

Incidence of global climate change on extreme values of the main climatic variables in the Guánica - La Rusia páramo.

Incidencia del cambio climático global sobre valores extremos de las principales variables climáticas en el páramo Guantiva – La Rusia.

Ivanova, Y.¹; Castellanos, J.D. ²; García M.A.³

¹**M.Sc. Yulia Ivanova.** Programa de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada. e-mail: yulia.ivanova@unimilitar.edu.co . Enlace ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8836-5175>

²**Ing. Julian David Castellanos Gutiérrez. Ingeniero Civil.** Programa de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada. julian.castellanos@unimilitar.edu.co . Enlace ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3143-3744>

³**Ing. Milton Augusto García Mora. Ingeniero Civil.** Programa de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada. milton.garcia@unimilitar.edu.co . Enlace ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3360-9599>

Universidad Militar Nueva Granada
Carrera 11 N° 101-8. Bogotá D.C, Colombia.
Tel: 650 0000, Ext. 1276 y 1277
E-mail: yulia.ivanova@unimilitar.edu.co

Recibido: 21/01/2025 / Aceptado: 27/04/2025

Resumen

Los páramos son ecosistemas únicos de la región septentrional de Sudamérica que se caracterizan por su amplia riqueza natural y biodiversidad. En parte, estos se posibilitan por variabilidad climática que puede ser afectada por el fenómeno del cambio climático. El presente estudio indaga acerca de la incidencia del cambio climático sobre el clima regional en el páramo Guantiva – La Rusia a través de los análisis estadísticos de las pruebas paramétricas. Se identificó que las temperaturas máximas tienden a incrementar con un gradiente de hasta 0.8

°C/10 años y precipitaciones mensuales en los meses lluviosos crecen en hasta 20 mm/10 años, mientras que las demás variables no confirmaron un patrón de cambio. Los cambios en los patrones climáticos identificados pueden provocar el cambio en los pisos térmicos del páramo, y modificación de coberturas vegetales naturales conjunto con las transformaciones antrópicas presentes en el territorio.

Palabras clave: Páramo, Cambio Climático, Variabilidad climática, Temperaturas extremas.

Abstract

The paramos are unique ecosystems in the northern region of South America, characterized by their vast natural wealth and biodiversity. In part. These are made possible by climatic variability that can be affected by the phenomenon of climate change. This study investigates the impact of climate change on the regional climate in the Guantiva – La Rusia páramo through statistical analysis of parametric tests. It was identified that maximum temperatures trend to increase with a gradient of up to 0.8 °C/10 years and monthly precipitation in the rainy months increases by up to 20 mm/10 years, while their variables did not confirm pattern of change. The changes in the identified climatic patterns can cause changes in the thermal floors of the paramo, and modification of natural vegetation covers together with the anthropic transformations present in the territory.

Keywords: Paramo, Climate change, Climate variability, Extreme temperatures.

1. INTRODUCCIÓN

La manifestación del cambio climático global impacta variabilidad de diferentes parámetros climáticos (Kordun & Makhinko, 2024) como precipitaciones (Silva *et al.*, 2024), temperaturas (Picornell *et al.*, 2025), evaporación (Zhang *et al.*, 2024), entre otras. La complejidad del efecto del cambio climático radica en que este no solo incide sobre el cambio de los valores medios de las variables climáticas, sino sobre sus valores extremos (Li *et al.*, 2024), (Liu *et al.*, 2024) y su variabilidad. Estos cambios (Ruiz *et al.*, 2012) generan repercusiones sobre los sectores productivos dependientes del clima como agricultura (Waqas *et al.*, 2025), producción de hidroenergía (Wu *et al.*, 2024), entre otros, así como sobre los servicios ecosistémicos de la naturaleza (Su *et al.*, 2024).

Colombia no es ajena a los efectos del cambio climático global y es demostrado

desde diferentes áreas de saber que los cambios en los patrones climáticos afectan varios servicios ecosistémicos asociados como provisión (Schlattmann *et al.*, 2022) y regulación de diferentes procesos naturales (Suescún *et al.*, 2023). A los efectos del cambio climático global se suma el impacto de las actividades humanas que transforman paisaje natural, alterando funcionalidad ecosistémica del ambiente (Murad *et al.*, 2024).

El país es el segundo por la disponibilidad de los ecosistemas de páramos (Peyre *et al.*, 2021) que actualmente enfrentan un proceso de modificación de coberturas vegetales, producto del cambio climático global (Diazgranados *et al.*, 2021) y de las actividades antrópicas (Araujo & Molina, 2021). Según algunos estudios, el cambio climático fuerza la alteración de los pisos térmicos (Hofstede *et al.*, 2014) que, en su parte, incide sobre el comportamiento de las coberturas vegetales. Aunque hay

diferentes estudios en el tema, a veces la única certeza de los efectos del cambio climático es el aumento de temperaturas medias, pero el efecto de este impulsor sobre la pluviosidad, temperaturas mínimas y máximas no es claro y, a menudo, tiene comportamiento local (Hofstede *et al.*, 2014). Se sabe que la biodiversidad de los páramos es vulnerable al cambio climático porque incrementos de temperatura, humedad y mayor tasa de radiación solar causan adaptaciones fisiológicas y fenológicas, movimiento y/o extinción de diferentes especies. En este orden de ideas, a mayor desplazamiento de cinturones altitudinales, se espera un mayor desplazamiento de biomas y, a mayor altitud de ecosistemas de páramo, mayor será la afectación. Esto, en su parte, rompe corredores ecológicos, vulnerando la existencia de diferentes especies de flora y fauna.

