






Correlation of climate variation and NDVI values using Landsat scenes in the Amazonian penillanura of Yurimaguas - Peru, from 1984 to 2023






Milagros Daniela Durand Poma¹, Jose Carlo Contreras Garces², Danitza Mirella Farromeque Pacífico³,
Alessandra Soto Lopez⁴, Ulises Francisco Giraldo Malca, Doctor⁵
Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ,
u202124421@upc.edu.pe¹, u201414132@upc.edu.pe², u202218052@upc.edu.pe³, u20221a130@upc.edu.pe⁴,
pcigugir@upc.edu.pe⁵
Universidad Cesar Vallejo, Perú, ugiraldoma@ucvvirtual.edu.pe⁵

Abstract-- Despite the decrease in deforestation rates in the world, it is still an expanding problem in tropical areas such as the Amazon, losing millions of hectares of forests per year, due to weak governance of their territories and driven mainly by agriculture, livestock and a strong expansion of agro-industrial plantations such as oil palm in recent decades. Therefore, it is necessary to know the extent of the impacts generated in the alteration of local climates and how they affect the surrounding populations and ecosystems. Therefore, the objective of the research is to analyze the impact of deforestation and changes in vegetation cover on the variation of temperatures and precipitation in the town of Yurimaguas - Peru, between 1984 and 2023. For this purpose, meteorological data were used to determine changes in the local climate and global warming, processed in Microsoft Excel software, as well as Landsat satellite images, processed in QGIS software, to see the evolution of the landscape by calculating the NDVI. The results show that the maximum and average NDVI of the study area have a negative trend, associated with the increase in temperatures of up to 2 °C in 40 years and the loss of 25% of its primary forests in the last 20 years, which means more than 2,200 hectares deforested in a single year. It is concluded that agroindustrial monocultures such as oil palm, together with other activities that change land use, have a strong impact by removing large tracts of native forests for decades, which is projected in the negative trend shown by the NDVI values, a phenomenon that is due to the greater effect of global warming on the local climate, the reduced water supply to ecosystems and increased levels of evapotranspiration, which affect the water balance of the soil and the vigor of its vegetation..

Keywords-- Normalized difference vegetation index, rainfall reduction, evapotranspiration, remote sensing, climate variability, land use changes.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Correlación de la variación climática y los valores NDVI mediante escenas Landsat en la penillanura amazónica de Yurimaguas – Perú, de 1984 a 2023

Milagros Daniela Durand Poma¹, Jose Carlo Contreras Garces², Danitza Mirella Farromeque Pacífico³,
Alessandra Soto Lopez⁴, Ulises Francisco Giraldo Malca, Doctor⁵
Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ,
u202124421@upc.edu.pe¹, u201414132@upc.edu.pe², u202218052@upc.edu.pe³, u20221a130@upc.edu.pe⁴,
pcigugir@upc.edu.pe⁵
Universidad Cesar Vallejo, Perú, ugiraldoma@ucvvirtual.edu.pe⁵

Resumen– A pesar de la disminución de las tasas de deforestación en el mundo, continúa siendo un problema en expansión en zonas tropicales como la Amazonia, perdiendo millones de hectárea de bosques al año, debido a la débil gobernanza de sus territorios e impulsado principalmente por la agricultura, ganadería, y una fuerte expansión de plantaciones agroindustriales como la palma aceitera en las últimas décadas. Por ello es necesario conocer los alcances de los impactos que genera en la alteración de climas locales y cómo afectan a las poblaciones y ecosistemas circundantes, por lo que, el objetivo de la investigación es analizar el impacto de la deforestación y los cambios de la cobertura vegetal en la variación de temperaturas y precipitaciones de la localidad de Yurimaguas - Perú, entre 1984 y 2023. Con ese fin, se utilizaron datos meteorológicos para determinar los cambios en el clima local y el calentamiento global, procesados en el software Microsoft Excel, así como imágenes satelitales Landsat, procesadas en el software QGIS, para ver la evolución del paisaje mediante el cálculo del NDVI. Los resultados muestran que el NDVI máximo y promedio en el área de estudio tienen una tendencia negativa, asociada al incremento de las temperaturas de hasta 2 °C en 40 años y la pérdida del 25% de sus bosques primarios en los últimos 20 años, llegando a contabilizar hasta más de 2,200 hectáreas deforestadas en un solo año. Se concluye que los monocultivos agroindustriales como palma aceitera junto a otras actividades que cambian el uso del suelo, tienen un fuerte impacto por la remoción de grandes extensiones de bosques nativos a lo largo de décadas, que se proyecta en la tendencia negativa que muestran los valores NDVI, fenómeno que se debe al mayor efecto del calentamiento global en el clima local, el menor aporte de agua a los ecosistemas y el incremento de niveles de evapotranspiración, que afectan el balance hídrico del suelo y la vigorosidad de su vegetación.

Palabras clave-- Índice normalizado de diferencia vegetal, reducción de precipitaciones, evapotranspiración, teledetección, variabilidad climática, cambios en el uso del suelo.

I. INTRODUCCIÓN

La deforestación es un fenómeno ambiental de gran relevancia que ha suscitado creciente preocupación en todo el mundo, ya que en los últimos 13 años ha causado un daño alarmante al destruir cerca de 43 millones de hectáreas de bosques en diferentes partes del planeta [1], [2]. Este fenómeno ha contribuido significativamente a la más grande pérdida de biodiversidad en el mundo [3], además de ser la segunda fuente

más importante de gases de efecto invernadero de origen antrópico. A pesar de que el ritmo de pérdida de bosques viene disminuyendo de 7,8 millones de hectáreas al año en la década de 1990-2000, a 4,7 millones de hectáreas anuales en la década 2010-2020 [4], la deforestación aun representa una gran amenaza para el 26.6% de la superficie terrestre cubierta por bosques según Ball, (2008) [6], siendo los principales factores impulsores la conversión de territorios para uso agrícola o ganadero, así como la tala ilegal [7].

Los bosques actúan como barreras naturales, disminuyendo la velocidad del viento y dirigiendo la humedad hacia determinadas áreas, por lo que la deforestación de una selva afectará el ciclo del agua y el clima local [8] presentando cambios en estos patrones de circulación del aire, desplazando la humedad y causando una reducción de formación de nubes y lluvias de esas regiones, además de una mayor emisión de carbono a la atmósfera por la combustión de biomasa y la respiración heterótrofa [9]. Asimismo, Poveda Jaramillo (2011) demostró que la pérdida de cobertura forestal altera el clima local de forma severa [11], al encontrar correlación positiva con la temperatura y negativa con la precipitación [12]. Además, la eliminación de bosques puede dar lugar a lo que se denomina el "efecto isla de calor", que implica que zonas sin un dosel arbóreo experimentan temperaturas más altas por la ausencia de sombra y la mayor absorción de energía por sus superficies descubiertas [13]. Sin embargo, a diferencia de los abundantes estudios que hablan del aporte de la deforestación al calentamiento global o al aumento de calor en los trópicos, solo hay pocos estudios que han evaluado los efectos de la deforestación por mayor exposición al calor en comunidades cercanas [14], o cuánto más afectas son al calentamiento global en relación con otras zonas que conservan sus bosques.

