

Estudio de registros extremos de precipitación asociados al cambio climático en el Parque Nacional Natural Chingaza durante el periodo de 1981–2010

Study of Extreme Precipitation Records Associated with Climate Change in the Chingaza Natural National Park during the Period of 1981–2010

Paula Evelin Torres Ramos¹
Juan Antonio Aragón Moreno²

¹Ingeniería Ambiental Universidad Libre. Email: paula.evelin.24@gmail.com

²M.Sc. Meteorología Universidad Libre. Email: juan.aragonm@unilibre.edu.co

 OPEN ACCESS



Copyright:© 2020 Ingenierías USBMed. La revista *Ingenierías USBMed* proporciona acceso abierto a todos sus contenidos bajo los términos de la licencia creative commons Atribución- no comercial- SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Tipo de artículo: Investigación científica y tecnológica.

Recibido: 23-08-2019.

Revisado: 05-02-2020.

Aprobado: 05-03-2020.

Doi: 10.21500/20275846.4252

Referenciar así: P. E. Torres and J. A. Aragón. "Estudio de registros extremos de precipitación asociados al cambio climático en el Parque Nacional Natural Chingaza durante el periodo de 1981–2010," *Ingenierías USBMed*, vol. 11, no. 2, pp. 1-17, 2020.

Declaración de disponibilidad de datos: Todos los datos relevantes están dentro del artículo, así como los archivos de soporte de información.

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen conflicto de intereses.

Editor: Andrés Felipe Hernández. Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.

Resumen. Este trabajo caracterizó y analizó el comportamiento estadístico y espacial de la precipitación junto con sus extremos climáticos planteados por el ETCCDI, mediante el paquete estadístico RClmDex en el PNN Chingaza con un perímetro hasta los 12 km a partir de 19 series climatológicas de frecuencia diaria durante 1981-2010. La estimación de datos faltantes se realizó con el método de ponderación de la distancia inversa en el software RStudio, superó el control de calidad de la herramienta computacional RClmTool y se determinó la representación espacio-temporal con el sistema integrado de ArcGis. El comportamiento de la precipitación manifestó un régimen pluviométrico monomodal con cúspide en el segundo cuatrimestre del año, revelando la menor precipitación promedio anual en el noroeste con alturas que alcanzan los 3100 m.s.n.m., y aumentando hacia el sudeste del área protegida. Dentro del periodo de la normal climatológica, los índices extremos de precipitación que revelaron una tendencia positiva fueron: Rx1day, SDII, R95p y más pronunciada en CDD que en CWD; mientras que una tendencia negativa se obtuvo en: Rx5day, R10 y PRCPTOT. Así mismo, para el comportamiento pluviométrico e índices extremos se obtuvo la distribución espacial con el método de interpolación CoKriging.

Palabras Clave. Análisis estadístico, cambio climático, datos climáticos, ecosistema, humedal, precipitación.

Abstract. This work characterized and analyzed the statistical and spatial behavior of precipitation along with its climatic extremes proposed by ETCCDI, through the RClmDex statistical package in Chingaza NNP with a perimeter up to 12 km, from 19 climatological series of daily frequency during 1981-2010. The estimation of missing data was performed with the inverse distance weighting method in the RStudio software, passed the quality control of the RClmTool computational tool and the spatiotemporal representation was determined with the ArcGis integrated system. The precipitation behavior manifested a monomodal pluviometric regime with cusp in the second quarter of the year, revealing the lowest annual average precipitation in the northwest with altitudes reaching 3100 m.a.s.l., which is increasing towards the southeast of the protected area. Within the climatological normal period, the extreme precipitation indices that revealed a positive trend were: Rx1day, SDII, R95p, and more pronounced in CDD than in CWD; while, a negative trend was obtained in: Rx5day, R10 and PRCPTOT. For rainfall behaviour and extreme indices, spatial distribution was obtained using the CoKriging interpolation method.

Keywords. Climate change, climatic data, ecosystem, precipitation, statistical analysis, wetland.