Según algunos modelos predictivos, se espera un reemplazo de las coberturas del páramo por el bosque alto andino, aunque este escenario es incierto por la existencia de la demanda de tierras para el desarrollo agrícola en el país. A pesar de la incertidumbre existente con relación a los impactos del cambio climático global sobre la funcionalidad ecosistémica de los páramos, es innegable que este representa una amenaza.

En esta oportunidad, se analizó la incidencia del cambio climático global sobre el clima regional del páramo Guantiva – La Rusia. Este estudio se justifica porque este complejo de páramos es uno de los más extensos en el país, con un casi 70 % de su superficie de ecosistemas naturales (IAvH, 2024) que

alberga una importante biodiversidad, cuya existencia en parte depende de la variabilidad climática natural. No obstante, este páramo presenta unas modificaciones del paisaje natural, posiblemente asociado al efecto del cambio climático y actividades humanas (Olaya-Angarita *et al.*, 2019).

2. METODOLOGIA

2.1 Localización del paramo

El páramo Guantiva - La Rusia está localizado en la cordillera oriental de los Andes colombianos, abarcando territorios de los departamentos de Boyacá y Santander. Este ecosistema ocupa un área que incluye 23 municipios (IAvH, 2020), entre los que se destacan Duitama, Paipa, Soatá y Chiscas, junto con otras localidades más pequeñas que dependen directamente de los servicios ecosistémicos y recursos naturales que proporciona el páramo. Con una altitud promedio de entre 3.000 y 4.000 metros sobre el nivel del mar, este páramo posee características climáticas y ecológicas únicas, cruciales para la regulación de los recursos hídricos y la preservación de la biodiversidad regional.

El complejo de páramo cuenta con varias áreas protegidas que subrayan su importancia ecológica. Entre ellas se encuentra el Santuario de Flora y Fauna Guanentá – Alto Río Fonce, el área de Ranchería Paipa, orientada a proteger los recursos hídricos y la flora endémica, y el sector de Rusia, enfocado específicamente en la conservación de las fuentes de agua. Este ecosistema representa el 18,3% del área total de los páramos de Colombia, lo que lo convierte

en uno de los más relevantes del país (Corpoboyaca, 2015). La Figura 1 detalla la ubicación geográfica de este importante complejo natural.

El páramo Guantiva-La Rusia, se caracteriza por su clima frío y húmedo, con una temperatura promedio anual que ronda los 9°C, alcanzando máximas de 14°C y mínimas de 5°C (IAvH, 2024). De acuerdo con la clasificación climática de Caldas-Lang, el ecosistema presenta tres variaciones climáticas predominantes: el páramo bajo semihúmedo, localizado principalmente en la región norte y las vertientes orientales; el páramo bajo húmedo, presente en la vertiente

occidental; y el clima frío semihúmedo, característico de la zona oriental.

Este ecosistema juega un papel esencial en la regulación hídrica de la región, ya que constituye una importante fuente de agua. En su territorio nacen numerosas quebradas y más de 80 lagunas de origen glaciar, entre las que destacan la laguna Brava, la laguna Salitre, la laguna El Boquerón, la laguna de Moreno, la laguna El Santuario, entre otras. Estas lagunas son fundamentales para la conformación de una extensa red hídrica que sostiene tanto los ecosistemas aledaños como las comunidades humanas que dependen de estos recursos.

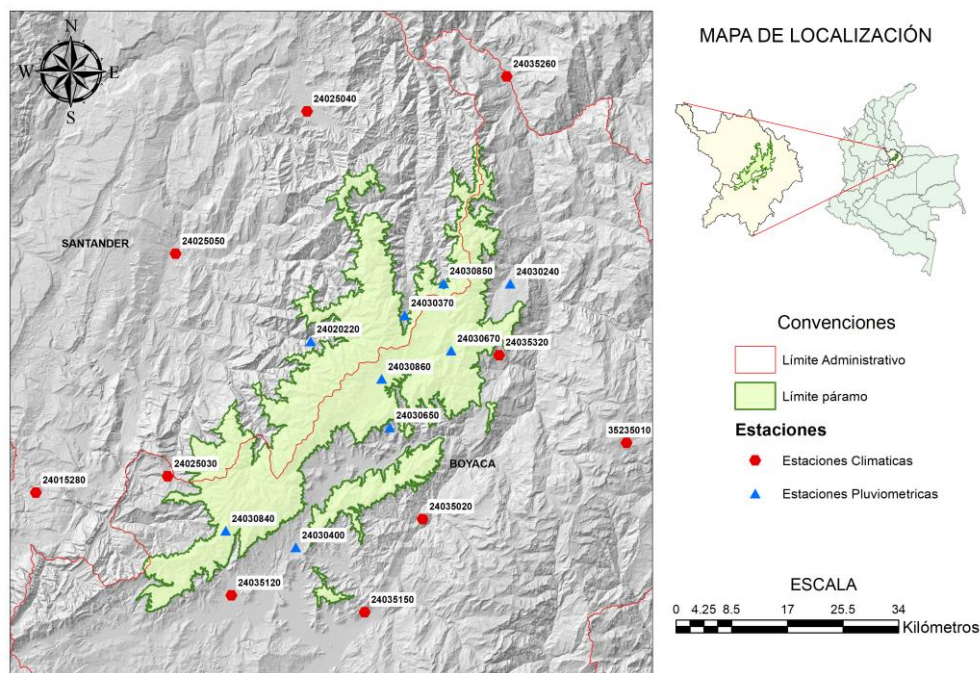


Figura 1. Mapa de localización del páramo Guantiva –La Rusia y estaciones meteorológicas cercanas.
Fuente: Autores.