Esta problemática es aún más grave en zonas ecuatoriales y tropicales, debido a la débil gobernanza que caracteriza a sus países, donde las autoridades recurren a la sobreexplotación de sus bosques, altamente biodiversos, para fines productivos, extractivos y comerciales [15]. En ese sentido, América Latina y el Caribe concentran el 44% de toda la pérdida de bosques en zonas tropicales, equivalente a 33,9 millones de hectáreas [16] que generará, de acuerdo con Marengo et al. (2018), solo en la selva amazónica, una disminución proyectada de hasta un 40% de las precipitaciones para finales del siglo XXI, debido que los

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

árboles tienen un rol esencial en el ciclo del agua, al absorberla del suelo y liberarla a la atmósfera a través de la evapotranspiración, lo que incrementa los niveles de humedad del aire y con ello la formación de nubes [18]. No obstante, la eliminación de árboles reduce drásticamente estos procesos, lo que conllevará una disminución en su disponibilidad para el futuro [19].

Las políticas comerciales y de inversión de los países más desarrollados, junto con las elecciones de consumo, tienen un impacto directo e indirecto en las tasas de deforestación [20], generando un escenario aún más preocupante en la Amazonia, que destaca por el almacenamiento del 38% de carbono que contiene la vegetación de áreas tropicales de América, África y Asia (228,700 millones de toneladas métricas) [21]. No obstante, las tendencias globales apuntan a incrementos en la deforestación para el periodo de 2015 y 2030, especialmente en países latinoamericanos como Perú [16].

El Perú es el segundo país con mayor extensión de bosques tropicales húmedos en el mundo, con cerca de 69 millones de hectáreas [22], donde su Amazonía, es reconocida como la cuarta área de bosque tropical más grande en la Tierra, jugando un papel crucial en la preservación de la biodiversidad, la regulación del ciclo hidrológico y el almacenamiento de carbono [23]. Sin embargo, con un ritmo alarmante de deforestación, como lo muestran cifras publicadas por el Ministerio del Ambiente de Perú (MINAM), que asciende a un promedio de 132,122 hectáreas al año⁻¹ entre 2001 y 2021, debido principalmente al cambio de uso de suelos, pero que al 2020 alcanzó la tasa más alta en las últimas dos décadas con 203,272 hectáreas [24].

El departamento de Loreto, ubicado en la región nororiental de Perú, perdió 107,388 hectáreas de bosque entre 2001 y 2015, que representa alrededor del 5,7% de toda su extensión [1], [25] Actualmente, una parte importante de esta pérdida se debe a la plantación de la palma aceitera (para la producción de biodiesel), uno de los cultivos de más rápida expansión en el mundo, que reemplaza a los bosques húmedos en regiones tropicales, con el mayor crecimiento porcentual en el sector agroindustrial en los últimos años, talando más de 40,000 hectáreas de bosques primarios en Perú entre 2000 y 2015 [26].

La teledetección satelital emerge como una herramienta muy importante para comprender y monitorear los procesos de cambio en el uso del suelo en áreas tan extensas como la Amazonía, en cuyo progreso se han desarrollado diversos índices e indicadores para la evaluación y monitoreo de coberturas vegetales a partir del procesamiento de escenas multiespectrales, como el Índice de Área Foliar [27] e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Precisamente, el NDVI es ampliamente utilizado para evaluar la fenología y dinámica vegetal a diferentes escalas mediante análisis espacial y temporal, teniendo una fuerte asociación con la fotosíntesis, ya que depende de la reflectancia generada por la disposición interna del mesófilo en hojas saludables y verdes, que reflejan intensamente la radiación infrarroja cercana, mientras que la

clorofila y otros pigmentos absorben una porción significativa de la luz visible [28]. Así, los valores del NDVI varían en un rango de -1 a 1, donde los píxeles con valores superiores a 0.5 indican la presencia de vegetación densa, mientras que la vegetación menos vigorosa o dispersa se presenta en el rango 0.1 - 0.5 [29], considerando que un NDVI de 0.1 es el umbral para la presencia de vegetación [30]. Asimismo, los suelos sin cobertura foliar presentan valores que oscilan entre 0 y 0.1, y los valores negativos suelen indicar la presencia de agua [29].

En ese sentido, es necesario identificar el impacto que tendría el calentamiento global y los procesos de cambio de uso de suelos sobre los ecosistemas que alberga el país, en especial en la cuenca amazónica por la alta biodiversidad que registra y los servicios ecosistémicos que brinda, analizando las alteraciones que viene mostrando sus coberturas vegetales y las condiciones climáticas locales, que puedan estar afectando a los pobladores y su economía. Por lo tanto, el objetivo de la investigación es analizar el impacto de la deforestación y cambios de la cobertura vegetal en la variación climática de temperaturas y precipitaciones de la localidad de Yurimaguas, Loreto - Perú entre los años 1984 y 2023.

II. ÁREA DE ESTUDIO

Está definido por el cuadrante de longitud 75°59'28" - 76°17'42" O y latitud 5°50'2" - 6°12'11" S, que contiene a la ciudad de Yurimaguas, capital de la provincia de Alto Amazonas - Loreto, y las plantaciones de palma aceitera en la localidad de Shanusi, cuya fisiografía corresponde a la penillanura Amazónica en las proximidades del río Huallaga.

Su clima tiene temperaturas cálidas a lo largo de todo el año y una alta humedad, con pequeñas variaciones estacionales, como el incremento de las precipitaciones entre octubre y abril, pudiendo superar los 3,000 mm de lluvia al año. Según la clasificación climática de Thornthwaite, la estación meteorológica (EM) Shanusi, ubicada a 154 m s.n.m y la EM San Ramón ubicada a 142 m s.n.m, tienen climas moderada y ligeramente húmedos (53.7 - 35.2 mm de índice global de humedad), con nulo a pequeño déficit de agua (0 - 1.5 de índice de aridez), megatérmico o cálido (26.7 °C de temperatura media), y con un 25% de concentración de la eficiencia térmica en verano (B2/B1 r A'a').

Según el mapa nacional de cobertura vegetal de Perú [31], la vegetación natural cubre 1,355 hectáreas de las zonas circundantes a las áreas intervenidas, siendo exuberante por su ubicación ecuatorial y altas precipitaciones, identificándose diferentes tipos de ecosistemas (**Fig. 1**) como: el Bosque de Terraza Baja (59.6%), Bosque Inundable de Palmeras (16.6%), Bosque de terraza alta (9.5%), Bosque de colina alta (6.6%), Bosque de colina baja (5.2%) y Vegetación de Isla (2.6%).

