



! POSGRADOS !

MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES CON MENCIÓN EN REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

RPC-SO-17-NO.363-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL

TEMA:

EVALUACIÓN ECOSISTÉMICA DE LA RESERVA PATOCOCHA FRENTE A LA VARIABILIDAD Y EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CANTÓN CAÑAR BAJO LOS ESCENARIOS SSP2-4.5 Y SSP5-8.5 UTILIZANDO PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE WORLDCLIM Y MODELOS SATELITALES

AUTOR:

JACKSON RENE ACERO ZHAO

DIRECTOR:

CARLOS ROLANDO ROSERO ERAZO

CUENCA – ECUADOR

2026

Autor:**Jackson Rene Acero Zhao**

Ingeniero Ambiental.

Candidato a Magíster en Recursos Naturales Renovables con Mención en Remediación y Restauración por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

Reneacero9@gmail.com

Dirigido por:**Carlos Rolando Rosero Erazo**

Ingeniero en Turismo.

Magister en Cambio Climático.

Carlos.roseroe@epoch.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2026 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

JACKSON RENE ACERO ZHAO

Evaluación ecosistémica de la reserva Patococha frente a la variabilidad y el cambio climático en el cantón Cañar bajo los escenarios ssp2-4.5 y ssp5-8.5 utilizando proyecciones climáticas de worldclim y modelos satelitales

DEDICATORIA

A mis abuelos y mis padres.

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mis abuelos y a mi Padre.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA	12
3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	15
3.1 ANTECEDENTES	18
3.2 JUSTIFICACIÓN	20
4. MATERIALES Y METODOLOGÍA	22
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
5.1 Resultado e interpretación del análisis morfométrico de la cuenca.....	29
5.2 Histogramas de las variables del modelo ejecutado en Rstudio.....	31
5.3 Descomposición de serie temporal de las variables del modelo ejecutado en Rstudio.....	38
5.4 Rosa de los vientos del modelo ejecutado en Rstudio.....	48
5.5 Periodograma de las variables del modelo ejecutado en Rstudio.....	49
5.6 Función de Autocorrelación de las variables del modelo ejecutado en Rstudio ..	58
6. CONCLUSIONES	98
7. REFERENCIAS	100

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Figura 1. Mapa de Ubicación de la Reserva Patococha</i>	23
<i>Figura 2. Mapa de los ecosistemas de la Cuenca del Rio Cañar</i>	24
<i>Figura 3. Parámetros de relieve</i>	30
<i>Figura 4. Histograma de temperaturas</i>	31
<i>Figura 5. Histograma de Precipitación.</i>	32
<i>Figura 6. Histograma de la Humedad Relativa.</i>	33
<i>Figura 7. Histograma de la velocidad del viento.</i>	33
<i>Figura 8. Histograma de la dirección del viento.</i>	34
<i>Figura 9. Histograma de la Temperatura de Bulbo.</i>	35
<i>Figura 10. Histograma de la Temperatura máxima.</i>	35
<i>Figura 11. Histograma de la Temperatura Mínima.</i>	36
<i>Figura 12. Histograma de la Luz solar.</i>	37
<i>Figura 13. Histograma de la Luz solar y Difusa.</i>	37
<i>Figura 14. Descomposición de serie temporal de la Precipitación.</i>	38
<i>Figura 15. Descomposición de serie temporal de la Humedad Relativa.</i>	39
<i>Figura 16. Descomposición de serie temporal de la velocidad del Viento.</i>	40
<i>Figura 17. Descomposición de serie temporal de la dirección del viento.</i>	41
<i>Figura 18. Descomposición de serie temporal de la temperatura media.</i>	42
<i>Figura 19. Descomposición de serie temporal de la temperatura de bulbo.</i>	43
<i>Figura 20. Descomposición de serie temporal de la temperatura máxima.</i>	44
<i>Figura 21. Descomposición de serie temporal de la temperatura mínima.</i>	45
<i>Figura 22. Descomposición de serie temporal de la luz solar difusa.</i>	46
<i>Figura 23. Descomposición de serie temporal de la temperatura mínima.</i>	47
<i>Figura 24. Rosa de los vientos</i>	48
<i>Figura 25. Periodograma de la Temperatura Máxima</i>	49
<i>Figura 26. Periodograma de la Temperatura Media</i>	50
<i>Figura 27. Periodograma de la Temperatura Mínima.</i>	51
<i>Figura 28. Periodograma de la Temperatura Mínima.</i>	52
<i>Figura 29. Periodograma de la Humedad Relativa.</i>	52
<i>Figura 30. Periodograma de la velocidad del viento.</i>	53
<i>Figura 31. Periodograma de la dirección del viento.</i>	54
<i>Figura 32. Periodograma de la temperatura de bulbo.</i>	55
<i>Figura 33. Periodograma de la luz difusa.</i>	56
<i>Figura 34. Periodograma de la luz solar y difusa.</i>	57
<i>Figura 35. Función ACF para la Temperatura Máxima.</i>	58
<i>Figura 36. Función ACF para la Temperatura Media.</i>	59
<i>Figura 37. Función ACF para la Temperatura Mínima.</i>	60
<i>Figura 38. Función ACF para la Precipitación.</i>	61
<i>Figura 39. Función ACF para la Humedad Relativa.</i>	62
<i>Figura 40. Función ACF para la Velocidad del Viento.</i>	63
<i>Figura 41. Función ACF para la Dirección del viento.</i>	64
<i>Figura 42. Función ACF para la Temperatura de bulbo.</i>	65
<i>Figura 43. Función ACF para la Luz solar Difusa.</i>	66
<i>Figura 44. Función ACF para la Luz solar y Difusa.</i>	67
<i>Figura 45. Correlación de variables de Temperatura.</i>	68
<i>Figura 46. Correlación de variables bioclimáticas (Énfasis en la Precipitación).</i>	71
<i>Figura 47. Correlación de variables bioclimáticas (Las 19 Variables).</i>	72
<i>Figura 48. Correlación de variables bioclimáticas (Énfasis en la Temperatura).</i>	73
<i>Figura 49. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 19.</i>	76
<i>Figura 50. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 18.</i>	77
<i>Figura 51. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 15.</i>	78
<i>Figura 52. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 12.</i>	79
<i>Figura 53. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 1.</i>	80
<i>Figura 54. Distribución espacial de las variables Bio1, Bio12, Bio15, Bio18 y Bio19.</i>	81
<i>Figura 55. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 19.</i>	83
<i>Figura 56. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 18.</i>	84
<i>Figura 57. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 15.</i>	85

Figura 58. <i>Distribución espacial de la Variable Bioclimática 12.</i>	87
Figura 59. <i>Distribución espacial de la Variable Bioclimática 1.</i>	87
Figura 60. <i>Distribución espacial de las variables Bio1, Bio12, Bio15, Bio18 y Bio19.</i>	88

EVALUACIÓN ECOSISTÉMICA DE LA
RESERVA PATOCOCHA FRENTE A LA
VARIABILIDAD Y EL CAMBIO
CLIMÁTICO EN EL CANTÓN CAÑAR
BAJO LOS ESCENARIOS SSP2-4.5 Y
SSP5-8.5 UTILIZANDO PROYECCIONES
CLIMÁTICAS DE WORLDCLIM Y
MODELOS SATELITALES

AUTOR(ES):

JACKSON RENÉ ACERO ZHAO

RESUMEN

El cambio climático altera de manera significativa los ecosistemas de alta montaña, afectando la regulación hídrica, la biodiversidad y el equilibrio ecológico. Esta investigación analiza sus efectos en la Reserva Patococha con el objetivo de evaluar cambios presentes y futuros mediante proyecciones climáticas, integrando modelación espacial, análisis morfométrico, interpretación de series temporales y correlación entre variables bioclimáticas. Los resultados muestran incrementos progresivos de temperatura y ligeras variaciones positivas en la precipitación anual, con aumentos más notorios durante el trimestre cálido. Asimismo, se identificó una intensificación de la variabilidad estacional y eventos aislados de precipitación extrema. Las variables térmicas presentan alta redundancia informativa, mientras que las asociadas a precipitación evidencian mayor heterogeneidad espacial. Los ecosistemas herbáceos húmedos y humedales altoandinos se perfilan como los más vulnerables debido a su dependencia de humedad constante. Además, la forma alargada de la cuenca favorece respuestas hidrológicas rápidas ante eventos extremos. En conclusión, se proyecta un escenario más cálido y ligeramente más húmedo, con mayor concentración de lluvias en periodos cortos, lo cual puede incrementar riesgos de erosión y afectar la disponibilidad hídrica. Se recomienda implementar restauración ecológica, monitoreo climático continuo y estrategias de adaptación basadas en la gestión comunitaria.

Palabras clave:

Modelación climática, Hidrodinámica de cuencas, Vulnerabilidad ecológica, Ecosistemas de montaña, Variabilidad estacional.

ABSTRACT

Climate change significantly alters high-mountain ecosystems, affecting water regulation, biodiversity, and ecological balance. This research analyzes its effects in the Patococha Reserve with the objective of assessing present and future changes through climate projections, integrating spatial modeling, morphometric analysis, interpretation of time series, and correlation between bioclimatic variables. The results show progressive increases in temperature and slight positive variations in annual precipitation, with more notable increases during the warmest quarter. Likewise, an intensification of seasonal variability and isolated extreme rainfall events was identified. Thermal variables exhibit high informational redundancy, while precipitation-related variables show greater spatial heterogeneity. Wet herbaceous ecosystems and high-Andean wetlands emerge as the most vulnerable due to their dependence on constant moisture. In addition, the elongated shape of the basin favors rapid hydrological responses to extreme events. In conclusion, a warmer and slightly more humid scenario is projected, with greater concentration of rainfall over short periods, which may increase erosion risks and affect water availability. It is recommended to implement ecological restoration, continuous climate monitoring, and adaptation strategies based on community-level management.

Keywords:

Climate modeling, Basin hydrodynamics, Ecological vulnerability, Mountain ecosystems, Seasonal variability.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha sido uno de los desafíos tanto científicos como ambientales más relevantes del siglo XXI, esto debido a su capacidad para modificar los sistemas naturales y sociales a nivel espacial y temporal. Este fenómeno afecta directamente a la variación de la temperatura, precipitación y la ocurrencia de eventos extremos alterando la estabilidad ecológica, específicamente el suministro de agua, regulación climática y la preservación de la biodiversidad (IPCC, 2022; WHO, 2024).

Los ecosistemas altoandinos, especialmente los páramos del Ecuador han experimentado una reducción de la cobertura vegetal, deterioro de los suelos y la disminución de la capacidad del almacenamiento hídrico, afectando directamente a la seguridad alimentaria y el bienestar de las poblaciones que habitan en estas zonas, todo esto debido al cambio climático (Ministerio del Ambiente, 2018; Canales et al., 2019). Por todo esto, resulta una prioridad los análisis de los efectos de este fenómeno sobre los ecosistemas, en este caso de la Reserva Patococha, localizada en el cantón Cañar, cuya funcionalidad ecológica es determinante para la regulación hidrológica y el bienestar de la población del mismo cantón.

En los últimos años, el conocimiento científico ha progresado notablemente en torno a la comprensión de los impactos del cambio climático mediante el uso de proyecciones globales y regionales derivadas del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) y de los escenarios socioeconómicos compartidos (SSPs). Este tipo de herramientas permite evaluar tendencias climáticas futuras bajo distintos supuestos de desarrollo socioambiental (Eyring et al., 2016; Fick & Hijmans, 2017). Haciendo referencia a los ecosistemas andinos, diversas investigaciones han utilizado estos modelos para el análisis de temperatura y precipitación y así mismo los efectos de estos cambios sobre la disponibilidad hídrica y la dinámica ecológica de los ecosistemas de paramo (Santos et al., 2024; Zhiña et al., 2024). Así mismo, las técnicas de teledetección como NDVI y EVI de los sensores MODIS y Sentinel ha facilitado la evaluación multitemporal los cambios en

los ecosistemas de páramo como la degradación y otras variaciones en la cobertura vegetal (Villarreal-Veloz et al., 2023; Huaraca et al., 2025).

A pesar de los avances, a nivel local, aún existen vacíos considerables en temas de evaluaciones sobre los distintos impactos del cambio climático en los ecosistemas de páramo, un ejemplo del mismo es la reserva Patococha. En la mayoría de investigaciones en el Ecuador, se han enfocado más en los estudios climáticos generales de sistemas montañosos de gran extensión sin el uso de metodologías multiescalares que integre las proyecciones climáticas. De la misma manera, no se ha indagado de manera detallada la interacción entre los dominios ecológicos (suelo, agua, vegetación y clima) con las presiones climáticas y antrópicas actuales. Toda esta falta de información impide la toma correcta de decisiones para la gestión sostenible del territorio y por ende dificulta el diseño de políticas de adaptación climática en el cantón Cañar.

Debido a este problema, el objetivo principal de este trabajo es evaluar la Reserva Patococha en relación con la Variabilidad y el Cambio Climático utilizando modelos climáticos desarrollados con los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Estos objetivos son (i) establecer las propiedades morfométricas de las unidades hidrográficas únicas de la reserva; (ii) caracterizar las propiedades climáticas presentes y futuras bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5; (iii) recomendar prácticas de conservación y adaptación, que consideren la resiliencia de los dominios ecológicos.

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

En el siglo XXI, el cambio climático se ha convertido en uno de los principales desafíos ambientales, generando alteraciones sustanciales en los patrones de temperatura, precipitación y en la dinámica ecológica a nivel global (IPCC, 2022). En los Andes Ecuatorianos (Zonas tropicales de alta montaña), estas variaciones afectan directamente a los ecosistemas de páramo los cuales se encargan de la regulación hídrica, almacenamiento de carbono y de la conservación de la biodiversidad (Ministerio del Ambiente, 2018). Estos ecosistemas actúan como

reservorios naturales que sostienen los ciclos ecológicos y las actividades humanas dependientes del recurso hídrico, de modo que su transformación representa una amenaza socioambiental relevante.

En este contexto, la Reserva Patococha, localizada en el cantón Cañar, constituye un ecosistema estratégico para la provisión de agua, la estabilidad ecológica y el equilibrio ambiental de las poblaciones circundantes. Sin embargo, el incremento de la temperatura, los cambios en la distribución temporal de la precipitación y las actividades antrópicas (Sobre pastoreo, quema y aumento de la actividad agrícola) han generado alteraciones progresivas en la estructura ecológica y en la funcionalidad de la misma (Intriago & Galarza, 2023). Estas alteraciones comprometen la biodiversidad local, la calidad del agua así como también los servicios ecosistémicos que sustentan la vida y las actividades productivas de la región.

Diversas investigaciones han evidenciado la elevada sensibilidad de los ecosistemas altoandinos frente a la variabilidad climática (Canales et al., 2019; Encina et al., 2020; Chirinos, 2023). No obstante, persiste una brecha significativa en el entendimiento integral de los impactos del cambio climático sobre la Reserva Patococha, particularmente bajo escenarios climáticos futuros. Aunque herramientas como la modelación de nichos ecológicos (Phillips et al., 2006) y las proyecciones de WorldClim (Fick & Hijmans, 2017) han permitido avances importantes, todavía no se han desarrollado investigaciones que integren información satelital, proyecciones climáticas basadas en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, y análisis correlativos entre dominios ecológicos y sus servicios asociados para este territorio específico.

La carencia de trabajos o estudios actualizados en forma precisa desde una perspectiva territorial o espacial limita la posibilidad de desarrollar formas de conservación/restauración y adaptación al cambio climático en base a alguna evidencia científica. Esta situación limita la capacidad de decisión basada en pruebas o datos por parte de gobiernos locales y las comunidades locales y, por tanto, la adecuada implementación de políticas de manejo ambiental sobre la

reserva Patococha. Por ello, se debe desarrollar un estudio que evalúe la variabilidad y el cambio climático sobre la estructura, la funcionalidad y la adaptación ecosistémica de la reserva considerando la interacción entre sus dominios ecológicos y las relaciones existentes entre los mismos.

Dentro de este contexto, la principal pregunta de investigación se formula de la siguiente manera: ¿de qué manera la variabilidad y el cambio climático influyen en la estructura, funcionalidad y resiliencia del ecosistema de la Reserva Patococha bajo escenarios climáticos futuros (SSP2-4.5 y SSP5-8.5)? Una respuesta a esta pregunta ayudaría a reducir las brechas de conocimiento en relación con los procesos climáticos y ecológicos en el páramo de Patococha, ofreciendo insumos técnicos para la gestión adaptativa de los ecosistemas de alta montaña.

El enfoque de esta problemática no solo va a favorecer el fortalecimiento del conocimiento local y regional, sino que también va a incrementar la capacidad de respuesta a los efectos del cambio climático, ya que posibilitará la formulación de estrategias de conservación, de restauración y de uso sostenible de los recursos naturales. Al mismo tiempo, los resultados obtenidos o generados servirán como orientaciones para otros ecosistemas de montaña del Ecuador y de la región andina, orientados a contribuir con políticas públicas de resiliencia climática y con la protección de la biodiversidad.

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

Cambio climático: bases conceptuales y proyecciones globales

El cambio climático se entiende como una modificación significativa y sostenida de los patrones climáticos a escala global, atribuible directa o indirectamente a actividades antropogénicas que alteran la composición atmosférica (IPCC, 2021). Este proceso se manifiesta a través de variaciones en la temperatura promedio, los regímenes de precipitación y la frecuencia de eventos extremos, afectando tanto los sistemas naturales como las estructuras socioeconómicas. Para el estudio de esta problemática, los modelos de circulación general (GCMs), integrados en el Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), constituyen la base para el desarrollo de proyecciones climáticas globales. Estos modelos permiten evaluar distintos escenarios derivados de trayectorias socioeconómicas denominadas Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), entre los cuales los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 se emplean para estimar trayectorias intermedias y extremas de calentamiento global (Eyring et al., 2016; O'Neill et al., 2017). En América Latina y particularmente en los Andes, la aplicación de estos modelos ha evidenciado tendencias marcadas hacia el incremento de la temperatura y la modificación de los patrones de precipitación, con implicaciones directas en la disponibilidad hídrica y la resiliencia de los ecosistemas altoandinos (Santos et al., 2024; Zhiña et al., 2024).

Ecosistemas altoandinos y páramos como reguladores climáticos e hidrológicos

Los páramos representan ecosistemas estratégicos ubicados en zonas altas de la cordillera de los Andes, caracterizados por su destacada capacidad para almacenar y regular recursos hídricos (Buytaert et al., 2006). Funcionan como verdaderas esponjas ecológicas, en donde captan humedad atmosférica liberándola gradualmente hacia cuencas inferiores lo que garantiza que los flujos hidrológicos continúen. La Reserva Patococha, localizada en la provincia del Cañar, resulta un sistema de páramo con elevada sensibilidad ecológica y climática, tiene la función hidrológica esencial para la sostenibilidad de las comunidades rurales y los sistemas agrícolas que dependen de sus recursos. No obstante, la sinergia entre presiones humanas (como la deforestación y la expansión agropecuaria) y los efectos del

cambio climático compromete la estructura y el funcionamiento de estos ecosistemas (Cuesta et al., 2019; Ruiz-Ordóñez et al., 2023).

Variables climáticas y su relación con la dinámica ecosistémica

Las variables bioclimáticas constituyen indicadores cuantitativos fundamentales para caracterizar la distribución térmica y pluviométrica de una región. En la investigación de proyecciones climáticas, se utilizan comúnmente 19 variables derivadas de WorldClim (Bio1–Bio19), las cuales abarcan aspectos como la temperatura anual promedio, la variabilidad térmica y los cambios en la precipitación (Fick Hijmans, 2017). El estudio de estas variables facilita la identificación de patrones y desviaciones climáticas que afectan la disponibilidad hídrica y la vegetación. Estudios recientes en la cordillera de los Andes en Ecuador demuestran que el incremento de la temperatura media y la reducción de las precipitaciones efectivas han provocado procesos de degradación en los suelos y la pérdida de vegetación en regiones de páramo (Villarreal-Veloz et al., 2023; Huaraca et al., 2025).

Asimismo, metodologías como la correlación por dominios y el análisis de componentes principales (PCA) constituyen herramientas estadísticas útiles para reducir la multicolinealidad entre variables y seleccionar aquellas con mayor incidencia en los procesos hidrológicos y ecológicos (Encina et al., 2020; Pérez-Ortiz et al., 2022). Estas técnicas facilitan la modelación y evaluación de escenarios futuros con mayor precisión y soporte científico.

Análisis morfométrico de cuencas hidrográficas

El análisis morfométrico de cuencas hidrográficas constituye un procedimiento clave en estudios hidrológicos, ya que permite describir su configuración física mediante parámetros como el área, perímetro, longitud de cauces, pendiente, altitud y densidad de drenaje. Estos factores posibilitan evaluar el comportamiento de la cuenca frente a procesos de escorrentía, infiltración y control de inundaciones (Suharyanto et al., 2020; Jothimani et al., 2021). Entre estos indicadores, el índice de compacidad o también conocido como el coeficiente de Gravelius (C_c) que no es más que la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo equivalente en área, se utiliza para medir la configuración del territorio: cifras próximas a 1 sugieren cuencas casi redondeadas que responden rápidamente a cambios hidráulicos, mientras que cifras superiores indican cuencas más elongadas, con tiempo de

concentración extendido y una mayor habilidad para amortiguar los caudales (Bendjoudi Hubert, 2002; Sinabarigui et al., 2022). Además, las características de las cuencas montañosas, como las pendientes y las diferentes variaciones en altitud, también aumentan la energía del flujo superficial, lo que a su vez disminuye el tiempo de viaje del agua hacia el canal principal y, en consecuencia, aumenta la propensión a la vulnerabilidad a la pérdida de agua (Ouaba Saidi, 2023). Por el contrario, la densidad de drenaje nos muestra dónde se ha desarrollado la red de agua y está asociada con la permeabilidad del suelo y también con la topografía del suelo. Así, se obtienen cifras moderadas de un compromiso razonable entre escorrentía e infiltración, mientras que cifras altas corresponden a suelos poco permeables o pendientes pronunciadas, donde se considera probable la erosión (Jothimani et al., 2021). En conjunto, estos parámetros nos brindan una sólida base teórica para comprender la configuración, la topografía y la red de drenaje, y el grado en que afectan la capacidad de una cuenca para proporcionar una gestión adecuada del agua, responder a alteraciones y, a su vez, apoyar funciones esenciales del ecosistema con respecto al cambio climático.

Por otro lado, los principales ecosistemas de páramo se encuentran por gradientes de elevación y atributos del suelo y regímenes de humedad, como el páramo herbáceo con amplias camas de pastizales dispersos; el pastizal húmedo con suelo saturado (rico en material orgánico); el matorral andino con algunas especies de arbustos; los bosques de montaña transicionales, que existen como corredores biológicos; y los humedales altoandinos, que también desempeñan un papel importante en la regulación del agua al retenerla. Estas unidades representan una función importante, ya que absorben carbono, preservan la biodiversidad y regulan el ciclo del agua (Buytaert et al., 2006). Algunos estudios que reportan actividades recientes, como las actividades humanas y el cambio climático, están llevando a cambios en la altitud de las especies, modificaciones de la cobertura vegetal y los pastizales, dependiendo de la vulnerabilidad ecológica de las especies (Báez et al., 2020). Esta diversidad estructural y funcional pone de manifiesto la importancia ecológica del páramo y resalta la necesidad urgente de implementar estrategias efectivas de manejo y conservación ante futuros escenarios climáticos.

3.1 ANTECEDENTES

El cambio climático es reconocido como una amenaza a nivel mundial para el desarrollo de los países y el bienestar de los ecosistemas y sociedades (OMS, 2024), este fenómeno también supone una amenaza creciente para los ecosistemas, la diversidad biológica y los medios de subsistencia, la salud y el bienestar de las generaciones actuales y venideras. Las variables que destacan del cambio climático son la temperatura y la precipitación, cuya disminución o incremento trae consigo distintos e importantes cambios en el clima. (UNICEF, 2015) menciona que la variación de la temperatura puede provocar temperaturas demasiado elevadas, así como también heladas, por otro lado, la variación de la precipitación, puede ocasionar sequías e inundaciones en caso de lluvias extremas.

Según (Fews Net, 2024) en centro américa y algunas partes de Sudamérica el largo período con presencia de altas temperaturas ha afectado la disponibilidad de humedad en los suelos y los niveles del caudal en los ríos, lo que tendrá implicaciones para el desarrollo de cultivos. Las altas temperaturas, que en los últimos cuatro meses han superado los dos o más grados Centígrados respecto al promedio, han provocado un aumento en la incidencia de incendios forestales y retrasos en las actividades de siembra para el ciclo de Primera en Centroamérica.

Entre las causantes de la variación de temperatura y precipitación tenemos el Niño Oscilación del Sur (ENOS), que se refiere a la fluctuación natural de las temperaturas superficiales del mar y la presión atmosférica entre el Este y Oeste del Océano Pacífico Tropical (CRRH-SICA, 2019), es decir, es el acople entre lo que está ocurriendo con las temperaturas de la superficie del mar y el comportamiento de la atmósfera. En Ecuador, el niño, acentúa las sequías en los Andes y en las regiones de las llanuras occidentales; la capacidad de recuperación de poblaciones podría verse afectada a largo plazo (MINISTERIO DEL AMBIENTE, 2018).

(Pérez-Ortiz et al., 2022) y (Chirinos, 2023) sugirieron que el análisis de la variación espacial y temporal de las precipitaciones y el cambio climático debería considerarse un elemento fundamental en el proceso de toma de decisiones dentro de las cuencas hidrográficas analizando la influencia de El Niño Oscilación del Sur, por otro lado (García Rengifo & Ochoa, 2023) caracterizó la variabilidad climática de un periodo de registros de temperatura, precipitación y caudal de un río basándose en los

registros históricos tomados de sensores remotos logrando determinar que la variabilidad climática revela aumentos, tanto en los patrones como en las tendencias de las estaciones de verano e invierno; así como en las tendencias de los elementos climáticos que podrían ser consecuencia de fenómenos atmosféricos, como el problema subyacente de la variabilidad climática.

Existen escenarios utilizados para la evaluación del cambio climático, (Chapi Siñani, 2023) menciona que los escenarios SSP245 Y SSP585 son útiles para determinar la vulnerabilidad en base a la variación de la temperatura categorizando el mismo en grados de riesgo.

La forma exacta en la que la variabilidad climática afecta a las cuencas hidrográficas no es tan clara. Sin embargo, (Canales et al., 2019) menciona que hay evidencia de que los fenómenos meteorológicos o climáticos afectan la vulnerabilidad ante futuros fenómenos climáticos extremos. En ese sentido, diversos estudios en el país sobre variabilidad y cambio climático, muestran amenazas relacionadas al aumento en la temperatura media (aumento de 1°C) que podrían ocasionar el retroceso de los glaciares (30% de disminución de masa en los últimos 30 años), la degradación y desertificación de los páramos, la pérdida de bosques y biodiversidad, y un incremento en la frecuencia de eventos extremos climáticos, que alterarían los ciclos hidrológicos (MINISTERIO DEL AMBIENTE, 2018).

Los impactos del cambio climático no solo se ven reflejados en la disponibilidad de la precipitación si no, también en como este afecta a la biodiversidad o distribución natural de las especies, (Encina et al., 2020), evalúa la respuesta de las especies al cambio climático, esto mediante modelos bioclimáticos.

Los pobladores cercanos al estero Patococha utilizan sus aguas para diferentes actividades, ya sea para el consumo o el riego, según (Intriago & Galarza, 2023) e información recabada de la Tucayta, el estero, cuenta con 3 lagunas, las mismas que abastecen de agua potable a todo el cantón, además de ello, las zonas rurales, utilizan sus salientes de agua para el riego de diferentes cultivos.

Las principales fuentes de ingresos de los habitantes cercanos al estero es el aprovechamiento del mismo, es decir, existía turismo en el cual se practicaba la pesca, el mismo que ha ido disminuyendo con el paso del tiempo haciendo que las autoridades no inviertan en el mejoramiento del cuidado y protección del área, esto a su vez junto al desconocimiento de algunos habitantes y la poca disponibilidad de lluvias, en noviembre del 2020 ocurrió un incendio en donde se consumió gran parte

del páramo de Patococha. Además, los páramos a lo largo de las décadas han sufrido afecciones asociadas al sobre pastoreo por ganado bravo, infraestructura vial, incendios, y entre otras actividades, que han cambiado las propiedades físicas y químicas de los suelos y la vegetación nativa de la zona.

En este sentido, las cuencas hidrográficas, resultan ser el principal aporte de agua potable a las zonas pobladas ubicadas no solo alrededor de la misma si no, zonas bajo las faldas del páramo, así, en el cantón Cañar, provincia de Cañar existe una reserva natural llamada Patococha, la misma se ha visto afectada por la práctica desmedida de la agricultura, ganadería y también por desastres provocados como incendios y sobrepastoreo, esto según información de la organización a cargo de la reserva Patococha, Tucayta.

3.2 JUSTIFICACIÓN

En el cantón Cañar, los ecosistemas de páramo presentan una limitada disponibilidad de información técnica que permita evaluar de manera integral su vulnerabilidad frente a los diferentes factores climáticos y ambientales que condicionan tanto su funcionamiento como su conservación. Esta situación se ve afectada por la escasez de registros climáticos locales continuos y por la ausencia de estudios que integren datos climáticos actuales y proyectados con variables biofísicas e hidrológicas, lo que dificulta la identificación de áreas críticas y procesos de deterioro en sistemas estratégicos como el estero Patococha. Frente a esta problemática, la presente investigación busca analizar la vulnerabilidad del páramo mediante el uso de información climática interpolada y proyecciones futuras, combinadas con análisis morfométricos de cuenca, evaluación de series temporales y relaciones entre variables bioclimáticas, lo que nos permitirá caracterizar espacialmente los factores que influyen en la dinámica del ecosistema. Los resultados obtenidos evidencian tendencias de incremento térmico, cambios en la distribución estacional de la precipitación y una mayor susceptibilidad de determinados tipos de cobertura vegetal, especialmente aquellos dependientes de condiciones de humedad relativamente constantes. La información generada constituye un aporte técnico relevante para el diseño de estrategias de gestión, conservación y adaptación del páramo, proporcionando criterios objetivos para la planificación territorial y el manejo sostenible del recurso hídrico. Asimismo, el enfoque metodológico empleado

establece que puede ser utilizado para futuras investigaciones, facilitando la comparación de resultados y fortaleciendo el conocimiento científico sobre la vulnerabilidad de los ecosistemas de páramo en el sur del Ecuador.

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

MATERIALES

Equipos y recursos tecnológicos:

Se empleó equipos con acceso a internet que carguen software como GIS, Rstudio y Excel.

Software y herramientas analíticas:

El procesamiento de datos geográficos y climáticos se realizó con los programas GIS, mientras que el análisis estadístico y de correlación se efectuó con RStudio. Asimismo, se utilizó Excel 2019 para la gestión de datos tabulares y la elaboración de gráficos.

Fuentes de datos y cartografía base:

Las variables bioclimáticas fueron obtenidas de la base WorldClim, tanto en su versión histórica (1994–2024) (WorldClim, 2025) como en las proyecciones futuras bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, correspondientes a los periodos 2021–2040 ya que representa un horizonte cercano y operativo del cambio climático, en el cual las variaciones de temperatura y precipitación ya son detectables, pero con menor incertidumbre que las proyecciones de largo plazo, también porque su enfoque de corto a mediano plazo resulta especialmente útil para la planificación ambiental y la gestión de ecosistemas. Se emplearon modelos digitales de elevación SRTM (30 m) (ASF, 2025) para la delimitación hidrográfica y el cálculo de parámetros morfométricos. Además, se usaron imágenes Sentinel-2 y Landsat 8 OLI (ASF, 2025) para la clasificación de coberturas y validación espacial.

La información complementaria como shapes de provincias, cuencas, microcuencas, cobertura vegetal y mapa general de Ecuador, fue obtenida del Instituto Geográfico Militar (IGM) y del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).