En cuanto a la biodiversidad, el páramo cuenta con una destacada cobertura vegetal compuesta por frailejones, musgos, líquenes y una flora endémica única que se adapta a las condiciones extremas de este entorno. Este tipo de

vegetación no solo contribuye a la captación y regulación del agua, sino que también alimenta sistemas hídricos subterráneos y superficiales. En las laderas más bajas, los bosques de niebla albergan una diversidad biológica

extraordinaria, con especies únicas de aves, mamíferos y anfibios. Según datos recientes, el ecosistema sostiene 578 especies de flora, 169 especies de aves, 23 especies de anfibios y 24 especies de invertebrados (Renjifo *et al.*, 2014).

La administración del páramo Guantiva-La Rusia está dividida entre dos entidades regionales: Corpoboyacá, que tiene bajo su jurisdicción el 61% del área, y la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS), encargada del 39% restante. Esta distribución resalta la importancia de una gestión articulada entre diferentes territorios, garantizando la conservación de este ecosistema estratégico. La gobernanza se basa en una cooperación activa entre instituciones gubernamentales y organizaciones no gubernamentales, promoviendo prácticas sostenibles que buscan equilibrar las necesidades de desarrollo de las comunidades locales con la preservación de los servicios ecosistémicos.

Históricamente, las comunidades que habitan en el páramo han basado su subsistencia en actividades como la agricultura tradicional, el pastoreo de ovejas y la recolección de plantas medicinales. Estas prácticas, aunque fundamentales para la economía local, han sido adaptadas en los últimos años hacia enfoques más sostenibles. Este cambio tiene como objetivo reducir el impacto ambiental y garantizar un equilibrio entre el uso de los recursos naturales y la conservación del ecosistema.

En este sentido, el páramo Guantiva-La Rusia no solo se destaca por su riqueza natural sino, también, por su capacidad

para ofrecer servicios ecosistémicos esenciales, como el suministro de agua y regulación de diferentes ciclos naturales que pueden ser vulnerados por los efectos del cambio climático global.

2.2 Pasos Metodológicos

Como se había mencionado anteriormente, los efectos del cambio climático global se reflejan sobre el comportamiento de valores medios y extremos de diferentes variables climáticas. Este cambio influye a las transformaciones de pisos térmicos que incentivan, en su parte, transformaciones fisiológicas y fenológicas de diferentes especies. Para evaluar si en la zona del páramo Guantiva - Rusia se pueden identificar patrones temporales y espaciales del cambio de los principales parámetros climáticos, se propuso la metodología que se estructura en tres etapas fundamentales. La primera etapa, representada en color morado, se centra en la recolección de los insumos - base para desarrollar el análisis estadístico. En la segunda etapa, identificada en color azul, se ejecutan los procedimientos estadísticos que permitan evaluar la incidencia del cambio climático sobre el clima regional. La tercera etapa, destacada en color verde, resume los hallazgos en tres aspectos clave: los patrones temporales de cambio, que muestran la evolución de las variables climáticas a lo largo del tiempo; los patrones espaciales de cambio, que revelan las variaciones regionales; y la incidencia del cambio climático sobre el clima local. Esta etapa integra los análisis anteriores para ofrecer una visión integral del cambio climático sobre variables climáticas. Ver Figura 2.

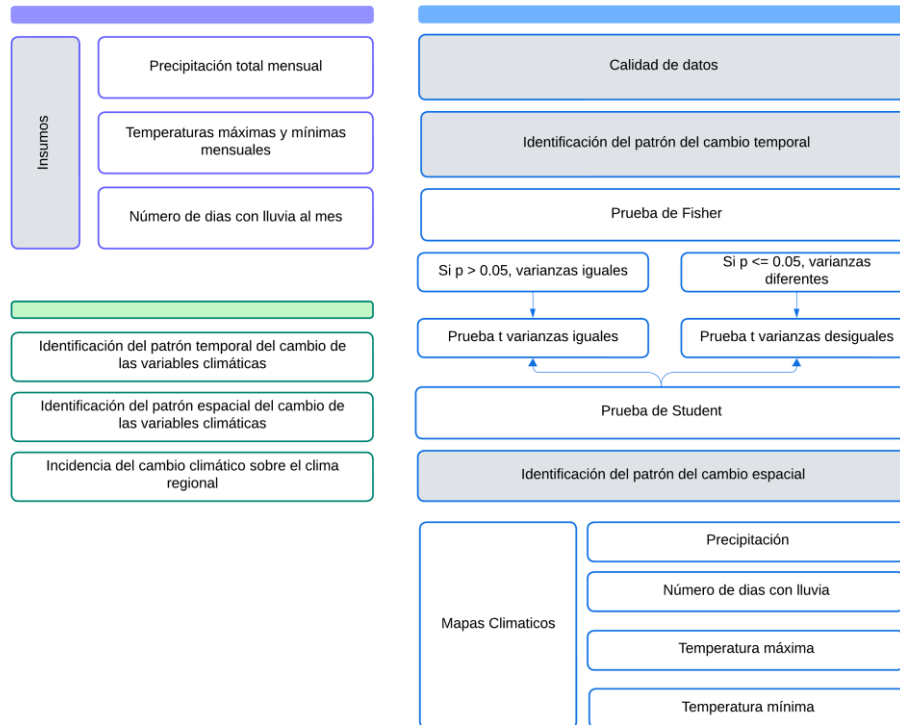


Figura 2. Metodología de Investigación. Fuente: Autores.

Los insumos de la primera etapa se enfocan en la recolección de las series históricas relacionadas con variables climáticas como precipitación total mensual, temperaturas mínimas y máximas, así como número de días con lluvia. Esta información se obtuvo de la página oficial del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM, 2024).

