

Análisis espaciotemporal de la deforestación en el campus mutile (2005-2023) usando Google Earth Engine

Spatio-temporal analysis of deforestation on the mutile campus (2005-2023) using Google Earth Engine

MARTÍNEZ, DIEGO¹; CAMACHO, RAÚL¹; BAUTISTA, BORYS²; VEGA, ISRAEL³

¹R&MConsulting. Ecuador

²Cooperativa de ahorro y créditos Artesanos. Ecuador

³Meteorológicas- UTLVTE. FACAP. Ecuador

Autores

Autor de correspondencia
diegokamilomartinez@gmail.com.

Fecha de recepción

01/09/2024

Fecha de aceptación

18/10/2024

Fecha de publicación

01/11/2024

Martínez Martínez, Diego Camilo
Magister en Geología petrolera, actualmente supervisor de proyectos en Proterra-Venezuela.

Afiliación: R&MConsulting.

Correo-e: diegokamilomartinez@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8382-2293>

Camacho Marín, Raúl Alfonso

Magister en Gerencia de Recursos Humanos, Especialista en Gerencia de Investigación y Desarrollo I+D. Actualmente consultor organizacional de proyectos de investigación. Afiliación: R&MConsulting.

Correo-e: rcamacho2475@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8386-4039>

Bautista Garnica, Borys Armando

Maestrante en Ingeniería y Tecnología Ambiental, actualmente asesor de negocios en la Afiliación: Cooperativa de ahorro y créditos Artesanos.

Correo-e: brsbautista@live.com.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2378-218X>

Vega Macias, Israel Patricio

Ingeniero Forestal, Master en Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas. Actualmente Técnico docente- laboratorio de sistemas de información geográfica y estaciones

Afiliación: Meteorológicas- UTLVTE. FACAP.

Correo-e: israel.vega@catie.ac.cr

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6105-5935>

Citación:

Martínez, D., Camacho, R., Bautista, B. y Vega, I. (2024). Análisis espaciotemporal de la deforestación en el campus mutile (2005-2023) usando Google Earth Engine. *GICOS*, 9(3), 226-243

DOI:



RESUMEN

Este estudio analiza la deforestación en el campus Mutile de la Universidad Técnica Luis Vargas Torres entre 2005 y 2023, utilizando imágenes satelitales procesadas con Google Earth Engine (GEE). El objetivo principal es cuantificar el área total deforestada, identificar los años con mayor pérdida de cobertura forestal y analizar la tendencia de la deforestación a lo largo del tiempo. Mediante el análisis de imágenes de los satélites Landsat 5, 7 y 8, se estimó una pérdida total de 51.82 hectáreas, con picos significativos en los años 2017 y 2012, donde se registraron 18.9 ha y 11.97 ha de deforestación, respectivamente. El análisis estadístico reveló una media anual de deforestación de 5.03 ha, con una desviación estándar de 6.86 ha, lo que indica una alta variabilidad en los datos. Además, la regresión lineal mostró una pendiente de 0.11 ha/año, sugiriendo una tendencia moderadamente creciente de deforestación en el periodo estudiado. La visualización mediante un boxplot destacó la presencia de valores atípicos, reflejando eventos esporádicos de alta intensidad en la tala ilegal. Las recomendaciones incluyen el establecimiento de un sistema de monitoreo continuo con GEE, el fortalecimiento de la vigilancia y la implementación de políticas de conservación en áreas críticas del campus. Este estudio subraya la importancia de la teledetección para la gestión sostenible de los recursos forestales en zonas vulnerables.

Palabras clave: deforestación, Landsat, Google Earth Engine, satélite.

ABSTRACT

This study analyzes deforestation in the Mutile campus of the Universidad Técnica Luis Vargas Torres between 2005 and 2023, using satellite images processed with Google Earth Engine (GEE). The main objective is to quantify the total deforested area, identify the years with the greatest loss of forest cover, and analyze the trend of deforestation over time. By analyzing images from Landsat 5, 7 and 8 satellites, a total loss of 51.82 ha was estimated, with significant peaks in the years 2017 and 2012, where 18.9 ha and 11.97 ha of deforestation were recorded, respectively. Statistical analysis revealed an annual mean deforestation of 5.03 ha, with a standard deviation of 6.86 ha, indicating high variability in the data. In addition, the linear regression showed a slope of 0.11 ha/year, suggesting a moderately increasing trend of deforestation over the period studied. Visualization using a boxplot highlighted the presence of outliers, reflecting sporadic events of high intensity illegal logging. Recommendations include the establishment of a continuous monitoring system with ESG, the strengthening of surveillance, and the implementation of conservation policies in critical areas of the campus. This study highlights the importance of remote sensing for sustainable management of forest resources in vulnerable areas.

Keywords: deforestation, Landsat, Google Earth Engine, satellite.

En la actualidad, la deforestación es uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial, con consecuencias devastadoras para la biodiversidad, el clima y las comunidades humanas que dependen de los recursos forestales. Según datos recientes de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se pierden aproximadamente 10 millones de hectáreas de bosques al año, afectando principalmente a las regiones tropicales de América Latina, África y el sudeste asiático (FAO, 2020). Este fenómeno no solo contribuye al calentamiento global mediante la liberación de carbono almacenado, sino que también pone en peligro a miles de especies que habitan en estos ecosistemas (Montoya et al., 2023). A pesar de los esfuerzos internacionales por reducir la pérdida de cobertura forestal, las actividades humanas como la tala ilegal y la expansión agrícola continúan siendo las principales causas de la deforestación (Valverde, 2022), lo que exige la adopción de nuevas tecnologías y estrategias para su monitoreo y mitigación.

En este sentido, el cambio climático y la deforestación se han convertido en problemas ambientales críticos a nivel global, afectando tanto a los ecosistemas como a la biodiversidad. En regiones tropicales, como en la provincia de Esmeraldas, Ecuador, la pérdida de cobertura forestal ha acelerado la degradación de los recursos naturales (Valverde, 2022). La deforestación no solo impacta en términos ecológicos, sino también en las comunidades locales que dependen del bosque para obtener ingresos económicos; en este contexto, es fundamental contar con herramientas que permitan monitorear de manera precisa los cambios en la cobertura forestal, con el fin de generar medidas correctivas y de conservación (Perilla et al., 2020).

En los últimos años, el uso de tecnologías de teledetección ha permitido avanzar significativamente en la capacidad de monitorear la deforestación a través de imágenes satelitales y procesamiento digital. Es por ello, que herramientas como Google Earth Engine (GEE) han emergido como plataformas esenciales para el procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos espaciales. Estudios recientes destacan que GEE facilita el monitoreo de áreas vulnerables en tiempo real, optimizando la toma de decisiones sobre la gestión de recursos forestales (Huacani et al., 2022). Estas plataformas permiten acceder a datos satelitales históricos, lo que las convierte en una opción ideal para estudios longitudinales de deforestación (Guzmán, 2021).