I. Introducción

El páramo es un ecosistema estratégico de alta montaña [1, 2] que, por sus características de clima, vegetación, geografía y edafología, ofrece servicios ecosistémicos semejantes a servicios de soporte, mediante la estabilización física en zonas elevadas. Este evita avalanchas y desprendimiento de tierras; refugio de especies endémicas de flora y fauna; servicios de provisión como almacenamiento y suministro del recurso hídrico y servicios de regulación por medio de la captura y almacenamiento de carbono atmosférico en áreas de turberas que contribuyen a la mitigación del cambio climático y al mejoramiento de la calidad del aire. Además, proveen servicios culturales a consecuencia de su atractivo cultural, científico, espiritual y turístico [3, 4].

En diferentes trabajos [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] se ha señalado que los ecosistemas de alta montaña, comprendiendo glaciares, humedales, páramos y bosques altoandinos [13], presentan una alta vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático, debido a su baja resiliencia y capacidad de adaptación [14]. Esta vulnerabilidad en el páramo se origina por su evolución en aislamiento geográfico [15], donde no fue sometido a alteraciones permanentes y no hubo desarrollo en cuanto a adaptación especial para enfrentarlas. Esto lo convirtió en un ecosistema de gradientes únicos de especies, nutrientes, altitudinales, climáticos e hídricos [16]. Además, su fragilidad se profundiza por la presión antrópica como los incendios forestales, deforestación, ganadería, agricultura, cacería, minería a cielo abierto, levantamiento de obras civiles y siembra de especies exóticas [2, 16, 17, 18]. En ese sentido, los efectos del cambio climático sumados al alto grado de intervención antrópica en ecosistemas de alta montaña se ven reflejados en el aumento de temperatura, la disminución de precipitaciones y la modificación en los ciclos hidrológicos y de nutrientes [19, 20]. Esto resulta en una reducción en la capacidad de almacenamiento y suministro de agua en los humedales y la formación de turberas, permitiendo una transformación de sumideros a emisores de carbono [21, 22, 23]. A su vez, en escenarios de cambio climático, se propicia la pérdida de características del hábitat que afecta principalmente a la fauna nativa y endémica para su desarrollo, reproducción y migración [17, 24, 25].

El ecosistema páramo se encuentra en Costa Rica, Panamá y se extiende por los Andes tropicales en Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú [26, 27]. Aunque su extensión es menos generosa, también está en África, Asia y Oceanía [15, 28]. Sin embargo, a Colombia se le considera el país núcleo de estos ecosistemas, debido a que posee la mitad de la extensión del páramo a nivel mundial [26] y el 60% de la riqueza de vegetación del bioma (ecosistema tropical húmedo sobre el límite del bosque [15]) de alta montaña de Centroamérica y el Norte de Suramérica [29].

Con el objetivo de conservarlo, de las 2906137 hectáreas de páramo colombiano, el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) tiene el 45% (1297450 ha) de la extensión protegida bajo alguna de sus clases [30]. Además, posee el páramo más grande del mundo en Sumapaz, que junto al de Chingaza proveen de agua a Bogotá D.C. y a varios pueblos de Cundinamarca, Boyacá, Meta y Tolima [31]. El Parque Nacional Natural Chingaza abastece el 80% de agua dulce a la capital colombiana [32]. Así pues, esta área protegida cuenta con una extensión de páramo cerca del 33% de su área total (76600 ha), 47% de bosque andino, 15% de bosque alto andino, 2% de vegetación secundaria, 1% de superficie de agua, 1% de pastos y ganado y 1% mosaico de áreas intervenidas [33]. Estos son albergue para especies gravemente amenazadas como el cóndor de los andes (*Vultur gryphus*), el oso de anteojos (*Tremarctos ornatus*), dos especies de danta (*Tapirus terrestris* y *Tapirus pinchaque*), el venado colorado (*Mazama rufina bricenni*) y el puma (*Felix concolor*) [31]. Además, atesora el Sistema Lacustre de Chingaza como sitio RAMSAR (declarado por medio del Decreto 233 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial) con un área aproximada de 4058 ha en jurisdicción con Fómeque, Choachí y San Juanito [33].