METODOLOGÍA

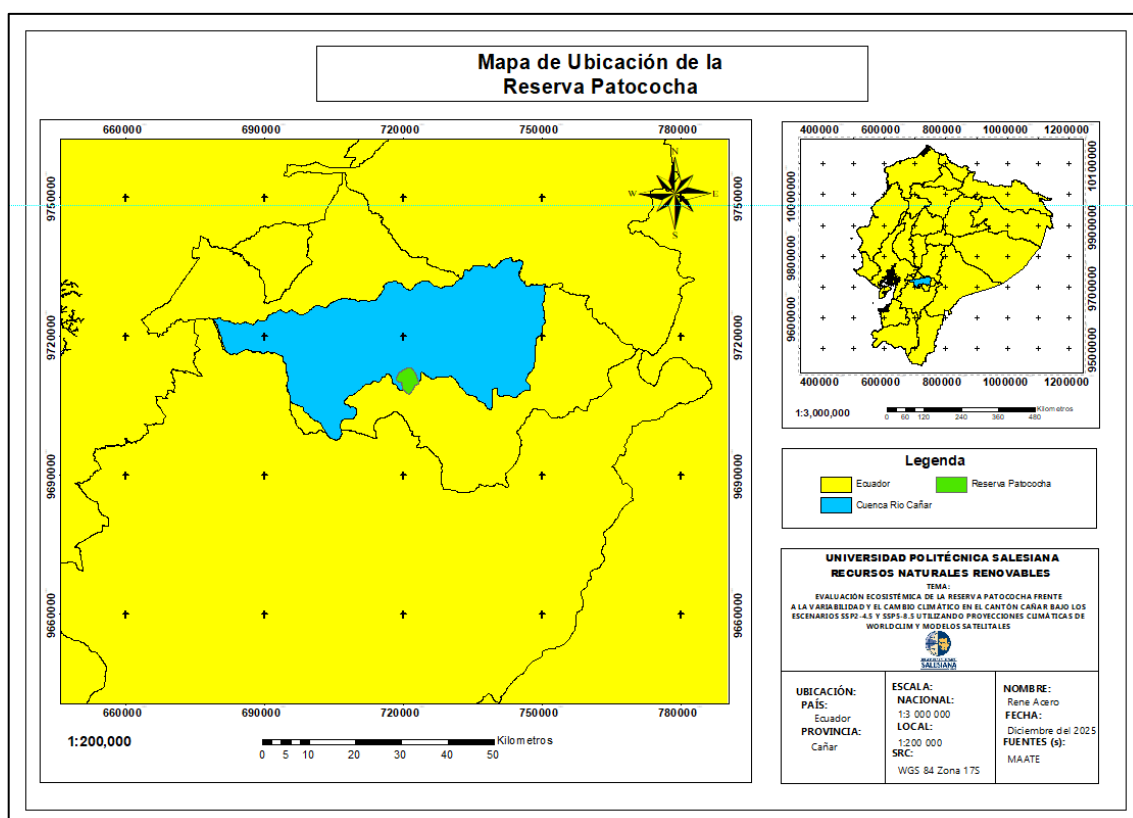
El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y proyectivo, dividido en seis fases principales, dirigidas al cumplimiento de los objetivos de caracterización morfométrica, análisis climático y propuesta de estrategias de mitigación y adaptación.

Fase 1. Delimitación y caracterización de la unidad de estudio

El presente estudio se llevará a cabo en la Parroquia Cañar perteneciente a la Provincia del Cañar cuyos límites geográficos son, al norte con la provincia de Chimborazo, al sur con la provincia del Azuay, al este con la provincia del Azuay, y al oeste con la provincia del Guayas con coordenadas $2^{\circ}29'01''\text{S}$ $78^{\circ}58'42''\text{O}$.

La zona principal de estudio se encuentra exclusivamente en Zhuya, que es una de las muchas comunidades pertenecientes a la Parroquia Cañar. Las coordenadas del punto central de la zona de estudio son: X: 721619.40212; Y: 9709658.76515.

Figura 1. Mapa de Ubicación de la Reserva Patococha

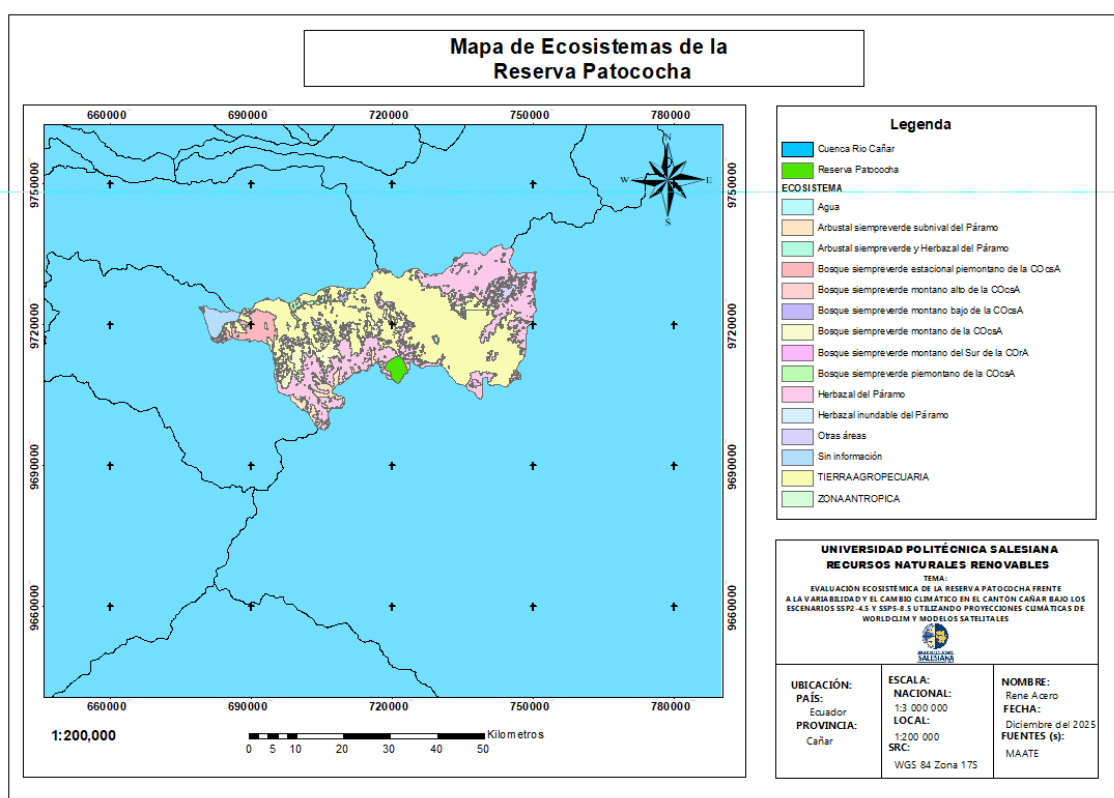


Fuente: Elaboración Propia.

En la zona de estudio de la Reserva Patococha se identifican múltiples ecosistemas altoandinos con diferentes coberturas: el Arbustal siempreverde subnival del Páramo ($69\,438,24\text{ m}^2$), el Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo ($205\,390,26\text{ m}^2$), el Bosque siempreverde estacional piemontano de la Cordillera Occidental de los Andes ($61\,954,11\text{ m}^2$), el Bosque siempreverde montano alto ($115\,619,58\text{ m}^2$), el Bosque siempreverde montano bajo ($245\,721,51\text{ m}^2$), el Bosque siempreverde montano ($363\,560,04\text{ m}^2$), el Bosque siempreverde piemontano ($406\,385,73\text{ m}^2$), el Herbazal del Páramo ($1\,091\,487,51\text{ m}^2$) y el Herbazal inundable del Páramo (10

915,56 m²). De todos los ecosistemas mencionados anteriormente, el que más representa a la Reserva Patococha debido a su vasta extensión es el Páramo. Esto significa que las capas herbáceas en las montañas desempeñan un papel importante en la regulación del agua, la conservación de la humedad, y también representan servicios ecosistémicos en la cuenca. Pueden estar asociados con climas fríos, altos niveles de humedad y suelos orgánicos que influyen en gran medida en el equilibrio hídrico y la sostenibilidad ecológica de toda la región. Este mosaico ecosistémico refleja la complejidad altitudinal propia de los páramos andinos, donde los gradientes de vegetación, suelo y agua interactúan de modo estrecho (Brück et al., 2023; Beltrán Valenzuela, 2019).

Figura 2. Mapa de los ecosistemas de la Cuenca del Río Cañar



Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la caracterización de la unidad de estudio, se realizó la delimitación de las unidades hidrográficas asociadas a la Reserva Patococha en GIS. A partir de lo anterior, se establecieron los límites para las cuencas, subcuencas y los ríos principales. Se calcularon los parámetros morfométricos más importantes (área de la cuenca, longitud del río principal, pendiente media, densidad de drenaje y forma de la cuenca) según los métodos de Marsik & Quesada (2007) y Valero Fajardo (2022). Cada uno de estos indicadores resultó útil para determinar las características físicas

y estructurales y otros elementos clave para comprender el comportamiento hidrológico de la cuenca en respuesta a la variabilidad climática.

Fase 2. Recolección y preparación de datos climáticos

Se descargaron las capas climáticas históricas y proyectadas de WorldClim v2.1 (CMIP6), bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 porque representan trayectorias contrastantes de desarrollo socioeconómico y emisiones, permitiendo evaluar respuestas climáticas intermedias y de alta intensidad.

Tabla 1. Variables Bioclimáticas.

VARIABLE	SIGNIFICADO
BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Rango medio diario (Media mensual de (temperatura máxima - temperatura mínima))
BIO3	Isotermalidad ($BIO2/BIO7 \times 100$)
BIO4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar $\times 100$)
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO7	Rango anual de temperatura ($BIO5 - BIO6$)
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más lluvioso
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO17	Precipitación del trimestre más seco
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO19	Precipitación del trimestre más frío

Fuente: Elaboración propia.

Las variables bioclimáticas (Bio1–Bio19) fueron estandarizadas y re proyectadas al sistema de coordenadas UTM Zona 17S en Rstudio, garantizando compatibilidad con la cartografía base. Posteriormente, se seleccionaron las variables más representativas mediante un proceso de correlación por dominio, eliminando aquellas con alta multicolinealidad ($|r| > 0.7$) (Castillo, 2016). El análisis se complementó con un Análisis de Componentes Principales (PCA), que permitió reducir la dimensionalidad del conjunto de datos e identificar los factores climáticos con mayor

influencia en la variabilidad ambiental de la reserva (Encina et al., 2020; Pérez-Ortiz et al., 2022).

Fase 3. Análisis climático y espacial

Con las variables seleccionadas, se generaron mapas climáticos comparativos entre el periodo histórico (1994–2024) y los periodos proyectados (2021–2040). Los datos fueron analizados en RStudio y representados mediante mapas temáticos y gráficos de tendencia elaborados en GIS y Excel. Este análisis permitió determinar las tendencias tanto de cambio en temperatura como en la precipitación, así también como las áreas de mayor sensibilidad climática dentro de la Reserva Patocochoa.

Fase 4. Integración multiescalar y propuesta ecosistémica

Los resultados obtenidos en las fases anteriores se integraron en un análisis multiescalar que correlacionó los factores climáticos, morfométricos e hidrológicos. La correlación se realizó mediante un análisis estadístico y espacial que integró variables bioclimáticas, morfométricas e hidrológicas en Rstudio, evaluando su relación a través de matrices de correlación y superposición cartográfica en un entorno de sistemas de información geográfica. Este proceso permitió identificar las zonas más vulnerables dentro de la reserva y definir estrategias de mitigación y adaptación.

Ya incorporando las variables en Rstudio los resultados a obtener son:

Descomposición de serie temporal que consiste en separar una serie de datos en sus componentes fundamentales los cuales son, la tendencia, estacionalidad y componente residual lo que nos permite identificar el comportamiento de largo plazo, los patrones periódicos recurrentes y la variabilidad aleatoria de la serie (Pardo-Igúzquiza & Rodríguez-Tovar, 2013). En los resultados es clave evaluar la dirección de la tendencia, la regularidad de la estacionalidad y que los residuos no presenten patrones, lo que indica una correcta representación de la dinámica temporal de la serie.

Periodograma de las variables, es una herramienta del análisis espectral que permite identificar las frecuencias dominantes en una serie temporal, es decir, los ciclos que explican su variabilidad. Se obtiene aplicando la Transformada de Fourier a la serie, a partir de la cual se calcula la densidad espectral de potencia en función de la frecuencia (Pardo-Igúzquiza & Rodríguez-Tovar, 2013). En la interpretación de resultados se analiza la concentración de energía en bajas frecuencias (ciclos

estacionales o de largo plazo) y la disminución hacia altas frecuencias, lo que permite distinguir entre variabilidad estructural y fluctuaciones aleatorias de corto plazo.

Función de Autocorrelación de las variables (ACF), sirve para analizar la dependencia temporal de las variables climáticas a partir de su representación gráfica (Pardo-Igúzquiza & Rodríguez-Tovar, 2013). En la interpretación de resultados se observa el grado de correlación entre los valores de la serie y sus retardos sucesivos, es decir, a disminución lenta de la autocorrelación indica presencia de tendencia o estacionalidad, mientras que una caída rápida sugiere un comportamiento más cercano a la estacionariedad.

Fase 5. Morfometría Patococha

La metodología aplicada para el análisis morfométrico de la cuenca se basó en la obtención, procesamiento y evaluación de parámetros geométricos, hipsométricos e hidrológicos que describen la configuración física del sistema hidrográfico. Los límites de la cuenca y el drenaje fueron especificados por el modelo digital de elevación y mapas base utilizando aplicaciones de software GIS. Parámetros fundamentales como el área y el perímetro, las elevaciones máxima y mínima, la diferencia altitudinal, la pendiente promedio, la longitud del canal principal y total, la densidad de drenaje y de corrientes fueron calculados en Excel. El índice de compacidad, en adelante llamado coeficiente de Gravelius (C_g), fue calculado para determinar la forma de la cuenca y entender su comportamiento hidrológico (Kouadio et al., 2023).

$$C_g = \frac{p}{2 * \sqrt{\pi A}}$$

Donde:

P: Perímetro de la Cuenca (km²)

A: Área de la Cuenca (km²)

El estudio se complementó mediante la caracterización de la altitud (media y más común) junto con el cálculo de la inclinación promedio de la red hídrica, lo que facilitó la identificación de la energía potencial del terreno y su efecto en los fenómenos de escorrentía y erosión. La fusión de estos elementos en un sistema de información geográfica propició la creación de una base de datos morfométrica que cuantifica la estructura física de la cuenca, convirtiéndose en una herramienta esencial para la gestión del recurso hídrico, la evaluación de la vulnerabilidad

ambiental y la formulación de estrategias de conservación y adaptación ante el cambio climático.

Fase 6. Consideraciones éticas

El estudio no incluyó la participación de humanos o animales, por lo tanto, no se requirió el consentimiento informado ni la autorización de un comité ético. Se mantuvieron los estándares de confidencialidad y manejo responsable de la información, asegurando que todos los datos empleados derivan de fuentes públicas y están destinados únicamente a fines académicos. Además, la integridad científica fue preservada a lo largo de la elaboración, análisis y divulgación de los hallazgos, garantizando tanto la reproducibilidad como la transparencia de la investigación.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultado e interpretación del análisis morfométrico de la cuenca

En la tabla 1 se detalla en resumen las características de la Cuenca del río Cañar que en donde se encuentra la zona de estudio.

Tabla 2. Características de la Cuenca del Río Cañar

Cuenca del Río Cañar		
Parámetro	Unidades	Valor
Área	km ²	1369.06014
Perímetro	km ²	292.147189
Cota máxima	msnm	4408.52
Cota mínima	msnm	0.00292969
Desnivel altitudinal	m	4408.51707
Centroide X	m	717.367176
Centroide Y	m	9718.126487
Centroide Z	m	1686.566551
Índice de Compacidad	Un	2.23
Altura Media	m	2204.26
Altura más frecuente	m	1102.13
Pendiente media de la cuenca	%	35.4359
Pendiente media de la red hídrica	%	17.96
Longitud cauce principal	km	100.79
Longitud orden 1	km	490.23
Longitud orden 2	km	240.48
Longitud red hídrica	km	958.56
Densidad de drenaje	km/km ²	0.70
Densidad de corrientes		0.5529

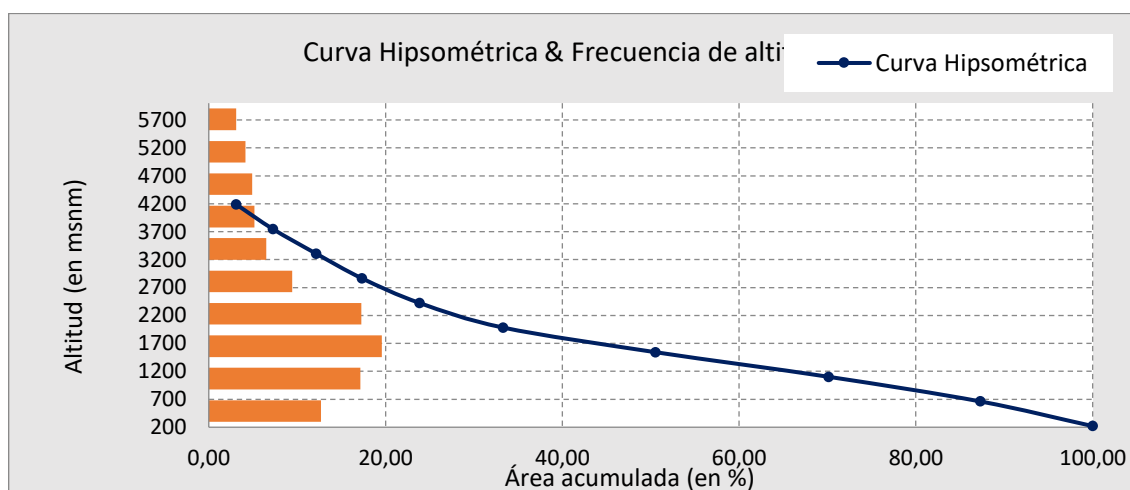
Fuente: Elaboración propia.

El análisis morfométrico de la cuenca de la Reserva Patococha permitió determinar los principales parámetros físicos y geomorfológicos que condicionan su comportamiento hidrológico (Tabla 1). La cuenca presenta un área total de 1369,06 km² y un perímetro de 292,15 km, valores que indican una extensión considerable, con una morfología alargada y un perímetro relativamente irregular. El índice de compacidad ($C_g = 2,23$) o coeficiente de Gravelius, refleja que la cuenca se aleja de la forma circular ideal ($C_g = 1$) (Kouadio et al., 2023), lo que implica un tiempo de

concentración más prolongado y una menor susceptibilidad a crecidas súbitas, al facilitar una evacuación de caudales más gradual hacia el cauce principal.

La altitud máxima registrada alcanza los 4408,52 m s. n. m., mientras que la mínima es cercana a 0,0029 m s. n. m., evidenciando un desnivel altitudinal de 4408,51 m, lo que confirma el marcado gradiente topográfico característico de las zonas andinas. La altura media de 2204,26 m y la altura más frecuente de 1102,13 m reflejan una topografía predominantemente montañosa, típica de ecosistemas de páramo y zonas de transición altoandinas.

Figura 3. Parámetros de relieve



Fuente: Excel

El análisis de pendientes muestra una pendiente media de la cuenca de 35,44 %, lo que la clasifica dentro del rango de cuencas de alta pendiente, donde los procesos de escorrentía superficial y erosión son más dinámicos. En términos de la pendiente media de la red hídrica, que se sitúa en un 17,96 %, se infiere que existen canales de elevada energía, capaces de movilizar sedimentos finos y de tamaño mediano, sobre todo durante los periodos de intensa lluvia. Todos los valores anteriores indican que la cuenca tiene una excelente capacidad de drenaje, aunque también es naturalmente susceptible a la erosión hídrica y deslizamientos de tierra debido a la falta de vegetación estable.

Basado en las características hidrográficas, la longitud del canal principal es de 100.79 km y la longitud total de la red hídrica es de 958.56 km, de los cuales 490.23 km corresponden a canales de primer orden y 240.48 km a canales de segundo orden. Esta red muestra conectividad fluvial y jerarquía característica de cuencas naturales con drenaje semi-dendrítico.

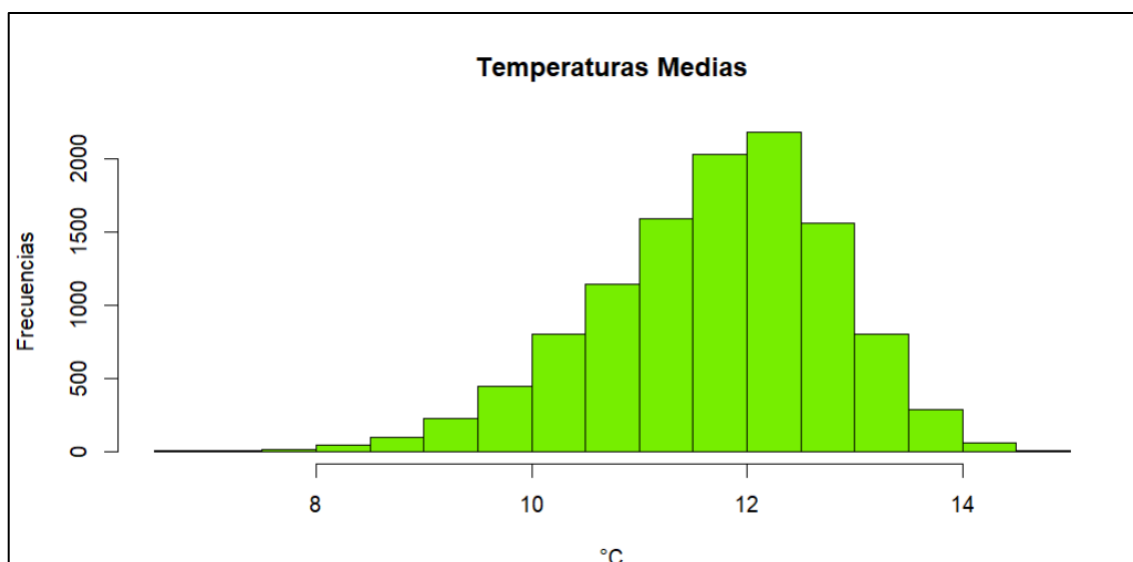
Con una densidad de drenaje de 0.70 km/km², indica que tiene un patrón de escorrentía moderado con las aguas superficiales convergiendo en los canales principales, pero sin saturación del suelo. En contraste con una densidad de corrientes de 0.5529, esta es una forma eficiente de red hídrica donde ocurre la regulación del flujo de las aguas. No obstante, esta eficiencia también puede acelerar los procesos de transporte de contaminantes o sedimentos en condiciones de degradación del suelo o pérdida de cobertura vegetal.

En síntesis, los valores obtenidos evidencian que la cuenca de la Reserva Patococha posee una morfología alargada, relieve abrupto y red hidrográfica bien estructurada, condiciones que la hacen hidrológicamente activa y sensible a variaciones climáticas. Su topografía escarpada y su gradiente altitudinal imponen una dinámica de escorrentía rápida y concentración progresiva de flujos hacia el cauce principal, factores que deben considerarse en el análisis de vulnerabilidad ante escenarios de cambio climático y en la planificación de medidas de conservación del ecosistema de páramo.

5.2 Histogramas de las variables del modelo ejecutado en Rstudio

A continuación, se presentan los resultados de las variables bioclimáticas (BIO1-BIO19) incorporadas al software Rstudio, tanto los históricos como las de las proyecciones futuras bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5:

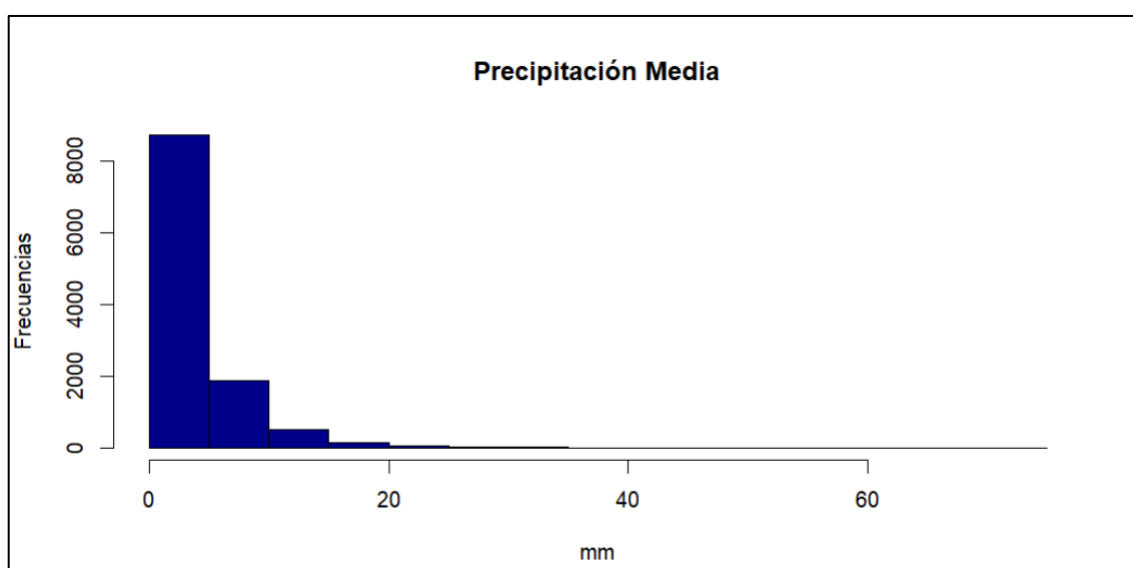
Figura 4. Histograma de temperaturas



Fuente: Elaboración propia.

El histograma correspondiente a las temperaturas promedio evidencia una distribución de valores comprendida entre 8 °C y 14 °C, adoptando una tendencia cercana a la normalidad. La mayor frecuencia se concentra alrededor de los 12 °C, lo que sugiere un clima moderado y relativamente estable, sin variaciones térmicas pronunciadas a lo largo del periodo analizado.

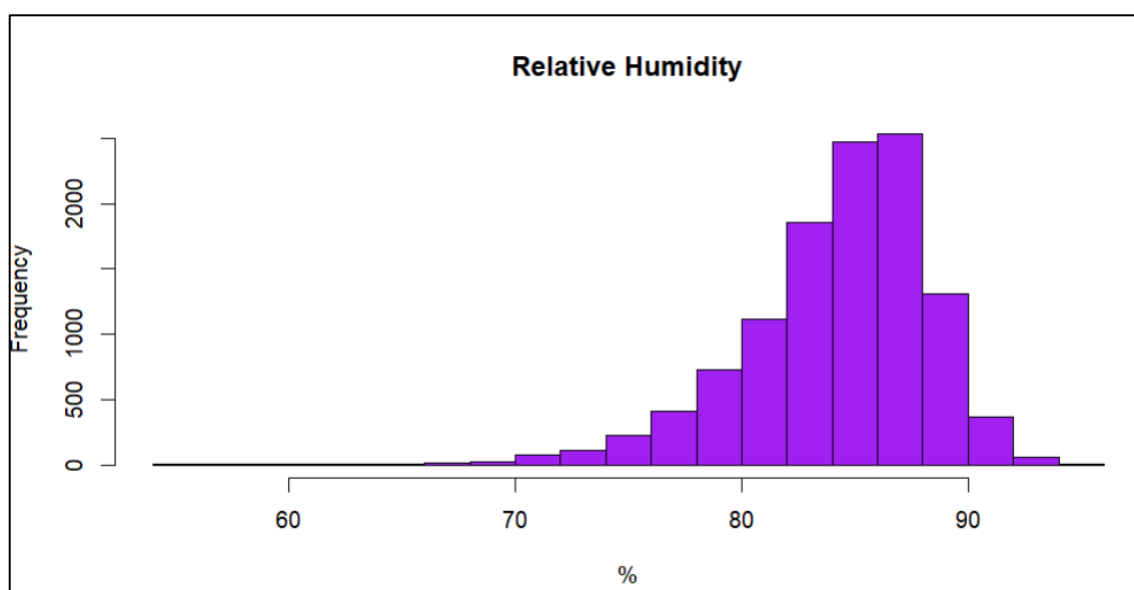
Figura 5. Histograma de Precipitación.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la precipitación promedio, la gráfica evidencia una marcada concentración de registros bajos, principalmente entre 0 y 10 mm, mientras que los eventos pluviométricos superiores a 40 mm se presentan de manera esporádica. Esto indica que el patrón de lluvias está dominado por lloviznas o precipitaciones ligeras, aunque de forma ocasional pueden manifestarse episodios de lluvia intensa.

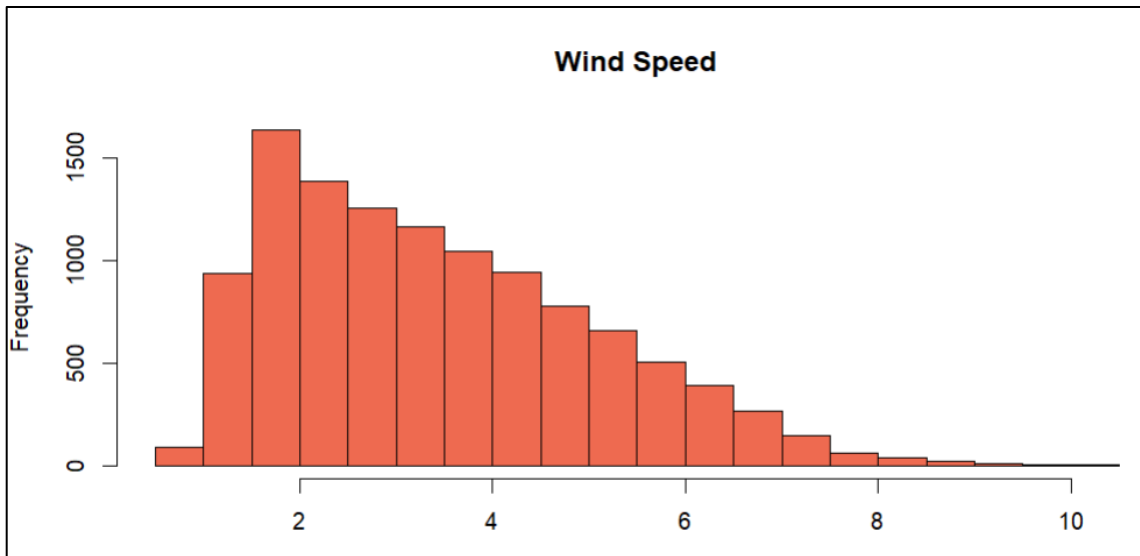
Figura 6. Histograma de la Humedad Relativa.



Fuente: Elaboración propia.

La gráfica de humedad relativa muestra que la mayor parte de los valores se concentra entre 80 % y 90 %, registrándose pocos datos inferiores al 70 %. Este comportamiento indica la presencia de un ambiente mayoritariamente húmedo, con alta nubosidad y condiciones propicias para la condensación, lo que a su vez limita la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie.

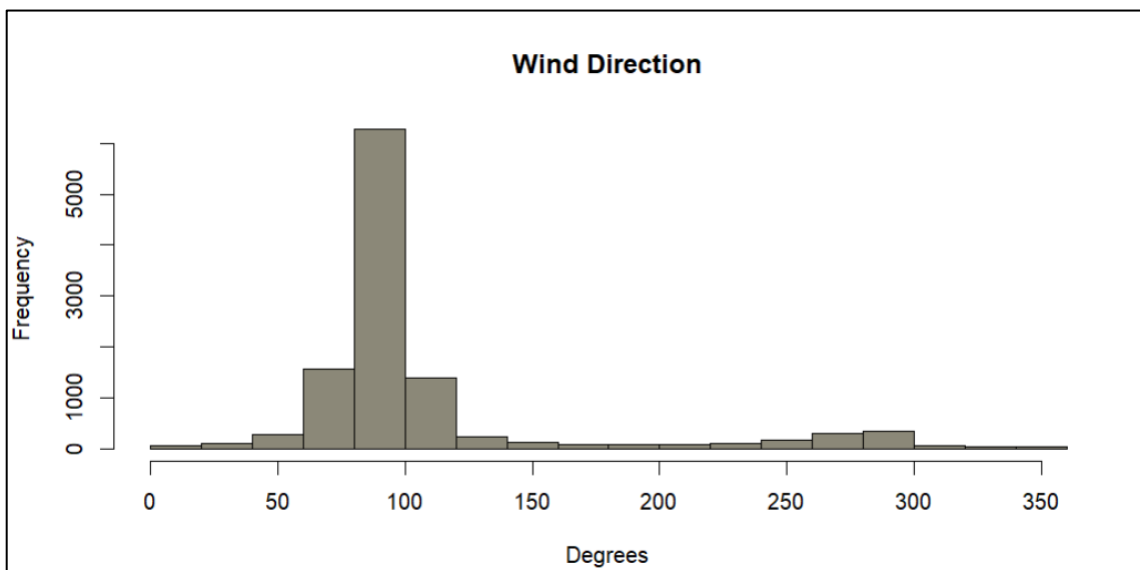
Figura 7. Histograma de la velocidad del viento.