El área de estudio presenta una alta intervención antrópica, al ubicarse en los alrededores de la ciudad de Yurimaguas y la carretera que la conecta con la ciudad de Tarapoto. Su economía se sustenta en actividades primarias y extractivas, como las agropecuarias, de caza, silvicultura, pesca y extracción de canteras, siendo la ganadería orientada principalmente al

consumo familiar y el mercado local [32], y el sector agrícola tradicionalmente de subsistencia. Sin embargo, recientemente se ha dinamizado por cultivos agroindustriales como cacao, camu camu [33] y especialmente el monocultivo de palma aceitera, destacando el caso de la Agroindustrial Shanusi S.A. perteneciente al Grupo Romero [34], que desde 2006 viene experimentando un notable crecimiento [35], gracias a las condiciones biofísicas que reúne este sector de la penillanura amazónica, que solo en el valle del río Shanusi ha permitido que las plantaciones de palma aceitera pasen de tener de 1,000 hectáreas en el año 2000, a más de 12,000 hectáreas en el año 2016 [36], aglutinando a unas 400 familias que dependen directa o indirectamente de este cultivo [37].

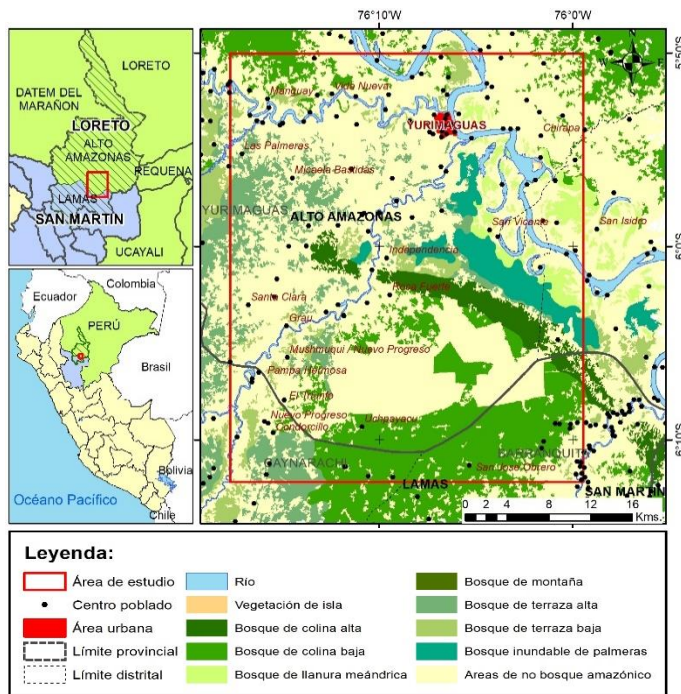


Fig. 1. Coberturas vegetales del área de estudio
Nota: Data procesada a partir del mapa de coberturas vegetales de MINAM, 2015 – disponible en la plataforma web Geoservidor.

III. MÉTODOS

La investigación es de tipo cuantitativa, exploratoria y correlacional, trabajada con técnicas informáticas y de estadística, buscando data en múltiples repositorios web que nos permitieron acceder a artículos científicos de reconocidas revistas, así como tesis, o libros, que brindaron información de confianza y calidad. De igual forma, se consiguió reportes y publicaciones de instituciones competentes en la conservación y gestión de los bosques o el monitoreo del clima, tales como el MINAM, Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR), Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

A. Procesamiento de datos meteorológicos

Se hizo el cálculo de precipitaciones anuales y temperaturas medias mensuales de las EM ubicadas al interior del área de estudio, obtenidos de la base de datos del SENAMHI, disponibles en su página web institucional, siendo procesadas en hojas de cálculo y tablas dinámicas del software Microsoft EXCEL. La clasificación climática se hizo con los datos correspondientes a cada EM, aplicando el sistema propuesto por Charles Warren Thornthwaite.

Asimismo, se utilizó la aplicación web Google Earth Engine (GEE) para la adquisición de datos de temperatura media diaria a 2 metros sobre la superficie desde 1984 a 2020, mediante un código script que extrae datos reportados por el sensor espacial ERA 5, de dos puntos de interés: la ciudad de Yurimaguas y las plantaciones de Palma Aceitera en Shanusi.

B. Estimación de la vigorosidad de la vegetación mediante el cálculo del NDVI

Para determinar el estado de las coberturas vegetales se utilizó como indicador el nivel de reflectancia que presentó el área de estudio a lo largo de nuestro periodo de análisis, cuantificando los valores de NDVI, calculados a partir de la comparación de bandas espectrales roja e infrarroja cercana, de una escena por año del programa LANDSAT, recopilados en la plataforma web Global Visualization Viewer (GloVis) del United States Geological Survey (USGS), aplicando la fórmula [38]:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$$

En total, se procesaron treinta y nueve imágenes multiespectrales de los sensores Landsat 5 TM, 7 ETM+, 8 y 9 OLI_TIRS correspondientes al periodo de 1984-2023, mediante el software de código abierto QGIS. Con ello se determinó los valores NDVI máximo, mínimo y promedio de cada escena al interior del área de estudio, para analizar sus tendencias temporales y correlaciones con temperaturas medias, precipitaciones anuales, y las variaciones térmicas globales (cambio climático) según la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

C. Uso de información temática complementaria de coberturas vegetales.

Asimismo, se usó información y capas temáticas disponibles en los servidores web GeoServidor y GeoBosques del MINAM, referentes a coberturas vegetales, extensión de bosques primarios y pérdida de bosques en los 4 distritos que conforman el área de estudio en el periodo de 2001 – 2021, para determinar el impacto de la variación anual de la extensión de bosque primario en los valores NDVI y el clima local del área de estudio.

IV. RESULTADOS

Tras el procesamiento de las imágenes multiespectrales, se observa que tanto los resultados de NDVI máximo ($NDVI_{max}$) y NDVI promedio ($NDVI_{prom}$), tienen una tendencia negativa

(Fig. 2), pues van disminuyendo con el pasar de los años, mientras que el NDVI mínimo tiene una tendencia positiva, ya que sus valores se van incrementando (Fig. 1). En ese sentido, los valores más altos del $NDVI_{prom}$ y del $NDVI_{max}$ corresponden a los primeros años del periodo de estudio, 1988 ($NDVI_{prom} = 0.613$) y 1984 ($NDVI_{max} = 0.941$) respectivamente, mientras que los valores mínimos del $NDVI_{prom}$ (0.417) y del $NDVI_{max}$ (0.582) se registraron en 2016.