La pluviosidad en el PNN Chingaza en general es alta y con precipitaciones anuales que superan los 3000 mm [34]. No obstante, la cantidad de precipitación anual presenta una variación entre las diferentes zonas del área protegida, dado que está fuertemente ligada a las condiciones geográficas, a la altitud y a la topografía [35]. La precipitación se ajusta a un régimen unimodal [34] con lluvias máximas de junio a julio y un periodo seco de enero a febrero, presentándose la mayor cantidad promedio de lluvia anual (4000 mm) a una altura de 2000 m.s.n.m. [36]. De manera semejante, Carreño y Ramírez [37] afirman que las precipitaciones medias anuales revelan solo un pico de lluvias intensas entre los meses de mayo a agosto, durante los cuales se registra cerca del 60% del total anual; los meses de diciembre a febrero son los menos lluviosos, significando escasamente entre el 9% y el 17% de la precipitación total anual. Sin embargo, como afirmaron IDEAM [19] y Moya, León y Marín [20], puede haber alteraciones en el comportamiento de la precipitación bajo escenarios de cambio climático, como se reporta en la Tercera Comunicación de Cambio Climático [38], donde se estima una disminución del orden del 10% de la precipitación actual para el año 2040 en el ecosistema de alta montaña.

Por otro lado, la distribución espacial de la precipitación en zona de alta montaña puede lograrse con los métodos de interpolación IDW y Kriging, que presentan una precisión similar, mientras que el método Spline no representa la topografía de alta montaña [39]. Sin embargo, a pesar de que el método de interpolación IDW es comúnmente el que más se ajusta a la precipitación, se recomienda usar un método que incluya

variables como la elevación para la alta montaña, dado que dicho método asume que la distribución espacial de las variables solo depende de la distancia entre los puntos con información [40]. En ese sentido, diferentes estudios han comparado métodos de interpolación en áreas de alta montaña, como el realizado en el suroeste de Irán [41], en la cuenca del río Willamette en Estados Unidos [42] y en un área de 5000 km² en Portugal [43], donde determinaron la interpolación de CoKriging como un excelente método para estimar la distribución espacial de la precipitación y la consistencia con la topografía, puesto que utiliza como variable auxiliar la elevación en el proceso de estimación [44]. No obstante, en la consulta bibliográfica de este estudio no existe un tipo de discusión para ecosistemas de alta montaña en Colombia hasta la fecha.

En el cambio climático se comprende al evento extremo climático como la ocurrencia de alguna variable meteorológica con un valor que supera un umbral especificado de acuerdo con la observación histórica de dicha variable y cuya probabilidad de ocurrencia es baja [45]. El Equipo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) de Canadá, propone 27 índices básicos para extremos climáticos de temperatura y precipitación [46, 47], los cuales pueden ser calculados mediante el paquete estadístico RCLimDex y ser utilizados en estudios de monitoreo y detección de cambios climáticos [48] conforme a un periodo de 30 años en cumplimiento de la normal climatológica establecida por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) [49].

Avanzando en este razonamiento se han obtenido y estudiado los índices de extremos climáticos de precipitación calculados por RCLimDex en diferentes trabajos. Por ejemplo, Baidya, Shrestha y Sheikh [50] analizaron las tendencias en extremos climáticos diarios de temperatura y precipitación en Nepal; Keggenhoff, Elizbarashvili, Amiri y King [51] desarrollaron tendencias en la temperatura y las precipitaciones extremas en Georgia durante 1971-2010; Ávila, Justino, Wilson, Bromwich y Amorim [52] analizaron los cambios espaciales y temporales en las precipitaciones de 1978 a 2014 en el sur de Brasil y Rahimi, Mohammadian, Rezei y Whan [53] examinaron las tendencias en los índices de temperatura y precipitación extrema durante el periodo de 1960-2014 en Irán, entre otros estudios.