Fuente: Elaboración propia.

En relación con la velocidad del viento, la distribución de datos se ubica principalmente entre 2 y 5 m/s, reduciéndose gradualmente hacia los valores más altos, donde solo se registran pocos casos cercanos a 9 o 10 m/s. Este comportamiento sugiere la presencia de vientos moderados que influyen en las condiciones climáticas, aunque sin llegar a generar escenarios de intensidad extrema.

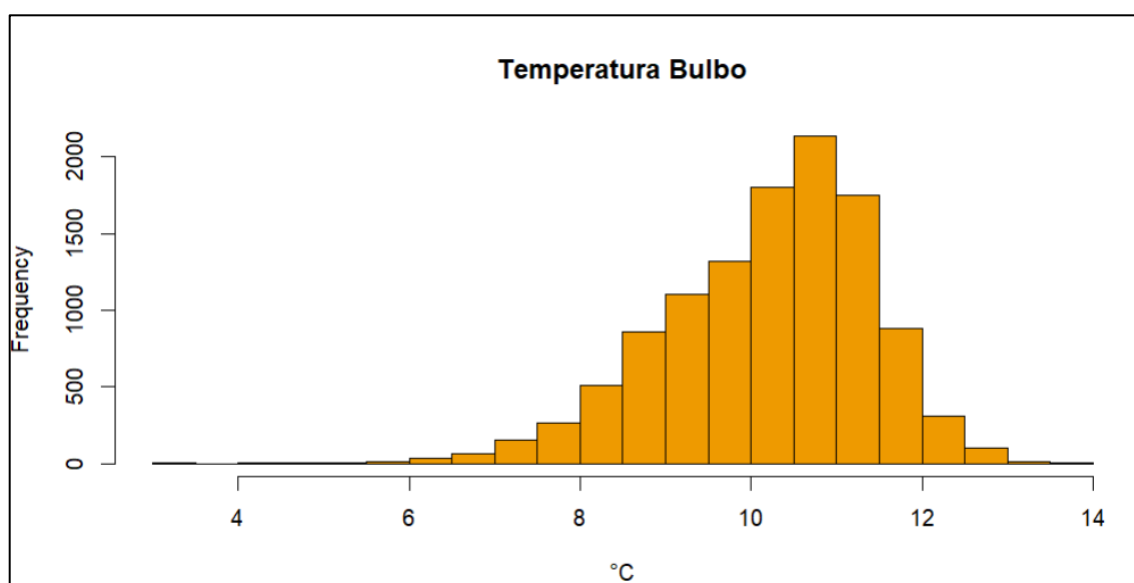
Figura 8. Histograma de la dirección del viento.



Fuente: Elaboración propia.

El histograma correspondiente a la dirección del viento evidencia una marcada concentración de registros entre los 100° y 120° , lo que indica que la mayor parte de las corrientes de aire provienen del Este-Sureste. Aunque se observan valores en otros ángulos, la predominancia en este intervalo confirma un patrón de circulación atmosférica predominante en el área de estudio.

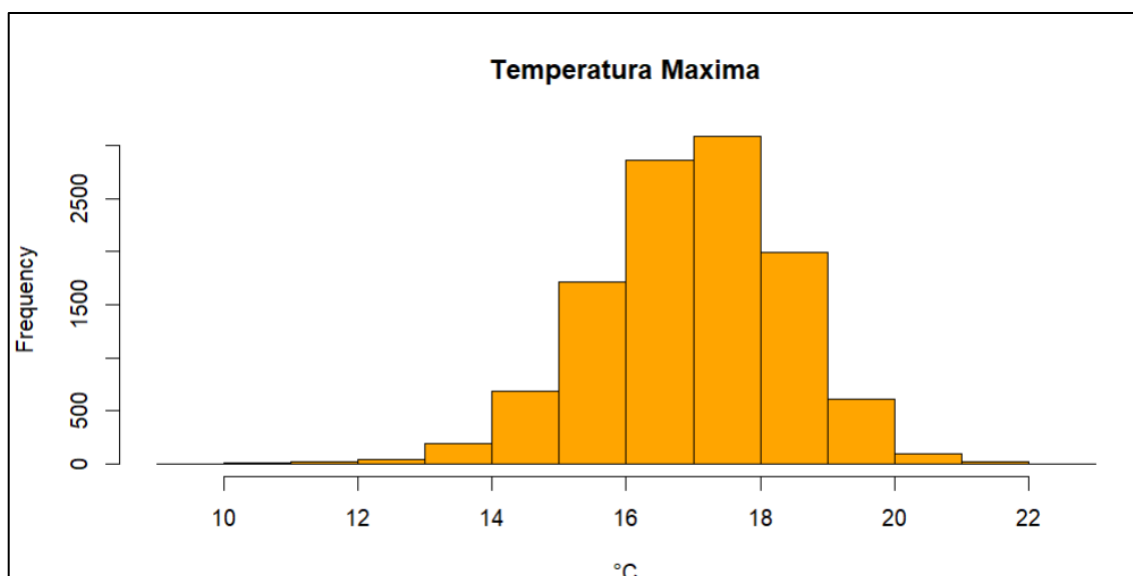
Figura 9. Histograma de la Temperatura de Bulbo.



Fuente: Elaboración propia.

En relación con la temperatura de bulbo húmedo, los datos se concentran mayormente entre 9°C y 10°C , mostrando una distribución cercana a la normal, comparable a la de la temperatura media. Este indicador representa una sensación térmica más fresca condicionada por la humedad del aire, por lo que se considera un parámetro clave para evaluar el nivel de confort térmico en la zona.

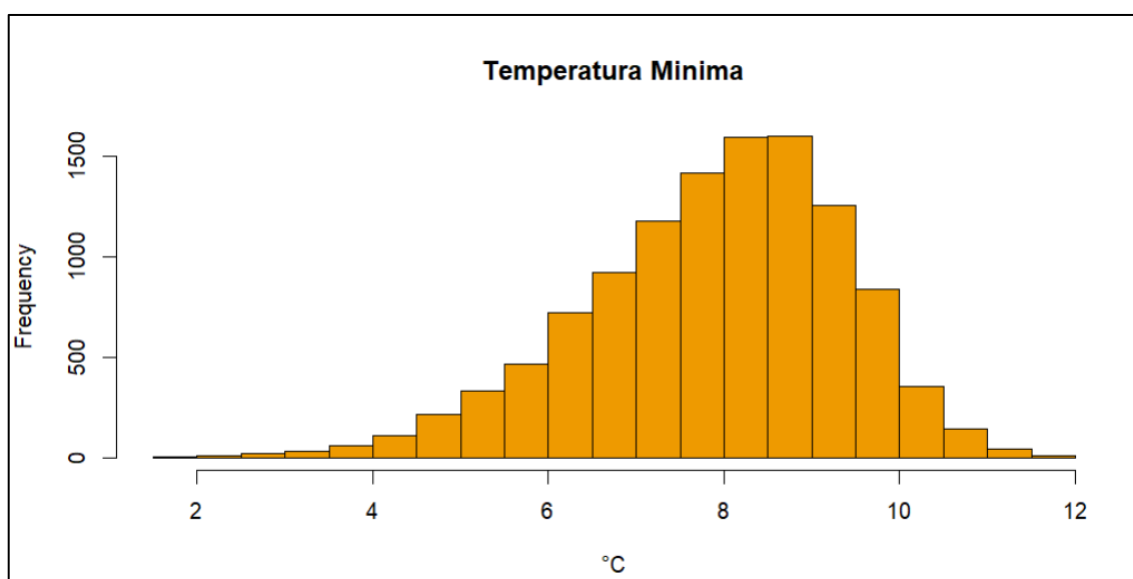
Figura 10. Histograma de la Temperatura máxima.



Fuente: Elaboración propia.

La gráfica de temperatura máxima evidencia que la mayor parte de los valores se agrupan entre 16 °C y 20 °C, dentro de un intervalo general que va desde 10 °C hasta 22 °C. Este comportamiento indica que, si bien se registran picos térmicos moderados, no se observan eventos de calor extremo, lo que confirma la estabilidad térmica característica del clima de la zona

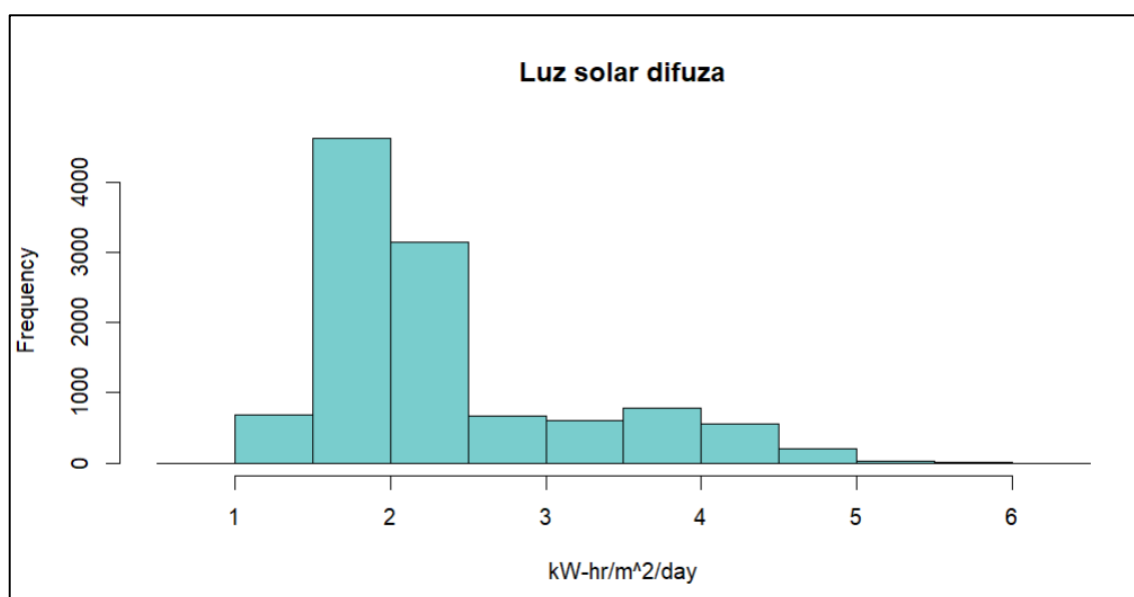
Figura 11. Histograma de la Temperatura Mínima.



Fuente: Elaboración propia.

En relación con la temperatura mínima, los valores se concentran mayormente entre 6 °C y 10 °C, dentro de un intervalo general comprendido entre 2 °C y 12 °C. Este patrón sugiere la presencia de noches frescas y confortables, sin descender a rangos suficientemente bajos como para provocar heladas severas o episodios de frío extremo en la zona.

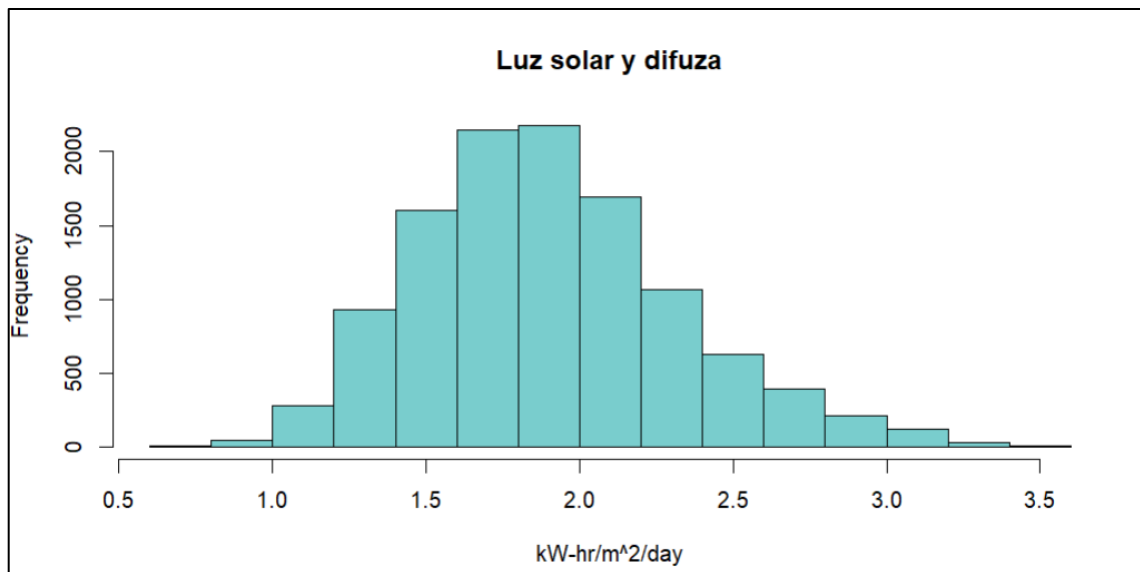
Figura 12. Histograma de la Luz solar.



Fuente: Elaboración propia.

El histograma de luz solar difusa evidencia que la mayor parte de los registros se concentra entre 1 y 2 unidades, disminuyendo gradualmente hacia valores más altos. Este comportamiento sugiere una predominancia de radiación difusa, asociada a una presencia constante de nubosidad y elevados niveles de humedad en la atmósfera, lo cual coincide con los patrones de humedad relativa previamente analizados.

Figura 13. Histograma de la Luz solar y Difusa.

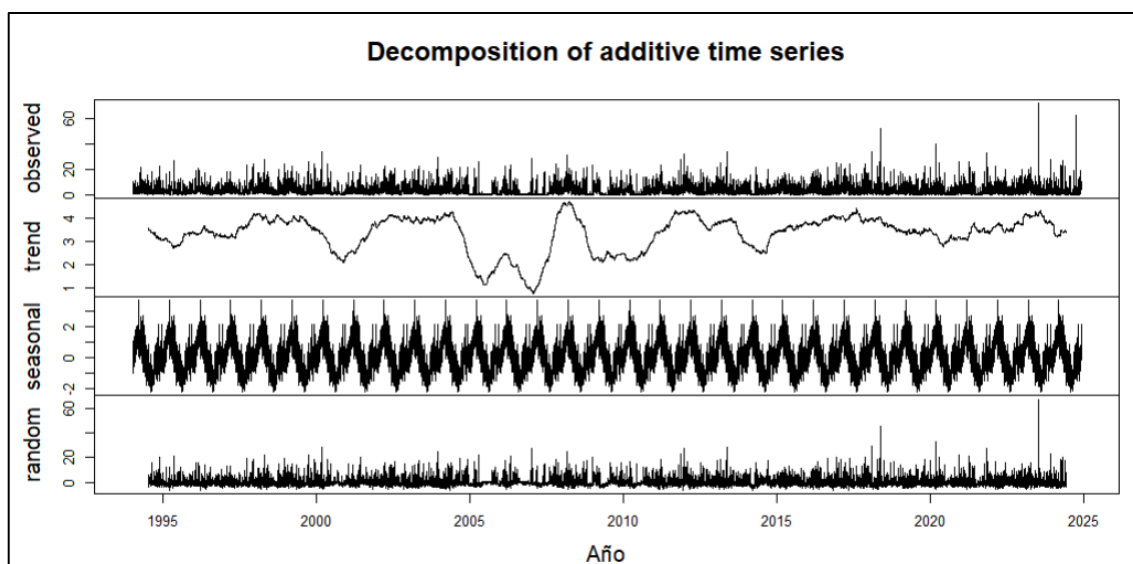


Fuente: Elaboración propia. Elaboración propia.

Finalmente, el histograma de luz solar difusa presenta una distribución equilibrada, con la mayor concentración de valores situada entre 1.5 y 2.0 kW-hr/m²/día, rango en el que se registra la frecuencia más alta. Los valores atípicos, tanto por debajo como por encima de este intervalo, se observan con poca frecuencia, lo que sugiere que la radiación solar difusa se mantiene relativamente constante y en niveles moderados. Esta estabilidad está asociada principalmente a la presencia recurrente de nubosidad en la zona.

5.3 Descomposición de serie temporal de las variables del modelo ejecutado en Rstudio

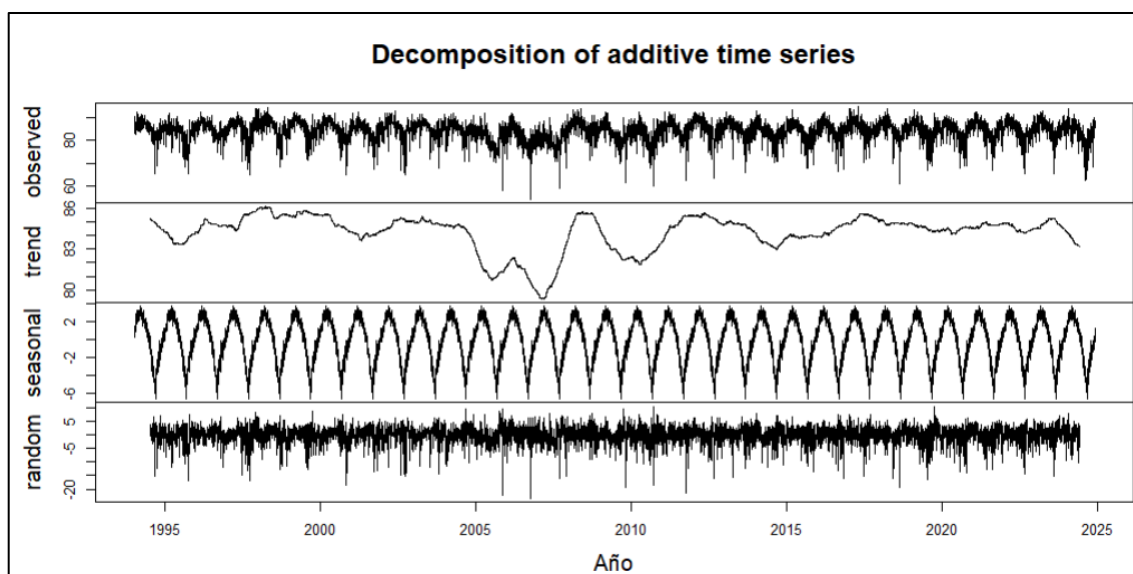
Figura 14. Descomposición de serie temporal de la Precipitación.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la descomposición de la serie temporal de precipitación evidencia una alta variabilidad en los registros, con picos asociados a eventos de lluvia de gran intensidad. El patrón indica la existencia de ciclos de aumento y disminución, mostrando una disminución sustancial entre 2000 y 2007, seguida de una mejora hacia 2010 y una variación moderada en los años posteriores, pero lo más importante, relativamente constante en la última década. El factor estacional exhibe una tendencia estacional importante, que mostró una tendencia anual estadísticamente significativa, con regularidad alternante entre los meses lluviosos y los meses secos, proporcionando evidencia de la importancia del patrón climático característico de la región. Finalmente, el componente aleatorio agrupa los episodios de precipitación extrema que no se explican por la tendencia ni por la estacionalidad, representando lluvias intensas y esporádicas. En conjunto, la serie de precipitación se distingue por su marcada estacionalidad, variaciones de tendencia a largo plazo y la ocurrencia ocasional de eventos extremos.

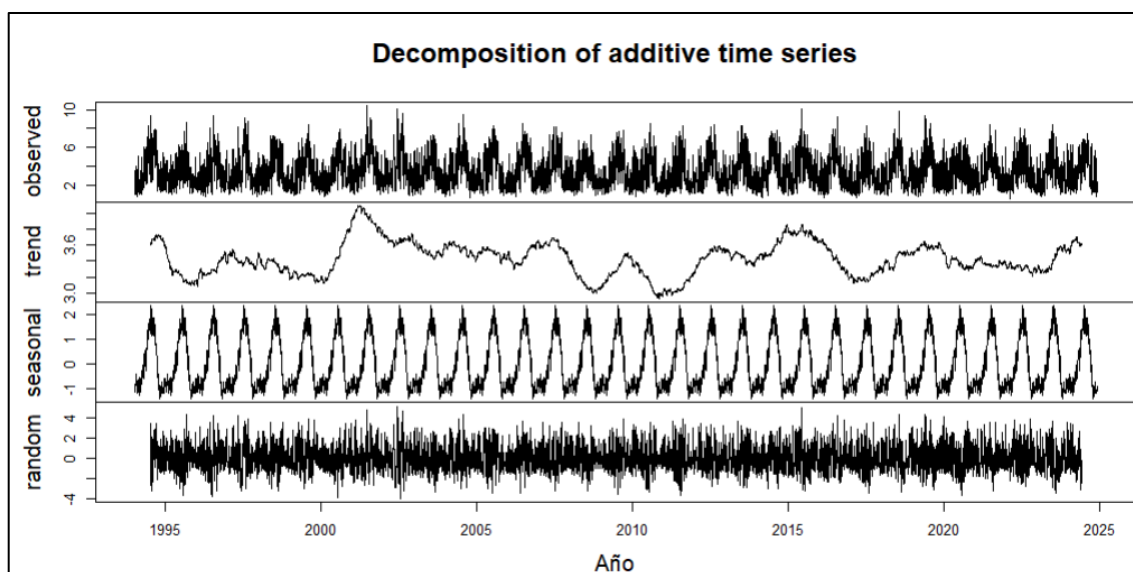
Figura 15. Descomposición de serie temporal de la Humedad Relativa.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la descomposición de la serie temporal de humedad relativa revela que los valores se mantienen altos, fluctuando mayormente entre el 60 % y el 80 %, con variaciones constantes a lo largo del tiempo. Considerando la descomposición de la serie temporal de la humedad relativa, parece que los valores se mantienen bastante altos, variando en gran medida entre el 60% y el 80%, de manera consistente. En general, la tendencia muestra un aumento acumulativo hasta principios de los años 2000, antes de disminuir nuevamente en 2007 y el rebote permaneciendo estable en niveles intermedios. Los datos estacionales muestran una fuerte tendencia anual con fases repetitivas que son una parte recurrente del carácter climático regional y de los incidentes de lluvia y sequía. Por otro lado, su parte aleatoria está definida por fluctuaciones repentinas y esporádicas resultantes de ocurrencias extremas agudas localizadas. La humedad relativa tiene un comportamiento general alto y estable, condicionado por los patrones climáticos estacionales y las modulaciones específicas de la variabilidad atmosférica.

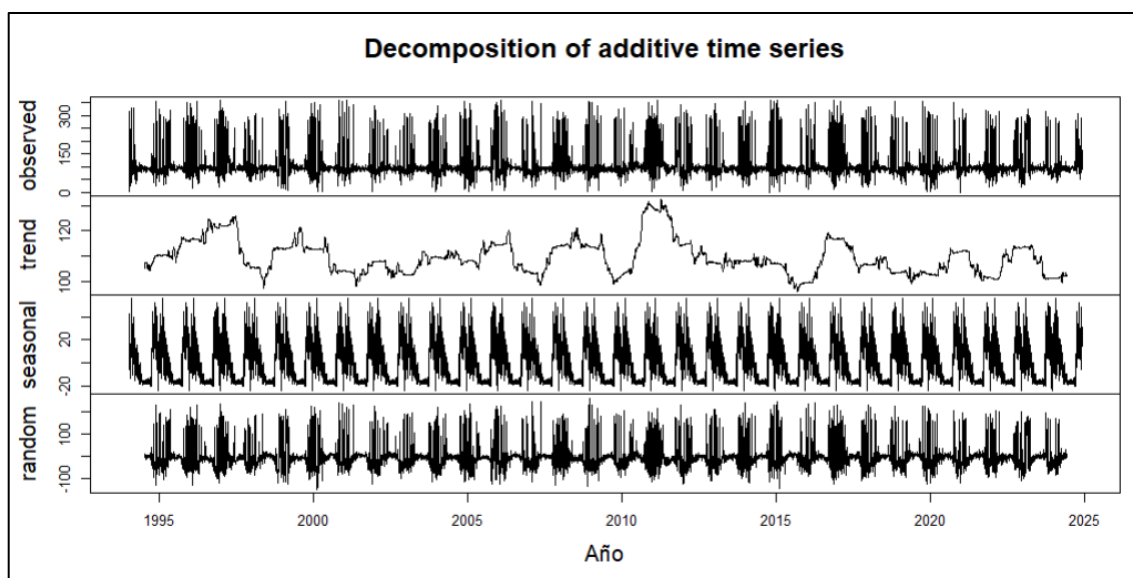
Figura 16. Descomposición de serie temporal de la velocidad del Viento.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la descomposición de la serie temporal de velocidad del viento evidencia que los valores se mantienen predominantemente entre 2 y 8 m/s, mostrando variaciones frecuentes y algunos picos aislados asociados a episodios de mayor intensidad. La tendencia general refleja fluctuaciones de largo plazo, con un incremento hacia finales de la década de 1990, seguido por descensos y repuntes sucesivos alrededor de los años 2005, 2010 y 2015, hasta estabilizarse con un leve aumento en el periodo más reciente. El componente estacional muestra un patrón anual estacional fuerte con una actividad estacional muy predecible y constante, lo que indica la gran importancia que se le da a la influencia del patrón climático estacional en la dinámica del viento. En cuanto al componente aleatorio, esto incluye cualquier cosa que no pueda explicarse por la tendencia o la estacionalidad, enfatizando por un lado eventos de viento irregular y ráfagas y, al mismo tiempo, eventos ocasionales de viento extremo. En general, la serie muestra que generalmente se favorecen intensidades moderadas, aunque también con una variación esporádica al alza, como es indicativo de variaciones en el régimen de viento local.

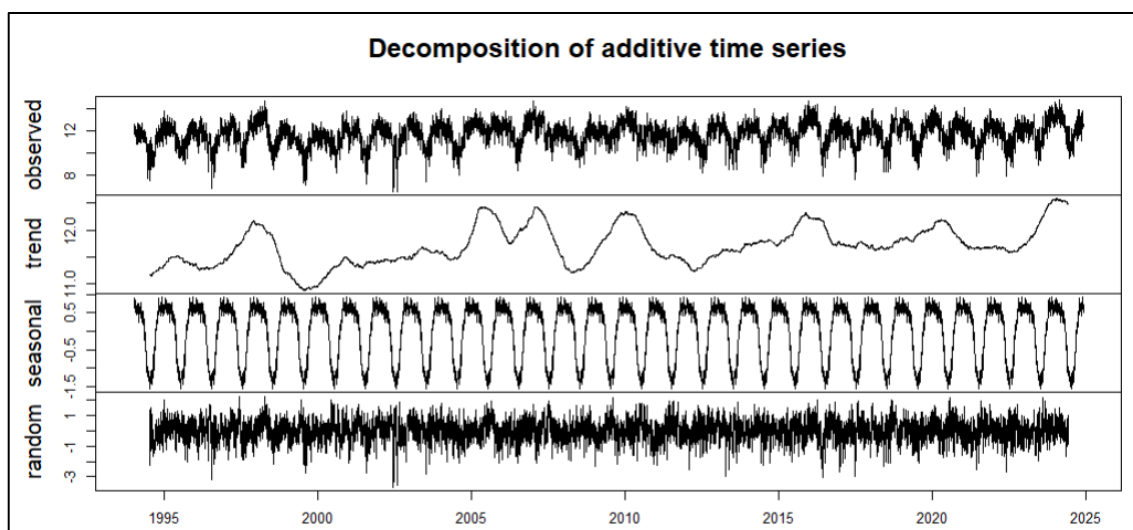
Figura 17. Descomposición de serie temporal de la dirección del viento.



Fuente: Elaboración propia.

La descomposición de la serie temporal de la dirección del viento revela una variabilidad continua y amplia, caracterizada por cambios bruscos y recurrentes a lo largo del tiempo. En la tendencia general, los valores mostraron fluctuaciones a medio y largo plazo, un aumento notable a principios de los años 2000 seguido de descensos y fluctuaciones, y luego estabilización en años posteriores. El componente estacional exhibe una tendencia anual regular y recurrente que indica la influencia significativa que los ciclos climáticos dependientes de la estación tienen en la dirección del viento. El componente aleatorio, por último, comprende toda la variación que ya no es explicada por los otros factores, incluyendo picos atípicos que indican cambios abruptos en la dirección del viento, posiblemente influenciados por fenómenos atmosféricos locales o eventos meteorológicos severos.

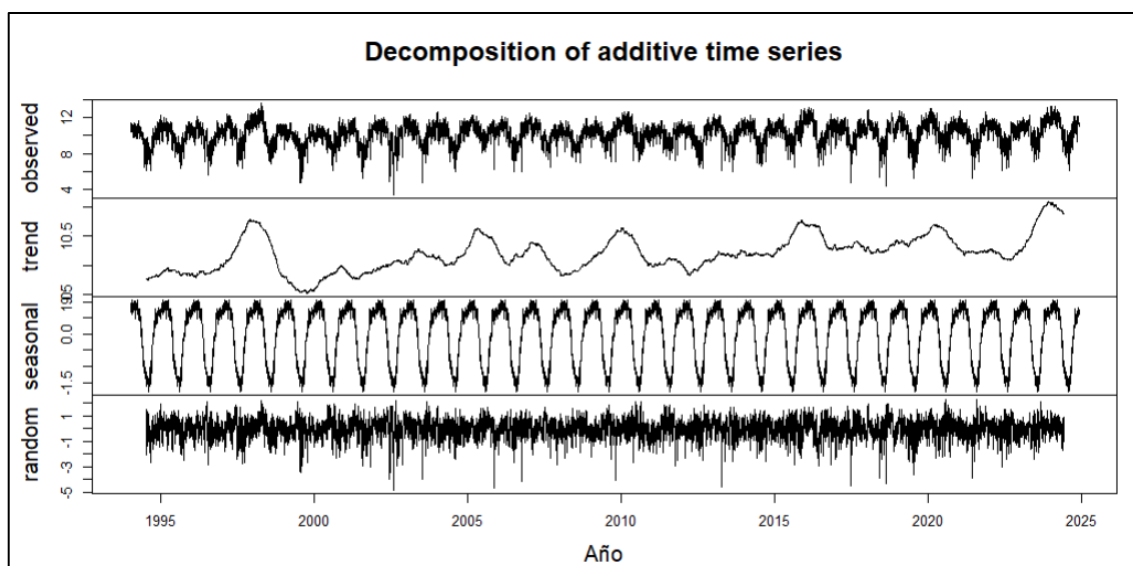
Figura 18. Descomposición de serie temporal de la temperatura media.



Fuente: Elaboración propia.

La descomposición de la serie temporal de temperatura media revela un comportamiento estable, con fluctuaciones regulares que se mantienen dentro de un rango constante a lo largo del tiempo. La tendencia general es a largo plazo con aumentos/disminuciones y luego una restauración progresiva en años más recientes. En la parte estacional, tenemos un ciclo estacional y recurrente notable que ilustra los efectos de los ciclos climáticos estacionales en la temperatura. El último componente, el aleatorio, organiza las fluctuaciones menores en aquellas que están asociadas con cambios particulares que no pueden ser explicados ni por la tendencia ni por el comportamiento estacional.

