



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**Análisis multitemporal de la relación entre
deforestación, sequías y variabilidad climática en la
provincia de Tambopata, 1990-2022**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctora en Ciencias
Ambientales

AUTOR

Andrea Susans AUCAHUASI ALMIDON

ASESOR

Dr. Carlos Francisco CABRERA CARRANZA

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Aucahuasi, A. (2025). *Análisis multitemporal de la relación entre deforestación, sequías y variabilidad climática en la provincia de Tambopata, 1990-2022*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Andrea Susans Aucahuasi Almidon
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47660984
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-3109-0603
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Carlos Francisco Cabrera Carranza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	17402784
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5821-5886
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Juan Carlos Montero Chirito
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09493599
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Elmer Gonzales Benites Alfaro
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07867259
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Freddy Atuncar Yrribari
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25527597
Datos de investigación	

Línea de investigación	Degradación de suelos y cambio climático
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: País: Perú Departamento: Madre de Dios Provincia: Tambopata Distrito: Tambopata Urbanización :La Montada Azul Avenida: Jr. Jorge Chavez, Mz. « A », Lt. 5 Latitud: -12.58904075054356 Longitud: -69.20073310902062
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023 - 2025
URL de disciplinas OCDE	Investigación climática: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.10 Forestal https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#4.01.02



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los treinta y un días del mes de octubre del año dos mil veinticinco, siendo las once horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000328-2025-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 23 de octubre del 2025, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA RELACIÓN ENTRE DEFORESTACIÓN, SEQUÍAS Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA PROVINCIA DE TAMBOPATA, 1990 - 2022»

Presentado por la Mg. **ANDREA SUSANS AUCAHUASI ALMIDON**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTORA** en **CIENCIAS AMBIENTALES**.

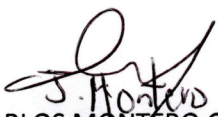
El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° UNMSM-20230110287, de fecha 14 de diciembre del 2023, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 72 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

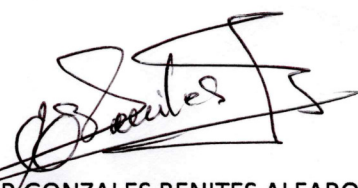
Excelente (19)

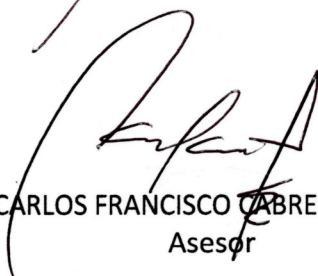
Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTORA** en **CIENCIAS AMBIENTALES** a la Mg. **ANDREA SUSANS AUCAHUASI ALMIDON**.

Siendo las 12:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. JUAN CARLOS MONTERO CHIRITO
Presidente


DR. JOSÉ FREDDY ATUNCAR YRRIBARI
Miembro


DR. ELMER GONZALES BENITES ALFARO
secretario


DR. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA
Asesor



Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, DR. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la **UPG** o de la EP N° 000052-2024-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM **de la tesis/** monografía/ informe de investigación/trabajo académico, cuyo título es **«ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA RELACIÓN ENTRE DEFORESTACIÓN, SEQUÍAS Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA PROVINCIA DE TAMBOPATA, 1990 - 2022»**, presentado por la bachiller/ **magíster/** egresado/ licenciado/ estudiante ANDREA SUSANS AUCAHUASI ALMIDON, para optar el grado académico* de/ título*/ especialidad en DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **14%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado académico*/ título*/ especialidad* DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES.

Lima, 26 de Agosto de 2025



Firmado digitalmente por CABRERA
CARRANZA Carlos Francisco FAU
20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 27.08.2025 11:33:44 -05:00

Firma del Asesor _____

Nombres y Apellidos del asesor: Dr. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA

DNI: 17402784

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

A mis padres, Javier Moisés Aucahuasi Pacheco y Susana Almidón Sánchez, ejemplo de esfuerzo y amor incondicional. Agricultor incansable y mujer de admirable dedicación al hogar, ustedes me enseñaron que el conocimiento también se cultiva con trabajo, constancia y fe.

Este esfuerzo es para ustedes.

Y también es para mis sobrinos, a quienes anhelo inspirar con este logro. Que vean en este esfuerzo la semilla de sus propios sueños, y comprendan que con voluntad y perseverancia todo es posible.

AGRADECIMIENTOS

Muchas emociones, aprendizaje, trabajo y esfuerzo han culminado en este momento.

Quiero agradecer a todas las personas que han sido parte de esta tesis.

Al Dr. Carlos Francisco Cabrera Carranza por ser asesor de esta investigación y fuente de conocimientos. Al M.Sc. Jorge Santiago Garate Quispe, por su amable guía, tiempo y comprensión a lo largo de este viaje.

Agradezco a mis docentes Dr. Alejandro Alcántara, Dr. Oscar Tinoco, y el Dr. Elmer Benites Alfaro, por sus consejos, correcciones y apoyo que han sido fundamentales para el presente estudio. A los tres docentes, gracias por el conocimiento y la paciencia a lo largo de estos años. Asimismo, a los miembros de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera Metalúrgica y Geográfica, por toda la ayuda que me brindaron.

Al Dr. Gabriel Alarcón Aguirre, Dr. Germán Correa Núñez y M.Sc. Nelson Quispe Gutiérrez quienes desde afuera me pudieron ayudar.

A ti, que has estado a mi lado en los momentos de mayor exigencia y cansancio, brindándome apoyo incondicional, palabras de aliento y una compañía silenciosa pero poderosa. Gracias por tu paciencia y por caminar conmigo en este proceso con tanto amor y comprensión. Esta meta también es tuyo.

Les agradezco su tiempo y apoyo.

Gracias.

Contenido

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	10
1.1. Situación problemática	10
1.2. Formulación del problema	16
1.2.1. Problema general de investigación	16
1.2.2. Problemas específicos de investigación	16
1.3. Justificación de la investigación	16
1.3.1. Justificación teórica	17
1.3.2. Justificación práctica	18
1.3.3. Justificación ambiental	20
1.4. Objetivos	21
1.4.1. Objetivo general	21
1.4.2. Objetivos específicos	21
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	22
2.1. Marco epistemológico de la investigación	22
2.2. Antecedentes de investigación	24
2.2.1. Antecedentes internacionales	24
2.2.2. Antecedentes nacionales	27
2.3. Bases teóricas	30
2.2.1. Variable 1: variabilidad climática	30
2.2.2. Variable 2: Sequía	36
2.2.3. Variable 3: deforestación	41
2.4. Marco conceptual	43
3.1. Variables de investigación	47
3.2.1. Variables de investigación	47
3.2.2. Matriz de operacionalización de variables	48
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	50
4.1. Tipo y diseño de investigación	50
4.2. Unidad de análisis, población y muestra	50
4.3. Técnicas de recolección de datos	52
4.4. Análisis e interpretación de la información	69
4.5. Softwares y herramientas	71
4.6. Consideraciones éticas	72
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
4.1. Análisis, interpretación y discusión de resultados	73
4.1.1. Relación entre la deforestación y la variabilidad climática	73
4.1.2. Determinar la relación entre la deforestación y los índices de sequía de SPI y SPEI en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022	128
4.2. Discusión de resultados	141

4.3.	Prueba de hipótesis de la investigación.....	147
4.3.1.	Hipótesis general	147
4.3.2.	Hipótesis específicas	147
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES		149
RECOMENDACIONES.....		150
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		152
ANEXOS.....		168

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de consistencia.....	46
Tabla 2. Matriz de operacionalización de variables.....	48
Tabla 3. Características de los índices de sequía	60
Tabla 4. Categorías de las anomalías de los índices de SPI y SPEI.....	60
Tabla 5. Categorías de cobertura y uso de suelo (nivel 0 y 1)	67
Tabla 6. Periodos de evaluación de precipitación y temperatura	73
Tabla 7. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura media anual y mensual en los años 1970-2022.	105
Tabla 8. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura máxima anual y mensual en los años 1970-2022.	108
Tabla 9. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura mínima anual y mensual en los años 1970-2022.	111
Tabla 10. Tendencia lineal y cambio por década de la precipitación anual y mensual durante 1970-2022.	114
Tabla 11. Tendencia de la temperatura media anual, mensual y estacional durante 1970-2022.	117
Tabla 12. Tendencia de la temperatura máxima anual, mensual y estacional durante 1970-2022.	118
Tabla 13. Tendencia de la temperatura mínima anual, mensual y estacional del periodo 1970-2022.	119
Tabla 14. Tendencias de la precipitación anual, mensual y estacional del periodo 1970 – 2022	120
Tabla 15. Cobertura y uso de suelo durante el periodo 1990-2022 (ha)	121
Tabla 16. Tasa y porcentaje de pérdida de bosque (deforestación) anual promedio en la provincia de Tambopata.....	123
Tabla 17. Deforestación anual en la provincial de Tambopata durante 33 años.....	124
Tabla 18. Número de eventos/episodios según SPI en diferentes escalas de tiempo.....	131
Tabla 19. Intensidad máxima y severidad de sequía de SPI en diferentes escalas de tiempo.	132
Tabla 20. Frecuencia de sequías-SPI por escala de tiempo durante 1990-2022	133
Tabla 21. Número de eventos/episodios según SPEI en diferentes escalas de tiempo.	134
Tabla 22. Intensidad máxima y severidad de sequía de SPEI en diferentes escalas de tiempo.	135
Tabla 23. Frecuencia de sequías-SPEI por escala de tiempo durante 1990-2022.....	135
Tabla 24. Análisis de tendencias de SPI durante 1990-2022	136
Tabla 25. Análisis de tendencias de SPEI durante 1990-2022.....	137

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	51
Figura 2. Diagrama de flujo de la recopilación de información	53
Figura 3. Periodos de las series históricas de precipitación y temperatura.....	56
Figura 4. Esquema de análisis de los índices de sequías	59
Figura 5. Proceso metodológico de recolección de imágenes satelitales para deforestación, cobertura y uso de suelo.....	65
Figura 6. Procesamiento para la obtención de imágenes satelitales en la provincia de Tambopata	66
Figura 7. Comportamiento de la precipitación total durante 1970-2022	75
Figura 8. Comportamiento de la precipitación mensual según periodos evaluados	76
Figura 9. Precipitación mensual según periodos evaluados.....	78
Figura 10. Precipitación estacional según periodos evaluados	80
Figura 11. Anomalías de precipitación (mm) con respecto a la media entre 1970 a 2022. ..	81
Figura 12. Comportamiento de la temperatura media durante 1970 - 2023	82
Figura 13. Comportamiento de la temperatura media mensual según periodos evaluados ..	84
Figura 14. Temperatura media mensual según periodos evaluados.....	85
Figura 15. Temperatura media estacional durante periodos evaluados	87
Figura 16. Comportamiento de la temperatura máxima durante 1970 - 2022	88
Figura 17. Temperatura de la máxima mensual según periodos evaluados.....	89
Figura 18. Temperatura máxima mensual según periodos evaluados.....	91
Figura 19. Temperatura máxima estacional según periodos evaluados.....	93
Figura 20. Comportamiento de la temperatura mínima durante 1970 - 2022.....	94
Figura 21. Comportamiento de la temperatura mínima mensual según periodos evaluados.	96
Figura 22. Temperatura mínima mensual según periodos evaluados	97
Figura 23. Temperatura mínima estacional según periodos evaluados.....	99
Figura 24. Anomalías de temperatura media con respecto a la media entre 1970 a 2022.	100
Figura 25. Anomalías de temperatura máxima con respecto a la media entre 1970 a 2022.	101
Figura 26. Anomalías de temperatura mínima con respecto a la media entre 1970 a 2022.	103
Figura 27. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura media anual según periodos evaluados.....	106
Figura 28. Cambio de temperatura media mensual según periodos evaluados.....	107
Figura 29. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura máxima anual según periodos evaluados.....	109
Figura 30. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura máxima mensual según periodos evaluados.....	110
Figura 31. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura mínima anual en según periodos evaluados.....	112
Figura 32. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura mínima mensual según periodos evaluados.....	113
Figura 33. Tendencia lineal y cambio por década de la precipitación anual durante 1970-2022.	115
Figura 34. Tendencia lineal y cambio por década de la precipitación mensual durante 1970-2022.	115
Figura 35. Uso de suelo (ha) en la provincia de Tambopata.....	121

Figura 36. Evolución de la deforestación acumulada en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022.	122
Figura 37. Deforestación anual en la provincial de Tambopata durante 33 años	125
Figura 38. Correlación de la deforestación acumulada entre la temperatura durante 1990-2022	126
Figura 39. Correlación de la deforestación anual entre precipitación y temperatura 1990-2022.	127
Figura 40. Evaluación de la sequía en SPI y SPEI en diferentes escalas de tiempo.....	129
Figura 41. Correlación entre la deforestación y el índice de sequía SPEI	138
Figura 42. Correlación entre la deforestación y el índice de sequía SPI.....	139
Figura 43. Matriz de correlación entre SPEI y SPI a diferentes escalas.	140

RESUMEN

La provincia de Tambopata tiene pocas investigaciones locales y a largo plazo sobre los patrones de precipitación y temperatura. Y dado los impactos sobre los impactos sobre la variabilidad climática es importante comprender la relación entre la deforestación, precipitación, temperatura y la sequía. El estudio tuvo como objetivo determinar la relación entre la deforestación, sequía y la variabilidad climática (precipitación y temperatura) en la provincia de Tambopata. Se utilizaron datos de precipitación y temperatura de la estación de Puerto Maldonado durante el periodo de 1970 al 2022. También se analizaron la intensidad máxima, severidad y frecuencia de los índices de sequías de la precipitación estandarizada (SPI) y el índice de precipitación y evapotranspiración (SPEI) a escalas temporales (3, 6, 9 y 12 meses) durante el periodo 1990 al 2022. Para determinar las tendencias y magnitud de precipitación, temperatura y sequías se utilizó la prueba de Mann-Kendall y Sen's slope, mientras que se empleó la prueba de Pettitt para detectar el punto de cambio abrupto en la serie temporal de precipitación, temperatura y sequías. La normal climatológica se trabajó con el promedio de datos de precipitación y temperatura (53 años). Se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman para identificar la relación entre la deforestación, sequías y la variabilidad climática durante 1990 al 2022. Los resultados revelaron un aumento de las temperaturas medias, máximas y mínimas. La pendiente de Mann Kendall y Sen reveló tendencias significativas en las temperaturas mensuales, estacionales y anuales (media, máximo y mínima) en el período del estudio. Sin embargo, a diferencia de la tendencia de variación de la temperatura, las precipitaciones mensuales, estacionales y anuales no presentaron una tendencia significativa. La normal climatológica presenta anomalías positivas de temperatura

media, máxima y mínima. Por otra parte, encontramos correlaciones positivas entre la deforestación y las temperaturas media y mínima. Sin embargo, la deforestación no estaba significativamente asociada con la temperatura máxima. Finalmente, las sequías en el índice SPI registró mayor intensidad máxima y severidad fue en el 1995, 1996, 2005, 2010 y 2021, mientras que en el índice SPEI fue menor.

Palabras clave: Anomalías, tendencia de precipitación y temperatura, variabilidad climática, normal climatológica, punto de cambio.

ABSTRACT

Tambopata province has little local and long-term research on precipitation and temperature patterns. And given the impacts on climate variability it is important to understand the relationship between deforestation, precipitation, temperature and drought. The study aimed to determine the relationship between deforestation, drought and climate variability (precipitation and temperature) in Tambopata province. Precipitation and temperature data from the Puerto Maldonado station were used for the period 1970 to 2022. The maximum intensity, severity and frequency of drought indices of standardized precipitation (SPI) and the precipitation and evapotranspiration index (SPEI) were also analyzed at time scales (3, 6, 9 and 12 months) during the period 1990 to 2022. The Mann-Kendall and Sen's slope tests were used to determine the trends and magnitude of precipitation, temperature and drought, while the Pettitt test was used to detect the point of abrupt change in the time series of precipitation, temperature and drought. The climatological normal was worked with the average precipitation and temperature data (53 years). Pearson's correlation coefficient was used to identify the relationship between deforestation, drought and climate variability during 1990 to 2022. The results revealed an increase in mean, maximum and minimum temperatures. The Mann Kendall and Sen slope revealed significant trends in monthly, seasonal and annual temperatures (mean, maximum and minimum) over the study period. However, unlike the temperature variation trend, monthly, seasonal and annual precipitation did not show a significant trend. The climatological normal presents positive anomalies of mean, maximum and minimum temperatures. On the other hand, we found positive correlations between deforestation and mean and

minimum temperatures. However, deforestation was not significantly associated with the maximum temperature. Finally, droughts in the SPI index recorded higher maximum intensity and severity in 1995, 1996, 2005, 2010 and 2021, while in the SPEI index it was lower.

Key words: Anomalies, precipitation and temperature trend, climate variability, climatological normal, change point.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

La cuenca del Amazonas, la selva tropical más grande del mundo abarca 6.3 millones de kilómetros cuadrados en ocho países sudamericanos (más Guayana), con más de dos tercios de ella en Brasil (Butler, 2020; Hansen et al., 2020). La cuenca controla factores climáticos regionales como la temperatura y la precipitación, suministra una quinta parte del flujo de agua dulce hacia los océanos y regula el intercambio de gases atmosféricos (Coe et al., 2017; Davidson et al., 2012). La selva amazónica puede albergar el 25% de todas las especies terrestres, incluyendo 16,000 especies de árboles y 1,300 especies de aves (Barlow et al., 2018; Butler, 2020; Gaston, 2000). En los últimos cincuenta años, la selva amazónica, un punto caliente de biodiversidad a nivel mundial, ha experimentado una deforestación sustancial, principalmente con el propósito de crear pastizales para ganado (Danielson y Mazza Rodrigues, 2022).

La construcción de carreteras en la cuenca amazónica probablemente aceleró la deforestación en la primera mitad de la década de 1970 y desde el 2015, las tasas de la pérdida anual han aumentado, particularmente en la Amazonia Brasileira, después de alcanzar su punto máximo a principios de la década de 2000 y disminuir considerablemente en el 2005 (Danielson y Mazza Rodrigues, 2022).

Perú conserva el décimo lugar en la clasificación global de zonas con mayor densidad forestal, y ocupa el segundo lugar en Sudamérica, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024). La Amazonía peruana ocupa la mayor superficie forestal (67,786,340 ha) seguida de los bosques

andinos y secos (GeoBosques, 2022); por lo que conserva una alta biodiversidad (Alvarez-Montalván et al., 2021), pero ocupa el quinto lugar a nivel mundial en pérdida de bosques (Weisse et al., 2024).

La preservación de la biodiversidad, la regulación del ciclo hidrológico y el almacenamiento de carbono son una de las principales fuentes de servicios ecosistémicos de la selva tropical (Phillips y Brien, 2017), servicios que se encuentran amenazados debido a una acelerada pérdida de cobertura forestal (Brien et al., 2015). La pérdida de cobertura forestal en la Amazonía peruana está causada por la deforestación, que se debe principalmente al cambio de uso del suelo, establecido para la agricultura, minería y la ganadería por parte de la población local (Coomes et al., 2021). También, la selva amazónica se enfrenta a importantes retos debido y al aumento de sequías e incendios forestales (Bochow y Boers, 2023; de Abreu dos Santos et al., 2024; Nicolau et al., 2019).

Según la plataforma GeoBosques del Ministerio del Ambiente de Perú, solo entre 2001 y 2022 se deforestaron 2,921,138 ha en el territorio peruano siendo la mayor tasa de deforestación de los últimos 21 años en el 2020, cuando se perdieron 203.272 ha de bosque y en el departamento de Madre de Dios la pérdida de bosque entre 2001 y 2022 fue de 301,780.80 ha y en la provincia de Tambopata fue de 156,850 ha (GeoBosques, 2022). Entre 1985 y 2017 la actividad minera aurífera en Madre de Dios causó la pérdida de 95,751 hectáreas de bosques y la mayor tasa de deforestación ocurrió entre 2010 y 2017 (64,586 ha) (Espejo et al., 2018). Este proceso de deforestación a nivel nacional, regional y local está que pone en riesgo y ha tenido grandes avances en el territorio.

La biodiversidad de Perú se ve afectada por alteraciones tanto climáticas como antropogénicas y comprender estos cambios facilitará el desarrollo de estrategias de conservación de la biodiversidad (Zevallos y Lavado-Casimiro, 2022). De igual forma señalan que, la intensidad de los efectos del cambio climático varía según su ubicación, tecnología y riqueza (Getnet et al., 2023; IPCC, 2022).

Por otra parte, la causa principal de la deforestación en la región de Madre de Dios, un punto caliente de biodiversidad en el sur de la Amazonia, durante las décadas de 1980 y 1990 se atribuye al desarrollo agrícola subvencionado por el gobierno (Cho et al., 2021) y ha tenido implicaciones significativas en la pérdida de bosques naturales en la región (Alvarez y Naughton-Treves, 2003; Michaelsen et al., 2013). Sin embargo, durante el 2000, la actividad minera aurífera emergió como un importante impulsor de las alteraciones en los patrones regionales de uso y cobertura del suelo (Scullion et al., 2014). Y además Madre de Dios está posicionada como la segunda zona más afectada en términos de deforestación dentro del Perú (Asner et al., 2010; Naughton-Treves, 2004; Scullion et al., 2014).

Desde la época preindustrial, la temperatura del planeta ya ha aumentado unos 1.2 °C y se prevé que siga aumentando en los próximos años (IPCC, 2021). Leon et al., (2022) manifiestan que los modelos climáticos proyecten un aumento de la temperatura de más de 2.0°C si continúa la tendencia actual de las emisiones y esta situación sería más preocupante si no se implementan acciones de adaptación y mitigación frente al cambio climático. En el Perú, la temperatura máxima y mínima incrementaron en 0.2°C/década en la mayor parte del país, si bien es cierto, el país

ha dado pasos importantes en relación con la problemática del cambio climático, sin embargo, aún queda mucho por hacer ya que el Estado y la sociedad no dan la relevancia necesaria al problema, ni son conscientes de sus graves repercusiones económicas, sociales y ambientales que conlleva el cambio climático (Senamhi, 2009).

Por su parte el (Congreso de la República del Perú, 2024) señala que existe avances importantes en la articulación política frente al cambio climático, aunque persisten brechas significativas en la gobernanza ambiental, la gestión del riesgo de desastres y la implementación efectiva de políticas públicas. Por tanto, el fortalecimiento de las capacidades técnicas, la asignación de recursos sostenibles y la vigilancia parlamentaria resultan claves para enfrentar con eficacia los desafíos del cambio climático en el Perú.

También han evidenciado que el cambio climático representa una amenaza creciente para el desarrollo económico del Perú, especialmente por su impacto negativo en sectores sensibles como la agricultura y la pesca. Según el BCR (2021), los desvíos en la temperatura respecto a la normal histórica (1960–1990) ya han generado pérdidas económicas significativas y podrían reducir el ingreso per cápita entre un 9 % y 22 % hacia el 2050, e incluso hasta un 46 % al 2100, dependiendo de la magnitud del calentamiento. Los efectos del clima sobre el crecimiento económico son estadísticamente significativos, especialmente en regiones como Madre de Dios, Lima y Tumbes. Este escenario es aún más preocupante si se considera que el país exhibe una alta vulnerabilidad estructural al cambio climático, con ecosistemas frágiles, alta exposición a eventos extremos y una economía aún dependiente de

sectores primarios. La limitada capacidad de adaptación, la baja resiliencia institucional y la falta de políticas económicas climáticamente inteligentes agravan la situación, exigiendo acciones urgentes para incorporar el riesgo climático en la planificación territorial y económica a nivel nacional y regional.

La temperatura y la precipitación son los indicadores más importantes para estudiar sobre el cambio climático presente y futuros (Lute y Abatzoglou, 2021; Sun et al., 2015). No obstante, la deforestación y los incendios que ocurren en el Amazonas tienen repercusiones potenciales en la temperatura de la superficie de la tierra y la variabilidad de las precipitaciones (Reygadas et al., 2023; Silva et al., 2023). En el sureste de la Amazonia peruana (Madre de Dios), la agricultura, minería y silvicultura selectiva tienen efectos negativos en la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas forestales, y se les considera los principales impulsores de la deforestación (Lagneaux et al., 2024). Aunque la extracción de oro causa los efectos negativos más graves en los ecosistemas (Pisconte et al., 2024), la agricultura causa la mayor proporción de deforestación (Alarcón-Aguirre et al., 2023). Por lo tanto, en el contexto actual de la crisis del calentamiento global y la biodiversidad, la deforestación en el Amazonas es una preocupación mundial importante debido a sus efectos sobre el clima, el medio ambiente natural y las condiciones socioeconómicas de las poblaciones más vulnerables (Cabral et al., 2024).

Por otro lado, estudios previos han demostrado cómo la deforestación en la Amazonia genera impactos significativos en las variables climáticas, el incremento de la deforestación tiende a aumentar la temperatura (Maillard et al., 2022) y disminuir la precipitación (Reygadas et al., 2023). Sin embargo, poco se ha estudiado a escala

local como la degradación forestal afecta la precipitación y temperatura. Debido a que tradicionalmente, los estudios sobre el clima han abarcado grandes zonas y tendencias a escala mundial y para comprender el cambio climático es esencial reducir a escala local (Pielke et al., 2000). La provincia de Tambopata es caracterizado por tener cambios de uso de la tierra dominados por la minería y la agricultura (Espin y Perz, 2021). Estudios sobre tendencias, punto de cambio de la precipitación y temperatura a escala local a largo plazo son escasos y, dado los impactos sobre la variabilidad climática, es importante comprender la relación entre la deforestación, precipitación y temperatura.

La sequía se ha convertido en una preocupación científica crucial en el marco del cambio climático global, vigilar las tendencias a largo plazo de las múltiples características de la sequía es importante para mitigar y abordar el riesgo de sequía (Liu et al., 2024). El SPI es un índice que se calcula a partir de los datos de precipitación, mientras que el SPEI emplea un balance hídrico que se determina restando la evapotranspiración de la precipitación (Tirivarombo et al., 2018).

A nuestro conocimiento, la provincia de Tambopata tiene pocas investigaciones locales y a largo plazo sobre los patrones de precipitación y temperatura. Y dado los impactos sobre los impactos sobre la variabilidad climática es importante comprender la relación entre la deforestación, precipitación, temperatura y la sequía.

La deforestación es el peligro más significativo para la selva en el área de estudio. La mayoría de la deforestación ocurre de manera ilegal, y el gobierno peruano y de

Madre de Dios enfrenta desafíos significativos para hacer cumplir el estado de derecho en la cuenca del Amazonas debido a las vastas distancias involucradas.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general de investigación

¿Cuál fue la relación entre la deforestación, sequías y variabilidad climática en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022?

1.2.2. Problemas específicos de investigación

¿Cuál fue la relación entre la deforestación y la variabilidad climática en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022?

¿Cuál fue la relación entre la deforestación y los índices de sequía en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022?

1.3. Justificación de la investigación

La crisis climática representa un grave problema global para los próximos años, y alcanzar emisiones netas cero es el objetivo de la mayoría de las naciones para abordarlo y para lograr este objetivo requiere un esfuerzo coordinado entre los sectores público y privado, implicando una transformación fundamental de hábitos en áreas como la generación de energía, la manufactura, la agricultura, la movilidad

y la vivienda (Becchetti et al., 2025). En base a ello se propone la justificación teórica y justificación practica:

1.3.1. Justificación teórica

La conciencia pública sobre la importancia global de la selva amazónica se ha visto fortalecida por las preocupaciones sobre la pérdida de biodiversidad y sus contribuciones al calentamiento relacionado con el cambio climático a través de la deforestación (Cerri et al., 2018). Con el cambio climático, ha quedado claro que se necesita más investigación para entender cómo la selva amazónica cicla y almacena carbono junto a los procesos de la deforestación (Danielson y Mazza Rodrigues, 2022).

También, la cuenca del Amazonas ha experimentado sequías sustanciales, particularmente en 2005, 2010 y 2015, lo que ha resultado en un aumento de la incidencia de incendios y ha impactado la vegetación, la captura de carbono y los ciclos hidrológicos (Armenteras y Retana, 2012; Panisset et al., 2018; Parsons et al., 2018). Se anticipa que las sequías aumenten en frecuencia y severidad, lo que incrementará la susceptibilidad de la selva amazónica al cambio climático (Panisset et al., 2018; Parsons et al., 2018; Staal et al., 2020).

Comprender la interacción entre la variabilidad climática, la deforestación y la sequía es crucial para formular políticas de mitigación efectivas y preservar la sostenibilidad del ecosistema de la cuenca del Amazonas y sus funciones regulatorias del clima global (Aragão et al., 2008; Paredes-Trejo et al., 2021).

La variabilidad climática, la deforestación y las sequías de la cuenca amazónica están profundamente interconectadas, ya que cada factor influye en los demás y los agrava. Comprender estas interacciones es crucial para desarrollar estrategias eficaces de conservación y gestión que mitiguen el impacto sobre este ecosistema vital (S. Chen et al., 2024; Davidson et al., 2012; Lopes et al., 2016; Parsons et al., 2018; Spracklen y Garcia-Carreras, 2015; Staal et al., 2020).

1.3.2. Justificación práctica

La región amazónica peruana, y en particular la provincia de Tambopata ha experimentado una considerable transformación en su paisaje durante las últimas décadas debido a la creciente presión de actividades humanas como la deforestación, la actividad minera y la expansión agrícola. Este proceso ha impactado no solo en los ecosistemas locales, sino también en los patrones climáticos, generando alteraciones en la temperatura y en la disponibilidad de agua debido a la variabilidad climática. Dada la relevancia global que tiene la Amazonía como reguladora del clima planetario, es crucial entender las interrelaciones entre los fenómenos de deforestación, la ocurrencia de sequías y los cambios en los patrones climáticos a nivel local.

El análisis de estas relaciones no solo es de interés académico, sino que también tiene implicaciones directas en la formulación de políticas públicas que promuevan un uso más sostenible de los recursos naturales. La sequía, exacerbada por el cambio climático y la deforestación, afecta la biodiversidad, la agricultura y la calidad de vida de las poblaciones locales, que dependen en gran medida de los servicios ecosistémicos provistos por los bosques.

En este sentido, la elección de Tambopata como área de estudio es pertinente debido a que esta provincia se encuentra en una de las regiones con mayores tasas de deforestación en el Perú. Asimismo, su ubicación en la Amazonía la hace especialmente vulnerable a los impactos del cambio climático, tales como el aumento en la frecuencia e intensidad de sequías, lo cual a su vez puede estar relacionado con la pérdida de cobertura forestal.

A través de este estudio multitemporal, que abarca más de tres décadas (1990-2022), se busca identificar tendencias en las variables climáticas clave, como la temperatura y la precipitación, y cómo estas están asociadas con la deforestación en Tambopata. El uso de técnicas robustas de análisis de tendencia, como la prueba no paramétrica de Mann-Kendall y el estimador de pendiente de Sen, permitirá detectar cambios significativos en los datos, lo cual es crucial para comprender los efectos a largo plazo de la intervención humana en los ecosistemas amazónicos.

En resumen, este estudio se justifica por la necesidad urgente de entender las interacciones entre la deforestación, las sequías y la variabilidad climática en una de las áreas más biodiversas y vulnerables del planeta. Los resultados proporcionarán una base sólida para el diseño de políticas y prácticas que promuevan la sostenibilidad ambiental en la región de Tambopata, contribuyendo de manera directa al bienestar de las poblaciones locales y a la preservación de los recursos naturales para las futuras generaciones.

1.3.3. Justificación ambiental

Basado en el profundo impacto que se generan en los ecosistemas, los ciclos hidrológicos, estabilidad climática y la seguridad alimentaria, así como su conexión directa con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), surge la justificación ambiental para estudiar la relación entre la deforestación, la variabilidad climática y las sequías. La deforestación no solo contribuye a la pérdida de biodiversidad (ODS 15: Vida de Ecosistemas Terrestres), sino que también interrumpe el equilibrio del carbono, influyendo en la regulación natural del clima. (ODS 13: Acción por el Clima). Debido a que los bosques almacenan carbono, absorben cantidades significativas de CO₂ de la atmósfera. A su vez, esto tiene consecuencias directas para la disponibilidad de agua (ODS 6: Agua limpia y saneamiento), lo que compromete tanto la seguridad hídrica y alimentaria como los ecosistemas (ODS 2: El hambre ya no existe).

También la seguridad alimentaria se ve significativamente afectada por la deforestación y la variabilidad climática a nivel local, donde las poblaciones que dependen de los recursos forestales y agrícolas se ven directamente impactadas. Los efectos de las sequías prolongadas y la reducción de las precipitaciones son particularmente perjudiciales para estas comunidades, que a menudo dependen del bosque para obtener alimentos, agua y otros recursos. La reducción de los bosques agrava aún más las desigualdades en estas regiones al restringir el acceso a productos tradicionales y reducir la productividad agrícola, poniendo en peligro el bienestar y los medios de vida de la población local.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la relación entre la deforestación, sequía y la variabilidad climática (precipitación y temperatura) en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022.

1.4.2. Objetivos específicos

Determinar la relación entre la deforestación y la variabilidad climática (precipitación y temperatura) en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022.

Determinar la relación entre la deforestación y los índices de sequía en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco epistemológico de la investigación

La filosofía ambiental desempeña un papel crucial a la hora de abordar la variabilidad climática, la deforestación y las sequías, integrando perspectivas ecológicas y éticas para fomentar prácticas sostenibles. Este marco integra conocimientos de diversas disciplinas, enfatizando la interconexión de los factores naturales y sociales.

La filosofía ambiental estudia la interacción entre los seres humanos y su entorno natural, promoviendo una transición hacia una perspectiva más ética e integral. Su objetivo es replantear la relación entre la humanidad y la naturaleza, cuestionando el paradigma de dominación sobre el entorno para resaltar la importancia de una convivencia más equilibrada y sostenible (Bugallo, 2008). En el contexto de la variabilidad climática, la deforestación y las sequías, la filosofía ambiental invita a reflexionar sobre los valores, creencias y objetivos de las sociedades industriales, que han incentivado la explotación desmedida de los recursos naturales. Esta filosofía propone redefinir la relación entre el ser humano y su entorno, priorizando una coexistencia más armónica y sustentable (Bugallo, 2008).

Asimismo Velayos et al., (2019) señala que la filosofía ambiental no solo trata de la conservación de la naturaleza, sino también de crear una sociedad más equitativa y responsable, que garantice el bienestar de todos los seres vivos. Además, la educación ambiental en cualquier nivel de un sistema educativo parece ser evidente y universal debido a la gravedad de los desafíos ambientales contemporáneos y la filosofía de la

educación ambiental, difiere de un país a otro (Zakharova et al., 2015). Y para el medio ambiente es importante para la sostenibilidad y supervivencia humana, así como para de otros organismos (Omorovie, 2020).

Desde el enfoque filosófico para la variabilidad climática y sequias la filosofía de la ecología y la religión pueden contribuir de manera significativa a la resolución de crisis ambientales al promover las practicas sostenibles y las consideraciones éticas (Omorovie, 2020). Desde la integración científica y tecnológica comprender las complejas interdependencias entre el clima, la hidrología y las actividades humanas es esencial para una gestión efectiva de la sequía y esto incluye reconocer los factores antropogénicos que agravan las condiciones de sequía (AghaKouchak et al., 2021; Haile et al., 2020). Sobre el uso sostenible de la tierra adoptar métodos agrícolas sostenibles y prácticas de uso de la gua es fundamental para mantener el equilibrio y mitigar los impactos de la sequía (Birinyi et al., 2023).

Por otra parte, la deforestación ocasiona la erosión del suelo, la pérdida de hábitats y la alteración del ciclo del agua, lo que incrementa el riesgo de sequías y contribuye al cambio climático y para ello recomiendan que se debe tener en cuenta las técnicas avanzadas de monitoreo, como la vigilancia forestal basada en el aprendizaje profundo, y son fundamentales para seguir de cerca la deforestación y aplicar estrategias de gestión eficaces (Srivastava y Ahmed, 2024).

La gestión eficiente de la sequía y la deforestación requiere un enfoque integral que combine la comprensión científica con perspectivas éticas y filosóficas para garantizar prácticas ambientales sostenibles como una de las estrategias integrales

(Birinyi et al., 2023; Omorovie, 2020; Srivastava y Ahmed, 2024). Por otra parte, involucrar a la población y a los responsables de las políticas en la comprensión y mitigación de los efectos de la variabilidad climática y la deforestación es esencial para una sostenibilidad prolongada (Bapon y Saeid, 2017).

Para proteger las funciones ecológicas e hidrológicas de la Amazonia, los responsables políticos deben tener en cuenta los múltiples efectos de la variabilidad climática a escala local y mundial.

Finalmente, integrar ideas filosóficas con los avances científicos y técnicos puede facilitar un enfoque más integral y sostenible para abordar la variabilidad climática, la deforestación y las sequías. Este enfoque integral no solo aborda problemas ambientales urgentes, sino que también fomenta una resiliencia ecológica y sostenibilidad.

.

2.2. Antecedentes de investigación

2.2.1. Antecedentes internacionales

Reygadas et al. (2023) el objetivo principal de la investigación fue evaluar los efectos de la deforestación y de la degradación forestal en tres tipos de indicadores de servicios ecosistémicos a nivel local: evapotranspiración, temperatura de la superficie terrestre y la precipitación, durante el periodo comprendido entre 2003 - 2020. Para analizar las tendencias, emplearon el enfoque de Mann-Kendall. El estudio se realizó en bosques deforestados, degradados y en zonas de

amortiguamiento. Los autores concluyen que, los servicios ecosistémicos presentan diferencias significativas según las condiciones del bosque y observaron tendencias positivas en la evapotranspiración, temperatura y la precipitación en áreas más afectadas localmente, como carreteras, y asentamientos humanos.

Silva et al. (2023) analizaron las tendencias de la deforestación y las áreas quemadas en la Amazonia durante el periodo 2001 – 2020, así mismo evaluaron los impactos en la precipitación y temperatura. Para determinar la deforestación utilizaron Google Earth Engine y llevaron a cabo diversas etapas de análisis, como el mapeo de la evolución de la cobertura del bosque, el análisis de cambios en el uso del suelo, la identificación de áreas quemadas y el análisis de la relación entre la deforestación, la precipitación y la temperatura. Para los análisis emplearon las pruebas de Mann-Kendall y la pendiente de Senn para examinar las tendencias. Sus resultados revelaron un aumento significativo de la deforestación. Además, se observó una disminución de la precipitación y un aumento en las temperaturas. En las conclusiones señalan la relación espacial entre los cambios en la cobertura del suelo y las variaciones de la precipitación y temperatura.

Kumar y Raj Gautam (2014) realizaron un análisis cualitativo del impacto del cambio climático en la productividad agrícola. Los autores destacan la preocupante predicción de la mayoría de los modelos en cuanto a la presencia de condiciones meteorológicas extremas, lo que representa una amenaza para la agricultura y la seguridad alimentaria. En la India, se han registrado 23 sequías de gran impacto entre 1981 y 2009, y la frecuencia de estos eventos continua. Además, el 55% del territorio de la India sufre de escasez de agua. Los autores también señalan que el 66% de la

población depende de la agricultura de subsistencia, la cual está estrechamente ligada al clima. El estudio concluye en que, se destaca que los fenómenos meteorológicos ejercen una gran influencia en el rendimiento y producción de los cultivos. Se estima que el rendimiento del trigo se verá afectado entre 5% y 10% con cada aumento de 1°C, lo cual tendrá repercusiones en la alimentación de las personas.

Maillard et al. (2022) llevaron a cabo cálculos de las tasas anuales de pérdida de cobertura vegetal con el objetivo de establecer su relación con las tendencias anuales de temperatura. Utilizaron datos de cobertura vegetal obtenidos a partir de imágenes satelitales durante un periodo de tiempo y datos de estaciones meteorológicas del servicio meteorológico de Bolivia. Para los análisis aplicaron la prueba de Mann-Kendall para determinar la relación entre las variables y emplearon el coeficiente de Pearson para determinar su correlación entre la deforestación y las tendencias de precipitación. Sus resultados revelaron una tendencia pequeña pero significativa ($p < 0,05$) de pérdida de bosque para cada sitio de estudio, siendo la expansión de la soja y ganadería la principal causa de la deforestación. Así mismo encontraron que las tendencias anuales de temperatura diurna y nocturna fueron significativas ($p > 0,001$) en bosques impactados y en bosques intactos ($p > 0,001$).

Iñiguez-Gallardo y Tzanopoulos (2023) estudiaron las posturas de las personas sobre la mitigación y adaptación al cambio climático, así como de la recopilación de las percepciones de los agricultores sobre la adaptación en zonas rurales. Utilizaron entrevista semiestructuradas y encuestas para la recopilación de información. En sus resultados señalan que la gran mayoría de la población urbana tienen una postura

favorable para la mitigación mientras que la población de las zonas rurales y agricultores tienen una postura de revisión.

2.2.2. Antecedentes nacionales

Espejo et al. (2018) realizaron el cálculo de la deforestación por minería en Madre de Dios para un periodo de 34 años. En este estudio emplearon imágenes satelitales de CLASlite y los datos de Global Forest Change para identificar la presencia de la actividad de minería. La metodología consistió en fusionar los conjuntos de los datos para cuantificar la deforestación. En sus resultados revelaron que durante el periodo comprendido entre 1984 – 2017 se deforestaron un total de 95,751 hectáreas de bosque en el área de estudio. Además, se identificaron que las zonas de mayor dinámica causada por la minera se ubicaron en Huepetuhe, Delta y la Pampa en Madre de Dios. Los autores concluyen que la deforestación por minería estuvo impulsada principalmente por la construcción de la carretera interoceánica y los elevados costos de la venta y compra del oro.

Espin y Perz (2021) examinaron la falta de eficacia en la implementación de la Ley de minería ilegal de oro en Madre de Dios. Entre sus objetivos fue explicar las razones detrás de la ineffectividad del marco normativo en abordar los delitos ambientales asociadas con la actividad minera en Madre de Dios. El análisis consistió en la revisión marco legal ambiental sobre las actividades extractivas que las regulan. Finalmente señalan que encontraron una baja efectividad de aplicación de normas en la región de Madre de Dios y se debe principalmente a la débil colaboración entre

cooperantes públicas y privadas, así mismo a la escasa intervención presupuestal por parte de los estamentos políticos.

Moraes et al. (2023) evaluaron las tendencias climáticas en el departamento de Arequipa desde 1988 a 2017. Los autores señalan que Arequipa es una región susceptible al cambio climático debido a sus actividades mineras y agricultura de regadío. Emplearon la prueba de Mann-Kendall para determinar las tendencias y la pendiente de Sen para estimar el punto de cambio de las variables climatológicas. Se utilizaron datos de precipitación y temperatura del SENAMHI y datos grillados de la NOAA. En sus resultados encontraron un aumento en la precipitación anual (+19.9 mm/década) y en las temperaturas mínimas (+0.31 °C/década) y máximas (+0.22 °C/década) en toda la región de Arequipa durante el periodo analizado. Finalmente, señalan que el incremento de la temperatura mínima fue mayor en comparación con las temperaturas máximas y el este aumento de temperatura tuvo un impacto negativo en la masa de los glaciares provocando su disminución. Los autores también resaltan la escasez de análisis de datos climáticos a escala local.

Chavez et al. (2020) analizaron de cómo la variabilidad climática afecta a las actividades de subsistencia: cultivo del arroz, yuca y maíz, en las comunidades de Madre de Dios, específicamente en las provincias de Tambopata, Tahuamanu y Manu, teniendo en cuenta que esta región ha experimentado registros de sequía, se llevaron a cabo 77 encuestas a productores rurales (14 mujeres y 63 varones), así como de talleres con diversos actores como parte de la metodología. Los resultados reportan impactos negativos de la variabilidad en las actividades de subsistencia, y el 96% de los entrevistados percibe los efectos del cambio climático en los últimos

años, incluyendo altas temperaturas (51%), fuerte vientos (44%) y sequías extremas (20%). La vulnerabilidad climática afecta la subsistencia y se intensifica en sectores como la agricultura, producción de castaña, ganadería y acuicultura. Se destaca la importancia de investigaciones locales para abordar los impactos del cambio climático en las comunidades rurales.

Chávez-Michaelsen et al. (2013) analizaron el uso y cambio de uso de suelo durante 1996-2011 en la provincia de Tahuamanu, considerando tres dinámicas: tierras agrícolas cercanas a la carretera interoceánica, zonas de concesión maderera y zonas protegidas cerca al río. En sus resultados indicaron que previo al periodo analizado, la deforestación fue mínima. Sin embargo, después de la construcción de la carretera interoceánica, la deforestación fue aumentando de 7.70 ha 19,516 hectáreas, en áreas cercanas a la carretera, mientras que los cambios disminuyeron en zonas protegidas. Se registró un aumento en la titularidad de tierras cerca de la carretera interoceánica debido a la densidad poblacional. Finalmente concluyen que hubo una conversión del 53% de bosques a áreas de pastoreo. Además, se destaca la efectividad de las concesiones forestales maderables en la prevención de la deforestación.

2.3. Bases teóricas

2.2.1. Variable 1: variabilidad climática

a. Variabilidad climática

La variabilidad climática se refiere a los cambios en las condiciones promedio y las características estadísticas del clima, incluyendo medidas como la desviación estándar y la ocurrencia de eventos extremos, a lo largo de diferentes periodos de tiempo y áreas geográficas (Vellinga, 2013). Según la Comisión Europea (2021), la variabilidad se representa como las desviaciones de la tendencia promedio. La variabilidad climática se representa al identificar anomalías en la precipitación y temperatura que pueden ocurrir de manera interanual o estacional (Montealegre y Pabon, 2000). La variabilidad del clima son impulsadas en gran parte por los cambios en el uso del suelo, urbanización y los impactos del cambio climático humanas (IPCC, 2021).

