sin nubes del año 2019</p>