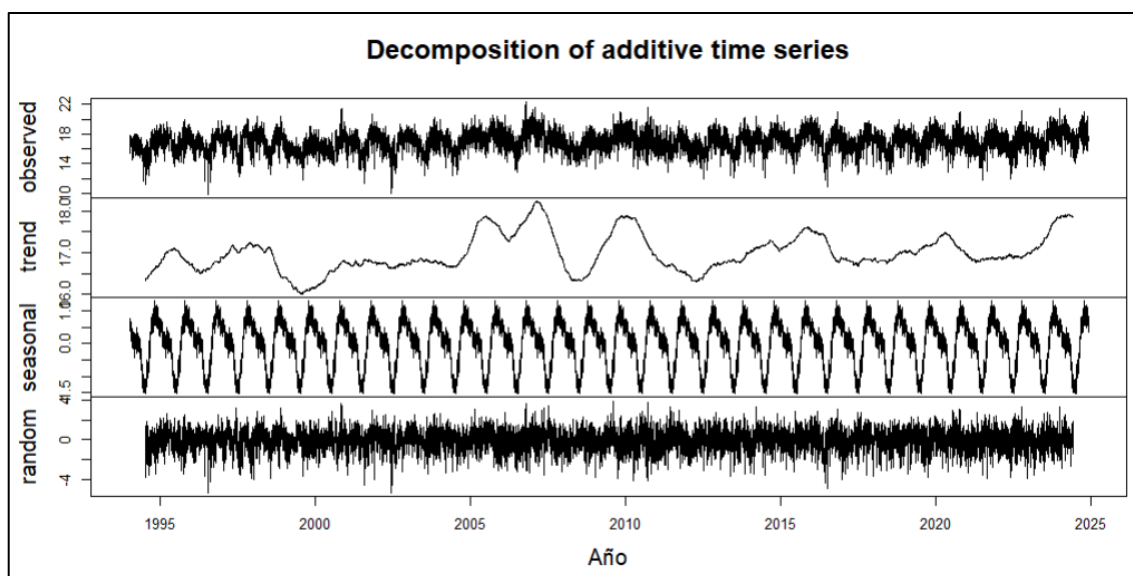
Figura 19. Descomposición de serie temporal de la temperatura de bulbo.



Fuente: Elaboración propia.

La descomposición de la serie temporal de la temperatura de bulbo húmedo evidencia un comportamiento estable, con fluctuaciones regulares que se mantienen a lo largo del periodo analizado. Estas tendencias también tienen una variación a largo plazo, por lo que experimentan un aumento de magnitud hacia finales de la década de 1990, un descenso intermedio y una recuperación prolongada a lo largo de los intervalos posteriores. El componente estacional muestra un ciclo anual y repetitivo, mostrando también características climáticas estacionales en la región. Por el contrario, solo la parte aleatoria es significativa para picos únicos y no uniformes, y por lo tanto, no tiene el efecto que tienen la tendencia y la estacionalidad.

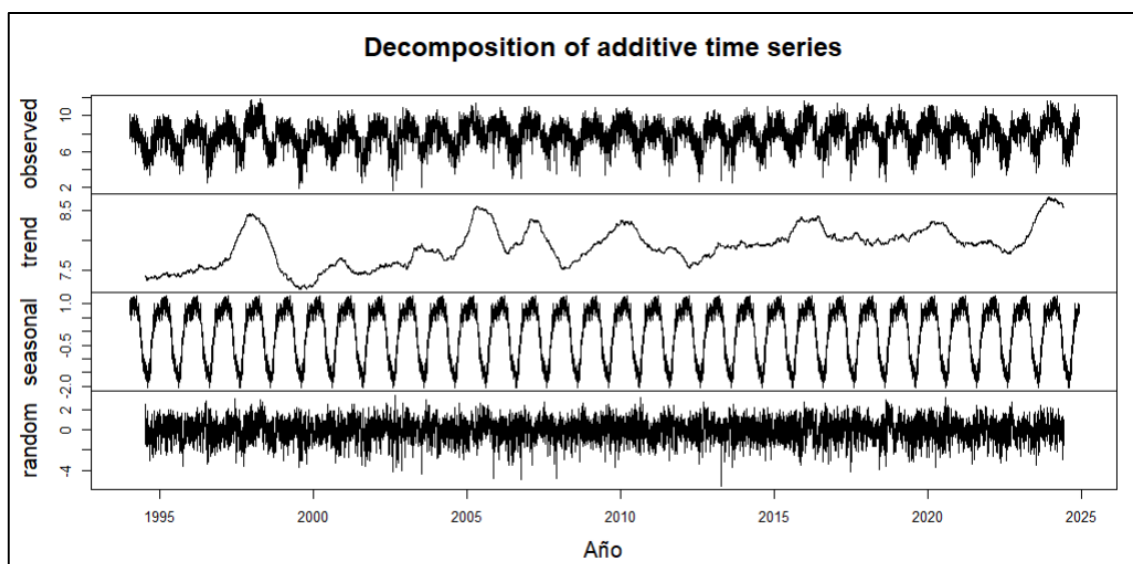
Figura 20. Descomposición de serie temporal de la temperatura máxima.



Fuente: Elaboración propia.

La descomposición de la serie temporal de la temperatura máxima revela valores observados con estabilidad general y variaciones regulares a lo largo del tiempo. Esta tendencia es consistente con una trayectoria a largo plazo de cambios, con niveles en aumento hasta finales de la década de 1990, luego descensos y tendencias al alza en períodos de tiempo más recientes. Del componente estacional podemos ver un patrón anual que se repite notablemente y muestra la influencia directa de las variaciones climáticas estacionales. La última de las tres cosas es el componente aleatorio, que agrupa las oscilaciones irregulares a corto plazo con efectos menores en comparación con la influencia significativa de la tendencia y la estacionalidad.

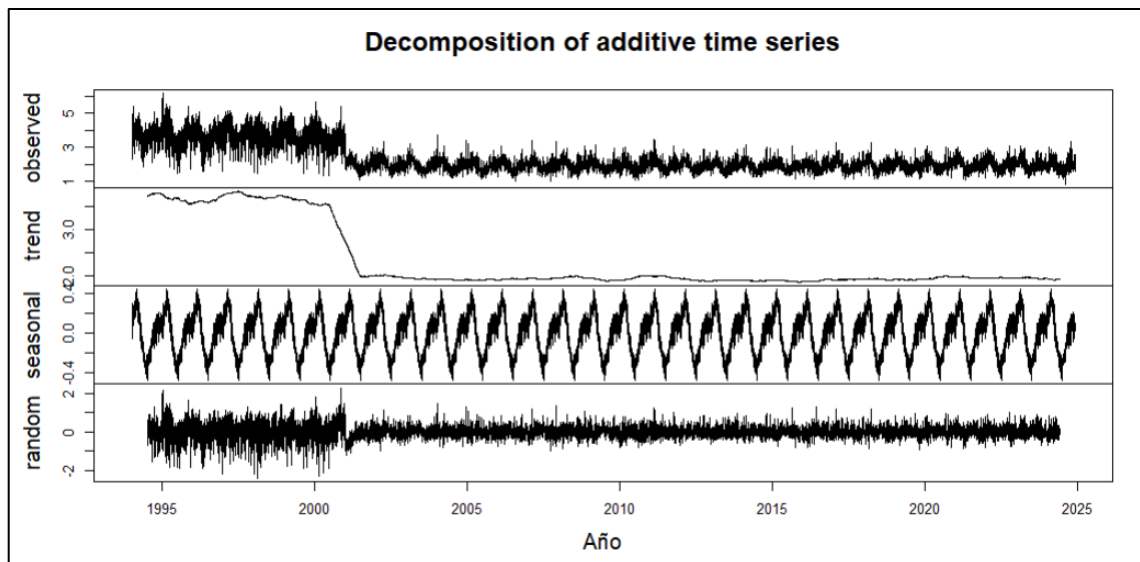
Figura 21. Descomposición de serie temporal de la temperatura mínima.



Fuente: Elaboración propia.

La descomposición de la serie temporal de la temperatura mínima evidencia valores observados con oscilaciones regulares a lo largo del tiempo. La tendencia muestra variaciones de largo plazo, con un incremento hacia finales de la década de 1990, descensos intermedios y un ascenso progresivo y sostenido en los años recientes. El componente estacional presenta un ciclo anual claramente definido, característico de los patrones climáticos propios de la zona. Finalmente, el componente aleatorio integra las fluctuaciones irregulares de corta duración, cuyo efecto resulta limitado frente a la marcada influencia de la tendencia general y la estacionalidad.

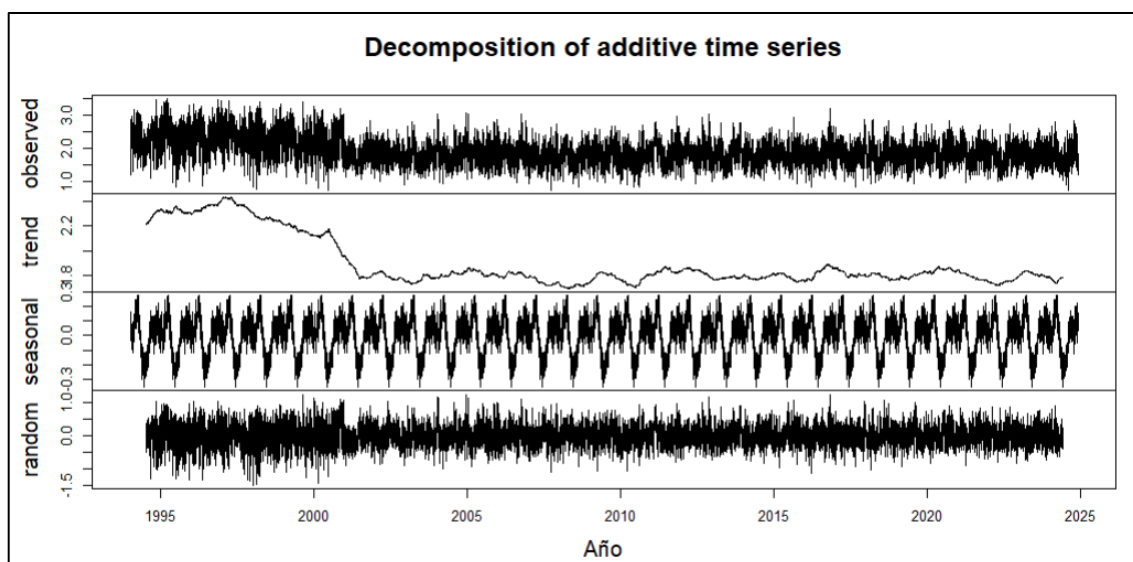
Figura 22. Descomposición de serie temporal de la luz solar difusa.



Fuente: Elaboración propia.

La descomposición de la serie temporal de la luz solar difusa revela valores observados relativamente estables, aunque con una variabilidad perceptible a lo largo del tiempo. Ahora, a partir de esta tendencia, podemos observar una disminución significativa a principios de los años 2000, seguida de niveles bajos casi constantes y casi uniformes. Esto se deriva de la variación estacional natural de la radiación solar a lo largo del año, creando un ciclo anual prominente. Finalmente, este componente aleatorio muestra variaciones impredecibles a menor escala que no alteran significativamente el patrón general establecido por la estacionalidad.

Figura 23. Descomposición de serie temporal de la temperatura mínima.

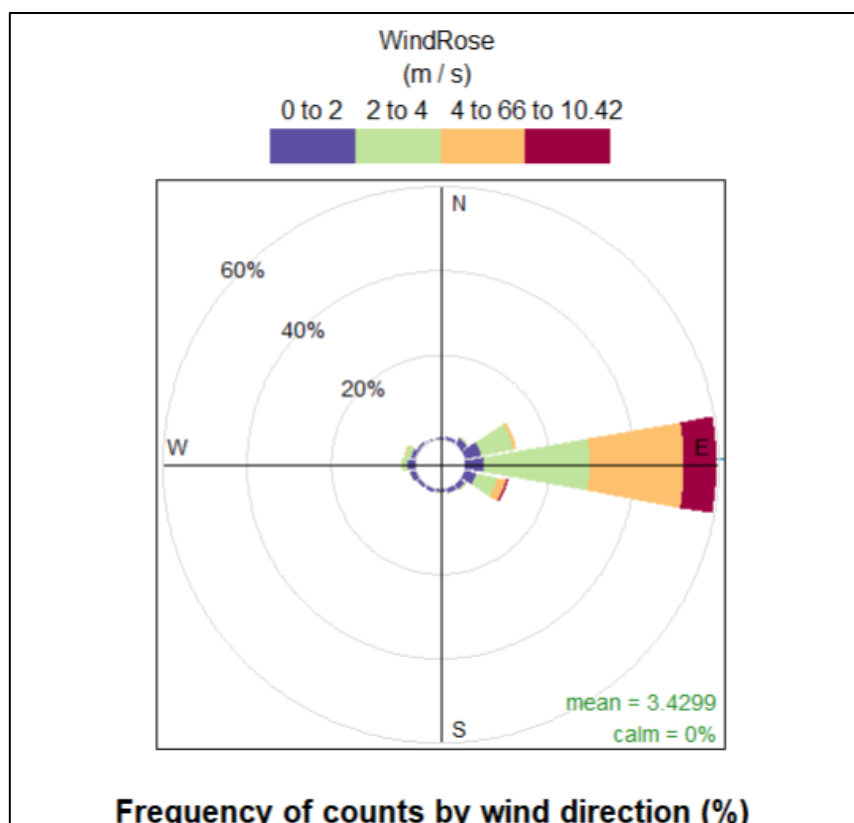


Fuente: Elaboración propia.

La descomposición de la serie temporal de la luz solar y la radiación difusa evidencia una marcada variabilidad en los valores observados, con repeticiones cíclicas bien definidas. La tendencia general muestra un descenso sostenido desde finales de la década de 1990 hasta aproximadamente 2005, seguido de una estabilización en niveles más bajos y constantes. El componente estacional revela un patrón anual claramente identificado, asociado con los procesos naturales de variación de la radiación solar a lo largo del año. Por su parte, el componente aleatorio presenta fluctuaciones irregulares de corta duración que no modifican de manera significativa el comportamiento general determinado por la tendencia y la estacionalidad.

5.4 Rosa de los vientos del modelo ejecutado en Rstudio

Figura 24. Rosa de los vientos

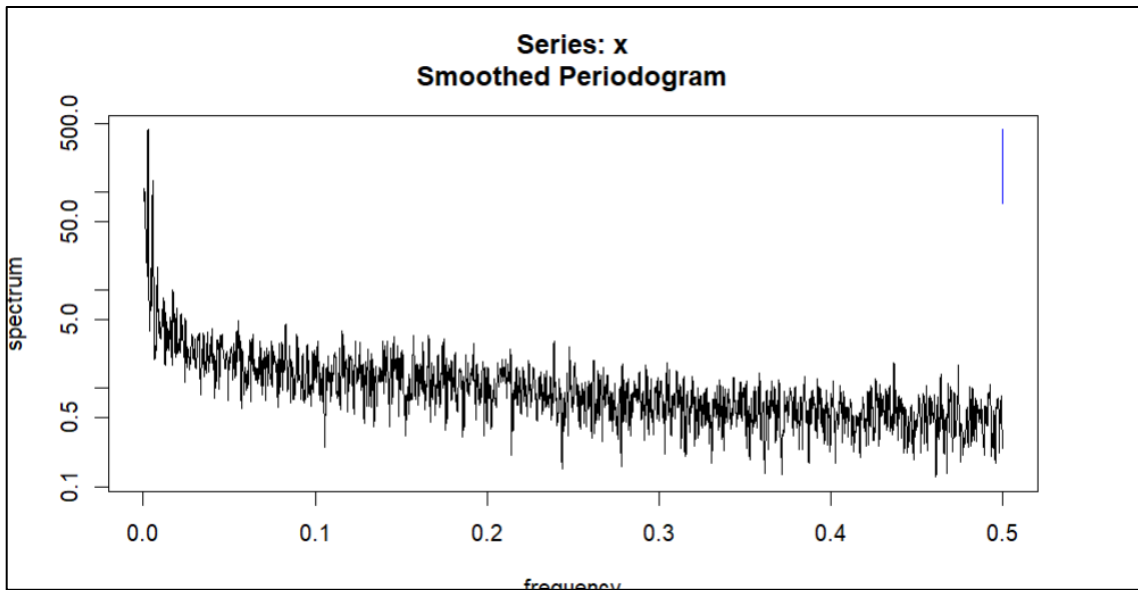


Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la rosa de los vientos evidencia que la circulación atmosférica en la zona se encuentra dominada por corrientes provenientes del Este (E), alcanzando frecuencias superiores al 60%. Las velocidades de viento más recurrentes se sitúan entre 2 y 6 m/s, aunque se registran episodios aislados con intensidades cercanas a los 10.4 m/s. Cabe destacar que no se identifican condiciones de calma (0%), y la velocidad promedio registrada es de 3.43 m/s. En conjunto, estos resultados indican un régimen de viento constante, predominantemente direccional y con una intensidad moderada orientada principalmente hacia el sector oriental.

5.5 Periodograma de las variables del modelo ejecutado en Rstudio

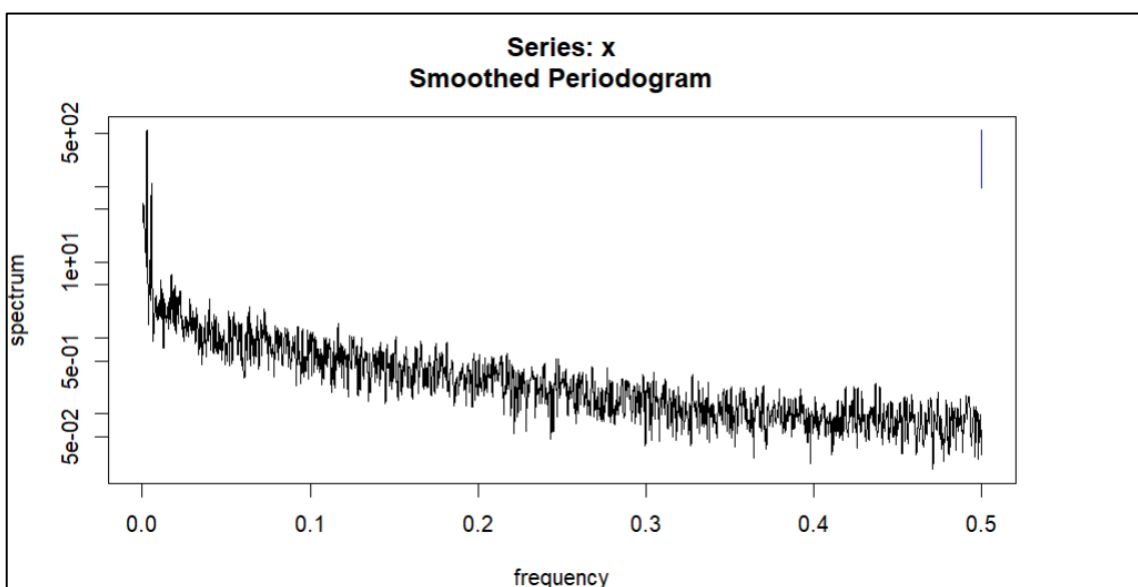
Figura 25. Periodograma de la Temperatura Máxima



Fuente: Elaboración propia.

El análisis del periodograma muestra que la temperatura máxima está asociada principalmente a componentes de baja frecuencia, lo que indica que su variación está condicionada por ciclos prolongados o de carácter estacional. Esto significa que los cambios más relevantes en este parámetro térmico se manifiestan de manera gradual en el tiempo, mientras que las oscilaciones de corto plazo ejercen una influencia limitada sobre el comportamiento general de la serie.

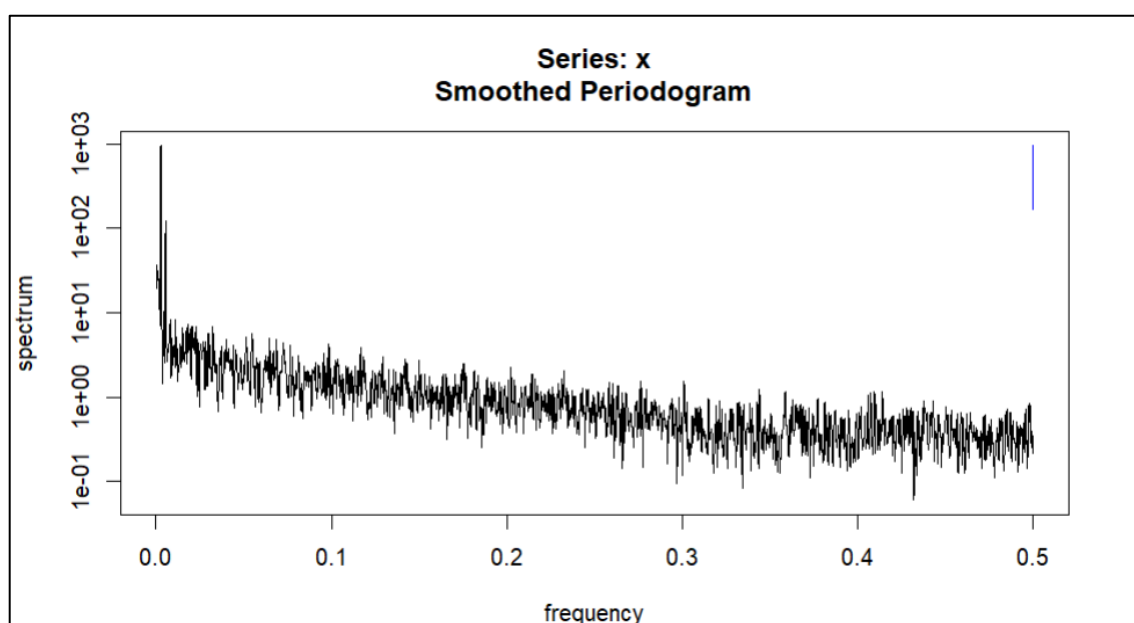
Figura 26. Periodograma de la Temperatura Media



Fuente: Elaboración propia.

El periodograma suavizado correspondiente a la temperatura media presenta en el eje X las frecuencias y en el eje Y la densidad espectral. También se observa un gran aumento en las frecuencias más bajas (cerca de 0), lo que indica el impacto de los elementos a largo plazo de la serie temporal. A medida que la frecuencia aumenta, la energía espectral disminuye progresivamente, lo que sugiere un menor impacto de los cambios debidos al ruido en comparación con los ciclos de baja frecuencia. Debido a todo esto, los patrones estacionales o las tendencias largas dominan el comportamiento promedio, y las variaciones aleatorias parecen ocupar una posición secundaria.

Figura 27. Periodograma de la Temperatura Mínima.

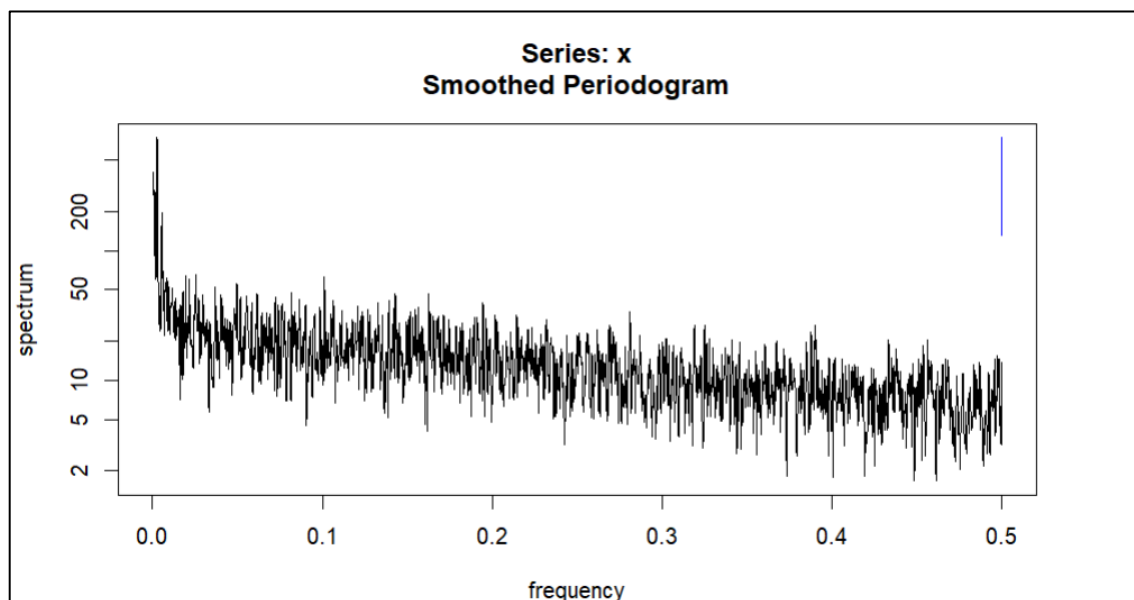


Fuente: Elaboración propia.

El periodograma suavizado de la temperatura mínima evidencia que la mayor parte de la energía espectral se concentra en las frecuencias más bajas (próximas a 0), lo cual indica la presencia de una tendencia marcada y de componentes de largo plazo predominantes en la serie temporal. A medida que la frecuencia incrementa, la densidad espectral decrece gradualmente, lo que demuestra que las variaciones rápidas o de corta duración ejercen una influencia limitada sobre su comportamiento. En este sentido, la temperatura mínima está fuertemente condicionada por ciclos estacionales y patrones persistentes, mientras que las

fluctuaciones aleatorias de alta frecuencia tienen un impacto comparativamente menor.

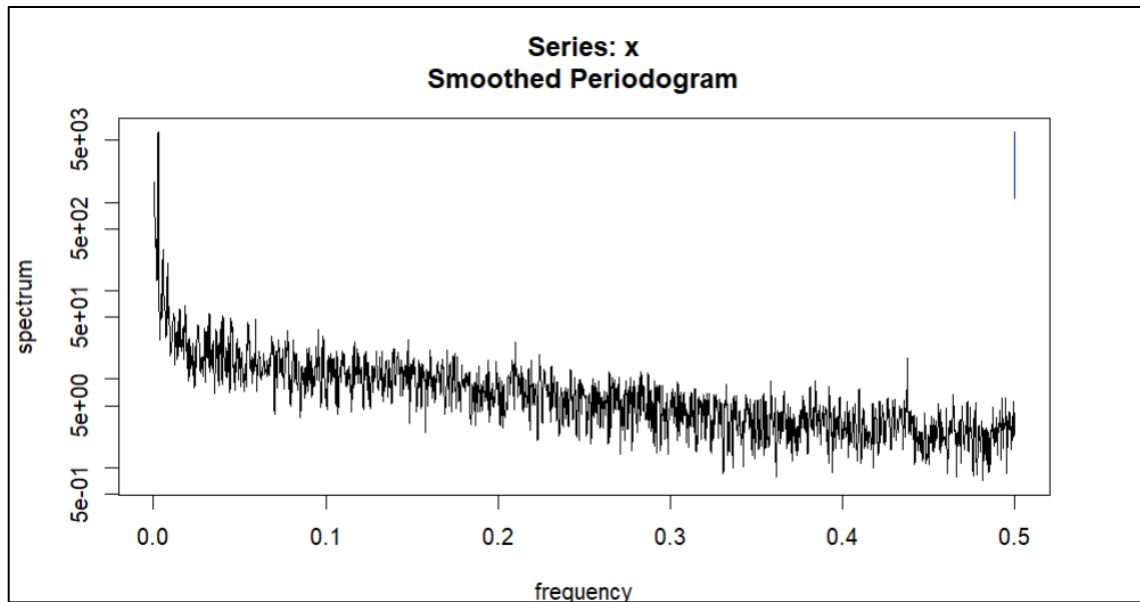
Figura 28. Periodograma de la Temperatura Mínima.



Fuente: Elaboración propia.

El periodograma suavizado de la precipitación revela un pico destacado en las frecuencias más bajas (cercasas a 0), lo que evidencia la presencia de tendencias y ciclos de largo plazo que predominan en la serie. Conforme la frecuencia aumenta, la densidad espectral disminuye de manera notable, indicando que las variaciones rápidas o de alta frecuencia aportan muy poco al comportamiento general. Esto confirma que la dinámica de la precipitación está condicionada principalmente por patrones estacionales y persistentes, mientras que las fluctuaciones aleatorias de corta duración tienen una influencia limitada.

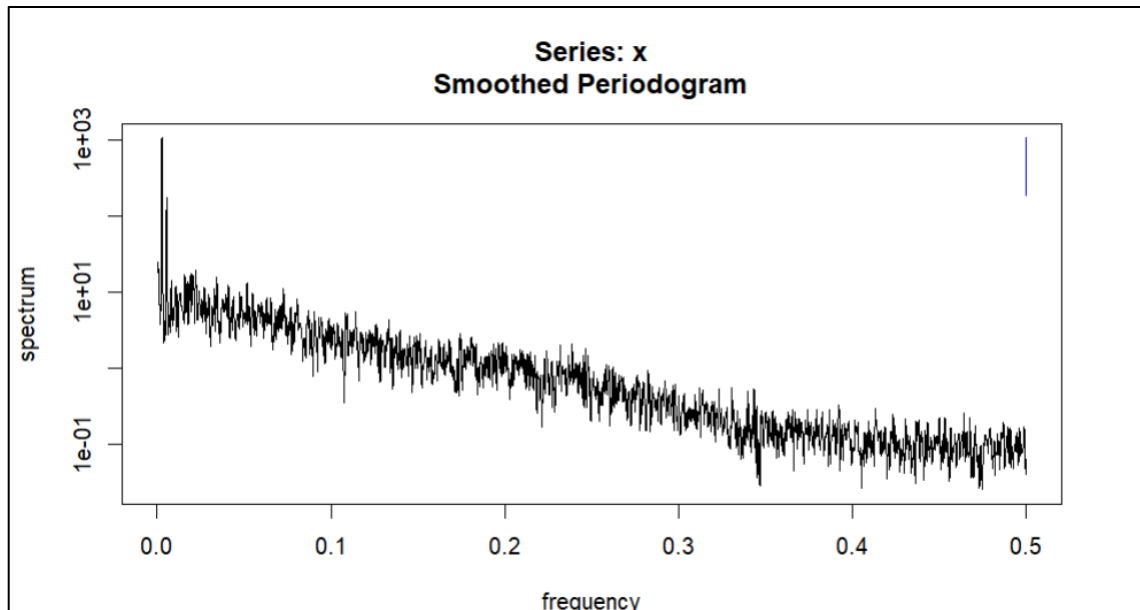
Figura 29. Periodograma de la Humedad Relativa.



Fuente: Elaboración propia.

El periodograma suavizado de la humedad relativa muestra un pico predominante en las frecuencias más bajas, lo que indica la presencia de ciclos extensos y de carácter estacional dentro de la serie. A medida que la frecuencia incrementa, la densidad espectral desciende de forma abrupta y se mantiene en niveles reducidos, lo que evidencia que este parámetro está influenciado principalmente por variaciones de largo plazo, mientras que las fluctuaciones rápidas o de origen aleatorio tienen una participación mínima en su comportamiento general.

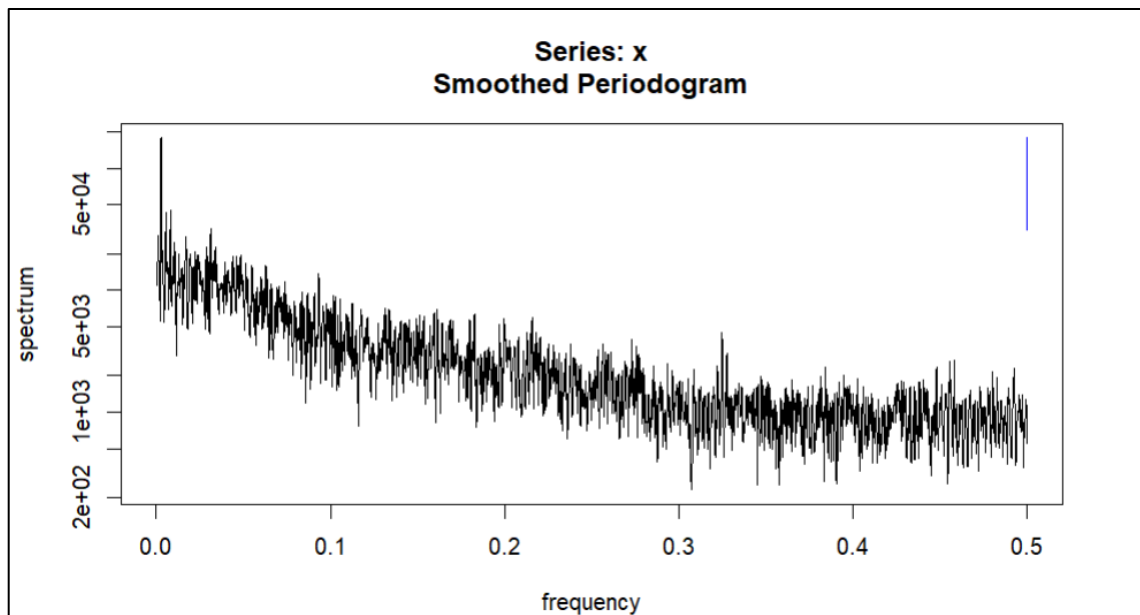
Figura 30. Periodograma de la velocidad del viento.