La prueba de Mann-Kendall, se emplea frecuentemente para evaluar tendencias en parámetros climáticos como la temperatura, la precipitación, la humedad y la evaporación, ha sido examinado en una variedad de estudios sobre variabilidad climática. El análisis de tendencias está diseñado para determinar si los valores de los datos aumentan, disminuyen o permanecen fijos a lo largo del tiempo (Agbo et al., 2023). Esta prueba se emplea con frecuencia en el examen de series temporales climatológicas, meteorológicas e hidrológicas (De Luca et al., 2020) y ha sido

ampliamente recomendado para uso público por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1996).

b. Variación climática

“Es la fluctuación, o un componente de la misma, cuya escala de tiempo característica es lo suficientemente larga como para resultar en una inconsistencia apreciable de los promedios sucesivos de 30 años (normales de la variable) (WMO, 1996).

c. Cambio climático

El cambio climático se refiere a las alteraciones significativas de los patrones climáticos provocadas principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes tanto de los sistemas naturales como de las actividades humanas (Sridevi et al., 2024) y entre ellos son la agricultura, urbanización y los procesos industriales (Hurlimann et al., 2021). Estas emisiones, entre las que se incluyen el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), contribuyen al efecto invernadero, que calienta la Tierra y provoca diversos cambios climáticos (Kinney et al., 2023; Sridevi et al., 2024).

El cambio climático constituye una amenaza para la sostenibilidad de las ciudades y sus respectivas sociedades, y debe ser tratado de manera apropiada. Los entornos urbanos, específicamente las ciudades, son responsables de la generación de una cantidad considerable de emisiones de gases de efecto invernadero, los cuales constituyen la fuente del cambio climático (Hurlimann et al., 2021).

El cambio climático afecta a múltiples sectores, como la sanidad, la agricultura, la silvicultura y los entornos urbanos. Provoca un aumento de las temperaturas, fenómenos meteorológicos extremos y cambios en los ecosistemas (Sridevi et al., 2024).

Las estrategias para hacer frente al cambio climático incluyen la mitigación (reducir las emisiones de GEI) y la adaptación (ajustarse a los efectos del cambio climático). Ambos enfoques son esenciales para gestionar sus impactos (Hurlimann et al., 2021; Kinney et al., 2023; Sridevi et al., 2024).

d. Tendencias climáticas

Las tendencias climáticas se refieren a los cambios a largo plazo de variables climáticas como la temperatura, las precipitaciones y los fenómenos meteorológicos extremos durante periodos prolongados. Estas tendencias suelen analizarse para comprender los efectos del cambio climático y desarrollar estrategias de adaptación (Gashaw et al., 2023). Asimismo la WMO (2012) señala que la tendencia es una variable que cambia gradualmente.

Para el análisis de las tendencias climáticas, diversos investigadores han utilizado una prueba no paramétrica conocida como la prueba de Mann-Kendall. Esta prueba fue introducida originalmente por (Mann, 1945) y desde entonces se ha generalizado su uso en los campos de la hidrología y la climatología para el análisis de tendencias, como demuestran estudios como (Basin, 2019). La hipótesis nula de la prueba de Mann-Kendall señala que no existe una tendencia monótona discernible en el

conjunto de datos. Esto implica que, si el valor p de la prueba estadística es inferior o igual a 0,05, se puede inferir que existe un patrón discernible en los datos con un nivel de significación del 5% (Hirsch et al., 1981).

Muchos estudios han empleado la prueba de tendencia de Mann-Kendall en sus investigaciones sobre los patrones cambiantes de precipitación y temperatura, (J. Chen et al., 2023; Fan et al., 2021; Getnet et al., 2023; Khan et al., 2023; Moraes et al., 2023; Moreira et al., 2023).

e. Tiempo y clima

El tiempo y el clima son conceptos meteorológicos relacionados pero distintos. El tiempo se refiere al estado específico de la atmósfera en un lugar y momento determinados, incluyendo factores como la temperatura, la precipitación, la humedad, el viento y la presión atmosférica (Awange, 2012; Thanvisitthpon et al., 2024).

El clima se define como las condiciones meteorológicas medias de una región a lo largo de un periodo prolongado, normalmente de 30 años o más y para caracterizar el clima pueden utilizarse promedios estadísticos y valores extremos (Awange, 2012; Thanvisitthpon et al., 2024).

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) se recomienda analizar periodos de 30 años para poder identificar tendencias, variaciones naturales y eventos extremos que no serían distinguibles en periodos más cortos (Vellinga, 2013).

Según Oñate-Valdivieso y Bosque Sendra (2011) el clima de una región viene definido por una serie de factores que se relacionan entre sí. Estos factores son el resultado de fenómenos físicos que tienen lugar en las capas bajas de la atmósfera y en los que influyen diversas características geográficas. Además, estos factores son el resultado de una combinación de ambos. La precipitación y la temperatura son dos factores que indican el clima y, puesto que son los que tienen más registros históricos y los más comparables, analizar su variabilidad puede ser una forma eficaz de encontrar indicios de un posible cambio climático.

f. Parámetro climático

Los parámetros climáticos son factores críticos que caracterizan la condición y la dinámica del clima en un lugar particular, estos parámetros son esenciales para varias aplicaciones, como la previsión meteorológica, la planificación agrícola y la vigilancia ecológica. La temperatura, humedad, precipitación, radiación solar, evapotranspiración, velocidad del viento, nubosidad y presión atmosférica son los parámetros climáticos más relevantes (Alazba, 2004; Chandrasekhar Reddy, 2023; Er et al., 2009; Medeiros et al., 2006).

“Indicador estadístico de un elemento climático de superficie o altitud y en la mayoría de los casos se trata de la media aritmética, aunque también puede incluir valores tales como la desviación típica, los puntos de percentil el número de veces que se excede un umbral o los valores extremos”(OMM, 2007).

También, los parámetros climáticos son mediciones que se utilizan para estudiar y comprender el clima de una región específica y los estudios de cambio climático emplean datos de los parámetros climáticos necesarios para comprender este fenómeno (Casado, 2020).

g. Temperatura máxima

“Es la mayor temperatura del aire registrada en un día, generalmente se da después del mediodía” (OMM N°1204, 2017).

h. Temperatura mínima

“Es la menor temperatura del aire registrada en un día, generalmente se da en horas de la madrugada” (OMM N°1204, 2017)

i. Normal climática

“Medias periódicas calculadas para un período uniforme y relativamente largo que comprende por lo menos tres períodos consecutivos de 10 años” (OMM N°1204, 2017). Asimismo, se entiende como las medias de los datos climatológicos calculadas para los siguientes períodos consecutivos de 30 años (OMM N° 1203, 2017)

j. Anomalía de temperatura

“Es la diferencia de la temperatura del aire observada y el valor histórico promedio correspondiente al mismo periodo (decadal o mensual) y la unidad que se expresa es en grados centígrados C°” (OMM N°1204, 2017).

k. Anomalía de precipitación

Se refiere a la "diferencia entre el valor histórico promedio correspondiente al mes actual o año (Ejm. Precipitación acumulada en ABR 2020) y el valor histórico promedio correspondiente al mismo mes (Ejm. Precipitación acumulada promedio ABR 1981-2020). Las unidades de las anomalías de precipitación son el milímetro y el porcentaje (OMM N°1204, 2017).

2.2.2. Variable 2: Sequía

La sequía es una de las catástrofes naturales más graves a escala mundial (H. Wang et al., 2019) y en los últimos años, el cambio climático ha provocado diversos cambios meteorológicos en todo el mundo. La sequía es una de las principales consecuencias del cambio climático que han atraído el interés de los científicos durante décadas (S. Mohammed et al., 2022). La sequía forma parte de la naturaleza de los diferentes climas que ocasionalmente se producen en una región o regiones. Por ello, aunque es un fenómeno normal, muchas consecuencias y daños son ahora mayores que en el pasado (Lotfifrad et al., 2022). Esto se debe a que la sequía afecta a millones de personas en todo el mundo año tras año, provocando importantes problemas de desarrollo debido a sus dramáticos efectos en diversos aspectos de la

actividad humana, incluidas las prácticas agrícolas y el desarrollo socioeconómico (S. Mohammed et al., 2022).

Con la finalidad de analizar cuantitativamente la duración, la gravedad, el inicio y la terminación de la sequía se han desarrollado diversos índices de sequía, considerando su aplicabilidad a múltiples regiones y escalas temporales (H. Wang et al., 2019). Los cuatro tipos de índices de sequía son: (1) sequía meteorológica (falta de precipitaciones), (2) sequía hidrológica (déficits de caudales superficiales o subsuperficiales), (3) sequía agrícola (falta de humedad del suelo) y (3) sequía socioeconómica (falta de demanda de recursos hídricos) (H. Wang et al., 2019).

Existen múltiples índices disponibles para el análisis de la sequía, que incorporan variables climáticas. Entre las opciones disponibles, el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice de Evaporación de Precipitación Estandarizado (SPEI) surgen como las opciones más apropiadas para investigar las sequías con variaciones geográficas. Los factores causantes de las sequías graves siguen siendo inciertos, ya que aún no se ha determinado si se deben únicamente a anomalías en los regímenes de precipitaciones o si las variaciones de temperatura también contribuyen a su aparición (Meseguer-Ruiz et al., 2024). A continuación se describe los índices de sequías más utilizados:

a. Índice de precipitación estandarizado (SPI)

McKee et al. (1993) desarrollaron el SPI para medir los episodios húmedos y secos de una región. La sequía tiene un principio, un final, una gravedad y una magnitud.

Debido a su facilidad de uso (basado en el registro de precipitación a largo), es un indicador de sequía muy popular. El cálculo del SPI también permite elegir una escala temporal (1, 3, 6, 9, 12 meses, etc.). La conversión de datos históricos modelados distribuidos normalmente con valor constante en el tiempo y el espacio hace que los periodos secos y húmedos se evalúen de forma más objetiva. El SPI mide la intensidad de los fenómenos secos o húmedos.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) reconoce que el SPI es un índice de sequía ampliamente aplicable debido a su capacidad para calcularse para diferentes marcos temporales, teniendo en cuenta los distintos tiempos de respuesta de las características hidrológicas a la precipitación (R. Mohammed et al., 2017). Varios estudios que examinan el Índice de Precipitación Normalizado (SPI) utilizando una serie de valores, como (Brito et al., 2021; Cerpa Reyes et al., 2022) han demostrado la eficacia de este índice para caracterizar episodios de sequía con recursos limitados y a través de diversas escalas temporales. Este atributo particular lo diferencia de otros enfoques alternativos para evaluar las condiciones de sequía, lo que le confiere una ventaja. A pesar de su relativamente corta existencia de sólo diez años, el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) ha demostrado una eficacia significativa en una serie de aplicaciones, sobre todo en la caracterización y vigilancia de las condiciones de sequía (Cerpa Reyes et al., 2022).

b. Índice estandarizado de evapotranspiración de la precipitación (SPEI)

El índice normalizado de evapotranspiración de las precipitaciones (SPEI) fue propuesto por primera vez por (Vicente-Serrano et al., 2010). El SPEI considera

datos de evapotranspiración en su formulación y contempla el balance hídrico climático a diferentes escalas temporales. Incluye la temperatura como variable clave para calcular la evapotranspiración potencial (Beguería et al., 2014).

Para el seguimiento de las sequías meteorológicas, se han utilizado ampliamente el SPI McKee et al. (1993) y el SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010). A distintas escalas temporales, estos dos indicadores pueden calcularse de forma comparable. Mientras que el SPEI se calcula utilizando tanto la precipitación como la evapotranspiración potencial (PET), el SPI se basa únicamente en la precipitación (P).

La caracterización de las sequías tanto para el Índice de Precipitación Normalizado (SPI) como para el Índice de Evapotranspiración por Precipitación Normalizado (SPEI) se establece utilizando la escala SPI propuesta por (McKee et al., 1993). La utilización de la escala SPI se justifica por el hecho de que el cálculo de ambos índices se basa en principios idénticos. La clasificación de las sequías es de moderadas a extremas, definiéndose la escala de índices SPI/SPEI del siguiente modo: sequía extrema (≤ -2), sequía grave (-2 a -1,5) y sequía moderada (-1,5 a -1). Es importante reconocer que el término de una sequía se produce cuando el índice de precipitación normalizado (SPI) o el índice de evapotranspiración por precipitación normalizado (SPEI) se aproxima a 0 y pasa a una magnitud positiva (McKee et al., 1993; Tirivarombo et al., 2018).

c. Intensidad máxima

Es un parámetro frecuentemente utilizado en la caracterización de secuencias. Algunos autores lo calculan como la relación entre la duración de la secuencia y su intensidad media, mientras que en otros casos se define como el valor máximo del déficit (Gálvez, 2017a).

d. Severidad

Este término hace referencia al déficit acumulativo de precipitaciones por debajo de un límite específico durante un período de sequía, que se cuantifica mediante la acumulación de la sucesión negativa de los déficits de precipitación en un suceso de sequía (Gálvez, 2017a).

e. Frecuencia

Se refiere a la probabilidad de ocurrencia de una sequía o de una intensidad específica (moderada, severa o extrema) durante un lapso de tiempo determinado (Gálvez, 2017a).

2.2.3. Variable 3: deforestación

a. Deforestación

“La deforestación es la conversión del bosque a otros usos de la tierra, como la agricultura y la infraestructura independientemente por humano o no, incluye la reducción permanente de la cobertura de la copa por debajo del umbral mínimo de 10%” (FAO, 2020). Asimismo, la deforestación se caracteriza por la conversión de regiones boscosas a usos alternativos de la tierra, como la agricultura, la urbanización o la minería (de Abreu dos Santos et al., 2024; Shimabukuro et al., 2019). Este método implica la erradicación total de árboles y plantas, lo que resulta en una alteración permanente en la cobertura y el uso del suelo (de Abreu dos Santos et al., 2024; Shimabukuro et al., 2019). La agricultura, la tala ilegal, la expansión urbana y la minería son los principales impulsores de la deforestación (Mabee, 2019).

La deforestación tiene un impacto complejo y extenso en el medio ambiente, afectando a las sociedades humanas, la salud del suelo, los ciclos del agua, la biodiversidad y el clima (de Abreu dos Santos et al., 2024; Mabee, 2019; Shimabukuro et al., 2019). Y también afecta a los medios de subsistencia de las comunidades que dependen de los bosques (Kranz et al., 2018).

La superposición de los derechos de tenencia está vinculado a mayores tasas de deforestación y las políticas que aumentan la certificación de la tierra están asociadas a menores tasas de deforestación (Walker et al., 2022). Para estudiar la deforestación se emplean varias herramientas y metodologías avanzadas, que aprovechan tanto las tecnologías de teledetección como las técnicas de aprendizaje automático, entre las

herramientas para el análisis de la deforestación son: teledetección e imágenes por satélite, aprendizaje automático y análisis de datos y los programas informáticos y tratamiento de datos (Lechler et al., 2020; Rodrigues et al., 2024).

b. Usos de suelo

El uso del suelo es un concepto dentro del campo de la planificación y el ordenamiento territorial, que se refiere a la forma en que se utiliza la propiedad y el desarrollo de actividades productivas en un área específica. La importancia del uso del suelo en el ordenamiento radica en la necesidad de organizar y gestionar de forma adecuada la ocupación del territorio, a través de políticas que prevengan y mitiguen los impactos generado por las actividades económicas y relacionada a una unidad de territorial (Villegas et al., 2015). Según el IPCC (2011) el uso del suelo es definido como el “conjunto de disposiciones, actividades e insumos relacionados con un tipo de cubierta terrestre determinado.

La planificación del uso del suelo debe tener en cuenta los cambios dinámicos en el uso y la ocupación del suelo. Las regiones propensas a las catástrofes pueden ser el resultado de cambios en el uso del suelo y que el futuro del uso del suelo debe ser más eficaz y ceñirse a la capacidad de carga del medio ambiente y del terreno (Ambarwulan et al., 2023).

2.4. Marco conceptual

a. Adaptación al cambio climático

La adaptación al cambio climático se refiere a las acciones deliberadas tomadas para reducir las consecuencias adversas del cambio climático y aprovechar cualquier oportunidad beneficiosa que pueda presentar (Agrawala y Fankhauser, 2008; Eisenhauer, 2020). Se reconoce como una respuesta crítica a los desafíos planteados por el cambio climático, complementando los esfuerzos para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (Agrawala y Fankhauser, 2008). La adaptación es esencial para construir resiliencia contra los impactos climáticos, como los eventos meteorológicos extremos, el aumento del nivel del mar y los cambios en los patrones de precipitación (Patt, 2013).

b. Escenario climático

Los escenarios climáticos son herramientas esenciales utilizadas en la investigación sobre el cambio climático para explorar los climas futuros potenciales y sus impactos. Ellos cumplen múltiples funciones, incluyendo la ayuda en aplicaciones pedagógicas, motivacionales y prácticas como el diseño de ingeniería, la planificación espacial y el desarrollo de políticas; estos escenarios se construyen utilizando una variedad de metodologías, a menudo involucrando modelos climáticos (Hulme y Dessai, 2008).

c. Pérdida de bosque

La pérdida de bosques se refiere a la reducción de las áreas forestales debido a varios factores (causas), incluyendo la deforestación, la degradación forestal y los cambios en el uso del suelo (Olorunfemi et al., 2022).

d. Meteorología

La meteorología es una ciencia que es tanto integral como interdisciplinaria, con el objetivo de predecir y comprender los fenómenos atmosféricos. Es una disciplina crítica tanto para la investigación científica como para las aplicaciones prácticas, ya que es esencial para la previsión meteorológica, los estudios climáticos y la gestión de desastres (Colombo et al., 2018). También Pattani y Gautam (2022) señalan que la meteorología se refiere al estudio y análisis científico de las condiciones meteorológicas y los fenómenos atmosféricos en la Tierra, los procesos que causan estas condiciones meteorológicas y sus predicciones futuras.

e. Indicadores climáticos

Los indicadores climáticos son métricas medibles utilizadas para rastrear y comprender los cambios en el clima de la Tierra a lo largo del tiempo. Sirven como herramientas esenciales para investigadores, formuladores de políticas y científicos para monitorear y analizar los impactos del cambio climático, proporcionando datos críticos para desarrollar estrategias de mitigación y adaptación (Martin, 2025). Los indicadores climáticos son valores numéricos que representan parámetros específicos

relacionados con el clima, como la temperatura, la precipitación y el nivel del mar (Laureshyn et al., 2024).

f. Datos climáticos históricos

Los datos climáticos históricos se refieren a registros y evidencias de condiciones climáticas pasadas derivadas de diversas fuentes antes de la llegada de las mediciones instrumentales modernas, que comenzaron alrededor de 1880 (Dostal y Bürger, 2010). Estos datos son cruciales para comprender la variabilidad y las tendencias climáticas a largo plazo, proporcionando información sobre los patrones climáticos naturales y los impactos de las actividades antropogénicas (Ogilvie, 2010).

Tabla 1. Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Procedimiento
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	
¿Cuál fue la relación entre la deforestación, sequía y la variabilidad climática durante el periodo 1990-2022?	Determinar la relación entre la deforestación, sequía y la variabilidad climática (precipitación y temperatura) en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022	El incremento de la deforestación se relaciona de forma significativa con un incremento en los índices de sequía y la variabilidad climática (precipitación y temperatura) en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022	• Análisis de las tendencias históricas de la variabilidad climática (precipitación y temperatura) • Análisis de la tasa de deforestación anual • Análisis de la sequía
Problema específico	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Procedimiento
¿Cuál fue la relación entre la deforestación y la variabilidad climática en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022?	Determinar la relación entre la deforestación y la variabilidad climática (precipitación y temperatura) en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990 – 2022.	El incremento de la deforestación se relaciona significativamente con un incremento en la variabilidad climática (precipitación y temperatura) en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022	• Análisis de tendencias lineales (incremento o disminución de precipitación y temperatura) • Análisis de tendencias de precipitación y temperatura durante el periodo 1990-2022, empleando pruebas estadísticas (test no paramétrico de Mann-Kendal y Pettitt). • Análisis de punto de cambio de precipitación y temperatura durante el periodo 1990-2022, empleando pruebas estadísticas (test no paramétrico de pettit) • Análisis de la deforestación anual a partir de imágenes satelitales para el periodo 1990-2022
¿Cuál fue la relación entre la deforestación y los índices de sequía en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022?	Determinar la relación entre la deforestación y los índices de sequía en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022.	El incremento de la deforestación se relaciona significativamente con un incremento en los índices de sequías en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022	• Análisis de la sequía Índice estandarizado de evapotranspiración por precipitación, Índice de Precipitación Estandarizado, Índice Palmer de gravedad de la sequía

3.1. Variables de investigación

3.2.1. Variables de investigación

Deforestación: aumento la tasa de bosques o áreas forestales que son destruidas o eliminadas en comparación con un periodo de tiempo anterior.

Variabilidad climática: hace referencia a los cambios en los parámetros climáticos como la temperatura y precipitación con respecto a una climatología de referencia.

Sequía: hace referencia al déficit de precipitaciones en comparación con una cantidad media y de duración del periodo seco.

3.2.2. Matriz de operacionalización de variables

Tabla 2. Matriz de operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida
1. Deforestación	“La deforestación es la conversión del bosque a otros usos de la tierra, como la agricultura y la infraestructura independientemente por humano o no, incluye la reducción permanente de la cobertura de la copa por debajo del umbral mínimo de 10%” (FAO, 2020).	Tasa de bosques o áreas forestales que son destruidas o eliminadas en comparación con un periodo de tiempo anterior.	Cobertura de suelo	Uso de suelo	Hectárea
			Pérdida de bosque	Tasa anual de deforestación	Porcentaje %
2. Variabilidad climática	La variabilidad climática se refiere a los cambios en las condiciones promedio y las características estadísticas del clima, incluyendo medidas como la desviación estándar y la ocurrencia de eventos extremos, a lo largo de diferentes periodos de tiempo y áreas geográficas (Vellinga, 2013).	Cambios en los parámetros climáticos como la temperatura y precipitación con respecto a una climatología de referencia.	Temperatura	Temperatura media, máxima y mínima anual, mensual y estacional	°C
			Precipitación	Temperatura total anual, mensual y estacional	mm

3. Sequías	Evento climático extremo de origen natural, que resulta de la deficiencia de lluvias considerablemente inferiores a los normales registrados, generando impactos negativos asociados a la vulnerabilidad de los sistemas expuestos (SENAMHI, 2019)	Déficit de precipitaciones en comparación con una cantidad media y de duración del periodo seco.	Índices de sequías	- Índice estandarizado de evapotranspiración por precipitación (SPEI)	Sequia leve Sequia moderada Sequia severa Sequia extrema
			Intensidad máxima, severidad y frecuencia	- Índice de Precipitación estandarizado (SPI)	

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

4.1. Tipo y diseño de investigación

a. Tipo de investigación

De acuerdo con Hernández (2014), la investigación se clasifica en dos grupos principales: la investigación pura o básica, que busca avanzar en la comprensión científica mediante la formulación y comprobación de teorías en un área específica, y la investigación aplicada, tiene el objetivo de generar información para la resolución de problemas.

De acuerdo con la descripción el tipo de la investigación es aplicada con el enfoque cuantitativo – correlacional de tipo longitudinal (tiempo histórico de la data).

b. Diseño de investigación

La presente investigación tiene un diseño no experimental, debido a que no se han realizado ningún tipo de control/y manipulación sobre las variables.

4.2. Unidad de análisis, población y muestra

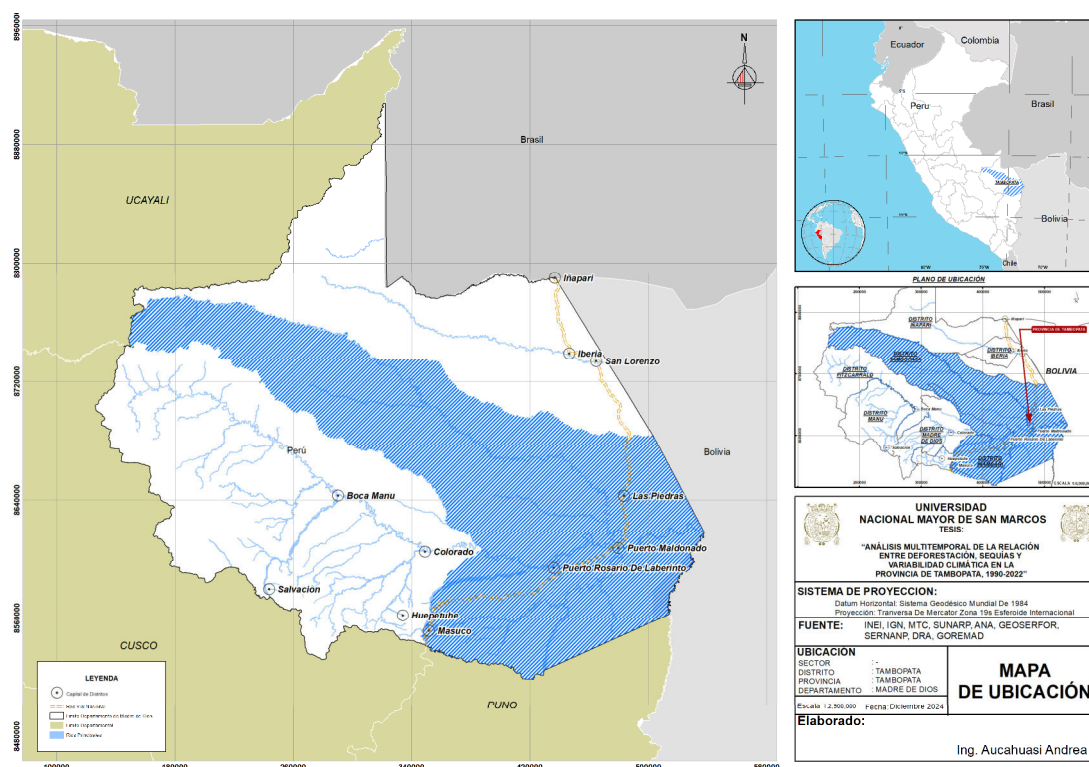
La región de Madre de Dios y su provincia de Tambopata está ubicada con una elevación entre 250 a 500 msnm (Ambrizzi et al., 2019). La cuenca del Amazonas

(caso Madre de Dios) está dominada por un clima cálido y húmedo que provoca precipitaciones convectivas muy frecuentes (Brêda et al., 2023).

La unidad de análisis, la población y muestra por la consistencia del estudio está conformada por data de la provincia de Tambopata, que esta conformada por variabilidad climática (precipitación y temperatura), sequías y deforestación.

El área de estudio se ubica en la provincia de Tambopata y se encuentra constituido por cuatro distritos (Tambopata, Laberinto, Las Piedras e Inambari) que abarca 36,268 km² (GOREMAD, 2010).

Figura 1. Ubicación del área de estudio



4.3. Técnicas de recolección de datos

Hernández (2014) señala que, la fase de recopilación de datos consiste en diseñar un plan detallado de los procedimientos que conducirán a la recogida de datos para un fin determinado, empezando por definir las fuentes, localizarlas, determinar los medios de recogida y sistematización, etc. Las técnicas e instrumentos en la presente investigación fueron las siguientes:

a. Técnicas

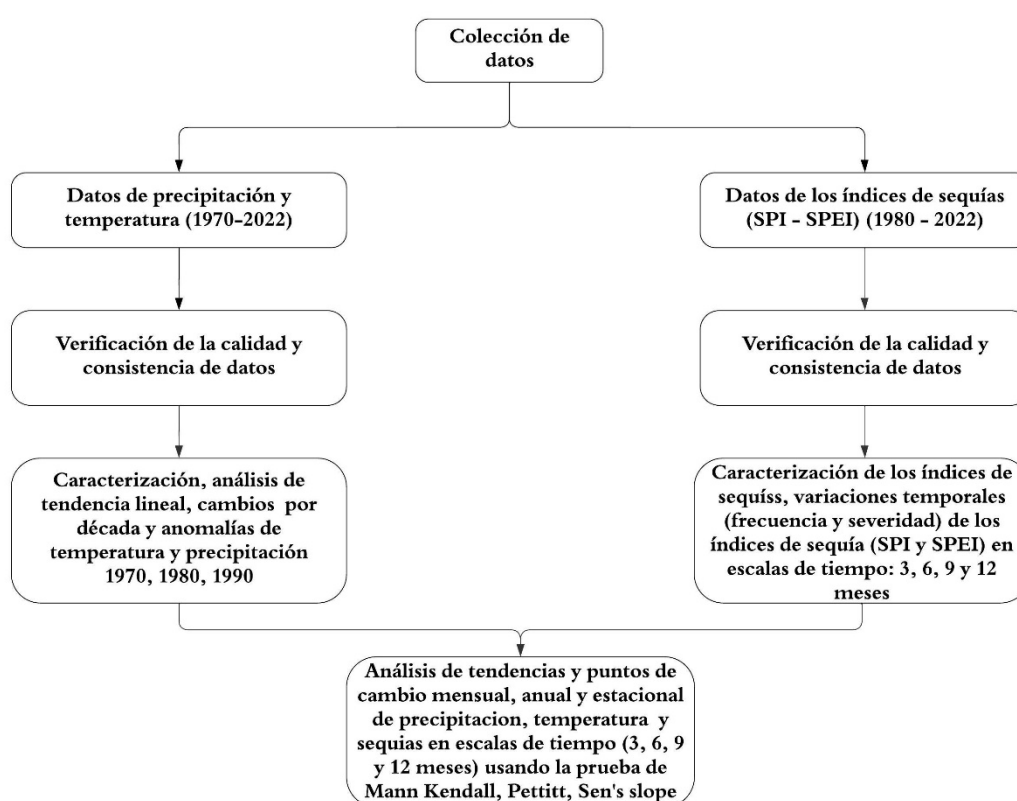
- **Revisión de documentos:** se realizó la identificación, obtención, categorización y consolidación de la información fundamental del estado de arte mediante resúmenes bibliográficos y categorización de la información adquirida a través de fuentes físicas y digitales. posteriormente, se llevó a cabo el análisis de la información relacionados con el estado del arte y con las variables del presente estudio. Entre los procedimientos para la obtención de los datos se realizó:
- **Ficha de solicitud:** a través de formatos de solicitud se realizó la recopilación de información de variabilidad climática (precipitación y temperatura) al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Por otra parte, los registros de los índices de sequías se obtuvo mediante el acceso a las plataformas autorizadas.
- **Ficha de datos:** a partir de una ficha de procesamiento de datos, se organizó la información de la precipitación, temperatura del periodo 1970 - 2022 y sequías

del periodo 1990 - 2022. Por otro lado, el registro de la cartografía de la pérdida de bosque se obtuvo a partir de Google Earth Engine (GEE) del periodo 1990 a 2022.

b. Procedimientos

Para el análisis de la data de las precipitaciones, temperatura, sequias y la deforestación en la provincia de Tambopata, se realizó los siguientes pasos:

Figura 2. Diagrama de flujo de la recopilación de información



Etapla 1: Recopilación de datos de variabilidad climática (precipitación y temperatura) y los índices de sequías.

En etapa 1 del presente estudio de investigación se recopiló los datos históricos de precipitación mensual (mm), temperaturas máximas (Tmax), mínimas (Tmin) y medias (Tmean) (°C) de la estación meteorológica de Puerto Maldonado (12°35'1" S, 69°12'1" O, y 200 m sobre el nivel del mar) para el periodo 1970–2022. Los datos fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) que mantiene una red de 323 estaciones dentro del Perú y a partir del 2015 el número de estaciones ha aumentado sustancialmente en el Perú.

También, en la presente investigación se utilizó los datos del Índice Estandarizado de evapotranspiración-Precipitación (SPEI) del Monitor de Sequía Global ([SPEI Global Drought Monitor csic.es](https://globaldroughtmonitor.csic.es/)) ([SPEIbase v2.9](https://speibase.v2.9)). Además, se emplearon los datos del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) de la base de datos del SENAMHI. Ambos índices registran una resolución espacial de 0,5° y escalas temporales de 3, 6, 9 y 12 meses respectivamente.

Etapla 2: Verificación de la calidad y consistencia de datos

En la segunda etapa de la investigación se ha desarrollado la verificación y consistencia de datos de precipitación, temperatura con la finalidad de identificar los valores atípicos, datos ausentes y datos sin valores durante el periodo. En la data histórica de precipitación y temperatura se encontró datos faltantes (10%) y se optó por el completado de datos mediante la prueba promedio de datos vecinales debido

a que resultó el más adecuado. Es importante señalar que la prueba de Mann-Kendall discrimina datos faltantes para el análisis de las tendencias.

Etapas 3: Caracterización de precipitación y temperatura durante tres periodos (1970, 1980 y 1990) en la provincia de Tambopata.

La caracterización de la precipitación y temperatura se desarrolló mediante un enfoque descriptivo-estadístico que permitió analizar la variabilidad temporal de estos parámetros en tres escalas: mensual, anual y estacional. El análisis se realizó utilizando series históricas en tres periodos (1970-2022, 1980-2022 y 1990-2022) de datos provenientes de estaciones meteorológicas del SENAMHI que cumplen con criterios de calidad, continuidad y representatividad geográfica.

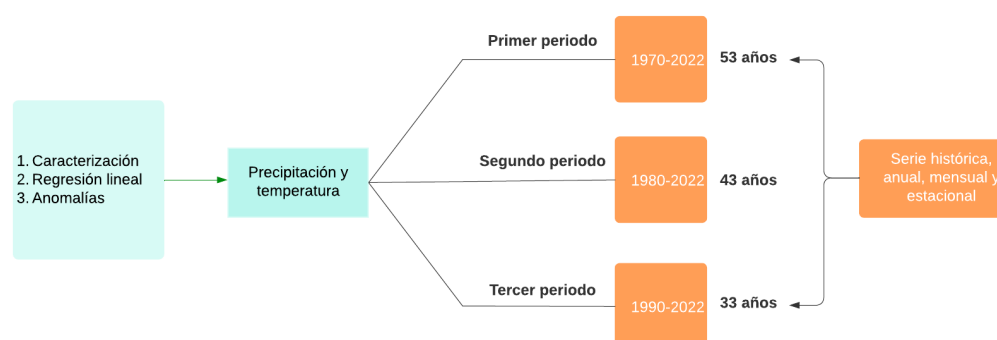
La caracterización de la precipitación y temperatura se realizó a través de:

- **Comportamiento de medias:** se constituye como el primer paso del análisis del comportamiento de medias de la temperatura para determinar los valores de evolución de los valores promedio de ambas variables (ya sea mínima, máxima o media) durante un periodo determinado (mensual, estacional o anual). Por otro lado, el comportamiento de las medias de la precipitación se analizó el promedio de las lluvias acumuladas durante el periodo analizado, lo que permitió caracterizar la distribución estacional de las lluvias (épocas húmedas y secas).
- **Análisis de la regresión lineal:** este análisis se realizó con la finalidad de determinar la pendiente de la tasa de cambio de los datos históricos de

precipitación y temperatura en los tres periodos. El análisis de regresión lineal se realizó en datos anuales, mensuales y estacionales. La precipitación y temperatura fue agrupada por estaciones climáticas: diciembre-enero-febrero (verano), marzo-abril-mayo (otoño), junio-julio-agosto (invierno) y septiembre-octubre-noviembre (primavera) (Lavado et al., 2012; Marengo et al., 2009; Pedron et al., 2017).

El registro histórico de la precipitación y temperatura corresponde al periodo 1970 – 2022. A partir de ello se pudo realizar la clasificación en 3 subperiodos (1970-2022, 1980-2022 y 1990-2022) con la finalidad de comprender la variabilidad y las tendencias climáticas a lo largo del tiempo.

Figura 3. Periodos de las series históricas de precipitación y temperatura



El análisis de la regresión lineal de las series temporales de precipitación y temperatura de los tres subperiodos (1970, 1980 y 1990) se analizó, empleando el Paquete estadístico PAleontological STatistics (PAST versión 3.2) lo que permitió determinar la pendiente o tasa de cambio de las variables de la presente

investigación. Los resultados de tendencia lineal de la precipitación y temperatura se presentan en forma de diagramas de caja y bigotes (boxplots).

- **Análisis de las anomalías:** En el presente estudio se calcularon las anomalías de las variables de precipitación y temperatura anual. Para el cálculo de anomalías, se definió como periodo de referencia el intervalo 1970–2022, en concordancia con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para el establecimiento de valores climatológicos normales.

Las anomalías fueron calculadas como la diferencia entre los valores observados en un año y el promedio climatológico correspondiente del periodo base. Se calculó utilizando la ecuación:

$$\text{Anomalía: } X_i - \bar{X}$$

Donde:

X_i : valor observado en un año específico

$\bar{X}$: promedio climático (precipitación y temperatura) del periodo de referencia (normal climatológica, 1970–2022)

Las anomalías fueron interpretadas bajo los siguientes criterios:

Para **precipitación y temperatura:**

- Positiva: Año húmedo (por encima de lo normal)
- Negativa: Año seco (por debajo de lo normal)

Los resultados son presentados mediante diagramas de barras, facilitando la visualización de los años con anomalías significativas.

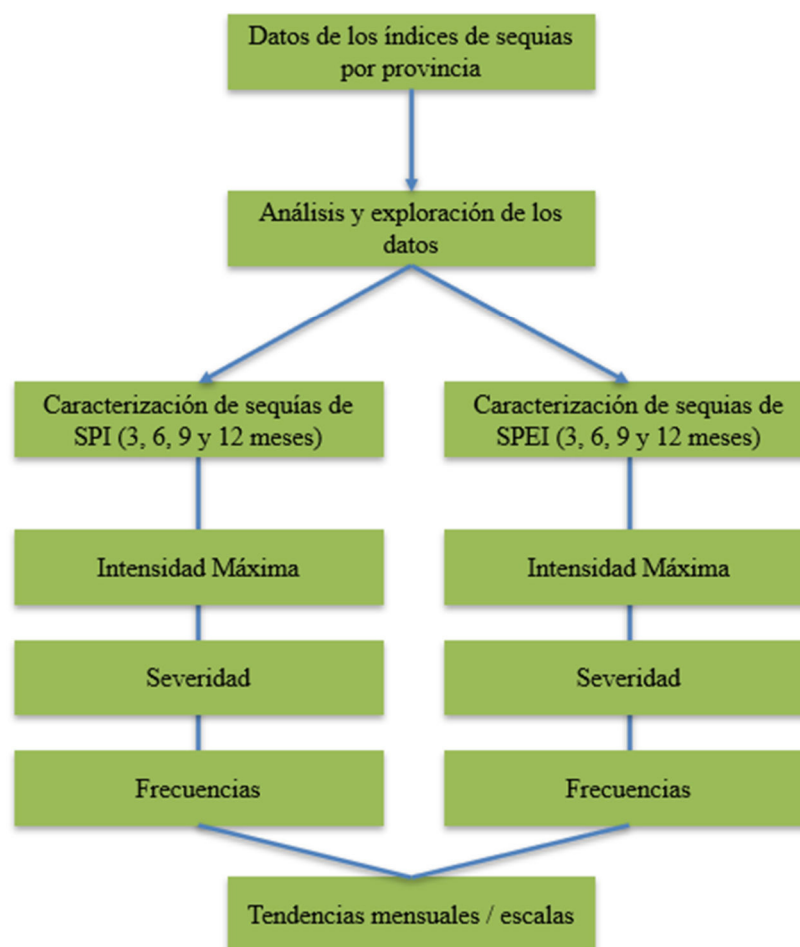
Etapa 4: Caracterización y tendencias de los índices de sequías SPI y SPEI en escalas de tiempo: 3, 6, 9 y 12 meses.

- Caracterización del índice de los índices de sequía de SPI y SPEI

El índice de precipitación normalizado (SPI) es un índice de sequía ampliamente utilizado que se basa únicamente en datos de precipitación (McKee et al., 1993) y el índice normalizado de precipitación-evapotranspiración (SPEI) se basa en la precipitación y la evapotranspiración (Vicente-Serrano et al., 2010). Los indicadores de SPI y SPEI fueron recomendados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para cuantificar la duración, intensidad y extensión de la sequía. En las últimas décadas, estos dos índices se han transformado en los índices fundamentales de sequía (Nedialcov et al., 2015).

La metodología utilizada para el desarrollo de la presente investigación se basa en el esquema mostrado en la Figura 4, en el que se esquematiza la metodología para la caracterización de las sequías y el análisis de intensidad máxima, severidad y frecuencia:

Figura 4. Esquema de análisis de los índices de sequías



a. Datos y análisis de la exploración de datos de sequías:

La información empleada del índice SPEI en la presente investigación corresponde a los datos de Global SPEI database y los datos de SPI al SENAMHI. Posteriormente se realizó el análisis exploratorio de los datos con la finalidad de determinar la presencia de datos atípicos y para ello se determinó a partir de los gráficos de Boxplot. En la Tabla 3, se muestran las características de los índices de sequías.

Tabla 3. Características de los índices de sequía

Índice	Uso de datos	Aplicación	Puntos fuertes	Puntos débiles
SPI	Precipitación	Meteorológica	Sencillo y muy utilizado	No tiene en cuenta la temperatura
SPEI	Precipitación, Evapotranspiración	Meteorológica y Agricultura	Considera la temperatura	Mas complejo

b. Caracterización de las sequías

La caracterización de las sequías tanto para el SPI como para el SPEI se basa en la escala SPI (McKee et al., 1993). En el presente estudio de investigación por cada evento se determinaron las características de sequías (intensidad máxima, severidad y frecuencia) de las categorías sequía extrema (≤ -2), sequía severa (-1.5 a -1.99) y sequía moderada (-1 a -1.49) (Tabla 4). Asimismo, es importante señalar que la sequía termina cuando el SPI/SPEI se acerca a cero y progresa a un valor positivo. Las categorías de los de los índices de sequías fueron interpretadas bajo los siguientes criterios:

Tabla 4. Categorías de las anomalías de los índices de SPI y SPEI

SPI	SPEI	Clases/descripción
≥ 2.00	≥ 2.00	Extremadamente húmedo
1.50 to 1.99	1.50 to 1.99	Severamente húmedo
1.00 to 1.49	1.00 to 1.49	Moderadamente húmedo
0 to 0.99	0 to 0.99	Normal
0 to -0.99	0 to -0.99	Levemente seco
-1 to -1.49	-1 to -1.49	Moderadamente seco
-1.50 to -1.99	-1.50 to -1.99	Severamente seco
≤ -2.00	≤ -2.00	Extremadamente seco

Fuente: Rango de los índices SPI/SPEI/PSI y clasificación de la sequía basada en (McKee et al., 1993; Vicente-Serrano et al., 2010)

Para la caracterización de sequías se tuvo en cuenta el uso de 3 características de la sequía en base al SPI y SPEI, y que se describen de la siguiente manera:

- **Intensidad máxima:** se consideró el máximo valor del déficit del SPI/SPEI ocurrido durante el evento de sequía
- **Severidad:** se cuantificó como la acumulación de la sucesión de déficits del SPI/SPEI durante un evento de sequía.
- **Frecuencia:** representa la cantidad de veces que ocurre un evento de sequía en un tiempo determinado.

La caracterización y estimación de los índices de SPI/ SPEI del periodo 1990-2022 se analizaron a diferentes escalas de tiempo (1, 3, 9 y 12 meses).

c. Tendencias de las sequias

Adicionalmente, en los datos de SPI/SPEI se realizó un análisis de tendencias basado en la prueba de Mann Kendall.

Etapas 5: Análisis de tendencias y puntos de cambio mensual, anual y estacional de precipitación y temperatura y sequias.

Para identificar las tendencias en las series temporales de precipitación y temperatura (máxima y mínima), se aplicó el test no paramétrico de Mann-Kendall (Kendall, 1975), el cual permite detectar tendencias sin requerir supuestos de normalidad en los datos. Este análisis fue complementado con el estimador de la pendiente de Sen

(Sen, 1968), que cuantifica la magnitud del cambio por unidad de tiempo. También se utilizó la prueba no paramétrica de Pettitt para detectar puntos de cambio en los en las series temporales (Pettitt, 1979). Los métodos se aplicaron a los registros anuales y estacionales obtenidos de estaciones meteorológicas del SENAMHI durante el período 1990–2022. Los resultados se interpretaron en función del valor del estadístico Z (positivo para tendencia creciente, negativo para decreciente) y su significancia estadística ($p < 0.05$).

Por otro lado, la pendiente de Sen se expresó en unidades de mm/año para precipitación, °C/año y °C/década para temperatura, lo cual permitió caracterizar el comportamiento climático del área de estudio.

Asimismo, se calcularon las tendencias de las sequías mensuales en los índices de SPEI/SPI, también se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall. Los resultados se presentan en tablas con:

Etapla 6: procesamiento de datos de deforestación / pérdida de bosque

Para determinar la pérdida de bosques en la provincia de Tambopata, se realizó los siguientes pasos:

a. Obtención de imágenes satelitales

Para la recopilación de la información se emplearon imágenes satelitales provenientes de las colecciones Landsat: Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y Operational Land Imager (OLI), captadas por los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8, respectivamente. Se utilizaron productos de reflectancia de superficie (SR) de la colección Landsat Collection 1 Nivel 1, los cuales cuentan con corrección geométrica y una resolución espacial de 30 m en sus bandas multiespectrales. Y para ello se realizó el siguiente procedimiento.

1. Selección del área de estudio

Se definió el área de estudio utilizando la colección de features de Google Earth Engine (`ee.FeatureCollection`) con el nombre `pro_Tambopata`. Esta colección representó la ubicación geográfica del área de investigación. En este primer paso se crearon los códigos (script).

2. Adquisición de Imágenes Landsat 5

Se cargaron tres imágenes del sensor Landsat 5 para el año 1990 (1 de agosto, 24 de agosto y 16 de septiembre) utilizando sus IDs correspondientes (ee.Image). Estas imágenes fueron necesarias para el análisis de deforestación en la provincia de Tambopata.

3. Combinación de Imágenes

Las tres imágenes Landsat 5 fueron combinadas en una sola imagen utilizando la función Mosaic de Earth Engine. Esto permitió obtener una imagen compuesta que abarca el periodo de interés (1990-2022).