En este particular, el campus Mutile, perteneciente a la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, ha sido víctima de deforestación ilegal desde 2005, lo que ha provocado la pérdida de grandes extensiones de bosque primario y secundario. Los taladores ilegales, aprovechando la falta de guardabosques y los escasos recursos para la vigilancia, han extraído madera de especies valiosas como la balsa y la caoba, afectando el equilibrio del ecosistema local (Martínez, 2020). Por ello, el estudio busca cuantificar la deforestación anual en el campus Mutile entre 2005 y 2023, utilizando imágenes satelitales procesadas a través de Google Earth Engine. Este análisis no solo permitirá identificar las áreas más afectadas, sino también contribuirá a diseñar estrategias para mitigar la pérdida forestal en el futuro.

El campus Mutile ubicado en la provincia de Esmeraldas en la República del Ecuador, con una extensión de 847 hectáreas, las cuales sirven de sede a la Facultad de Ciencias Agropecuarias FACAP de la UTLVTE, ha

sufrido un deterioro ambiental en las últimas dos décadas debido a la actividad ilegal de tala de árboles. A pesar de los esfuerzos aislados por parte de las autoridades locales, la falta de un sistema de vigilancia adecuado ha permitido que taladores ilegales continúen explotando este recurso natural valioso, de donde extraen recursos madereros de alta calidad entre los que destacan variedades como: Balsa, Caoba, Laurel y Jagua. Esta situación es preocupante, ya que el bosque primario y secundario del campus alberga una rica biodiversidad que está siendo gravemente afectada. La Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, propietaria del terreno, ha visto cómo estas actividades no solo deterioran el ecosistema, sino también comprometen sus proyectos académicos y de investigación (Bone, 2019).

El problema de la deforestación no es exclusivo de Ecuador; se ha documentado que la pérdida de cobertura forestal en América Latina ha incrementado drásticamente en los últimos años debido a la falta de vigilancia y la limitada capacidad institucional para gestionar los bosques (Perilla et al., 2020). Investigaciones recientes destacan que las áreas rurales en países tropicales, donde la supervisión es escasa y los recursos forestales abundan, son las más vulnerables a la deforestación (Huacani et al., 2022). En Ecuador, aunque se han establecido políticas de conservación, la implementación de medidas eficaces sigue siendo un desafío, particularmente en áreas de difícil acceso como el campus Mutile (Valverde Chávez, 2022). Esto ha generado una crisis ambiental que no solo afecta la biodiversidad local, sino también contribuye al cambio climático global debido al aumento de las emisiones de carbono asociadas a la tala indiscriminada (Montoya et al., 2023).

Por lo anteriormente expuesto, se consideró como propósito de esta investigación cuantificar la deforestación anual en el campus Mutile entre 2005 y 2023 mediante el uso de imágenes satelitales procesadas en Google Earth Engine, y proporcionar una base para la toma de decisiones en la gestión de áreas protegidas.

El uso de tecnologías de teledetección ha emergido como una herramienta clave para enfrentar este problema. Plataformas como Google Earth Engine permiten analizar y monitorear grandes áreas forestales con datos satelitales en tiempo real, lo que facilita la identificación de zonas críticas afectadas por la deforestación. Sin embargo, la aplicación de estas tecnologías sigue siendo limitada en muchas regiones de América Latina debido a la falta de conocimiento técnico y recursos (Fernández & Ángel, 2017). En el caso del campus Mutile, la implementación de estas herramientas podría proporcionar información valiosa para la toma de decisiones y la planificación de medidas de mitigación a largo plazo (Martínez, 2020). Este estudio busca precisamente aprovechar las capacidades de Google Earth Engine para cuantificar la deforestación en el campus, contribuyendo a una mejor gestión y protección de los recursos naturales de la zona.

Según la información disponible en la página web del Consejo de la Judicatura de la República del Ecuador, en la causa número 08282201601945 de julio de 2016, se documenta un delito ambiental cometido en el campus Mutile. Este incidente destaca como una de las pocas ocasiones en las que los responsables han sido capturados en flagrancia, ya que, en la mayoría de los casos, solo se encuentran evidencias posteriores del delito. Ante esta situación, es crucial cuantificar tanto el área de deforestación anual como la acumulada, identificar las zonas con mayor recurrencia delictiva, y desarrollar una función que relacione el área deforestada con el tiempo.

Esta información permitirá a las autoridades universitarias implementar medidas más efectivas para proteger el bosque de Mutile y mitigar la deforestación.

El uso de datos obtenidos por teledetección se utiliza para realizar inventarios en áreas como: cálculos de cultivos; inventarios forestales; problemas de contaminación del agua, aire y suelo, entre otros, que permite a los gestores ambientales la medición, valoración y control de los recursos naturales (Logroño-Naranjo et al., 2020). Existen varios métodos para extraer y visualizar el conjunto de datos de teledetección. Uno de ellos utiliza GEE, API de JavaScript, donde se pueden analizar directamente los resultados de las composiciones anuales de Landsat usando el ID UMD/Hansen/global_forest_change_2029_v1_8 generando así los índices de la pérdida de árboles desde el año 2000 para las regiones de interés (Hansen et al., 2013). En el caso del campus Mutile la cuantificación de la deforestación anual ha sido estimada usando los datos Landsat procesados por el GFC, esta investigación pretende usar esta base de datos para generar imágenes satelitales e histogramas de pérdida de bosque en el campus Mutile y, de esta manera, hacer la cuantificación de deforestación anual y acumulada desde el año 2005 (año en el que se genera el primer cambio respecto al año 2000) hasta 2023.

Área geográfica de estudio

El campus Mutile se localiza en la parroquia San Mateo del Cantón Esmeraldas en la Provincia de Esmeraldas la cual pertenece a la región costa de la República del Ecuador. El campus Mutile tiene 847 hectáreas de superficie; presenta un clima tropical húmedo con temperaturas que oscilan entre los 25 y 28 grados centígrados, la precipitación promedio anual suele superar los 2000 mm siendo la estación de lluvias entre los meses de diciembre y mayo. La elevación en el campus Mutile oscila entre los 9 msnm en su límite con el río Esmeraldas hasta poco más de los 300 msnm en su parte más alta; la vegetación es exuberante y gran parte de su área está cubierta por bosque tropical húmedo, dentro de las especies más comunes destacan árboles como Laurel, Balsa y Caoba y plantas como café y cacao. En las especies de fauna observadas destacan mamíferos como el mono aullador y el armadillo, aves como el tucán y el colibrí y reptiles y anfibios como serpientes y ranas. La colindancia del campus Mutile con el río Esmeraldas ha brindado un enorme aporte para el desarrollo de las actividades de la FACAP aportando agua que a través de sistemas de riego sirve a los proyectos de agricultura, silvicultura, ganadería y piscicultura.

El uso de tecnologías de teledetección ha sido clave en el monitoreo y control de la deforestación a nivel global. Gonçalves et al. (2021) realizaron un estudio en la Amazonía brasileña, empleando imágenes satelitales Landsat para cuantificar la pérdida de cobertura forestal en áreas protegidas, destacando que la deforestación en estas zonas ha incrementado a pesar de las políticas de conservación. Por otro lado, Adusei et al. (2020) aplicaron Google Earth Engine en Ghana para evaluar el impacto de la tala selectiva en la biodiversidad, concluyendo que la plataforma permitió una identificación precisa de las zonas afectadas, promoviendo la implementación de medidas correctivas. Estos estudios demuestran cómo las tecnologías de teledetección han facilitado el análisis multitemporal y espacial de la deforestación en distintas regiones del mundo.