En el territorio nacional, Pinilla y Pinzón [54] hicieron una caracterización en la parte central del departamento de Santander, en la que analizaron los eventos extremos revelando una tendencia negativa en la precipitación total anual; Pabón [55] realizó una reevaluación de las tendencias de temperatura y precipitación de largo plazo observadas durante la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI en Colombia, registrando reducciones incluso del 30% en la zona interandina y región Caribe; Armenta y Ruíz [56]

analizaron el comportamiento del cambio climático para Colombia en el periodo 2011-2040 donde señalan que la temperatura tenderá a aumentar y la precipitación a disminuir principalmente en el centro y suroccidente del país; Aragón y Lerma [57] estudiaron los escenarios espaciales y temporales de eventos extremos de la precipitación en Bogotá, revelando en los índices una tendencia positiva regional a excepción del sur de la ciudad. Por otra parte, IDEAM et al. [58] mostraron una recopilación de índices de extremos climáticos para la región Bogotá-Cundinamarca calculados mediante el software Stardex durante el periodo 1980-2010, indicando una tendencia de disminución hacia la zona oriental de Cundinamarca en la precipitación promedio anual.

Conforme a lo enunciado, este estudio busca ser un soporte analítico del comportamiento geoestadístico de la precipitación con relación a sus índices extremos. Además, tiene el propósito de ser guía para la toma de decisiones de termino ambiental, socioeconómico y político en ecosistemas de alta montaña, particularmente en el PNN Chingaza, en materia de suscitar conocimiento y medidas para la adaptación y mitigación del cambio climático.

II. Materiales y métodos

A. Área de estudio

La zona de estudio es el PNN Chingaza y un perímetro de 12 km hasta el área protegida (Figura 1), donde se tuvo en cuenta la información de los valores totales diarios de precipitación de 19 estaciones meteorológicas, de las cuales 16 pertenecen al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y las tres restantes a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).

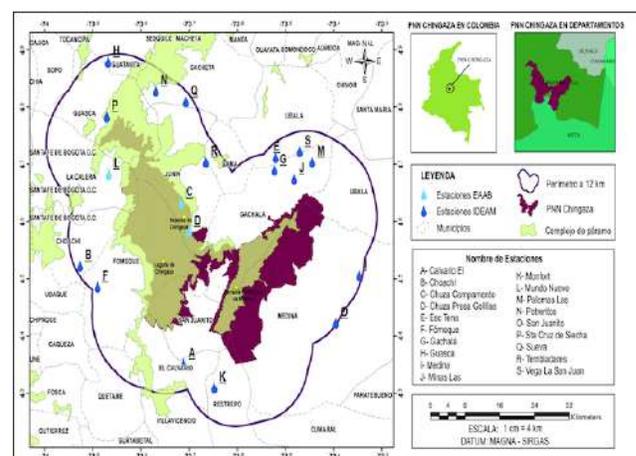


Figura 1. Área de estudio y estaciones meteorológicas

El Parque Nacional Natural Chingaza está situado en la cordillera oriental de la región andina, al nororiente de Bogotá D.C., entre los $4^{\circ} 20' - 4^{\circ} 50'$ de latitud norte y los $73^{\circ} 30' - 73^{\circ} 55'$ de longitud oeste, con alturas desde 800 m.s.n.m. hasta 4.020 m.s.n.m. y temperaturas que oscilan entre 4° C y 21° C [31, 33]. Posee una extensión por resolución de 76600 ha y extensión por información geográfica de 77414 ha [31]. La mayoría de esta área tiene jurisdicción en el departamento de Cundinamarca, en los municipios de Fómeque, Choachí, Gachalá, Medina, La Calera, Guasca y Junín. El área restante se ubica en el departamento del Meta, en los municipios de Restrepo, San Juanito, Cumaral y El Calvario [33, 59].

B. Selección de estaciones y control de calidad

Se buscó información de las estaciones meteorológicas de precipitación localizadas en el área de estudio en el IDEAM, CAR de Cundinamarca y en la EAAB. Una vez ubicadas las estaciones se llevaron a cabo dos filtros para asegurar la calidad de estas. En el primer filtro se verificó que contaran con un periodo consecutivo y activo durante 1981-2010 con no más de dos años consecutivos sin datos, de acuerdo con la normal climatológica [49]. En el segundo filtro se comparó el nivel de información diaria que posee cada estación con el total de la serie de tiempo. Así se descartaron aquellas estaciones que no cumplieran con mínimo el 80% de los datos, de acuerdo con lo determinado por la OMM [60] y como criterio para realizar el control de calidad [61].