4. Recorte al Área de Estudio

La imagen combinada fue recortada al área de estudio utilizando la función clip. Esto asegura que el análisis se realice únicamente dentro del área de interés definida previamente.

5. Selección de Bandas

Se seleccionaron las bandas 5, 4 y 3 (infrarrojo cercano, rojo y verde, respectivamente) de la imagen recortada para realizar análisis posteriores. Seguidamente, la clasificación de cada algoritmo de los mosaicos fue exportada del GEE a archivos raster. Con el uso del software ArcGis 10.5, se procesaron los archivos raster para convertirlos en archivos shapefiles. Con estos archivos se

elaboraron los mapas de deforestación para cada algoritmo de clasificación anualmente (Figura 5 y Figura 6).

Figura 5. Proceso metodológico de recolección de imágenes satelitales para deforestación, cobertura y uso de suelo.

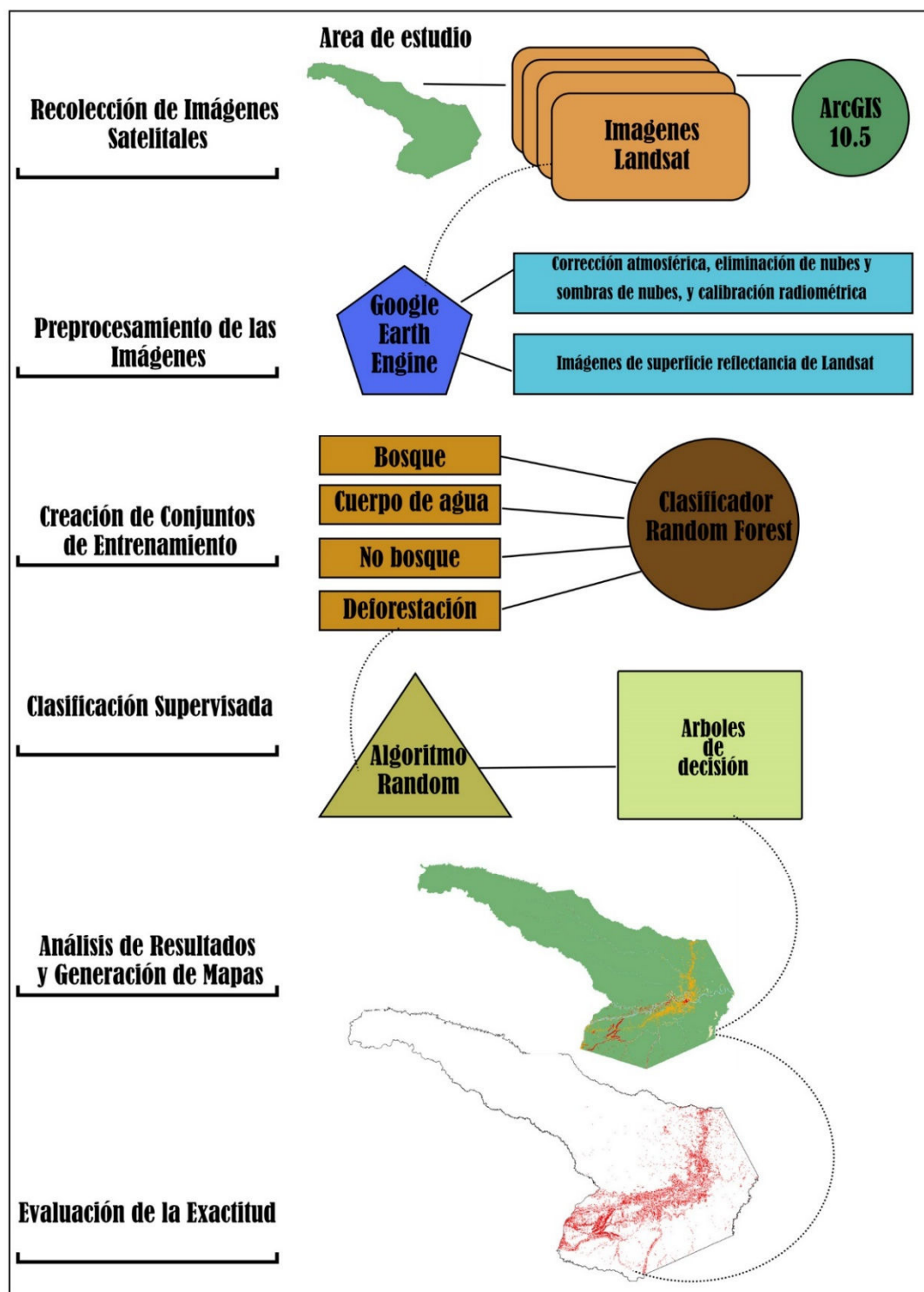
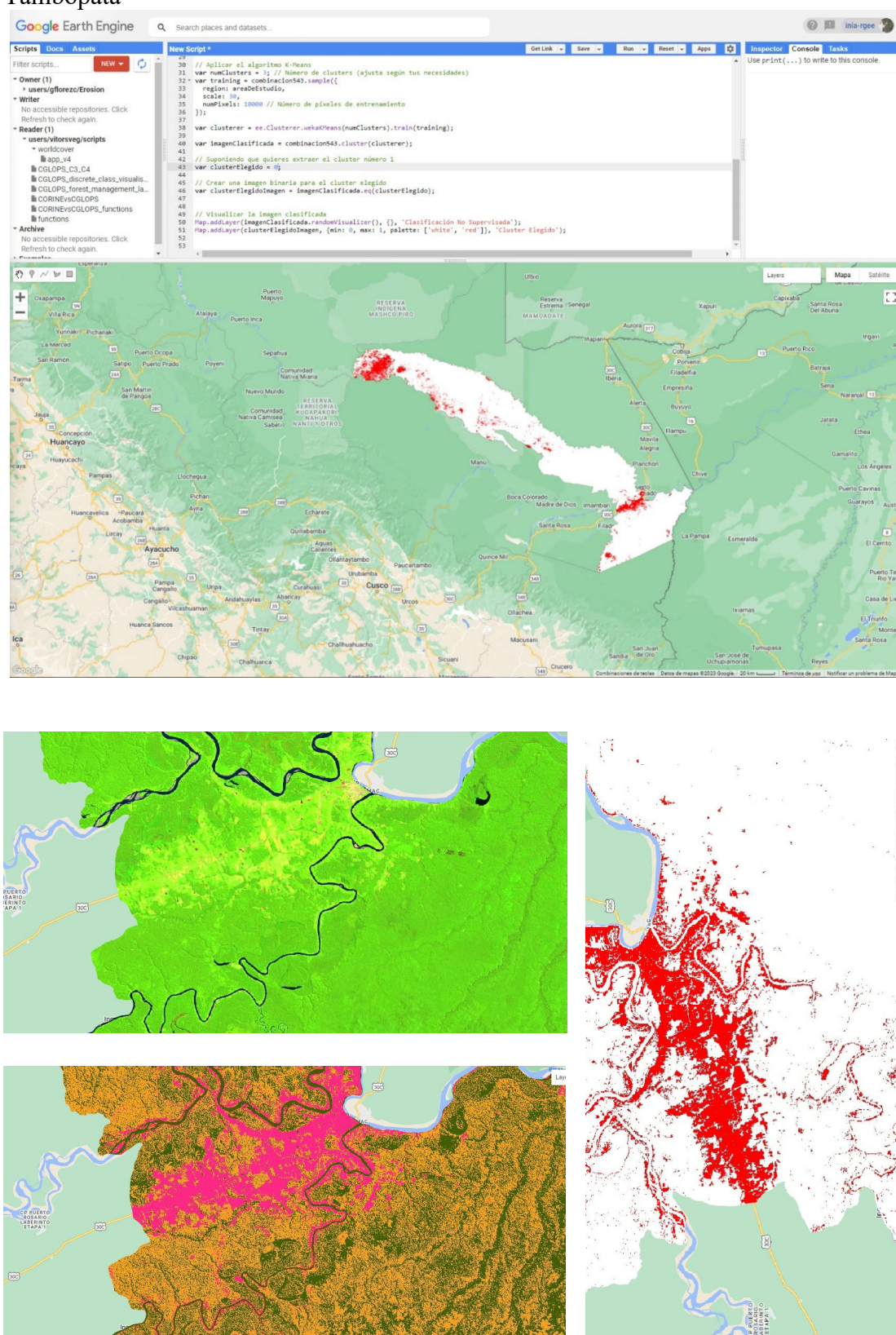


Figura 6. Procesamiento para la obtención de imágenes satelitales en la provincia de Tambopata



b. Identificación y clasificación de coberturas y uso de suelo (Deforestación)

Para la clasificación de cobertura y uso de suelo en la provincia de Tambopata se empleó la Metodología propuesta por CORINE Land Cover y adaptada por (IDEAM, 2010). Las categorías principales de cobertura y uso del suelo identificadas para la provincia de Tambopata se encuentran detalladas en la Tabla 5.

Tabla 5. Categorías de cobertura y uso de suelo (nivel 0 y 1)

Descripción y Código Nivel 0	Descripción Nivel 1
Deforestación	Pastizal, Pasto, Agricultura, Mosaico agropecuario, Infraestructura, otras áreas sin vegetación, Minería
Bosque	Bosque, Bosque inundable
Cuerpos de Agua	Superficies de Agua, Zonas pantanosas

Fuente: Tomado y adaptado de CORINE Land Cover (IDEAM, 2010).

c. Análisis de tasa de pérdida de bosque (deforestación) anual promedio en la provincia de Tambopata.

La tasa anual de deforestación fue calculada mediante el análisis de la matriz de cambio de cobertura, comparando las áreas ocupadas por diferentes categorías al inicio y al final del período evaluado, representado como (R) (Alarcón Aguirre et al., 2021; Puyravaud, 2003). Este enfoque permitió identificar y cuantificar las transformaciones en la cobertura del suelo durante el intervalo temporal definido.

$$R = \frac{(A_1 - A_2)}{(t_1 - t_2)} \dots\dots\dots(1)$$

Donde A_1 y A_2 son las áreas de bosque en la fecha final (t_2) e inicial (t_1).

Para la tasa anual de cambio (q) (Ecuación 3) se calculó primero la tasa porcentual anual, la cual se aplica a la cuantificación de la pérdida de bosque para cada año, según (Alarcón Aguirre et al., 2021; Puyravaud, 2003).

$$q = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\left(\frac{1}{t_1-t_2}\right)} - 1 \dots\dots\dots(2)$$

Donde A_2 y A_1 son las áreas de bosque en la fecha final (t_2) e inicial (t_1).

La tasa de pérdida de bosque (deforestación) se analizó en ocho periodos con a la finalidad de establecer los valores de cambio en porcentaje y km². Los periodos analizados fueron: (1990-1994, 1994-1998, 1998-2002, 2002-2006, 2006-2010, 2010-2014, 2014-2018, 2018-2022).

Etapas 6: Relación entre la deforestación, precipitación, temperatura y sequías del periodo 1990-2022

Con el fin de establecer la correlación entre la deforestación, la precipitación y la temperatura, se empleó el coeficiente de correlación de Spearman. Esta prueba se empleó ya que los datos no cumplen los supuestos paramétricos sobre la distribución entre las variables. El nivel de significancia de la correlación entre la deforestación, precipitación, temperatura y sequías se trabajó con el nivel de significancia de * < 0.05.

4.4. Análisis e interpretación de la información

Los datos obtenidos de la variabilidad climática (precipitación y temperatura), sequías y deforestación fueron procesados, tabulados y ordenados en orden cronológico mediante la estadística descriptiva usando el software Excel.

El comportamiento de precipitación y temperatura fueron analizados de forma mensual, anual y estacional divididos en tres periodos (1970-2022, 1980-2022, 1990-2022) mediante estadística descriptiva. El análisis de la tendencia lineal de precipitación y temperatura se realizó empleando el paquete estadístico PAleontological STatistics (PAST versión 3.2). El análisis de las tendencias y punto de cambio de precipitación, temperatura y los índices de sequías se realizó con la estadística inferencial con el uso del software utilizó R (R Core Team, 2024) empleando el paquete estadístico Trend, Non-Parametric Test and Change-Point Detection (Test no paramétrico de Mann-Kendal y Pettitt y la prueba de S. la variabilidad climática (precipitación y temperatura) fueron analizaos en tres periodos (1970-2022, 1980-2022, 1990-2022) mientras que los índices de sequías fueron analizados en único periodo de 1990-2022, respectivamente.

El nivel de significancia de la tendencia lineal, tendencias y puntos de cambio de precipitación, temperatura y sequías se trabajó con el nivel de significancia de $* < 0.05$, $** < 0.01$ y $*** < 0.001$. El nivel se significancia permitió determinar e interpretar de forma coherente los resultados del estudio (responde la hipótesis).

A continuación, se analizó la relación entre la deforestación y la variabilidad climática (precipitación y temperatura) y la sequía, se utilizó el análisis de correlación. En un primer momento se verificó el cumplimiento de los supuestos paramétricos de normalidad y homogeneidad de varianzas. La normalidad de los datos se verificó mediante la prueba Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Finalmente, el análisis de la correlación se realizó mediante la prueba de Spearman. Se empleó el software R en su versión 4.4.0 y SigmaPlot en su versión 15.

El nivel de significancia de la correlación entre la deforestación, precipitación y temperatura se trabajó con el nivel de significancia de $* < 0.05$ (responde la hipótesis).

Por otro lado, la tasa y porcentaje de pérdida de bosque (deforestación) anual promedio en la provincia de Tambopata se analizó en ocho periodos tomando un intervalo de cuatro años (1990-1994, 1994-1998, 1998-2002, 2002-2006, 2006-2010, 2010-2014, 2014-2018, 2018-2022) y sobre estos periodos se aplicó las fórmulas de tasa anual de deforestación (q) y tasa de cambio anual (R). Finalmente, la pérdida de bosque se analizó de forma anual para un periodo de 33 años consecutivos.

Todas las figuras se realizaron utilizando diversos paquetes como el paquete estadístico y SigmaPlot v15 y Paquete de R ggplot2.

4.5. Softwares y herramientas.

a. Softwares y herramientas

En el presente estudio de investigación, se utilizó diversos softwares y herramientas lo que permitió analizar y obtener los resultados pertinentes.

Softwares utilizados:

- Microsoft office (Word, Excel, power point)
- Software de ArcGis Desktop 10.8
- Google Earth Engine.

Programas utilizados:

- Software R en entorno R-Studio (R Core Team, 2023)
- Paquete Trend, Non-Parametric Test and Change-Point Detection. Test no paramétrico de Mann-Kendal y Pettitt.
- Paquete de R ggplot2
- Paquete estadístico PAleontological STatistics (PAST versión 3.2)
- Paquete Sigmaplot (versión 15)

4.6. Consideraciones éticas

Se mantuvieron los principios éticos de la investigación al proporcionar información de manera precisa, imparcial y veraz, al mismo tiempo que se respetaban los derechos de los autores y su propiedad intelectual. Se mantuvo el cumplimiento de las regulaciones establecidas en el Código de Ética de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (RR N. °012648-2023-R/UNMSM). Este código regula la correcta ejecución de los procedimientos de investigación y se basa en el compromiso de mantener estándares éticos que sean compatibles con los de la institución, así como con el bienestar de la sociedad y el medio ambiente. Para determinar el grado de semejanza, este documento fue analizado con software anti-plagio.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis, interpretación y discusión de resultados

4.1.1. Relación entre la deforestación y la variabilidad climática.

4.1.1.1. Caracterización de la precipitación y temperatura de la provincia de la provincia de Tambopata.

Considerando que la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1996) sugiere un periodo de 30 años para establecer la normal climatológica estándar. En el presente estudio utilizamos 3 periodos para el análisis de precipitación y temperatura, comportamiento, tendencias en la variabilidad y anomalías durante el periodo 1970-2022. El periodo análisis abarcó 53 años y fue subdividido en tres subperiodos (Tabla 6). El estudio de la variabilidad climática en distintos periodos es importante porque permitió comprender los cambios de precipitación y temperatura en la provincia de Tambopata.

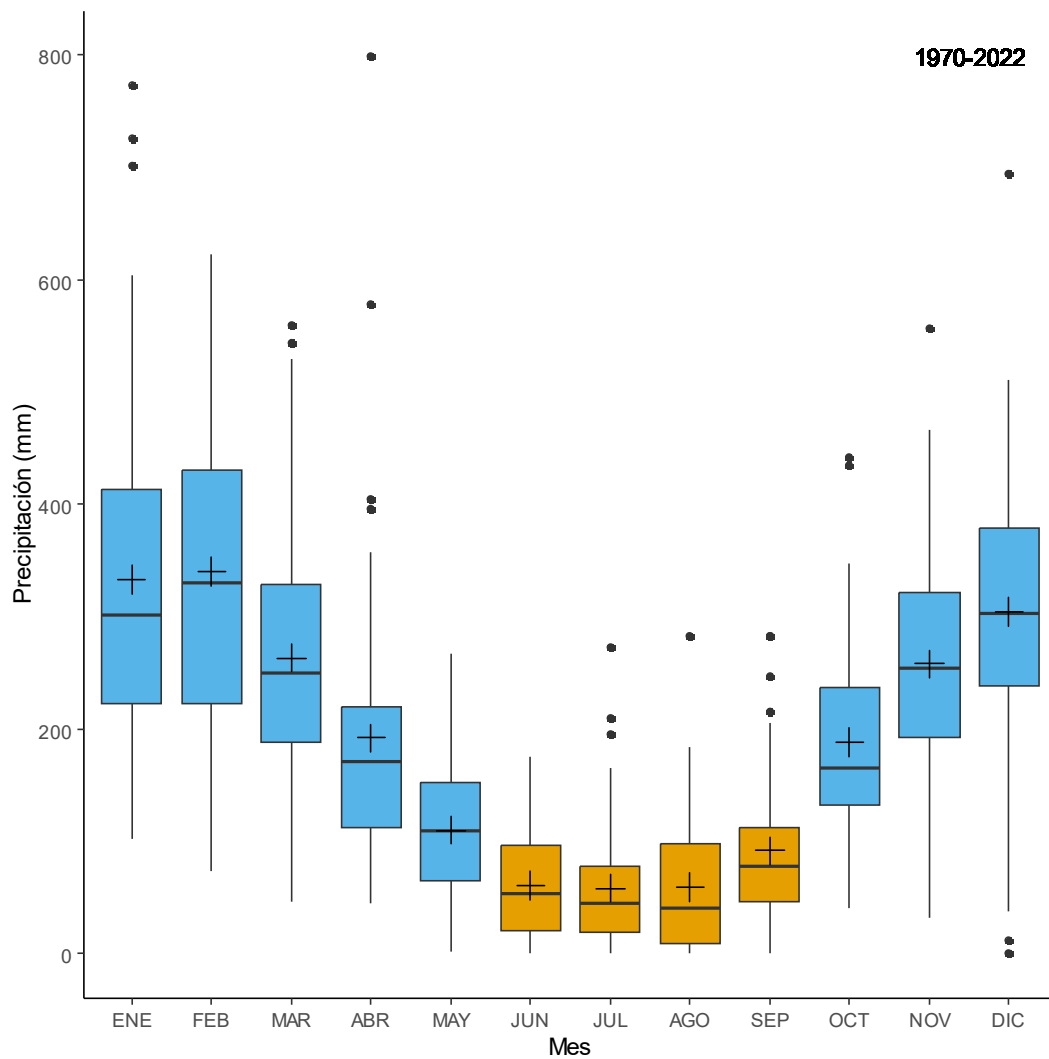
Tabla 6. Periodos de evaluación de precipitación y temperatura

Variables	Subperiodos	Periodo de evaluación	Número de años
Precipitación y temperatura	Primer periodo	1970 - 2022	53
	Segundo periodo	1980 - 2022	43
	Tercer periodo	1990 - 2022	33

En la Figura 7 se observa el comportamiento de la precipitación anual y mensual a lo largo del periodo 1970-2022. La precipitación anual registró el valor mínimo en 1989 (1413 mm) y el valor máximo en 1982 (3734 mm). La precipitación promedio histórica registrada fue de 2258 mm. Se observó un marcado comportamiento estacional en la serie mensual de las precipitaciones. Las precipitaciones promedio más altas se

concentraron en enero (303.6 mm), febrero (337.2 mm), noviembre (254.7 mm) y diciembre (296.6 mm), esto indica la época lluviosa (periodo más húmedo). Resaltando febrero como el mes con mayor precipitación durante el periodo 1970-2022. A partir de abril a agosto, los registros de la precipitación disminuyen, con medianas por debajo de 100 mm. Este es el periodo seco, especialmente entre junio y agosto, donde la lluvia es mínima. Además, septiembre a diciembre muestran un incremento progresivo de la precipitación, iniciando la transición hacia la estación lluviosa. Los registros más altos de precipitaciones fueron en 1982 (3734 mm), 1984 (3090 mm), 1981 (3083 mm), 1992 (3000 mm), 2014 (2887 mm) y 2003 (2864 mm). Por otro lado, se observó valores atípicos de precipitación en casi todos los meses, lo que indicaría que ciertos años se han registrado eventos de lluvia muy encima de lo normal.

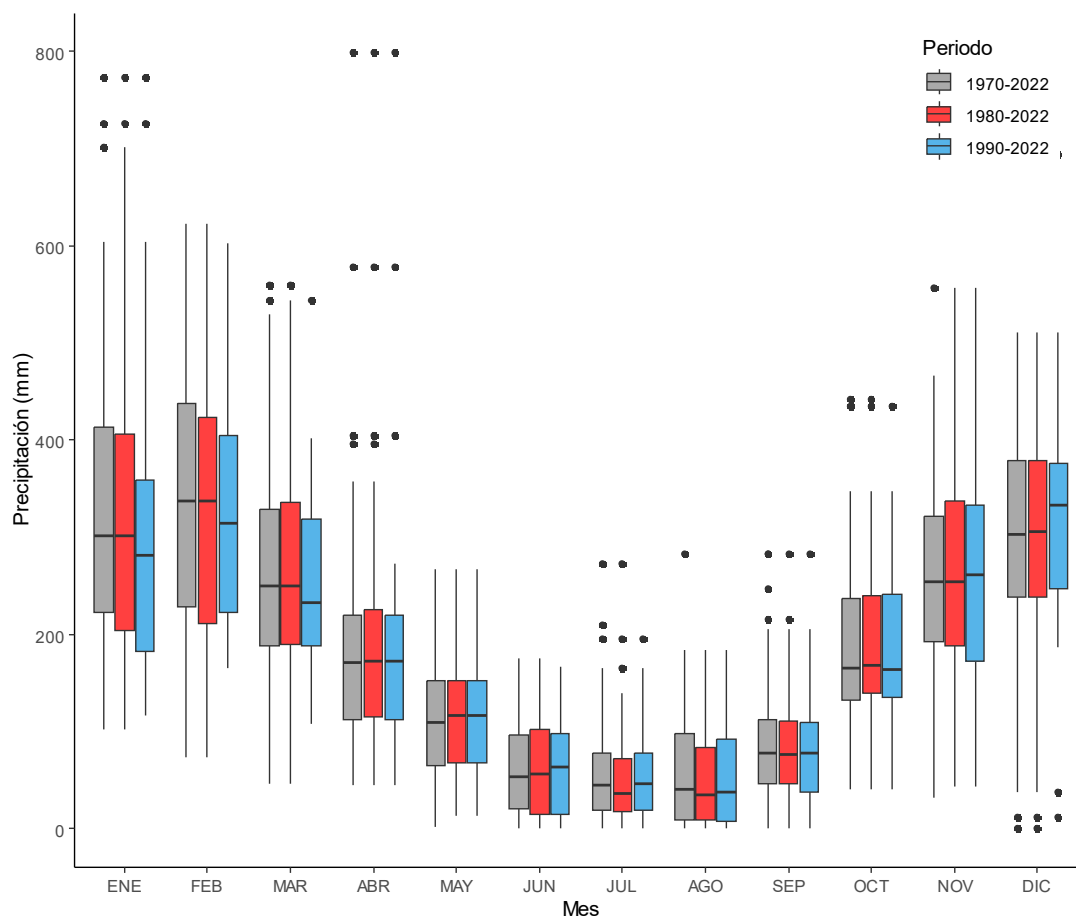
Figura 7. Comportamiento de la precipitación total durante 1970-2022



En la Figura 8 se muestra el comportamiento de la precipitación mensual en los tres periodos evaluados (1970-2022, 1980-2022 y 1990-2022). La comparación según periodos mostró que junio, julio, agosto y setiembre son los meses de menor precipitación total (0~283 mm) en los tres periodos, sugiriendo estación seca. Mientras que, en enero, febrero, noviembre y diciembre se concentró la mayor parte de la precipitación anual, representando a los meses con mayor precipitación durante el año. Los tres periodos tienen tendencias similares, pero hay ligeras variaciones en las medianas y los rangos de algunos meses. En los meses como enero y febrero, los valores parecen ser más estables entre los periodos (precipitación en estos meses es

más consistente entre los periodos), mientras que meses como abril o septiembre muestran más variabilidad entre los periodos.

Figura 8. Comportamiento de la precipitación mensual según periodos evaluados

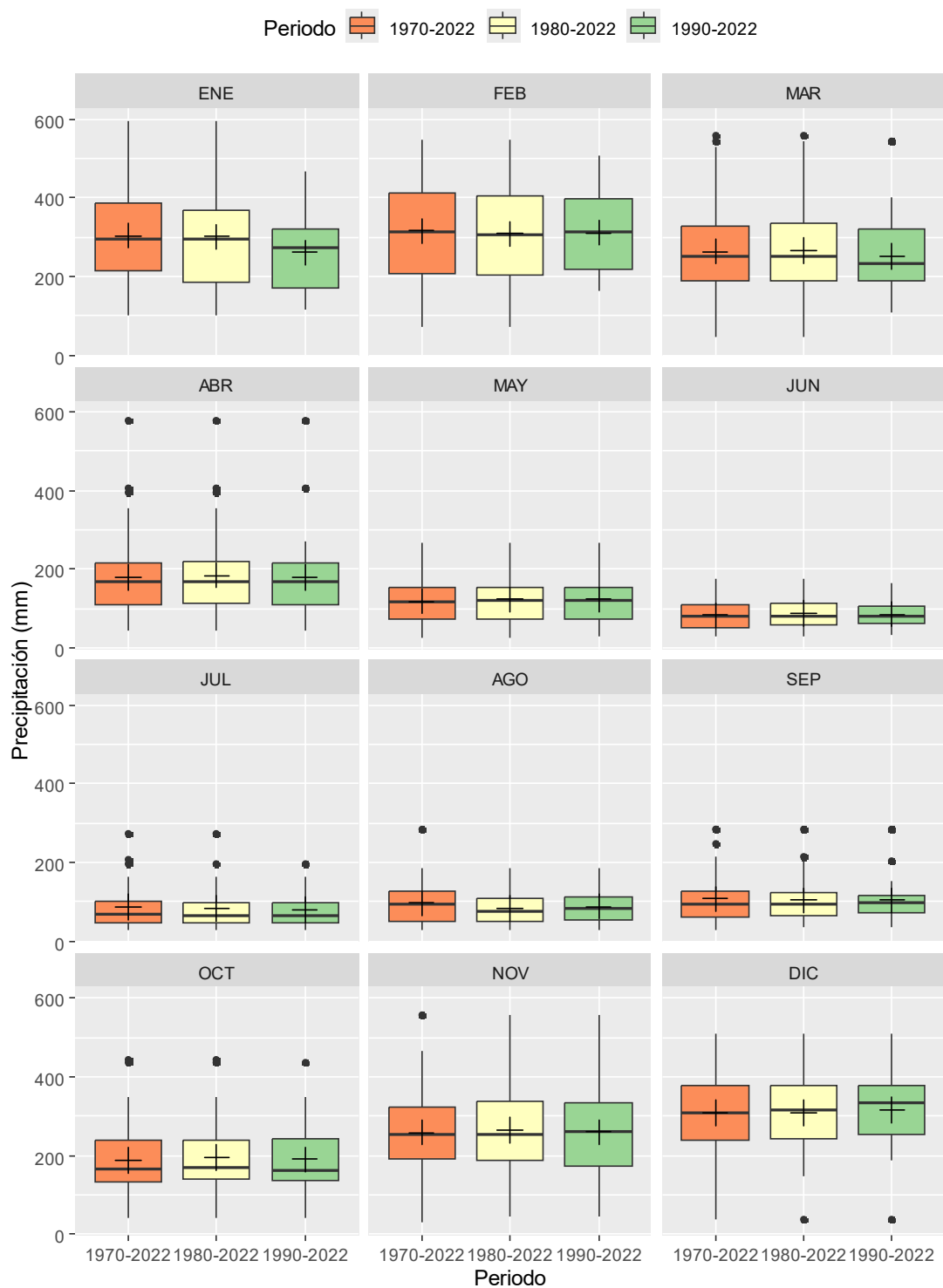


La Figura 9, muestra el comportamiento de la precipitación mensual en los tres periodos (a) 1970-2022, (b) 1980-2022 y (c) 1990-2022. Realizando la comparación entre los periodos se observa que los meses de junio, julio, agosto y setiembre son los meses de menor precipitación total (283 mm), indicando periodos secos. Asimismo, entre enero, febrero, noviembre y diciembre se concentra la mayor parte de la precipitación, siendo la mayor precipitación durante el año. Los tres periodos

analizados tienen tendencias similares, pero hay ligeras variaciones en las medianas y los rangos de algunos meses.

También se observa que los meses como febrero y noviembre presentan datos atípicos (puntos fuera de los bigotes), indicando eventos de precipitación extremos o inusuales, siendo típicos en la selva peruana. Finalmente se confirma un patrón estacional claro: mayores precipitaciones en los primeros meses del año (enero, febrero, noviembre y diciembre) y una disminución significativa en los meses centrales (junio, julio, agosto).

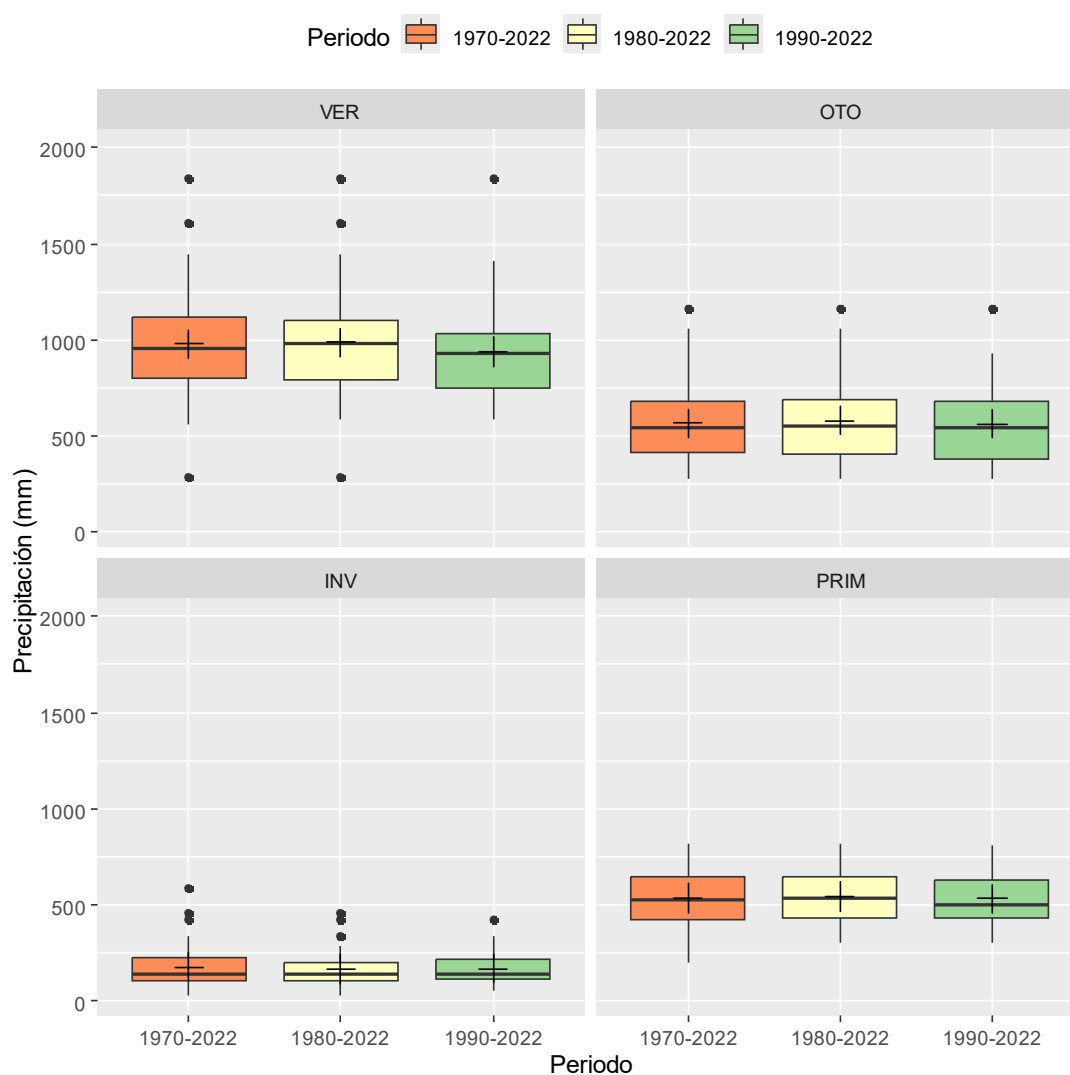
Figura 9. Precipitación mensual según periodos evaluados



En la Figura 10, se presenta el comportamiento de la precipitación estacional en los tres periodos analizados. Durante los 3 periodos de estudio se observa una disminución de la precipitación en invierno (JJA) y otoño (MAM), mientras que las otras dos estaciones como es primavera y verano muestran mayor precipitación respectivamente.

Las estaciones con mayor precipitación anual promedio de 53 años (1970-2022) son verano (978.98 mm) y otoño (565.23 mm). Las menores precipitaciones son de las estaciones de invierno (178.13 mm) y primavera (536.50 mm). durante los periodos 1980, 1990 – 2022 la precipitación estacional también la precipitación fue mayor en las estaciones de verano (989.34 y 938.30 mm) y otoño (558.71 y 564.66 mm). en este mismo periodo la precipitación menor se presentó en las estaciones de invierno y primavera. Adicionalmente, se registró la precipitación más significativa durante el verano en 1992 (1840.8 mm), en otoño en 1998 (1160.6 mm), en invierno en 1972 (589 mm) y en primavera en 1984 (818.2 mm) respectivamente.

Figura 10. Precipitación estacional según periodos evaluados

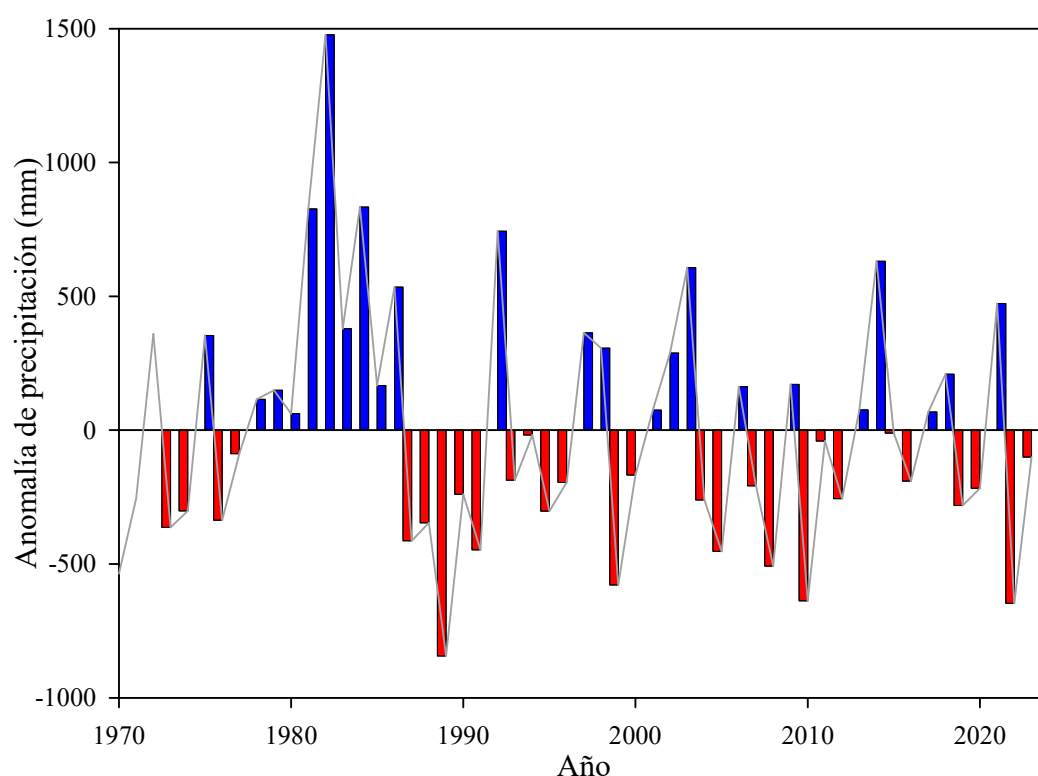


En la Figura 11, se observan las anomalías de la precipitación anual a lo largo del periodo 1970 - 2022, donde el promedio de la precipitación fue de 2258.82 mm (53 años). Las anomalías positivas indican condiciones más húmedas o los años más lluviosos (barras azules), mientras que las negativas indican condiciones más secas de lo normal (barras rojas) (Figura 11). Entre 1970-1986 se observó una alta variabilidad y exceso de lluvias. En 1981 y 1983 se observa anomalías superiores a +1400 mm, lo que sugiere que estos años fueron extremadamente lluviosos. Otros años con excesos elevados de precipitaciones fueron: 1984, 1986 y 1992, la mayoría con lluvias superior

de +500 mm. En 1987 – 1998 se puede observar una combinación entre los años húmedos y secos, pero tienen predominancia las anomalías negativas.

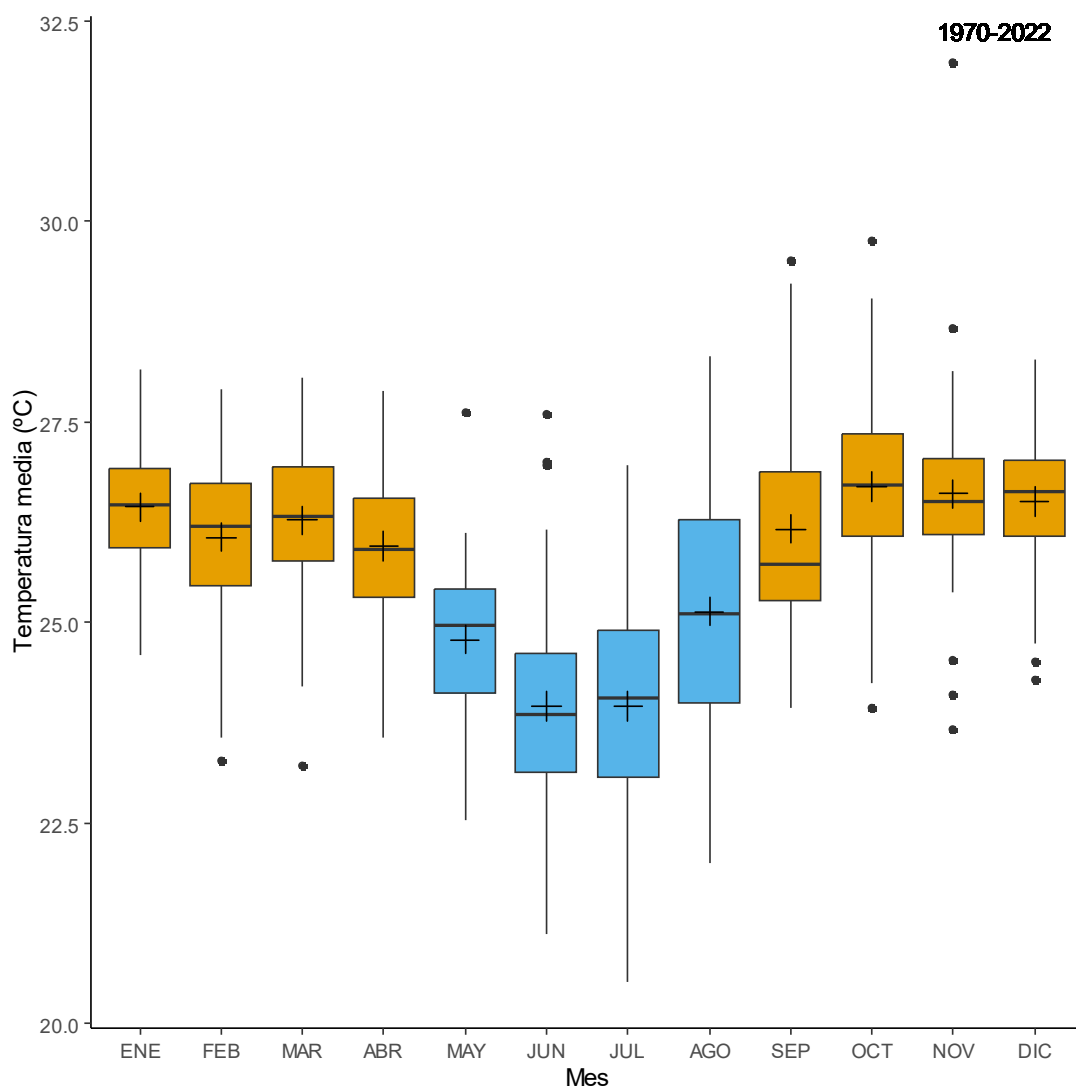
Entre 1993-2011 se observa una transición hacia condiciones más secas, ya que, en 1995, 2000, 2005, 2008 y 2011 se observaron déficits menores a -500 mm. Entre 2012 a 2022 se observó mayor regularidad con eventos aislados de anomalías. Los años más lluviosos fueron 2014, 2018 y 2022 (+500 mm) y los años secos 2015, 2020 y 2022 con déficit de lluvias.

Figura 11. Anomalías de precipitación (mm) con respecto a la media entre 1970 a 2022.



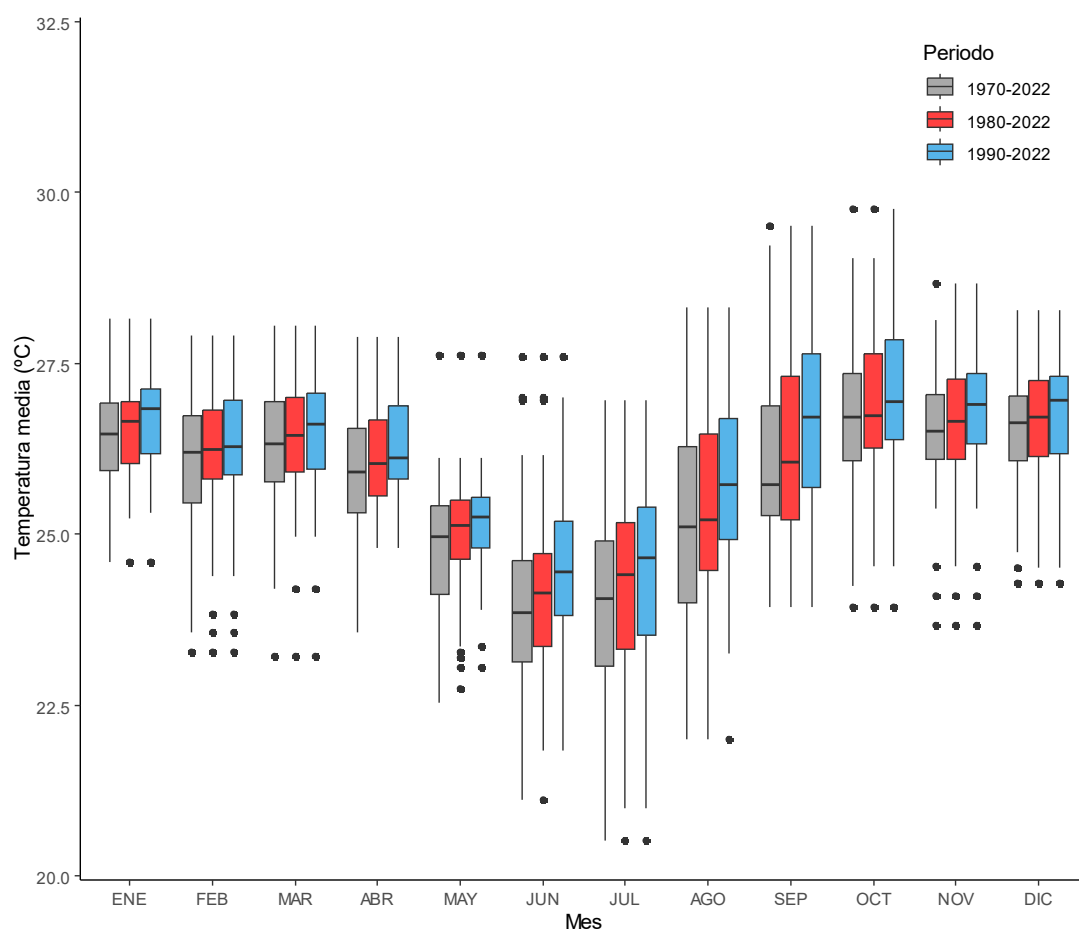
En la Figura 12, se observa el comportamiento de la temperatura mensual promedio a lo largo del periodo 1970-2022. La temperatura media durante este periodo varió entre 31 y 32.5° C. Mayo (24.76 °C), junio (23.94 °C), julio (23.92 °C) y agosto (25.07 °C) fueron los meses con la temperatura media más baja, siendo julio es mes con el registro más bajo de temperatura. Es habitual que estos meses se caractericen por temperaturas más bajas. Aunque esto posiblemente estaría asociado a los friajes amazónicos, ya que en el mes de julio se observó una mayor dispersión de los datos.