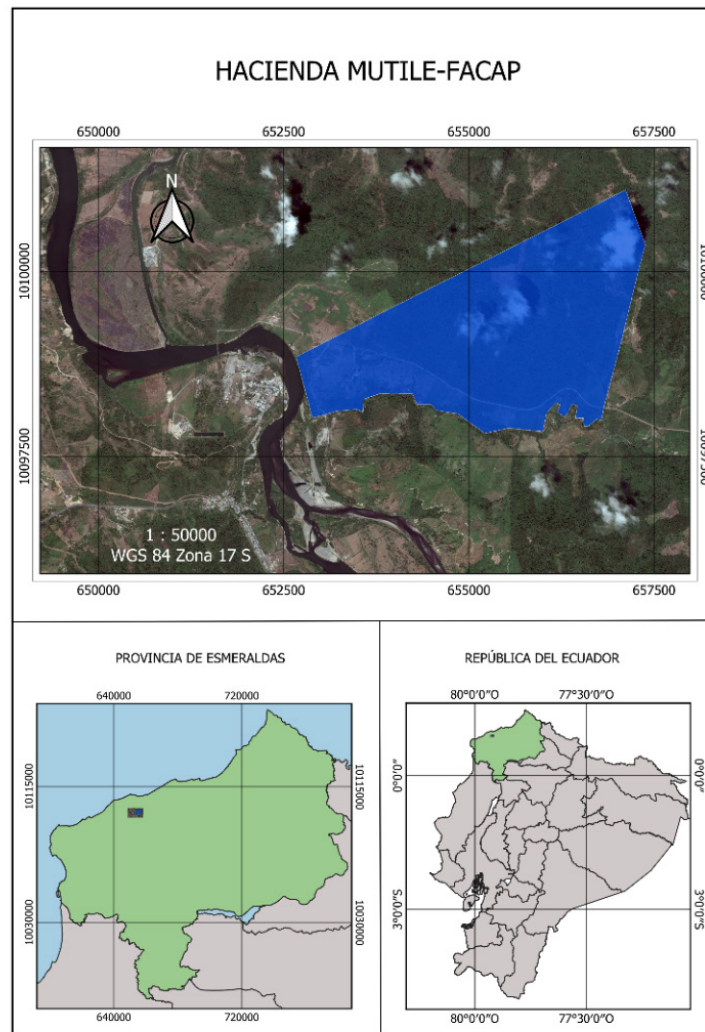


Figura 1.

Ubicación geográfica del campus Mutile-FACAP

En el contexto latinoamericano, Castillo et al. (2021) investigaron la deforestación en la región del Chaco argentino, empleando imágenes satelitales para analizar los cambios en la cobertura forestal entre 2000 y 2020. Los autores concluyeron que la expansión agrícola es la principal causa de la pérdida de bosque en esta área. Asimismo, Méndez et al. (2022) utilizaron Google Earth Engine para monitorear los bosques tropicales en Honduras, destacando la importancia de combinar datos satelitales con información de campo para obtener una visión más precisa del estado de los ecosistemas. Finalmente, Ulloa et al. (2023) realizaron un análisis espacial de la deforestación en la Amazonía ecuatoriana, empleando técnicas de clasificación supervisada en GEE, lo que permitió identificar patrones de deforestación ilegales que afectaban áreas protegidas. Estos estudios destacan la utilidad de GEE y la teledetección para la gestión y conservación de los recursos forestales en contextos de alta vulnerabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se enmarca en un diseño metodológico de enfoque cuantitativo, específicamente de tipo longitudinal, ya que analiza la evolución de la deforestación en el campus Mutile durante un periodo de 18 años (2005-2023).

Este enfoque permite evaluar los cambios temporales y espaciales en la cobertura forestal, proporcionando información clave sobre las tendencias de pérdida de bosque a lo largo del tiempo (Hernández et al., 2021). La investigación es de tipo descriptivo y correlacional, en la que no solo se cuantifica el área afectada por la deforestación, sino que también se busca identificar patrones y relaciones entre el tiempo y la deforestación mediante un análisis de regresión lineal (Salkind, 2020).

La recolección de datos se realizó a través de imágenes satelitales obtenidas de los satélites Landsat 5, 7 y 8, procesadas mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE). Este tipo de herramienta ha demostrado ser eficaz en estudios de cambio de uso de suelo y deforestación a nivel mundial (Perilla et al., 2020). El procesamiento de los datos incluyó la aplicación de máscaras para identificar la pérdida y ganancia de cobertura forestal utilizando el algoritmo de cambio forestal de Hansen et al. (2013). Para el análisis de los datos, se utilizaron técnicas estadísticas descriptivas como la media y desviación estándar, así como un análisis de regresión lineal para identificar posibles tendencias en la deforestación a lo largo del tiempo (Huacani et al., 2022). El software RStudio se empleó para generar gráficos que facilitan la interpretación visual de los resultados.

En teledetección existen diferentes métodos para la extracción de información y generación de imágenes de cambios en la cobertura de bosque (Fernández & Ángel, 2017), en la ejecución de esta investigación se usó la técnica de detección de cambios basada en bandas preprocesadas. Esta técnica consiste en utilizar datos satelitales ya procesados que contienen información específica sobre la cobertura forestal, la pérdida y la ganancia de bosque. En lugar de clasificar píxeles individualmente, el algoritmo aplica máscaras a estas bandas para visualizar y cuantificar los cambios en la cobertura forestal a lo largo del tiempo.

El algoritmo presentado utiliza datos del Global Forest Change, el cual usa imágenes que provienen de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8. Estos satélites forman parte del Programa Landsat, los cuales son el resultado de una colaboración entre la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Los sensores de cada misión empleados en la elaboración del algoritmo se representan en la siguiente tabla.

Tabla 1.

Sensores usados de misiones Landsat aplicados en elaboración del algoritmo.

Misión	Sensor	Abreviatura	Objetivo
Landsat 5	Thematic Mapper	(TM)	Capturar cambios forestales usando bandas visibles e infrarrojas
Landsat 7	Enhanced Thematic Mapper Plus	(ETM+)	Mejorar la detección de deforestación con mayor precisión y bandas adicionales.
Landsat 8	Operational Land Imager (OLI)	(OLI)	Monitorear la vegetación con mayor resolución y bandas espectrales avanzadas.
Landsat 8	Thermal Infrared Sensor	(TIRS)	Medir la temperatura terrestre, ayudando al análisis de cambios forestales asociados al calor

Los sensores proporcionan imágenes multiespectrales con una resolución espacial de 30 metros por píxel, por tal razón cada píxel analizado tiene un área de 900 m², esta resolución resulta adecuada para detectar cambios en la cobertura forestal a escala global. Para el cumplimiento de los objetivos planteados en esta investigación se usó un enfoque multifacético que integró el uso de diferentes programas y aplicaciones (figura 2). Google Earth Pro se usó para delimitar el área del campus Mutile según coordenadas obtenidas a través de GPS, una vez delimitada el área se procedió a la elaboración del shape (polígono) el cual fue exportado al programa Qgis 3.28 en el cual se realizó el mapa de ubicación (figura 1). Una vez en la plataforma Google Earth Engine se creó un nuevo script en el que se descargó el mapa de cambio de cobertura de bosque elaborado por Hansen et al. (2013), y a su vez, se importó el shape de superficie del campus Mutile al cual aleatoriamente se le asignó la etiqueta “geometry”. Con el fin de disminuir significativamente la información y acelerar la velocidad del algoritmo se aplicó la función “clip” la cual ajusta el conjunto de datos únicamente al área de interés “geometry”, garantizando así que solo fuesen analizados los píxeles dentro de esta región.