En razón a que los datos suministrados por las estaciones meteorológicas pueden presentar errores en los procedimientos y métodos de observación en los aparatos técnicos e instrumentos [62], se realizó el control de calidad de acuerdo con tres desviaciones estándar por debajo del percentil 25 y por encima del percentil 95 desarrollado por la herramienta RClimTool, con el fin de identificar datos no razonables y/o erróneos [61].

C. Estimación de datos ausentes

Se buscó completar los datos faltantes en las series de tiempo de las estaciones de precipitación por medio de tres métodos. El primer método que se utilizó fue mediante el uso de la teoría de modelos Vectoriales Auto-Regresivos (VAR) con apoyo de la herramienta RClimTool [61]. El segundo método que se empleó fue el método del vecino más cercano, el cual ingresa directamente el dato observado con información de la serie climatológica más cercana a la estación meteorológica con el dato vacío [63, 64].

Por último, el tercer método que se utilizó fue la ponderación de la distancia inversa, que se basa en estimar los datos desconocidos como promedios ponderados sobre las mediciones conocidas de las estaciones más cercanas, otorgando mayor peso a los valores disponibles que están más próximos a la estación de interés [65, 66, 67].

En atención a lo cual este método se define en (1) [64]:

$$\hat{z}(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i) d_{ij}^{-1}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-1}} \quad (1)$$

Donde $\hat{z}(x_j)$ es el valor estimado de la estación, de acuerdo con el promedio ponderado de las estaciones observadas $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$ y d_{ij} es el factor de ponderación definido como la distancia euclidiana entre la observación $z(x_j)$ y el valor para ser estimado $\hat{z}(x_j)$.

El método del vecino más cercano y el método de ponderación de la distancia inversa se efectuaron computacionalmente con el software RStudio y se comparó el error cuadrático medio (RMSE) con el fin de elegir el método más apropiado de llenado de datos. El RMSE es adecuado para medir el error de pronóstico y se obtiene al calcular la raíz cuadrada de la suma de los errores de predicción al cuadrado dividida por el número de observaciones, tal como se observa en (2) [64]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(x_i) - \hat{z}(x_i))^2}{n}} \quad (2)$$

Donde $z(x_i)$ es la cantidad de precipitación observada y $\hat{z}(x_i)$ es el valor estimado de la precipitación.

D. Análisis estadístico del comportamiento de la precipitación y procesamiento espacio temporal

Se llevó a cabo el análisis estadístico descriptivo de la precipitación promedio total multianual para cada una de las estaciones meteorológicas, calculando algunos parámetros de centralización como la media, la mediana y la moda; parámetros no centrales como el mínimo, máximo, el percentil 25 y el percentil 95 (rango de la variable meteorológica en el control de calidad) y el parámetro de dispersión de la desviación estándar.

Así mismo, se realizó el diagrama boxplot [68] de cada serie climatológica mediante la herramienta de Plot.ly [69] con el fin de visualizar mejor el régimen pluviométrico, en el que la línea discontinua corresponde a la media y la línea sólida a la mediana. Por último, se precedió a la representación espacio-temporal mediante la interpolación CoKriging con apoyo de la geostatística de ArcGis 10.3.

E. Análisis de índices de extremos climáticos y procesamiento espacio-temporal

De los 27 índices para extremos climáticos planteados por el ETCCDI se calcularon 10 índices de precipitación (Tabla 1) por medio del paquete estadístico RClimDex [48], donde se señalaron los índices con p-value (nivel de significancia estadística) menor o igual a 0.05 y 0.2 [56, 57, 58], y posteriormente se realizó el procesamiento

espacio-temporal de los índices mencionados con el fin de visualizar mejor la información mediante el sistema integrado de ArcGis 10.3. Se estimó la tendencia de precipitación extrema para el año 2030 y 2040 a partir del índice de la precipitación total anual en los días húmedos ($RR \geq 1\text{mm}$) (PRCPTOT).