Figura 12. Comportamiento de la temperatura media durante 1970 - 2022



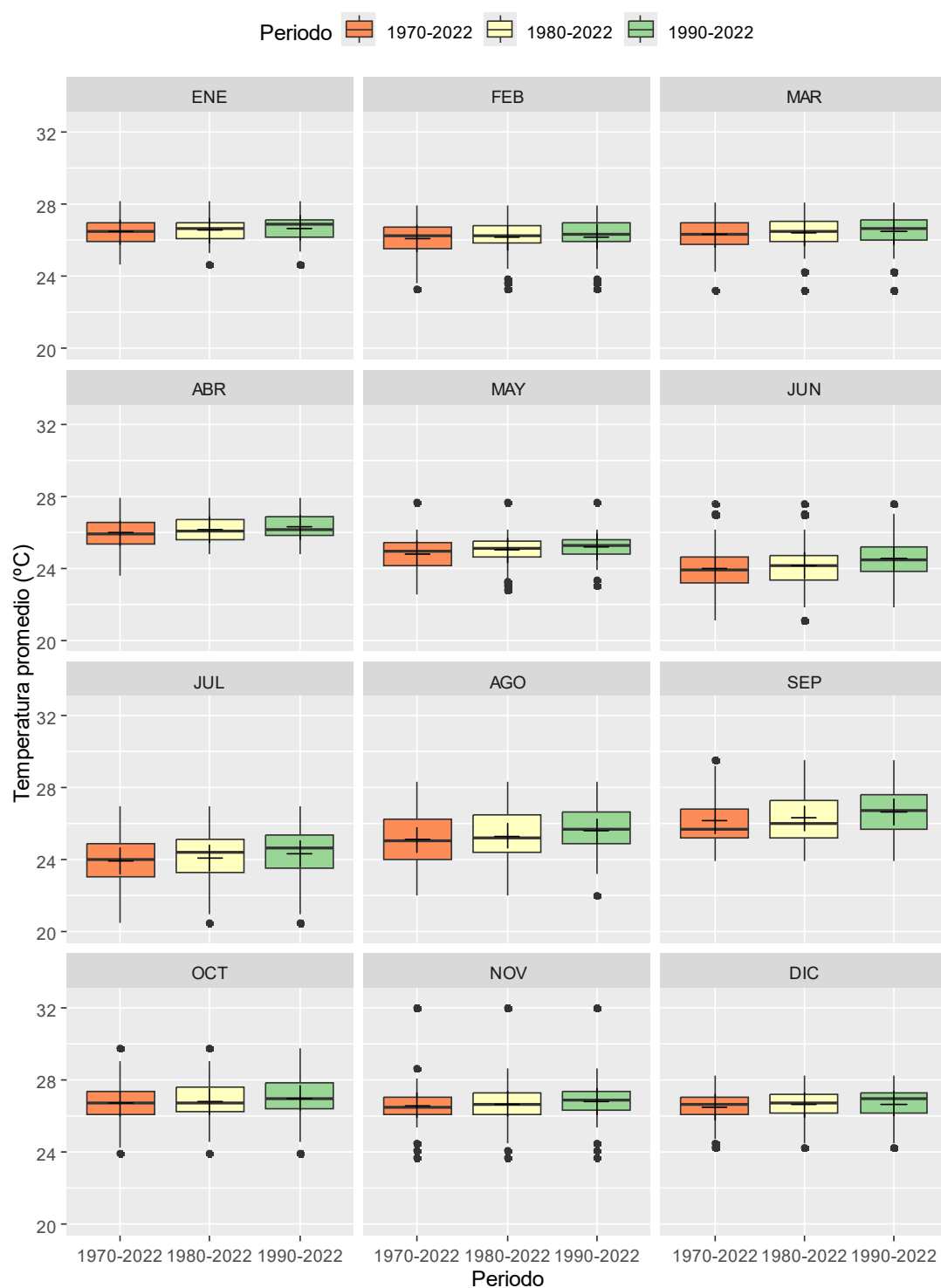
En la Figura 13, se observa el comportamiento mensual de la temperatura media promedio para los tres periodos de análisis (1970, 1980 y 1990). El promedio de la temperatura media anual durante el periodo 1970-2022 se registró en 25.67 °C; en el periodo 1980 se registró en 25.81°C y en el periodo 1990 fue de 25.98 °C. El valor máximo de la temperatura media anual se registró en el 2015 (27.05 °C) y 2020 (27.10 °C), siendo estas las temperaturas anuales más altas, mientras que el valor mínimo de la temperatura media anual se registró en 1971 (24. 33°C). La temperatura promedio mensual más baja se registró durante los meses de junio y julio; lo cual se alinea con los periodos de evaluación que concuerda para los periodos de evaluación. El mes de julio (23.9° C) registró la temperatura más baja, y generalmente durante estos meses se observan temperaturas más bajas. En comparación, los valores máximos de temperatura media mensual se registraron en los meses de setiembre, octubre y noviembre, respectivamente.

Figura 13. Comportamiento de la temperatura media mensual según periodos evaluados



En la Figura 14, se observa el comportamiento de la temperatura media mensual para los tres periodos analizados. En la mayoría de los meses, se observa que la mediana de la temperatura promedio aumenta ligeramente conforme se consideran periodos más recientes (de 1970-2022 a 1990-2022). Esto sugiere un incremento paulatino de la temperatura media mensual a lo largo de las décadas. La dispersión de los datos (ancho de las cajas y presencia de valores atípicos) es mayor en algunos meses, especialmente de junio a noviembre, lo que indica una mayor variabilidad en la temperatura durante esos meses.

Figura 14. Temperatura media mensual según periodos evaluados

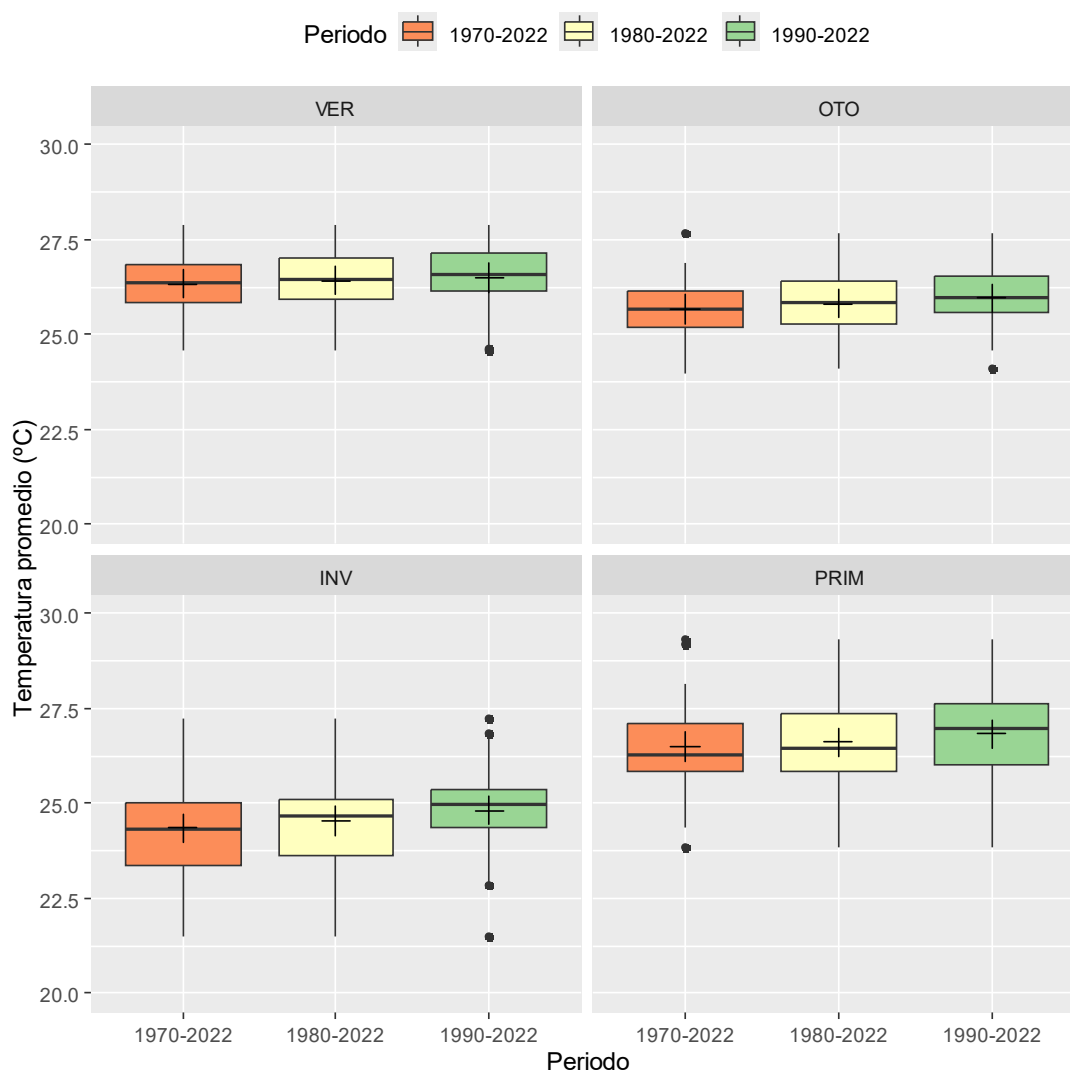


En la Figura 15, se muestra el comportamiento de la temperatura promedio estacional para los periodos 1970, 1980, 1990, por estación: verano (VER), otoño (OTO),

invierno (INV) y primavera (PRIM). En verano las medianas se mantienen bastante constantes (26.5°C) no se observa variabilidad entre los periodos, aunque en el periodo más reciente hay valores extremos bajos. Asimismo, se observa una estabilidad en el promedio durante el verano. En otoño el promedio de la entre los tres periodos esta entre los 25.5°C y no se observa una tendencia de aumento.

En la estación de invierno se muestra la temperatura promedio más baja, pero se muestra una tendencia al alza leve, de 24.2°C en el primer periodo a 25°C en el último periodo, asimismo, en este último periodo se muestra valores atípicos en los extremos. En la estación de primavera se observa una tendencia creciente de la temperatura promedio en el transcurso de los tres periodos. La mediana asciende desde los 26.5°C hasta casi los 27.5°C en el último periodo de análisis. La estación de primavera es la estación con mayor aumento de temperatura promedio, lo que coincide con los patrones vistos en las temperaturas máximas y mínimas.

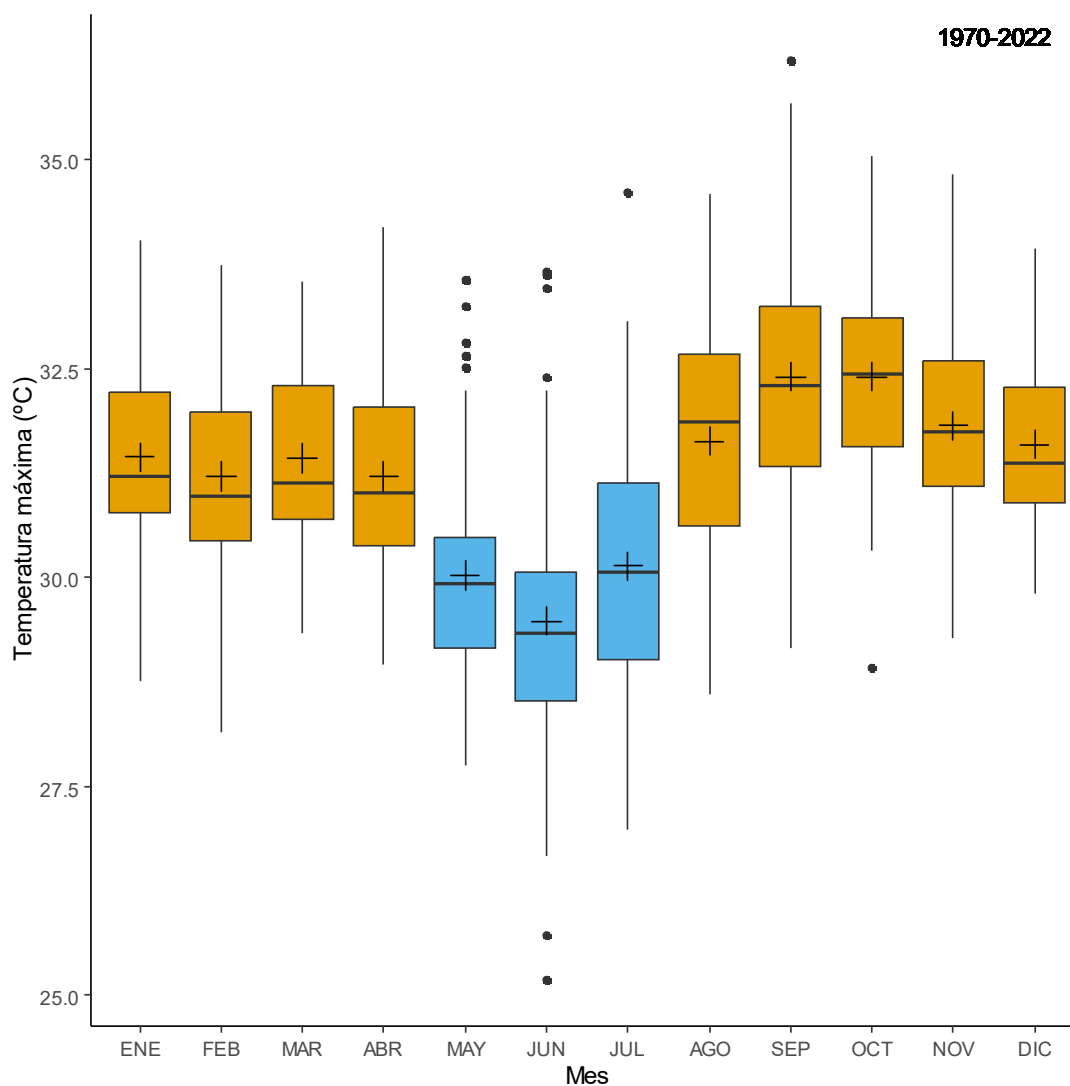
Figura 15. Temperatura media estacional durante periodos evaluados



En la Figura 16, también se observa el comportamiento mensual promedio de la temperatura máxima a lo largo del periodo 1970-2022. La temperatura máxima promedio mensual más baja se registró en el mes de junio (29,48 °C). Además, se puede observar que las temperaturas registradas más elevadas se registraron entre los meses de setiembre y octubre, alcanzando un valor de 32,36 °C. De acuerdo con los registros históricos de la provincia de Tambopata, para el periodo 1970 - 2022, la temperatura máxima anual alcanzó un valor mínimo de (29,80 °C) en 1990 y un valor

máximo en 2008, con 33,75 °C. La temperatura máxima promedio anual registrada fue de 31,22 °C.

Figura 16. Comportamiento de la temperatura máxima durante 1970 - 2022

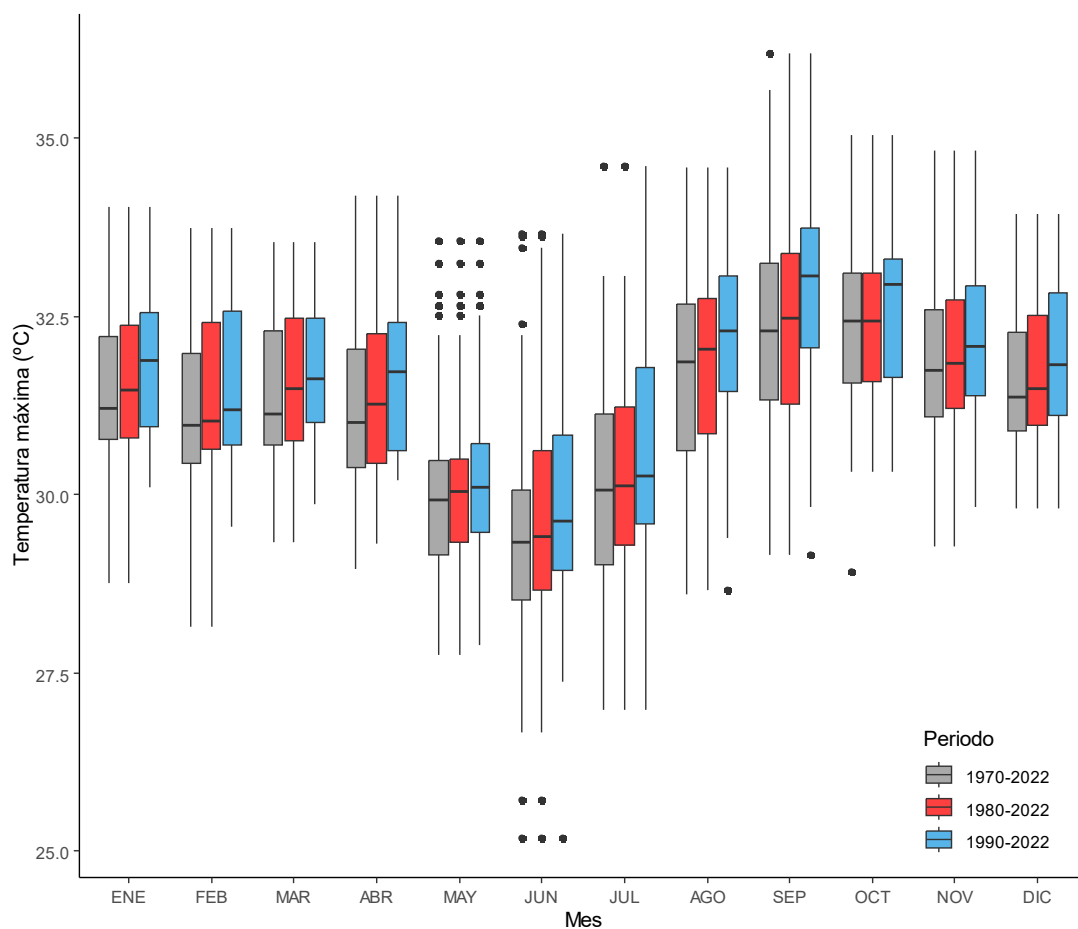


La Figura 17, muestra el comportamiento de la temperatura máxima promedio durante los periodos de análisis correspondientes a los años 1970, 1980 y 1990. En 1970, la temperatura máxima promedio registrada fue de 31.22 °C; esta cifra aumentó a 31.3583 °C en 1980 y alcanzó los 31.6169 °C en 1990, lo cual representa un incremento sostenido a lo largo de las dos décadas observadas.

El análisis mensual revela que los valores más altos de temperatura máxima se concentran principalmente en los meses de septiembre y octubre, coincidiendo con la transición entre la estación seca y el inicio de la temporada de lluvias, lo que podría estar asociado a una mayor incidencia de radiación solar y menor cobertura nubosa.

Por el contrario, los valores más bajos de temperatura máxima se observaron en el mes de junio, coincidiendo con la temporada de invierno austral. Este patrón estacional es coherente con la dinámica térmica típica de la región, en la cual las variaciones de temperatura máxima responden a los cambios en la radiación solar y en los regímenes atmosféricos propios de cada estación.

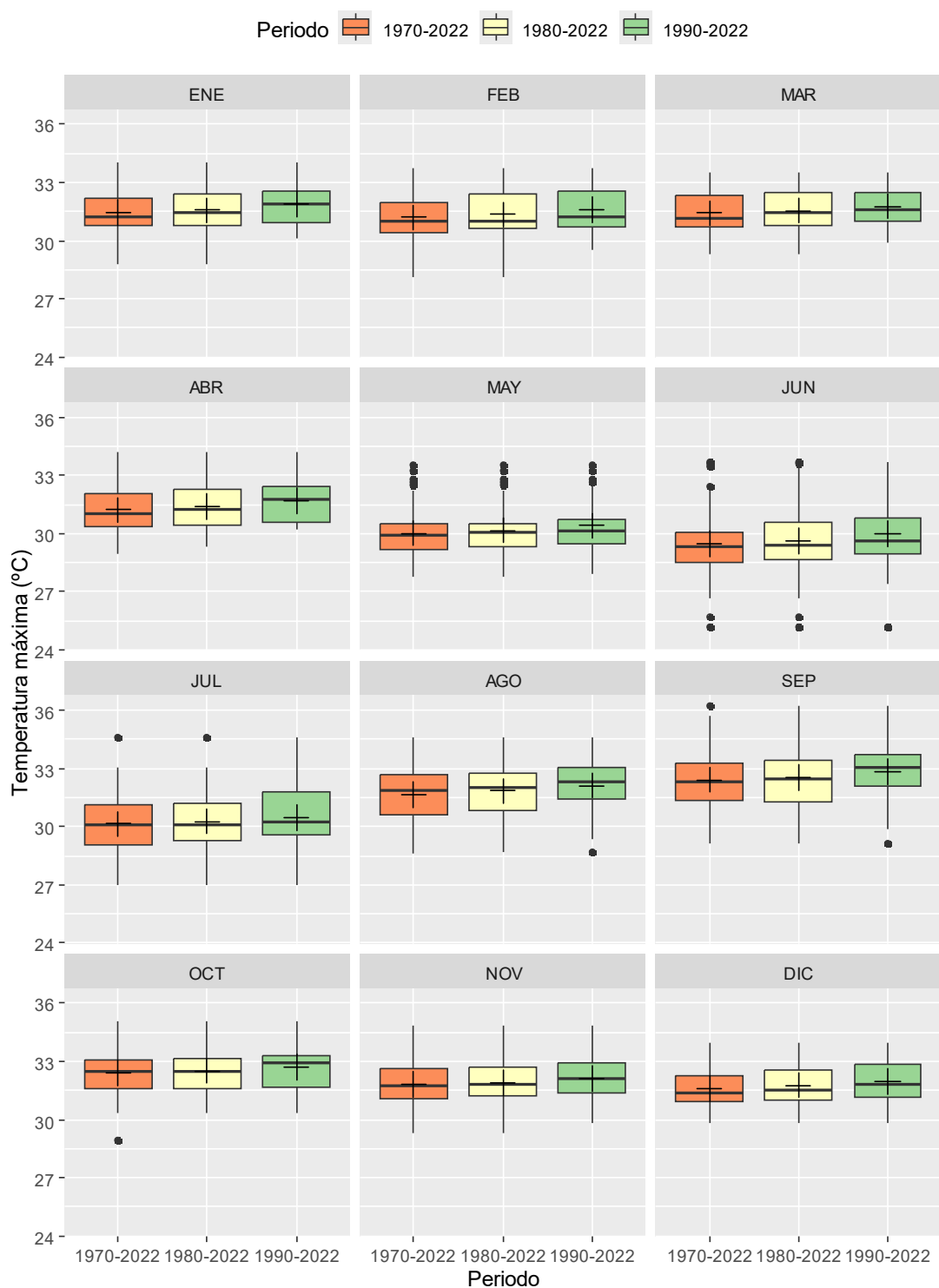
Figura 17. Temperatura de la máxima mensual según periodos evaluados.



La Figura 18, muestra la temperatura máxima mensual (en °C) para cada mes del año, comparando tres periodos: 1970–2022, 1980–2022 y 1990–2022. Septiembre y octubre destacan por registrar las temperaturas máximas más elevadas en los tres periodos, con valores que en algunos casos superan los 34 °C. Esto sugiere que el final de la estación seca, previo al inicio de las lluvias, es el periodo más caluroso del año.

Por otro lado, los meses de junio y mayo muestran las temperaturas máximas más bajas del año. Esto se alinea con la temporada de invierno austral, donde la influencia de masas de aire frío (posiblemente frentes fríos del sur) reduce las temperaturas, incluso las máximas. También se aprecia un aumento en la dispersión en algunos meses (más valores atípicos), lo cual sugiere mayor variabilidad climática reciente. La figura también muestra un ensanchamiento de los boxplots en los últimos periodos (especialmente en verde), lo que puede interpretarse como un aumento en la variabilidad térmica reciente. Finalmente, Los valores atípicos (puntos fuera del bigote del boxplot), particularmente en mayo, junio y septiembre, podrían estar asociados a eventos extremos (como frentes fríos intensos o veranillos).

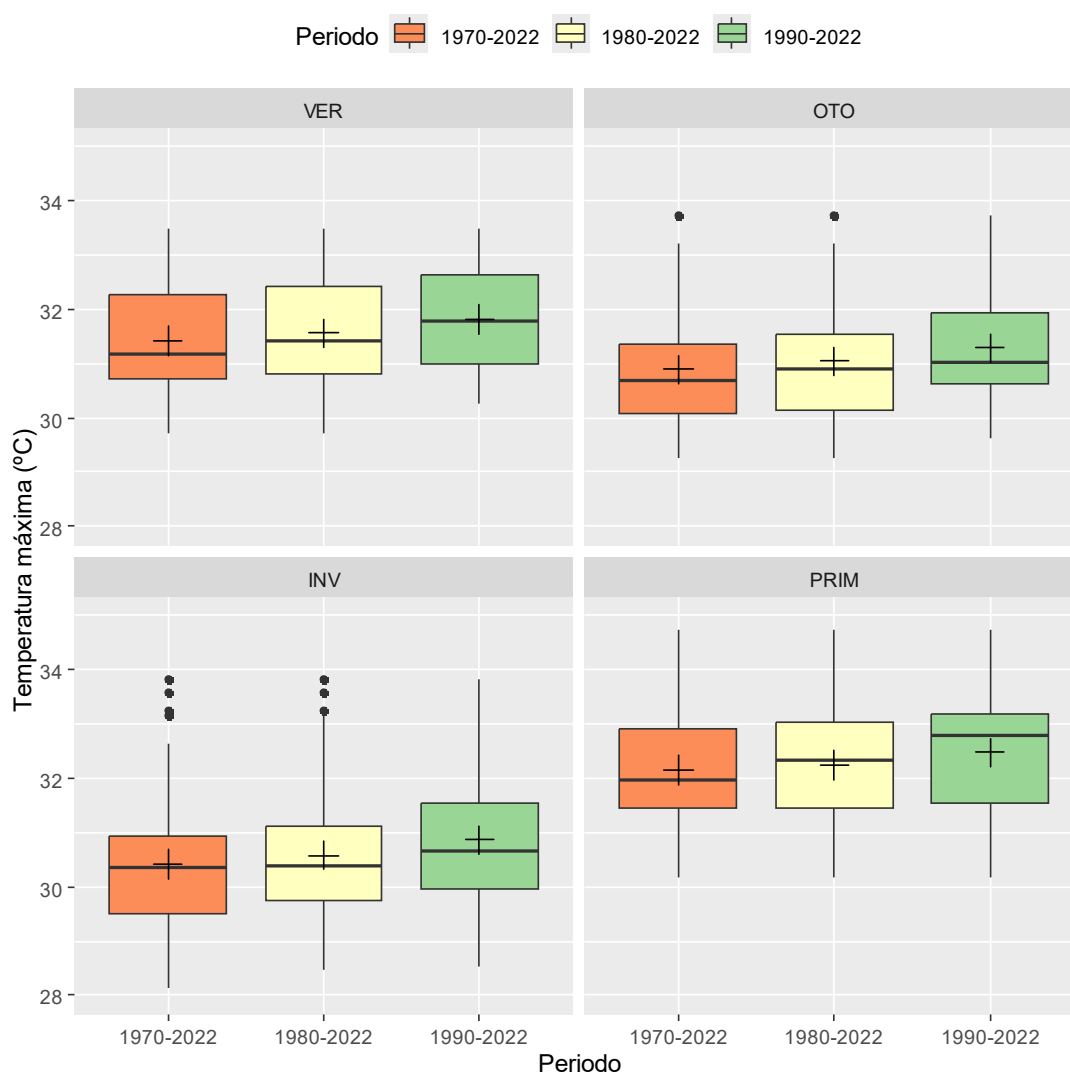
Figura 18. Temperatura máxima mensual según periodos evaluados



La Figura 19, representan la temperatura máxima estacional para tres periodos de análisis: 1970–2022, 1980–2022 y 1990–2022, desglosados por estaciones: verano (VER), otoño (OTO), invierno (INV) y primavera (PRIM). En verano las temperaturas

máximas medianas se ubican entre 31 °C y 32°C, y se observa una ligera tendencia ascendente en la mediana conforme avanza el periodo (1990-2022). La distribución es moderadamente simétrica, con valores extremos en todos los periodos. En otoño las temperaturas son más estables y con menor dispersión. Las medianas están por los 31° C y no muestran grandes variaciones entre los periodos y se muestra la presencia de valores atípicos hacia temperaturas más altas. Invierno es la estación con las temperaturas máximas más bajas y las medianas bordean los 30° C, aunque en el periodo 1990 – 2022 hay un ligero aumento, también hay mayor presencia de valores atípicos, que podría indicar eventos anómalos. Finalmente, en la estación de primavera se presenta temperaturas máximas más elevadas con relación al promedio. Se observa un incremento progresivo en la mediana desde 1970 a 1990. Las temperaturas máximas estacionales muestran una tendencia ascendente leve, más marcada en primavera e invierno.

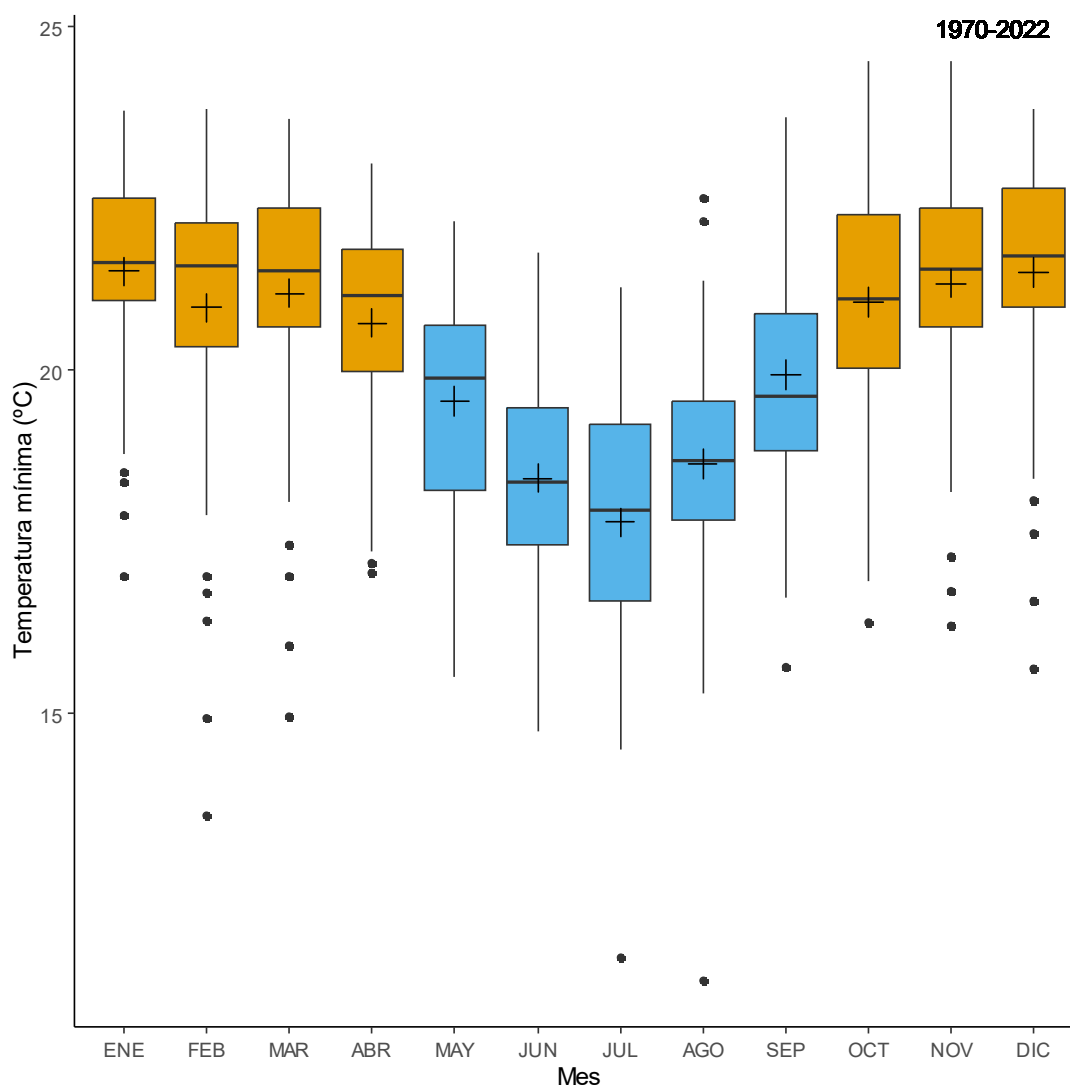
Figura 19. Temperatura máxima estacional según periodos evaluados



En la Figura 20 se muestra el comportamiento de las temperaturas mínimas mensuales a lo largo del periodo de análisis desde 1970 hasta 2022. Las temperaturas mínimas medias más bajas se registran en los meses de junio (18,38 °C) y julio (17,71 °C). El mes de julio se registra como el mes más frío con valores atípicos de 12° C y el cual reflejaría la ocurrencia de eventos de friaje amazónico. Los meses de enero, febrero, marzo, abril y setiembre, octubre, noviembre y diciembre las temperaturas mínimas medias se registraron entre 21 y 23° C, a su vez se observa temperaturas estables, estos meses corresponde a la época lluviosa. De acuerdo con los registros históricos, para el

periodo 1970 - 2022, se registró un valor mínimo anual de 15,98 °C en 1999 y un valor máximo registrado en 2015, con 22,46°C. El promedio anual de temperatura máxima fue de 20,12 °C.

Figura 20. Comportamiento de la temperatura mínima durante 1970 - 2022



La Figura 21 y Figura 22, muestran el comportamiento de la temperatura mínima mensual (en °C), comparando tres periodos de análisis: 1970–2022, 1980–2022 y 1990–2022. Se observa un incremento progresivo en las temperaturas mínimas mensuales conforme se avanza en el tiempo (de 1970 hacia 1990). Las medianas de

temperatura mínima se elevan gradualmente en casi todos los meses. A diferencia del gráfico de temperaturas máximas, aquí las cajas (rangos intercuartílicos) son más estrechas, lo que indica que las temperaturas mínimas tienen una variabilidad interanual menor.

Junio y julio registran las temperaturas mínimas más bajas del año. En el periodo 1970–2022, las mínimas llegaron a valores inferiores a 13 °C, lo que indica la presencia de frentes fríos (conocidos localmente como “friajes”). En los periodos más recientes (1990–2022), estas temperaturas mínimas extremas son menos frecuentes, lo que podría indicar una reducción en la intensidad de los friajes. Enero, febrero, marzo y diciembre presentan las temperaturas mínimas más altas, oscilando entre 21 y 24 °C.

Figura 21. Comportamiento de la temperatura mínima mensual según periodos evaluados.

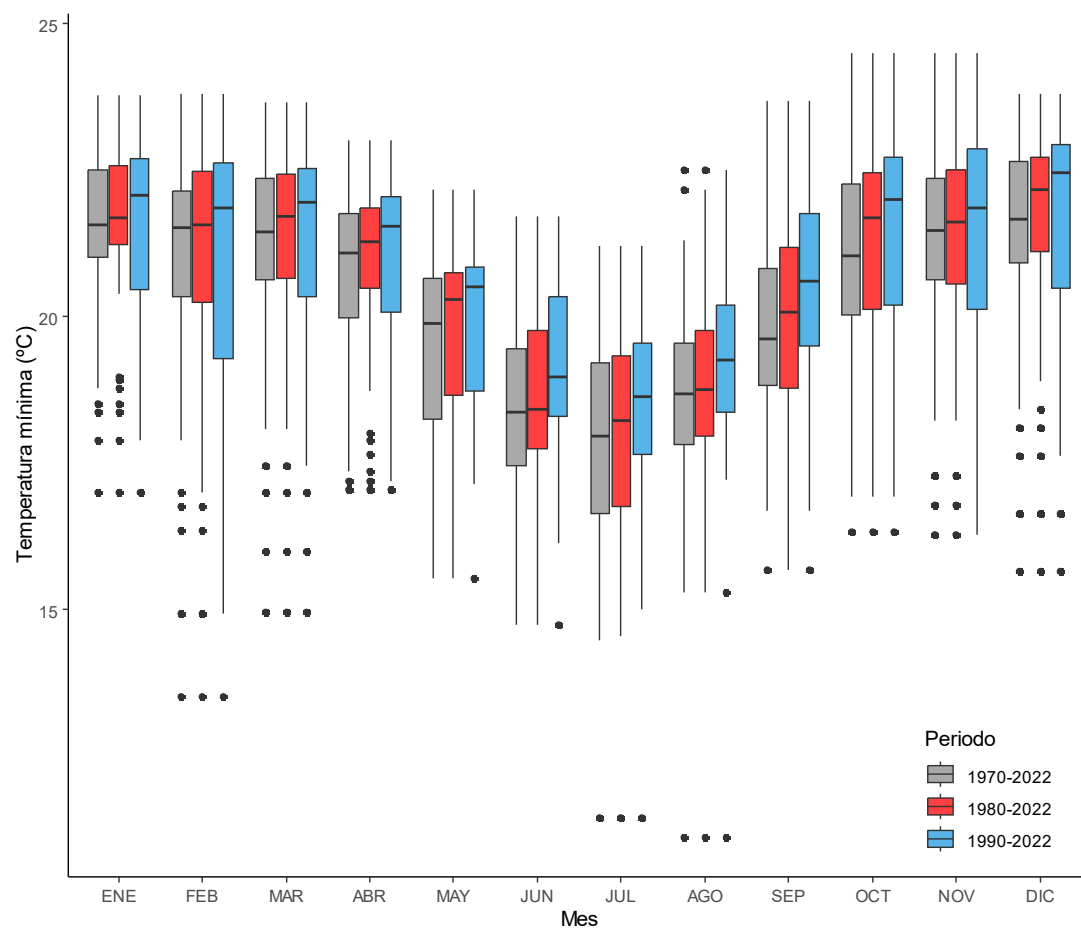
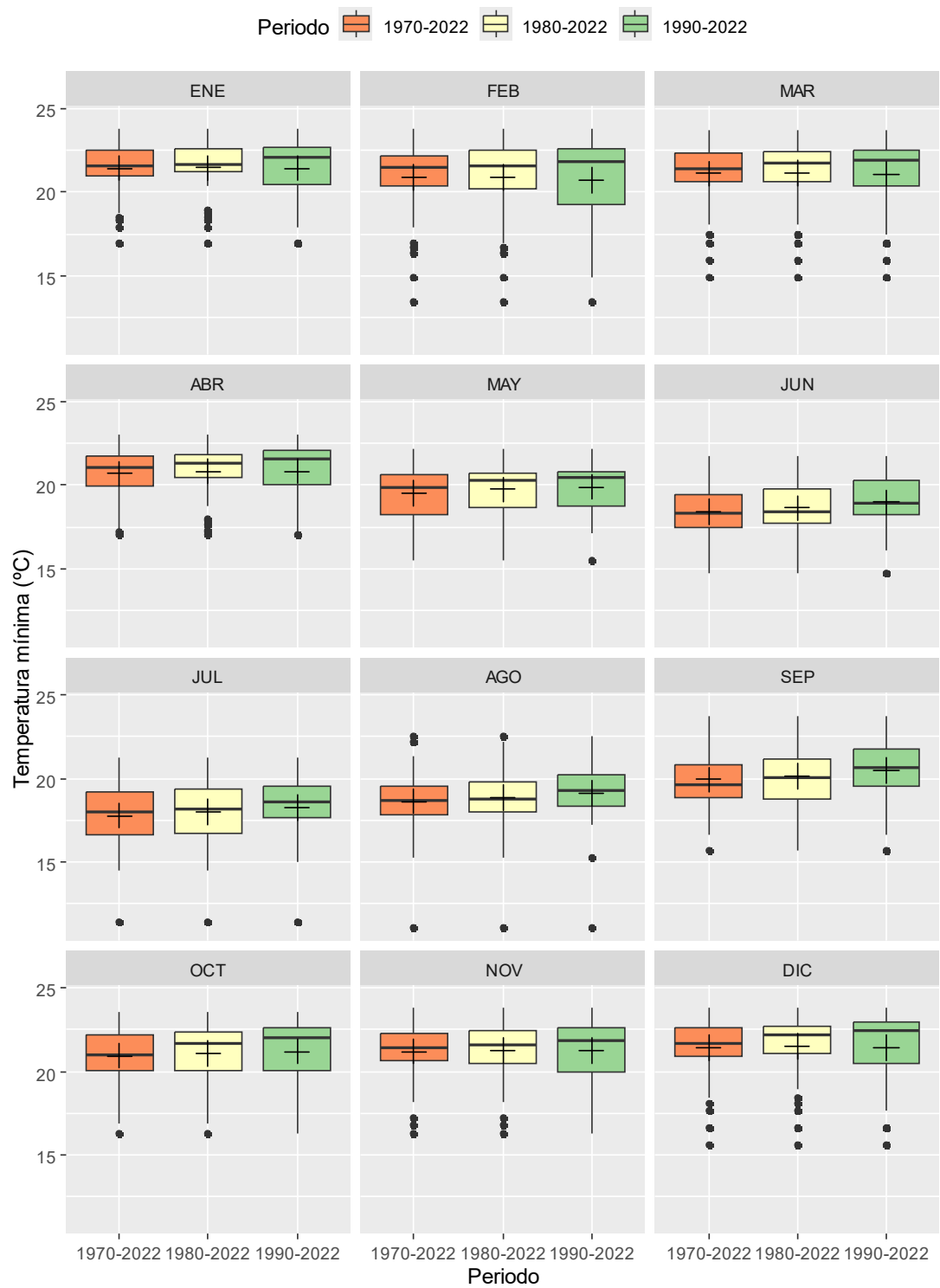


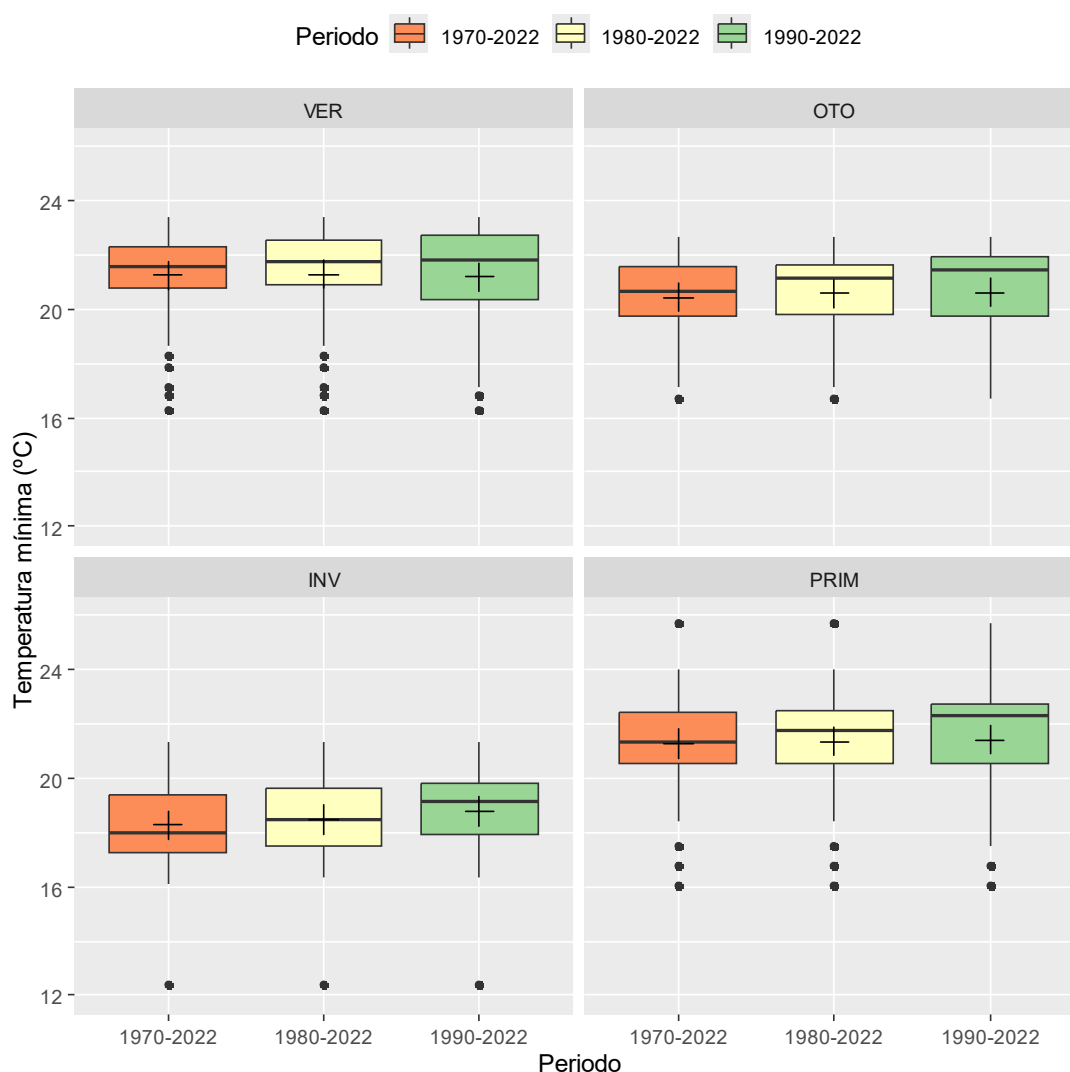
Figura 22. Temperatura mínima mensual según periodos evaluados



La Figura 23, representan la temperatura mínima estacional para tres periodos de análisis: 1970–2022, 1980–2022 y 1990–2022, desglosados por estaciones: verano (VER), otoño (OTO), invierno (INV) y primavera (PRIM). En verano las temperaturas mínimas se mantienen relativamente estables entre los tres periodos, con un aligera tendencia al alza en la mediana (21° C). Los valores atípicos se encuentran por debajo de los 18° C. En otoño las temperaturas mínimas bordean entre 20 y 21 °C en promedio .se observa un comportamiento similar en los tres periodos.