En la segunda etapa metodológica, se llevó a cabo el análisis de identificación de los patrones del cambio temporal y espacial de las variables climáticas. Para realizar los estudios, se utilizaron datos provenientes de 18 estaciones climáticas para las variables de precipitaciones y 10 estaciones para las temperaturas, como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones climáticas usadas en el estudio.

N	Código	Variable	Nombre	h,	Tipo
---	--------	----------	--------	----	------

		P, mm	T, °C		msnm	
1	24015280	x	x	Gambita	1900	CO
2	24020220	x		Las Pavas	2625	PM
3	24025030	x	x	La Sierra	2700	CO
4	24025040	x	x	Escuela Mogotes	1667	CO
5	24025050	x	x	Charala	1350	CO
6	24030240	x		Susacón	2550	PM
7	24030370	x		Susa	3080	PG
8	24030400	x		Santa Rosa Viterbo	2690	PM
9	24030650	x		Tutasa	2833	PM
10	24030670	x		Covarachia	2400	PM
11	24030840	x		El Aserrio	2600	PM
12	24030850	x		La Capilla	2800	PM
13	24030860	x		Cusagui	2950	CO
14	24035120	x	x	Bethitiva	2575	CO
15	24035150		x	Surbata Bonza	2485	AM
16	24035260	x	x	Belencito	2530	CP
17	24035320	x	x	Capitalejo	1160	CO
18	24035430	x	x	Sativanorte	2594	CO
19	35235010	x	x	Andalucía	3265	CP

Nota. PM- Pluviométrica, PG- Pluviográfica, CO- Climática Ordinaria, CP- Climática Principal, AM- Agrometeorológica

Fuente: Autores.

El análisis se realizó mes por mes, ya que algunas variables pueden presentar una mayor sensibilidad a los efectos del cambio climático global en ciertos meses del año.

El primer paso de la segunda etapa metodológica consistió en identificación del cambio de variabilidad temporal de las variables climáticas a través de las pruebas estadísticas de Fisher y Student, utilizadas para evaluar tanto la variabilidad como las diferencias entre medias (análisis tendencial). Aunque estas pruebas parten del supuesto de normalidad de los datos, es importante considerar que, como señala (Fisher, 1922), el rechazo de puntos considerados atípicos no implica necesariamente datos erróneos, sino que estos pueden no ajustarse a una distribución normal. Este aspecto fue considerado durante la validación de los resultados.

La prueba de Fisher fue utilizada para evaluar la homogeneidad de las varianzas entre períodos mensuales, mediante el cálculo del estadístico el cual se representa en la ecuación (2):

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (1)$$

Donde S_1^2 y S_2^2 corresponden a las varianzas mensuales de los períodos comparados. Este análisis fue clave para identificar diferencias significativas en la variabilidad climática.

Por su parte, la prueba de Student se aplicó para analizar diferencias en las medias mensuales entre los períodos evaluados, permitiendo identificar si estas eran estadísticamente significativas. El cálculo del estadístico t se realizó mediante la ecuación (2):

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (2)$$

Donde $\bar{X}_1$ Y $\bar{X}_2$ representan las medias mensuales de los períodos analizados, S_1^2 y S_2^2 las varianzas, y n_1 y n_2 los tamaños muestrales correspondientes. Como indica (Student, 1908), esta prueba es particularmente útil en análisis con muestras segmentadas, ya que permite identificar si las diferencias observadas entre períodos son atribuibles al azar o reflejan cambios significativos.

La significancia de las pruebas de Student y Fisher se comprobó a través del estadístico P – valor con el nivel de significancia de 0.05. Como resultado de las pruebas aplicadas, para cada estación, cada variable climática y sus valores mes por mes, se construyeron matrices numéricas con los resultados que facilitaron la visualización de posibles patrones, ayudando a identificar tendencias y comportamientos recurrentes en las series mensuales.

El segundo paso de la segunda etapa metodológica consistió en la identificación de los patrones espaciales del cambio de las variables climáticas. Para este fin, desde las matrices construidas en el primer paso de la segunda etapa, se seleccionó el mes que representó un patrón más claro del cambio temporal de los parámetros del clima y para este mes para cada variable se construyó su gradiente de cambio. Los valores de los gradientes se usaron para la construcción de los mapas temáticos que representaron la distribución espacial de los gradientes de cambio de precipitaciones mensuales, número de días con lluvia mensual y temperaturas máximas y mínimas mensuales. Estos mapas permitieron correlacionar los patrones temporales

detectados con las variaciones espaciales, proporcionando una visión integral del comportamiento climático en el páramo Guantiva – La Rusia.

3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Inicialmente, se recopilaron los insumos expuestos en la Tabla 1 de las estaciones cercanas al páramo mostradas en la Figura 1. A partir del compilado de registros obtenidos se determinó un periodo de estudio unificado para todas las variables comprendido entre 1983 y 2022. De igual forma, se revisó la calidad de los datos con el fin de evitar valores vacíos y asegurar un periodo consecutivo para la aplicación de las pruebas estadísticas.

Posterior a ello, se realizó el análisis de variación temporal de las variables climáticas a través de las pruebas de Fisher y t - Student con el fin de evaluar si las series temporales presentan un cambio estadísticamente significativo en su varianza y valores medios. Para dicho fin, a las estaciones con cambios que demostraron ser significativos y crecientes al nivel de significancia anteriormente expuesto se les asignó el valor de 1, las que demostraron cambio significativo decreciente el valor de -1 y las estaciones que no demostraron ningún tipo de cambio significativo se les impuso el valor de 0, todo esto tanto para la varianza como para los valores medios. Los resultados de

ambos análisis se presentan en las Tablas de 2 a 5.