Tabla 1. Índices extremos de precipitación, ajustado de Zhang y Yang [48]

Id/ (Unidad)	Denominación	Descripción
RX1day (mm)	Cantidad máxima de precipitación en un día	Máximo mensual de precipitación en un día
RX5day (mm)	Cantidad máxima de precipitación en 5 días	Máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos
R95p (mm)	Días muy húmedos	Precipitación anual total en que $RR > 95$ percentil
R99p (mm)	Días extremadamente húmedos	Precipitación anual en que $RR > 99$ percentil
PRCPTOT (mm)	Precipitación total anual en los días húmedos	Precipitación total anual en los días húmedos ($RR \geq 1\text{ mm}$)
SDII (mm/día)	Índice simple de intensidad diaria	Precipitación total anual dividida para el número de días húmedos (definidos por $RR \geq 1\text{ mm}$) en un año
R10 (días)	Número de días con precipitación intensa	Número de días en un año en que $RR \geq 10\text{ mm}$
R20 (días)	Número de días con precipitación muy intensa	Número de días en un año en que $RR \geq 20\text{ mm}$
CDD (días)	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con $RR < 1\text{ mm}$
CWD (días)	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con $RR \geq 1\text{ mm}$

RR: cantidad diaria de precipitación

III. Resultados y discusión

A. Selección de estaciones y control de calidad

Existen 86 estaciones meteorológicas con información de la variable meteorológica de precipitación del IDEAM,

EAAB y CAR de Cundinamarca distribuidas en la zona de estudio. Se rechazaron 55 estaciones después de verificar el cumplimiento de la normal climatológica durante el periodo de 1981 a 2010 (primer filtro); y se descartaron 12 estaciones más porque no cumplieron con mínimo el 80% de los datos en las series de tiempo (segundo filtro), como se puede observar en la Fig. 2.

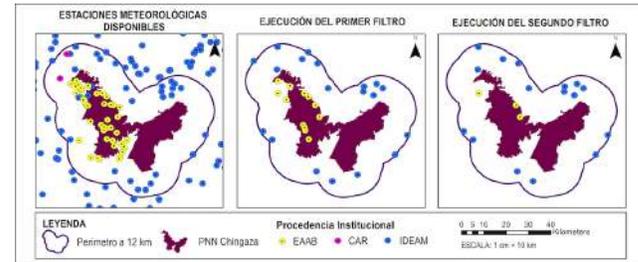


Figura 2. Visualización de los filtros de las estaciones meteorológicas

De esta manera se escogieron 19 estaciones meteorológicas (Tabla 2), de las cuales 16 pertenecen al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Las otras 3 series climatológicas restantes hacen parte de la jurisdicción de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

El periodo en estudio comprende 208050 datos, que abarcan los 365 días durante 30 años de de las 19 series climatológicas, las cuales tenían en disponibilidad de 197755 datos. Mediante el control de calidad de la herramienta RClimTool se reconocieron y descartaron 9757 (4.93%). Por ejemplo, en la Estación C - Chuza Campamento (Figura 3) el percentil 25 corresponde a una precipitación de 0 mm y el percentil 95 a 23.6 mm. De esta manera, la herramienta estadística identifica los datos con más de 3 desviaciones estándar por encima de 23.6 mm y por debajo de 0 mm, que se identifica por la línea roja y procede a generar una base de datos con este reconocimiento.