El algoritmo procesó las imágenes Landsat utilizando tres bandas principales: treecover2000, loss, y gain. Estas bandas ya están preprocesadas y disponibles en el conjunto de datos de Hansen donde “treecover2000” representa la cobertura forestal en el año 2000, utilizada como referencia para evaluar cambios posteriores; “loss” indica la pérdida de cobertura forestal desde el año 2000 y “gain” representa las áreas donde se ha ganado cobertura forestal. Una vez agregadas las bandas antes mencionadas se procedió a aplicar a “geometry” cada una de las máscaras, donde “Máscara de Cobertura Forestal” se aplicó a la banda “treecover2000” para visualizar el área de bosque que había en el año 2000; “Máscara de Pérdida de Bosque”, se aplicó a la banda “loss” para identificar las áreas donde se produjo deforestación, esta capa es fundamental para calcular la cantidad y ubicación de la pérdida de bosque. Por último, y no menos importante, se genera la “Máscara de Ganancia de Bosque” a la banda “gain” para destacar las zonas donde hubo reforestación o crecimiento de nuevos bosques.

En este orden de ideas, cabe destacar que el cálculo de deforestación anual se genera multiplicando la banda de pérdida (loss) por el área de píxeles “pixelArea” para obtener la superficie deforestada en cada año. Se utilizó la banda “lossyear” para asociar la pérdida de bosque en años específicos, permitiendo calcular la deforestación acumulada por año. El algoritmo empleado usa una metodología robusta para delimitar áreas de estudio y calcular la deforestación anual, aprovechando la potencia de las imágenes Landsat y las herramientas de procesamiento de Google Earth Engine. La técnica utilizada es eficaz para identificar y cuantificar cambios en la cobertura forestal, lo que la convierte en una herramienta valiosa para la gestión y conservación de los recursos forestales.

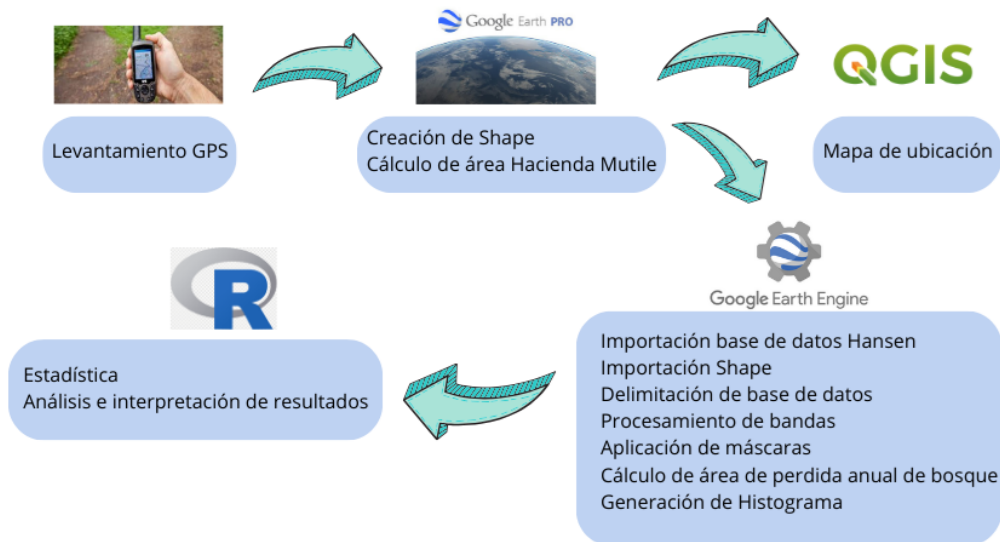


Figura 2.
Marco Metodológico del estudio

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una visión detallada de la evolución de la deforestación en el campus Mutile entre 2005 y 2023, destacando los años con mayores pérdidas de cobertura forestal y las fluctuaciones en las tasas de deforestación. Mediante el uso de imágenes satelitales procesadas en Google Earth Engine, se logró identificar las áreas más afectadas y se cuantificó la superficie total deforestada. Además, el análisis estadístico y de regresión lineal permitió observar tendencias en la deforestación a lo largo del tiempo, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones orientadas a la conservación y gestión sostenible del bosque.

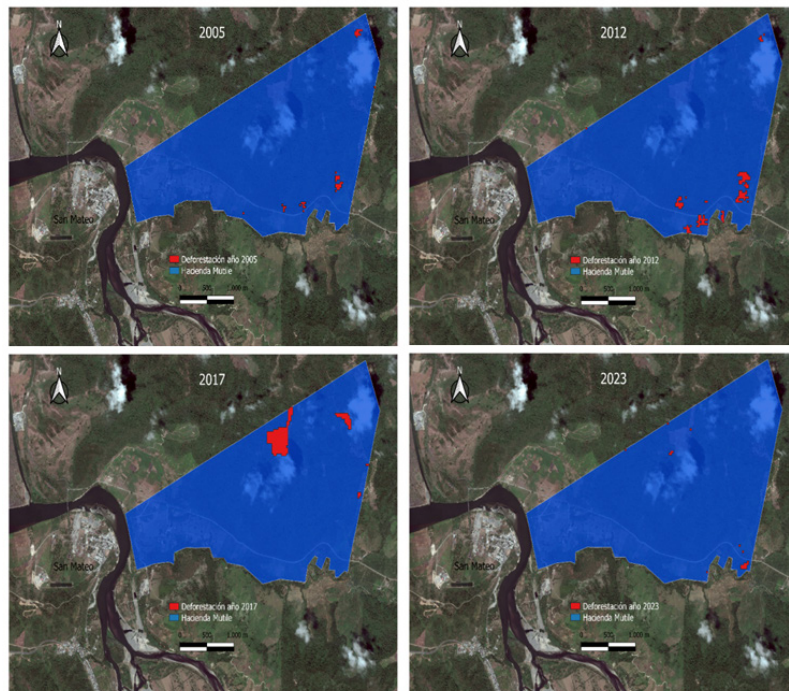


Figura 3.
Zonas deforestadas en años 2005, 2012, 2017 y 2023

La figura 3 evidencia las zonas de deforestación en el campus Mutile en los años de inicio y finalización de esta investigación (2005, 2023) y los 2 años con mayor área deforestada (2012 y 2023). A pesar de que la base de datos de Hansen sobre cobertura de bosque a nivel mundial está disponible con datos a partir del año 2000, el primer reporte de pérdida de cobertura de bosque en el campus Mutile es del año 2005, por lo cual se deduce que, en los años 2001, 2002, 2003 y 2004 no hubo ningún proceso de deforestación.