En invierno se observa las temperaturas mínimas más bajas del año, con medianas alrededor de los 18 °C. También se muestra valores extremos bajos cerca de los 12° C, lo que indica eventos fríos intensos. Finalmente se observa un leve aumento. Para la estación de primavera se presenta la mayor elevación de temperatura mínima durante el tiempo. La mediana fluctúa entre 21.5 °C a 22° C. Las estaciones de primavera y verano tienen un incremento en la temperatura mínima, mientras que la estación de invierno sigue siendo la estación más fría y hay una alta presencia de eventos fríos.

Figura 23. Temperatura mínima estacional según periodos evaluados

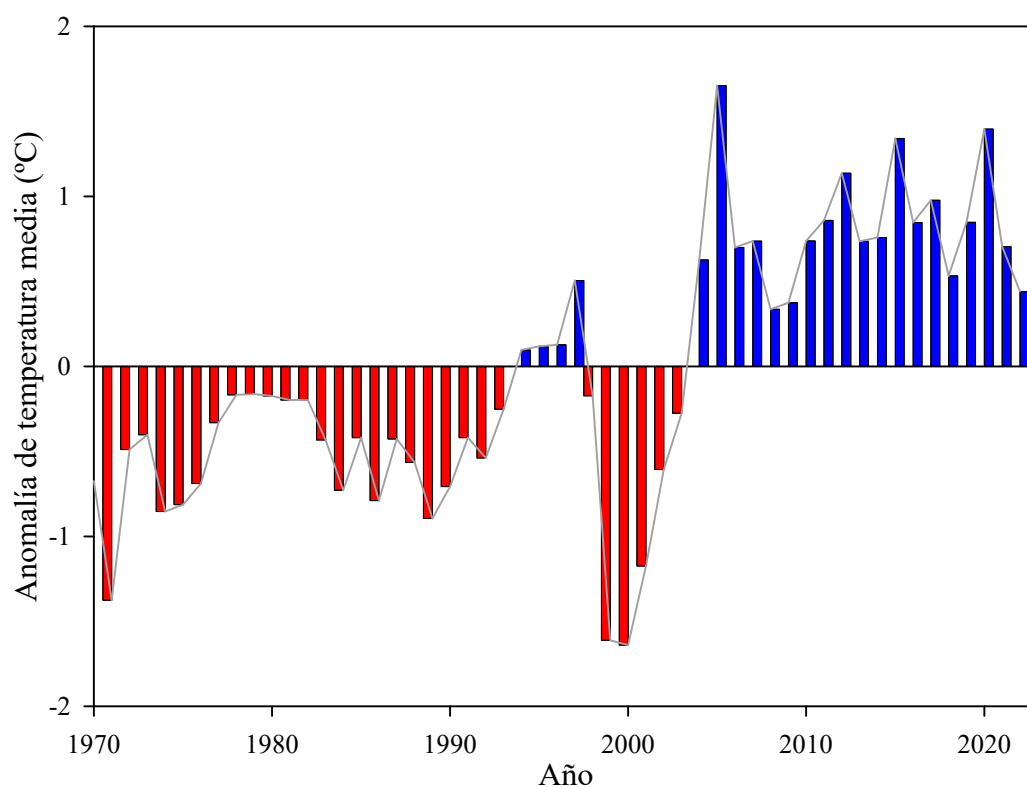


En la Figura 24, se muestra la evolución de las anomalías de la temperatura media anual con respecto al periodo de referencia 1970-2022, es decir, la diferencia entre la temperatura media registrada cada año y un valor referencial (normal climática). Las anomalías positivas indican condiciones más cálidas, mientras que las negativas indican condiciones más frías. El promedio histórico es 25.68° C. Entre 1970-1997 la mayoría de los años presentan valores por debajo de 0, lo que indica que fueron más frío en comparación con la media periodo de referencia. A partir del año 1999, las

anomalías comienzan a aumentar progresivamente, superando la línea de 0° C y esto indica un cambio en la tendencia hacia un clima más cálido.

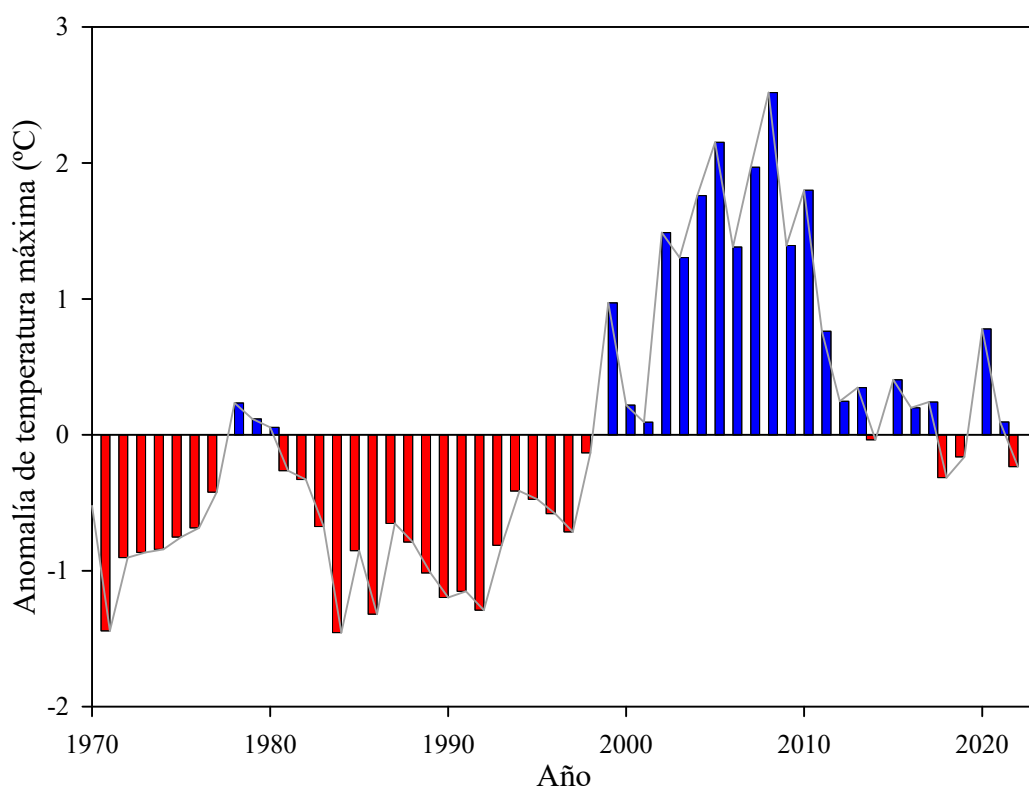
Desde 2004 al 2022 las anomalías se mantienen relativamente positivas, reflejando un patrón bastante marcado. 2005, 2015, 2019 y 2022 muestran anomalías cercanas o superiores a +1.5 °C, lo que indica que estos años fueron significativamente más cálidos que el promedio histórico. Las anomalías positivas dominantes en las últimas dos décadas sugieren impactos ya observables del cambio climático en el comportamiento térmico local.

Figura 24. Anomalías de temperatura media con respecto a la media entre 1970 a 2022.



En la Figura 25, se observa el valor de la anomalía anuales de la temperatura máxima a lo largo del periodo 1970 – 2022. Las barras positivas representan a los años con temperaturas máximas más altas que el promedio mientras que las barras negativas son los años que registraron temperaturas más bajas que el promedio, respectivamente. Durante 1970 al 1999 las anomalías negativas presentaron mayor predominancia, donde las temperaturas máximas fueron inferiores al promedio histórico. Del 2000 al 2010 se observa un cambio notorio con anomalías positivas. El periodo entre 2003 y 2010 registra las anomalías más altas, con un máximo en 2008 cercano a $+3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. aunque en 2011 y 2022 las anomalías disminuyen respecto a los años anteriores, sin embargo, siguen siendo positivos.

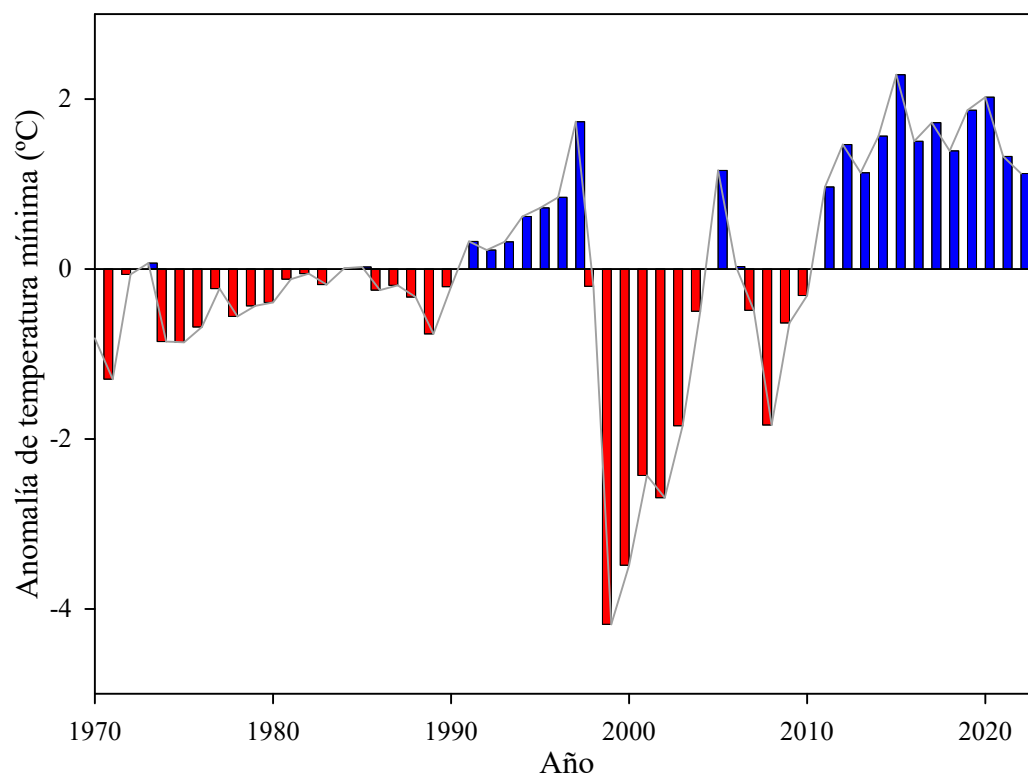
Figura 25. Anomalías de temperatura máxima con respecto a la media entre 1970 a 2022.



En la Figura 26, se muestra las anomalías anuales de la temperatura mínima respecto a la media histórica de 1970 – 2022. El promedio histórico fue de 20.13 °C. Las barras positivas nos señalan los años más cálidos en las noches frías y las barras negativas corresponde a los años más fríos en las temperaturas mínimas (noches más frías de lo normal). Durante 1970-1990 predominó las anomalías negativas de las temperaturas mínimas más bajas que el promedio. En 1970 se presentó la anomalía más baja (-1 °C). Entre 1991-1998 las anomalías de las temperaturas mínimas anuales se incrementan, cambiando de valores negativos a positivos. En 1998 la anomalía registrada es cercana a +2.0 °C.

Finalmente, entre 1999 – 2009 se observa un descenso de las temperaturas mínimas. En 2000 y 2001 se registran anomalías negativas (-3.5 °C), el punto más bajo del periodo analizado, estos eventos están relacionado a la presencia de La Niña y presencia de friajes amazónicos. Años como 2015, 2017, 2019 y 2021 muestran valores entre +1.5 °C y +2.5 °C, indicando noches inusualmente cálidas.

Figura 26. Anomalías de temperatura mínima con respecto a la media entre 1970 a 2022.



4.1.1.2. Determinación de la tendencia lineal mensual, anual de la precipitación y temperatura de la provincia de la provincia de Tambopata.

La identificación de una tendencia lineal en los datos de series temporales se realiza mediante el uso de la regresión lineal (Kiros et al., 2016). La pendiente de la línea de tendencia representa al que la precipitación y la temperatura varían con el tiempo (Yan, 2009). La regresión lineal también puede aportar información sobre la tendencia, como el intercepto de la línea de tendencia (Zelege et al., 2024).

Las tendencias lineales de la precipitación y temperatura mensual y anual se analizaron siguiendo la división de los tres periodos (a) 1970-2022, (b) 1980-2022 y (c) 1990-2022.

En la Tabla 7 se muestra la tendencia lineal de la temperatura media anual. A lo largo del periodo de 1970-2022 se encontró un incremento significativo de la temperatura media anual y mensual ($p < 0,05$), el incremento en 53 años fue de 1.84°C . En el periodo 1980-2022 el incremento de la temperatura media fue de 1.79°C . Durante el último subperiodo, más reciente, 1990-2022, el incremento significativo de la temperatura media anual fue de 1.73°C . En los tres periodos analizados se observa un incremento significativo de la temperatura media anual ($p < 0.05$).

Tabla 7. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura media anual y mensual en los años 1970-2022.

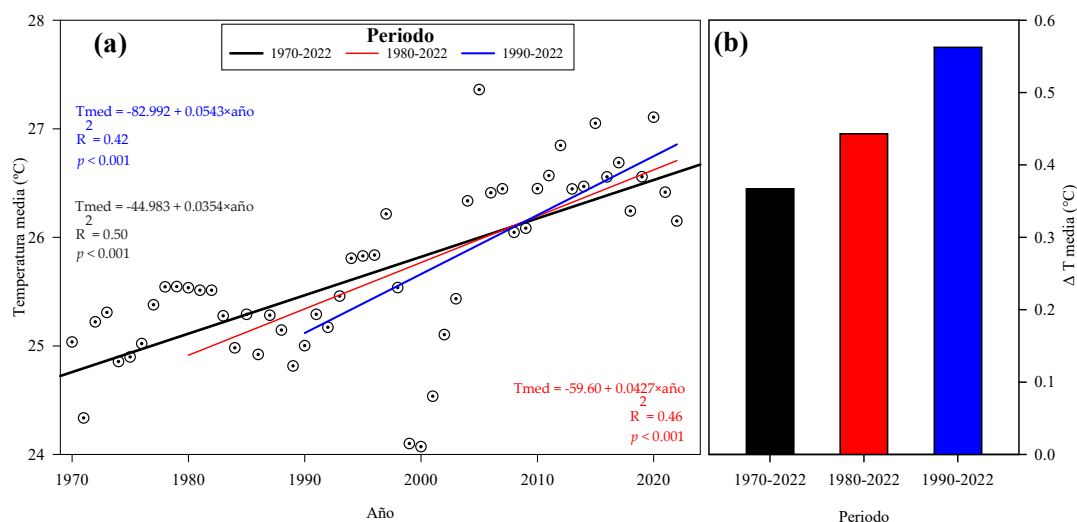
(1)	Temperatura media 1970-2022												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	0.024	0.022	0.020	0.034	0.034	0.044	0.052	0.050	0.057	0.036	0.026	0.027	0.035
ΔT_m (°C)	1.227	1.133	1.022	1.773	1.786	2.264	2.724	2.598	2.976	1.874	1.332	1.381	1.841
r²	0.210	0.117	0.123	0.377	0.310	0.228	0.254	0.354	0.472	0.280	0.119	0.234	0.496
P-value	0.001	0.012	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000

(2)	Temperatura media 1980-2022												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	0.030	0.028	0.024	0.033	0.032	0.048	0.067	0.056	0.083	0.046	0.036	0.031	0.043
ΔT_m (°C)	1.244	1.194	1.019	1.382	1.336	2.014	2.811	2.354	3.471	1.913	1.492	1.283	1.793
r²	0.208	0.119	0.109	0.289	0.195	0.178	0.257	0.304	0.566	0.294	0.126	0.183	0.461
P-value	0.002	0.024	0.030	0.000	0.003	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.020	0.004	0.000

(3)	Temperatura media 1990-2022												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	0.035	0.056	0.038	0.040	0.032	0.021	0.097	0.064	0.105	0.064	0.044	0.057	0.054
ΔT_m (°C)	1.106	1.805	1.211	1.277	1.027	0.662	3.114	2.048	3.350	2.035	1.397	1.830	1.738
r²	0.162	0.231	0.134	0.241	0.144	0.022	0.302	0.215	0.528	0.297	0.092	0.306	0.418
P-value	0.020	0.005	0.036	0.004	0.029	0.413	0.001	0.007	0.000	0.001	0.086	0.001	0.000

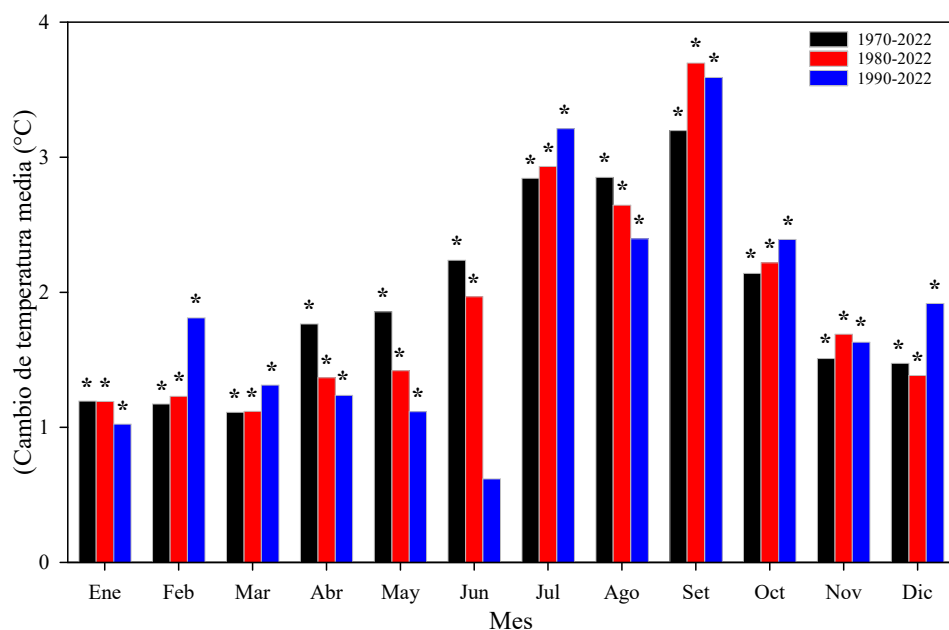
En la Figura 27, se muestra la tendencia lineal y cambio por año y década de la temperatura media anual durante los tres periodos analizados. En el periodo 1970-2022 se encontró un incremento significativo ($p < 0.05$) de la temperatura media anual de $0.0354^{\circ}\text{C/año}$ y $0.35^{\circ}\text{C/década}$ (10 años). Durante el periodo 1980-2022, la temperatura media registro un incremento significativo de $0.0427^{\circ}\text{C/año}$ y $0.42^{\circ}\text{C/década}$. Durante el subperiodo, más reciente, 1990-2022, se observó un incremento significativo de la temperatura media anual de $0.0543^{\circ}\text{C/año}$ y $0.54^{\circ}\text{C/década}$. En los tres periodos analizados se observa un incremento significativo notable tanto anual y por década ($p < 0.05$).

Figura 27. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura media anual según periodos evaluados



En la Figura 28, se observa el cambio de temperatura media mensual durante 1970, 1980 y 1990. Se observa un incremento significativo ($p < 0.05$). en la temperatura media a lo largo de los meses en los tres periodos analizados. Los meses con mayores incrementos son entre julio y setiembre, con picos más altos en julio y setiembre, superando los 3° C. El incremento de la temperatura media es más notable durante los meses más secos (junio a setiembre).

Figura 28. Cambio de temperatura media mensual según periodos evaluados



Nota. El nivel de significancia * $p < 0.05$.

En la Tabla 8, se muestra la tendencia lineal de la temperatura máxima anual y mensual durante 1970-2022. El incremento de la temperatura máxima anual fue estadísticamente significativo ($p < 0.05$) durante el periodo 1970-2022, con un incremento anual de 1.86 °C. Para el periodo 1980-2022 el incremento de la temperatura máxima también fue estadísticamente significativo ($p < 0.05$) con un valor de 1.75 °C. Durante el periodo más reciente de 1990-2022, la temperatura máxima anual aumentó en 1.08 °C. En resumen, el incremento de la temperatura máxima anual fue estadísticamente significativo en los tres periodos analizados.

Tabla 8. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura máxima anual y mensual en los años 1970-2022.

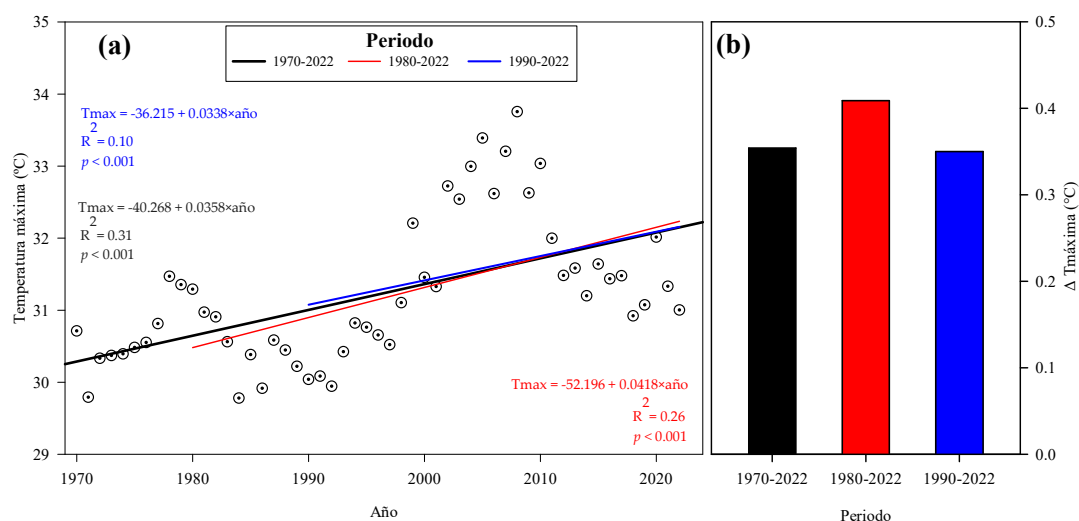
<u>(1)</u>	Temperatura máxima 1970-2022												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	0.035	0.028	0.027	0.042	0.031	0.034	0.041	0.047	0.052	0.033	0.022	0.037	0.036
ΔT_m (°C)	1.816	1.444	1.417	2.187	1.633	1.749	2.131	2.469	2.716	1.712	1.126	1.948	1.862
r²	0.211	0.131	0.155	0.309	0.131	0.084	0.146	0.259	0.297	0.199	0.096	0.302	0.310
P-value	0.001	0.008	0.004	0.000	0.008	0.035	0.005	0.000	0.000	0.001	0.024	0.000	0.000

<u>(2)</u>	Temperatura máxima 1980-2022												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	0.041	0.027	0.031	0.045	0.033	0.034	0.050	0.051	0.080	0.042	0.026	0.042	0.042
ΔT_m (°C)	1.711	1.130	1.290	1.897	1.383	1.424	2.109	2.148	3.355	1.765	1.088	1.745	1.754
r²	0.175	0.075	0.117	0.236	0.088	0.051	0.139	0.216	0.397	0.242	0.081	0.226	0.258
P-value	0.005	0.076	0.025	0.001	0.054	0.147	0.014	0.002	0.000	0.001	0.065	0.001	0.001

<u>(3)</u>	Temperatura máxima 1990-2022												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	0.021	0.003	0.018	0.032	0.023	-0.017	0.068	0.051	0.105	0.050	0.007	0.045	0.034
ΔT_m (°C)	0.659	0.098	0.569	1.025	0.745	-0.540	2.187	1.617	3.369	1.602	0.214	1.439	1.082
r²	0.035	0.001	0.026	0.079	0.025	0.008	0.134	0.120	0.375	0.180	0.003	0.153	0.103
P-value	0.296	0.889	0.367	0.113	0.383	0.631	0.037	0.048	0.000	0.014	0.756	0.024	0.069

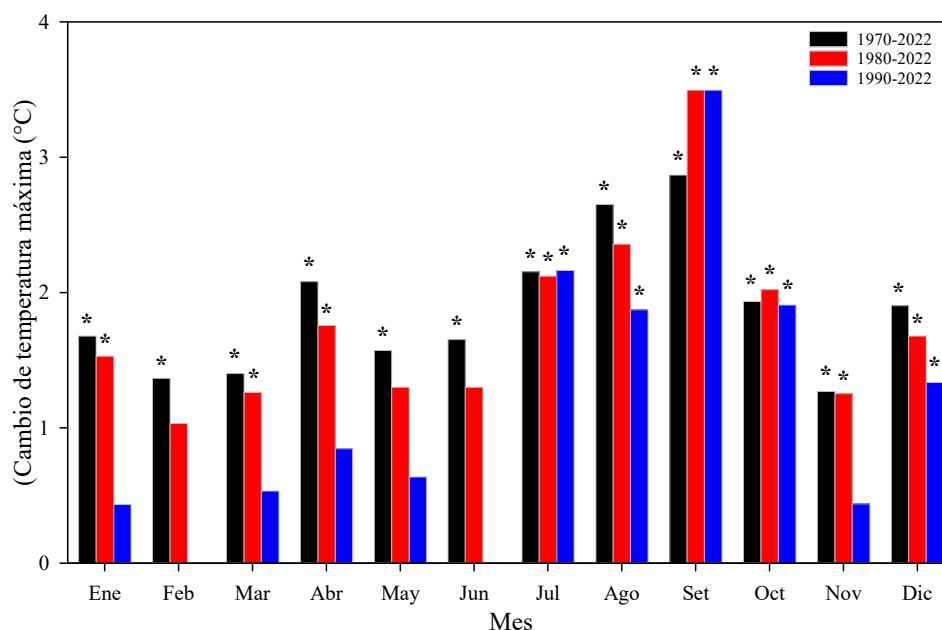
En la Figura 29 se observa la tendencia lineal y el cambio por año y década de la temperatura máxima anual durante los tres periodos analizados. En el periodo 1970-2022, se encontró un incremento significativo de la temperatura máxima anual $0.0358^{\circ}\text{C/año}$ y $0.36^{\circ}\text{C/década}$. Para el periodo 1980-2022 el incremento de la temperatura máxima también fue estadísticamente significativo ($p < 0.05$) con un valor de $0.0418^{\circ}\text{C/año}$ y $0.42^{\circ}\text{C por década}$. Durante el periodo más reciente de 1990-2022, la temperatura máxima anual aumentó en $0.0338^{\circ}\text{C/año}$ y $0.34^{\circ}\text{C por década}$. En resumen, el incremento de la temperatura máxima anual fue estadísticamente significativo en los tres periodos evaluados.

Figura 29. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura máxima anual según periodos evaluados



En la Figura 30, se muestra el cambio de la temperatura máxima mensual durante se muestra el cambio de la temperatura mínima mensual durante 1970, 1980 y 1990. Durante los tres periodos de julio, agosto, setiembre, octubre y diciembre se encontraron tendencias homogéneas estadísticamente significativas ($p < 0.05$). El periodo más reciente (1990-2022) registró incrementos solo en los meses de julio, agosto, setiembre, octubre y diciembre. En el mes de setiembre de los tres periodos se observa mayor incremento respecto a los otros meses.

Figura 30. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura máxima mensual según periodos evaluados



Nota. El nivel de significancia * $p < 0.05$

En la Tabla 9 se observa la tendencia lineal y el cambio de la temperatura mínima anual y mensual durante el periodo 1970-2022. En este primer periodo, se observa un incremento anual de 1.78 °C en la temperatura mínima, sin embargo, dicho aumento fue estadísticamente significativo ($p > 0.05$). En comparación para el periodo 1980–2022, se observó un aumento estadísticamente significativo de 1.79 °C en la temperatura mínima anual. De manera similar, durante el periodo 1990–2022, se registró un incremento significativo de 2.35 °C en la temperatura mínima anual ($p < 0.05$).

Tabla 9. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura mínima anual y mensual en los años 1970-2022.

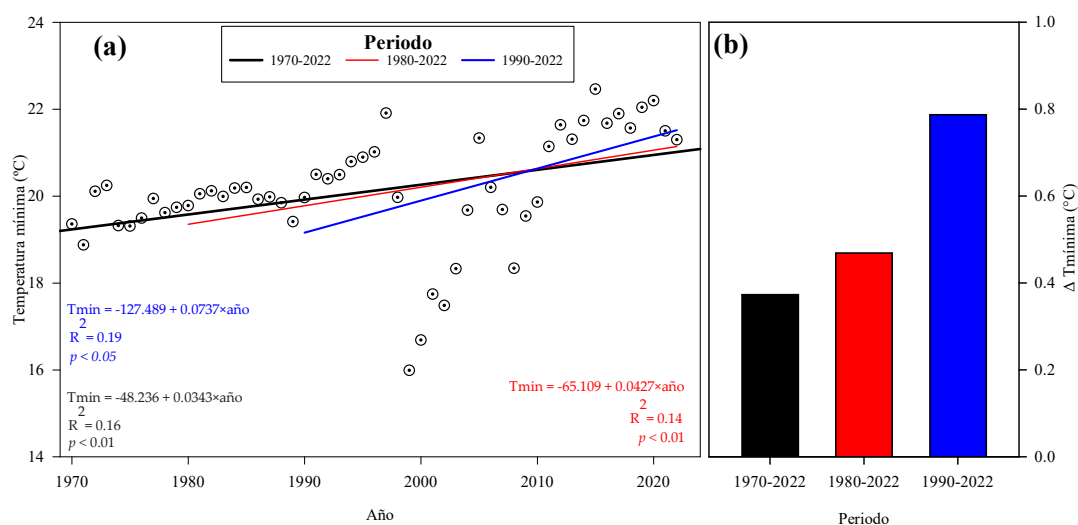
<u>(1)</u>	Temperatura mínima 1970-2022												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	0.012	0.016	0.012	0.026	0.037	0.053	0.064	0.052	0.062	0.039	0.021	0.016	0.034
ΔT_m (°C)	0.639	0.823	0.626	1.358	1.939	2.778	3.318	2.727	3.236	2.036	1.078	0.814	1.781
r²	0.016	0.013	0.010	0.068	0.149	0.266	0.255	0.217	0.340	0.126	0.036	0.020	0.157
P-value	0.360	0.421	0.472	0.059	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.173	0.192	0.311

<u>(2)</u>	Temperatura mínima 1980-2022												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	0.019	0.030	0.018	0.021	0.031	0.062	0.084	0.061	0.085	0.049	0.034	0.020	0.043
ΔT_m (°C)	0.777	1.257	0.747	0.868	1.290	2.604	3.514	2.559	3.586	2.060	1.417	0.821	1.792
r²	0.021	0.025	0.012	0.026	0.066	0.241	0.268	0.185	0.368	0.112	0.052	0.017	0.138
P-value	0.359	0.312	0.481	0.302	0.096	0.001	0.000	0.004	0.000	0.028	0.142	0.402	0.014

<u>(3)</u>	Temperatura mínima 1990-2022												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	0.048	0.110	0.058	0.048	0.041	0.058	0.126	0.077	0.104	0.077	0.067	0.069	0.074
ΔT_m (°C)	1.552	3.513	1.852	1.529	1.308	1.865	4.041	2.479	3.332	2.468	2.139	2.221	2.358
r²	0.064	0.155	0.060	0.064	0.063	0.123	0.342	0.147	0.295	0.132	0.094	0.100	0.189
P-value	0.155	0.023	0.171	0.155	0.160	0.046	0.000	0.027	0.001	0.038	0.082	0.073	0.011

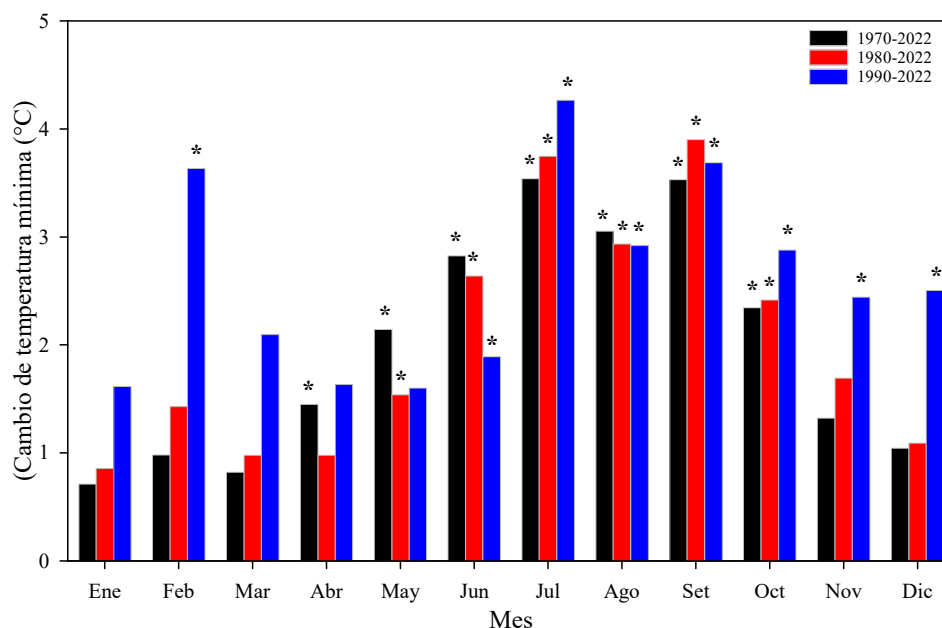
En la Figura 31 se observa la tendencia lineal de la temperatura mínima anual durante los tres periodos analizados y fueron estadísticamente significativos ($p < 0.05$) En el periodo de 1970-2022, se registró un incremento de la temperatura mínima anual de 0.0343°C/año y 0.34 °C/década. De manera similar, la temperatura mínima anual durante el periodo 1980-2023 mostró incremento de 0.0427 °C/año y en 0.42 °C/década. En el periodo 1990-2022 el incremento de la temperatura mínima anual también fue de 0.0737 °C/año y 0.73 °C/década, respectivamente.

Figura 31. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura mínima anual en según periodos evaluados



Asimismo, en la Figura 32, se muestra el cambio de la temperatura mínima mensual durante 1970, 1980 y 1990. Durante los tres periodos en los meses de junio, julio, agosto, setiembre y octubre se encontraron tendencias homogéneas estadísticamente significativas ($p < 0.05$) y estos meses corresponde a temporada seca. El periodo más reciente (1990-2022) tiene mayores incrementos en casi todos los meses, con valores que superan los 4° C en julio y febrero. En el periodo 1990-2022 se observan incrementos superiores a otros años. En el periodo 1980-2022 se observa un incremento intermedio, mientras que en 1970-2022 se registra los menores aumentos, siendo notorio en los primeros meses del año.

Figura 32. Tendencia lineal y cambio por década de la temperatura mínima mensual según periodos evaluados



Nota. El nivel de significancia * $p < 0.05$

En la Tabla 10, se observa la tendencia y el cambio anual de la precipitación, durante los tres periodos analizados. Entre el periodo 1970-2022, se registró una disminución no significativa ($p > 0.05$) en la precipitación anual con un total de 169.89 mm. También, durante el periodo 1980-2022, se observó una disminución en la precipitación anual (-434.994 mm), Durante el último subperiodo más reciente, 1990-2022, se encontró una disminución de la precipitación anual (-33.02 mm). La precipitación anual y mensual en los tres periodos ha presentado una disminución; sin embargo, no es de relevancia estadística ($p < 0.05$) (Figura 33).

Tabla 10. Tendencia lineal y cambio por década de la precipitación anual y mensual durante 1970-2022.

(1) Precipitación 1970-2022													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	-1.763	-0.478	-0.651	0.654	0.671	0.032	-0.269	-0.715	-0.800	-0.531	0.829	-0.247	-3.267
Δ Pp(mm)	-91.676	-24.839	-33.850	34.030	34.901	1.677	-14.012	-37.185	-41.576	-27.620	43.092	-12.841	-169.894
r2	0.028	0.003	0.008	0.006	0.026	0.000	0.005	0.032	0.034	0.008	0.016	0.001	0.013
P-value	0.231	0.709	0.535	0.578	0.249	0.941	0.606	0.200	0.187	0.519	0.369	0.824	0.421

(2) Precipitación 1980-2022													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	-4.026	-2.348	-1.804	-0.035	0.082	0.091	0.141	0.474	-0.778	-2.000	0.209	-0.362	-10.357
Δ Pp(mm)	-169.075	-98.599	-75.776	-1.485	3.433	3.804	5.907	19.889	-32.694	-83.983	8.761	-15.194	-434.994
r2	0.084	0.041	0.036	0.000	0.000	0.001	0.001	0.014	0.026	0.072	0.001	0.001	0.076
P-value	0.059	0.190	0.222	0.984	0.921	0.883	0.845	0.451	0.300	0.081	0.873	0.822	0.074

(3) Precipitación 1990-2022													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pendiente	0.651	2.402	-0.105	0.361	0.879	0.014	0.155	0.349	-1.120	-2.839	1.710	-3.488	-1.032
Δ Pp(mm)	20.825	76.851	-3.357	11.540	28.120	0.435	4.967	11.158	-35.846	-90.845	54.733	-111.600	-33.021
r2	0.002	0.045	0.000	0.001	0.016	0.000	0.001	0.004	0.034	0.095	0.023	0.073	0.001
P-value	0.828	0.237	0.956	0.898	0.477	0.988	0.868	0.728	0.304	0.081	0.399	0.129	0.880

En la Figura 33 se puede observar la tendencia lineal y cambio por década de la precipitación anual y mensual durante los tres periodos analizados. Entre el periodo 1970-2022 la disminución de la precipitación por año fue de 1.032 mm, aunque no fue estadísticamente significativos. En la Figura 34, se muestra la tendencia y cambio mensual de la precipitación (mm). Se observa una disminución en precipitación en los meses de enero, febrero, marzo, abril, julio, agosto, septiembre y octubre y diciembre, pero estas no son significativas. En los tres periodos, la precipitación mensual no fue estadísticamente significativa ($p > 0.05$). Durante los otros meses la precipitación aumentó, pero no fueron estadísticamente significativas.

Figura 33. Tendencia lineal y cambio por década de la precipitación anual durante 1970-2022.

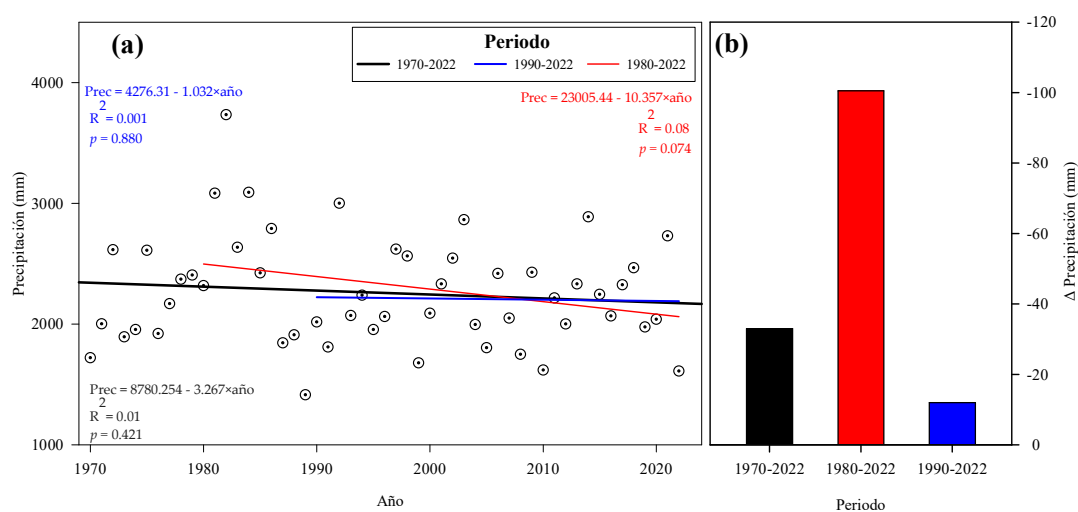
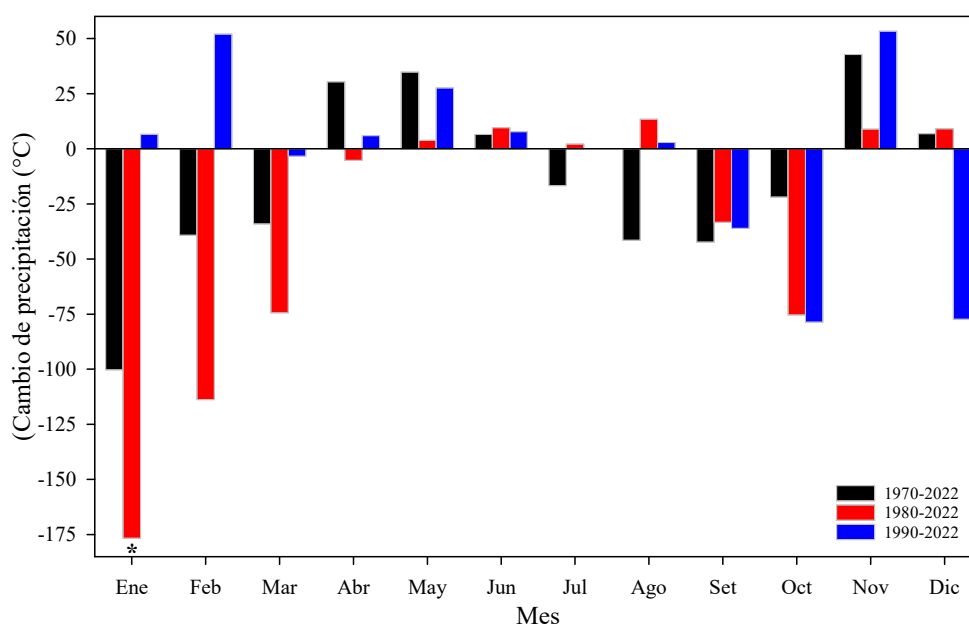


Figura 34. Tendencia lineal y cambio por década de la precipitación mensual durante 1970-2022.



Nota. El nivel de significancia * $p < 0.05$

4.1.1.3. Determinación de la tendencia y punto de cambio mensual, anual y estacional de la precipitación y temperatura de la provincia de la provincia de Tambopata.

Es importante señalar que, los resultados de la tendencia de Mann Kendall es representado por el valor de Z , donde $Z > 0$ indica que existe una tendencia creciente en los datos y $Z < 0$ indica que existe una tendencia decreciente en los datos (Marsick et al., 2024; L. Wang et al., 2021). Es importante señalar que la Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha utilizado estas técnicas en investigaciones sobre las variaciones temporales de los datos climáticos (Fattah et al., 2024).

En la Tabla 11, se observa la tendencia de la temperatura media anual, mensual y estacional durante el periodo 19970-2022. La temperatura media anual mostró una tendencia significativa al aumento de ($0.035\text{ }^{\circ}\text{C/año}^{-1}$) (prueba de Sen's slope estimator, $p < 0.001$), y se estimó un punto de cambio en el 2003 (prueba de Pettit, $p < 0.001$). El aumento de la temperatura media estacional fue mayor en invierno ($0.044\text{ }^{\circ}\text{C por año}$) y en primavera (0.039 C/año^{-1}). Los puntos de cambio para la temperatura media estacional se detectaron entre 2000 y 2003 ($p < 0.01$ en la prueba de Pettit). El invierno fue la primera estación en presentar un punto de cambio (2000), mientras que el verano y el otoño experimentaron un punto de cambio en 2004 (prueba de Pettit $p < 0.01$).

Tabla 11. Tendencia de la temperatura media anual, mensual y estacional durante 1970-2022.

Mes	Temperatura media (°C)		
	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator
ANUAL	5.45***	2003***	0.035***
ENE	3.80***	2004**	0.025***
FEB	2.76**	2004***	0.022**
MAR	3.34***	2004***	0.023***
ABR	4.41***	2004***	0.034***
MAY	4.46***	2000***	0.032***
JUN	3.89***	2000***	0.043***
JUL	3.67***	2000***	0.049***
AGO	4.72***	1999***	0.056***
SEP	4.72***	2003***	0.051***
OCT	4.11***	2008***	0.037***
NOV	3.25***	2003***	0.023***
DIC	4.49***	2003***	0.032***
Verano (DJF)	4.12***	2004***	0.026***
Otoño (MAM)	4.78***	2004***	0.029***
Invierno (JJA)	4.74***	2000***	0.044***
Primavera (SON)	4.75***	2003***	0.039***

Nota. Niveles de significación estadística * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

En la Tabla 12, se observa la tendencia de la temperatura máxima anual, mensual y estacional durante el periodo 19970-2022. La temperatura máxima anual mostró una tendencia significativa al aumento ($0.030\text{ }^{\circ}\text{C/año}^{-1}$) (pendiente de Sen's slope estimator, $p < 0.001$), y se estimó un punto de cambio en 1997 ($p < 0.01$ en la prueba de Pettit). El aumento en la temperatura máxima estacional fue mayor en invierno y primavera (0.037 y $0.034\text{ }^{\circ}\text{C por año}$), mientras que el más bajo fue en otoño ($0.027\text{ }^{\circ}\text{C/año}^{-1}$). Los puntos de cambio para la temperatura máxima estacional se detectaron entre 1996 y 2000 (prueba de Pettit, $p < 0.01$). La primavera fue la primera estación en presentar un punto de cambio (1996), y la última fue el invierno (2000) (prueba de Pettit, $p < 0.01$). La temperatura máxima tuvo un patrón y una tendencia similares a los observados en las temperaturas media y mínima.

Tabla 12. Tendencia de la temperatura máxima anual, mensual y estacional durante 1970-2022.