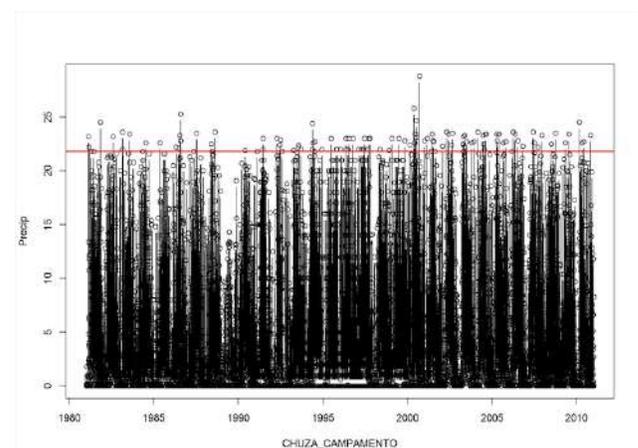


Figura 3. Ejemplo de control de calidad de RClim Tool en estación C

Tabla 2. Estaciones meteorológicas seleccionadas

	Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Institución	Departamento
A	Calvario El	4.3520556	-73.71158	1800	IDEAM	Meta
B	Chosachi	4.5229167	-73.92658	1950	IDEAM	Cundinamarca
C	Chuza Campamento	4.6333333	-73.71667	3100	EAAB	Cundinamarca
D	Chuza Presa Gorilas	4.5833333	-73.70000	3008	EAAB	Cundinamarca
E	Esc Tena	4.7126944	-73.52069	1650	IDEAM	Cundinamarca
F	Fómeque	4.4865278	-73.89042	1900	IDEAM	Cundinamarca
G	Chacalá	4.6905278	-73.52292	1733	IDEAM	Cundinamarca
H	Guasca	4.8798611	-73.86811	2750	IDEAM	Cundinamarca
I	Medina	4.5065556	-73.34780	480	IDEAM	Cundinamarca
J	Minas Las	4.6751667	-73.48214	2003	IDEAM	Cundinamarca
K	Monfort	4.3100833	-73.64803	1100	IDEAM	Meta
L	Mundo Nuevo	4.6833333	-73.86667	2400	EAAB	Cundinamarca
M	Palomas Las	4.7049167	-73.44489	2003	IDEAM	Cundinamarca
N	Potreros	4.8288056	-73.76928	2802	IDEAM	Cundinamarca
O	San Juanito	4.4232222	-73.39597	426	IDEAM	Cundinamarca
P	Sta Cruz de Siecha	4.7842778	-73.87081	3100	IDEAM	Cundinamarca
Q	Sueva	4.8100000	-73.70717	1965	IDEAM	Cundinamarca
R	Tembladares	4.7048611	-73.66528	2878	IDEAM	Cundinamarca
S	Vega La San Juan	4.7233056	-73.47056	1791	IDEAM	Cundinamarca

B. Estimación de datos ausentes

En el método de estimación de datos faltantes a partir de modelos VAR es indispensable contar con información de temperatura máxima y mínima. Este fue descartado debido a que en la zona de estudio solo se contaba con 5 estaciones meteorológicas con información de temperatura y tenían más del 20% de datos vacíos. El método de vecino más cercano tuvo un RMSE promedio de 10.14 mm, mientras que el método de ponderación de la distancia inversa tuvo un RMSE de 7.074 mm. Por tal razón los datos faltantes de las series climatológicas fueron estimados por el método de la distancia inversa, señalado también como un método de interpolación adecuado para la lluvia por Chen y Liu [67] y Ferrari y Ozaki [64] en sus estudios.

C. Análisis estadístico del comportamiento de la precipitación

En la descripción estadística del promedio total multianual de las 19 series climatológicas de 1981 a 2010 (Tabla III) se reconoció que la media varía entre 47.9 mm y 349.5 mm de precipitación mensual, presentados en las estaciones H y K respectivamente, revelando una tendencia de menor a mayor precipitación desde el noroeste del PNN Chingaza hasta el sudeste. De manera similar sucede con la mediana: el 50% de los datos fluctúa entre 49.9 mm y 381.9 mm en las mismas estaciones mencionadas. En el área de estudio el mínimo absoluto mensual de precipitación correspondió a 17.9 mm durante el mes de enero en la estación B; mientras que el máximo absoluto mensual fue de 564.0 mm durante el mes de junio en la estación K, coincidiendo con el comportamiento espacial de noroeste a sureste.

Tabla 3. Descripción estadística del promedio total multianual

Nom	Media	Mediana	Mín	Máx	Dev. est.
A	200.9	203.4	57.4	361.0	104.9
B	61.6	63.0	17.9	96.5	26.2
C	141.6	135.1	43.1	237.3	66.0
D	206.2	196.6	64.0	343.2	96.5
E	142.7	140.9	32.0	236.8	72.3
F	80.8	83.3	20.7	123.3	36.0
G	145.1	140.7	29.2	239.4	74.3
H	47.9	49.9	23.9	65.9	14.2
I	225.5	238.6	47.0	371.4	112.7
J	221.3	235.9	56.5	353.5	101.4
K	349.5	381.9	86.8	564.0	163.6
L	97.1	101.6	30.1	168.9	46.1
M	254.0	255.3	59.3	424.3	126.5
N	120.9	115.2	37.7	203.6	55.1
O	231.6	255.3	39.1	367.4	115.5
P	71.9	70.3	21.8	121.9	32.5
Q	84.3	86.5	21.3	134.0	40.7
R	219.6	208.8	69.1	351.3	96.1
S	193.9	188.1	44.2	330.3	97.4

El régimen pluviométrico en el área de estudio es monomodal con cúspide entre los meses de junio y julio en las estaciones meteorológicas (Figura 4), reafirmando lo manifestado por Parques Nacionales Naturales de Colombia [36] y Cárdenas y Tobón [34] en cuanto a los meses.