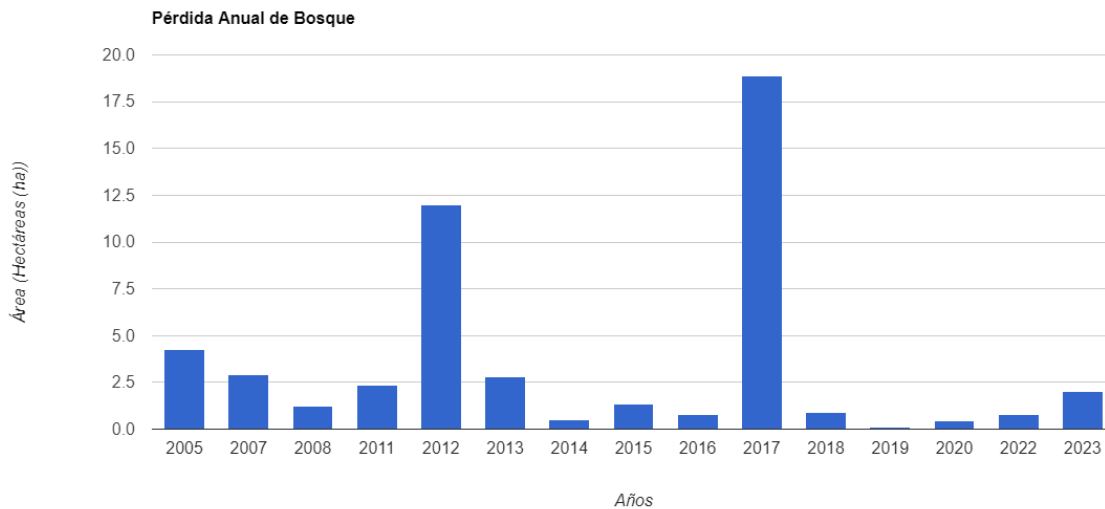


Figura 4.

Área deforestada (ha) - años

De igual forma, la figura 4 muestra el histograma de las hectáreas de bosque deforestado durante cada año desde 2005 hasta 2023 en el campus Mutile. En los años 2006, 2009, 2010 y 2021 no se presentó ningún proceso de deforestación. Los años 2012 y 2017 fueron los años con mayor deforestación con 11.97 ha y 18.9 ha deforestadas respectivamente. El área total de deforestación del campus Mutile entre los años 2005 y 2023 es de 51.82 hectáreas lo que corresponde a un 6.12% del total de su superficie. El script para la realización de esta investigación y el gif de la serie temporal pueden ser revisados en los siguientes links:

<https://code.earthengine.google.com/78d33a7f08c87252b16598c0991bc8cb>

<https://drive.google.com/file/d/1DumE-hXqKi7qqrDm7dXsQ3VUNaP7TmGz/view?usp=sharing>

Cabe destacar, que estos resultados coinciden con lo reportado por estudios similares que señalan que los eventos de deforestación suelen concentrarse en años específicos debido a factores como la tala ilegal y la explotación intensiva de recursos naturales en áreas rurales desprotegidas (Huacani et al., 2022). La presencia de años sin deforestación, como 2006, 2009, 2010 y 2021, refleja la naturaleza esporádica de las actividades de tala ilegal en la región (Valverde, 2022).

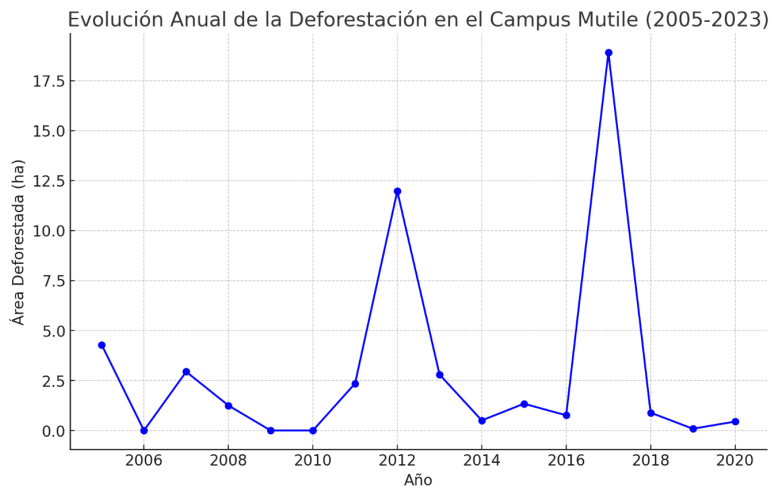


Figura 5.

Evolución anual de deforestación en el campus Mutile (2005-2023).

Esta dispersión figura 5, se debe principalmente a la presencia de eventos extremos, como los observados en 2017 y 2012, que distorsionan la distribución de los datos. Estos resultados sugieren que la deforestación en el campus Mutile no sigue un patrón constante, sino que responde a eventos puntuales de alta intensidad. Este fenómeno ha sido documentado en otros estudios de deforestación en áreas tropicales, donde la falta de vigilancia y la tala ilegal suelen provocar picos de actividad (Perilla et al., 2020).

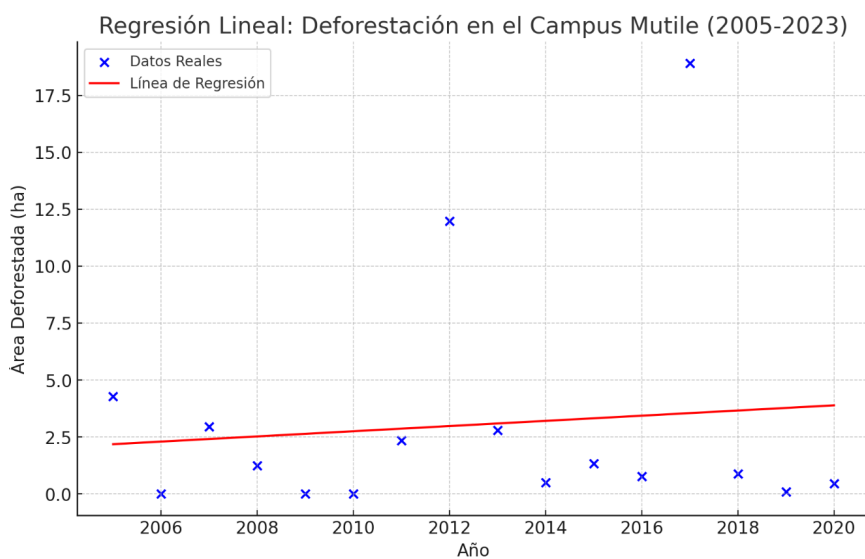


Figura 6.