Fuente: Elaboración propia.

El periodograma suavizado de la velocidad del viento evidencia un pico pronunciado en las frecuencias más bajas, lo que sugiere que la mayor parte de su variabilidad está asociada a ciclos estacionales y patrones de largo plazo. Conforme la frecuencia aumenta, la densidad espectral disminuye gradualmente, indicando que las fluctuaciones rápidas o de corta duración tienen una influencia reducida en la serie. En síntesis, la dinámica de la velocidad del viento está mayormente determinada por tendencias persistentes y ciclos estacionales, mientras que las variaciones aleatorias presentan un impacto limitado.

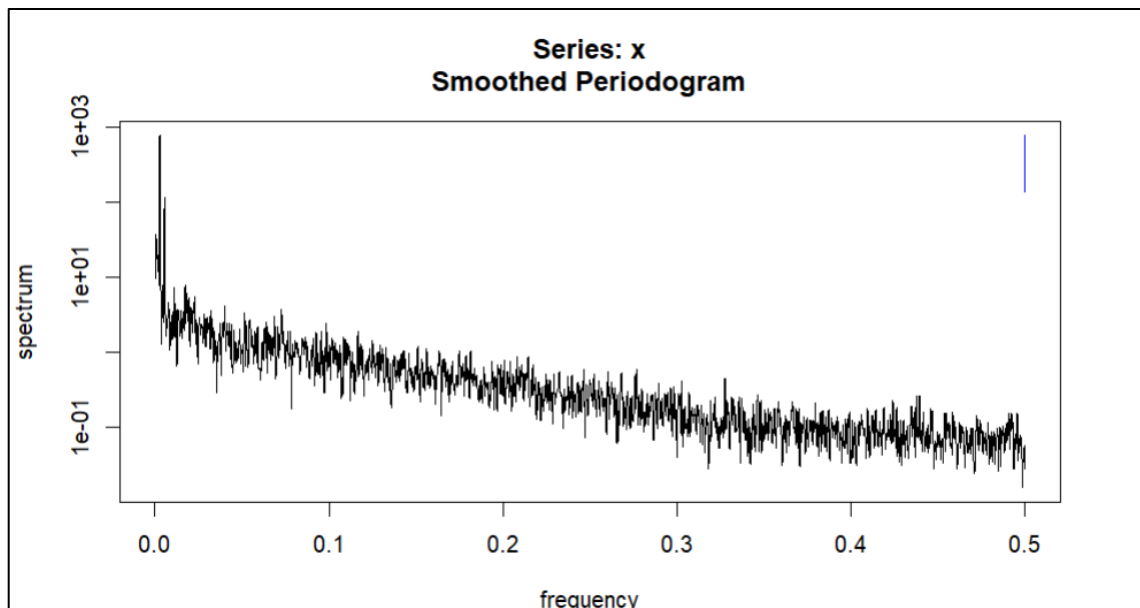
Figura 31. Periodograma de la dirección del viento.



Fuente: Elaboración propia.

El periodograma suavizado de la dirección del viento muestra un pico destacado en las frecuencias más bajas, lo cual evidencia la presencia de ciclos estacionales o patrones de largo plazo que influyen en su comportamiento. Con el aumento de la frecuencia, la densidad espectral disminuye gradualmente; sin embargo, se observa cierta variabilidad, lo que indica que algunas de las oscilaciones pueden ser rápidas o de corta duración, pero contribuyen menos a la variabilidad general de la serie. La dirección del viento en la mayoría de los componentes está dominada por los componentes de baja frecuencia que están asociados con las estaciones anuales, así como por variaciones aleatorias en intervalos cortos.

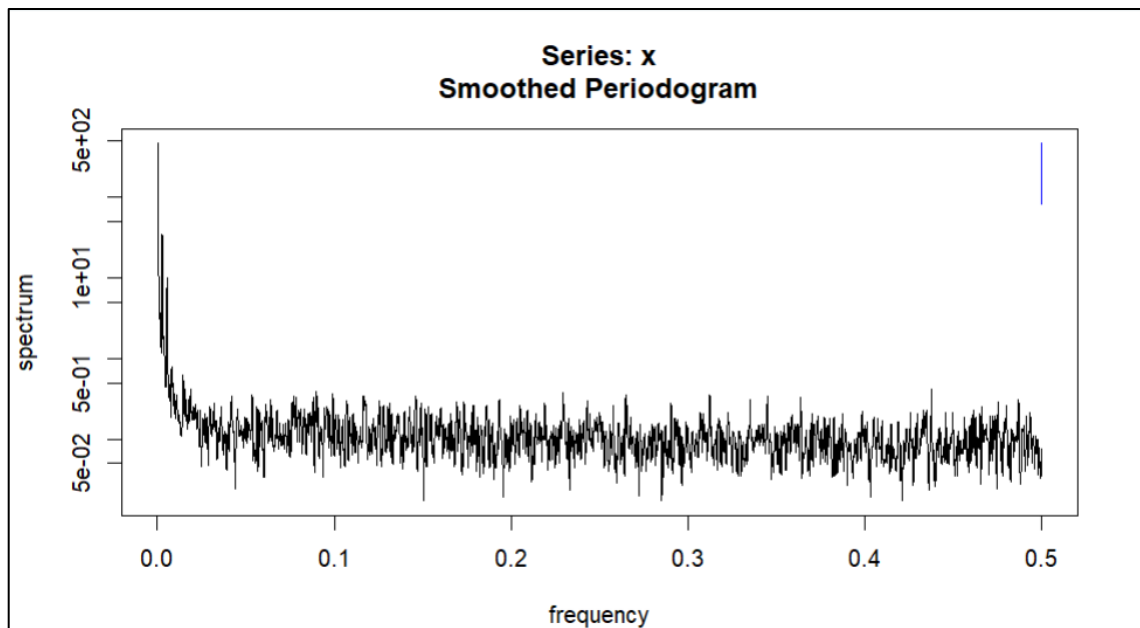
Figura 32. Periodograma de la temperatura de bulbo.



Fuente: Elaboración propia.

El periodograma suavizado de la temperatura de bulbo húmedo evidencia un pico marcado en las frecuencias más bajas, lo cual indica que su variabilidad está principalmente influenciada por patrones estacionales o de largo plazo. A medida que la frecuencia aumenta, la densidad espectral disminuye gradualmente, lo que sugiere que las fluctuaciones rápidas o de corta duración aportan poca variabilidad al comportamiento general de la serie. En conjunto, la temperatura de bulbo húmedo se caracteriza por una dinámica estable en escalas amplias, acompañada de variaciones de menor intensidad en periodos más breves.

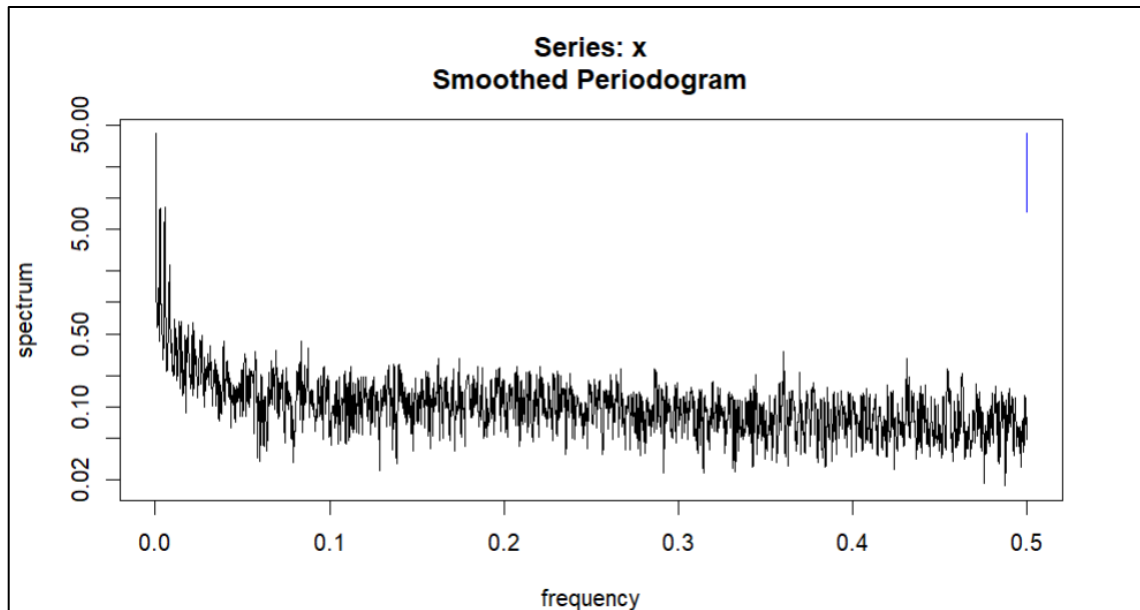
Figura 33. Periodograma de la luz difusa.



Fuente: Elaboración propia.

El periodograma indica que la radiación solar está controlada principalmente por componentes de baja frecuencia, lo que refleja una variabilidad estacional marcada y sostenida en el tiempo. Esto confirma que las variaciones más relevantes en la radiación ocurren de forma gradual y cíclica, siguiendo el comportamiento anual. En contraste, las fluctuaciones de corto plazo como episodios de nubosidad o cambios atmosféricos puntuales que aportan una influencia menor sobre la variación global de la serie.

Figura 34. Periodograma de la luz solar y difusa.

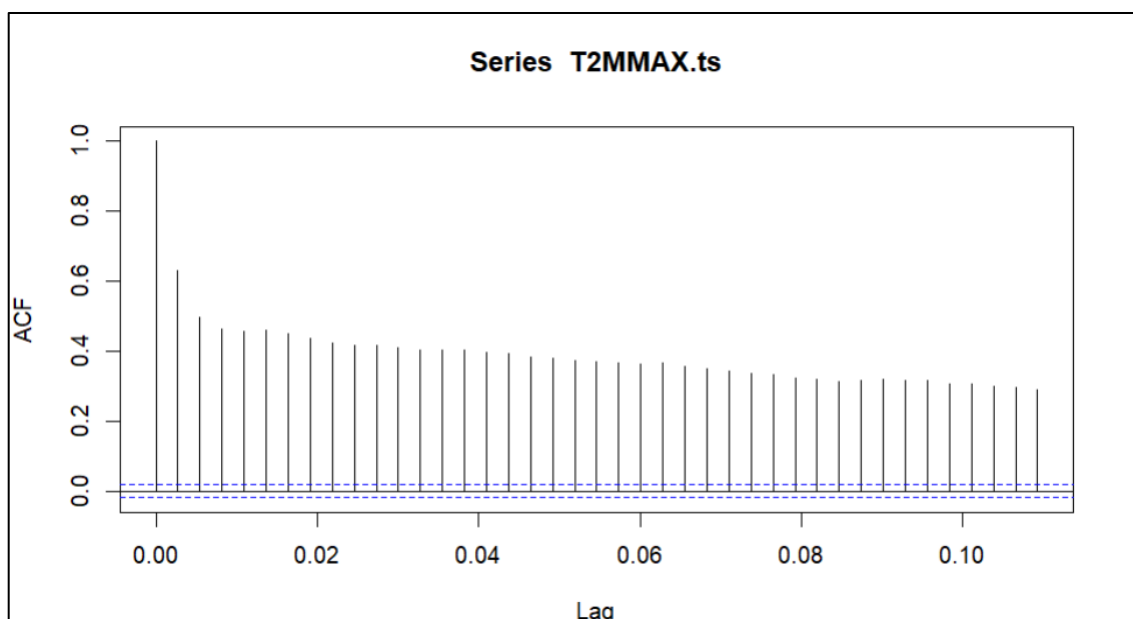


Fuente: Elaboración propia.

El periodograma suavizado de la radiación solar y la radiación difusa muestra un pico muy marcado en las frecuencias más bajas, lo que evidencia que la variabilidad está dominada por componentes de largo plazo, principalmente asociadas a ciclos estacionales (tanto diarios como anuales). Conforme la frecuencia incrementa, la energía espectral disminuye de manera abrupta y luego se mantiene en valores bajos y estables. Esto sugiere que las variaciones rápidas o de alta frecuencia tienen una influencia limitada en la dinámica general de la radiación solar, aportando solo cambios menores frente a los patrones estacionales predominantes.

5.6 Función de Autocorrelación de las variables del modelo ejecutado en Rstudio

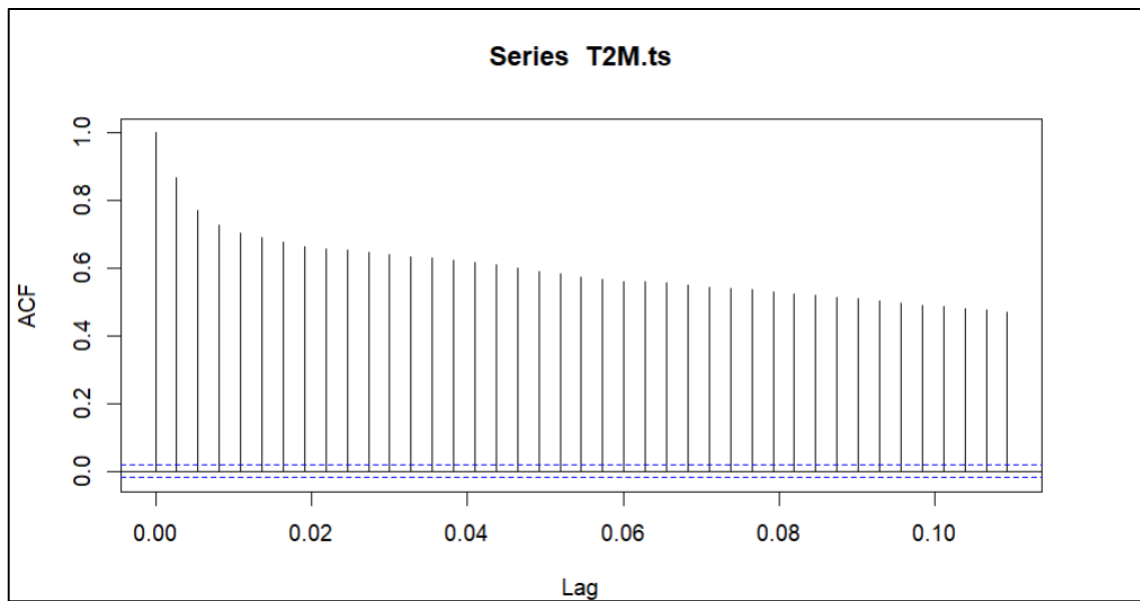
Figura 35. Función ACF para la Temperatura Máxima.



Fuente: Elaboración propia.

La función de autocorrelación (ACF) para la temperatura máxima presenta un valor inicial de 1 en el retardo 0 y muestra una disminución progresiva conforme aumentan los lags. El comportamiento de la serie muestra una persistencia temporal bastante alta, con correlaciones significativas en varios rezagos. Esta pérdida gradual de los coeficientes de autocorrelación revela que la serie no es estacionaria y muestra largas dependencias a lo largo del tiempo. Por lo tanto, es necesario implementar transformaciones (diferenciación, eliminación de tendencia, etc.) para que pueda ser modelada adecuadamente utilizando técnicas de análisis de series temporales.

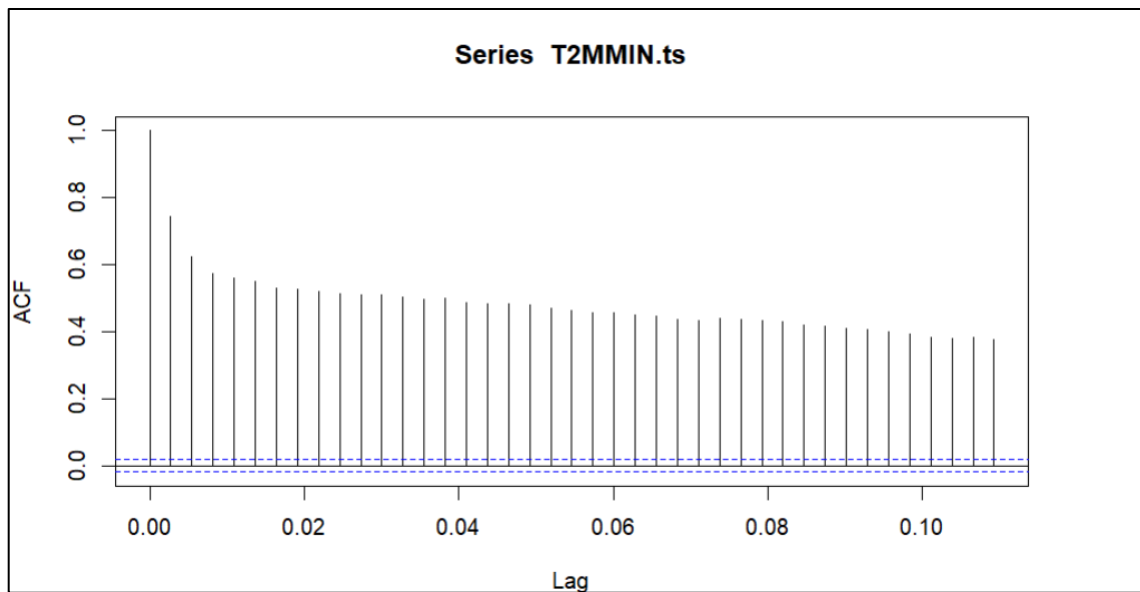
Figura 36. Función ACF para la Temperatura Media.



Fuente: Elaboración propia.

La función de autocorrelación (ACF) de la temperatura media muestra coeficientes elevados en los primeros retardos, disminuyendo de forma progresiva a medida que aumentan los lags. En este patrón, la dependencia temporal muestra una fuerte relación entre los valores presentes y los datos pasados. La disminución gradual en la autocorrelación sugiere que la serie no exhibe estacionariedad, ya que mantiene una estructura consistente a lo largo del tiempo. Para un modelado efectivo, se necesitan métodos como la diferenciación o las transformaciones para suprimir la tendencia y reducir las correlaciones prolongadas.

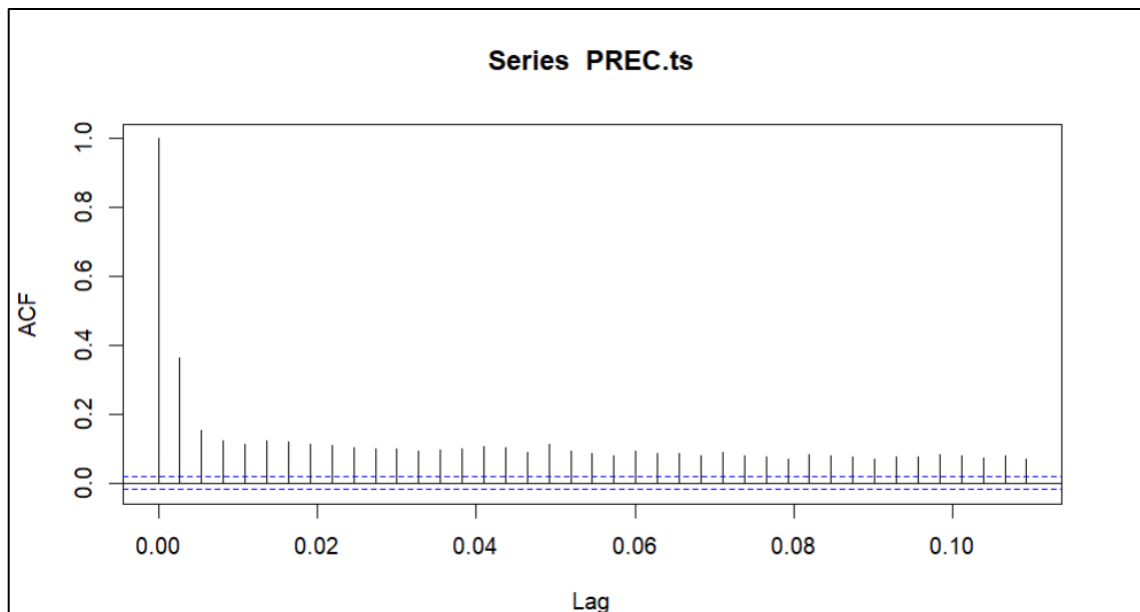
Figura 37. Función ACF para la Temperatura Mínima.



Fuente: Elaboración propia.

La función de autocorrelación (ACF) de la temperatura mínima presenta coeficientes considerablemente altos en los primeros retardos, disminuyendo de forma lenta y continua conforme aumentan los lags. Este patrón indica que hay una fuerte dependencia temporal: los valores actuales están estrechamente relacionados con las observaciones anteriores. La persistencia de altas autocorrelaciones a lo largo de varios rezagos sugiere que la serie no es estacionaria, ya que mantiene una tendencia y una memoria temporal marcada. Por lo tanto, se necesitaría algún tipo de diferenciación u otro enfoque transformado para su análisis y predicción, donde el modelo podría estabilizar la variabilidad en la escala de tiempo y mitigar la dependencia sostenida

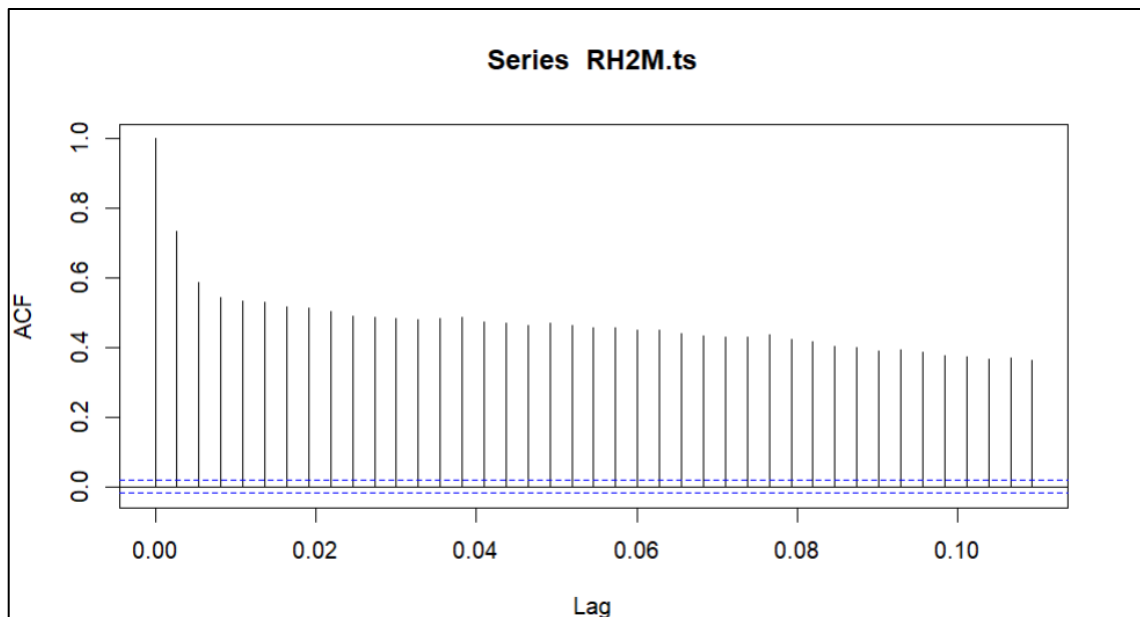
Figura 38. Función ACF para la Precipitación.



Fuente: Elaboración propia.

La función de autocorrelación (ACF) de la precipitación muestra un valor inicial alto en el rezago cero, seguido de un descenso marcado en los retardos posteriores, donde los coeficientes se mantienen cercanos a cero y, en su mayoría, dentro de los límites de significancia. Esto indica que la serie de precipitaciones exhibe baja persistencia temporal, a diferencia de lo observado con las variables de temperatura, y por lo tanto muestra una dependencia muy baja entre valores sucesivos. Estadísticamente, este patrón es consistente con una tendencia a la estacionariedad, cuando la fuerte correlación se atenúa rápidamente y no muestra una tendencia de serie temporal a largo plazo. Pero hay algunos picos aislados en los rezagos iniciales que probablemente están asociados con el efecto de acumulación o estacional conocido por ocurrir con los patrones de precipitación.

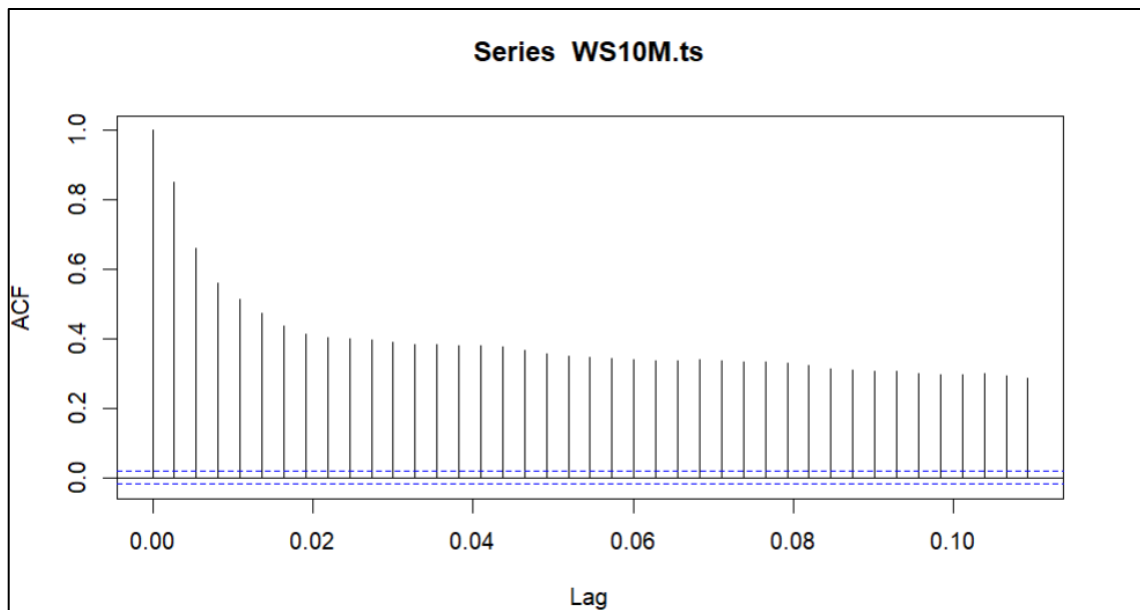
Figura 39. Función ACF para la Humedad Relativa.



Fuente: Elaboración propia.

La función de autocorrelación (ACF) de la humedad relativa muestra coeficientes positivos elevados en los primeros retardos, disminuyendo de manera gradual y manteniéndose significativos a lo largo de varios lags. Este comportamiento evidencia una alta persistencia temporal, indicando que los valores actuales de humedad están fuertemente condicionados por registros previos. Desde el punto de vista estadístico, esta prolongada estructura de correlación sugiere que la serie no es estacionaria y que podría incorporar componentes de tendencia o estacionalidad vinculadas a la dinámica climática local. Por ello, se recomienda aplicar técnicas de transformación o diferenciación con el fin de estabilizar la varianza y mitigar la dependencia a largo plazo antes de proceder con el ajuste de un modelo predictivo.

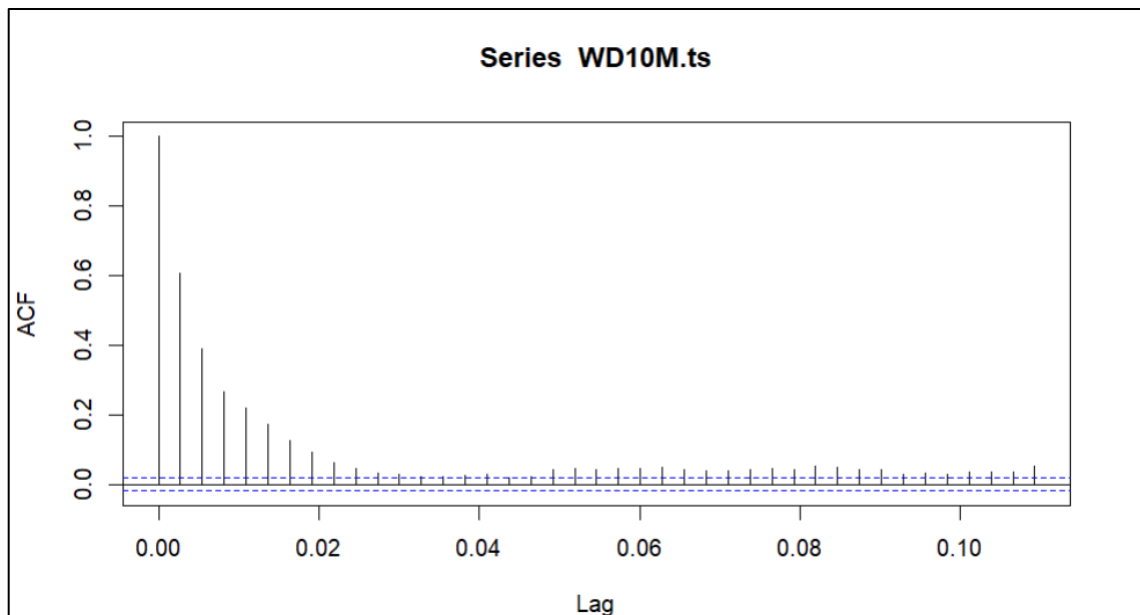
Figura 40. Función ACF para la Velocidad del Viento.



Fuente: Elaboración propia.

La función de autocorrelación (ACF) de la velocidad del viento presenta un coeficiente inicial alto, el cual desciende de manera gradual conforme aumentan los retardos, manteniéndose significativo en varios de ellos. Tales tendencias tienden a persistir con el tiempo, mostrando que los valores actuales del viento están influenciados por días pasados. La disminución gradual en la autocorrelación indica que la serie no es estacionaria, ya que contiene información que varía con el tiempo debido a fenómenos atmosféricos y fluctuaciones estacionales específicas del área. Por lo tanto, se recomienda aplicar técnicas de diferenciación o transformaciones similares para reducir la tendencia y estabilizar la serie antes de ajustar un modelo predictivo.

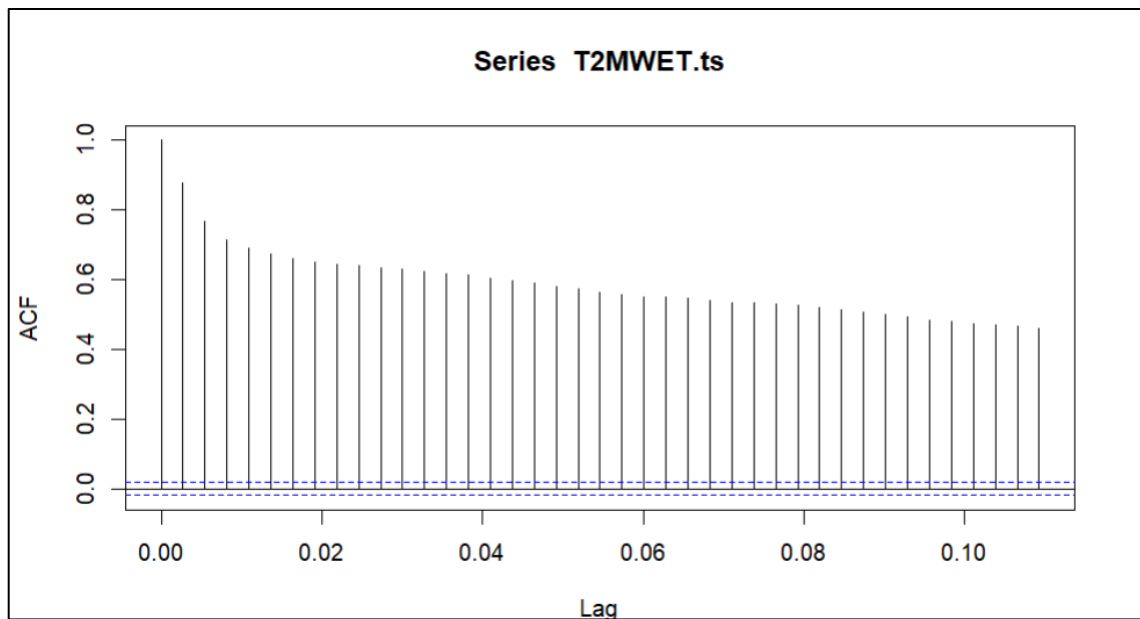
Figura 41. Función ACF para la Dirección del viento.