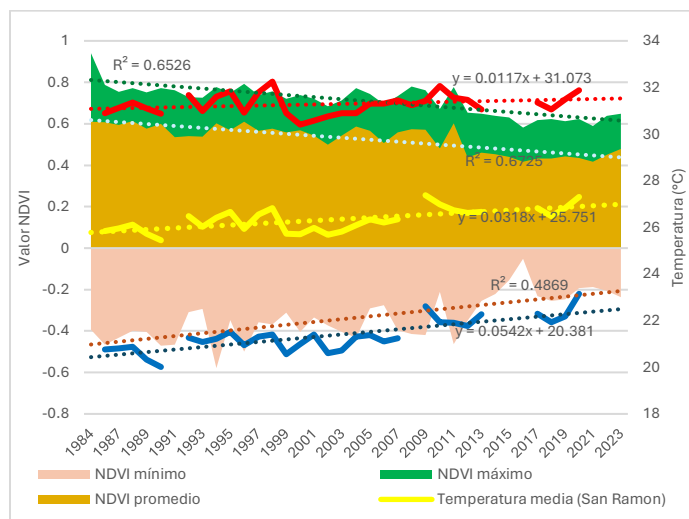


Fig. 2. Registro de valores $NDVI_{max}$, $NDVI_{prom}$ y $NDVI$ mínimo, calculados desde escenas Landsat y temperaturas medias para cada año del periodo de análisis.

En relación con las temperaturas media, máxima y mínima de la EM San Ramón, pese a tener un comportamiento fluctuante en el tiempo, se hace evidente una tendencia incremental en la temperatura media, de más de $1.2^{\circ}C$ entre 1984 y 2023. Asimismo, es notable que la temperatura mínima mostró una pendiente más pronunciada, que alcanzó un calentamiento proyectado superior a los $2^{\circ}C$. En contraste, la tendencia de la temperatura máxima fue menor, teniendo un incremento de $0.4^{\circ}C$ en el mismo periodo.

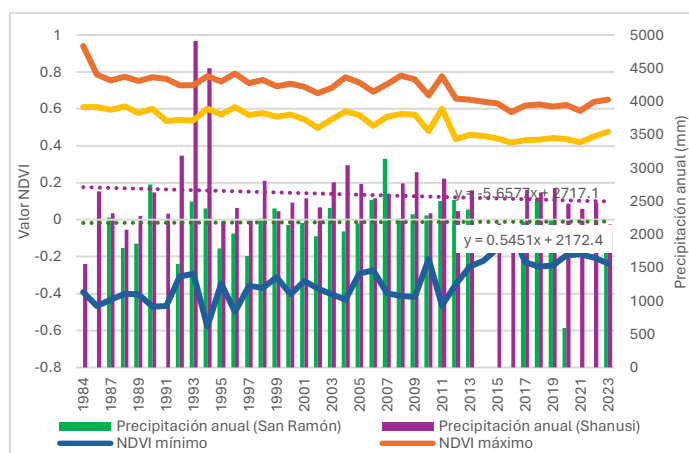


Fig. 3. Registro de valores $NDVI_{max}$, $NDVI_{prom}$ y mínimos calculados desde escenas multispectrales Landsat y precipitaciones anuales para cada año del periodo de análisis.

En el caso de las precipitaciones se puede observar un patrón cíclico de años más húmedos y años más secos (Fig. 3), con variaciones notables en las cantidades de lluvia que reciben las EM de San Ramón (ciudad de Yurimaguas) y Shanusi (próxima a las plantaciones de palma aceitera), alcanzando un registro máximo anual de 4,907 mm (EM Shanusi) en 1993 y el más bajo de 1,556 mm (para un año completo) en 1992 (EM San Ramón). Sin embargo, se aprecia una diferencia en las tendencias que muestran las precipitaciones en cada una de las EM, porque la EM San Ramón no tiene mayor variación a lo largo de los 39 años de estudio, mientras que la EM Shanusi muestra una ligera tendencia negativa para el mismo periodo.

Dentro del periodo de análisis, el área cubierta de bosques primarios presenta una tendencia decreciente (Fig. 4), disminuyendo gradualmente de 76,737 hectáreas en 2001, a 57,291 hectáreas en 2021, lo que representa una pérdida total de 19,801 hectáreas, reduciendo en al menos 25% su extensión en tan solo 20 años. La tasa promedio de deforestación durante este periodo fue de aproximadamente 943 hectáreas por año⁻¹, pero teniendo las mayores reducciones entre 2006-2007, con una pérdida de 2,284 hectáreas, y 2007-2008 con una pérdida de 1,785 hectáreas.

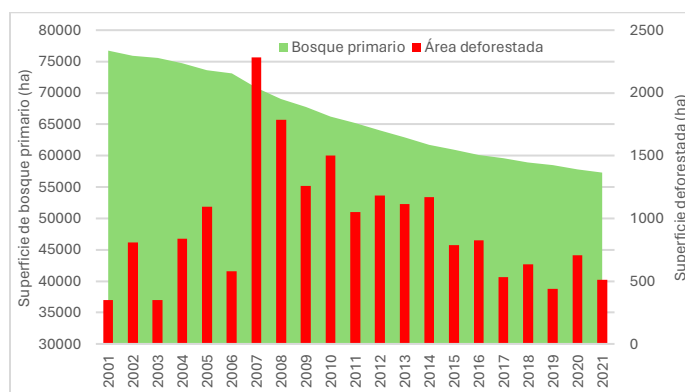


Fig. 4. Variación del área de bosques primarios y la extensión de bosque perdido anualmente en el área de estudio durante el periodo 2001 - 2021

Nota: Valores calculados a partir de las áreas de bosque y de pérdida de bosque anual a nivel distrital de la plataforma web GeoBosques – MINAM.

Las tasas de deforestación anual han variado en el tiempo, alcanzando hasta 3.1% en 2007, 2.5% en 2008 o 2.2% en 2010, teniendo un promedio entre el 2001 y el 2021 de 1.4% al año⁻¹. A pesar de la variabilidad de las tasas de deforestación reportadas por el MINAM, durante el periodo 2001 - 2021, se aprecia 3 momentos diferentes en la evolución de sus extensiones anuales, siendo el primero de 2001 a 2006 con una media de 670 hectáreas afectadas al año⁻¹, mostrando una tendencia incremental, pero con valores menores a las 1,100 hectáreas. Un segundo momento se presenta entre 2007 y 2014, considerado crítico porque tiene un crecimiento superlativo hasta las 2,284 hectáreas (2007), mostrando un promedio de 1,418 hectáreas deforestadas al año⁻¹, y que la pérdida de bosques siempre superó las 1,000 hectáreas anuales, pero teniendo una tendencia decreciente, que se extiende al tercer

momento entre 2015 y 2021, donde la pérdida se redujo a 634 hectáreas al año⁻¹, sin superar en ningún registro las 824 hectáreas deforestadas.

V. DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados, se puede apreciar en los valores de $NDVI_{max}$ y $NDVI_{prom}$ una correlación inversa moderadamente fuerte con el paso de los años ($R^2 = 0.6482$ y $R^2 = 0.6695$ respectivamente), que se debería a una reducción progresiva y constante de la vegetación arbórea en el ámbito, por los procesos de cambio de uso del suelo de zonas inicialmente cubiertas de bosque, para la expansión de áreas de producción agropecuaria, agroindustrial y urbanas, teniendo una variación relativamente homogénea a lo largo de todo el periodo de análisis, patrón que coincide con la reducción que ha tenido la extensión del bosque primario en el área de estudio (Fig. 5), presentando una correlación moderada a fuerte con el $NDVI_{prom}$ ($R^2=0.59$; p-value < 0.0001) y con el $NDVI_{max}$ ($R^2=0.57$; p-value < 0.0001).

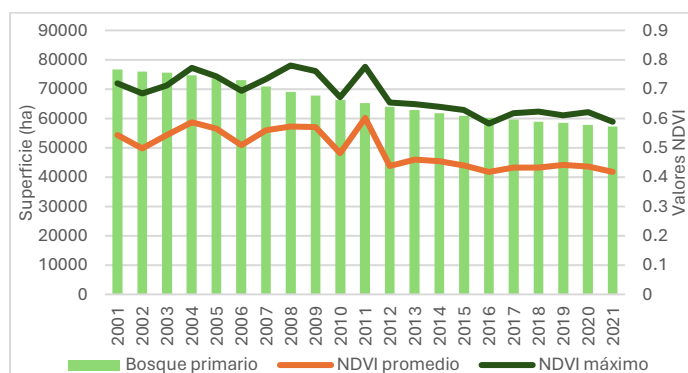


Fig. 5. Relación entre la extensión de bosques primarios (no alterados) y los valores de $NDVI_{prom}$ y $NDVI_{max}$ en el periodo 2001-2021.

Esta disminución del $NDVI_{max}$ (correspondiente a las coberturas vegetales más vigorosas) se produciría por una reducción en la provisión de agua o el incremento de las temperaturas. En cambio, la reducción del $NDVI_{prom}$ (que representa el estado de vigor de todos los tipos y extensiones vegetales del territorio) se produciría por la reducción de la extensión de bosques y/o la pérdida de vigorosidad en la vegetación de todo el ámbito de estudio.

El inicio de operaciones de la empresa Palmas de Shanusi S.A. (2006), tuvo un agresivo desbosque de cientos de hectáreas entre los departamentos de Loreto y San Martín para la plantación de palma aceitera [39], [40], que coincide con el cuarto mayor descenso del $NDVI_{prom}$ en relación con el año precedente, y con los valores más altos de deforestación en el área de estudio según la data del MINAM (2017), en 2007, 2008, 2009 y 2010 consecutivamente [24]. Este tipo de proyectos habrían sido impulsados desde el Estado a partir de la emisión de normas orientadas a promover el cultivo de la palma aceitera en la amazonia peruana como el Decreto Supremo N° 015-2000-AG y el Decreto Legislativo N°1090

(2008), que permitieron la adjudicación de extensas áreas de bosques primarios a empresas agroindustriales para ese fin.

En el caso del clima, se observa que la tendencia negativa del $NDVI_{max}$ y $NDVI_{prom}$, tiene una evolución inversa con relación al incremento de las temperaturas registradas en la EM San Ramón, especialmente con el caso del promedio anual de temperaturas mínimas, al mostrar una correlación moderada con el $NDVI_{prom}$ ($R^2 = 0.403$; p-valor < 0.0001). Esta reducción progresiva de los valores NDVI, de acuerdo con Waqar Ahmad et al. (2020), se debería a los procesos de deforestación, por el impacto que genera en sus condiciones ambientales al perder servicios ecosistémicos como el enfriamiento de la superficie con la sombra que proyecta el bosque sobre el territorio y la mayor reflectividad de las nubes de bajo nivel que se forma por la mayor transpiración de sus árboles, mecanismos que según Carrillo-Niquete et al. (2022) y Ellison et al. (2017) regulan el clima local [42], [43].

Asimismo, el incremento de la temperatura como un efecto de la pérdida de bosques (reducción del $NDVI$), explicaría mejor el aumento de la temperatura máxima. Sin embargo, conforme a lo planteado por Bax et al. (2016), la pérdida de bosques provoca el incremento de la temperatura mínima y la alteración de los patrones de precipitación [45], por el efecto de isla de calor que generan estas áreas al ser expuestas a una mayor insolación, aumentando la capacidad de absorción de energía solar de sus superficies y el posterior calentamiento de su entorno, especialmente durante la noche, como lo explica Bey et al. (2024) y Carrillo-Niquete et al. (2022), con una liberación de calor más lenta y constante [42], [46].

Otro hallazgo que permitiría explicar el mayor incremento de las temperaturas mínimas en la EM San Ramón, es la correlación ($R^2 = 0.5376$; p-value < 0.0001) que tiene con el incremento de las temperaturas globales, reportado por *Goddard Institute for Space Studies* de la *National Aeronautics and Space Administration* de los Estados Unidos [47], superior a las correlaciones que presentaron la temperatura media ($R^2 = 0.4072$) y la temperatura máxima ($R^2 = 0.1365$). Esto ocurriría porque, la variación de las temperaturas mínimas refleja mejor los efectos del calentamiento global sobre el clima local, debido a que son definidas por las características de las masas de aire que llegan a un lugar en un determinado momento, a diferencia de las temperaturas máximas, que se definen por los niveles de insolación que recibe la superficie a lo largo del día.

La fuerte correlación inversa ($R^2 > 0.63$) hallada entre los valores de $NDVI_{max}$ y $NDVI_{prom}$ con el incremento de las temperaturas medias globales [47] (Fig. 6), indicarían el efecto negativo que tiene el incremento de las temperaturas sobre las coberturas vegetales en general ($NDVI_{prom}$), pero con una mayor incidencia sobre los bosques ($NDVI_{max}$), mostrando que los niveles de vigorosidad de las plantas disminuyen ante un calentamiento del clima, probablemente por el incremento de los volúmenes de agua evapotranspirados, que afectará negativamente el balance hídrico del suelo, en perjuicio de los organismos vivos que depende de él.

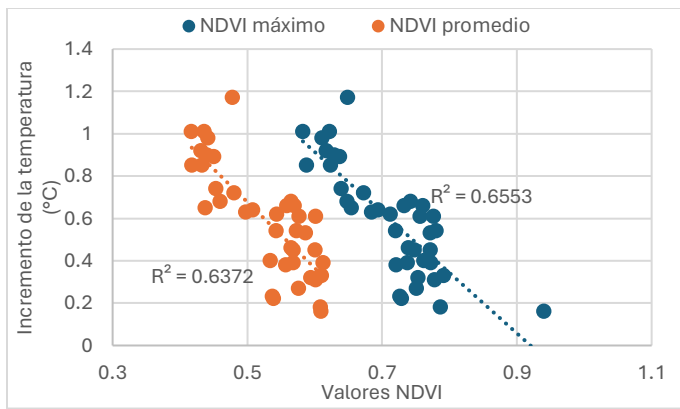


Fig. 6: Correlación del NDVI con relación Cambio Climático según la NASA.