Regresión lineal, deforestación en el campus Mutile

El análisis de regresión lineal Figura 6, muestra una pendiente de 0.11 hectáreas/año, lo que sugiere una tendencia creciente en la deforestación, aunque de manera moderada. La baja pendiente refleja que, si bien, la deforestación ha aumentado a lo largo del tiempo, los picos altos son eventos aislados que no necesariamente indican un incremento sostenido. Es decir, que la pendiente positiva sugiere una tendencia creciente de deforestación a lo largo del tiempo, aunque de manera moderada. Este comportamiento es consistente con investigaciones previas que han observado patrones de deforestación en los que la actividad ilegal ocurre de manera irregular y está influenciada por factores externos, como la demanda de madera o la intervención de

las autoridades (Fernández y Ángel, 2017).

La ecuación de regresión toma la forma:

Donde:
$$\hat{y} = b_0 + b_1x$$

\hat{y} es la predicción de la deforestación (en hectáreas) para un año dado.

b_0 es la intersección o valor de la deforestación estimada cuando el año es 0, que en este caso es -225.78 (aunque no tiene una interpretación directa relevante para este estudio, ya que el valor predicho para el año 0 está fuera del rango de los datos).

b_1 es la pendiente de la recta, que representa el incremento promedio de la deforestación por año, y es 0.11 hectáreas/año.

X es el número de años (el tiempo).

$$\hat{y} = -225.78 + 0.11x$$

El coeficiente de 0.11 ha/año sugiere que, en promedio, la deforestación aumenta de forma gradual cada año, pero al ser un valor relativamente bajo, puede implicar que los grandes picos (como en 2017) son eventos atípicos que influyen en la tendencia global. Asimismo, aunque el intercepto (-225.78 ha) no tiene un valor interpretativo directo en este contexto (ya que el valor predicho para el año 0 no es relevante), sirve para ajustar la línea de tendencia. Un punto interesante para destacar es que, la ecuación de regresión refleja una tendencia de deforestación creciente en el campus Mutile, aunque con eventos esporádicos de gran intensidad. Este modelo permite hacer estimaciones de la deforestación acumulada en función del tiempo, lo que es útil para planificar acciones de mitigación y conservación.

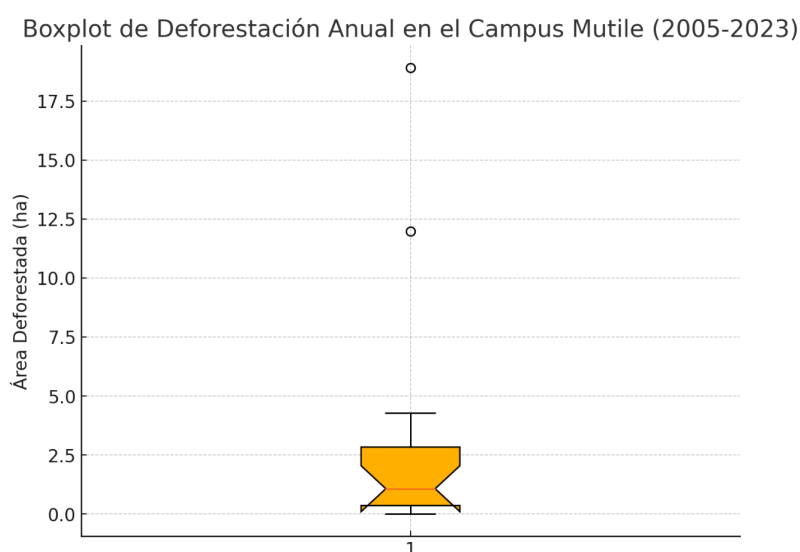


Figura 7.

Boxplot de deforestación anual en el campus Mutile (2005-2023)

La figura 7, muestra la dispersión de los valores de deforestación por año, donde permite observar que

hay varios valores atípicos (outliers) que corresponden a los años de mayor deforestación, como 2017. La mayoría de los valores están concentrados en un rango bajo, lo que sugiere que los picos de deforestación son relativamente infrecuentes.

Al respecto, el boxplot generado en esta investigación ofrece una representación visual clara de la dispersión y variabilidad de los datos de deforestación anual en el campus Mutile entre 2005 y 2023. En este gráfico, se puede observar que la mayor parte de los años registran niveles relativamente bajos de deforestación, con la mediana concentrada cerca de las 2 hectáreas, lo que indica que la mitad de los valores se encuentran por debajo de este umbral. Sin embargo, el boxplot también destaca la presencia de valores atípicos o outliers, como los registrados en 2017 y 2012, donde la deforestación fue excepcionalmente alta. Estos valores atípicos, representados por puntos fuera de los bigotes del gráfico, reflejan eventos puntuales de gran impacto que distorsionan la tendencia general de deforestación en el campus. El rango intercuartílico (IQR) también revela la dispersión de los datos entre el primer y el tercer cuartil, indicando que, aunque los eventos de deforestación más altos son excepcionales, existe una variabilidad considerable en los datos anuales. Este análisis es crucial para comprender cómo la deforestación no sigue un patrón constante, sino que responde a factores externos e impredecibles que provocan picos ocasionales de actividad intensa.

En este sentido, gráficos como el boxplot y el histograma confirman esta variabilidad en la deforestación anual, mostrando que la mayoría de los valores están concentrados en niveles bajos de pérdida forestal, con algunos años destacando como outliers significativos. Estas visualizaciones proporcionan una mejor comprensión de cómo los eventos de deforestación se distribuyen a lo largo del tiempo y refuerzan la necesidad de implementar medidas de monitoreo continuo en el campus Mutile. Tal como señalan Montoya et al. (2023), la integración de tecnologías de teledetección en el monitoreo ambiental es esencial para identificar patrones de deforestación y tomar medidas correctivas oportunas.

Red Semántica de Conceptos en el Análisis de Deforestación

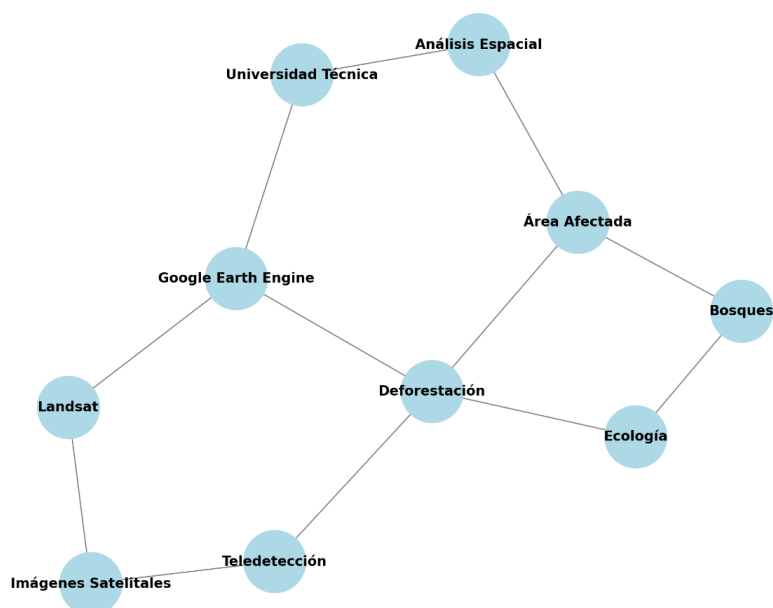


Figura 8.