Los resultados del análisis temporal de precipitaciones obtenidos por la prueba de Fisher no dejan ver un patrón claro de cambio en la varianza. Sin embargo, los meses de marzo y junio se caracterizan por tener el mayor incremento en la variabilidad, lo cual indica un posible aumento en la precipitación en estas épocas. Por el contrario, agosto, octubre y diciembre demostraron ser las temporalidades con los mayores cambios negativos en la variabilidad, reflejando así la disminución de lluvias durante estos periodos. A nivel general, las estaciones 24030650 y 2403240 fueron las que reflejaron mayor disminución en las lluvias, mientras que la 24020220 fue la que se destacó por presentar el mayor incremento en la variabilidad de las precipitaciones, aclarando que solo se presenta en algunos meses y por lo tanto no es un patrón evidente. En la Tabla 2 se presenta el resumen de la prueba Fisher y t-Student para las series de precipitaciones totales mensuales.

Con relación al análisis tendencial por medio de la prueba t - Student tampoco se observa un patrón manifiesto. No obstante, las estaciones 24030240 y 24030650 muestran una clara tendencia hacia la disminución de precipitaciones en varios meses, demostrando de esta forma en esas zonas particulares, reducción en las lluvias.

Tabla 2. Resumen de la prueba Fisher y t - Student para precipitaciones totales mensuales.

Prueba Fisher												
Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
24015280	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
24020220	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
24025030	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Prueba Student												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	

Prueba Fisher												
24025040	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	0
24025050	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0
24030240	0	-1	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0
24030370	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	-1
24030400	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
24030650	-1	-1	0	0	0	1	-1	-1	0	-1	0	0
24030670	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
24030840	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
24030850	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
24030860	0	0	1	0	-1	0	0	-1	0	-1	0	0
24035120	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
24035260	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24035320	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1
24035430	0	0	1	0	0	1	1	-1	-1	0	0	0
35235010	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Prueba Student												
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0
0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	-1	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	-1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autores.

Según los resultados de la aplicación de la prueba Fisher, en el número de días con lluvia, no es evidente un patrón hacia el incremento o disminución de la variabilidad de esta variable. Sin embargo, los mayores cambios se registran por las estaciones en los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre, periodos que para la zona de estudio corresponden a las épocas húmedas, predominando en estos un patrón hacia el incremento de

número de días con lluvia. Respecto a las épocas secas y especialmente en enero y febrero no se observa ningún cambio en la variabilidad. Por último, cabe anotar que cuatro de las dieciocho estaciones no manifestaron ningún cambio en el comportamiento de la varianza. En la Tabla 3 se presenta el resumen del análisis de la prueba Fisher y t-Student aplicada a las series de número de días con lluvia.

Tabla 3. Resumen de la prueba Fisher y t - Student para número de días con lluvia

Prueba Fisher												
Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
24015280	0	0	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0
24020220	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
24025030	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0
24025040	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0
24025050	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
24030240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24030370	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24030400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24030650	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24030670	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
24030840	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
24030850	0	0	1	-1	1	0	1	0	0	0	0	0
24030860	0	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0
24035120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
24035260	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
24035320	0	0	1	-1	1	0	1	0	1	1	0	0
24035430	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0
35235010	0	0	0	0	0	1	-1	0	1	1	1	0

Prueba Student												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	1	0	
0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	
0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	
0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	
0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	
0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	
0	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	
-1	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	

Fuente: Autores.

El análisis tendencial de este parámetro no manifiesta tampoco un patrón definido. Pese a esto, el mayor número de

tendencias significativas, tanto positivas como negativas, se observan en las épocas donde predominan las lluvias, es

decir los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre. Referente a las estaciones, las que confirman tendencia predominante hacia el crecimiento del número de días con lluvia son las de código 24030840, 24030850 y 24035260; mientras que la estación 24035320 es la que confirma tendencia hacia la disminución del número de días con lluvia en la mayoría de los meses del año. Según la Tabla 4 no se observa ningún

patrón en la varianza de esta variable. Por otra parte, se resalta que septiembre es el único mes que no demuestra ningún tipo de cambio, mientras que octubre y noviembre son los meses en los que se presentan los mayores cambios significativos decrecientes, pero no es un patrón claro ya que solo dos o tres de las diez estaciones manifestaron ese comportamiento en dichos meses.

Tabla 4. Resumen de la prueba Fisher y t - Student para temperaturas máximas.

Prueba Fisher												
Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
24015280	0	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	0	0
24025030	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	-1	0
24025040	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0
24025050	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	0
24035120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24035150	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
24035260	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
24035320	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0
24035430	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1
35235010	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Prueba Student												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	
0	0	-1	0	-1	-1	0	0	0	-1	-1	0	
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	
1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	
0	0	0	-1	0	1	1	1	1	0	1	0	
0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	

Fuente: Autores.

Por el contrario, la prueba de Student sí evidencia una tendencia predominante significativa hacia el incremento de las temperaturas máximas, especialmente en junio y en el segundo semestre del año. De igual forma, a excepción de la estación 24025030, todas las demás se destacan por presentar tendencias significativas crecientes. El análisis a nivel de estaciones y a nivel mensual en la mayoría de sus registros, confirman una tendencia significativa hacia el incremento en los valores del extremo alto de las temperaturas en la zona del páramo. En la Tabla 4 se presenta el resumen de la prueba de t-Student aplicada a las series de temperaturas máximas.

Finalmente, la distribución temporal de las temperaturas mínimas Tabla 5 no se evidencia un patrón definido ni en sus valores medios y tampoco en su varianza.