Al dividir el periodo en dos secciones parciales, se pudo apreciar una mayor correlación del NDVI con el incremento de las temperaturas globales en las últimas dos décadas, en relación con la que muestra entre 1984 y 2001 (Fig. 7). Este efecto se debería a que antes de 2002 los bosques del área de estudio estuvieron en mejor condición y cubrían una mayor área, cuya extensión se fue reduciendo con el paso de los años, por lo que los servicios ambientales que brindan (como la regulación de temperaturas) también se redujo. En ese sentido, en el primer periodo los bosques de la zona regulaban más el clima local, por la mayor extensión que tenían, pero en el segundo periodo, al tener una reducción significativa en su extensión, produjo una menor capacidad en su regulación, por lo que el ámbito quedó más expuesto a las variaciones climáticas generadas por el calentamiento global.

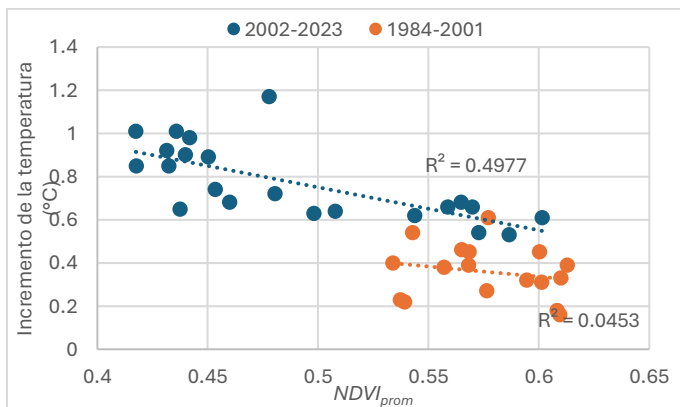


Fig. 7: correlación de las variables de NDVI promedio por periodos parciales y el incremento de las temperaturas según la NASA.

Al correlacionar los resultados del $NDVI_{prom}$ y las precipitaciones anuales de las EM Shanusi y San Ramón, se observa una baja correlación en ambos casos ($R^2 = 0.0254$; $R^2 = 0.0121$ respectivamente). Sin embargo, se pudo encontrar que la correlación se incrementa significativamente en el periodo 2002 a 2022 ($R^2 = 0.51$; $p\text{-value} = 0.0002$), debido a que, a un mayor aporte de agua de las precipitaciones permitiría un mejor desarrollo de la vegetación, incrementando su NDVI, mientras

que, cuando se reduce el volumen de precipitaciones, el desarrollo fenológico de la vegetación será menor, reduciendo su vigorosidad y su valor NDVI (Fig. 8). Esta diferencia se debería a las condiciones climáticas más estables que se tienen a partir de 2002, a diferencia de años previos por la ocurrencia de eventos extremos, como precipitaciones extraordinarias en 1993 y 1994, hasta 88% superiores a la media anual de todo el periodo de análisis (2,605 mm), o por el ENOS extraordinario de 1997-1998, que produjo un aumento de temperaturas de 0.8°C , en relación a la media de años anteriores, que habría incrementado significativamente la evapotranspiración, afectando negativamente al balance hídrico de la zona y la vigorosidad de las coberturas vegetales.

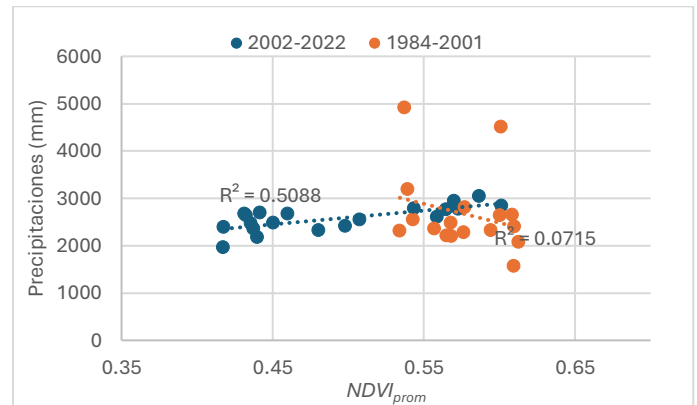


Fig. 8 - Correlación entre las precipitaciones anuales de la EM Shanusi y el $NDVI_{prom}$ del área de estudio

Es importante señalar que las imágenes de $NDVI$ son variables en el tiempo y el espacio, debido a factores que afectan su vigor y cobertura foliar, como los ciclos fenológicos estacionales, etapas de crecimiento, condiciones meteorológicas y climáticas, así como la topografía (generación de sombras) y orientación del terreno (ángulo de incidencia de la insolación), que alteran los niveles de reflectancia de las superficies.

Asimismo, las precipitaciones de las EM de San Ramón y Shanusi muestran dos momentos distintos con relación a sus tendencias: el primero, de 1984 a 2004, tiene una tendencia incremental, mientras que el segundo, de 2005 a 2023, la tendencia se invierte, mostrando un descenso en los volúmenes de sus precipitaciones. Este fenómeno, puede ser explicado con las afirmaciones de Mu & Jones (2022), al precisar que la deforestación afecta las precipitaciones, incrementándolas en los primeros años y descendiendo en zonas deforestadas antiguas [48], por el menor aporte de humedad que brinda la vegetación de zonas alteradas. En ese sentido, se entiende que las primeras décadas (80s y 90s) constituyeron la etapa inicial de la deforestación a gran escala en la zona, lo que habría generado el incremento de sus precipitaciones, pero en el nuevo siglo ya se tenía una buena extensión deforestada varios años atrás, lo que habría generado una disminución en sus precipitaciones. Este argumento también explicaría el

incremento de las precipitaciones en la EM Shanusi en los años 2007, 2008, 2009 y 2011, que corresponden a los primeros años de operación del proyecto Palmas de Shanusi, que deforestó cientos de hectáreas en el sector sur del ámbito de estudio, cerca de la EM Shanusi, por lo cual ese efecto solo se ve reflejado en esta EM más no en los registros de la EM San Ramón, por estar más alejada del área afectada.

Otra observación encontrada fue una fuerte correlación ($R^2=0.62$) entre las precipitaciones de la EM Shanusi y el NDVI mínimo, correspondiente a cuerpos de agua, como lo refiere Ma et al. (2007) y Rodríguez-López et al. (2020) [29], [30]. Esto se debería a que, según Ma et al. (2007) los cuerpos de agua turbios (por la alta carga de sedimentos) tienen niveles de reflectancia muy superiores a los que presentan aguas claras, por lo que, como lo refiere Diaz Crespo et al. (2023), en años en que las precipitaciones son más intensas, los cursos de agua tendrán un mayor caudal y energía para transportar sedimentos [49], por lo que al ser más turbios, su reflectancia y NDVI serán mayores, en cambio, en años con menos precipitaciones los ríos serán menos torrentosos y de aguas más calmadas, por lo que tendrán menos sedimentos suspendidos, y su reflectancia y NDVI disminuirán.