Mes	Temperatura Máxima (°C)		
	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator
ANUAL	4.26***	1997***	0.030***
ENE	3.41**	1997***	0.035***
FEB	2.55*	1997***	0.025*
MAR	2.51**	1998***	0.023**
ABR	3.80***	1998***	0.039**
MAY	2.40*	1998***	0.024*
JUN	2.25*	2000**	0.029*
JUL	2.55**	2000***	0.039**
AGO	3.90***	1998***	0.049***
SEP	3.55***	1996***	0.044***
OCT	3.31***	1997***	0.034***
NOV	2.30**	1994**	0.024**
DIC	4.23***	1996***	0.038***
Verano (DJF)	3.57***	1997***	0.034***
Otoño (MAM)	3.29**	1998***	0.027**
Invierno (JJA)	3.38***	2000***	0.037***
Primavera (SON)	3.54***	1996***	0.034***

Nota. Niveles de significación estadística * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

En la Tabla 13, también muestra la tendencia de la temperatura mínima anual, mensual y estacional durante el periodo de 1970-2022. Y del mismo modo, la temperatura mínima anual también mostró una tendencia significativa creciente ($0,045\text{ }^{\circ}\text{C/año}^{-1}$) (pendiente de Sen's slope estimator, $p < 0.001$), y se estimó el punto de cambio en 2010 (prueba de Pettit; $p < 0.05$). El aumento de la temperatura mínima estacional fue mayor en invierno ($0.057\text{ }^{\circ}\text{C/año}^{-1}$), mientras que en verano ($0.032\text{ }^{\circ}\text{C/año}^{-1}$) y verano fue el más bajo ($0.032\text{ }^{\circ}\text{C/año}^{-1}$). Los puntos de cambio de la temperatura mínima estacional se encontraron entre 2002 y 2010 (prueba de Pettit; $p < 0.05$). El invierno fue la primera estación en presentar un punto de cambio (2002), mientras que el verano y otoño experimentaron un punto de cambio en 2010 (prueba de Pettit; $p < 0.05$).

Tabla 13. Tendencia de la temperatura mínima anual, mensual y estacional del periodo 1970-2022.

Mes	Temperatura Min (°C)		
	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator
ANUAL	4.07***	2010***	0.045***
ENE	2.35*	2010**	0.028*
FEB	2.45**	2010***	0.035**
MAR	2.54**	2010**	0.029**
ABR	3.31***	2010***	0.037***
MAY	3.21***	2010**	0.039***
JUN	3.89***	2003***	0.055***
JUL	4.23***	2000***	0.063***
AGO	4.58***	2003***	0.050***
SEP	4.66***	2003***	0.063***
OCT	3.97***	2008***	0.051***
NOV	2.38**	2008***	0.032**
DIC	2.94**	2008***	0.032**
Verano (DJF)	2.94**	2010***	0.032**
Otoño (MAM)	3.47***	2010***	0.037***
Invierno (JJA)	4.81***	2002***	0.057***
Primavera (SON)	3.31***	2008***	0.040***

Nota. Niveles de significación estadística: *P < 0.05, **P < 0.01 y *** P < 0.001.

La Tabla 14, muestra las tendencias de la precipitación anual, mensual y estacional durante el periodo 1970-2022. Las tendencias (Sen's slope; $p > 0.05$) y puntos de cambio de la precipitación mensual, anual y estacional no fueron significativos (Pettit's test; $p > 0.05$). Aunque se observó una tendencia decreciente no significativa de la precipitación anual y en los meses de enero, febrero, marzo, julio, agosto, setiembre y en todas las estaciones del año.

Tabla 14. Tendencias de la precipitación anual, mensual y estacional del periodo 1970 – 2022

Mes	Precipitación (mm)		
	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator
ANUAL	-0.36	1986	No trend
ENE	-1.27	1988	No trend
FEB	-0.27	1986	No trend
MAR	0.02	1984	No trend
ABR	0.21	2015	No trend
MAY	1.02	1977	No trend
JUN	-0.06	1993	No trend
JUL	-0.15	1978	No trend
AGO	-1.29	1977	No trend
SEP	-0.57	1992	No trend
OCT	-0.44	1994	No trend
NOV	0.61	2013	No trend
DIC	0.38	1991	No trend
Verano (DJF)	-0.73	1988	No trend
Otoño (MAM)	0.47	1977	No trend
Invierno (JJA)	-0.33	1975	No trend
Primavera (SON)	-0.82	2003	No trend

4.1.1.4. Caracterización de la cobertura y deforestación en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022.

a. Cobertura y uso de suelo durante el periodo 1990-2022

En la Tabla 15 se presenta la cobertura y uso de suelo a lo largo del periodo 1990 – 2022. La cobertura está conformada por bosque, bosque inundable, agua y zona pantanosa mientras que, el uso del suelo está conformado por pastizal, agricultura, infraestructura, otras áreas sin vegetación y minería. En 1990 el uso de suelo fue de 83,570 ha y este valor se incrementó a 195,981 ha en el 2022. De la Tabla 15 se puede observar que la agricultura, infraestructura y la minería se fue incrementando a medida del transcurso de los años (ver Figura 35).

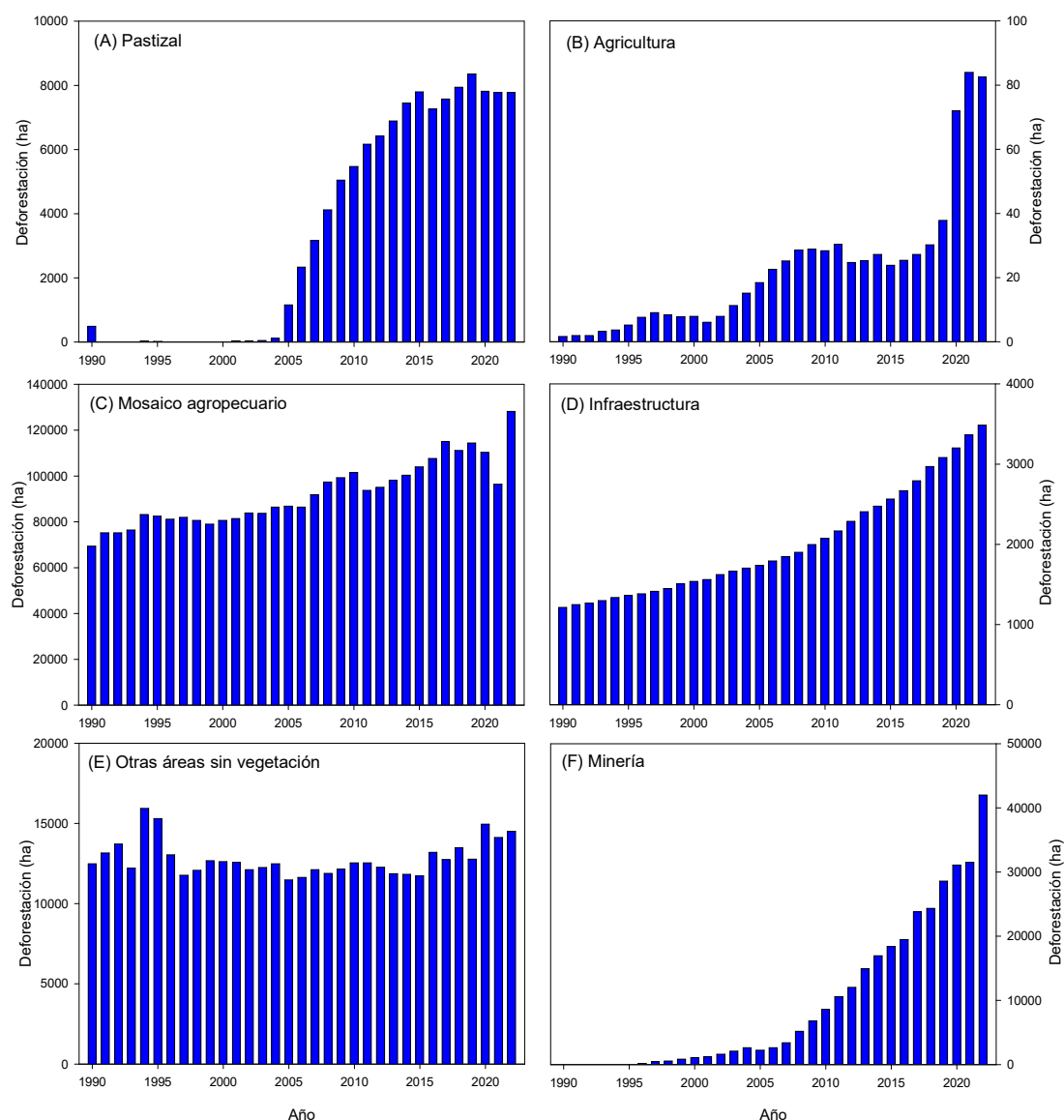
Tabla 15. Cobertura y uso de suelo durante el periodo 1990-2022 (ha)

Año	Cobertura y uso										Deforestación Acumulada
	Bosque	Bosque inundable	Agua	Zona pantanosa	Pasto	Agricultura	Mosaico agropecuario	Infraestructura	Otra área sin vegetación	Minería	
1990	2,879,582	577,490	42,875	15,372	487	2	69,399	1,213	12,459	12	83,570
1991	2,875,723	574,975	41,619	16,942	9	2	75,212	1,247	13,150	8	89,629
1992	2,875,757	575,348	40,554	17,053	11	2	75,193	1,267	13,703	9	90,185
1993	2,874,841	576,593	41,549	15,979	7	3	76,412	1,298	12,193	9	89,922
1994	2,870,090	569,106	40,916	18,395	17	4	83,100	1,336	15,919	13	100,388
1995	2,869,260	572,322	42,179	16,015	17	5	82,381	1,361	15,292	53	99,109
1996	2,871,856	569,506	42,318	19,552	7	8	81,073	1,383	13,025	152	95,648
1997	2,870,927	572,735	43,371	16,278	5	9	81,960	1,413	11,751	436	95,575
1998	2,870,494	573,785	42,699	17,207	7	8	80,623	1,448	12,073	535	94,694
1999	2,870,662	572,528	43,004	18,687	9	8	78,990	1,504	12,660	829	94,001
2000	2,869,183	573,934	43,516	16,468	6	8	80,570	1,537	12,598	1,062	95,782
2001	2,867,282	571,063	45,490	18,237	29	6	81,431	1,561	12,566	1,212	96,805
2002	2,866,527	571,781	44,658	16,720	29	8	83,857	1,622	12,101	1,576	99,194
2003	2,864,983	572,927	45,284	15,995	42	11	83,688	1,664	12,232	2,050	99,688
2004	2,862,932	569,789	44,965	17,977	110	15	86,311	1,705	12,482	2,600	103,222
2005	2,861,982	571,684	44,254	17,558	1,150	18	86,816	1,737	11,471	2,212	103,405
2006	2,860,099	570,449	44,496	18,991	2,314	23	86,464	1,790	11,624	2,621	104,835
2007	2,855,700	568,586	45,300	16,992	3,160	25	91,781	1,844	12,109	3,387	112,306
2008	2,849,479	563,557	47,840	17,591	4,115	29	97,364	1,900	11,870	5,139	120,416
2009	2,846,565	559,980	46,592	20,532	5,032	29	99,259	1,997	12,134	6,755	125,205
2010	2,843,201	555,880	45,833	23,795	5,409	28	101,510	2,073	12,521	8,575	130,117
2011	2,845,913	565,118	47,234	15,427	6,149	30	93,725	2,166	12,523	10,582	125,177
2012	2,842,874	562,609	49,639	15,748	6,414	25	95,017	2,286	12,249	12,020	128,011
2013	2,840,697	557,133	48,599	18,267	6,884	25	98,123	2,406	11,842	14,907	134,186
2014	2,835,649	549,941	52,777	21,514	7,439	27	100,289	2,474	11,822	16,943	138,994
2015	2,832,874	548,010	53,390	20,264	7,791	24	103,878	2,562	11,717	18,369	144,341
2016	2,829,521	548,861	52,351	18,016	7,254	25	107,534	2,666	13,194	19,462	150,133
2017	2,822,582	542,610	52,182	19,634	7,573	27	114,981	2,793	12,746	23,755	161,876
2018	2,821,970	547,597	52,128	17,420	7,941	30	111,058	2,970	13,471	24,300	159,770
2019	2,818,071	540,597	55,843	17,236	8,341	38	114,329	3,083	12,761	28,573	167,125
2020	2,827,443	532,294	50,329	21,409	7,813	72	110,309	3,200	14,936	31,080	167,410
2021	2,842,410	535,731	52,436	15,082	7,780	84	96,393	3,361	14,108	31,496	153,223
2022	2,812,442	521,233	54,375	14,848	7,781	83	128,180	3,485	14,497	41,955	195,981

En la Figura 35, se muestra la deforestación (perdida de bosque) acumulada a lo largo del periodo 1990-2022. Donde en (A) se muestra una expansión de pastizales y especialmente a partir del 2004; entre 1991 y 2003, la deforestación por pastizal es bajo, lo que indicaría un cambio de uso de suelo casi ausente durante esos años; 2004-2010 se observa una fase de rápido crecimiento y entre 2020-2022 una leve reducción. (B) muestra un aumento progresivo de la deforestación causada por la agricultura entre 1990 – 2022, también se acelera notablemente a partir del 2014 pero más un entre 2018 y 2021 lo cual reflejaría la intensificación del cambio de uso de suelo y la pérdida de bosque. (C) muestra una aceleración marcada durante todo el periodo.

En (D) se observa un incremento continuo y sostenido de la superficie deforestada por infraestructura a lo largo de los 33 años; a partir del 201 la pendiente se vuelve más pronunciada; este patrón está relacionado con la construcción de vías de acceso y la urbanización acelerada. (E) otras áreas sin vegetación. (F) muestra la deforestación por minería con una tendencia exponencial (acelerada y continua) durante el tiempo; en los primeros 15 años, los valores son bajos y el crecimiento lento; a partir del 2006 se observa una aceleración marcada en la deforestación.

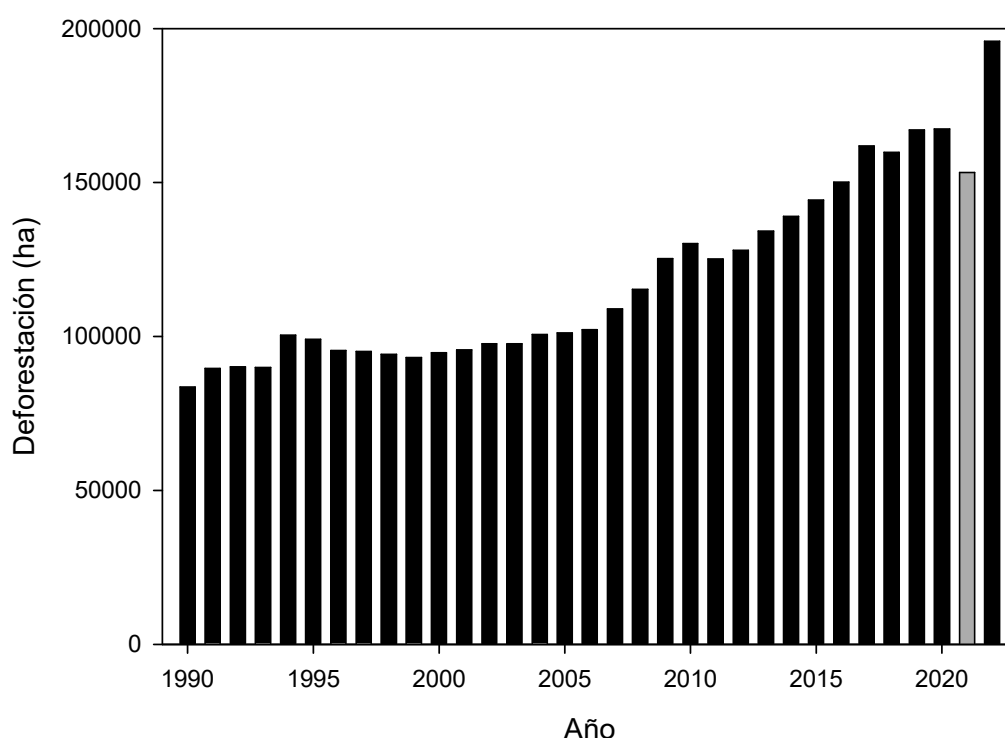
Figura 35. Uso de suelo (ha) en la provincia de Tambopata



La Figura 36 se muestra la deforestación acumulada anual del periodo 1990-2022. Entre 1990 y 2007 el aumento es moderado, pero a partir del 2008 se acelera, alcanzando su máximo histórico en 2022 con más de 195,980 ha deforestadas acumuladas. A partir de 1990-2005 la deforestación acumulada crece de forma lenta y estable. Entre 2006-2015 se intensifica la deforestación, en la que se consolidan múltiples motores de cambio (agricultura, ganadería, minería). Para el 2016 – 2022

se muestra una aceleración con mayor incremento lo que indica la pérdida de cobertura de bosque. Sin embargo, se puede observar que, en el 2020 la deforestación se habría reducido lo que estaría relacionado al proceso del COVID 19.

Figura 36. Evolución de la deforestación acumulada en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022.



b. Tasa de pérdida de bosque (deforestación)

En la Tabla 16, se muestra la tasa y porcentaje de pérdida de bosque (deforestación) anual promedio en la provincia de Tambopata. La tasa de pérdida relacionada con la agricultura y minería aurífera ha variado desde un mínimo de 1.01 km² /año (0.00%) en 1994-1998 a un máximo de -42.25 km² /año (-0.15%) en 2006-2010 (Tabla 16). Los resultados señalan una tasa de anual de cambio (q) de -0.08 (23.73 km² /año) para el periodo 1990-1994 y -0.03% (9.92 km² /año) para el periodo 1998-2002.

Durante el periodo 2018-2022 la deforestación total anual promedio fue de 34.20 km² /año (-0.12%). El análisis multitemporal de los periodos 2006-2010 muestra una tasa anual de deforestación de -0.15% (-42.25 km² /año) siendo superior a los primeros periodos 1990-1994, 1994-1998, 1998-2002, 2002-2006. Las mayores tasas de deforestación se registraron en el periodo 2014-2018 y 2006-2010, esto debido a la fuerte presión a los bosques por la agricultura y la minería aurífera.

Tabla 16. Tasa y porcentaje de pérdida de bosque (deforestación) anual promedio en la provincia de Tambopata

Periodos	Deforestación total anual promedio (Km ²) (r)	Tasa anual de deforestación (%) (q)
1990-1994	-23.73	-0.08
1994-1998	1.01	0.00
1998-2002	-9.92	-0.03
2002-2006	-16.07	-0.06
2006-2010	-42.25	-0.15
2010-2014	-18.88	-0.07
2014-2018	-34.20	-0.12
2018-2022	-23.82	-0.08

c. Deforestación anual o pérdida de bosque

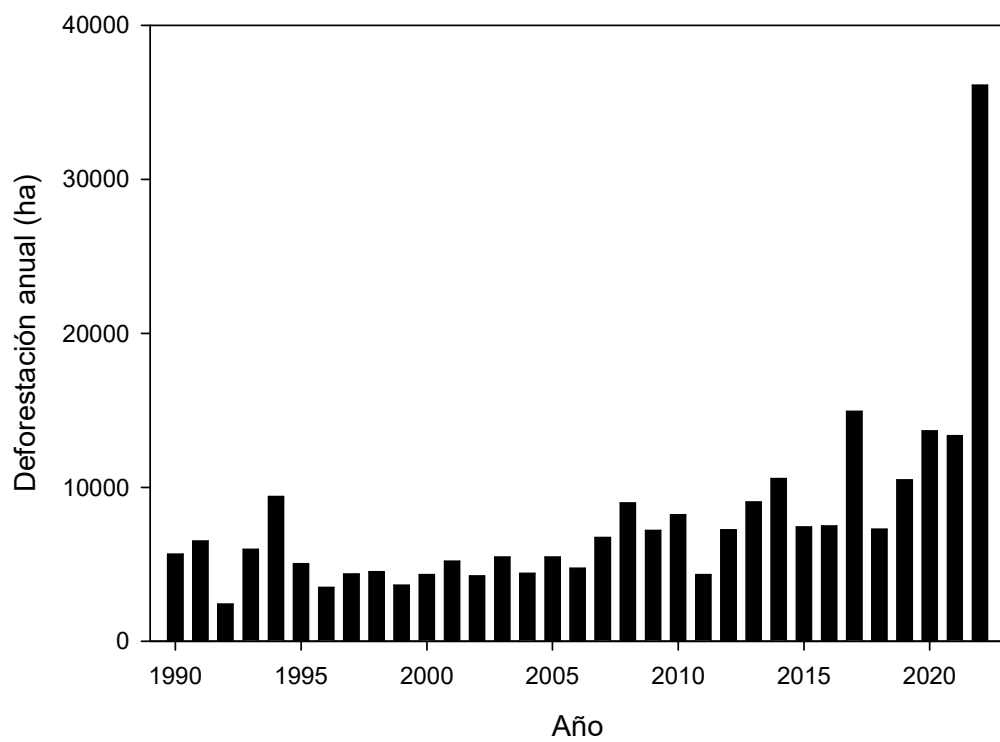
En la Tabla 17 se observa la deforestación anual a lo largo del periodo 1990-2022. Desde 1990 – 2022 (33 años) se perdieron 258,025.81 ha de bosques debido a las diversas actividades (agricultura, minería, infraestructura urbana). En los últimos 15 años del 2008-2022, se perdieron 166,365.33 ha de bosque, y en el periodo anterior 1990-2007 se perdieron 91,660.48 ha de bosque con una diferencia de 74,704.85 ha. En 2022 se observa mayor deforestación (36,123.82 ha) en comparación los primeros años, asimismo los años con mayor deforestación fue el 2017 (14,946.91 ha), 2020 (13,662.64 ha) y 2021 (13,355.07 ha) respectivamente. Los periodos marcados de mayor pérdida de bosque fueron: 2022, 2017, 2020, 2021, 2014 y 2019. Finalmente,

los datos estadísticos de deforestación anual se emplearon para el análisis de correlación entre la deforestación y la variabilidad climática (precipitación y temperatura) (Figura 37).

Tabla 17. Deforestación anual en la provincial de Tambopata durante 33 años

Año	deforestación
1990	5,664.97
1991	6,513.24
1992	2,409.23
1993	5,969.88
1994	9,403.85
1995	5,037.59
1996	3,497.03
1997	4,373.02
1998	4,507.85
1999	3,650.12
2000	4,328.53
2001	5,209.89
2002	4,240.61
2003	5,472.24
2004	4,417.67
2005	5,472.24
2006	4,741.83
2007	6,750.72
2008	8,994.24
2009	7,191.78
2010	8,211.39
2011	4,326.11
2012	7,251.71
2013	9,063.50
2014	10,574.59
2015	7,427.49
2016	7,485.76
2017	14,946.91
2018	7,272.89
2019	10,477.44
2020	13,662.64
2021	13,355.07
2022	36,123.82

Figura 37. Deforestación anual en la provincial de Tambopata durante 33 años



4.1.1.5. Relación entre deforestación y la variabilidad climática (precipitación y temperatura 1990-2022).

En la Figura 38 se muestra los resultados del análisis de correlación de Spearman y se observa que, existe una relación positiva y significativa entre la deforestación acumulada y la temperatura media, mínima anual ($p < 0.05$). Por otro lado, no se encontró correlaciones significativas entre la deforestación acumulada y la precipitación ($p > 0.05$). Asimismo, el análisis de correlación de Spearman de la deforestación anual entre la temperatura media y media mostró una relación positiva y significativa ($p < 0.05$). Por otro lado, no se encontró correlaciones significativas de la deforestación entre la precipitación y temperatura máxima ($p > 0.05$) Figura 39.

Figura 38. Correlación de la deforestación acumulada entre la temperatura durante 1990-2022

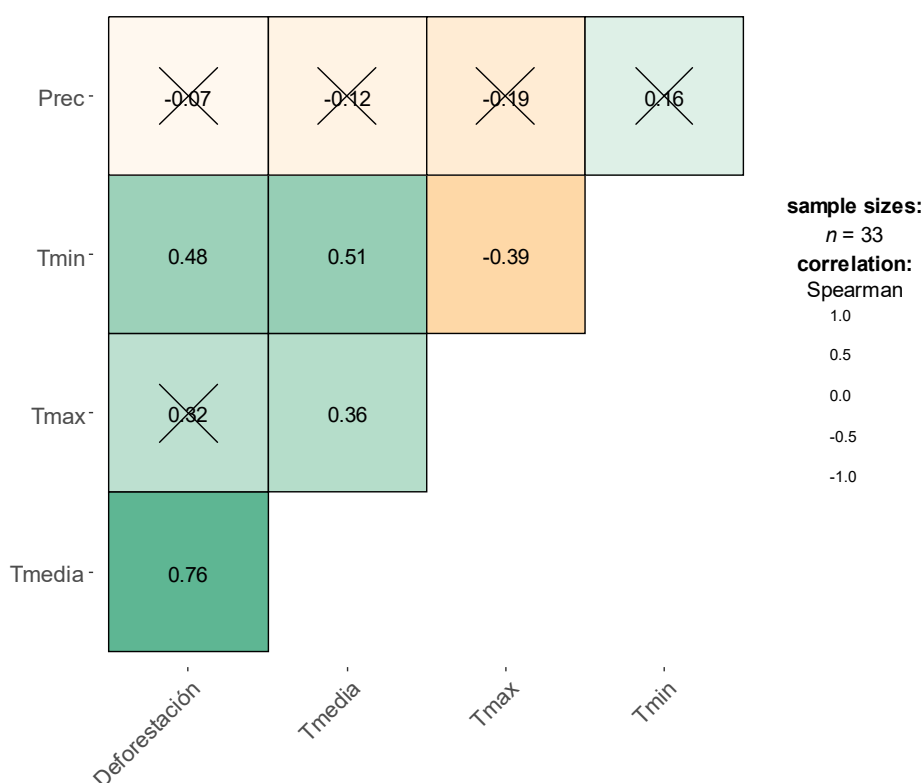
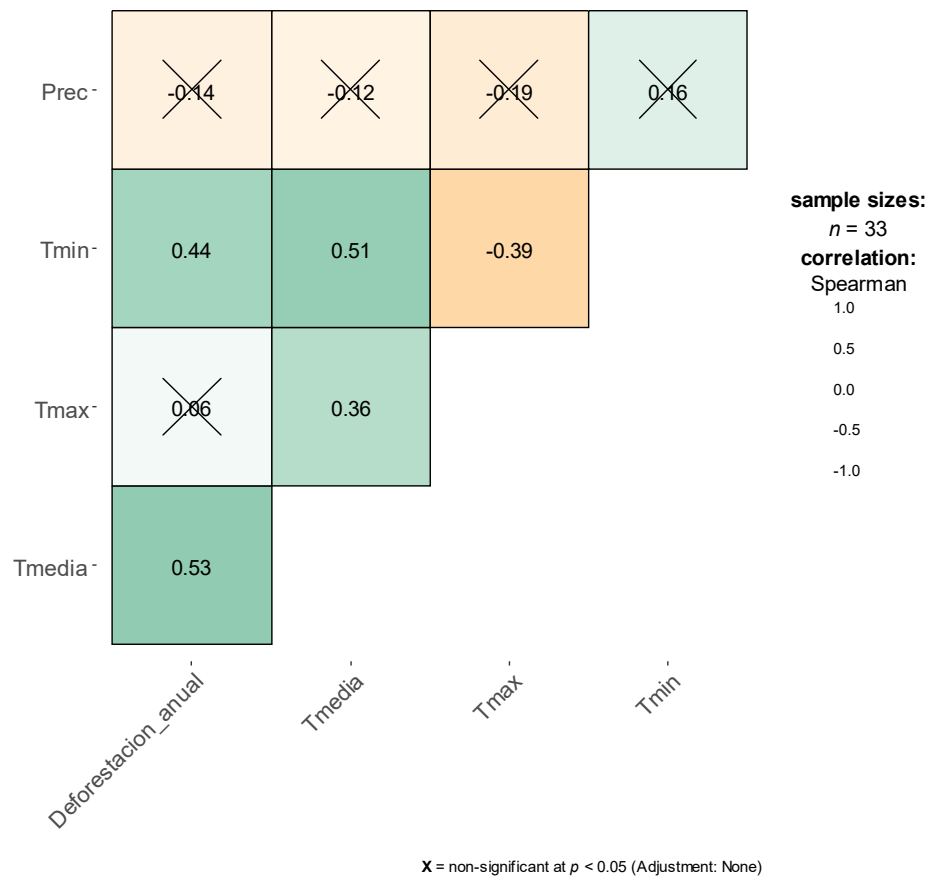


Figura 39. Correlación de la deforestación anual entre precipitación y temperatura 1990-2022.



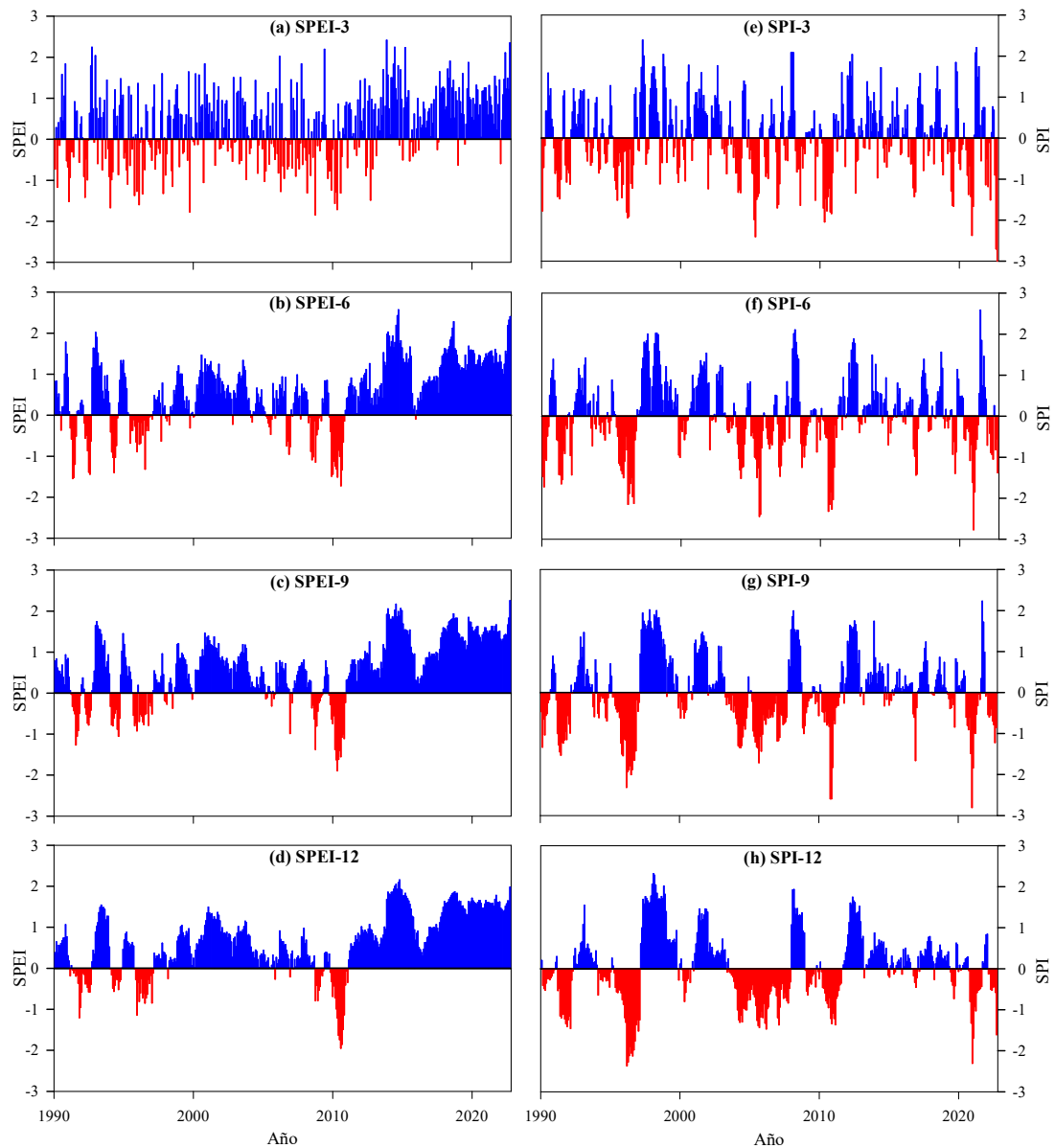
En ambos casos de la Figura 38 y Figura 39 el análisis de correlación de Spearman describe el grado de compacidad analizando la magnitud de la relación lineal entre dos variables. Un valor absoluto del coeficiente de correlación cercano a uno indica una fuerte correlación entre las dos variables, mientras que un valor del coeficiente de correlación cercano a cero muestra una correlación débil. Un coeficiente de correlación igual a cero indica que no existe ninguna relación lineal (L. Wang et al., 2021). Los resultados sugieren que a medida que aumente la deforestación anual en la provincia de Tambopata se espera un incremento en la temperatura.

4.1.2. Determinar la relación entre la deforestación y los índices de sequía de SPI y SPEI en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022.

4.1.2.1. Caracterización de los índices de sequía (SPI, SPEI)

En la Figura 40, se muestran la variación del SPI/SPEI categorizados en cuatro escalas temporales (3, 6, 9 y 12 meses) durante 1990-2022. En la figura, el color rojo representa períodos secos y el azul indica condiciones húmedas para la provincia de Tambopata. Se observó que el SPI es más sensible a detectar eventos de sequía que el SPEI, ya que en los últimos años (2010-2022) se observan más registros de sequías en el SPI.

Figura 40. Evaluación de la sequía en SPI y SPEI en diferentes escalas de tiempo.



Nota. (a-e) escala temporal de 3 meses; (b-f) escala temporal de 6 meses (c-g); escala temporal de 9 meses (d-h) escala temporal de 12 meses.

La Tabla 18 muestra los eventos/episodios de sequías según el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) en cuatro escalas temporales: SPI-3, SPI-6, SPI-9 y SPI-12, clasificando la severidad en: leve, moderado, severo y extremo. Para las escalas (3, 6, 9 y 12 meses) se predominan los eventos de sequía leve y seguido por eventos moderados. La mayor cantidad ocurre en SPI-12 (148 eventos), seguido por SPI-9

(147 eventos), lo que indicaría que, a medida que se amplía el periodo de análisis, es más común registrar déficit hídricos leves y persistentes.

Las sequias severas, se mantienen muy similares en SPI-3 (13 eventos) y SPI-9 (13 eventos), pero estas disminuyen a 6 eventos en SPI-12. Este resultado nos daría a conocer que las sequias severas tienden a manifestarse en escalas más cortas. Finalmente, las sequias extremas, son menos frecuentes, pero se presentan en todas las escalas. El mayor pico se presenta en SPI-6 (10 eventos), lo que indicaría que a escala semestral pueden identificarse crisis hídricas.

En sequias moderadas de SPI-12 muestra la mayor frecuencia (38 eventos) y también indicaría la mayor acumulación de déficit en periodos prolongados. Las sequias moderadas, aumentan progresivamente con el incremento del periodo SPI. Asimismo, aumentan progresivamente con el incremento del periodo.

Las sequias extremas en el SPI-3 se presentó en 2005, 2010, 2021 y 2022. En SPI-3 fueron los años 1996, 2005, 2010, 2021 y 2022, mientras en el SPI-9 ocurrieron en 1996, 2010, 2021 y 2022. Finalmente, en el SPI-12 fueron en los años 1996, 2021 y 2022. Este patrón evidencia que los años 2021 y 2022 concentran sequias extremas en todas las escalas SPI. Asimismo, los años como 2010 y 1996 también presentaron sequias.

Tabla 18. Número de eventos/episodios según SPI en diferentes escalas de tiempo.

Año	SPI-3					SPI-6					SPI-9					SPI-12				
	Lev	Mod	Sev	Ext	Σ	Lev	Mod	Sev	Ext	Σ	Lev	Mod	Sev	Ext	Σ	Lev	Mod	Sev	Ext	Σ
1990	4		1		5	3	2	1		6	5	2			7	11				11
1991	5	5			10	6	2	2		10	4	7	1		12	2	9			11
1992		1			1	1	1			2	2				2	2	1			3
1993	7				7	4				4	2				2					0
1994	7				7	10				10	10				10	12				12
1995	5	4	1		10	3	5	1		9	7	2	2		11	9	1			10
1996	4	2	3		9	3	1	3	2	9	2	2	6	2	12		3	4	5	12
1997	4				4					0	1				1		1			1
1998	2	1			3					0					0					0
1999	6	1			7	2	1			3	3				3	2				2
2000	5	1			6	6				6	9				9	10				10
2001					0					0					0					0
2002	2	1			3	4				4	1				1					0
2003	8				8	8				8	9				9	7				7
2004	4	3			7	3	4	1		8	6	5			11	6	6			12
2005	4	3	1	1	9	6	3		2	11	3	7	1		11	6	6			12
2006	6				6	8				8	12				12	10	2			12
2007	3	1	2		6	4	3			7	6	3			9	10	2			12
2008	7		1		8	4	1			5	1	1			2					0
2009	4		1		5	7				7	9				9	11				11
2010	2	3	4	1	10	6		1	4	11	8			2	10	9	2			11
2011	4				4	5	1			6	7		1		8	5	3			8
2012	2	1			3	3				3					0					0
2013	3				3	2				2	3				3	2				2
2014	5				5	2				2	2				2					0
2015	3				3	5				5	4				4	4				4
2016	5	2			7	4	1			5	2				2	4				4
2017	3	1			4	3	1			4	1		1		2	3				3
2018	3				3	4				4	2				2	1				1
2019	5	1	2		8	7	1			8	7				7	5				5
2020	7	1			8	6	1			7	4				4	4				4
2021	1	2	1	1	5	3		2	1	6	6	1	1	1	9	6	2	1	1	10
2022	3	2	1	2	8	7	2		1	10	9	1		1	11	7		1	1	9

* Lev: Sequía leve; Mod: Sequía moderada; Sev: Sequía severa; Ext: Sequía extrema.

En la Tabla 19, se observa las características de las sequías en intensidad máxima y severidad en SPI durante 1990-2022 en 4 escalas. En el año 1995 se registró sequías severas SPI-3 y SPI-6; sequías moderas en SPI-9 y SPI-12. En 1996 fueron sequías severas en SPI-3, en SPI-6, SPI-9 y SPI-12, fueron extremadamente secos y de más larga duración durante el periodo 1990-2022.

En el año 2005, se registraron sequías extremas en SPI-3 y SPI-6. Severas en SPI-9 y SPI-12. También en el 2010 en SPI-3, SPI-6 y SPI-9 se registraron sequías extremas. Asimismo, en 2021 y 2022 se registraron sequías extremas en las cuatro escalas (SPI-

3, SPI-6, SPI-6, SPI-12). El 2022 es el año con la sequía más intensa del periodo de todas las escalas, siendo también de más larga duración.

Tabla 19. Intensidad máxima y severidad de sequía de SPI en diferentes escalas de tiempo.

Año	SPI-3		SPI-6		SPI-9		SPI-12	
	Intensidad máxima	Severidad	Intensidad máxima	Severidad	Intensidad máxima	Severidad	Intensidad máxima	Severidad
1990	-1.77	1.77	-1.72	3.82	-1.33	2.37	-0.52	-
1991	-1.48	6.03	-1.65	6.05	-1.53	10.03	-1.41	10.96
1992	-1.12	1.12	-1.43	1.43	-0.99	-	-1.46	1.46
1993	-0.66	-	-0.72	-	-0.59	-	0.08	-
1994	-0.85	-	-0.58	-	-0.69	-	-0.64	-
1995	-1.51	6.37	-1.50	7.66	-1.54	5.41	-1.19	1.19
1996	-1.94	7.98	-2.15	11.25	-2.32	17.69	-2.37	22.03
1997	-0.64	-	0.12	-	-0.23	-	-1.25	1.25
1998	-1.12	1.12	0.09	-	0.80	-	1.39	-
1999	-1.08	1.08	-1.01	1.01	-0.37	-	-0.28	-
2000	-1.04	1.04	-0.57	-	-0.63	-	-0.80	-
2001	0.55	-	0.71	-	0.95	-	0.37	-
2002	-1.23	1.23	-0.82	-	-0.06	-	0.26	-
2003	-0.87	-	-0.40	-	-0.48	-	-0.47	-
2004	-1.33	3.90	-1.52	6.33	-1.35	6.35	-1.31	6.99
2005	-2.40	8.65	-2.45	8.63	-1.72	10.19	-1.44	7.49
2006	-0.98	-	-0.79	-	-0.78	-	-1.47	2.80
2007	-1.70	4.43	-1.46	3.90	-1.18	3.45	-1.37	-0.18
2008	-1.64	1.64	-1.25	1.25	-1.00	1.00	0.88	-
2009	-1.51	1.51	-0.87	-	-0.81	-	-0.64	-
2010	-2.05	13.27	-2.32	10.62	-2.59	5.19	-1.34	2.55
2011	-0.84	-	-1.24	1.24	-1.83	1.83	-1.37	3.67
2012	-1.34	1.34	-0.40	-	0.36	-	0.53	-
2013	-0.27	-	-0.20	-	-0.30	-	-0.22	-
2014	-0.97	-	-0.70	-	-0.33	-	0.12	-
2015	-0.40	-	-0.41	-	-0.30	-	-0.21	-
2016	-1.42	2.63	-1.44	1.44	-0.61	-	-0.34	-
2017	-1.31	1.31	-1.41	1.41	-1.66	1.66	-0.45	-
2018	-0.62	-	-0.32	-	-0.06	-	-0.26	-
2019	-1.66	4.59	-1.39	1.39	-0.84	-	-0.73	-
2020	-1.37	1.37	-1.08	1.08	-0.91	-	-0.80	-
2021	-2.37	5.46	-2.77	6.24	-2.81	6.14	-2.31	6.35
2022	-3.90	10.43	-3.04	-	-3.07	4.29	-2.11	3.73

En la Tabla 20, se observa la frecuencia de las sequías de SPI por escalas durante 1990-2022, donde en SPI-3 es la escala que presenta mayor número total de eventos de sequías (21). En SPI-6 se registró 18 eventos, donde también se registraron eventos extremos (5). SPI-9 y SPEI-12 registran menor frecuencia, pero mayor persistencia.

Tabla 20. Frecuencia de sequias-SPI por escala de tiempo durante 1990-2022

Categoría de sequia	SPI-3	SPI-6	SPI-9	SPI-12
Moderadamente seco	10	9	4	10
Severamente seco	7	4	5	
Extremadamente seco	4	5	4	2
Total	21	18	13	12

En la Tabla 21, se muestra los eventos/episodios de sequías según el índice estandarizado de precipitación (SPEI) en cuatro escalas temporales: SPI-3, SPI-6, SPI-9 y SPI-12, clasificando la severidad en: leve, moderado, severo y extremo.

Las sequias leves, son las más frecuente en todas las escalas en SPEI-3 (121 eventos). Esta frecuencia disminuye a medida que se amplía el periodo de análisis (de 121 en SPEI-3 a 66 en SPEI-12). Las sequias moderadas presentan una cantidad bastante baja pero que estas se encuentran distribuidas en todas las escalas. En SPEI-6 se encontró la mayor cantidad (17 eventos), lo que también indicaría que en periodos semestrales pueden concentrar sequias de impacto moderado.

Las sequias severas, son poco frecuentes. Se encontró 7 eventos en SPEI-3 y 4 en SPEI-6 y SPEI-9, siendo ausentes en SPEI-12.

Finalmente las sequias extremas no registraron eventos en ninguna escala y esto indicaría que no se han presentado déficit hídricos extremos en el periodo analizado.

Tabla 21. Número de eventos/episodios según SPEI en diferentes escalas de tiempo.

Año	SPEI-3					SPEI-6					SPEI-9					SPEI-12				
	Lev	Mod	Sev	Ext	Σ	Lev	Mod	Sev	Ext	Σ	Lev	Mod	Sev	Ext	Σ	Lev	Mod	Sev	Ext	Σ
1990	4	1			5	1				1					0					0
1991	5		1		6	3	1	2		6	7	2			9	9	1			10
1992	6	1			7	5	2			7	6				6	8				8
1993	5				5					0					0					0
1994	3		1		4	4	3			7	8	1			9	10				10
1995	5	3			8	7				7	4				4	2	1			3
1996	6	1	1		8	11	1			12	11				11	12				12
1997	6	1			7	2				2	2				2	2				2
1998	3	1			4	4				4	3				3	2				2
1999	4		1		5	1				1	1				1					0
2000	3	1			4	2				2					0					0
2001	2				2					0					0					0
2002	5				5	1				1					0					0
2003	5				5					0					0					0
2004	4				4	2				2					0					0
2005	6	1			7	7				7	5				5	2				2
2006	7	1			8	3				3					0					0
2007	7				7	3				3	2				2	2				2
2008	5	1	1		7	5	3			8	4	1			5	2				2
2009	7				7	6				6	7				7	7				7
2010	2	3	2		7	3	7	2		12	7	5			12	5	3	4		12
2011	3				3					0	1				1	3				3
2012	3	1			4					0					0					0
2013	3				3					0					0					0
2014	1				1					0					0					0
2015	4				4					0					0					0
2016	2				2	1				1					0					0
2017	2				2					0					0					0
2018					0					0					0					0
2019	2				2					0					0					0
2020					0					0					0					0
2021					0					0					0					0
2022	1				1					0					0					0

* Lev: Sequía leve; Mod: Sequía moderada; Sev: Sequía severa; Ext: Sequía extrema.

En la Tabla 22, se observa las características de las sequías en intensidad máxima y severidad en SPEI durante 1990-2022 en 4 escalas. En SPEI-3 los años con mayor intensidad de sequías fueron: 1991, 1992, 1994, 1996, 1999, 2008, 2010 y 2012. Siendo el 2008 con el valor más bajo (-1.85). El valor más alto de severidad se registra en el año 2010 con 7.12 indicando una sequía prolongada e intensa del periodo 1990-2022. Los otros años con severidades elevadas son: 1996 (3.73), 2008 (3.16), 1995 (2.93) y 1997 (1.32). La mayor duración de SPEI-3 se dio en el año 2010.

En SPEI-6, SPEI-9 y SPEI-12, intensidad y severidad se presenta más fuerte en el año 2010 y duraciones largas durante el periodo 1990-2022.

Tabla 22. Intensidad máxima y severidad de sequía de SPEI en diferentes escalas de tiempo.