Red semántica de conceptos en el análisis de desforestación

La red semántica elaborada en este estudio representa de manera visual las interrelaciones entre los conceptos clave relacionados con la deforestación en el campus Mutile y las herramientas utilizadas para su análisis. En el centro de la red se encuentra el concepto de “Deforestación”, que actúa como el nodo principal, vinculándose estrechamente con términos como “Google Earth Engine”, “Teledetección” e “Imágenes Satelitales”, los cuales fueron fundamentales para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos.

El concepto de “Google Earth Engine” (GEE), destacado por su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos satelitales, está vinculado a “Landsat”, haciendo referencia a las imágenes satelitales provenientes de los satélites Landsat 5, 7 y 8, utilizados en este estudio. Esta conexión pone de manifiesto cómo las plataformas de teledetección han permitido realizar un seguimiento detallado de los cambios en la cobertura forestal a lo largo del tiempo, lo que concuerda con estudios previos que resaltan la utilidad de GEE para monitorear fenómenos ambientales a gran escala (Perilla et al., 2020).

Asimismo, los nodos “Área Afectada” y “Análisis Espacial” están fuertemente vinculados a la deforestación, reflejando la relación entre la magnitud de la pérdida de cobertura forestal y su distribución espacial dentro del campus Mutile. La red también incluye el concepto de “Ecología”, que resalta los impactos ambientales asociados a la deforestación, afectando la biodiversidad y el equilibrio de los ecosistemas locales, lo que ha sido ampliamente documentado en investigaciones sobre áreas tropicales vulnerables (Montoya et al., 2023).

Finalmente, la inclusión del nodo “Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas” subraya el contexto institucional de la investigación, destacando el papel de la universidad no solo como propietaria de la tierra afectada, sino también como promotora de la investigación y conservación a través del uso de tecnologías avanzadas como GEE para proteger los recursos forestales del campus.

Esta red semántica permite una mejor comprensión de las interconexiones entre los diferentes elementos involucrados en el análisis de la deforestación, proporcionando una estructura clara de los conceptos fundamentales y sus relaciones en el contexto de la investigación ambiental.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio confirman que la deforestación en el campus Mutile es un fenómeno altamente variable, concentrado en eventos esporádicos de alta intensidad. Los años 2017 y 2012 fueron los periodos más críticos, con pérdidas significativas de 18.9 ha y 11.97 ha respectivamente, mientras que en varios años no se registró deforestación. Este comportamiento refleja lo documentado en estudios previos sobre deforestación en áreas rurales, donde la tala ilegal se produce de manera irregular, pero con graves consecuencias para el ecosistema (Huacani et al., 2022). La elevada desviación estándar de 6.86 ha destaca la gran dispersión en los datos, lo que sugiere que la actividad ilegal de tala no sigue un patrón predecible y está influenciada por factores externos como la demanda de madera o la intervención de las autoridades.

El análisis de regresión lineal reveló una tendencia creciente en la deforestación, con una pendiente de 0.11 ha/año, aunque esta tasa no es lo suficientemente pronunciada como para afirmar que la deforestación está

aumentando de manera constante. Este resultado está en línea con lo observado por Montoya et al. (2023), quienes también detectaron tendencias fluctuantes de deforestación en otras áreas tropicales debido a la falta de control y vigilancia efectiva. La regresión sugiere que, si bien el problema persiste, los grandes picos de deforestación son eventos aislados que deben ser tratados de forma puntual mediante estrategias de intervención rápida y efectiva por parte de las autoridades locales. De igual forma, este comportamiento es similar a lo observado en estudios como el de Ulloa et al. (2023), quienes identificaron patrones de deforestación irregular en áreas protegidas de la Amazonía ecuatoriana debido a la falta de control y vigilancia.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Gonçalves et al. (2021) en su estudio sobre áreas protegidas en la Amazonía brasileña. A pesar de que la deforestación no parece aumentar de forma constante, los picos extremos observados en este y otros estudios sugieren la influencia de actividades humanas no reguladas. Asimismo, Castillo et al. (2021) encontraron patrones similares en el Chaco argentino, donde la expansión agrícola fue el principal motor de la pérdida de bosques. En el caso del campus Mutile, la falta de vigilancia y la explotación ilegal de recursos forestales siguen siendo factores clave que deben abordarse con medidas de monitoreo más rigurosas.

Además, el uso de herramientas como Google Earth Engine (GEE) demostró ser una solución eficaz para monitorear y analizar la deforestación en el campus Mutile. GEE permitió procesar grandes volúmenes de datos satelitales, facilitando la cuantificación precisa de las áreas afectadas y la visualización de la pérdida de cobertura forestal a lo largo del tiempo. Este hallazgo concuerda con lo reportado por Perilla et al. (2020), quienes destacan que las plataformas de teledetección, como GEE, son esenciales para la gestión de recursos forestales en áreas de difícil acceso. La integración de esta tecnología con las decisiones administrativas de la Universidad Técnica Luis Vargas Torres podría ser clave para la implementación de estrategias de conservación más eficaces en el futuro.

Asimismo, el uso de herramientas como Google Earth Engine (GEE) demostró ser una solución eficaz para monitorear y analizar la deforestación en el campus Mutile, lo que concuerda con los hallazgos de Adusei et al. (2020) y Méndez et al. (2022), quienes también resaltaron la utilidad de GEE en estudios de deforestación en áreas rurales y tropicales. GEE permitió procesar grandes volúmenes de datos satelitales, facilitando la cuantificación precisa de las áreas afectadas y la visualización de la pérdida de cobertura forestal a lo largo del tiempo. La integración de esta tecnología con las decisiones administrativas de la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, podría ser clave para la implementación de estrategias de conservación más eficaces en el futuro.

CONCLUSIONES

El estudio logró cuantificar la deforestación en el campus Mutile de la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas entre los años 2005 y 2023, proporcionando datos fundamentales sobre la pérdida de cobertura forestal en esta área. A lo largo del periodo de análisis, se identificó una pérdida acumulada de 51.82 hectáreas, con picos significativos en 2017 y 2012, donde las actividades de tala ilegal fueron más

intensas. Estos hallazgos demuestran la naturaleza irregular de la deforestación en la zona, lo que refuerza la necesidad de un monitoreo continuo y la implementación de medidas preventivas por parte de las autoridades universitarias para proteger los recursos naturales del campus. El uso de imágenes satelitales procesadas a través de Google Earth Engine fue crucial para alcanzar este objetivo, ya que permitió realizar un seguimiento detallado de los cambios en la cobertura forestal con gran precisión.

El análisis estadístico, incluyendo una regresión lineal, indicó una tendencia moderadamente creciente de deforestación, con una pendiente de 0.11 hectáreas por año. Si bien la deforestación no sigue un patrón constante, los picos extremos sugieren la influencia de actividades humanas específicas y la falta de vigilancia continua. Estos resultados proporcionan una base sólida para que las autoridades universitarias y ambientales tomen decisiones informadas sobre la gestión forestal en el campus Mutile. Además, la elevada variabilidad en la deforestación observada en los diferentes años pone de manifiesto la importancia de intervenir de manera puntual en los periodos en los que la actividad ilegal es más intensa.