Finalmente, es necesario el fortalecimiento del marco normativo y la implementación de sistemas de monitoreo remoto, con imágenes satelitales, fotografías aéreas y sistemas de información geográfica, para detectar prontamente y fiscalizar procesos de deforestación que realicen estas empresas concesionarias, a fin de imponer sanciones ante incumplimientos que presenten frente a las regulaciones forestales vigentes.

VI. CONCLUSIONES

La implementación de proyectos agroindustriales y plantación de monocultivos como la palma aceitera tienen un fuerte impacto por la remoción de grandes extensiones de bosques nativos en zonas tropicales, que junto a otras actividades que cambian el uso del suelo, hacen de la deforestación, procesos constantes a lo largo de décadas, que se proyecta en la tendencia negativa que muestran los valores NDVI. La disminución del NDVI (*promedio y máximo*) se debe al efecto de tres procesos interconectados entre sí: el primero, la pérdida de servicios ecosistémicos, que aumenta el efecto del calentamiento global en el clima local, viéndose reflejado en el incremento de las temperaturas mínimas; el segundo, el menor aporte de agua a los ecosistemas, por la reducción de las precipitaciones y formación de nubes bajas; y el tercero, por el incremento de las temperaturas, que aumenta los niveles de evapotranspiración, afectando el balance hídrico del suelo al disponer menos agua para la vegetación.

Estos hallazgos hacen notar la necesidad de implementar políticas efectivas de conservación y gestión sostenible de los bosques primarios en la Amazonía, para mitigar los impactos negativos de la deforestación, reducir los efectos del cambio climático, conservar la extraordinaria biodiversidad que

albergan, así como el aprovechamiento de recursos forestales, del que dependen cientos de comunidades locales.

REFERENCIAS

- [1] F. Leijten, U. Lantz C Baldos, J. A. Johnson, S. Sim, and P. H. Verburg, "Projecting global oil palm expansion under zero-deforestation commitments: Direct and indirect land use change impacts," *iScience*, vol. 26, no. 6, p. 106971, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.iisci.2023.106971.
- [2] M. Ruv Lemes *et al.*, "Impacts on South America moisture transport under Amazon deforestation and 2 °C global warming," *Science of The Total Environment*, vol. 905, p. 167407, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167407.
- [3] S. L. Maxwell, R. A. Fuller, T. M. Brooks, and J. E. M. Watson, "Biodiversity: The ravages of guns, nets and bulldozers," *Nature*, vol. 536, no. 7615, pp. 143–145, Feb. 2016, doi: 10.1038/536143a.
- [4] FAO, "Evaluación de los recursos forestales 2020," 2020.
- [5] J. B. Ball, "Global Forest Resources: History and Dynamics," in *The Forests Handbook, Volume 1*, Oxford, UK: Blackwell Science Ltd, 2008, pp. 3–22. doi: 10.1002/9780470757062.ch1.
- [6] J. B. Ball, "Global Forest Resources: History and Dynamics," in *The Forests Handbook, Volume 1*, Oxford, UK: Blackwell Science Ltd, 2020, pp. 3–22. doi: 10.1002/9780470757062.ch1.
- [7] R. M. da Silva, A. G. Lopes, and C. A. G. Santos, "Deforestation and fires in the Brazilian Amazon from 2001 to 2020: Impacts on rainfall variability and land surface temperature," *J Environ Manage*, vol. 326, p. 116664, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116664.
- [8] Y. Mu and C. Jones, "An observational analysis of precipitation and deforestation age in the Brazilian Legal Amazon," *Atmos Res*, vol. 271, p. 106122, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106122.
- [9] S. Wongchuig *et al.*, "Changes in the surface and atmospheric water budget due to projected Amazon deforestation: Lessons from a fully coupled model simulation," *J Hydrol (Amst)*, vol. 625, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130082.
- [10] G. Poveda Jaramillo, "El papel de la amazonía en el clima global y continental : impactos del cambio climático y la deforestación.," 2011, Accessed: Sep. 28, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9760>
- [11] J. C. A. Baker and D. V. Spracklen, "Climate Benefits of Intact Amazon Forests and the Biophysical Consequences of Disturbance," *Frontiers in Forests and Global Change*, vol. 2, Aug. 2019, doi: 10.3389/ffgc.2019.00047.
- [12] G. P. Jaramillo, "El papel de la amazonia en el clima global y continental : impactos del cambio climático y la deforestación.," 2011, [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9760>
- [13] N. A. S. K. Jumari *et al.*, "Analysis of urban heat islands with landsat satellite images and GIS in Kuala Lumpur Metropolitan City," *Heliyon*, vol. 9, no. 8, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18424.
- [14] L. A. Parsons *et al.*, "Tropical deforestation accelerates local warming and loss of safe outdoor working hours," *One Earth*, vol. 4, no. 12, pp. 1730–1740, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.oneear.2021.11.016.
- [15] J. Morpurgo, R. P. Remme, and P. M. Van Bodegom, "CUGIC: The Consolidated Urban Green Infrastructure Classification for assessing ecosystem services and biodiversity," *Landsc Urban Plan*, vol. 234, p. 104726, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.landurbplan.2023.104726.
- [16] A. Cotrina Sánchez, S. Bandopadhyay, N. B. Rojas Briceño, P. Banerjee, C. Torres Guzmán, and M. Oliva, "Peruvian Amazon disappearing: Transformation of protected areas during the last two decades (2001–2019) and potential future deforestation modelling using cloud computing and MaxEnt approach," *J Nat Conserv*, vol. 64, p. 126081, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jnc.2021.126081.
- [17] D. Marengo, C. Longobardi, M. A. Fabris, and M. Settanni, "Highly-visual social media and internalizing symptoms in adolescence: The mediating role of body image concerns," *Comput Human Behav*, vol. 82, pp. 63–69, May 2018, doi: 10.1016/j.chb.2018.01.003.
- [18] D. Marengo, C. Longobardi, M. A. Fabris, and M. Settanni, "Highly-visual social media and internalizing symptoms in adolescence: The