Año	SPEI-3		SPEI-6		SPEI-9		SPEI-12	
	Intensidad máxima	Severidad	Intensidad máxima	Severidad	Intensidad máxima	Severidad	Intensidad máxima	Severidad
1990	-1.17	1.17	-0.36	-	-	-	-	-
1991	-1.52	1.52	-1.55	4.27	-1.27	2.32	-1.21	1.21
1992	-1.41	1.41	-1.44	2.83	-0.78	-	-0.58	-
1993	-0.91	-	-	-	-	-	-	-
1994	-1.67	1.67	-1.40	3.46	-1.06	1.06	-0.56	-
1995	-1.37	3.73	-0.89	-	-0.92	-	-1.14	1.14
1996	-1.60	2.93	-1.32	1.32	-0.79	-	-0.85	-
1997	-1.32	1.32	-0.63	-	-0.51	-	-0.85	-
1998	-1.15	1.15	-0.24	-	-0.37	-	-0.25	-
1999	-1.77	1.77	-0.31	-	-0.15	-	-	-
2000	-1.06	1.06	-0.04	-	-	-	-	-
2001	-0.64	-	-	-	-	-	-	-
2002	-0.54	-	-0.22	-	-	-	-	-
2003	-0.98	-	-	-	-	-	-	-
2004	-0.83	-	-0.17	-	-	-	-	-
2005	-1.03	1.03	-0.47	-	-0.31	-	-0.27	-
2006	-1.27	1.27	-0.95	-	-	-	-	-
2007	-0.90	-	-0.77	-	-0.99	-	-0.21	-
2008	-1.85	3.16	-1.15	3.25	-1.38	1.38	-0.79	-
2009	-0.95	-	-0.40	-	-0.44	-	-0.79	-
2010	-1.71	7.12	-1.72	12.16	-1.90	12.67	-1.95	11.02
2011	-0.69	-	-	-	-0.23	-	-0.41	-
2012	-1.48	1.48	-	-	-	-	-	-
2013	-0.72	-	-	-	-	-	-	-
2014	-0.14	-	-	-	-	-	-	-
2015	-0.53	-	-	-	-	-	-	-
2016	-0.33	-	-0.09	-	-	-	-	-
2017	-0.25	-	-	-	-	-	-	-
2018	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	-0.63	-	-	-	-	-	-	-
2020	-	-	-	-	-	-	-	-
2021	-	-	-	-	-	-	-	-
2022	-0.59	-	-	-	-	-	-	-

En la Tabla 23 se muestra la frecuencia de sequías-SPEI por escalas temporales durante 1990-2022. Los eventos de sequía se detectan con menos frecuencia utilizando el SPEI en comparación con el SPI. La mayor cantidad de eventos se registró en SPEI-3 con un total de 15 eventos durante el periodo 1990-2022.

Tabla 23. Frecuencia de sequías-SPEI por escala de tiempo durante 1990-2022

Categoría de sequia	SPEI-3	SPEI-6	SPEI-9	SPEI-12
Moderadamente seco	9	4	3	2
Severamente seco	6	2	1	1
Extremadamente seco	0	0	0	0
Total	15	6	4	3

4.1.2.2. Determinación de las tendencias de índices de sequías SPI y SPEI

En la Tabla 24 se muestra las tendencias de SPI por escala de tiempo (3, 6, 9, 12 meses) para el periodo 1990-2022. En los resultados se observan que en SPI en las diferentes escalas no se encontró ninguna tendencia a un nivel de significancia estadística ($p > 0.05$). Asimismo, con el estimador de pendiente y punto de cambio no se encontraron tendencias significativas.

Tabla 24. Análisis de tendencias de SPI durante 1990-2022

Sequía SPI - 3 meses				Sequía SPI - 6 meses			
Mes	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator	Mes	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator
ENE	0.335ns	1987	0.006	ENE	1.277ns	2013	0.016
FEB	1.381ns	2006	0.02	FEB	1.256ns	2011	0.013
MAR	1.088ns	1996	0.014	MAR	1.591ns	2011	0.017
ABR	0.858ns	2014	0.01	ABR	1.905ns	2010	0.02
MAY	0.942ns	2010	0.011	MAY	2.177ns	2010	0.026
JUN	3.223ns	1999	0.037	JUN	2.114ns	2010	0.024
JUL	2.616ns	1988	0.038	JUL	2.700ns	2010	0.03
AGO	2.554ns	2012	0.028	AGO	3.265ns	2011	0.036
SEP	-0.167ns	2003	-0.002	SEP	3.244ns	2013	0.032
OCT	0.272ns	2010	0.004	OCT	2.198ns	2011	0.027
NOV	-0.021ns	2013	-0.001	NOV	1.570ns	2012	0.019
DIC	2.595ns	2010	0.03	DIC	1.905ns	2012	0.0199
Sequía SPI - 9 meses				Sequía SPI - 12 meses			
Mes	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator	Mes	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator
ENE	0.303ns	2010	0.004	ENE	1.947ns	2012	0.023
FEB	0.542ns	1995	0.007	FEB	1.633ns	2013	0.018
MAR	0.759ns	1995	0.008	MAR	1.926ns	2011	0.021
ABR	0.434ns	1995	0.004	ABR	2.156ns	2011	0.023
MAY	0.368ns	1995	0.005	MAY	2.156ns	2011	0.023
JUN	0.455ns	2010	0.004	JUN	1.968ns	2011	0.021
JUL	0.694ns	2006	0.006	JUL	2.051ns	2011	0.022
AGO	0.737ns	1995	0.008	AGO	2.093ns	2011	0.024
SEP	-0.477ns	2006	-0.006	SEP	2.323ns	2011	0.024
OCT	-0.087ns	1995	-0.002	OCT	2.365ns	2010	0.025
NOV	-0.824ns	2001	-0.01	NOV	2.177ns	2010	0.025
DIC	-0.477ns	2001	-0.006	DIC	2.282ns	2010	0.026

ns = no significativo a un 5% de probabilidad de error (enero a diciembre)

En la Tabla 25, se muestra las tendencias de SPEI por escala de tiempo (3, 6, 9, 12 meses). El índice SPEI-3 en enero, febrero, marzo, junio y diciembre mostraron

tendencias estadísticamente significativas. Marzo y diciembre fueron los de mayor grado de magnitud. El punto de cambio fue en 2013, 2006 y 2010. En el SPEI-6, se encontró tendencias en los meses de febrero (0.043), marzo y abril (0.048), mayo (0.055), junio (0.061), julio (0.048), agosto (0.042) y septiembre (0.032). Para SPEI-6 se observó tendencias de febrero a septiembre en los años 2010, 2011 y 2013. El SPEI-9 y 12 meses muestra tendencias positivas en todos los meses. El SPEI a 9 meses mostró la mayor magnitud en agosto (0.058), mientras que el SPEI a 12 meses se encontró en el mes de diciembre (0.051).

Tabla 25. Análisis de tendencias de SPEI durante 1990-2022

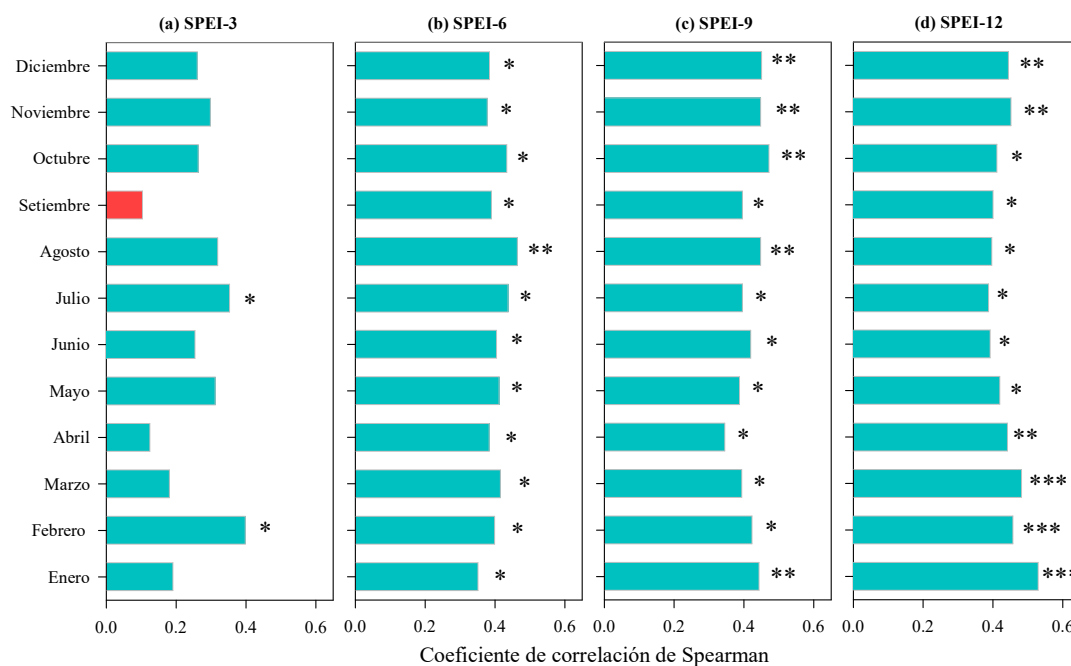
Sequía SPEI - 3 meses				Sequía SPEI - 6 meses			
Mes	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator	Mes	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator
ENE	2.836*	2013*	0.054	ENE	1.937	2013	0.028
FEB	3.920*	2006*	0.057	FEB	2.712*	2011*	0.043*
MAR	1.999*	1996	0.034*	MAR	3.114*	2011*	0.048*
ABR	1.193	2014	0.021*	ABR	3.486*	2010*	0.048*
MAY	1.813	2010	0.025*	MAY	3.920*	2010*	0.055*
JUN	2.495*	2010*	0.034*	JUN	4.292*	2010*	0.061*
JUL	0.945	2013	0.018*	JUL	4.044*	2010*	0.048*
AGO	1.72	2012	0.029*	AGO	3.517*	2011*	0.042*
SEP	-0.759	2000	-0.008*	SEP	2.433*	2013*	0.032*
OCT	0.356	2010	0.007*	OCT	1.565	2011	0.027
NOV	1.255	2013	0.028*	NOV	1.379	2012	0.029
DIC	2.309*	2010	0.039*	DIC	1.751	2012	0.031
Sequía SPEI - 9 meses				Sequía SPEI - 12 meses			
Mes	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator	Mes	Mann–Kendall Test (Z)	Pettit's test (U)	Sen's slope estimator
ENE	2.340*	2012*	0.035*	ENE	2.959*	2013*	0.040*
FEB	2.495*	2011*	0.042*	FEB	3.114*	2011*	0.045*
MAR	2.681*	2011*	0.040*	MAR	3.021*	2011*	0.045*
ABR	2.650*	2011*	0.041*	ABR	3.145*	2011*	0.042*
MAY	2.712*	2011*	0.040*	MAY	2.990*	2011*	0.042*
JUN	3.269*	2010*	0.047*	JUN	2.898*	2011*	0.042*
JUL	3.517*	2010*	0.055*	JUL	2.867*	2011*	0.041*
AGO	4.013*	2010*	0.058*	AGO	2.898*	2011*	0.042*
SEP	4.137*	2010*	0.052*	SEP	3.114*	2011*	0.041*
OCT	3.083*	2011*	0.040*	OCT	3.300*	2010*	0.044*
NOV	2.495*	2012*	0.037*	NOV	3.300*	2010*	0.048*
DIC	2.495*	2012*	0.036*	DIC	3.641*	2010*	0.051*

4.1.2.3. Relación entre la deforestación y los índices de SPEI y SPI durante 1990 – 2022.

a. Relación de la deforestación entre SPEI y SPI en escalas de tiempo.

En la Figura 41, se observa la relación entre la deforestación y el índice de SPEI para 3, 6, 9 y 12 meses durante 1990-2022. La deforestación y el índice de SPEI de 6, 9 y 12 meses presentan una relación estadísticamente significativa (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ y *** $p < 0.001$) para todos los meses del año, sin embargo, en SPEI-3 se encontró relación positiva solo en los meses de julio y febrero* ($p < 0.05$). De lo contrario, en SPEI-3 se encontró una correlación negativa no significativa ($p > 0.05$) en el mes de setiembre.

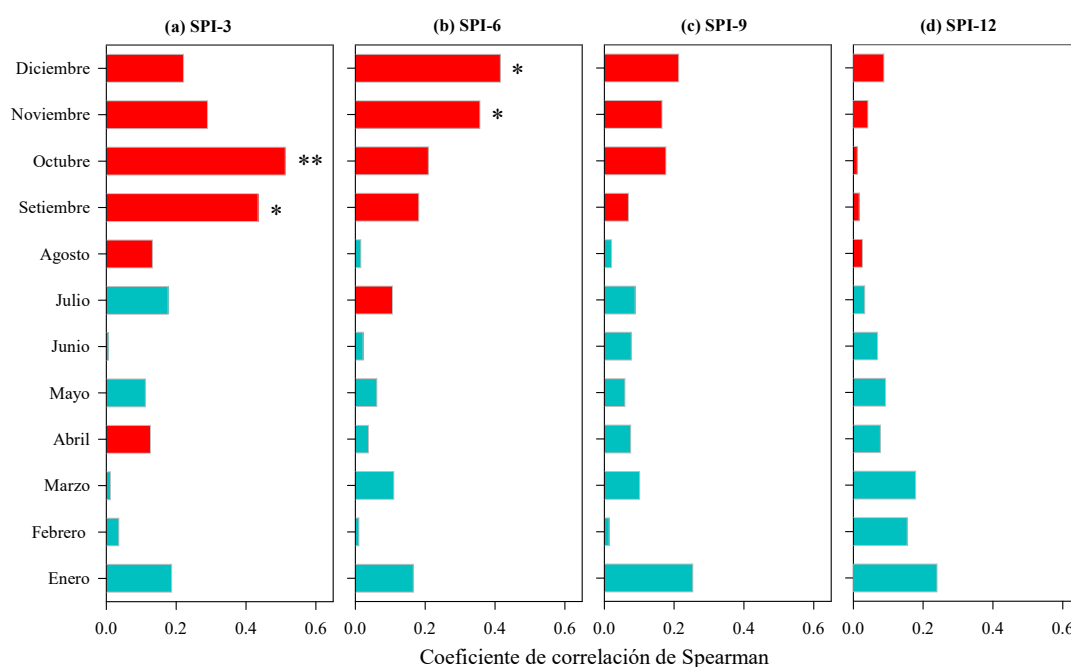
Figura 41. Correlación entre la deforestación y el índice de sequía SPEI



Nota. Las barras representan a valores absolutos de coeficiente de correlación de Spearman. Barras verdes representa correlaciones positivas y barras rojas correlaciones negativas. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

En la Figura 42, se observa la relación entre la deforestación y el índice de SPI para 3, 6, 9 y 12 meses durante 1990-2022. En SPEI-3 se encontró tendencias estadísticamente significativas en octubre (** $p < 0.01$) y en setiembre (* $p < 0.05$) y en SPI-6 se encontró tendencias significativas en diciembre y noviembre (** $p < 0.01$). En SPI-9 y 12 meses no se encontraron tendencias estadísticamente significativas.

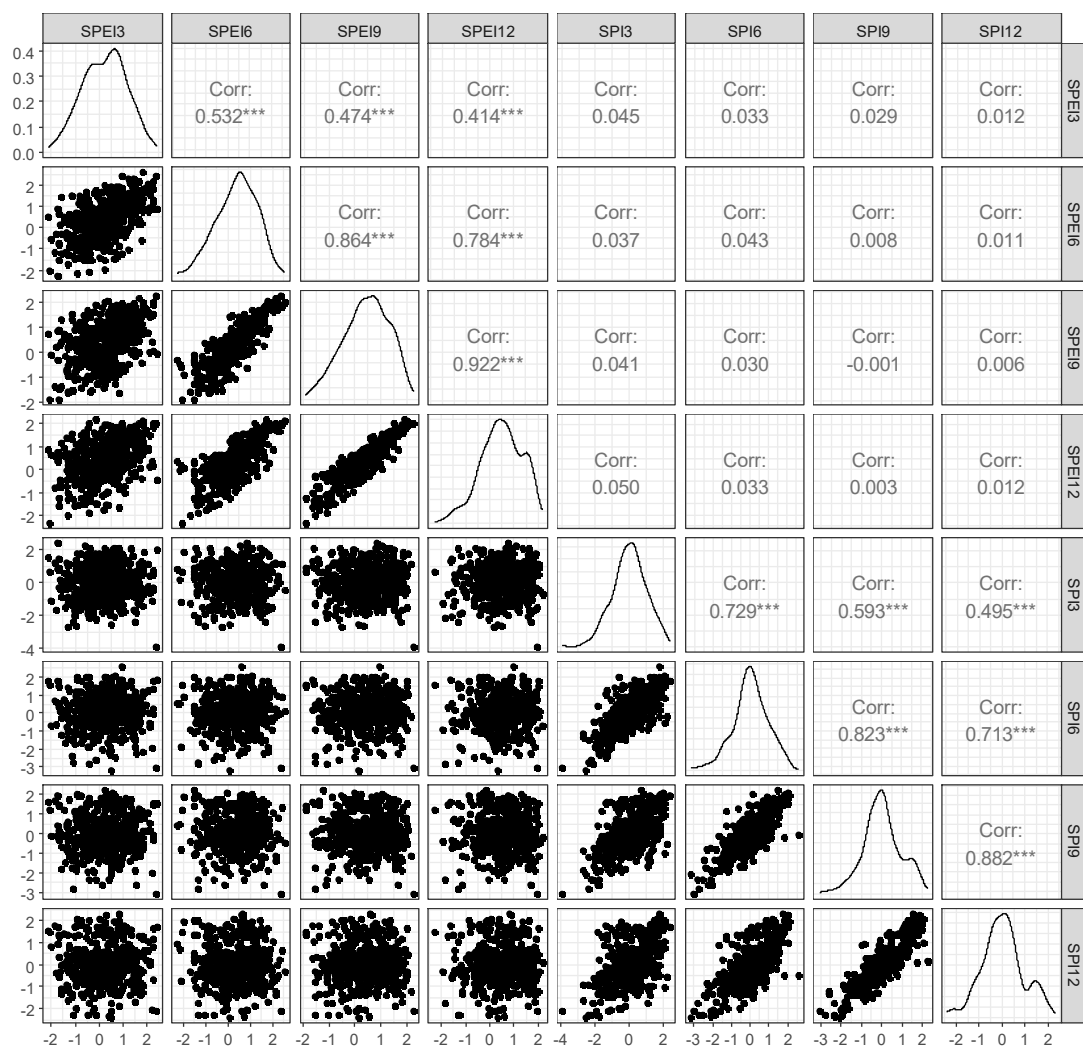
Figura 42. Correlación entre la deforestación y el índice de sequía SPI.



Nota: Las barras representan a valores absolutos de coeficiente de correlación de Spearman. Barras verdes representa correlaciones positivas y barras rojas correlaciones negativas. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

En la Figura 43 se observa la correlación de Pearson para categorizar el grado de correlación entre SPI y SPEI en diferentes escalas de tiempo.

Figura 43. Matriz de correlación entre SPEI y SPI a diferentes escalas.



4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Relación entre la deforestación y la variabilidad climática (precipitación y temperatura)

Variabilidad climática

Los resultados sobre el comportamiento de la precipitación y temperatura en la provincia de Tambopata coincide con otros estudios en la cuenca amazónica (Brasil, Perú, Bolivia, Colombia y Ecuador) (Doughty et al., 2021; Espinoza Villar et al., 2009; Zhao et al., 2018). La estación seca se caracteriza por bajas temperaturas y una reducción significativa de las precipitaciones (< 100 mm/mes) y comprende de mayo a setiembre. Durante esta estación la ausencia de nubosidad permite buena irradiación solar y buen calentamiento, mientras que la estación lluviosa comprende los meses de diciembre a marzo (Lavado et al., 2012; Marengo et al., 2008).

La no existencia de tendencias significativas y puntos de cambio en la precipitación anual encontrados en el presente estudio son consistentes con los reportados por estudios anteriores en la cuenca amazónica (Almeida et al., 2016; Espinoza et al., 2010; Lavado et al., 2012). Espinoza et al. (2010) y Almeida et al. (2016) encontraron una disminución no significativa de la precipitación anual en la cuenca amazónica (1975 y 2003) y en la Amazonia peruana e(1973 y 2013). Mientras que Lavado et al. (2012) encontraron tendencias no significativas en la precipitación anual y mensual en la cuenca amazónica entre 1965 y 2007. Sin embargo, los resultados de las tendencias de precipitación estacional y mensual difieren de los reportados por (Espinoza Villar et al., 2009; Lavado et al., 2012). Debido a que en la cuenca amazónica, durante el periodo 1975 a 2003, Espinoza et al. (2009)

observaron que la precipitación disminuyó significativamente en invierno y primavera.

La existencia de tendencias significativas y puntos de cambio en la temperatura media, anual y estacional encontrados en el presente estudio son consistentes con lo reportados por estudios previos en la Amazonia (Lavado et al., 2012; Malhi y Wright, 2004; Salviano et al., 2016). Aunque, las pendientes de los modelos lineales ajustados mostraron que las temperaturas promedio anual y estacional fueron más de cuatro veces superiores a las reportadas por estudios previos (Lavado et al., 2012; Malhi & Wright, 2004). A pesar de que el punto de cambio varió en más de 20 años, ya que Malhi & Wright (2004) encontraron el punto de cambio en 1970 y Lavado et al., (2012) encontraron el punto de cambio en 1978.

Por otro lado, los resultados sobre la temperatura mínima difiere de lo reportado por Lavado et al., (2012), debido a que estos autores no detectaron tendencia significativamente decrecientes entre 1965 y 2007. Sin embargo, la tendencias de la temperatura mínima reportadas en el presente estudio son coherentes con estudios realizados en el suroeste de la amazonia brasileña (Almeida et al., 2016; Marengo y Camargo, 2008). Ya que se encontró que la temperatura mínima anual fue 1.5 y entre 1.6 a 1.7 veces más que las reportadas por Marengo & Camargo (2008) ($0.008\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ año}^{-1}$) y Almeida et al., (2016) ($0.04\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ año}^{-1}$), respectivamente.

Con respecto a la temperatura máxima, las tendencias positivas encontradas en el presente estudio coinciden con estudios previos en la región amazónica (Almeida et al., 2016; Espinoza et al., 2024; Marengo y Camargo, 2008). Aunque las tasa de aumento de la temperatura máxima fueron menores en el presente estudio, ya que Marengo & Camargo (2008) y Almeida et al., (2016) encontraron un aumento de

30% en la temperatura máxima anual en comparación con el presente estudio. Sin embargo, para la temperatura máxima estacional, nuestros hallazgos fueron diferentes de los resultados reportados por Marengo & Camargo (2008), debido a que la pendiente de la temperatura anual fue dos veces mayor y su aumento en el verano fue mucho más alto que los encontrados en el presente estudio.

Anomalías

Las zonas afectadas por sequías graves y extremas pueden indicar una degradación forestal, con anomalías graves observadas principalmente en años típicos de sequía (por ejemplo, 2005, 2010, 2015 y 2016) (She, Li, Jiao, Sun, Ni, Zuo, et al., 2024). Los resultados sobre las anomalías de la temperatura mínima reportados en el presente estudio coinciden con los hallazgos de investigaciones previas realizadas en la región amazónica. En particular, se observa concordancia con lo señalado por Espinoza et al., (2024), quienes reportaron anomalías de la temperatura máxima y mínima superiores a +3 °C en el año 2015, respecto al promedio climático del periodo 1981–2020. También señalan que en los meses de junio a septiembre del 2023 se registraron anomalías negativas de la precipitación para la Amazonia. Asimismo, coincidimos que el periodo seco corresponde a esos meses (junio y setiembre).

Deforestación y su relación con la variabilidad climática

En las últimas décadas, la Amazonía peruana ha experimentado un rápido cambio en la cobertura forestal debido a la expansión de actividades antrópicas (Nicolau et al., 2019). Similar patrón se ha observado en estudios previos desarrollados en Madre de Dios, los cuales coinciden con los resultados del presente estudio en la provincia

de Tambopata, ya que estos reportaron que la agricultura y las actividades extractivas son los principales motores de deforestación (Nicolau et al., 2019)(Chavez Michaelsen et al., 2020)(Alarcón Aguirre et al., 2021)(Michaelsen et al., 2013). Alarcón Aguirre et al. (2021) reportaron que en Madre de Dios la agricultura es la principal fuente de deforestación (73%). Estos resultados coinciden con lo encontrado en el presente estudio, ya que las actividades agrícolas y similares representaron un 69% de la deforestación durante el periodo 1990-2022 en la provincia de Tambopata.

La deforestación debido a actividades mineras representó el 21% (41955 ha) del total de deforestación en la provincia de Tambopata Este valor es inferior a lo reportado por un estudio reciente (Velásquez et al., 2025), que reportó más de 120 mil hectáreas de bosque debido a la minería en la región Madre de Dios, durante el periodo 1980-2022. Esta diferencia en los niveles de deforestación con el estudio de Velásquez et al. (2025) se debería al alcance del área de estudio, ya que en el presente estudio solo se consideró a la provincia de Tambopata, mientras que en Velásquez et al. (2025) consideraron a toda la región Madre de Dios. Por otro lado, el incremento acelerado de la deforestación a partir de 2007 estaría relacionado con un incremento en el precio de oro (Ellwanger et al., 2020; Scullion et al., 2014; Velásquez et al., 2025) y con la construcción de la carretera interoceánica (Alarcón Aguirre et al., 2021; Espejo et al., 2018; Nicolau et al., 2019). Los que permitieron un mayor ingreso económico a la población dedicada a esta actividad y una mayor accesibilidad a nuevas áreas dentro de la provincia de Tambopata.

Estudios recientes en la Amazonia peruana han demostrado que la rápida pérdida de bosques viene afectando negativamente los servicios ecosistémicos y la capacidad

de resiliencia de los ecosistemas al cambio climático (Reygadas et al., 2023; Marques da Silva et al., 2023; de Abreu dos Santos et al., 2024). Debido a que la deforestación tiene efectos negativos en el ciclo del agua, ciclo de carbono, incrementa la temperatura, reduce la evapotranspiración y afecta las precipitaciones (Smith et al., 2023), a pequeña y gran escala (Qin et al., 2025). En la amazonia brasilera, De Souza et al. (2023) encontraron que la precipitación anual disminuyó debido a la pérdida de cobertura forestal entre 1982 y 2020, mientras que Silva et al. (2023) encontraron una disminución de la precipitación debido al aumento severo de la deforestación entre 2001 y 2020.

Los resultados de la relación directa entre la deforestación y la temperatura coinciden con estudios previos en la Amazonia (Maillard et al., 2022; Marques da Silva et al., 2023), que han demostrado cómo los altos niveles de deforestación se relacionan significativamente con un incremento de temperatura. En la Amazonia peruana, Layza & Gonzales (2018) y Mesia (2015) encontraron una alta variabilidad explicada ($r^2 > 50\%$) por la deforestación en el incremento de temperatura en los departamentos de San Martín e Iquitos, respectivamente. Esto demuestra que la deforestación tendría consecuencias adversas sobre el comportamiento del clima (Layza & Gonzales, 2018). Considerado lo descrito previamente, debería ser prioridad reducir las tendencias de deforestación en la provincia de Tambopata. Esto podría lograrse con políticas públicas para la conservación de los bosques y orientadas a la gestión territorial a múltiples escalas, promoviendo la protección, restauración de bosques, monitoreo de la deforestación y cambios de las precipitación y temperatura a diferentes escalas (Maillard et al., 2022). Por otro lado, estudio previos en la Amazonia reportaron que la deforestación tiende a disminuir las precipitaciones (De Sales et al., 2020; Maillard et al., 2022; Rizzo et al., 2020;

Stickler et al., 2013). En la Amazonia brasileña, De Souza et al. (2023) encontraron que entre 1982 y 2020 la precipitación anual disminuyó a causa de la reducción de la cobertura forestal. Asimismo Marques da Silva et al. (2023) encontraron entre 2001 y 2020 una reducción de la precipitación debido al incremento severo de la deforestación. Finalmente, da Motta Paca et al., (2020) también reportaron que la Amazonia ha experimentado alteraciones en sus patrones de precipitación entre 1981 - 2017.

El aumento de la temperatura está ocurriendo en un momento en que la selva amazónica se está acercando a un punto de inflexión, y es especialmente en aquellas regiones donde se están presentando deforestación, además el cambio climático como la deforestación en la amazonia se consideran los principales impulsores de transición en la amazonia (Jiménez-Muñoz et al., 2016; Marengo et al., 2022).

4.2.2. Deforestación y los índices de sequia

En la Amazonia las sequias tienen importantes repercusiones ecológicas, en detrimento de la biodiversidad, la disponibilidad de agua y afectan negativamente a las poblaciones locales, y estos impactos pueden afectar el futuro de los ecosistemas amazónicos (Marengo et al., 2022). Los resultados sobre las sequias coincide con los reportados por estudios previos en la cuenca amazónica, ya que según el SPEI y SPI se registraron sequias moderadas a extremas en 2005, 2010 y 2016, lo cual concuerda con estudios previos que reportaron eventos de sequías en estos años (Lewis et al., 2011; Marengo et al., 2022; Papastefanou et al., 2022; She, Li, Jiao, Sun, Ni, y Zuo, 2024; Zhu et al., 2024). Además, las anomalías de las

temperaturas durante estos años, especialmente durante el 2010, fueron favorables para la presencia de sequías (Espinoza et al., 2024).

4.3. Prueba de hipótesis de la investigación

4.3.1. Hipótesis general

Se acepta parcialmente la hipótesis general planteada sobre que el incremento de la deforestación se relaciona de forma significativa con un incremento en los índices de sequía y la variabilidad climática en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022. Esto debido a que no se encontró correlaciones significativas entre la deforestación con todas las variables climáticas, ni entre la deforestación y los dos índices de sequía. Ya que solo se encontraron correlaciones directas y significativas ($p < 0.05$) entre la deforestación y la temperatura media y temperatura mínima. Mientras que el SPEI se correlacionó consistentemente de forma directa y significativa ($p < 0.05$) con la deforestación.

4.3.2. Hipótesis específicas

Con respecto a la hipótesis específica 1, sobre que el incremento de la deforestación se relaciona significativamente con un incremento en la variabilidad climática (precipitación y temperatura) en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022. Se acepta parcialmente la hipótesis específica 1, debido a que se encontró que la deforestación (acumulada y anual) se relacionó de forma positiva y significativa con la temperatura mínima y temperatura media ($\rho > 0.4$; $p < 0.05$). Mientras que

la deforestación (acumulada y anual) no se relacionó significativamente con la temperatura máxima ($\rho < 0.35$; $p > 0.05$) y la precipitación ($|\rho| < 0.2$; $p > 0.05$).

Con respecto a la hipótesis específica 2, sobre que el incremento de la deforestación se relaciona significativamente con un incremento en los índices de sequías en la provincia de Tambopata durante el periodo 1990-2022. Se acepta parcialmente la hipótesis específica 2, debido a que solo el índice de sequía SPEI se correlacionó de forma positiva y significativa ($\rho > 0.35$; $p < 0.05$) con la deforestación en la provincia de Tambopata. Específicamente la deforestación se relacionó directa y significativa con los valores del índice de sequía SPEI-6, SPEI-9 y SPEI-12 durante todos los meses del año. Sin embargo, la deforestación no se relacionó de forma significativa con los valores del índice de sequía SPI, en sus diferentes niveles, a excepción de SP-3 (octubre y septiembre) y SPI-6 (noviembre y diciembre), los cuales se relacionaron de forma inversa y significativa con la deforestación ($|\rho| > 0.35$; $p < 0.05$).

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Los incrementos en la temperatura media y mínima se relacionan con los incrementos en la deforestación en la provincia de Tambopata. Debido a que se encontró que la deforestación (acumulada y anual) se relacionó de forma positiva y significativa con la temperatura mínima y temperatura media ($\rho > 0.4$; $p < 0.05$). Mientras que la deforestación (acumulada y anual) no se relacionó significativamente con la temperatura máxima ($\rho < 0.35$; $p > 0.05$) y la precipitación ($|\rho| < 0.2$; $p > 0.05$).

Los incrementos en el índice de sequía SPEI se relacionan con los incrementos en la deforestación en la provincia de Tambopata. Debido a que se encontró que índice de sequía SPEI se correlacionó de forma positiva y significativa ($\rho > 0.35$; $p < 0.05$) con la deforestación en la provincia de Tambopata. Específicamente la deforestación se relacionó directa y significativa con los valores del índice de sequía SPEI-6, SPEI-9 y SPEI-12 durante todos los meses del año. Sin embargo, la deforestación no se relacionó de forma significativa con los valores del índice de sequía SPI, en sus diferentes niveles, a excepción de SP-3 (octubre y septiembre) y SPI-6 (noviembre y diciembre), los cuales se relacionaron de forma inversa y significativa con la deforestación ($|\rho| > 0.35$; $p < 0.05$).

RECOMENDACIONES

- Como recomendación metodológica, destacamos por ampliar el estudio para incluir un mayor número de estaciones, particularmente en los bosques de la amazonia peruana. Esto proporcionará hallazgos más amplios sobre la correlación entre variables como la tenencia de la tierra, la deforestación. Esto es especialmente significativo ya que el presente estudio sugiere consecuencias adversas entre la deforestación y la temperatura, las cuales, si se corroboran con estudios adicionales, podrían evolucionar hacia un principio teórico, requiriendo así modificaciones en las políticas públicas.
- El presente estudio analiza los efectos principales de la deforestación. No obstante, pasamos por alto otros problemas significativos, incluyendo la deterioración del agua y el suelo, así como los incendios forestales. Es necesaria más investigación para examinar los posibles efectos de la deforestación junto con la variable de sequía, es esencial tener en cuenta los impactos adicionales de la variabilidad climática en la agricultura, como los incendios forestales. Es necesaria una investigación adicional para abordar los cambios leves en los patrones de precipitación causados por la deforestación. Investigaciones adicionales sobre estas variables, junto con los hallazgos de nuestro estudio, mejorarán la comprensión de las complejas relaciones entre la deforestación, sequías y la variabilidad climática.
- La investigación de 33 años sobre la deforestación en el sureste de Perú proporciona una oportunidad única para evaluar los factores hipotéticos de la deforestación provocada por diversas actividades. Se aconseja que en los futuros estudios se utilicen tecnologías geoespaciales avanzadas para el monitoreo

preciso y la detección temprana de la deforestación en poblaciones locales. Este es el caso del Estado Peruano, a través del Ministerio del Ambiente, y algunos esfuerzos de entidades privadas, como el Proyecto de "Mapeo Anual de Cobertura y Uso del Suelo en Perú", entre otras intervenciones, con el fin de optimizar el tiempo y obtener resultados de investigación más efectivos. También La deforestación es una causa significativa de las emisiones globales de carbono, contribuyendo al calentamiento global y al cambio climático, y frente a ello se recomienda investigar la relación del incremento de temperatura con las emisiones de carbono por tipo de actividad de uso de suelo.

- Utilizar cuestionarios estructurados para recoger las percepciones de las comunidades locales sobre los factores que impulsan la deforestación y sus efectos. Este enfoque permitirá comprender las perspectivas locales e identificar factores clave como el crecimiento demográfico y la expansión agrícola. Además, complementar las encuestas de hogares con debates de grupos focales para profundizar en las repercusiones a escala comunitaria y las estrategias de adaptación.
- Finalmente, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y las entidades técnico-científicas deben de realizar campañas informativas sobre los avances en la comprensión física del clima con la finalidad de la toma de decisiones en comunidades locales desde los gobiernos subnacionales.
- Los resultados de esta investigación forman una base para desarrollar información basada en el clima y el tiempo para la sociodemográfica de tal manera que se pueda plantear medidas de adaptación

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agbo, E. P., Nkajoe, U., y Edet, C. O. (2023). Comparison of Mann–Kendall and Şen’s innovative trend method for climatic parameters over Nigeria’s climatic zones. En *Climate Dynamics* (Vol. 60, Números 11–12). <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06521-9>
- AghaKouchak, A., Mirchi, A., Madani, K., Di Baldassarre, G., Nazemi, A., Alborzi, A., Anjileli, H., Azarderakhsh, M., Chiang, F., Hassanzadeh, E., Huning, L. S., Mallakpour, I., Martinez, A., Mazdiyasni, O., Moftakhari, H., Norouzi, H., Sadegh, M., Sadeqi, D., Van Loon, A. F., y Wanders, N. (2021). Anthropogenic Drought: Definition, Challenges, and Opportunities. *Reviews of Geophysics*, 59(2), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2019RG000683>
- Agrawala, S., y Fankhauser, S. (2008). Putting Climate Change Adaptation in an Economic Context. En *Economic Aspects of Adaptation to Climate Change* (Vol. 9789264046, pp. 19–28). OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264046214-3-en>
- Alarcón-Aguirre, G., Sajami Quispe, E., Vásquez Zavaleta, T., Ponce Tejada, L. V., Ramos Enciso, D., Rodríguez Achata, L., y Garate-Quispe, J. (2023). Vegetation dynamics in lands degraded by gold mining in the southeastern Peruvian Amazon. *Trees, Forests and People*, 11(2023), 100369. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100369>
- Alarcón Aguirre, G., Canahuire Robles, R. R., Guevara Duarez, F. M., Rodríguez Achata, L., Gallegos Chacón, L. E., y Garate-Quispe, J. (2021). Dinámica de la pérdida de bosques en el sureste de la Amazonia peruana: un estudio de caso en Madre de Dios. *Ecosistemas*, 30(2), 2175–2175. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/2175>
- Alazba, A. A. (2004). Contour maps for hydrologic and climatic parameters in Saudi Arabia. *ASAE Annual International Meeting 2004*, 2017–2031. <https://doi.org/10.13031/2013.16379>
- Almeida, C. T., Oliveira-Júnior, J. F., Delgado, R. C., Cubo, P., y Ramos, M. C. (2016). Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. *International Journal of Climatology*, 37(4), 2013–2026. <https://doi.org/10.1002/joc.4831>
- Alvarez-Montalván, C. E., Manrique-León, S., Vela-Da Fonseca, M., Cardozo-Soarez, J., Callo-Ccorcca, J., Bravo-Camara, P., Castañeda-Tinco, I., y Alvarez-Orellana, J. (2021). Floristic composition, structure and tree diversity of an amazon forest in Peru. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 73–82. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.009>
- Alvarez, N. L., y Naughton-Treves, L. (2003). Linking National Agrarian Policy to Deforestation in the Peruvian Amazon: A Case Study of Tambopata, 1986–1997. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 32(4), 269–274. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.4.269>
- Ambarwulan, W., Yulianto, F., Widiatmaka, W., Rahadiati, A., Tarigan, S. D., Firmansyah, I., y Hasibuan, M. A. S. (2023). Modelling land use/land cover projection using different scenarios in the Cisadane Watershed, Indonesia:

- Implication on deforestation and food security. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(2), 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.04.002>
- Ambrizzi, T., Reboita, M., da Rocha, R., y Llopart, M. (2019). The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1), 98–120. <https://doi.org/10.1111/nyas.13932>
- Aragão, L. E. O. C., Malhi, Y., Barbier, N., Lima, A., Shimabukuro, Y., Anderson, L., y Saatchi, S. (2008). Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1498), 1779–1785. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0026>
- Armenteras, D., y Retana, J. (2012). Dynamics, Patterns and Causes of Fires in Northwestern Amazonia. *PLoS ONE*, 7(4), e35288. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035288>
- Asner, G. P., Powell, G. V. N., Mascaró, J., Knapp, D. E., Clark, J. K., Jacobson, J., Kennedy-Bowdoin, T., Balaji, A., Paez-Acosta, G., Victoria, E., Secada, L., Valqui, M., y Hughes, R. F. (2010). High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(38), 16738–16742. <https://doi.org/10.1073/pnas.1004875107>
- Awange, J. L. (2012). Climate Change and Weather Related Impacts. En *Environmental Science and Engineering* (pp. 169–200). https://doi.org/10.1007/978-3-540-88256-5_10
- Bapon, F., y Saeid, E. (2017). Analysis of Drought Factors Affecting the Economy. En *Handbook of Drought and Water Scarcity* (1st Editio, p. 13).
- Barlow, J., França, F., Gardner, T. A., Hicks, C. C., Lennox, G. D., Berenguer, E., Castello, L., Economo, E. P., Ferreira, J., Guénard, B., Gontijo Leal, C., Isaac, V., Lees, A. C., Parr, C. L., Wilson, S. K., Young, P. J., y Graham, N. A. J. (2018). The future of hyperdiverse tropical ecosystems. *Nature*, 559(7715), 517–526. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0301-1>
- Basin, K. R. (2019). Trend Analysis of Hydroclimatic Variables in the. *Water*.
- BCR. (2021). Efectos económicos del cambio climático en el Perú. En *Banco Central de Reserva del Perú* (Vols. 2021–009).
- Becchetti, L., Conzo, G., y Salustri, F. (2025). Standard-Nutzungsbedingungen: What about the others? Conditional cooperation, climate change perception and ecological actions. *Ecological Economics*, 227(August 2024), 108371. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108371>
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., y Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Birinyi, E., Lakatos, B. O., Belényesi, M., Kristóf, D., Hetesi, Z., Mrekva, L., y Mikus, G. (2023). Contribution of data-driven methods to risk reduction and climate

- change adaptation in Hungary and beyond. *Idojaras*, 127(4), 421–446. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2023.4.1>
- Bochow, N., y Boers, N. (2023). The South American monsoon approaches a critical transition in response to deforestation. *Science Advances*, 9(40), eadd9973. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add9973>
- Brêda, J. P. L. F., Cauduro Dias de Paiva, R., Siqueira, V. A., y Collischonn, W. (2023). Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. *Journal of Hydrology*, 619(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129284>
- Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo-Mendoza, A., Malhi, Y., Lewis, S. L., Vásquez Martínez, R., Alexiades, M., Álvarez Dávila, E., Alvarez-Loayza, P., Andrade, A., Aragão, L. E. O. C., Araujo-Murakami, A., Arets, E. J. M. M., Arroyo, L., ... Zagt, R. J. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519(7543), 344–348. <https://doi.org/10.1038/nature14283>
- Brito, C. S. de, Silva, R. M. da, Santos, C. A. G., Brasil Neto, R. M., y Coelho, V. H. R. (2021). Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil. *Atmospheric Research*, 250(July 2020), 105380. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105380>
- Bugallo, A. (2008). Avances en filosofía y medio ambiente en iberoamérica. Vinculos significativos entre filosofía ambiental y ciencias. *Redalyc (Ciencia y Sociedad)*, 10, 31–41. <http://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/1157>
- Butler, R. A. (2020). *The Amazon Rainforest: The World's Largest Rainforest*. Mongabay.com / A Place Out of Time: Tropical Rainforests and the Perils They Face. <https://rainforests.mongabay.com/amazon/>
- Cabral, B. F., Yanai, A. M., Graça, P. M. L. de A., Escada, M. I. S., de Almeida, C. M., y Fearnside, P. M. (2024). Amazon deforestation: A dangerous future indicated by patterns and trajectories in a hotspot of forest destruction in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 354(2024), 120354. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120354>
- Casado, C. (2020). Philosophy Of Climate Science: Models , Problems And Uncertainties. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, 20, 201–234. <https://doi.org/10.18270/rcfc.v20i41.3193>
- Cerpa Reyes, L. J., Ávila Rangel, H., y Herazo, L. C. S. (2022). Adjustment of the Standardized Precipitation Index (SPI) for the Evaluation of Drought in the Arroyo Pechelín Basin, Colombia, under Zero Monthly Precipitation Conditions. *Atmosphere*, 13(2), 236. <https://doi.org/10.3390/atmos13020236>
- Cerri, C. E. P., Cerri, C. C., Maia, S. M. F., Cherubin, M. R., Feigl, B. J., y Lal, R. (2018). Reducing Amazon deforestation through agricultural intensification in the Cerrado for advancing food security and mitigating climate change. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su10040989>
- Chandrasekhar Reddy, K. (2023). Artificial Intelligence-Based Reference Evapotranspiration Modelling with Minimum Climatic Parameters. *Lecture*

Notes in Civil Engineering, 339 LNCE, 559–568. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1901-7_45

- Chavez Michaelson, A., Huamani Briceño, L., Vilchez Baldeon, H., Perz, S. G., Quaadvlieg, J., Rojas, R. O., Brown, I. F., y Pinedo Mora, R. (2020). The effects of climate change variability on rural livelihoods in Madre de Dios, Peru. *Regional Environmental Change*, 20(2). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01649-y>
- Chen, J., Shi, X., Gu, L., Wu, G., Su, T., Wang, H. M., Kim, J. S., Zhang, L., y Xiong, L. (2023). Impacts of climate warming on global floods and their implication to current flood defense standards. *Journal of Hydrology*, 618(September 2022), 129236. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129236>
- Chen, S., Stark, S. C., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., de Jesus Amore, D., Restrepo-Coupe, N., Smith, M. N., Chitra-Tarak, R., Ko, H., Nelson, B. W., y Saleska, S. R. (2024). Amazon forest biogeography predicts resilience and vulnerability to drought. *Nature*, 631(8019), 111–117. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07568-w>
- Cho, S. E., Jo, J. W., Kwag, Y.-N., Lee, H., Chung, J.-W., Oh, S. H., y Kim, C. S. (2021). Complete mitochondrial genome sequence of *Gymnopilus junonius*. *Mitochondrial DNA Part B*, 6(3), 1020–1021. <https://doi.org/10.1080/23802359.2021.1895692>
- Coe, M. T., Brando, P. M., Deegan, L. A., Macedo, M. N., Neill, C., y Silvério, D. V. (2017). The Forests of the Amazon and Cerrado Moderate Regional Climate and Are the Key to the Future. *Tropical Conservation Science*, 10(June). <https://doi.org/10.1177/1940082917720671>
- Colombo, F., Caccamo, M., y Magazù, S. (2018). Meteorological maps: How are they made and meteorology during the last three centuries how to read them. A brief history of the synoptic. En *New Trends in Physics Education Research* (Número 0, pp. 191–224). Nova Science Publishers, Inc.
- Comisión Europea. (2021). *Escenarios de cambio climático regionalizados para la planificación de medidas de adaptación. Conceptos básicos, herramientas de visualización y buenas prácticas*.
- Congreso de la República del Perú. (2024). *INFORME DE LA COMISIÓN ESPECIAL DE CAMBIO CLIMÁTICO : PERIODO ANUAL DE SESIONES 2023 - 2024*.
- Coomes, O. T., Cheng, Y., Takasaki, Y., y Abizaid, C. (2021). What drives clearing of old-growth forest over secondary forests in tropical shifting cultivation systems? Evidence from the Peruvian Amazon. *Ecological Economics*, 189(2021), 107170. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107170>
- da Motta Paca, V. H., Espinoza-Dávalos, G. E., Moreira, D. M., y Comair, G. (2020). Variability of trends in precipitation across the Amazon river basin determined from the CHIRPS precipitation product and from station records. *Water (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/W12051244>
- Danielson, R. E., y Mazza Rodrigues, J. L. (2022). Impacts of land-use change on soil microbial communities and their function in the Amazon Rainforest. En *Advances in Agronomy* (1a ed., Vol. 175). Elsevier Inc.