Haciendo la salvedad que respecto a su variabilidad los meses de marzo, abril y diciembre son los que demuestran mayores cambios significativos decrecientes; y, con relación a su tendencia, las estaciones 24025050 y 35235010 son las que registran un comportamiento, en el cual, en la mayoría de los meses se evidencia tendencia significativa hacia el incremento de las temperaturas mínimas; la estación 24035320 registra el mismo comportamiento, pero hacia la disminución de los valores medios.

El análisis conjunto del comportamiento temporal de las cuatro variables climáticas permite identificar que, referente a la variabilidad no se manifiesta ningún patrón evidente de cambio significativo en la varianza y, con relación a la tendencia, la temperatura máxima es la única variable

en la cual predomina la tendencia significativa hacia el aumento de los valores máximos. Dicho esto, la incidencia del cambio climático en la zona de estudio

se evidencia en el incremento de los máximos de temperaturas, esperando así, climas más cálidos en la región del páramo.

Tabla 5. Resumen de la prueba Fisher y t - Student para temperaturas mínimas.

Prueba Fisher													Prueba Student												
Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
24015280	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0		
24025030	-1	-1	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	-1	0	1	0	0	0		
24025040	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0		
24025050	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1		
24035120	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
24035150	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
24035260	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
24035320	0	0	-1	-1	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0		
24035430	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1		
35235010	0	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1		

Fuente: Autores.

En el segundo paso metodológico se analizó el patrón espacial de cambio de variables climáticas. Para dicho fin se escogió, a partir del análisis temporal el mes en el año, que demostró el mayor cambio para todas las variables sea creciente o decreciente tanto en la variabilidad en la hidrometeorológicas estudiadas, el cual corresponde a noviembre, destacando que este mes siempre registra en todas las variables algún tipo de cambio significativo como en la tendencia. Para este mes, para cada estación y variable climática se construyó el gradiente de cambio correspondiente a 10 años. Este gradiente se representó en los mapas presentadas en figura 3.

Con relación al análisis espacial de precipitaciones se observa que la mayoría de las estaciones en la zona del páramo confirman una pendiente de cambio ascendente a 10 años entre 0 y 20 mm, aunque en la región nororiental algunas estaciones presentan un gradiente negativo. Sin embargo, otras estaciones de esa misma zona registran un cambio creciente, razón por la cual se concluye

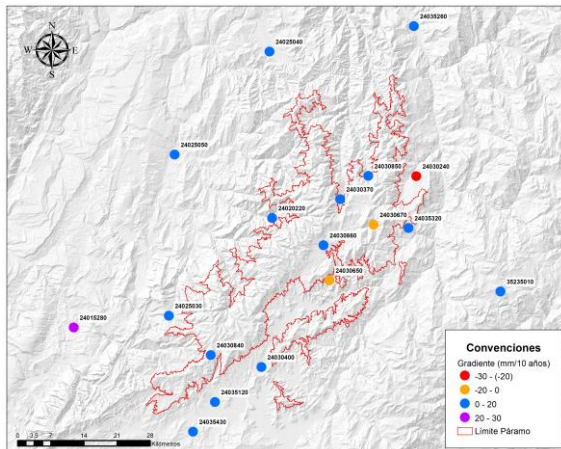
que, en el páramo, a excepción de la zona nororiental, se manifiesta un patrón hacia el incremento en la pluviosidad con un cambio entre 0 y 20 mm al mes en un periodo de 10 años.

Respecto al número de días con lluvia, se aprecia que únicamente el costado noroccidental evidencia un patrón claro en las estaciones, no obstante, este patrón está relacionado a cambios muy leves en esta variable que incluso no llega a ser de 1 día de lluvia al mes por cada 10 años. El resto de las zonas del páramo no manifiesta ningún patrón claro.

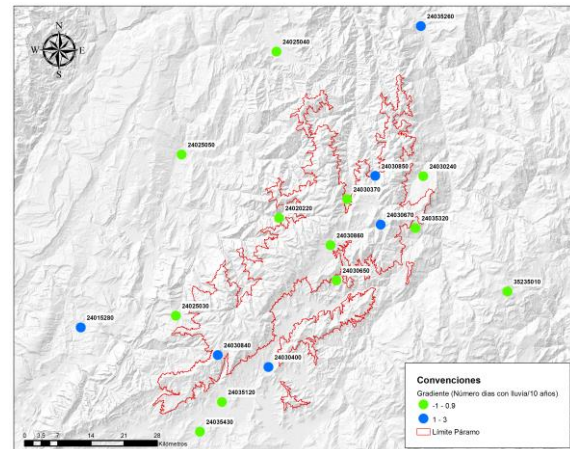
La distribución espacial de temperaturas máximas lleva consigo un patrón hacia el incremento, aunque la magnitud de este cambio varía según la región del páramo. En la franja noroccidental y suroriental se registran los mayores cambios de esta variable, por lo tanto, se espera que las temperaturas máximas aumenten considerablemente en estos costados del páramo, llegando a alcanzar un incremento de hasta 0.8 °C en 10 años. La franja nororiental también sigue un patrón

hacia el crecimiento, pero con una menor magnitud – las estaciones 24035260 y 35235010 con un gradiente de 0.2 a 0.4 °C/10 años y la estación 24035320 con una variación entre 0 a 0.2 °C/10 años. Caso similar a lo que ocurre en la zona suroccidental con la mayoría de las estaciones a excepción de la 24025030.