Por esta razón, esta investigación no solo cumple con el objetivo de cuantificar la deforestación y sus tendencias a lo largo del tiempo, sino que también aporta un enfoque metodológico aplicable a otras áreas de interés. La integración de tecnologías de teledetección como Google Earth Engine y el uso de análisis estadísticos robustos han demostrado ser herramientas efectivas para el monitoreo ambiental. Estos resultados sugieren que la implementación de políticas de conservación apoyadas en tecnologías avanzadas es fundamental para mitigar el impacto de la deforestación y promover la sostenibilidad de los recursos forestales en áreas vulnerables como el campus Mutile.

RECOMENDACIONES

1. Implementación de un sistema de monitoreo continuo: Se recomienda que la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas establezca un sistema de monitoreo continuo utilizando plataformas de teledetección como Google Earth Engine. Este sistema permitirá identificar de manera temprana los eventos de deforestación y tomar medidas inmediatas. La automatización de alertas de cambio en la cobertura forestal sería crucial para detectar actividades ilegales y proteger el ecosistema del campus Mutile.
2. Fortalecimiento de la vigilancia y control en el campus Mutile: Dado que los datos revelan que los picos de deforestación son esporádicos, pero de gran magnitud, es fundamental reforzar la vigilancia en las áreas más vulnerables. Se sugiere la instalación de puntos estratégicos de control y la colaboración con autoridades locales para mitigar la tala ilegal. Asimismo, la integración de tecnologías de vigilancia aérea mediante drones podría complementar el monitoreo satelital y mejorar la efectividad de la detección de actividades ilegales.
3. Promover la restauración y conservación del bosque: Con base en los resultados que indican una considerable pérdida de cobertura forestal en el campus Mutile, se recomienda la implementación de un plan de restauración forestal en las áreas más afectadas. Este plan debería incluir la reforestación con especies nativas y la promoción de la biodiversidad local. A largo plazo, se recomienda involucrar a la

comunidad universitaria en actividades de conservación y concienciación sobre la importancia de proteger los recursos forestales del campus.

4. Integrar la teledetección en la planificación y gestión ambiental: Los resultados de este estudio demuestran la efectividad de las herramientas de teledetección para el análisis ambiental. Por ello, se recomienda que estas tecnologías sean integradas formalmente en la planificación y gestión de los recursos naturales del campus y de otras áreas protegidas bajo la gestión de la universidad. Además, se sugiere la capacitación del personal académico y técnico en el uso de Google Earth Engine y otras plataformas similares para fortalecer las capacidades institucionales en el monitoreo ambiental.
5. Desarrollar políticas de conservación más estrictas: Finalmente, es recomendable que la Universidad Técnica Luis Vargas Torres, en colaboración con las autoridades ambientales locales y nacionales, desarrolle políticas de conservación más estrictas para proteger los recursos forestales del campus. Estas políticas deberían incluir sanciones más severas para la tala ilegal y la creación de programas de incentivos para la conservación, dirigidos tanto a la comunidad universitaria como a los pobladores locales.

REFERENCIAS

- Adusei, E. K., Martey, F., Addai, M., & Ofori, I. (2020). Impact of selective logging on biodiversity using Google Earth Engine in Ghana. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100362. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100362>
- Castillo, M. A., Fernández, A. M., y Gómez, L. E. (2021). La deforestación en el Chaco argentino: análisis multitemporal 2000-2020. *Revista Geográfica del Sur*, 45(2), 52-67. <https://doi.org/10.1007/s13523-021-0456-x>
- FAO. (2020). *The state of the world's forests 2020: Forests, biodiversity and people*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/ca8642en>
- Fernández, A. R., y Ángel, G. P. (2017). Monitoreo forestal mediante la combinación de sensores remotos. *Investigaciones en Ciencia y Tecnología*, 8(2), 133-148.
- Gonçalves, R. F., Pereira, M. P., & Silva, J. T. (2021). Monitoring deforestation in protected areas of the Brazilian Amazon using Landsat images. *Journal of Environmental Management*, 285, 112146. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112146>
- Guzmán Arévalo, D. F. (2021). *Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada—NDVI usando la plataforma Google Earth Engine para los años 2019 y 2020 de la vereda La Florida en el municipio de Puerto Asís*. Universidad del Rosario. <http://hdl.handle.net/10654/40417>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2021). *Metodología de la investigación* (7ma ed.). McGraw-Hill.
- Huacani, W., Meza, N. P., Aguirre, F., Sánchez, D. D., & Luque, E. N. (2022). Analysis of deforested area using Google Earth Engine in the period 2001-2020 in the Apurimac Region. *Journal of Internet and E-Business Studies*, 1-14. <https://doi.org/10.5171/2022.988227>
- Logroño-Naranjo, S. I., López-Paredes, C. R., Moyano-Jácome, M. G., & Oyague-Bajaña, E. S. (2020). El alcance de la teledetección satelital utilizando modelos estadísticos y físicos y sus beneficios en áreas contables. *Dominio de las Ciencias*, 6(2), Article 2. <https://doi.org/10.23857/dc.v6i2.1142>
- Martínez, G. (2020). *Teledetección aplicada a la deforestación de la Amazonia e impactos del COVID-19 sobre la contaminación en Europa mediante Google Earth Engine* [Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Madrid]. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/692909>

- Méndez, D. R., Aguilar, F. S., & Ventura, C. J. (2022). Tropical forest monitoring in Honduras using Google Earth Engine: Combining satellite and field data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 10. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09735-7>
- Montoya, V., Danilo, A., y Director. (2023). Análisis multitemporal de la deforestación en respuesta a la implementación del embalse Daule-Peripa, Ecuador. [Tesis de Maestría, Universidad de Guayaquil]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/57456>
- Perilla, G. A., Mas, J.-F., Perilla, G. A., y Mas, J.-F. (2020). Google Earth Engine (GEE): Una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones Geográficas*, (101). <https://doi.org/10.14350/rig.59929>
- Bone, B. (2019). *Recorrido por el Bosque Mutile e Identificación de Especies Forestales*. <https://es.slideshare.net/slideshow/recorrido-por-el-bosque-mutile-e-identificacin-de-especies-forestales/143116411>
- Salkind, N. J. (2020). *Exploring research* (9th ed.). Pearson.
- Ulloa, C., Pérez, R., y Sánchez, M. (2023). Análisis espacial de la deforestación en la Amazonía ecuatoriana utilizando técnicas de clasificación supervisada en Google Earth Engine. *Acta Amazónica*, 53(1), 98-108. <https://doi.org/10.24841/actamazonica.v53i1.100123>
- Valverde, B. R. (2022). *Análisis de la dinámica de deforestación ocurrida en los últimos cinco años en la zona intangible "Tagaeri taromenane" (ZITT) mediante aplicación de tecnologías geoespaciales* [Trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16124>