<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.04.001>

- Davidson, E. A., de Araújo, A. C., Artaxo, P., Balch, J. K., Brown, I. F., C. Bustamante, M. M., Coe, M. T., DeFries, R. S., Keller, M., Longo, M., Munger, J. W., Schroeder, W., Soares-Filho, B. S., Souza, C. M., y Wofsy, S. C. (2012). The Amazon basin in transition. *Nature*, 481(7381), 321–328. <https://doi.org/10.1038/nature10717>
- de Abreu dos Santos, D., Lopes, T. R., Damaceno, F. M., y Duarte, S. N. (2024). Evaluation of deforestation, climate change and CO2 emissions in the Amazon biome using the Moran Index. *Journal of South American Earth Sciences*, 143(March), 105010. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105010>
- De Luca, D., Petroselli, A., y Galosso, L. (2020). A Transient Stochastic Rainfall Generator for Climate Changes Analysis at Hydrological Scales in Central Italy. *Atmosphere*, 11(1292), 21. <https://doi.org/10.3390/atmos11121292>
- De Sales, F., Santiago, T., Biggs, T. W., Mullan, K., Sills, E. O., y Monteverde, C. (2020). Impacts of Protected Area Deforestation on Dry-Season Regional Climate in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(16), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2020JD033048>
- De Souza, F., Duku, C., y Hein, L. (2023). Deforestation-induced changes in rainfall decrease soybean-maize yields in Brazil. *Ecological Modelling*, 486(2023), 110533. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110533>
- Dostal, P., y Bürger, K. (2010). L'évolution climatique de la haute vallée du Rhin. *Revue d'histoire moderne & contemporaine*, n° 57-3(3), 111–130. <https://doi.org/10.3917/rhmc.573.0111>
- Doughty, R., Xiao, X., Qin, Y., Wu, X., Zhang, Y., y Moore, B. (2021). Small anomalies in dry-season greenness and chlorophyll fluorescence for Amazon moist tropical forests during El Niño and La Niña. *Remote Sensing of Environment*, 253(November 2020), 112196. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112196>
- Eisenhauer, D. C. (2020). Climate Change; Adaptation. En *International Encyclopedia of Human Geography* (pp. 281–291). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102295-5.10756-5>
- Ellwanger, J., Kulmann-Leal, B., Kaminski, V., y Valverde-Villegas, M. (2020). Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 92(1), 1–33. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020191375>
- Er, F., Ogut, M., y Sami Erol, A. (2009). Path analysis and relationships between some climatic parameters and sugar content of sugar beet. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 15(3), 222–227.
- Espejo, J. C., Messinger, M., Román-Dañobeytia, F., Ascorra, C., Fernandez, L. E., y Silman, M. (2018). Deforestation and forest degradation due to gold mining in the Peruvian Amazon: A 34-year perspective. *Remote Sensing*, 10(12), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs10121903>
- Espin, J., y Perz, S. (2021). Environmental crimes in extractive activities: Explanations

- for low enforcement effectiveness in the case of illegal gold mining in Madre de Dios, Peru. *Extractive Industries and Society*, 8(1), 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.12.009>
- Espinoza, J. C., Jimenez, J. C., Marengo, J. A., Schongart, J., Ronchail, J., Lavado-Casimiro, W., y Ribeiro, J. V. M. (2024). The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Scientific Reports*, 14(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Lavado, W., Cochonneau, G., Oliveira, E., Pombosa, R., Vauchel, P., y Guyot, J. (2010). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin and its relationship to regional hydrological variability. A particular focus in the Andean region. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA*, 2(2), 99–130.
- Espinoza Villar, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., y Vauchel, P. (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29(11), 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>
- Fan, G., Sarabandi, A., y Yaghoobzadeh, M. (2021). Evaluating the climate change effects on temperature, precipitation and evapotranspiration in eastern Iran using CMPI5. *Water Supply*, 21(8), 4316–4327. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.179>
- FAO. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales: Términos y Definiciones FRA 2020* (Número 188).
- FAO. (2024). *El estado de los bosques del mundo 2024*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd1211es>
- Fattah, M. A., Hasan, M. M., Dola, I. A., Morshed, S. R., Chakraborty, T., Kafy, A. Al, Alsulamy, S., Khedher, K. M., y Shohan, A. A. A. (2024). Implications of rainfall variability on groundwater recharge and sustainable management in South Asian capitals: An in-depth analysis using Mann Kendall tests, continuous wavelet coherence, and innovative trend analysis. *Groundwater for Sustainable Development*, 24(October 2023), 101060. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101060>
- Gálvez, P. (2017a). Caracterización de las sequías históricas y proyectadas bajo escenarios de cambio climático en la cuenca del río Mantaro. En *In Universidad Nacional Agraria La Molina*. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3161>
- Gálvez, P. (2017b). Caracterización de las sequías históricas y proyectadas bajo escenarios de cambio climático en la cuenca del río Mantaro. En *In Universidad Nacional Agraria La Molina*.
- Gashaw, T., Wubaye, G. B., Worqlul, A. W., Dile, Y. T., Mohammed, J. A., Birhan, D. A., Tefera, G. W., van Oel, P. R., Haileslassie, A., Chukalla, A. D., Taye, M. T., Bayabil, H. K., Zaitchik, B., Srinivasan, R., Senamaw, A., Bantider, A., Adgo, E., y Seid, A. (2023). Local and regional climate trends and variabilities in Ethiopia: Implications for climate change adaptations. *Environmental Challenges*, 13(November), 100794. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100794>
- Gaston, K. J. (2000). Global Patterns in Biodiversity. *Nature*, 405, 220–227.

- GeoBosques. (2022). *Cobertura y pérdida de bosque húmedo amazónico 2022*.
- Getnet, G. T., Dagneu, A. B., y Ayal, D. Y. (2023). Spatiotemporal variability and trends of rainfall and temperature in the tropical moist montane ecosystem: Implications to climate-smart agriculture in Geshy watershed, Southwest Ethiopia. *Climate Services*, 30(February), 100384. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100384>
- GOREMAD. (2010). *Estudio de diagnostico y zonificación de la provincia de Tambopata para el Tratamiento de Demarcacion Territorial*.
- Haile, G. G., Tang, Q., Li, W., Liu, X., y Zhang, X. (2020). Drought: Progress in broadening its understanding. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(2), 1–25. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1407>
- Hansen, M. C., Wang, L., Song, X. P., Tyukavina, A., Turubanova, S., Potapov, P. V., y Stehman, S. V. (2020). The fate of tropical forest fragments. *Science Advances*, 6(11), 1–9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax8574>
- Hernández, R. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta edic).
- Hirsch, R. M., Slack, J. R., y Smith, R. A. (1981). Techniques of trend analysis for monthly water-quality data. *Water Resources Research*, June. <https://doi.org/10.3133/ofr81488>
- Hulme, M., y Dessai, S. (2008). Negotiating future climates for public policy: a critical assessment of the development of climate scenarios for the UK. *Environmental Science & Policy*, 11(1), 54–70. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.09.003>
- Hurlimann, A. C., Moosavi, S., y Browne, G. R. (2021). Climate change transformation: A definition and typology to guide decision making in urban environments. *Sustainable Cities and Society*, 70(July 2020), 102890. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102890>
- IDEAM. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000. *Area*, TH-62-04-1(257), 16.
- Iñiguez-Gallardo, V., y Tzanopoulos, J. (2023). Perceptions of Climate Adaptation and Mitigation: An Approach from Societies in Southern Ecuadorian Andes. *Sustainability*, 15(2), 1086. <https://doi.org/10.3390/su15021086>
- IPCC. (2011). Anexo I: Glosario, siglas, símbolos químicos y prefijos. *Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático del IPCC*, 161–178. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srren_report_glossary_es.pdf
- IPCC. (2021). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. En *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. (2022). *Comunicado de prensa del IPCC 31*.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., Takahashi, K., Malhi, Y., Sobrino, J. A., y Schrier, G. Van Der. (2016). Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El

- Niño 2015-2016. *Scientific Reports*, 6(September), 1–7.
<https://doi.org/10.1038/srep33130>
- Kendall, M. G. (1975). Rank Correlation Methods. En *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)* (Vol. 134, Número 4).
<https://doi.org/10.2307/2343668>
- Khan, F., Ali, S., Ullah, H., y Muhammad, S. (2023). Twenty-first century climate extremes' projections and their spatio-temporal trend analysis over Pakistan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 45.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101295>
- Kinney, P. L., Ge, B., Sampath, V., y Nadeau, K. (2023). Health-based strategies for overcoming barriers to climate change adaptation and mitigation. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 152(5), 1053–1059.
<https://doi.org/10.1016/j.jaci.2023.09.012>
- Kiros, G., Shetty, A., y Nandagiri, L. (2016). Analysis of variability and trends in rainfall over northern Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(6).
<https://doi.org/10.1007/s12517-016-2471-1>
- Kranz, O., Schoepfer, E., Tegtmeier, R., y Lang, S. (2018). Earth observation based multi-scale assessment of logging activities in the Democratic Republic of the Congo. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 254–267.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.012>
- Kumar, R., y Raj Gautam, H. (2014). Climate Change and its Impact on Agricultural Productivity in India. *Journal of Climatology & Weather Forecasting*, 2(1), 2–4.
<https://doi.org/10.4172/2332-2594.1000109>
- Lagneaux, E. G., Callo-Concha, D., Speelman, E. N., y Descheemaeker, K. (2024). Panarchy to explore land use: a historical case study from the Peruvian Amazon. *Sustainability Science*, c. <https://doi.org/10.1007/s11625-024-01502-9>
- Laureshyn, A., Agerholm, N., y Šucha, M. (2024). Traffic Safety Data. En A. Laureshyn, N. Agerholm, y M. Šucha (Eds.), *Traffic Safety Data: Sources, analysis and applications*. The Institution of Engineering and Technology.
<https://doi.org/10.1049/PBTR028E>
- Lavado, W., Labat, D., Ronchail, J., Espinoza, J. C., y Guyot, J. (2012). *Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon – Andes basin over the last 40 years (1965 – 2007)*. <https://doi.org/10.1002/hyp.9418>
- Layza, R., y Gonzales, F. (2018). La deforestación y el cambio climatico en la provincia de San Martin periodo:1973-2014. *Ciencia y Tecnología*, 14(2), 19–30.
- Lechler, S., Picoli, M. C. A., Soares, A. R., Sanchez, A., Chaves, M. E. D., y Versteegen, J. (2020). Exploring nasa's harmonized landsat and sentinel-2 (HLS) dataset to monitor deforestation in the amazon rainforest. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B3), 705–711. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-705-2020>
- Leon, M., Cornejo, G., Calderón, M., González-Carrión, E., y Florez, H. (2022). Effect of Deforestation on Climate Change: A Co-Integration and Causality Approach

- with Time Series. *Sustainability (Switzerland)*, 14(18), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su141811303>
- Lewis, S. L., Brando, P. M., Phillips, O. L., Van Der Heijden, G. M. F., y Nepstad, D. (2011). The 2010 Amazon drought. *Science*, 331(6017), 554. <https://doi.org/10.1126/science.1200807>
- Liu, H., Wang, X., Liang, C., Xue, P., Wang, Z., Chen, Y., y Zhang, M. (2024). Divergent nonlinear trends of global drought and its multivariate characteristics. *Journal of Hydrology*, 630(September 2023), 130759. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130759>
- Lopes, A. V., Chiang, J. C. H., Thompson, S. A., y Dracup, J. A. (2016). Trend and uncertainty in spatial-temporal patterns of hydrological droughts in the Amazon basin. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3307–3316. <https://doi.org/10.1002/2016GL067738>
- Lotfirad, M., Esmaili-Gisavandani, H., y Adib, A. (2022). Drought monitoring and prediction using SPI, SPEI, and random forest model in various climates of Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 13(2), 383–406. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.287>
- Lute, A. C., y Abatzoglou, J. T. (2021). Best practices for estimating near-surface air temperature lapse rates. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E110–E125. <https://doi.org/10.1002/joc.6668>
- Mabee, W. E. (2019). Deforestation. En *International Encyclopedia of Human Geography, Second Edition* (pp. 203–211). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102295-5.10004-6>
- Maillard, O., Vides-Almonacid, R., Salazar, Á., y Larrea-Alcazar, D. M. (2022). Effect of Deforestation on Land Surface Temperature in the Chiquitania Region, Bolivia. *Land*, 12(1), 2. <https://doi.org/10.3390/land12010002>
- Malhi, Y., y Wright, J. (2004). Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 359(1443), 311–329. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1433>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Marengo, J. A., y Camargo, C. C. (2008). Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. *International Journal of Climatology*, 28(7), 893–904. <https://doi.org/10.1002/joc.1584>
- Marengo, J. A., Jimenez, J. C., Espinoza, J. C., Cunha, A. P., y Aragão, L. E. O. (2022). Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. *Scientific Reports*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04241-4>
- Marengo, J. A., Jones, R., Alves, L. M., y Valverde, M. C. (2009). Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, 29(15), 2241–2255. <https://doi.org/10.1002/joc.1863>

- Marengo, J. A., Nobre, C. A., Tomasella, J., Oyama, M. D., de Oliveira, G. S., de Oliveira, R., Camargo, H., Alves, L. M., y Brown, I. F. (2008). The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, 21(3), 495–516. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1600.1>
- Marques da Silva, R., Garcia, A., y Guimarães, C. (2023). Deforestation and fires in the Brazilian Amazon from 2001 to 2020: Impacts on rainfall variability and land surface temperature. *Journal of Environmental Management*, 326(2023), 116664. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116664>
- Marsick, A., André, H., Khelf, I., Leclère, Q., y Antoni, J. (2024). Benefits of Mann–Kendall trend analysis for vibration-based condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 216(October 2023), 111486. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111486>
- Martin, V. (2025). Climate Change Indicator Analysis. *Journal of Central Banking Theory and Practice*, 14(1), 75–94. <https://doi.org/10.2478/jcbtp-2025-0005>
- McKee, T., Doesken, N., y Jhon, K. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales* (Vol. 105, Número 0). <https://doi.org/10.1002/jso.23002>
- Medeiros, J. F., Py-Daniel, V., y Izzo, T. J. (2006). The influence of climatic parameters in the haematophagic daily activity of *Cerqueirellum argentiscutum* (Shelley & Luna Dias) (Diptera: Simuliidae) in Amazonas, Brazil. *Acta Amazonica*, 36(4), 563–568. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000400019>
- Meseguer-Ruiz, O., Serrano-Notivoli, R., Aránguiz-Acuña, A., Fuentealba, M., Nuñez-Hidalgo, I., Sarricolea, P., y Garreaud, R. (2024). Comparing SPI and SPEI to detect different precipitation and temperature regimes in Chile throughout the last four decades. *Atmospheric Research*, 297(October 2023), 107085. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107085>
- Mesia, J. (2015). *Deforestación en el eje vial Iquitos y su relacion con la variabilidad climática local a traves de los años*. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.
- Michaelsen, A. C., Briceño, L. H., Menis, R. F., Chura, N. B., Tito, F. V., Perz, S., Brown, I. F., Del Aguila, S. D., Mora, R. P., y Alarcón Aguirre, G. (2013). Regional deforestation trends within local realities: Land-cover change in Southeastern Peru 1996-2011. *Land*, 2(2), 131–157. <https://doi.org/10.3390/land2020131>
- Mohammed, R., Scholz, M., y Zounemat-Kermani, M. (2017). Temporal Hydrologic Alterations Coupled with Climate Variability and Drought for Transboundary River Basins. *Water Resources Management*, 31(5), 1489–1502. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1590-0>
- Mohammed, S., Alsafadi, K., Enaruvbe, G. O., Bashir, B., Elbeltagi, A., Széles, A., Alsalman, A., y Harsanyi, E. (2022). Assessing the impacts of agricultural drought (SPI/SPEI) on maize and wheat yields across Hungary. *Scientific Reports*, 12(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12799-w>
- Montealegre, J., y Pabon, J. (2000). La Variabilidad Climatica Interanual Asociada Al Ciclo El Niño-La Niña–Oscilacion Del Sur Y Su Efecto En El Patron

- Pluviométrico De Colombia. En *Meteorología Colombiana* (Vol. 2, Número 7). https://www.researchgate.net/publication/281605886_La_variabilidad_climatica_interanual_asociada_al_ciclo_El_Nio-La_Nia-Oscilacin_del_Sur_y_su_efecto_en_el_patrn_pluviomtrico_de_Colombia
- Moraes, A. G. de L., Watkins, A. H., Brecheisen, Z., Bowling, L. C., Pinto Cáceres, J. P., Novoa, H. M., y Cherkauer, K. A. (2023). The fast-changing climate reality of Arequipa, Peru. *International Journal of Climatology*, 43(2), 979–995. <https://doi.org/10.1002/joc.7855>
- Moreira, R. M., dos Santos, B. C., y Sanches, R. G. (2023). Trend analysis of precipitation for protected areas and pasturelands in southwest Amazônia between 1998 and 2019. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 29(November 2022), 100901. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100901>
- Naughton-Treves, L. (2004). Deforestation and Carbon Emissions at Tropical Frontiers: A Case Study from the Peruvian Amazon. *World Development*, 32(1), 173–190. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2003.06.014>
- Nedealcov, M., Răileanu, V., Sîrbu, R., y Cojocari, R. (2015). The Use Of Standardized Indicators (SPI And SPEI) In Predicting Droughts Over The Republic Of Moldova Territory. *Present Environment and Sustainable Development*, 9(2), 149–158. <https://doi.org/10.1515/pesd-2015-0032>
- Nicolau, A. P., Herndon, K., Flores-Anderson, A., y Griffin, R. (2019). A spatial pattern analysis of forest loss in the Madre de Dios region, Peru. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124045. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab57c3>
- Ogilvie, A. E. J. (2010). Historical climatology, Climatic Change, and implications for climate science in the twenty-first century. *Climatic Change*, 100(1), 33–47. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9854-1>
- Olorunfemi, I. E., Olufayo, A. A., Fasinmirin, J. T., y Komolafe, A. A. (2022). Dynamics of land use land cover and its impact on carbon stocks in Sub-Saharan Africa: an overview. *Environment, Development and Sustainability*, 24(1), 40–76. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01484-z>
- OMM. (2007). Función De Las Normales Climatológicas En Un Clima Cambiante. *Organización Meteorológica Mundial*, 61(Ginebra), 1.
- OMM N° 1203. (2017). Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas. En *Organización Meteorológica Mundial*. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4167
- OMM N°1204. (2017). *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre la generación de un conjunto definido de productos nacionales de vigilancia del clima. Edición de 2017 OMM-N° 1204* (OMM (ed.); 2017a ed.).
- Omorovie, M. (2020). The role of philosophy of ecology and religion in the face of the environmental crisis. *Journal for the study of religions and ideologies*, 19(57), 81–95.
- Oñate-Valdivieso, F., y Sendra, J. B. (2011). Estudio de tendencias climáticas y generación de escenarios regionales de cambio climático en una cuenca hidrográfica binacional en América del Sur. *Estudios Geograficos*, 72(270), 147–

172. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201107>

- Panisset, J. S., Libonati, R., Gouveia, C. M. P., Machado-Silva, F., França, D. A., França, J. R. A., y Peres, L. F. (2018). Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. *International Journal of Climatology*, 38(2), 1096–1104. <https://doi.org/10.1002/joc.5224>
- Papastefanou, P., Zang, C. S., Angelov, Z., De Castro, A. A., Jimenez, J. C., De Rezende, L. F. C., Ruscica, R. C., Sakschewski, B., Sörensson, A. A., Thonicke, K., Vera, C., Viovy, N., Von Randow, C., y Rammig, A. (2022). Recent extreme drought events in the Amazon rainforest: assessment of different precipitation and evapotranspiration datasets and drought indicators. *Biogeosciences*, 19(16), 3843–3861. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3843-2022>
- Paredes-Trejo, F., Barbosa, H. A., Giovannettone, J., Lakshmi Kumar, T. V., Thakur, M. K., y de Oliveira Buriti, C. (2021). Long-Term Spatiotemporal Variation of Droughts in the Amazon River Basin. *Water*, 13(3), 351. <https://doi.org/10.3390/w13030351>
- Parsons, L. A., LeRoy, S., Overpeck, J. T., Bush, M., Cárdenes-Sandí, G. M., y Saleska, S. (2018). The Threat of Multi-Year Drought in Western Amazonia. *Water Resources Research*, 54(9), 5890–5904. <https://doi.org/10.1029/2017WR021788>
- Patt, A. (2013). Climate risk management: Laying the groundwork for successful adaptation. En *Successful Adaptation to Climate Change: Linking Science and Policy in a Rapidly Changing World* (pp. 186–200). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9780203593882-22>
- Pattani, K. A., y Gautam, S. (2022). Introduction to Meteorology and Weather Forecasting. En *Artificial Intelligence of Things for Weather Forecasting and Climatic Behavioral Analysis* (pp. 1–15). <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-3981-4.ch001>
- Pedron, I. T., Silva Dias, M. A. F., de Paula Dias, S., Carvalho, L. M. V., y Freitas, E. D. (2017). Trends and variability in extremes of precipitation in Curitiba – Southern Brazil. *International Journal of Climatology*, 37(3), 1250–1264. <https://doi.org/10.1002/joc.4773>
- Pettitt. (1979). A Non-parametric to the Approach Problem. En *Applied Statistics* (Vol. 28, Número 2).
- Phillips, O., y Brien, R. (2017). Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations' carbon emissions. *Carbon Balance and Management*, 12(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0069-2>
- Pielke, R. A., Stohlgren, T., Parton, W., Doesken, N., Moeny, J., Schell, L., y Redmond, K. (2000). Spatial Representativeness of Temperature Measurements from a Single Site. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(4), 826–830. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0826:SPATIA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0826:SPATIA>2.3.CO;2)
- Pisconte, J. N., Vega, C. M., Sayers, C. J., Sevillano-Ríos, C. S., Pillaca, M., Quispe, E., Tejeda, V., Ascorra, C., Silman, M. R., y Fernandez, L. E. (2024). Elevated mercury exposure in bird communities inhabiting Artisanal and Small-Scale Gold Mining landscapes of the southeastern Peruvian Amazon. *Ecotoxicology*, 472–

483. <https://doi.org/10.1007/s10646-024-02740-4>

- Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1–3), 593–596. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)
- Qin, Y., Wang, D., Ziegler, A. D., Fu, B., y Zeng, Z. (2025). Impact of Amazonian deforestation on precipitation reverses between seasons. *Nature*, 639(8053), 102–108. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08570-y>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Reygadas, Y., Spera, S. A., y Salisbury, D. S. (2023). Effects of deforestation and forest degradation on ecosystem service indicators across the Southwestern Amazon. *Ecological Indicators*, 147(2023), 109996. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109996>
- Rizzo, R., Garcia, A. S., Vilela, V. M. d. F. N., Ballester, M. V. R., Neill, C., Victoria, D. C., da Rocha, H. R., y Coe, M. T. (2020). Land use changes in Southeastern Amazon and trends in rainfall and water yield of the Xingu River during 1976–2015. *Climatic Change*, 162(3), 1419–1436. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02736-z>
- Rodrigues, J., Dias, M. A., Negri, R., Hussain, S. M., y Casaca, W. (2024). A Robust Dual-Mode Machine Learning Framework for Classifying Deforestation Patterns in Amazon Native Lands. *Land*, 13(9), 1427. <https://doi.org/10.3390/land13091427>
- Salviano, M. F., Groppo, J. D., y Pellegrino, G. Q. (2016). Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(1), 64–73. <https://doi.org/10.1590/0102-778620150003>
- Scullion, J. J., Vogt, K. A., Sienkiewicz, A., Gmur, S. J., y Trujillo, C. (2014). Assessing the influence of land-cover change and conflicting land-use authorizations on ecosystem conversion on the forest frontier of Madre de Dios, Peru. *Biological Conservation*, 171, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.01.036>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Senamhi. (2009). Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030. – Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático. *Resumen técnico. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)*, Lima, 26 pp.
- SENAMHI. (2019). Caracterización espacio temporal de la sequía en los departamentos altoandinos del Perú (1981- 2018). En *Proceedings of the National Academy of Sciences* (Vol. 3, Número 1). <http://dx.doi.org/10.1016/j.bpj.2015.06.056%0Ahttps://academic.oup.com/bioinformatics/article-abstract/34/13/2201/4852827%0Ainternal-pdf/semisupervised-3254828305/semisupervised.ppt%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.str.2013.02.005%0Ahttp://dx.doi.org/10.10>

- She, X., Li, Y., Jiao, W., Sun, Y., Ni, X., y Zuo, Z. (2024). Agricultural and Forest Meteorology Varied responses of Amazon forests to the 2005 , 2010 , and 2015 / 2016 droughts inferred from multi-source satellite data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 353(April), 110051. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110051>
- She, X., Li, Y., Jiao, W., Sun, Y., Ni, X., Zuo, Z., Knyazikhin, Y., y Myneni, R. B. (2024). Varied responses of Amazon forests to the 2005, 2010, and 2015/2016 droughts inferred from multi-source satellite data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 353(January), 110051. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110051>
- Shimabukuro, Y. E., Arai, E., Duarte, V., Jorge, A., Santos, E. G. dos, Gasparini, K. A. C., y Dutra, A. C. (2019). Monitoring deforestation and forest degradation using multi-temporal fraction images derived from Landsat sensor data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 40(14), 5475–5496. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1579943>
- Smith, C., Baker, J. C. A., y Spracklen, D. V. (2023). Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation. *Nature*, 615(7951), 270–275. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05690-1>
- Spracklen, D. V., y Garcia-Carreras, L. (2015). The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophysical Research Letters*, 42(21), 9546–9552. <https://doi.org/10.1002/2015GL066063>
- Sridevi, V., Kalaivanan, D., y Kumar, M. S. (2024). Organic Farming Practices for Climate Change Mitigation and Adaptation. En *Advances in Organic Farming* (pp. 65–80). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003502715-7>
- Srivastava, S., y Ahmed, T. (2024). DLCD: Deep learning-based change detection approach to monitor deforestation. *Signal, Image and Video Processing*, 18(S1), 167–181. <https://doi.org/10.1007/s11760-024-03140-1>
- Staal, A., Flores, B. M., Aguiar, A. P. D., Bosmans, J. H. C., Fetzter, I., y Tuinenburg, O. A. (2020). Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environmental Research Letters*, 15(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab738e>
- Stickler, C. M., Coe, M. T., Costa, M. H., Nepstad, D. C., McGrath, D. G., Dias, L. C. P., Rodrigues, H. O., y Soares-Filho, B. S. (2013). Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(23), 9601–9606. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., y Wang, Y. (2015). Temperature and precipitation changes over the Loess Plateau between 1961 and 2011, based on high-density gauge observations. *Global and Planetary Change*, 132(2015), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.05.011>
- Thanvisitthpon, N., Kallawicha, K., y Chao, H. J. (2024). Introduction to meteorology, weather, and climate. En *Health and Environmental Effects of Ambient Air Pollution: Volume 1: Air Pollution, Human Health, and the Environment* (Vol. 1, pp. 303–329). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16088-2.00004-1>

- Tirivarombo, S., Osupile, D., y Eliasson, P. (2018). Drought monitoring and analysis: Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 106(July), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.07.001>
- Velásquez, M. G., Nazario Rios, J. C., Gobin, A., Pillaca, M., Thomas, E., Guerrero Barrantes, J. A., Román, U., Becerra Lira, E., Muñoz Ushñahua, A., Nascimento Herbay, P., Rodriguez Achata, L., Garate-Quispe, J., Malpica, S., Russo, R., Abril, M., Dionisio, L. F. S., Corvera Gomringer, R., y del Castillo Torres, D. (2025). Degradation, Classification, and Management of Soils From Alluvial-Gold Mine Spoils in the Southeastern Peruvian Amazon. *Land Degradation & Development*, 36(2), 375–391. <https://doi.org/10.1002/ldr.5365>
- Velayos, C., Lumbreras, S., Guitron, R., Aguirre, G., y Garcia, F. (2019). Diálogo Filosófico. En *Diálogo Filosófico*.
- Vellinga, P. (2013). P. Vellinga, “Le changement climatique, mythes, réalités et incertitudes”. *OpenEdition Journals*, 2, 0–2. <https://doi.org/10.4000/belgeo.11234>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Villegas, E., Cifuentes, A., Contreras, D., y Fernández, L. (2015). Ordenamiento territorial como instrumento , para la zonificación ambiental a traves de la Estructura Ecologica Principal , como apoyo a la formulación de los POTs y los POMCAS en Colombia. *Revista Colombiana de Geografía*, 14(2), 97–109.
- Walker, S., Alix-Garcia, J., Bartlett, A., Van Den Hoek, J., Friedrich, H. K., Murillo-Sandoval, P. J., y Isoto, R. (2022). Overlapping Land Rights and Deforestation in Uganda: 20 Years of Evidence. *SSRN Electronic Journal*, 82(June), 102701. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4090219>
- Wang, H., Chen, Y., Pan, Y., Chen, Z., y Ren, Z. (2019). Assessment of candidate distributions for SPI/SPEI and sensitivity of drought to climatic variables in China. *International Journal of Climatology*, 39(11), 4392–4412. <https://doi.org/10.1002/joc.6081>
- Wang, L., Chen, S., Zhu, W., Ren, H., Zhang, L., y Zhu, L. (2021). Spatiotemporal variations of extreme precipitation and its potential driving factors in China’s North-South Transition Zone during 1960–2017. *Atmospheric Research*, 252(December 2020), 105429. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105429>
- Weisse, M., Goldman, E., y Carter, S. (2024). ¿Cuánto bosque se perdió en 2023? <https://research.wri.org/es/gfr/latest-analysis-deforestation-trends>
- WMO. (1996). *Climatic Change: Report of a working group of the Comisión for Climatology*.
- WMO. (2012). International Glossary of Hydrology. En *IHP/OHP-Berichte* (Número 12).
- Yan, X. (2009). *Linear Regression Analysis: Theory and Computing*, World Scientific

(pp. 1–7).

- Zakharova, E., Liga, M., y Sergeev, D. (2015). Constructing Philosophy of Environmental Education in Contemporary Russia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 214(June), 1181–1185. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.739>
- Zelege, T. T., Zakaria Wani Lukwasa, A., Ture Beketie, K., y Yayeh Ayal, D. (2024). Analysis of spatio-temporal precipitation and temperature variability and trend over Sudd-Wetland, Republic of South Sudan. *Climate Services*, 34, 100451. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2024.100451>
- Zevallos, J., y Lavado-Casimiro, W. (2022). Climate Change Impact on Peruvian Biomes. *Forests*, 13(238). <https://doi.org/10.3390/f13020238>
- Zhao, Y., Zou, X., Cao, L., Yao, Y., y Fu, G. (2018). Spatiotemporal variations of potential evapotranspiration and aridity index in relation to influencing factors over Southwest China during 1960–2013. *Theoretical and Applied Climatology*, 133(3–4), 711–726. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2216-4>
- Zhu, Z., Duan, W., Zou, S., Zeng, Z., Chen, Y., Feng, M., Qin, J., y Liu, Y. (2024). Spatiotemporal characteristics of meteorological drought events in 34 major global river basins during 1901–2021. *Science of the Total Environment*, 921(November 2023), 170913. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170913>

ANEXOS

Anexo 01: ficha de características de las imágenes satelitales utilizadas para deforestación y clasificación de uso de suelo.

DATOS DE LA IMAGEN	ID de Imagen	Fecha de adquisición
1990	1 1 LT05 002068 19900520	20/05/1990
1990	1 1 LT05 003068 19900520	20/05/1990
1990	1 1 LT05 003069 19900520	20/05/1990
1990	1 1 LT05 002069 19900801	1/08/1990
1990	1 1 LT05 004068 19900527	27/05/1990
1990	1 1 LT05 002068 19900630	30/06/1990
1991	1 1 LT05 002069 19910329	29/03/1991
1991	1 1 LT05 002068 19910329	29/03/1991
1991	1 1 LT05 003068 19910216	16/02/1991
1991	1 1 LT05 003069 19910523	23/05/1991
1991	1 1 LT05 004068 19910701	1/07/1991
1992	1 1 LT05 003068 19920626	26/06/1992
1992	1 1 LT05 003069 19920423	23/04/1992
1992	1 1 LT05 003069 19920423	23/04/1992
1992	1 1 LT05 002068 19920315	15/03/1992
1992	1 1 LT05 002069 19920212	12/02/1992
1992	1 1 LT05 004068 19920210	10/02/1992
1993	1 1 LT05 003069 19930613	13/06/1993
1993	1 1 LT05 002068 19930606	6/06/1993
1993	1 1 LT05 002069 19930622	22/06/1993
1993	1 1 LT05 004068 19930706	6/07/1993
1993	1 1 LT05 003068 19930512	12/05/1993
1994	1 1 LT05 002068 19940727	27/07/1994
1994	1 1 LT05 003069 19940515	15/05/1994
1994	1 1 LT05 003068 19940616	16/06/1994
1995	1 1 LT05 003069 19950619	19/06/1995
1995	1 1 LT05 003068 19950705	5/07/1995
1995	1 1 LT05 002069 19950425	25/04/1995
1995	1 1 LT05 002068 19950409	9/04/1995
1995	1 1 LT05 003069 19950619	19/06/1995
1995	1 1 LT05 004068 19950423	23/04/1995
1996	1 1 LT05 003068 19960605	5/06/1996
1996	1 1 LT05 004068 19960612	12/06/1996
1997	1 1 LT05 003068 19970624	24/06/1997
1997	1 1 LT05 002068 19970225	25/02/1997
1997	1 1 LT05 003069 19970624	24/06/1997
1997	1 1 LT05 003068 19970624	24/06/1997
1998	1 1 LT05 004068 19970818	18/08/1997

1998	1 1 LT05 003068 19980627	27/06/1998
1998	1 1 LT05 003069 19980526	26/05/1998
1998	1 1 LT05 004068 19980618	18/06/1998
1998	1 1 LT05 002068 19980604	4/06/1998
1997	1 1 LT05 002069 19980212	12/02/1998
1999	1 1 LT05 002069 19970225	25/02/1997
1999	1 1 LT05 003069 19990529	29/05/1999
1999	1 1 LT05 003068 19990427	27/04/1999
1999	1 1 LT05 003069 19990709	9/07/1999
1999	1 1 LT05 002068 19990522	22/05/1999
2000	1 1 LT05 004068 19991027	27/10/1999
2000	1 1 LT05 003068 20000904	4/09/2000
2000	1 1 LT05 003069 20000515	15/05/2000
2000	1 1 LT05 002069 20000524	24/05/2000
2000	1 1 LT05 002068 20000202	2/02/2000
2001	1 1 LT05 003069 20000515	15/05/2000
2001	1 1 LT05 003069 20010518	18/05/2001
2002	1 1 LT05 003068 20010603	3/06/2001
2003	1 1 LT05 003068 20020113	13/01/2002
2003	1 1 LT05 003069 20030711	11/07/2003
2003	1 1 LT05 003068 20030727	27/07/2003
2004	1 1 LT05 002069 20030704	4/07/2003
2004	1 1 LT05 004068 20040618	18/06/2004
2004	1 1 LT05 003068 20040119	19/01/2004
2004	1 1 LT05 002068 20040128	28/01/2004
2005	1 1 LT05 003069 20040814	14/08/2004
2005	1 1 LT05 002069 20050607	7/06/2005
2006	1 1 LT05 003068 20050630	30/06/2005
2006	1 1 LT05 004068 20060624	24/06/2006
2006	1 1 LT05 002068 20060306	6/03/2006
2006	1 1 LT05 003068 20060430	30/04/2006
2007	1 1 LT05 003069 20060516	16/05/2006
2007	1 1 LT05 004068 20070526	26/05/2007
2007	1 1 LT05 002068 20070512	12/05/2007
2007	1 1 LT05 003068 20070228	28/02/2007
2008	1 1 LT05 003069 20070823	23/08/2007
2008	1 1 LT05 003068 20080419	19/04/2008
2008	1 1 LT05 002069 20080514	14/05/2008
2008	1 1 LT05 003069 20080505	5/05/2008
2009	1 1 LT05 004068 20080901	1/09/2008
2009	1 1 LT05 003068 20090609	9/06/2009
2009	1 1 LT05 002069 20090906	6/09/2009
2010	1 1 LT05 003069 20090524	24/05/2009
2010	1 1 LT05 003069 20100723	23/07/2010
2010	1 1 LT05 002068 20100213	13/02/2010

2010	1 1 LT05 003068 20100612	12/06/2010
2011	1 1 LT05 003069 20100612	12/06/2010
2011	1 1 LT05 004068 20100502	2/05/2010
2011	1 1 LT05 003069 20110530	30/05/2011
2011	1 1 LT05 003068 20110615	15/06/2011
2011	1 1 LT05 003069 20110530	30/05/2011
2011	1 1 LT05 002069 20110421	21/04/2011
2011	1 1 LT05 003068 20110530	30/05/2011
2011	1 1 LT05 003069 20110602	2/06/2011
2012	1 1 LT05 003069 20110615	15/06/2011
2012	1 1 LT05 003068 20120611	11/06/2012
2012	1 1 LT05 002068 20120628	28/06/2012
2013	1 1 LT05 004068 20120601	1/06/2012
2013	1 1 LT05 003069 20130703	3/07/2013
2013	1 1 LT05 003068 20130710	10/07/2013
2014	1 1 LT05 004068 20130825	25/08/2013
2014	1 1 LT05 003068 20140530	30/05/2014
2014	1 1 LT05 002068 20140506	6/05/2014
2015	1 1 LT05 003069 20140701	1/07/2014
2016	1 1 LT05 004068 20150718	18/07/2015
2016	1 1 LT05 003068 20160722	22/07/2016
2017	1 1 LT05 003069 20160724	24/07/2016
2018	1 1 LT05 003068 20170711	11/07/2017
2018	1 1 LT05 004068 20180630	30/06/2018
2019	1 1 LT05 003069 20180601	1/06/2018
2019	1 1 LT05 003068 20190721	21/07/2019
2020	1 1 LT05 004068 20190930	30/09/2019
2021	1 1 LT05 002068 20200620	20/06/2020
2021	1 1 LT05 003068 20210730	30/07/2021
2022	1 1 LT05 003069 20210724	24/07/2021
2023	1 1 LT05 004068 20220102	2/01/2022
2023	1 1 LT05 003068 20230704	4/07/2023
2023	1 1 LT05 003069 20230701	1/07/2023
2023	1 1 LT05 004068 20230819	19/08/2023
2023	1 1 LT05 003068 20230917	17/09/2023
2023	1 1 LT05 002068 20231023	23/10/2023

Anexo 02: ficha de solicitud de información de las variables climáticas (precipitación y temperatura).

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

Puerto Maldonado, 25 de abril del 2024

CARTA N° 001-2024/ASAA

Señor: Ing. Zenón Huamán Gutiérrez
Director Zonal 12 - SENAMHI

ASUNTO: Solicito información

Es grato dirigirme a usted para saludarlo cordial para informarle que, en calidad de estudiante del programa de doctorado en Ciencias Ambientales en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, estoy llevando a cabo la investigación titulada "ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA RELACIÓN ENTRE DEFORESTACIÓN, SEQUÍAS Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA PROVINCIA DE TAMBOPATA, 1990 – 2022". En este contexto, quisiera solicitar su colaboración para obtener meteorológica referente a las variables de precipitación diaria, temperatura máxima y mínima diaria correspondientes al periodo 1970 – 2022, específicamente de la estación meteorológica de Puerto Maldonado. Agradecería mucho que pudiera facilitarme dicha información. Para cualquier comunicación adicional, puede contactarme a través del correo electrónico: andrea.aucahuasi@unmsm.edu.pe o al teléfono N° 950156855.

Dado mi compromiso y mi dedicación al campo de las ciencias ambientales, esta investigación representa un paso significativo en mi desarrollo profesional y contribuirá al avance del conocimiento en esta área. Por lo tanto, le agradecería enormemente cualquier asistencia que pueda brindarme al facilitarme los datos meteorológicos solicitados. Adjunto ficha de matrícula correspondiente al quinto semestre.

Agradezco de antemano su atención y colaboración en este importante proyecto.

AUCAHUASI ALMIDON ANDREA SUSANS
ESTUDIANTE - 22167401
DNI: 47660984



Señor(a)
**DIRECTOR(A) ZONAL DEL SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL
PERU - SENAMHI**
Presente.-

ANDREA SUSANS AUCAHUASI ALMIDON
(Nombres y Apellidos)

JR. JORGE CHAVEZ, AH LA MONTADA AZUL, MZ A LT 5
(Dirección)

con N° DNI: 47660984 Telf.: 950156855 E-mail Andrea.aucahuasi@

Universidad/ Instituto:. UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Carrera/ DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Ante usted me presento y expongo;

Que, a la fecha vengo cursando el quinto semestre del doctorado en ciencias ambientales y vengo desarrollando el proyecto de tesis "ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA RELACIÓN ENTRE DEFORESTACIÓN, SEQUÍAS Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA PROVINCIA DE TAMBOPATA, 1990-2022 y el motivo de la solicitud es para desarrollar los objetivos trazados de la presente investigación.

Solicito la siguiente información:

ESTACIÓN	PARÁMETROS	ESCALA	PERÍODOS
Puerto Maldonado	Temperatura media	Mensual	1970-2023
Puerto Maldonado	Temperatura mínima	Mensual	1970-2023
Puerto Maldonado	Temperatura máxima	Mensual	1970-2023
Puerto Maldonado	Precipitación	Mensual	1970-2023

Si bien es cierto el periodo establecido corresponde a 1990-2022, sin embargo, se pretende alizar el incremento de los parámetros de precipitación y temperatura desde el periodo 1970 para tener resultados cercanos a cambio climático.

Por lo expuesto, agradeceré a usted atender lo solicitado.

Puerto Maldonado, 08 de mayo del 2024


.....
ANDREA SUSANS AUCAHUASI
ALMIDON

ANEXO 04: FORMATO DE CARTA DE COMPROMISO

CARTA DE COMPROMISO

Yo, Ancheu Quichuan Dimidón
identificado (a) con DNI N° 47660984, alumno de la
Carrera doctorado en ciencias ambientales, me comprometo a cumplir con
lo siguiente:

Entrega de un (01) ejemplar de mi trabajo de Tesis a la Biblioteca del Servicio
Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI, al término y debida
sustentación del mismo.

Puerto Maldonado 09 de mayo del 2024



Ancheu Quichuan Dimidón

Firma del Usuario

PROCEDIMIENTOS PARA OTORGAR INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA EN EL SENAMHI A
ESTUDIANTES, TESISISTAS, MAESTRISTAS, DOCTORADO E INVESTIGADORES

ANEXO 03: FORMATO DE DECLARACIÓN JURADA

DECLARACION JURADA

Yo, Andrea Susana Avelhuasi Almidon identificado (a) con DNI
Nº 47660984 con domicilio en Jr. Jorge Chavez - en el Distrito de
Tambopata Provincia de Tambopata Departamento
Madre de Dios



DECLARO BAJO JURAMENTO, QUE



La información hidrometeorológica proporcionada por SENAMHI, será de uso exclusivo de
mi trabajo/proyecto/tesis titulado (a) "Análisis multi temporal de la
relación entre deforestación, aguas y clima" de la Universidad/Instituto
bilidad climática - Universidad Nacional
Mayor de San Marcos.



Puerto Maldonado de mayo del 2024

Andrea

Firma del Usuario

Remite información

2 mensajes

Martha Huillca Condor (DZ12) <mhuillca@senamhi.gob.pe>

6 de junio de 2024, 15:54

Para: ANDREA SUSANS AUCAHUASI ALMIDON <andrea.aucahuasi@unmsm.edu.pe>

Estimada Sra. Andrea

Reciba el cordial saludo de la Dirección Zonal 12 del SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ - SENAMHI, a fin de remitirle los datos disponibles de la estación Puerto Maldonado, comprendidas en el expediente N° 2024-0004537, datos de escala mensual de las variables de precipitación, Temperatura, período (según la disponibilidad); cabe indicar que bajo la modalidad de servicio gratuito es por única vez. **A la espera de su confirmación en cuanto a la recepción del presente** y hacerle recordar que una vez concluida y aprobada su TESIS/INVESTIGACIÓN hacer llegar un ejemplar para nuestra biblioteca especializada.

Cabe señalar que de acuerdo a los procedimientos establecidos en la Directiva N° 003-2016-SENAMHI-SG-OPP-UM, para la atención a estudiantes, tesisistas e investigadores bajo la modalidad de servicio gratuito, dichos usuarios firman una DECLARACIÓN JURADA, que tiene un firme compromiso LEGAL de entregar un ejemplar de su tesis (empastada y digital) para nuestra biblioteca. En ese sentido estaremos atentos al cumplimiento de dicho acuerdo, saludos.

Atte.

Martha H.
DZ12 SENAMHI