Fuente: Elaboración propia.

La función de autocorrelación (ACF) de la dirección del viento presenta un valor inicial alto que disminuye de forma rápida en los primeros retardos, acercándose posteriormente a niveles poco significativos conforme aumenta el desfase. Este comportamiento indica una dependencia de fase de corta duración, que es mucho más débil y menos persistente en comparación con otras variables climáticas, como la temperatura o la humedad. La naturaleza detectada implica que la dirección del viento tiene una mayor aleatoriedad y menos persistencia temporal, y se acerca a un comportamiento que se asemeja más a la estacionariedad. Sin embargo, para realizar este ejercicio y llevar a cabo un modelado predictivo, es necesario realizar un análisis de los posibles elementos estacionales o ciclos repetitivos de antemano.

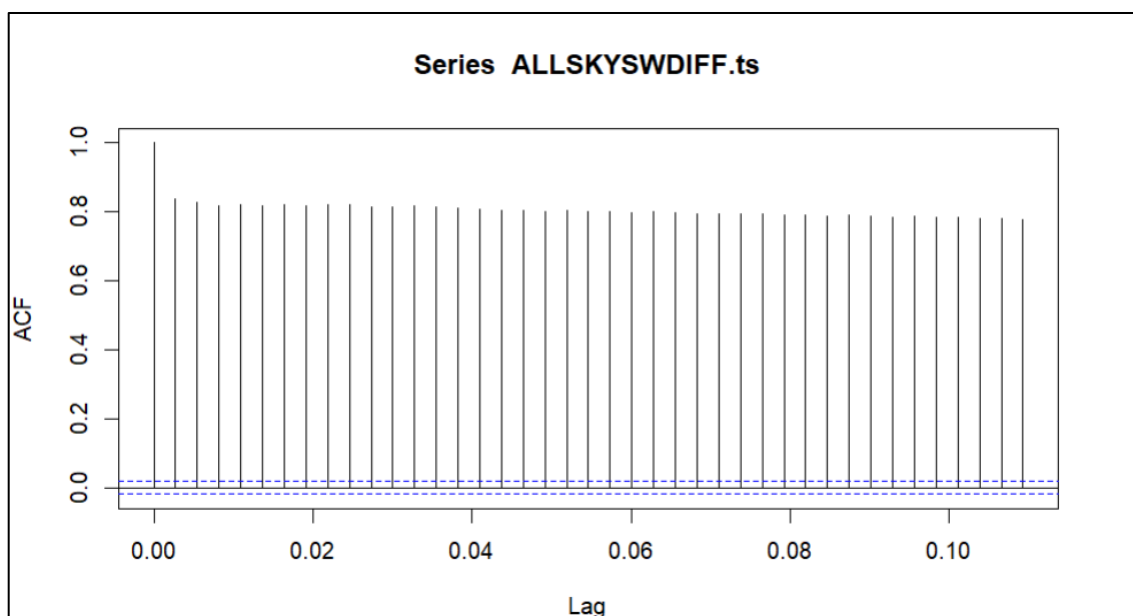
Figura 42. Función ACF para la Temperatura de bulbo.



Fuente: Elaboración propia.

La función de autocorrelación (ACF) de la temperatura de bulbo húmedo evidencia valores muy elevados en los primeros rezagos, los cuales disminuyen de forma lenta y gradual a medida que aumenta el desfase. Este patrón indica una marcada dependencia temporal y persistencia en los datos, lo que revela que la serie no presenta características de estacionariedad en su estado original. La continuidad de correlaciones significativas a lo largo de varios retardos sugiere la presencia de memoria temporal, por lo que será necesario aplicar transformaciones como diferenciación o ajustes estacionales para estabilizar la media y la varianza antes de proceder con su modelación estadística.

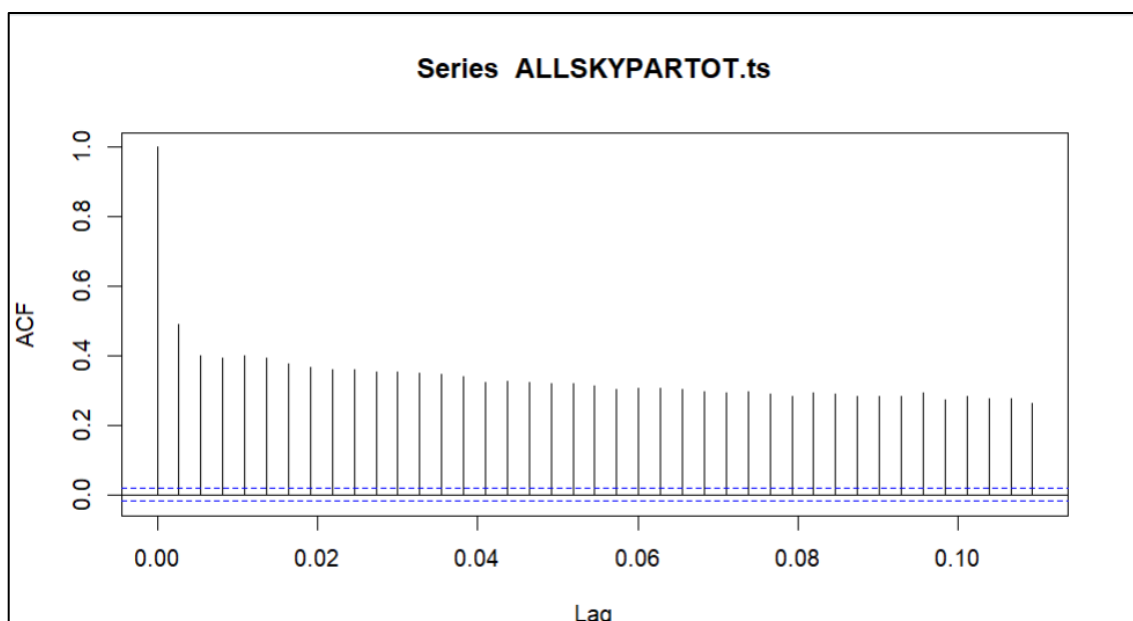
Figura 43. Función ACF para la Luz solar Difusa.



Fuente: Elaboración propia.

La función de autocorrelación (ACF) de la radiación solar difusa muestra una persistencia notable, manteniendo valores altos y relativamente constantes a lo largo de la mayoría de los rezagos analizados. Ese patrón sugiere una fuerte dependencia temporal y que la secuencia no tiene propiedades estacionarias en su forma original. La falta de una pérdida pronunciada de la autocorrelación sugiere que factores basados en tendencias o estaciones están influyendo en la variable. Se requerirá un ajuste adicional de los datos (adición de diferenciación o eliminación de componentes estacionales) para estabilizar la serie y ajustar modelos de predicción.

Figura 44. Función ACF para la Luz solar y Difusa.

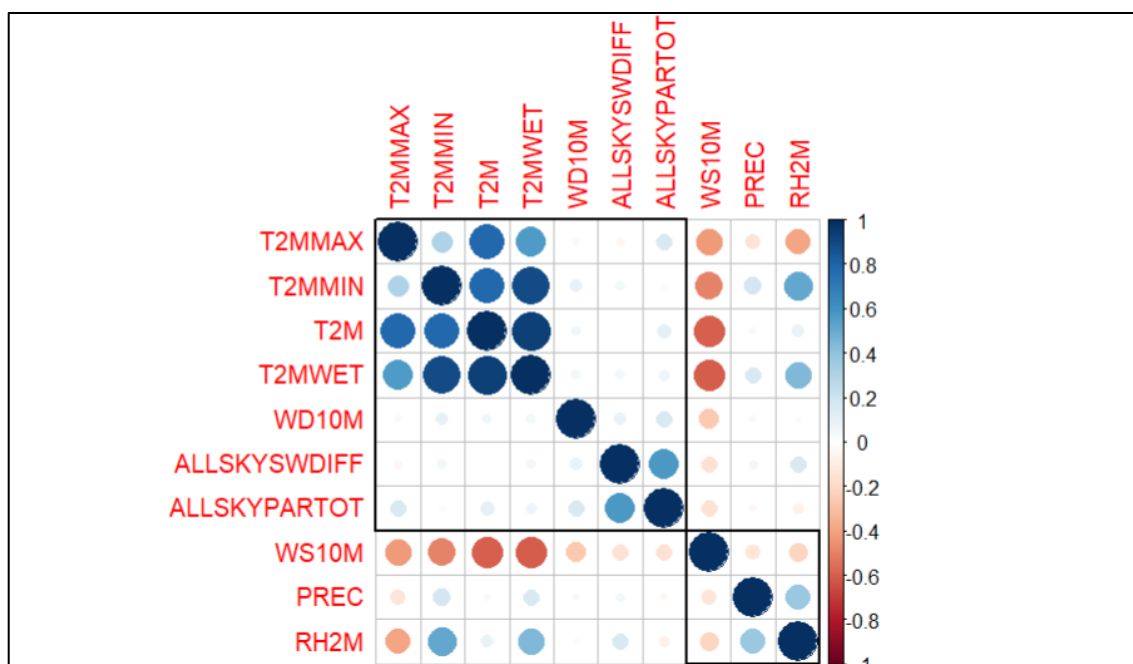


Fuente: Elaboración propia.

La función de autocorrelación (ACF) de la radiación solar total y difusa presenta un comportamiento de dependencia temporal marcado, evidenciado por valores elevados en los primeros rezagos que disminuyen de forma progresiva conforme aumenta el desfase. Este comportamiento sugiere una serie no estacionaria y una cuya memoria se retiene con el tiempo, debido a los ciclos diarios y los cambios estacionales de la dinámica de la radiación solar. Confirma la existencia de tendencia y estacionalidad, a través de la disminución gradual de la autocorrelación, por lo que se deben realizar transformaciones (por ejemplo, diferenciación, descomposición estacional) para estabilizar la serie y ajustar el modelo de predicción en consecuencia.

5.7 Correlación de variables de Temperatura

Figura 45. Correlación de variables de Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

Temperaturas (T2MMAX, T2MMIN, T2M, T2MWET)

Las variables relacionadas con la temperatura presentan correlaciones muy elevadas entre sí (próximas a 1), lo que evidencia que la temperatura máxima, mínima, media y la temperatura de bulbo húmedo siguen patrones temporales muy similares. Esto sugiere redundancia estadística entre ellas y que, en un contexto de modelación climática, podrían aportar información repetitiva.

Radiación solar (ALLSKYSWDIFF, ALLSKYPARTOT)

Se observa una correlación extremadamente alta entre la radiación difusa y la radiación total, lo cual es esperable, ya que la segunda engloba a la primera. Además, la radiación mantiene asociación positiva con las temperaturas y negativa con la humedad relativa, lo que refleja que las condiciones más soleadas tienden a ser más cálidas y con menor cantidad de vapor de agua en la atmósfera.

Humedad relativa (RH2M)

Esta variable presenta correlaciones negativas con todas las temperaturas analizadas y con la radiación solar, comportamiento coherente con principios

termodinámicos: conforme la temperatura y la radiación aumentan, la capacidad del aire para retener humedad se incrementa, provocando una disminución del porcentaje de humedad relativa.

Velocidad del viento (WS10M)

La velocidad del viento muestra correlaciones negativas débiles frente a las temperaturas y correlaciones positivas leves con la humedad relativa. Este patrón sugiere que la dinámica del viento está regulada por procesos atmosféricos distintos y no responde de manera directa a las variaciones térmicas locales.

Dirección del viento (WD10M)

Presenta correlaciones reducidas con la mayoría de las variables climáticas, lo que indica que su comportamiento es relativamente independiente y no sigue los mismos patrones de variación que temperatura o radiación.

Precipitación (PREC)

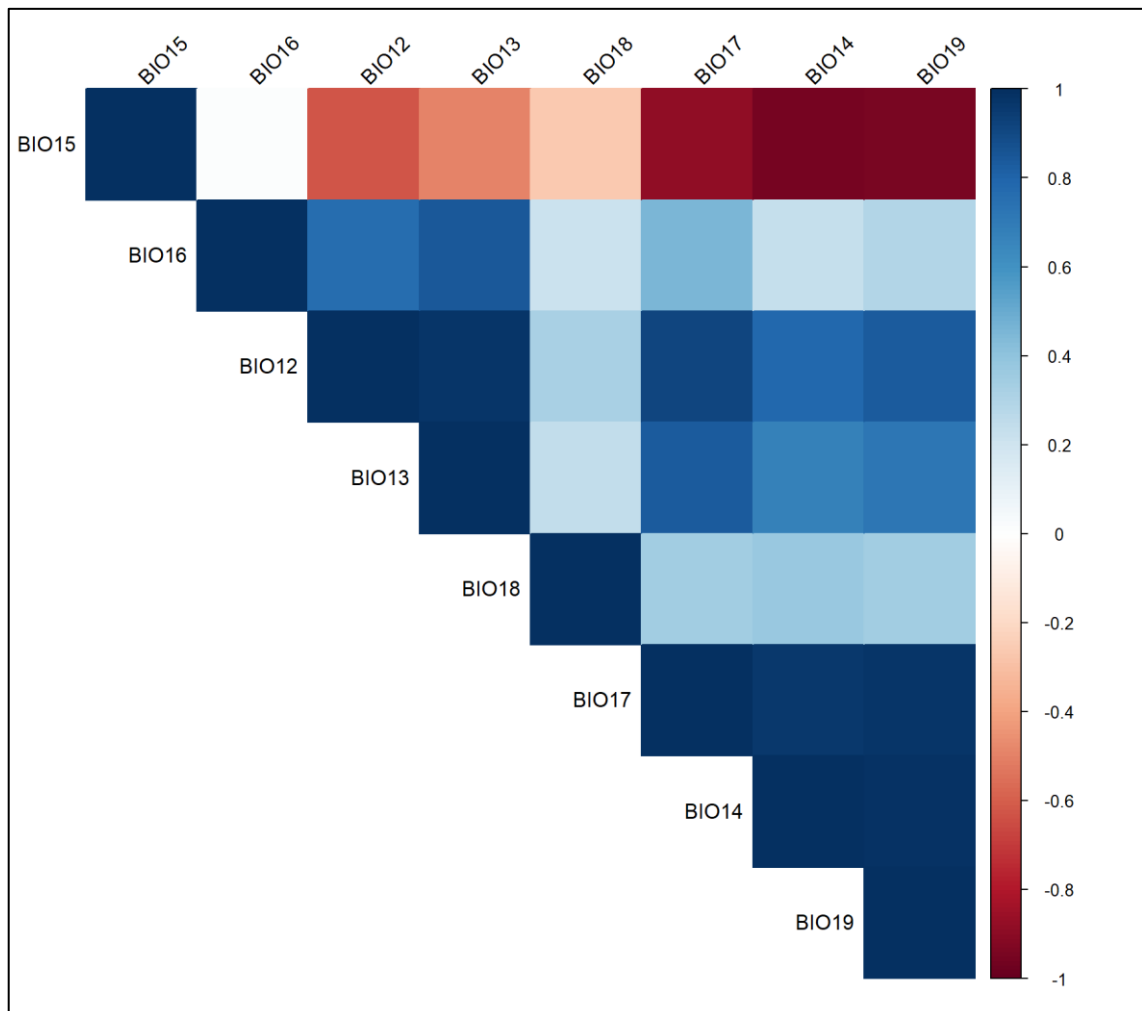
La precipitación mantiene correlaciones bajas con la mayor parte de las variables analizadas, aunque se identifica una ligera asociación positiva con la humedad relativa y una relación negativa con la radiación solar. Esto es consistente con la ocurrencia de lluvia bajo condiciones más húmedas y cielos menos despejados.

Síntesis general

En conjunto, las variables relacionadas con la temperatura y la radiación solar conforman un bloque altamente correlacionado, mientras que la humedad relativa tiende a comportarse de manera inversa a este grupo. Por otra parte, el viento (tanto su velocidad como dirección) y la precipitación presentan asociaciones débiles, lo que evidencia que su variabilidad está influenciada por procesos atmosféricos más complejos y no necesariamente vinculados con la dinámica térmica local.

5.8 Matriz de correlación de variables bioclimáticas

Figura 46. Correlación de variables bioclimáticas (Énfasis en la Precipitación).



Fuente: Elaboración propia.

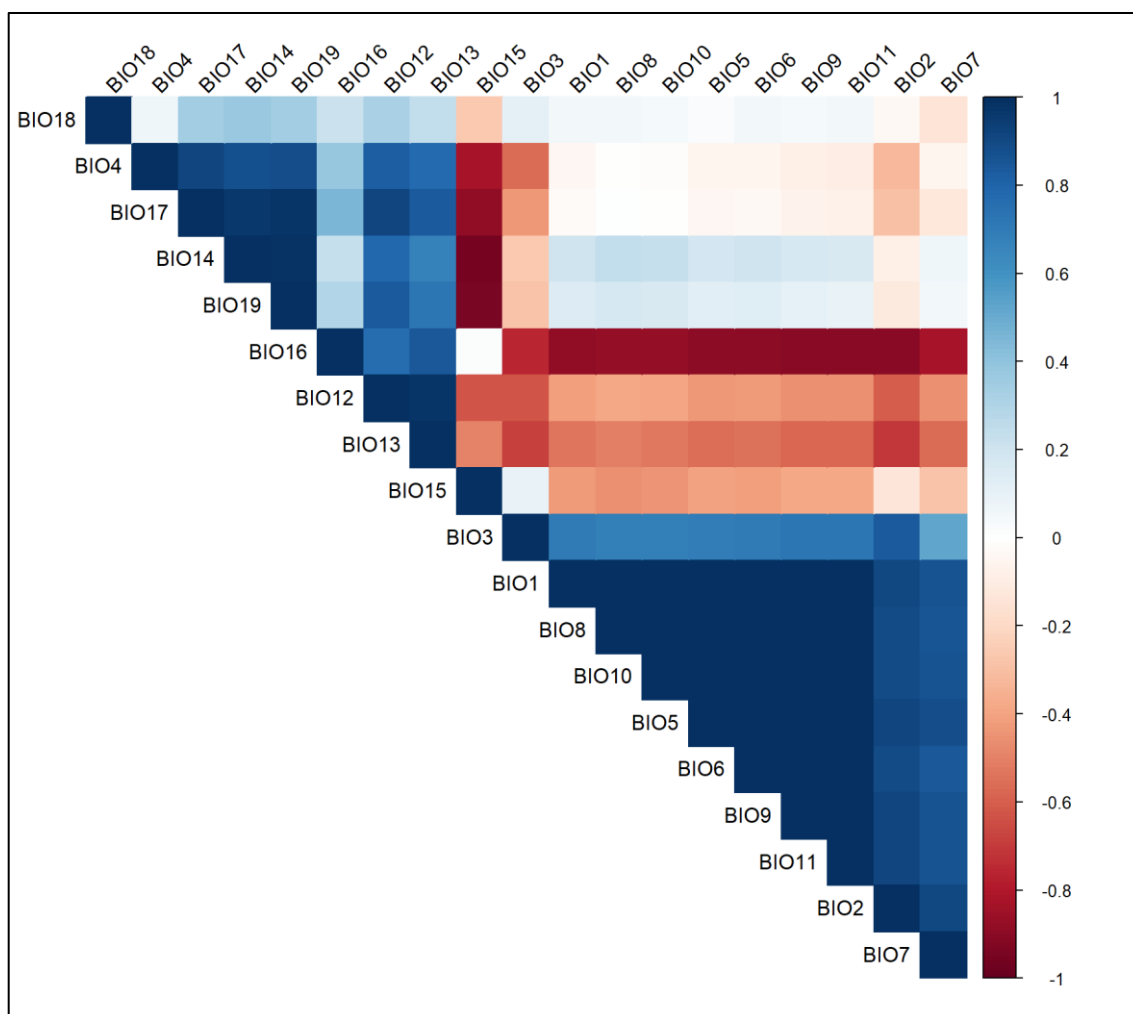
La matriz de correlación evidencia las relaciones existentes entre diversas variables bioclimáticas (BIO), reflejando patrones de asociación que permiten identificar redundancia de información. Se observa que la precipitación anual (BIO12) mantiene correlaciones negativas altas con la precipitación del mes más seco (BIO14) y con la del trimestre más frío (BIO19), lo que sugiere que, en zonas con abundante precipitación total, los periodos secos y fríos presentan menores niveles de lluvia, mientras que en áreas de menor precipitación anual estos periodos secos

son más marcados. De manera similar, la precipitación del mes más húmedo (BIO13) también muestra una relación inversa con BIO14 y BIO19, indicando que regiones con lluvias intensas durante la estación húmeda tienden a experimentar sequías más contrastadas durante la estación seca.

Por otro lado, se identifican correlaciones positivas elevadas entre BIO14, BIO17, BIO19 y BIO15, lo cual revela que la precipitación del mes más seco, del trimestre más seco y del trimestre más frío, junto con la estacionalidad de la precipitación, responden a un mismo patrón climático. Asimismo, en el presente caso, se observa una alta correlación entre la cantidad de precipitación anual (BIO12), la precipitación del mes más lluvioso (BIO13) y la precipitación del trimestre más lluvioso (BIO16) con coeficientes altos, mostrando que estas cantidades se presentan como los picos máximos en precipitación. Por el contrario, la precipitación del trimestre más cálido (BIO18) exhibe una correlación media con cada una de estas combinaciones y es una variable intermedia de importancia en la naturaleza, influenciada por los patrones estacionales de precipitación.

En general, la matriz ayuda a comparar, entre dos categorías de variables, aquellas relacionadas con los picos de precipitación (BIO12, BIO13, BIO16) y aquellas conectadas con períodos de mayor aridez y frío (BIO14, BIO17, BIO19, BIO15). Esta colinealidad pronunciada significa que el uso simultáneo de todas estas variables en modelos ecológicos o climáticos podría ser una fuente de redundancia informativa y aumentar el riesgo de sobreajuste. Por ello, se recomienda seleccionar únicamente una o dos variables representativas de cada grupo, a fin de optimizar la precisión y robustez de los análisis.

Figura 47. Correlación de variables bioclimáticas (Las 19 Variables).



Fuente: Elaboración propia.

La matriz de correlación permite observar cómo las 19 variables bioclimáticas (BIO1–BIO19) se agrupan en categorías con relaciones significativas, lo cual indica la existencia de información redundante. En términos generales, hay dos conjuntos principales, uno para la temperatura y otro para la precipitación. En el ámbito térmico, también se puede observar una asociación positiva significativa entre BIO1 (temperatura media anual), BIO5 (temperatura máxima del mes más cálido), BIO6 (temperatura mínima del mes más frío), BIO8 (temperatura media del trimestre más húmedo), BIO9 (temperatura media del trimestre más seco), BIO10 (temperatura media del trimestre más cálido) y BIO11 (temperatura media del trimestre más frío). Sin embargo, BIO2 (rango medio diurno) y BIO7 (rango de temperatura anual) tienen una fuerte correlación negativa con estas variables, lo que deja claro que las temperaturas promedio en las áreas donde la variabilidad

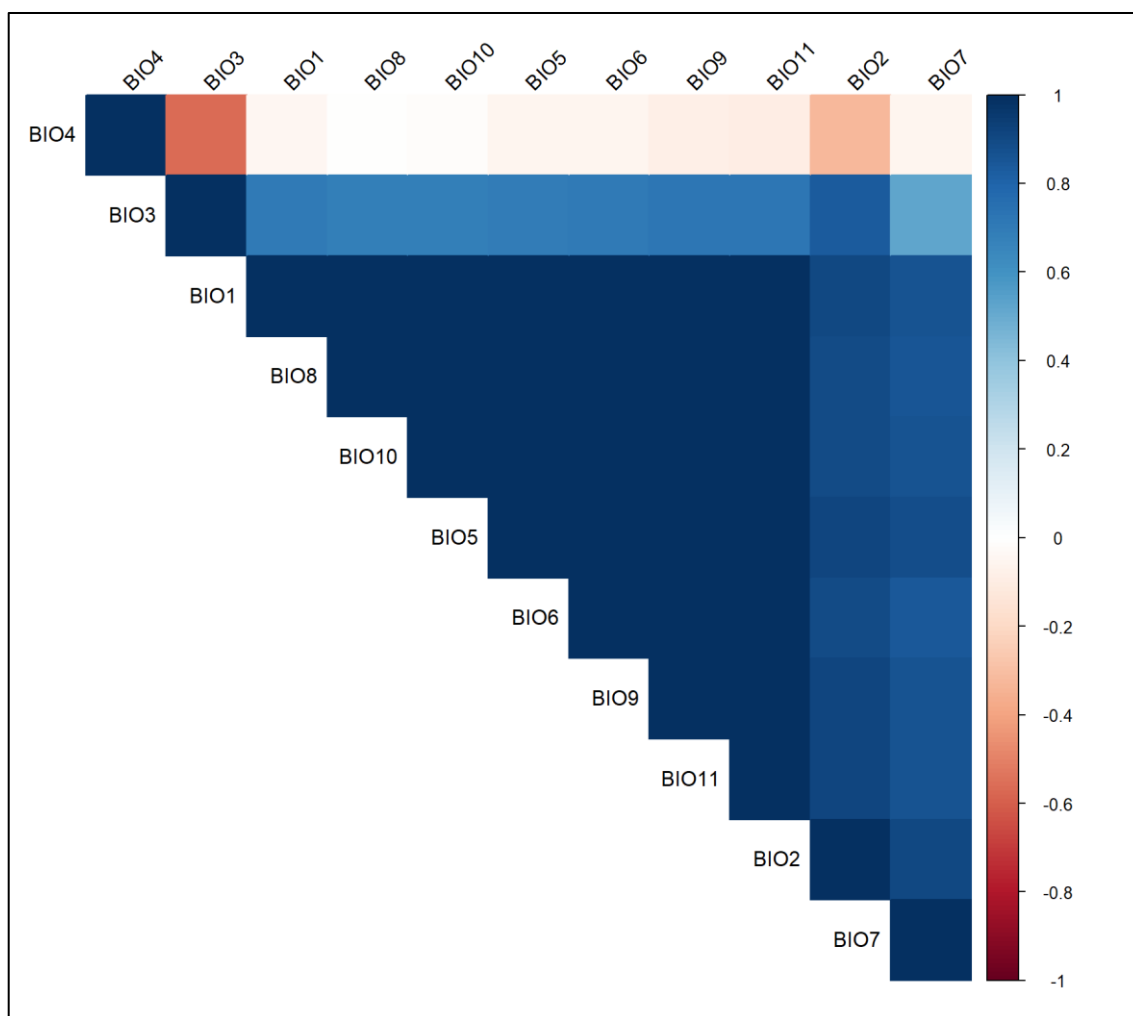
térmica es más común son estables. Ese es el comportamiento de los modelos predictivos, ya que la mayoría de las variables proporcionan datos similares, por lo que no sería necesario considerar todas las variables.

Con respecto al grupo de precipitación, también se detectan otras altas correlaciones. BIO12 (precipitación anual), BIO13 (precipitación del mes más húmedo) y BIO16 (precipitación del trimestre más húmedo) se agrupan como un subgrupo que refleja los picos de lluvia. Por el contrario, BIO14 (precipitación del mes más seco), BIO17 (precipitación del trimestre más seco) y BIO19 (precipitación del trimestre más frío) están correlacionados en términos de mínimos de precipitación, definiendo los mínimos de precipitación. Además, estas últimas variables están negativamente correlacionadas con las variables máximas, en otras palabras, reflejan la compensación natural entre las estaciones húmedas y secas.

La variable BIO15 (estacionalidad de la precipitación) en este ejemplo es más autónoma, ya que cuantifica la variabilidad de la precipitación a lo largo del año, no la cantidad de precipitación. Mientras que BIO3 (isotermalidad) exhibe correlaciones marginales dentro del bloque térmico (relativamente menos intensas que las otras).⁴

Como conclusión, la matriz muestra una correlación significativa tanto en la relación de temperatura de las variables como en la relación de precipitación, lo que indica la necesidad de reducir los predictores para evitar duplicados en aplicaciones climáticas o ecológicas. Como enfoque, se sugiere elegir variables representativas de cada conjunto: por ejemplo, BIO1 o BIO10 para la temperatura general, BIO7 para la variabilidad térmica, BIO12 o BIO13 para los picos de precipitación y BIO14 o BIO17 para episodios secos. Esta selección hace posible capturar la variabilidad ambiental sin sobrecargar los modelos con información repetida.

Figura 48. Correlación de variables bioclimáticas (Énfasis en la Temperatura).



Fuente: Elaboración propia.

Esta matriz de correlación está enfocada en las variables bioclimáticas asociadas con la temperatura (BIO1–BIO11) y evidencia patrones marcados de redundancia. La mayoría de estas variables presentan correlaciones muy altas y positivas (representadas en azul oscuro), lo que indica que describen prácticamente la misma información térmica.

Dentro de este grupo, variables como BIO1 (temperatura media anual), BIO5 (temperatura máxima del mes más cálido), BIO6 (temperatura mínima del mes más frío), BIO8 (temperatura media en la estación húmeda), BIO9 (temperatura media en la estación seca), BIO10 (temperatura media del trimestre más cálido) y BIO11 (temperatura media del trimestre más frío) muestran relaciones estrechamente positivas entre sí. En general, exhiben un comportamiento térmico similar y, por lo tanto, son redundantes, por lo que pueden ser eliminados en cualquier modelo. En

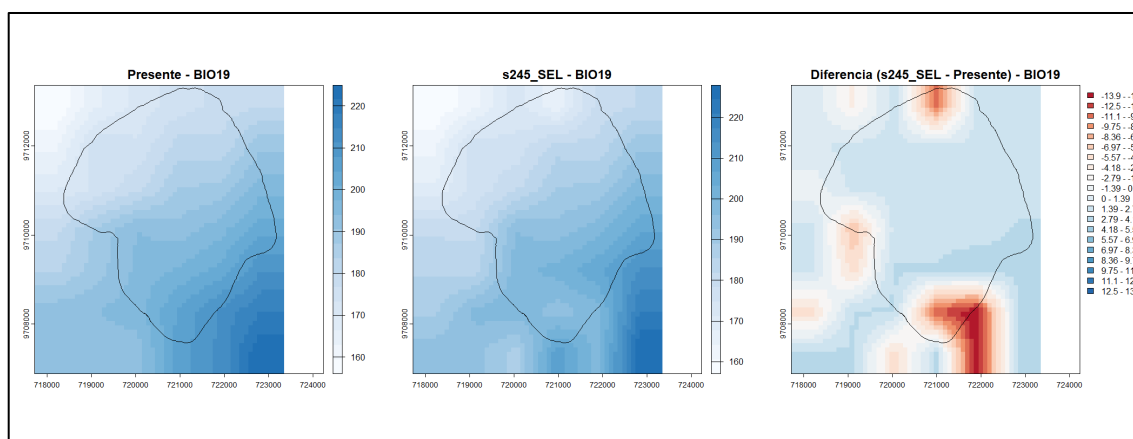
contraste, BIO2 (rango diurno medio) y BIO7 (rango de temperatura anual) muestran una correlación positiva igualmente fuerte, pero su asociación con el conjunto restante difiere. Así, estas variables incluyen datos sobre la amplitud de los fenómenos térmicos en los casos diarios (rango diurno medio) y anuales (rango de temperatura anual), lo cual no está representado en las variables basadas en promedios o extremos.

Un comportamiento particular se observa en BIO3 (isotermalidad), que presenta correlaciones negativas moderadas respecto a BIO4 (estacionalidad de la temperatura) y relaciones más débiles con el resto. Esto indica que cuantifica la estabilidad relativa de la temperatura a lo largo del año. BIO4, a su vez, se correlaciona débilmente con la mayoría de variables y de forma negativa con BIO2, representando una dimensión más independiente del clima.