- mediating role of body image concerns,” *Comput Human Behav*, vol. 82, pp. 63–69, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.chb.2018.01.003.
- [19] D. Ellison *et al.*, “Trees, forests and water: Cool insights for a hot world,” *Global Environmental Change*, vol. 43, pp. 51–61, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002.
- [20] M. R. Lemes *et al.*, “Impacts on South America moisture transport under Amazon deforestation and 2 °C global warming,” *Science of The Total Environment*, p. 167407, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.167407.
- [21] W. Walker *et al.*, “Forest carbon in Amazonia: the unrecognized contribution of indigenous territories and protected natural areas,” *Carbon Manag*, vol. 5, no. 5–6, pp. 479–485, Nov. 2014, doi: 10.1080/17583004.2014.990680.
- [22] F. E. Viscarra and B. R. Zutta, “Models of deforestation for setting reference levels in the context of REDD: A case study in the Peruvian Amazon,” *Environ Sci Policy*, vol. 136, pp. 198–206, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.ENVSCI.2022.05.015.
- [23] P. M. Fearnside, “Amazon Forest maintenance as a source of environmental services,” *An Acad Bras Cienc*, vol. 80, no. 1, pp. 101–114, Mar. 2008, doi: 10.1590/S0001-37652008000100006.
- [24] MINAM, “GEOBOSQUES - BOSQUE Y PÉRDIDA DE BOSQUE,” Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático. Accessed: Feb. 10, 2024. [Online]. Available: <https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php>
- [25] V. H. Gutiérrez-Vélez and R. DeFries, “Annual multi-resolution detection of land cover conversion to oil palm in the Peruvian Amazon,” *Remote Sens Environ*, vol. 129, pp. 154–167, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.RSE.2012.10.033.
- [26] A. Bennett, A. Ravikumar, and H. Paltán, “The Political Ecology of Oil Palm Company-Community partnerships in the Peruvian Amazon: Deforestation consequences of the privatization of rural development,” *World Dev*, vol. 109, pp. 29–41, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.worlddev.2018.04.001.
- [27] G. Zheng and L. M. Moskal, “Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors,” *Sensors*, vol. 9, no. 4, pp. 2719–2745, Apr. 2009, doi: 10.3390/s90402719.
- [28] V. B. Gallardo, M. A. Hadad, F. A. Roig, G. Gatica, and F. Chen, “Spatio-temporal linkage variations between NDVI and tree rings on the leeward side of the northern Patagonian Andes,” *For Ecol Manag*, vol. 553, p. 121593, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.foreco.2023.121593.
- [29] M. Ma, X. Wang, F. Veroustraete, and L. Dong, “Change in area of Ebinur Lake during the 1998–2005 period,” *Int J Remote Sens*, vol. 28, no. 24, pp. 5523–5533, Dec. 2007, doi: 10.1080/01431160601009698.
- [30] L. Rodríguez-López *et al.*, “Spectral analysis using LANDSAT images to monitor the chlorophyll-a concentration in Lake Laja in Chile,” *Ecol Inform*, vol. 60, p. 101183, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ecoinf.2020.101183.
- [31] MINAM, “Mapa Nacional de Cobertura Vegetal,” Lima, 2015. Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <https://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/>
- [32] C. C. E. L. W. L. F. Ocampo, “Planeamiento Estratégico de la Provincia de Alto Amazonas,” 2018.
- [33] Dammert, “La relación entre confianza y seguridad: El caso de Chile,” 2014.
- [34] E. A. Glinskis and V. H. Gutiérrez-Vélez, “Quantifying and understanding land cover changes by large and small oil palm expansion regimes in the Peruvian Amazon,” *Land use policy*, vol. 80, pp. 95–106, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.LANDUSEPOL.2018.09.032.
- [35] Limachi Luis; Grandez Roger, “ZONIFICACIÓN ECOLÓGICA Y ECONÓMICA DE LA PROVINCIA DE ALTO AMAZONAS,” 2013.
- [36] T. Leveau, “SUSTENTABILIDAD DE FINCAS PRODUCTORAS DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis*), EN EL VALLE DEL RÍO SHANUSI, LORETO,” 2016.
- [37] USAID, “Análisis de la deforestación en tiempo casi real,” 2014.
- [38] Y. Ke, J. Im, J. Lee, H. Gong, and Y. Ryu, “Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations,” *Remote Sens Environ*, vol. 164, pp. 298–313, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.rse.2015.04.004.
- [39] E. A. Glinskis and V. H. Gutiérrez-Vélez, “Quantifying and understanding land cover changes by large and small oil palm expansion regimes in the Peruvian Amazon,” *Land use policy*, vol. 80, pp. 95–106, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.LANDUSEPOL.2018.09.032.
- [40] E. Borasino Deustua, “Capítulo 2. La cadena de la palma aceitera en contexto,” in *¿Agroindustria en la Amazonía? Posibilidades para el desarrollo inclusivo y sostenible de la palma aceitera en el Perú*, GRADE, Ed., Lima: CLACSO, 2016, pp. 23–68. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: https://biblioteca.clacso.edu.ar/Peru/grade/20161013025755/LIBROGR ADE_palma.pdf
- [41] A. U. K. Waqar Ahmad, M. F. Fayaz Ahmad Khan, A. A. Baig, L. A. Shah, and J. Khan, “How Vegetation Spatially Alters the Response of Precipitation and Air Temperature? Evidence from Pakistan,” *Asian Journal of Atmospheric Environment*, vol. 14, no. 2, pp. 133–145, Jun. 2020, doi: 10.5572/ajae.2020.14.2.133.
- [42] G. A. Carrillo-Niquete, J. L. Andrade, J. R. Valdez-Lazalde, C. Reyes-García, and J. L. Hernández-Stefanoni, “Characterizing spatial and temporal deforestation and its effects on surface urban heat islands in a tropical city using Landsat time series,” *Landsc Urban Plan*, vol. 217, p. 104280, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.landurbplan.2021.104280.
- [43] D. Ellison *et al.*, “Trees, forests and water: Cool insights for a hot world,” *Global Environmental Change*, vol. 43, pp. 51–61, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002.
- [44] V. Bax, W. Francesconi, and M. Quintero, “Spatial modeling of deforestation processes in the Central Peruvian Amazon,” *J Nat Conserv*, vol. 29, pp. 79–88, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.JNC.2015.12.002.
- [45] V. Bax, W. Francesconi, and M. Quintero, “Spatial modeling of deforestation processes in the Central Peruvian Amazon,” *J Nat Conserv*, vol. 29, pp. 79–88, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.JNC.2015.12.002.
- [46] E. Bey, M. Türkeş, and M. M. Hamed, “Long-term air temperature trends in North Cyprus,” *Theor Appl Climatol*, vol. 155, no. 2, pp. 1113–1122, Feb. 2024, doi: 10.1007/s00704-023-04689-6.
- [47] NASA, “Global Temperature,” Global climate change - Vital signs of the planet. Accessed: Feb. 10, 2024. [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>
- [48] Y. Mu and C. Jones, “An observational analysis of precipitation and deforestation age in the Brazilian Legal Amazon,” *Atmos Res*, vol. 271, p. 106122, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2022.106122.
- [49] M. A. Diaz Crespo, S. R. Blas Cadillo, S. A. Gonzales Baldeon, N. S. Damián Esperilla, and U. F. Giraldo Malca, “Variation of the concentration of heavy metals due to rains and floods in the Rimac river basin, Lima-Peru,” in *Proceedings of the 21th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2023): “Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations,”* Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2023, doi: 10.18687/LACCEI2023.1.1.1061.