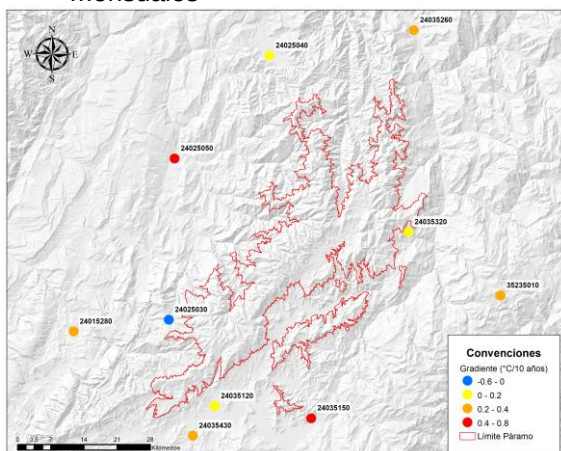
Dicho esto, y considerando que solo una estación exhibe pendiente negativa, se puede afirmar que el páramo registra una dinámica en sus valores de temperatura máxima hacia el crecimiento de estas, siendo más considerable en la franja noroccidental y suroriental.



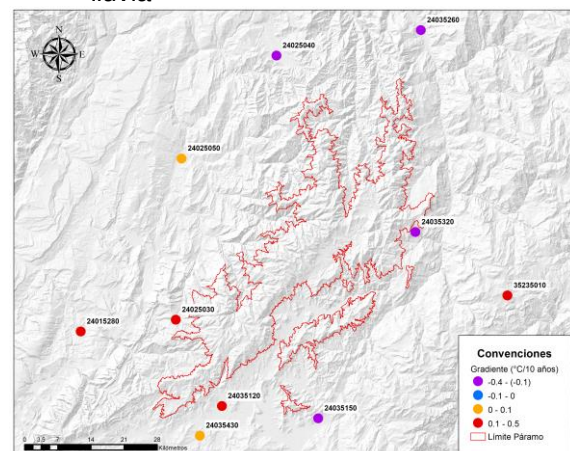
a) Patrón espacial de precipitaciones totales mensuales



b) Patrón espacial de número de días con lluvia



c) Patrón espacial de temperaturas máximas



d) Patrón espacial de temperaturas mínimas

Figura 3. Patrón espacial de las variables hidrometeorológicas en la zona del páramo. **Fuente:** Autores.

El análisis conjunto de las variables identifica la incidencia del cambio climático sobre el clima regional, evidenciándose tanto en las precipitaciones - aumento de la pluviosidad - como en las temperaturas - cambios en sus valores extremos. Esta última variable manifestada en aumento

de las temperaturas máximas en casi la totalidad del páramo y aumento en las temperaturas mínimas en la parte occidental con valores de crecimiento de hasta 0.5 °C en 10 años.

4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir que en la zona del páramo Guantiva – La Rusia la incidencia del cambio climático global sobre el clima regional se refleja con mayor claridad en la variabilidad temporal y espacial de temperaturas máximas. Por la mayoría de las estaciones climáticas se confirma un patrón de crecimiento de temperaturas máximas sin una afectación evidente del patrón de su variabilidad. Con relación al régimen de temperaturas mínimas, no se observa ningún patrón de cambio en la variación temporal ya que la mayoría de los registros no confirmaron cambio de sus valores medios y varianza.

Las variables de precipitación y número de días con lluvia no presentaron un claro patrón de cambio temporal en los meses asociados a las temporadas secas e intermedias, mientras que en las temporadas húmedas hay un mayor número de las estaciones confirmando una tendencia hacia el crecimiento de pluviosidad media mensual conjunto con la conservación del promedio de número de días con lluvia y la variabilidad de las dos variables relacionadas con precipitación.

Con relación a la identificación del patrón espacial de las variables climáticas, en la zona del páramo se observa una tendencia hacia el incremento de los valores medios de pluviosidad con un gradiente más frecuente de 0 a 20 mm / 10 años. El gradiente de cambio de número de días con lluvia se puede considerar como insignificante, teniendo en cuenta que los cambios identificados representan cerca de un día en 10 años. Las temperaturas mínimas no tienen un claro patrón espacial de cambio, mientras

que los registros mensuales de temperaturas máximas en su mayoría confirmaron una tendencia hacia crecimiento con unos gradientes de hasta 0.8°C/10 años.

De todo lo mencionado anteriormente se concluye que el cambio climático en la zona del estudio se refleja en un incremento de hasta 20 mm/10 años de precipitaciones totales mensuales y en un incremento de temperaturas máximas. Estos cambios de manera gradual pueden afectar los pisos térmicos, incluyendo a la transformación del paisaje natural del páramo. La alteración de las coberturas vegetales efecto del cambio climático global se suma con los efectos de las actividades humanas presentes en el páramo (CAS, 2024), siendo estos dos los principales impulsores del cambio de coberturas de la Tierra.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Militar Nueva Granada la gestión del proyecto INV-ING-3966.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araujo, J., & Molina, Y. (2021). Monitoreo del proceso de afectación del páramo andino venezolano a través de un análisis multitemporal. *REVISTA GEOGRÁFICA VENEZOLANA*, 62(2), 298–314.
<https://doi.org/10.53766/RGV/2021.62.02.01>
- CAS, Cc. A. R. de S. (2024, mayo 6). Hallazgos en Páramo Guantiva la Rusia.