En general, los datos demuestran que las variables asociadas con los promedios y extremos térmicos (BIO1, BIO5, BIO6, BIO8, BIO9, BIO10 y BIO11) pertenecen a un conjunto altamente redundante. Mientras tanto, para la variabilidad térmica, BIO2 y BIO7 son datos complementarios y BIO3 y BIO4 se refieren a otras características de isotermalidad y variación estacional. Para mitigar la colinealidad en el trabajo ecológico o climático, elegimos una variable representativa de las mencionadas (por ejemplo, BIO1) y otra de los rangos térmicos (por ejemplo, BIO7) y estacionalidad (BIO3 o BIO4); de esta manera se minimiza la redundancia de información en la síntesis climática.

5.9 Mapas de las distintas variables bioclimáticas del escenario SSP2-4.5 en los 3 paneles (Presente, futuro y diferencia) en la zona de estudio.

Figura 49. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 19.



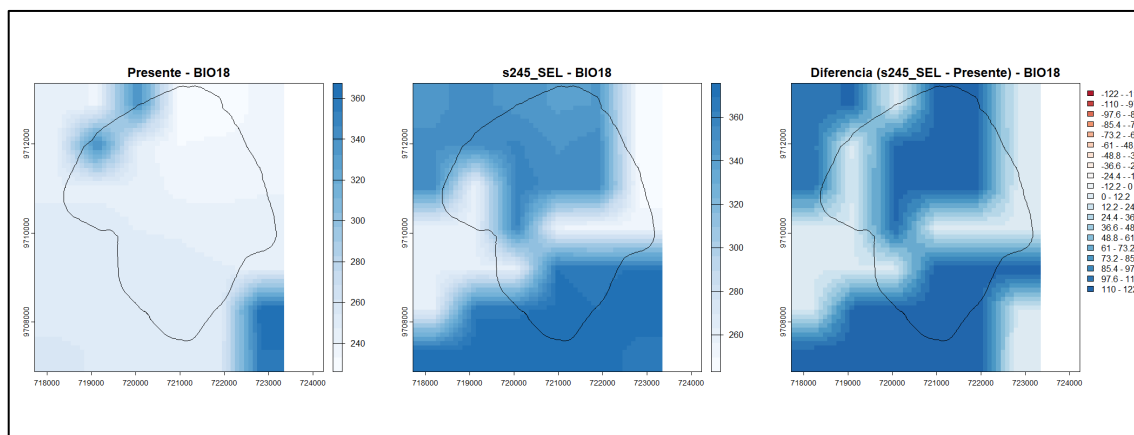
Fuente: Elaboración propia.

La gráfica representa la distribución espacial del BIO19 (precipitación del trimestre más frío) en tres paneles comparativos: condiciones actuales, proyección futura y variación estimada entre ambos periodos.

La condición actual (Presente – BIO19) se muestra en el panel, que indica niveles de precipitación en el área de 160-220 mm y los valores bajos y moderados se muestran principalmente en tonos azul claro. En el panel proyectado bajo el escenario SSP2-4.5, se observa una amplia distribución con poca diferencia en la intensidad y cobertura de las áreas de mayor precipitación en comparación con el escenario actual. La diferencia se muestra en un panel general que indica las modificaciones esperadas en vista del marco de tiempo de referencia.

El panel muestra tanto el aumento como la disminución de la precipitación. Los tonos azules indican aumentos por encima de +120 mm, mientras que los tonos rojizos muestran disminuciones que alcanzan hasta -139 mm. Esto significa que los resultados no son homogéneos y, de hecho, varían bastante: algunas localidades recibirán más lluvia en el trimestre frío, mientras que otras experimentarán una gran disminución.

El escenario SSP2-4.5 muestra un comportamiento mixto en la precipitación durante el trimestre más frío (BIO19), lo que aumenta la heterogeneidad climática regional a medida que algunas áreas se vuelven más húmedas en comparación con otras que tienden a ambientes comparativamente más secos.

Figura 50. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 18.

Fuente: Elaboración propia.

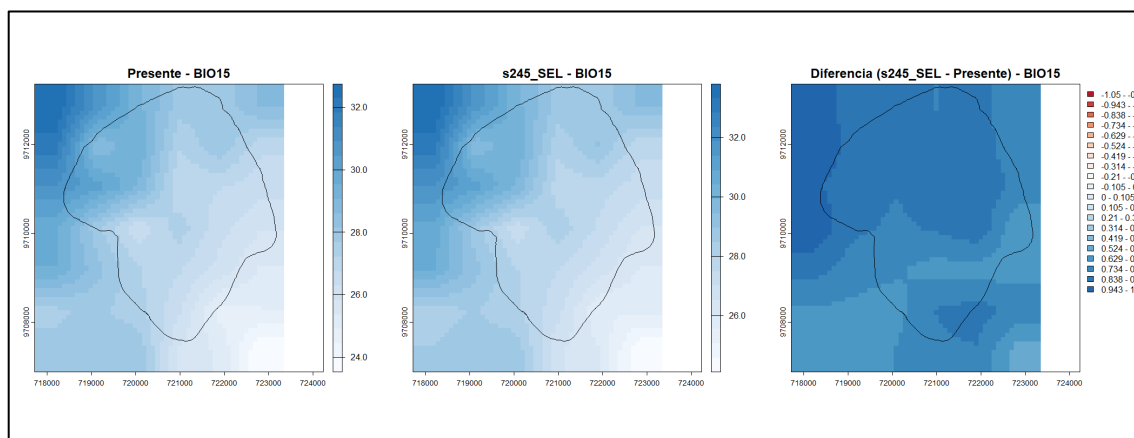
En la condición actual (BIO18), la precipitación correspondiente al trimestre más cálido presenta una distribución espacial heterogénea, con valores que varían aproximadamente entre 240 y 360 mm. Las cifras más bajas se encuentran en las regiones centrales y suroccidentales, mientras que se registran niveles más altos en las áreas del norte y sureste, destacando un claro gradiente en la disponibilidad de agua durante esta etapa climática crucial.

El caso estimado SSP2-4.5 (BIO18), hay un aumento general en la precipitación, especialmente cerca de las partes central y sur de la región que se estudia. Los valores están distribuidos de manera diferente, pero aún dentro de las lecturas actuales (240–360 mm), lo que sugiere que se están moviendo hacia los límites superiores de precipitación y sugiere que las áreas de precipitación intermedia tendrían un aumento masivo a corto y mediano plazo.

Las comparaciones de cada uno de estos períodos (SSP2-4.5 – Presente) verifican los aumentos positivos en la mayoría, variando de +20 mm a +122 mm. La mayoría de los aumentos se observan en las regiones central y sur, mientras que las variaciones en el norte son más sutiles o casi completamente estables. Este pronóstico implica una temporada más cálida que significaría más agua para todas las especies y que las dinámicas ecológicas, los patrones de movilidad de las especies y los procesos dependientes de la humedad del suelo estarían más en

juego, reflejando un patrón relativamente más húmedo y más estable de lo que han mostrado.

Figura 51. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 15.



Fuente: Elaboración propia.

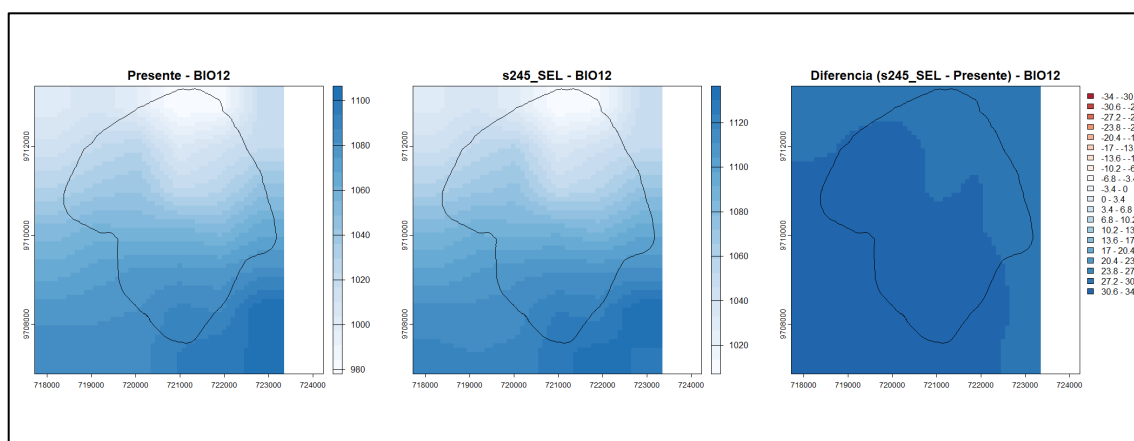
En la condición actual (BIO15) se identifica que la estacionalidad de la precipitación presenta valores que oscilan aproximadamente entre 24 y 32. Las cifras más elevadas se concentran en el sector norte y noroeste del área de estudio, lo que evidencia una mayor variabilidad en los patrones de lluvia. Por el contrario, en las zonas sur y sureste la variación es menor, reflejando un comportamiento pluviométrico más regular y estable.

Bajo el contexto del escenario futuro SSP2-4.5 (BIO15), la disposición geográfica de esta variable se mantiene prácticamente similar a la existente, manteniendo valores dentro del mismo intervalo (24–32). No obstante, se observa una ligera tendencia hacia la uniformización en niveles intermedios, disminuyendo las disparidades notables entre las regiones con las mayores y menores variaciones en la precipitación.

El análisis de las diferencias (SSP2-4.5 – Presente) valida este patrón: se notan incrementos discretos, que fluctúan entre +0.1 y +1 punto en la mayor parte del territorio, sin que se registren reducciones significativas. Esto sugiere que, a futuro, la estacionalidad de la lluvia podría seguir siendo comparable a la actual, aunque con una tendencia leve hacia una irregularidad mayor en la distribución temporal

de las precipitaciones. Esta situación plantearía desafíos para la recarga hídrica constante y para actividades que son sensibles a la variabilidad estacional, como la agricultura de secano y la dinámica ecológica en las localidades, a pesar de que otros indicadores (tales como BIO18 o BIO19) anticipen incrementos en los volúmenes totales de precipitaciones.

Figura 52. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 12.



Fuente: Elaboración propia.

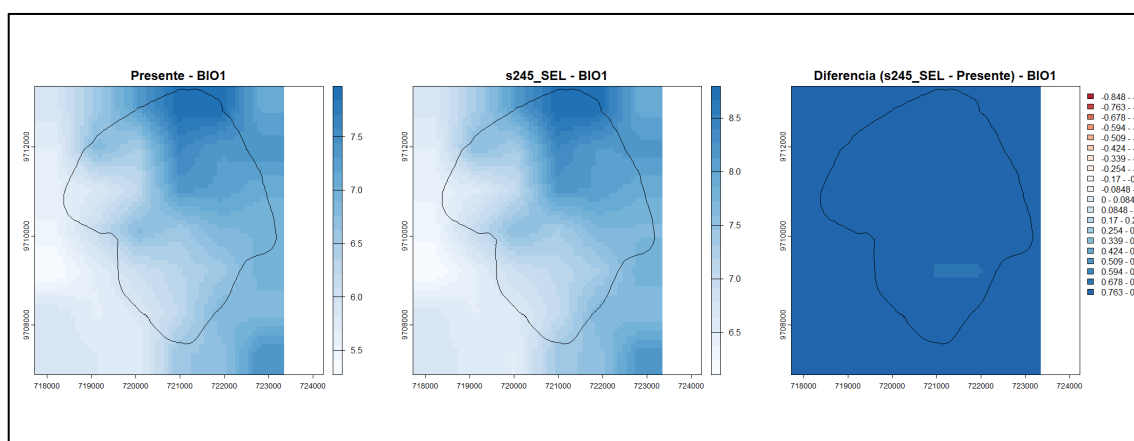
En el escenario actual (BIO12), los valores de precipitación anual se sitúan aproximadamente entre 980 y 1.100 mm. Se identifica un ligero gradiente espacial, donde las áreas ubicadas en el sur registran mayores acumulaciones de lluvia, mientras que hacia el norte los valores disminuyen progresivamente, mostrando un patrón relativamente estable en la distribución regional de la precipitación.

El modelo proyectado SSP2-4.5 (BIO12), y los números se mantienen en un rango similar, con un crecimiento sustancial en algunos lugares, con niveles aún más pronunciados en las partes central y sureste, donde el número de años llega a 1,120 mm. Eso indica que la disponibilidad de agua está en una tendencia general al alza, aunque no se distribuye de manera uniforme.

También está respaldado por el mapa de diferencias (SSP2-4.5 – Presente). Los aumentos son modestos, pero sugieren que el área también podría tener tiempos más húmedos en el futuro, proporcionando una forma de recargar agua, lo que puede ayudar a apoyar los ecosistemas locales. Sin embargo, junto con el

ligero aumento en la variabilidad estacional de otros predictores (es decir, BIO15), podría predisponer a lluvias más intensas en un corto período, con posibles efectos adversos como erosión, escorrentía superficial y disminución de la infiltración.

Figura 53. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 1.



Fuente: Elaboración propia.

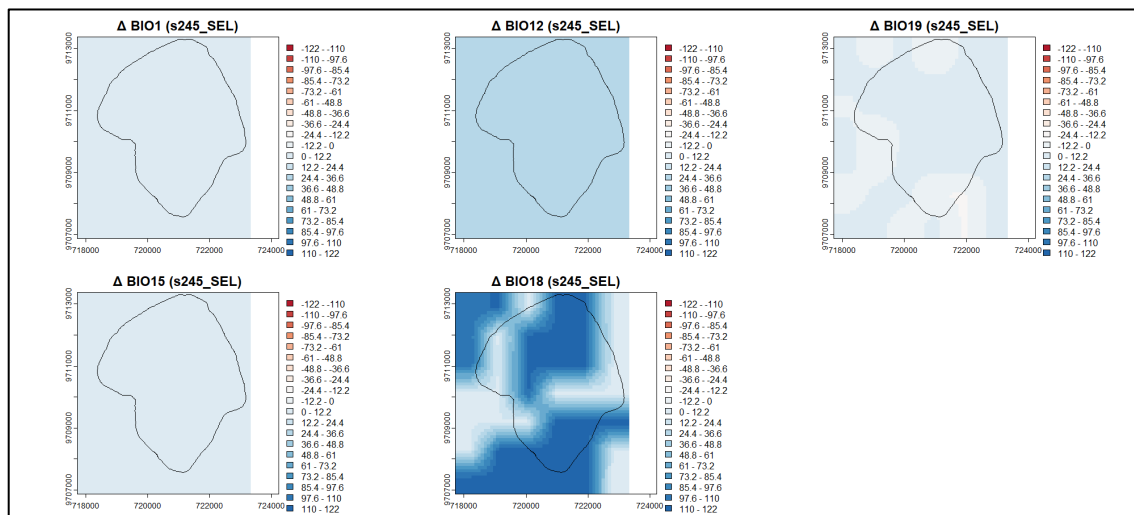
En el escenario actual (BIO1), la temperatura media anual en el área de estudio se ubica entre aproximadamente 5,5 °C y 7,8 °C. Este rango representa un clima frío característico de los ecosistemas altoandinos, con ligeras variaciones espaciales que se intensifican hacia los sectores noreste y sureste, donde se registran valores ligeramente más altos.

En el escenario SSP2-4.5, las temperaturas se mantienen dentro de un rango similar, a pesar de un aumento continuo y alcanzando valores cercanos a 8.2 °C en algunos lugares. Aunque el patrón espacial de distribución de temperatura permanece, la tendencia sugiere un aumento generalmente uniforme en la temperatura promedio a nivel regional.

El gráfico de variaciones (SSP2-4.5 – Presente) confirma esta predicción, mostrando un aumento neto positivo general de +0.5 °C a +0.8 °C en la mayoría de las áreas estudiadas. Estos hallazgos confirman que el cambio climático será un impulsor de un calentamiento gradual y consistente del territorio, con posibles

consecuencias ecológicas como el retroceso de los ambientes fríos, cambios en la dispersión de especies y impactos en la disponibilidad de agua a corto plazo.

Figura 54. Distribución espacial de las variables Bio1, Bio12, Bio15, Bio18 y Bio19.



Fuente: Elaboración propia.

La figura presenta las variaciones proyectadas para el escenario climático SSP2-4.5 (Δ s245_SEL) en cinco variables bioclimáticas (BIO1, BIO12, BIO15, BIO18 y BIO19), evidenciando los cambios estimados entre las condiciones actuales y futuras en el área de estudio.

BIO1 (Temperatura media anual)

La cartografía no muestra diferencias espaciales significativas; el tono homogéneo indica incrementos térmicos leves y uniformes, inferiores a 1 °C en toda la región. Esto sugiere un calentamiento moderado y generalizado.

BIO12 (Precipitación anual)

Los cambios identificados son mínimos y ligeramente positivos, con incrementos entre 20 y 40 mm en la mayoría del territorio. No se observan áreas con disminuciones marcadas, lo cual refleja una relativa estabilidad en la disponibilidad hídrica anual.

BIO19 (Precipitación del trimestre más frío)

Se registran aumentos débiles en sectores específicos, principalmente en la región central y norte. Estos incrementos indican una mayor humedad durante la estación fría, aunque sin un patrón de intensificación pronunciado.

BIO15 (Estacionalidad de la precipitación)

Las variaciones son muy reducidas y distribuidas de forma homogénea, lo que sugiere que la variabilidad temporal de las precipitaciones se mantendrá casi inalterada, sin modificaciones significativas en la dinámica estacional.

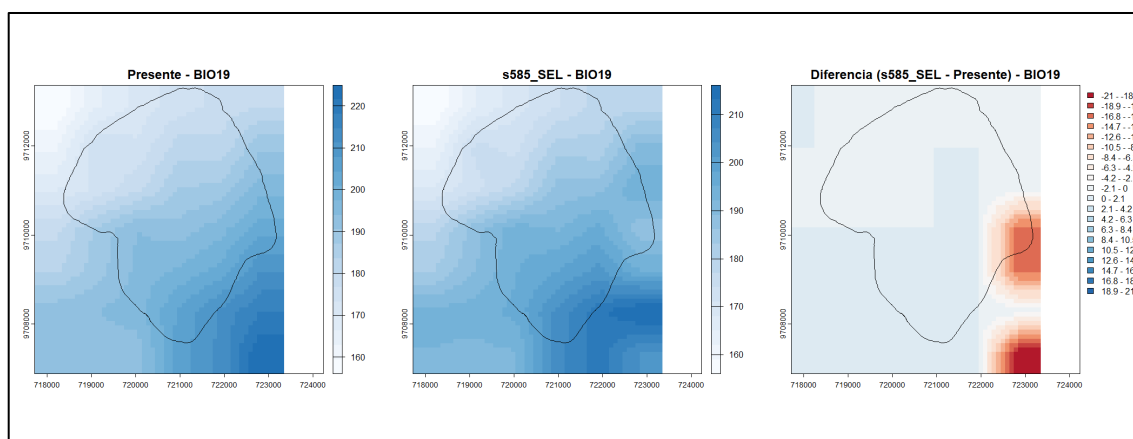
BIO18 (Precipitación del trimestre más cálido)

Las diferencias más evidentes son las áreas donde se detectan cambios. Una parte significativa del área presenta los mayores aumentos en precipitación, con registros que varían de +60 a +120 mm, especialmente en las zonas central y suroeste. Esto sugiere que las condiciones futuras traerán lluvias más intensas durante los meses cálidos.

En general, el modelo SSP2-4.5 predice un ligero aumento en la temperatura promedio y la precipitación anual, junto con aumentos más marcados durante el período cálido. El comportamiento apunta hacia un clima más templado y ligeramente más húmedo, con posibles repercusiones sobre la dinámica de la vegetación, un aumento en la evapotranspiración y ajustes en los procesos hidrológicos locales, sin presentar aún condiciones extremas.

5.9 Mapas de las distintas variables bioclimáticas del escenario SSP5-8.5 en los 3 paneles (Presente, futuro y diferencia) en la zona de estudio.

Figura 55. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 19.



Fuente: Elaboración propia.

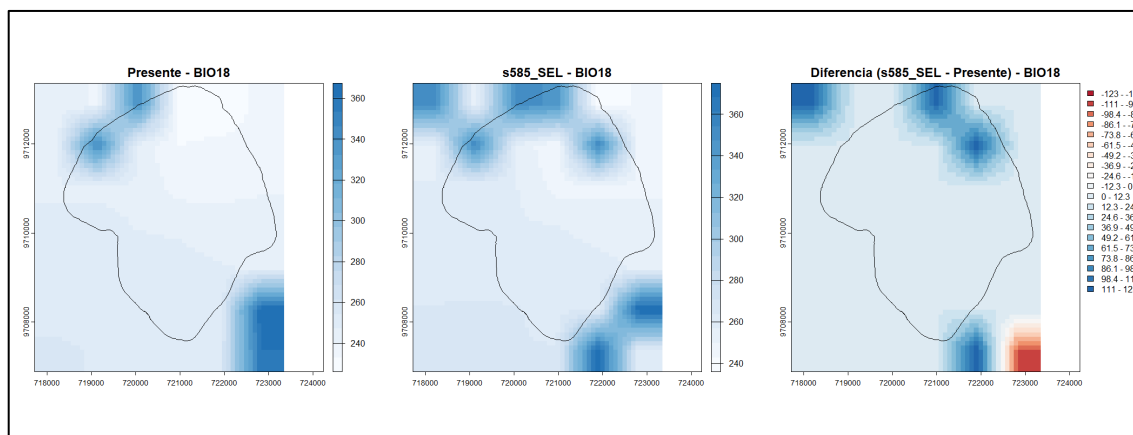
La figura analiza la variable BIO19 (precipitación del trimestre más frío), comparando las condiciones actuales con las proyecciones climáticas para el escenario SSP5-8.5, así como la variación entre ambos periodos.

En el mapa correspondiente al presente, los valores de precipitación se encuentran en un rango aproximado de 160 a 220 mm, distribuidos de manera relativamente uniforme, con ligeros aumentos hacia el sector oriental del área de estudio. Bajo el escenario futuro (s585_SEL), se observa una tendencia a la disminución de los valores en la mayor parte del territorio, evidenciando además un leve desplazamiento de las áreas con mayor humedad hacia la región centro-sur.

El mapa de diferencias muestra reducciones más marcadas en el sector suroriental, con disminuciones que oscilan entre -19 y -8 mm, mientras que en el resto de la zona los cambios son mínimos o prácticamente neutros. Este comportamiento muestra que, según el escenario SSP5-8.5, que se caracteriza por altas emisiones y un forzamiento radiativo significativo, la precipitación invernal es menor y corresponde a temperaturas más secas y cálidas que probablemente caractericen un evento de calentamiento extremo.

Más generalmente, estas proyecciones predicen una reducción en la disponibilidad de agua para el invierno, lo que podría afectar el frágil funcionamiento de los ecosistemas, la dinámica de la humedad del suelo y el balance hídrico en la región objetivo.

Figura 56. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 18.



Fuente: Elaboración propia.

La figura analiza la variable BIO18 (precipitación del trimestre más cálido) en tres condiciones: la situación actual, la proyección climática bajo el escenario SSP5-8.5 y la diferencia espacial entre ambas.

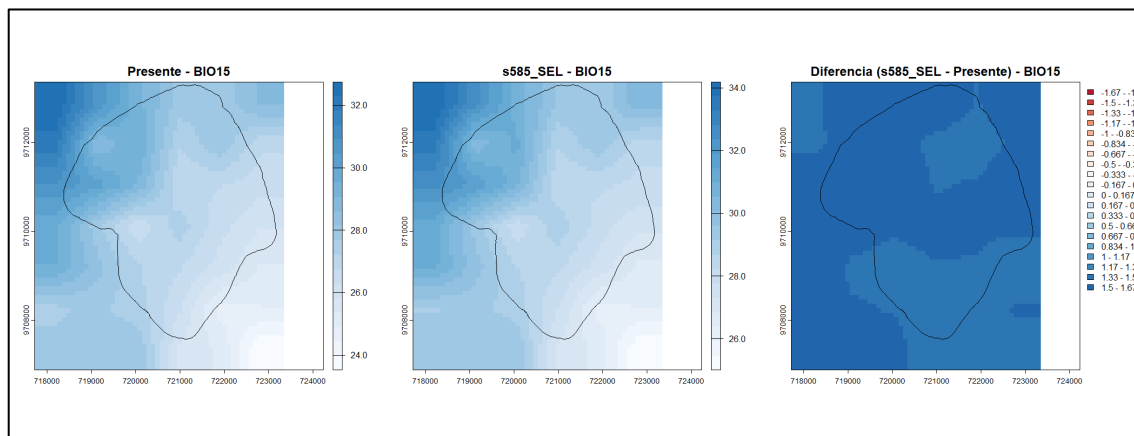
En el mapa correspondiente al periodo presente, los valores de precipitación para este trimestre se encuentran entre aproximadamente 240 y 360 mm, mostrando una distribución espacial heterogénea, con mayores acumulaciones hacia los sectores noroeste y sur del área de estudio. Bajo el escenario prospectivo SSP5-8.5, la distribución general permanece constante, aunque se registran ligeras reducciones en ciertas regiones y aumentos específicos, particularmente en los extremos sur y norte del territorio.

A partir de un mapa comparativo (s585_SEL – Presente), se puede deducir que se observa una cantidad muy pequeña de cambio (prácticamente cercana a cero), mientras que hay algunas áreas en el sureste que muestran un cambio moderado que varía de 80 a 120 mm. La implicación de esta tendencia es que, quizás en casos de altas emisiones, los niveles de precipitación local aumentaron en el trimestre más cálido debido a lluvias más grandes y fuertes sin un efecto marcado a nivel regional.

Así, las conclusiones del escenario SSP5-8.5 muestran una estabilidad global de la precipitación en el trimestre más cálido con aumentos localizados que señalan una

mayor variabilidad en el clima y una creciente frecuencia de extremos en ciertas áreas de la región analizada.

Figura 57. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 15.



Fuente: Elaboración propia.

La figura presenta la variable BIO15 (estacionalidad de la precipitación) para el periodo presente, el escenario SSP5-8.5 (s585_SEL) y la diferencia entre ambos.

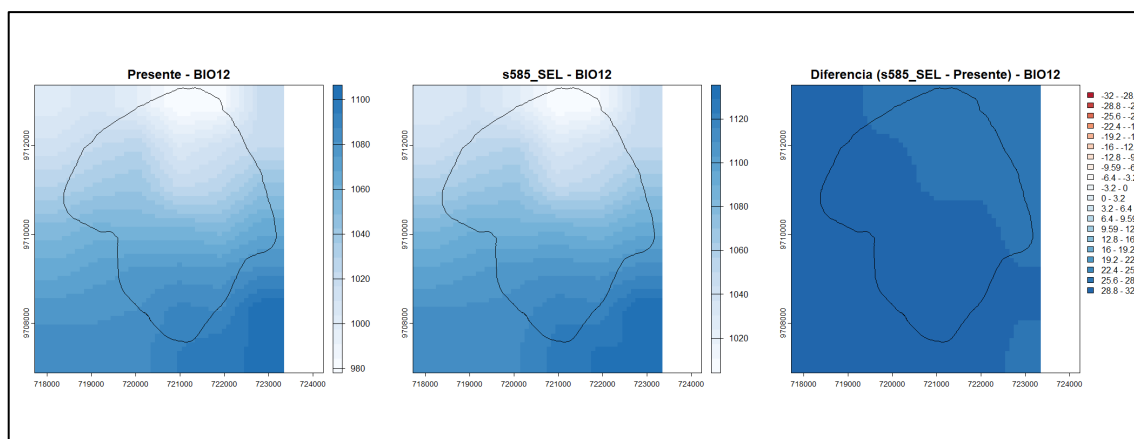
En el mapa del presente, las estimaciones de estacionalidad están entre 24 y 32, con una distribución relativamente constante, con ligeras variaciones menores en algunas partes del norte y noreste donde los patrones de lluvia son más irregulares. Bajo el escenario SSP5-8.5, estas cifras solo aumentan marginalmente, hasta 34 en esa dirección, principalmente al norte del área de estudio, y corresponden con lluvias más irregulares o agrupadas en ciertas épocas del año.

El mapa de diferencias (s585_SEL - Presente) muestra que la variación prevista de la lluvia no es muy significativa, típicamente entre -1.6 y 1.6, excepto por pequeñas variaciones locales en algunas áreas más pequeñas, tanto en el centro como en el norte. La tendencia hacia cierta estabilidad indica cambios leves en el patrón temporal de precipitación, probablemente reflejando un aumento en los episodios de humedad y sequía a lo largo del tiempo.

En resumen, la previsión en el contexto del escenario SSP5-8.5 indica que la estacionalidad de las lluvias se mantendrá constante, con incrementos sutiles en la

variabilidad hacia el norte, lo cual podría conllevar a una mayor concentración de las lluvias durante determinados períodos y, por ende, a una distribución menos uniforme a lo largo del año.

Figura 58. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 12.



Fuente: Elaboración propia.

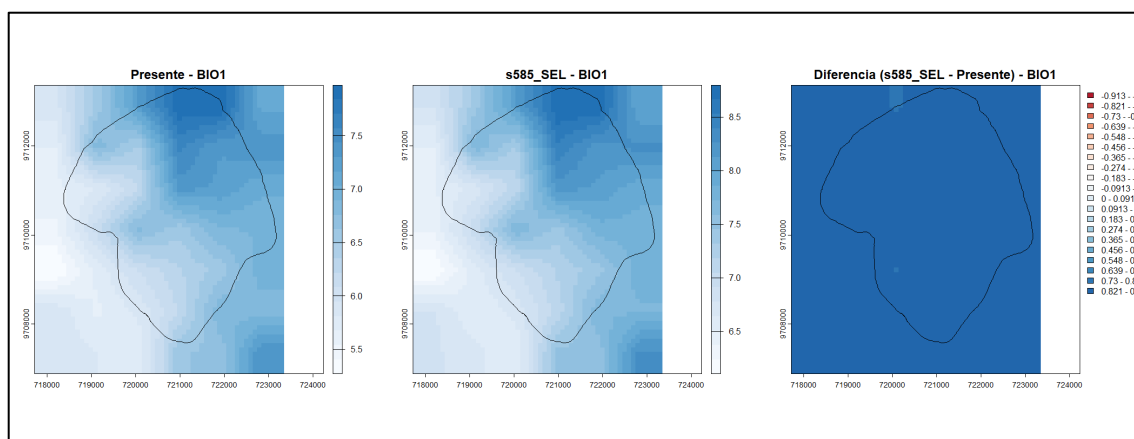
En esta figura, se representa la variable BIO12 (precipitación anual) para tres escenarios: hoy, la perspectiva futura bajo el escenario SSP5-8.5 (s585_SEL), y la diferencia proyectada entre los dos.

Como se muestra en el mapa actual, anualmente el rango de precipitación es aproximadamente entre 980 y 1100 mm; sin embargo, también hay un ligero gradiente ascendente de sur a norte, lo que indica una mayor disponibilidad de lluvia hacia las áreas altas o del norte. Para SSP5-8.5, las cantidades son un poco más altas, alcanzando hasta 1120 mm. Pero en general, el cambio promedio en la precipitación anual es modesto.

El gráfico de diferencias (s585_SEL - Presente) muestra fluctuaciones principalmente entre -32.8 y 28.3 mm con una gran variación incremental en la mayor parte de la región, especialmente en las regiones central y norte. Esto significa que se supone que el modelo a largo plazo no producirá grandes cambios, sino que aumentará lentamente la precipitación anual esperada.

En resumen, bajo el escenario SSP5-8.5, la precipitación anual total (BIO12) no experimentaría un gran cambio a lo largo de los años, con pequeños aumentos localizados, lo que indica una mayor disponibilidad de agua en partes de la región, aunque sin una alteración significativa en el régimen general de lluvias.

Figura 59. Distribución espacial de la Variable Bioclimática 1.



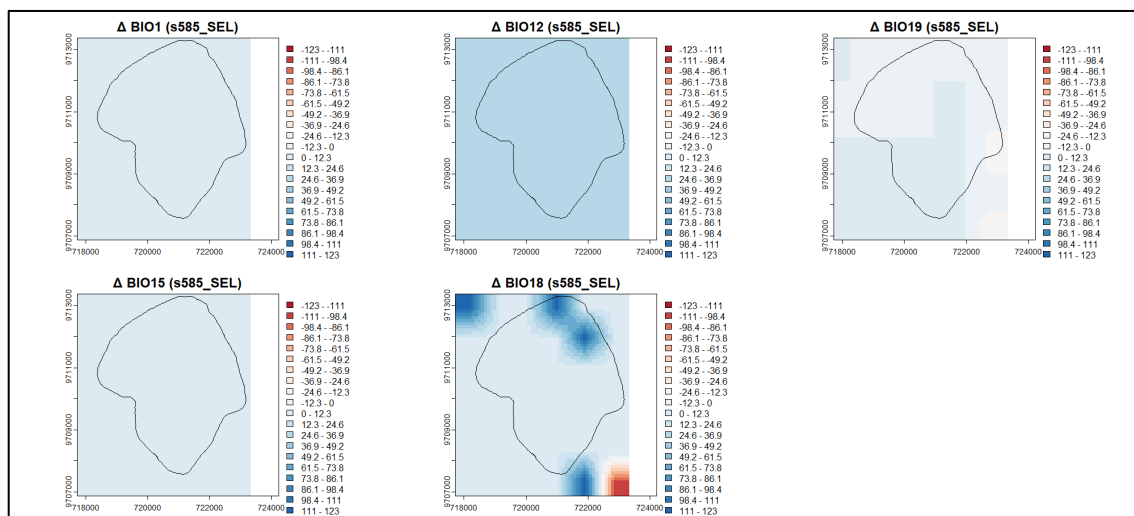
Fuente: Elaboración propia.

La figura representa la variable BIO1 (temperatura media anual) en tres escenarios: el presente, el futuro bajo el escenario SSP5-8.5 (s585_SEL) y la diferencia entre ambos periodos.

La temperatura media anual es de 5.5 °C a 7.8 °C, aunque hay un pequeño aumento hacia temperaturas más altas en el sector noreste con una ligera variación. Para el escenario futuro (SSP5-8.5), con valores que aumentan ligeramente a 8.5 °C, sugiere que la temperatura está aumentando en toda el área de estudio.

El gráfico de las cifras de discrepancia indica que la diferencia futuro-presente está alrededor de -0.91–0.91 °C, y las tendencias son mayormente positivas, lo que sugiere un calentamiento relativamente uniforme pero débil. Finalmente, en el escenario SSP5-8.5, la temperatura media anual (BIO1), con un ligero aumento, es consistente con la tendencia de calentamiento mundial. Este incremento gradual, si se detecta, podría alterar el suministro de agua; los ciclos biológicos; y la composición ecológica del área estudiada.

Figura 60. Distribución espacial de las variables Bio1, Bio12, Bio15, Bio18 y Bio19.



Fuente: Elaboración propia.

La figura muestra las variaciones proyectadas bajo el escenario SSP5-8.5 (Δ s585_SEL) para cinco variables bioclimáticas clave: BIO1, BIO12, BIO15, BIO18 y BIO19, que representan distintos aspectos de temperatura y precipitación. Cada mapa indica la magnitud y dirección del cambio (incremento o disminución) respecto al presente.

Interpretación general:

Los mapas evidencian cambios moderados a leves en las condiciones bioclimáticas de la zona analizada, con tendencias más marcadas en variables de precipitación que en temperatura.

Análisis por variable:

BIO1 (Temperatura media anual):

Se observa un cambio mínimo (entre -1 y $+1$ °C), indicando una estabilidad térmica relativa. Esto sugiere que, aunque el calentamiento global es evidente, su efecto directo en esta zona sería limitado en promedio anual.

BIO12 (Precipitación anual):

Los valores muestran una ligera tendencia positiva (hasta +28 mm), lo que representa un incremento moderado en la precipitación total anual. Esto puede implicar una mayor disponibilidad hídrica en términos generales.

BIO15 (Estacionalidad de la precipitación):

Presenta una variación leve ($\pm 1.5\%$), lo cual sugiere que la variabilidad interanual de las lluvias se mantendrá relativamente estable, sin cambios drásticos en los patrones estacionales.

BIO18 (Precipitación del trimestre más cálido):

Es la variable con mayores contrastes espaciales, con incrementos en el sector sur y ligeras disminuciones en otras áreas. Esto podría reflejar una redistribución de las lluvias durante los meses cálidos, posiblemente intensificando eventos lluviosos localizados.

BIO19 (Precipitación del trimestre más frío):

Muestra incrementos leves en el sureste (hasta +20 mm), lo que sugiere una mayor humedad incluso en la época más fría del año.

Conclusión General:

El escenario SSP5-8.5 proyecta un aumento leve de temperatura y precipitación en la zona de estudio, con variaciones más notorias en los trimestres cálido y frío. Aunque los cambios son sutiles, podrían tener efectos acumulativos sobre la dinámica hidrológica, la disponibilidad de agua y los ecosistemas locales, particularmente si se mantienen las tendencias de calentamiento global hacia finales del siglo XXI.

5.10 Estrategias de conservación y adaptación basadas en la resiliencia de los dominios ecológicos.

Adaptando los resultados de la modelización climática desarrollada para la Reserva Patococha para varios escenarios futuros SSP2-4.5 y SSP5-8.5, se discute la variabilidad de las respuestas del dominio ecológico a los aumentos de temperatura y los cambios en la distribución de las precipitaciones para abordar la resiliencia ecológica y la continuidad de los servicios ecosistémicos esenciales. Estos programas están diseñados para mitigar los efectos esperados en los ecosistemas de páramo, la estabilidad funcional y la sostenibilidad del agua y la biodiversidad a nivel local.

Las estrategias planteadas se organizan en torno a tres ejes principales:

Restauración y manejo de la cobertura vegetal nativa

- Establecer programas de restauración ecológica activa utilizando especies propias del páramo, como *Calamagrostis intermedia*, *Hypericum laricifolium* y *Chuquiraga jussieui*, con el fin de recuperar áreas degradadas por actividades como el sobrepastoreo y la quema.
- Favorecer la regeneración natural asistida en sectores identificados con potencial de recuperación de cobertura vegetal bajo escenarios de impacto moderado (SSP2-4.5).
- Regular la expansión de especies no nativas o invasoras que incrementan la susceptibilidad del suelo, disminuyen la absorción de agua y modifican la competencia entre las especies autóctonas.
- Implementar corredores ecológicos entre los fragmentos de vegetación que persisten, particularmente a lo largo de los cambios en altitud, con el objetivo de preservar la conectividad biológica ante los desplazamientos altitudinales previstos para diversas especies.

Conservación de recursos hídricos y adaptación ecohidrológica

- Proteger zonas de recarga hídrica mediante la delimitación de microcuencas prioritarias y la implementación de cercas vivas, contribuyendo a disminuir la erosión y la pérdida de suelo.

- Implementar infraestructura verde como zanjas de infiltración, humedales artificiales y biofiltros para retener el agua y disminuir la escorrentía superficial en condiciones de precipitaciones intensas, especialmente bajo el escenario SSP5-8.5.
- Realizar monitoreos periódicos de los caudales base y de la calidad del agua con el fin de anticipar alteraciones hidrológicas y promover ajustes oportunos en la gestión del recurso.
- Fomentar prácticas agroecológicas sostenibles en las zonas de amortiguamiento, minimizando el uso de insumos químicos y promoviendo sistemas productivos más resilientes a los eventos de sequía.

Fortalecimiento comunitario e institucional

- Promover la participación activa de las comunidades locales en los planes de conservación, desarrollando mecanismos de gobernanza territorial y acuerdos para el uso sostenible de los recursos.
- Enseñar a los residentes sobre la adaptación del paisaje, la restauración colaborativa y el monitoreo ambiental, integrando metodologías interculturales que valoren el conocimiento ancestral.
- Coordinar la gestión de la Reserva Patococha con iniciativas a nivel de cantones y provincias que aborden el cambio climático, promoviendo la colaboración entre instituciones para planificar, financiar y evaluar las acciones tomadas.
- Crear un sistema local de monitoreo climático y ecológico que en donde se recopile información sobre precipitaciones, temperaturas y cobertura vegetal, mejorando así la capacidad de toma de decisiones respaldada por evidencia científica.

DISCUSIÓN

Los resultados climatológicos obtenidos a partir de las proyecciones de WorldClim bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 evidencian un incremento progresivo de la temperatura media anual, así como modificaciones en los patrones de precipitación que apuntan hacia una mayor estacionalidad y potenciales déficits hídricos durante los periodos secos. Estas tendencias respaldan la interpretación de que el

ecosistema de páramo presente en la Reserva Patococha podría experimentar episodios más prolongados de estrés hídrico, aspecto concordante con lo reportado en análisis de vegetación altoandina mediante índices NDVI. En Ecuador, Villarreal-Veloz et al. (2023) observaron una relación intermedia entre la disponibilidad de agua y la dinámica de la vegetación; indicando una fuerte conexión entre la precipitación, la temperatura del suelo y así como el crecimiento de las plantas.

Estos datos se comparan con las características morfométricas de la cuenca, demostrando que una alta pendiente promedio, una importante gradiente altitudinal y un sistema de drenaje ordenado facilitan una rápida respuesta hidrológica a los cambios en la precipitación. Debido a estas características, el volumen de los flujos fluctuaría más ampliamente, con picos muy grandes durante la temporada de lluvias y volúmenes significativamente reducidos durante los períodos más secos. La simulación hidrológica de las cuencas de páramo también ha sufrido con respecto a su propio método: Jarrín-Pérez et al. (2024) ajustaron el modelo SWAT para reproducir estos flujos superficiales debido a la sobresaturación, considerando que los suelos de alta conductividad comunes en estas áreas permiten un alto grado de escorrentía en comparación con el modelo convencional basado en el exceso de infiltración. En este sentido, si las proyecciones climáticas indican pequeñas reducciones en la precipitación o cambios estacionales típicos de escenarios SSP altos, se producirán disminuciones significativas en los flujos mínimos de agua de la cuenca, poniendo en peligro el suministro de agua de algunas de nuestras comunidades que dependen de estas fuentes. La pérdida o deterioro de la cobertura vegetal agrava este problema, reduciendo la intercepción, la infiltración y la capacidad de retención de agua en el suelo.

El modelo y la prueba de parámetros morfométricos deben ir acompañados de estudios recientes sobre la dinámica de la vegetación en regiones montañosas. En Ecuador, un análisis NDVI multitemporal ha documentado un "enverdecimiento" o aumento en la actividad de la vegetación en múltiples regiones durante el período 1982-2010, pero su magnitud es notable en cuanto a que es regional y depende del acceso local al agua (Cambios espaciotemporales en el verdor de la vegetación en

el Ecuador continental). Pero estos arreglos temporales no significan estabilidad, considerando el impacto de la topografía, la humedad del suelo y los agentes antropogénicos.

Los hallazgos sugieren que la susceptibilidad de la Reserva Patococha no proviene de las condiciones climáticas proyectadas y, por lo tanto, la vulnerabilidad es resultado de la morfometría integrada, el estado de la vegetación y la capacidad hidrológica del área para absorber perturbaciones causadas por actividades humanas. En estas cuencas, los efectos del clima se contrarrestarán mejor con pendientes suaves y vegetación relativamente estable, mientras que en cuencas con colinas más altas y pérdida de vegetación, la respuesta hidrológica es mucho más inmediata. Desde este punto de vista, los resultados proporcionan una visión completa que enfatiza la necesidad de incluir una consideración integral de los factores relacionados con el clima y el terreno junto con un análisis climático al evaluar la resiliencia.

Pero también hay algunas advertencias pertinentes dadas en el presente estudio. 1) La resolución espacial de los datos de WorldClim no refleja necesariamente la variabilidad microclimática local consistente con los ecosistemas montañosos. En segundo lugar, la calibración del modelo hidrológico estuvo limitada por la falta de series de flujo histórico y estaciones meteorológicas dentro de la reserva, lo que puede introducir sesgos en los cálculos realizados para las estimaciones de flujo. En última instancia, las interpretaciones del NDVI asumen una relación relativamente lineal con las variables climáticas, una suposición que puede alterarse bajo condiciones de cambio severo en el uso del suelo y/o eventos extremos.

Cuando se involucra el estudio de diferentes ecosistemas, se observa que el Pastizal Inundado del Páramo puede considerarse una de las regiones más vulnerables del área a los cambios climáticos anticipados, debido a la demanda de alta humedad y saturación del suelo. Diferentes estudios muestran que los cambios en la humedad del suelo disminuyen la capacidad de regulación del agua y comprometen la biodiversidad local en los páramos ecuatorianos (Global Issues, 2013; Beltrán Valenzuela, 2019). En un escenario de menor disponibilidad hídrica y mayor

evapotranspiración, estos herbazales podrían ver reducida su capacidad de almacenamiento, aumentando su exposición ante sequías o eventos extremos. Por ello, se recomiendan investigaciones complementarias sobre distribución de especies y nichos ecológicos, para anticipar desplazamientos altitudinales y potenciales pérdidas de cobertura vegetal (Arellano-P. & Rangel-C., 2012; Gonda, 2020).

Se recomiendan estaciones meteorológicas locales y unidades de medición de flujo continuo para la calibración de modelos hidrológicos basados en datos de monitoreo observacional para proyectos futuros. Esta adición a las campañas de campo que se centraron en la ciencia botánica permitiría la comparación de estimaciones de NDVI y especies nativas. De manera similar, simular eventos extremos como sequías severas o lluvias intensas, por ejemplo, para establecer la robustez del sistema y adoptar técnicas socioecológicas para evaluar los impactos en las comunidades debería incluirse en la discusión.

Estos resultados de patrones de estudio morfométricos, climáticos y de vegetación muestran una correspondencia extraordinaria. Esta investigación contribuye sustancialmente a la condición climática actual y al estado físico y ecológico del sitio, que son necesarios para la gestión adaptativa de las cuencas en las áreas andinas.

Además, los enfoques fueron informados por el enfoque de Adaptación Basada en Ecosistemas propuesto por la UICN (UICN, 2018) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que enfatizan la necesidad tanto de la recuperación ecológica como de la gestión adaptativa para restaurar las capacidades adaptativas y mejorar la resiliencia de la tierra. En Ecuador, se ha demostrado recientemente que la cogestión adaptativa más los programas de restauración ecológica han elevado enormemente la productividad y mantenido los servicios hidrológicos en los territorios altos andinos (Neira, Ribadeneira & Erazo-Mera, 2022). Suárez, et al. (2022) señalaron que al restaurar turberas y pastizales, la clave es la gestión del agua y el uso de especies nativas que puedan soportar la variabilidad climática. Las prácticas en este sentido son consistentes con las estrategias sugeridas por la Reserva Patococha. Además, García et al. (2020) revelan

que el proceso de regeneración natural en los páramos del sur de Ecuador arroja tasas de éxito muy altas cuando la presión humana disminuye y se mantiene la conectividad ecológica.

En base a los resultados obtenidos en este estudio, investigaciones recientes sobre la vulnerabilidad de los páramos frente al cambio climático han utilizado enfoques que combinan análisis climáticos con variables ecológicas y morfométricas, lo que permite un contraste metodológico beneficioso. Por ejemplo, estudios que aplican evaluaciones integradas de vulnerabilidad mediante sistemas de información geográfica y análisis multiescalar han demostrado que la degradación del pastizal y la variabilidad o incremento de temperaturas son factores determinantes de la vulnerabilidad en ecosistemas altoandinos en otros países como en Perú, donde se identificó una correlación espacial positiva entre la degradación y la sensibilidad climática del sistema (Pizarro Carcausto, 2017). Asimismo, evaluaciones de impacto climático en páramos de Colombia han demostrado que los patrones de cambio de temperatura y precipitación afectan la distribución de coberturas vegetales y servicios ecosistémicos, logrando contribuir a las modificaciones del paisaje y de la estructura comunitaria (Impacto del Cambio Climático en Eventos Extremos del Páramo Guantiva-La Rusia, 2024). Comparando esos resultados de otros países, la presente investigación incorpora proyecciones de variables bioclimáticas bajo escenarios intermedios y extremos, descomposición de series temporales y correlaciones dominadas por multiescalas espaciales, lo que nos permite una interpretación más amplia de las tendencias climáticas y su impacto hidrológico. Aunque los resultados concuerdan en que las zonas de mayor vulnerabilidad coinciden con cambios térmicos y de precipitación, la combinación de métodos usados en este estudio facilita una comprensión más detallada de los mecanismos de respuesta ecosistémica, demostrándonos la necesidad de integrar diferentes enfoques metodológicos para formular estrategias de conservación adaptativas.

A diferencia de las intervenciones que enfatizan la resiliencia a nivel biofísico, el enfoque comunitario e institucional refleja que la resiliencia también funciona en el ámbito social, donde la participación local es clave para la conservación exitosa

(Fernández-Llamazares et al., 2021). Por lo tanto, las propuestas presentadas en esta sección fomentan el desarrollo de un modelo integral de gestión de ecosistemas, cuyos detalles y estructura pueden ser replicados en otros sistemas altos andinos de Ecuador.

Finalmente, se presenta la integración de modelos hidrológicos adaptados a escenarios de cambio de uso de suelo con una visión de futuro, y la realización de investigaciones de resiliencia socioecológica para estudiar la efectividad de las estrategias propuestas a mediano y largo plazo para entender si funcionarán efectivamente.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten afirmar que la cuenca de la Reserva Patococha tiene una morfología alargada, lo que implica que tiene pendientes pronunciadas, así como un sistema de drenaje bien definido, lo que da lugar a una respuesta hidrológica activa y al grado de susceptibilidad a la variabilidad climática. Estas características morfométricas se fusionaron con estas proyecciones climáticas para los contextos SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Es evidente que el área de estudio es muy sensible al cambio esperado en la temperatura y la precipitación en las próximas décadas. Se podría argumentar que la posición más vulnerable (en caso del peor escenario (SSP5-8.5), las tendencias en la temperatura promedio seguirán aumentando, la precipitación anual disminuirá, condiciones que podrían empeorar las sequías estacionales y alterar los flujos de agua responsables del ecosistema del páramo y sus recursos hídricos asociados.

Estos hallazgos confirman que el cambio climático está evolucionando el clima y la estructura ambiental de la Reserva Patococha y está alterando el control del agua y el equilibrio de los ecosistemas. Además, los resultados también cumplieron ciertos objetivos que ya se habían establecido: hoy y mañana la variación climática fue descrita a través de software de modelado espacial; se midió el parámetro morfométrico que afecta el comportamiento hidrológico de la cuenca, también se formularon medidas de conservación y adaptación basadas en los principios de resiliencia ecológica de los ecosistemas que existen en el área.

Las acciones inmediatas hacia la adaptación local incluyen (i) la restauración de la flora nativa en las áreas de recarga de agua; (ii) el monitoreo continuo de los sistemas climáticos e hidrológicos; (iii) la plantación de barreras vegetativas para reducir los efectos de la erosión; y (iv) el fortalecimiento de los programas de educación ambiental en la comunidad local. Según las directrices de la Estrategia Nacional de Biodiversidad de Ecuador (MAATE, 2022), estos proyectos deberían

aumentar la resiliencia ecológica del sistema y contribuir a hacer que los recursos hídricos locales sean más sostenibles dentro de climas adversos.

A escala regional, este estudio, sin embargo, se suma a la literatura sobre la sensibilidad y adaptabilidad de los ecosistemas de alta montaña al cambio climático en apoyo de estudios regionales realizados en los Andes tropicales (Buytaert et al., 2017; Cuesta et al., 2019). Estos hallazgos proporcionan una guía importante para el uso de estudios morfométricos y proyecciones climáticas como enfoques integrados para la gobernanza ambiental local y la gestión de recursos hídricos.

En realidad, la aplicabilidad de esta investigación es más viable: los métodos desarrollados son reproducibles utilizando la metodología en otras cuencas andinas con características comparables, y los resultados pueden proporcionar una base técnica muy sólida para establecer intervenciones de conservación adaptativa y planificación del uso del suelo en ecosistemas de páramo. Actualmente están experimentando impactos visibles del cambio climático, incluidos cambios en los comportamientos de escorrentía, suministros de agua y estructura funcional. En suma, la Reserva Patococha se proyecta como un ecosistema centinela del cambio climático en el sur del Ecuador, cuya conservación y manejo adecuado resultan esenciales para asegurar la resiliencia ambiental y el bienestar de las comunidades locales.

7. REFERENCIAS

- Assessing the potential of nature-based solutions as sustainable land and water management strategies in the high tropical Andean páramo ecosystem. (2024). *Journal of Environmental Management*.
<https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/116BKzo9/>
- ASF. (2025). Alaska Satellite Facility — SAR Data Search and Access.
<https://search.asf.alaska.edu/#/> (consultado el 28 de septiembre de 2025).
- Báez, S., Malizia, A., Carilla, J., et al. (2020). Effects of climate change on Andean páramo ecosystems. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 00238.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2020.00238/full>
- Bendjoudi, H., & Hubert, P. (2002). Le coefficient de compacité de Gravelius : analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological Sciences Journal*, 47(6), 921-930. <https://doi.org/10.1080/02626660209493000>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://condesan.org/wp-content/uploads/2017/07/Articulo2.pdf>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Cuesta, F., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Célleri, R. (2017). Human impact on the hydrology of Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53–72.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Canales, F. H., Alvarado, E. L., Pineda, E. B., Casilimas, D. C. A. S., David, C., Pasos, R., Codina, L., De Loma-Ossorio, E., García Ruiz, A., Córdoba Salinas, M., Ribalaygua Batalla, J., González, K., Larrea, F., Inés, J., Pinzón, C., IPCC, Martínez Rodríguez, L. J., Martínez, L., Martínez, H., & Solís. (2019). Estrategias de adaptación al cambio climático en municipios de Nicaragua del Golfo de Fonseca. *Universidad Andina Simón Bolívar*, 8(2002), 1980–2014.
<http://repositorio.una.edu.ni/3622/1/tne10s687.pdf>

- Castillo Namicela, G. F. (2016). *El impacto de las inversiones en salud y su control en la mortalidad infantil, periodo 1990–2014*. Universidad Nacional de Loja.
<http://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/10996>
- Cevallos Delgado, W., Zambrano Zambrano, M., Cedeño Menéndez, J., & Moreira Álava, A. (2024). Importancia de la hidrología en el manejo de cuencas hidrográficas. *Revista Dominio de las Ciencias*, 10(2), 1295–1310.
<http://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/index>
- Chapi Siñani, N. (2023). Riesgo de heladas históricas y ante escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585 dentro la cuenca del río Yesera, departamento de Tarija. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 10(2), 71–87. <https://doi.org/10.53287/gqtv3059vt66f>
- Chirinos, T. (2023). Variabilidad climática y cambios de cobertura de la tierra en los caudales de cabecera de la Cuenca del río Cabanillas. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(2), 6004–6024.
<https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.1030>
- CRRH-SICA. (2019). ¿Qué es el Fenómeno de El Niño, Oscilación del Sur (ENOS)? Comité Regional de Recursos Hidráulicos – SICA. https://centroclima.org/wp-content/uploads/2019/02/El_Ni%C3%B1o_febrero_2019.pdf
- Cuesta, F., Muriel, P., Beck, S., Meneses, R. I., Halloy, S., Salinas, N., & Becerra, M. T. (2019). Ecosystem services and carbon stocks in tropical Andean páramos under scenarios of land use change. *Regional Environmental Change*, 19(4), 989–1003. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1436-0>
- Cuesta, F., Tovar, C., Llambí, L. D., Gosling, W. D., Halloy, S., Carilla, J., ... & Muriel, P. (2019). Sensitivity of Andean ecosystems to climate change. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 39. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00039>
- Encina, F. M. M., González, J. M., & Paredes, J. C. (2020). Actual and potential distribution of *Dendroctonus mexicanus* Hopkins under two climate change scenarios. *Madera y Bosques*, 26(2), 1–14.
<https://doi.org/10.21829/MYB.2020.2622002>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

- FEWS NET. (2024). Altas temperaturas y escasas lluvias retrasan las siembras de Primera. Monitor estacional para América Latina y el Caribe.
<https://fews.net/sites/default/files/2024-05/LAC-seasonal-monitor-April2024.pdf>
- Fernández-Llamazares, Á., Lepofsky, D., & Brondizio, E. S. (2021). Reframing resilience: Indigenous knowledge and the adaptive governance of socio-ecological systems. *Ecology and Society*, 26(4), 21. <https://doi.org/10.5751/ES-12628-260421>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- García Rengifo, C. A., & Ochoa, D.-B. (2023). Variabilidad climática en la cuenca hidrográfica del río Chalpi Grande en Napo-Ecuador. *Enfoque UTE*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.872>
- García, N., Morales, J., & Reyes, F. (2021). Análisis multitemporal de la vegetación altoandina mediante índices NDVI y EVI en ecosistemas de páramo ecuatoriano. *Revista Geoespacial Latinoamericana*, 15(2), 77–92.
<https://revistageoespacial.org/paramo2021>
- García, V. J., Márquez, C. O., Rodríguez, M. V., Orozco, J. J., Aguilar, C. D., & Ríos, A. C. (2020). Páramo Ecosystems in Ecuador's Southern Region: Conservation State and Restoration. *Agronomy*, 10(12), 1922.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10121922>
- Giler-Ormaza, A., & Et-Al. (2019). Análisis del comportamiento hidrológico de cuencas hidrográficas tropicales utilizando índices: Estudio de caso en la región costa del Ecuador. *Terra. Nueva Etapa*, XXXV(58), e1.
<https://www.redalyc.org/journal/721/72164777003/72164777003.pdf>
- INEC. (2022). Censo Cañar 2022. Instituto Nacional de Estadística y Censos.
https://www.censoecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2024/01/Info_Canar.pdf
- Intriago, M., & Galarza, L. (2023). Páramos, compromiso comunitario, Tucayta. Asociación Tucayta. <https://www.avsf.org/app/uploads/2023/12/4-paramos-compromiso-comunitario-Tucayta.pdf>

- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- IPCC. (2023). *Sixth Assessment Report: Climate Change 2023 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- IUCN (2018). *Adapting to Climate Change: Guidance for Protected Area Managers and Planners*. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/PAG-024.pdf>
- Jarrín-Pérez, F., et al. (2024). Hydrologic simulation of a neotropical alpine catchment: capturing saturation-excess overland flow in páramo ecosystems. *Frontiers in Environmental Science*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2024.1303388/full>
- Jothimani, M., Lawrence, F., & Dawit, Z. (2021). Morphometric analysis and prioritization of sub-watersheds for soil erosion using Geomatics technologies in Megech River catchment. *Ethiopian Journal of Science and Sustainable Development*, 8(1), 52-64. <https://doi.org/10.20372/ejssdastu:v8.i1.2021.225>
- Kouadio, P. A., Koffi, Y. B., Kamagate, A., Ahoussi, E., & Kouassi, M. (2023). Morphometric Analysis of Topographic Surfaces in Highly Urbanized Tropical Environments. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 8(9). <https://ijisrt.com/assets/upload/files/IJISRT23SEP1826.pdf>
- Marsik, M., & Quesada, M. E. (2007). Indicadores físico-geográficos en el análisis de cuencas hidrográficas y su aplicación a la microcuenca Estero, Costa Rica. *Revista Dominio de las Ciencias*. <http://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/index>
- MAATE. (2022). *Estrategia Nacional de Biodiversidad y su Plan de Acción 2022–2030*. <https://www.ambiente.gob.ec/estrategia-nacional-de-biodiversidad-y-plan-de-accion-2022-2030>
- McGarigal, K., Cushman, S. A., & Ene, E. (2012). *FRAGSTATS v4*. University of Massachusetts, Amherst. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>

- MINISTERIO DEL AMBIENTE. (2018). Adaptación a los impactos del cambio climático en recursos hídricos en los Andes. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/11/1.-RESUMEN-PROYECTO-AICCA.pdf>
- Neira, F., Ribadeneira, S., & Erazo-Mera, E. (2022). Adaptive co-management of biodiversity... *Heliyon*, 8(12), e11883. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11883>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., & Sanderson, B. M. (2017). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- OMS. (2024). Cambio climático y salud. https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA77/A77_R14-sp.pdf
- Ouaba, M., & Saidi, M. E. (2023). Contribution of morphological study... *AIMS Environmental Science*, 10(1), 16-32. <https://doi.org/10.3934/environsci.2023002>
- Pardo-Igúzquiza, E., & Rodríguez-Tovar, F. J. (2013). Análisis espectral de series temporales de variables geológicas con muestreo irregular. *Boletín Geológico y Minero*, 124(2), 323–337. https://info.igme.es/media/boletin/2013/124_2/Articulo_11.pdf
- Pérez-Ortiz, M. A., Montenegro-Murillo, D. D., & Vargas-Franco, V. (2022). Analysis of the influence of climatic variability... *DYNA*, 89(221), 168–177. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.101607>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Pizarro Carcausto, J. A. (2017).** Evaluación de la vulnerabilidad del ecosistema de pastizales altoandinos frente al cambio climático en la región central del Perú. *Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación – CONCYTEC*. <https://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/328>
- Rodríguez, L., Martínez, J., & Pérez, A. (2024).** Impacto del cambio climático en eventos extremos del páramo Guantiva–La Rusia (Colombia). *Revista Avances*

- en Ciencias Ambientales*, 18(1), 55–72.
<https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/3741>
- Ruíz-Ordóñez, M., Aguirre, D., & Andrade, R. (2023). Evaluación de la vulnerabilidad ecológica frente al cambio climático en ecosistemas altoandinos. *Revista de Ciencias Ambientales Andinas*, 18(2), 122–141.
<https://doi.org/10.18272/rcaa.v18i2.3171>
- Sinabarigui, I., et al. (2022). Morphometric analysis... *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10, 299-312. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.1012017>
- Spatiotemporal changes in vegetation greenness across continental Ecuador (2020). University of Florida / GEOG. <https://geog.ufl.edu/2020/12/30/spatiotemporal-changes-in-vegetation-greenness-across-continental-ecuador-a-pacific-andean-amazonian-gradient-1982-2010/>
- Streamflow response to land use/land cover change in the Andes using SWAT (Valencia et al., 2024). ScienceDirect.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581824002374>
- Suarez, E., Chimbolema, S., Jaramillo, R., et al. (2022). Challenges and opportunities for restoration of high-elevation Andean peatlands in Ecuador. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 27, 30.
<https://doi.org/10.1007/s11027-022-10006-9>
- Suharyanto, A., Suhartanto, E., & Lesmana, S. B. (2020). Watershed morphometric classification analysis... *Geomate Journal*, 19(74), 114-122.
<https://geomatejournal.com/geomate/article/view/1856>
- Terram. (2024). Cuencas hidrográficas. Fundación Terram.
<https://creaccionambiental.cl/wp-content/uploads/2024/11/Documento-Maestro-Cuencas-Hidrograficas.pdf>
- Tropical Pacific SST influence on seasonal streamflow variability in Ecuador. (2024). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2401.09799>
- UNICEF. (2015). Cambio climático en niños, niñas, adolescentes y jóvenes en el Ecuador. <https://www.unicef.org/ecuador/media/10596/file/CAMBIO-CLIMATICO.pdf>
- Valero Fajardo, C. (2022). La caracterización hidrográfica y su influencia en la evaluación del riesgo de inundación. *Polo Del Conocimiento*, 7(8), 625–640.
<https://doi.org/10.23857/pc.v7i8>

- Vega, J., & Ludeña, C. (2020). Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático en ecosistemas altoandinos del sur del Ecuador. *Revista de Geografía Norte Grande*, 76, 65–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022020000200065>
- Villarreal-Veloz, D., Vásquez, J., & Tapia, C. (2023). Impactos del cambio climático en ecosistemas altoandinos de Ecuador... *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales*, 16(2), 45–62. <https://doi.org/10.18272/raca.v16i2.2800>
- WorldClim. (2025). WorldClim Version 2.1 – Global Climate Data. <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html> (consultado el 27 de septiembre de 2025).
- Zhiña, D. C., Molina, P., & Guamán, A. (2024). Evaluación de los efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica... *Revista Politécnica*, 54(2), 112–128. <https://doi.org/10.33333/rp.v54i2.3091>