- <https://cas.gov.co/prensa/hallazgos-en-paramo-guantiva-la-rusia-corporacion-autonoma-regional-de-santander/>
- Corpoboyaca. (2015). Estudios técnicos, económicos, sociales y ambientales para la identificación y delimitación del complejo Guantiva-La Rusia a escala 1:25.000. Tunja.
- Diazgranados, M., Tovar, C., Etherington, T. R., Rodríguez-Zorro, P. A., Castellanos-Castro, C., Rueda, M. G., & Flantua, S. G. A. (2021). Ecosystem services show variable responses to future climate conditions in the Colombian páramos. *PeerJ*, 9, e11370. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.11370/SUPP-8>
- Fisher, R. A. (1922). On the mathematical foundations of theoretical statistics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 222(594–604), 309–368. <https://doi.org/10.1098/RSTA.1922.0009>
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., & Cerra, M. (2014). Los páramos andinos: ¿Qué sabemos?: estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo - resource | IUCN. <https://iucn.org/node/40135>
- IaVH. (2020). Páramos y sistemas de vida Rabanal. Investigación en biodiversidad y servicios ecosistémicos para la toma de decisiones. <http://www.humboldt.org.co/es/i2d/item/559-paramos-y-sistemas-de-vida-rabanal>
- IaVH. (2024, julio 4). Átlas de páramos de Colombia. <https://repository.humboldt.org.co/bitstreams/b54d39f4-7a18-4fde-881c-d53723791f01/download>
- IDEAM. (2024, marzo 9). Catálogo Estaciones IDEAM. <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Catalogo-Estaciones-IDEAM/n6vw-vkfe>
- Kordun, O., & Makhinko, A. (2024). The Influence of Global Warming on the Change of Climatic Loads on the Territory of Ukraine. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 615 LNCE, 83–93. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73776-3_6
- Li, W., Zhang, H., Xin, Q., Gu, X., Ma, H., Cao, H., Bao, Z., Ye, L., & Huai, X. (2024). Analysis of Extreme Precipitation under Nonstationary Conditions in the Yangtze River Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 30(1), 05024025. <https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-6134>
- Liu, R., Kou, X., Song, W., & Dong, C. (2024). Evolution Laws and Spatial Differentiation Characteristics of Climate and Extreme Climate Before and After the Impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 487 LNCE, 476–488. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9184-2_39/FIGURES/9
- Murad, C. A., Pearse, J., & Huguet, C. (2024). Multitemporal monitoring of paramos as critical water sources in Central Colombia. *Scientific Reports* 2024 14:1, 14(1), 1–21. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67563-z>
- Olaya-Angarita, J. A., Díaz-Pérez, C. N., & Morales-Puentes, M. E. (2019). Composition and structure of the forest-páramo transition in the guantiva-la rusia corridor (Colombia). *Revista de*

- Biologia Tropical, 67(4), 755–768.
<https://doi.org/10.15517/RBT.V67I4.31965>
- Peyre, G., Osorio, D., François, R., & Anthelme, F. (2021). Mapping the páramo land-cover in the Northern Andes. *International Journal of Remote Sensing*, 42(20), 7777–7797.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1964709>
- Picornell, A., Caspersen, L., & Luedeling, E. (2025). The influence of calibration data diversity on the performance of temperature-based spring phenology models for forest tree species in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 360, 110302.
<https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2024.110302>
- Renjifo, L. M., Gómez, M. F., Velásquez-Tibatá, J., Amaya-Villarreal, Á. M., Kattan, G. H., Amaya-Espinel, J. D., & Jaime, B.-G. (2014). Libro rojo de Aves de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Researchgate.Net, 466.
http://www.researchgate.net/profile/Luis_Renjifo/publication/261992711_Libro_rojo_de_las_aves_de_Colombia_Volumen_1_bosques_hmedos_de_los_Andes_y_la_costa_pacifica/links/555cfd3008ae8c0cab2a6acc.pdf
- Ruiz, D., Martinson, D. G., & Vergara, W. (2012). Trends, stability and stress in the Colombian Central Andes. *Climatic Change*, 112(3–4), 717–732.
<https://doi.org/10.1007/S10584-011-0228-0>
- Schlattmann, A., Neuendorf, F., Burkhard, K., Probst, E., Pujades, E., Mauser, W., Attinger, S., & von Haaren, C. (2022). Ecological Sustainability Assessment of Water Distribution for the Maintenance of Ecosystems, their Services and Biodiversity. *Environmental Management*, 70(2), 329–349.
<https://doi.org/10.1007/S00267-022-01662-3/FIGURES/8>
- Silva, E. H., Miranda, I. S., Salinas, L. I. F., & Gonzalez-Mendoza, M. (2024). Building Resilience Against Climate Change. Focusing on Predicting Precipitation with Machine Learning Models on Mexico's Metropolitan Area. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 15246 LNAI, 68–80.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-75540-8_6
- Student. (1908). The Probable Error of a Mean. *Biometrika*, 6(1), 1.
<https://doi.org/10.2307/2331554>
- Su, H., Du, M., Liu, Q., Kang, X., Zhao, L., Zheng, W., & Liao, Z. (2024). Assessment of regional Ecosystem Service Bundles coupling climate and land use changes. *Ecological Indicators*, 169, 112844.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2024.112844>
- Suescún, D., León, J. D., Villegas, J. C., & Correa-Londoño, G. A. (2023). Nutrient loss to erosion responds to rain characteristics under transformed landscapes in the Río Grande basin, Colombian Andes. *Ecohydrology*, 16(3), e2519.
<https://doi.org/10.1002/ECO.2519>
- Waqas, M., Naseem, A., Humphries, U. W., Hlaing, P. T., Shoaib, M., & Hashim, S. (2025). A comprehensive review of the impacts of climate change on agriculture in Thailand. *Farming System*, 3(1), 100114.
<https://doi.org/10.1016/J.FARSYS.2024.100114>

Wu, S., Hu, F., & Zhang, Z. (2024). Climate change and energy poverty: Evidence from China. *World Development*, 186, 106826.

<https://doi.org/10.1016/J.WORLDDEV.2024.106826>

Zhang, Y., Liu, X., Patouillard, L., Margni, M., Bulle, C., & Yuan, Z. (2024). Where coal is produced really matters the

environmental impacts. *Resources, Conservation and Recycling*, 212, 107987.

<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2024.107987>