Sin embargo, a pesar de que la diferencia no es alta, la estación I es una excepción porque presentó el pico en mayo en el cuartil 3 con un valor de 20.8 mm/día, mientras que, junio tuvo un valor de 20 mm/día y julio 19 mm/día (Figura 5).

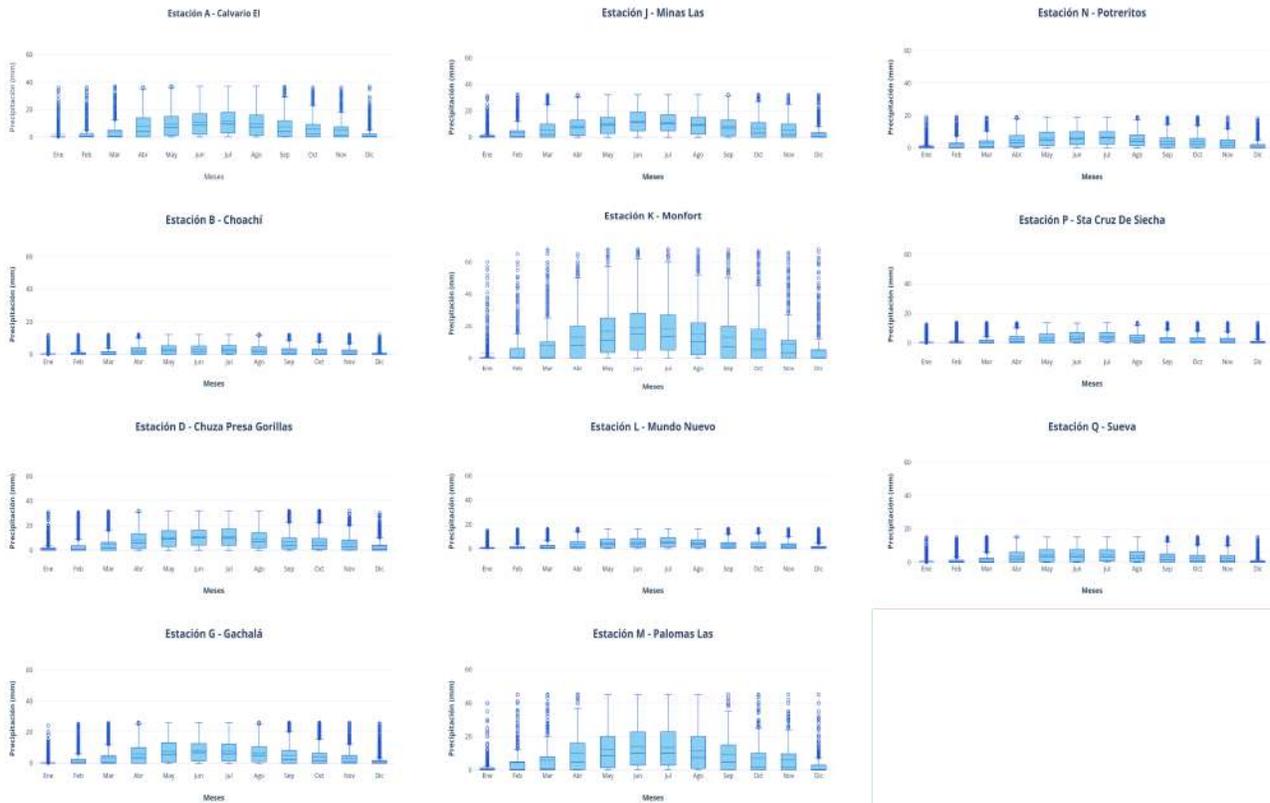


Figura 4. Regimen pluvimétrico monomodal con cúspide entre junio y julio

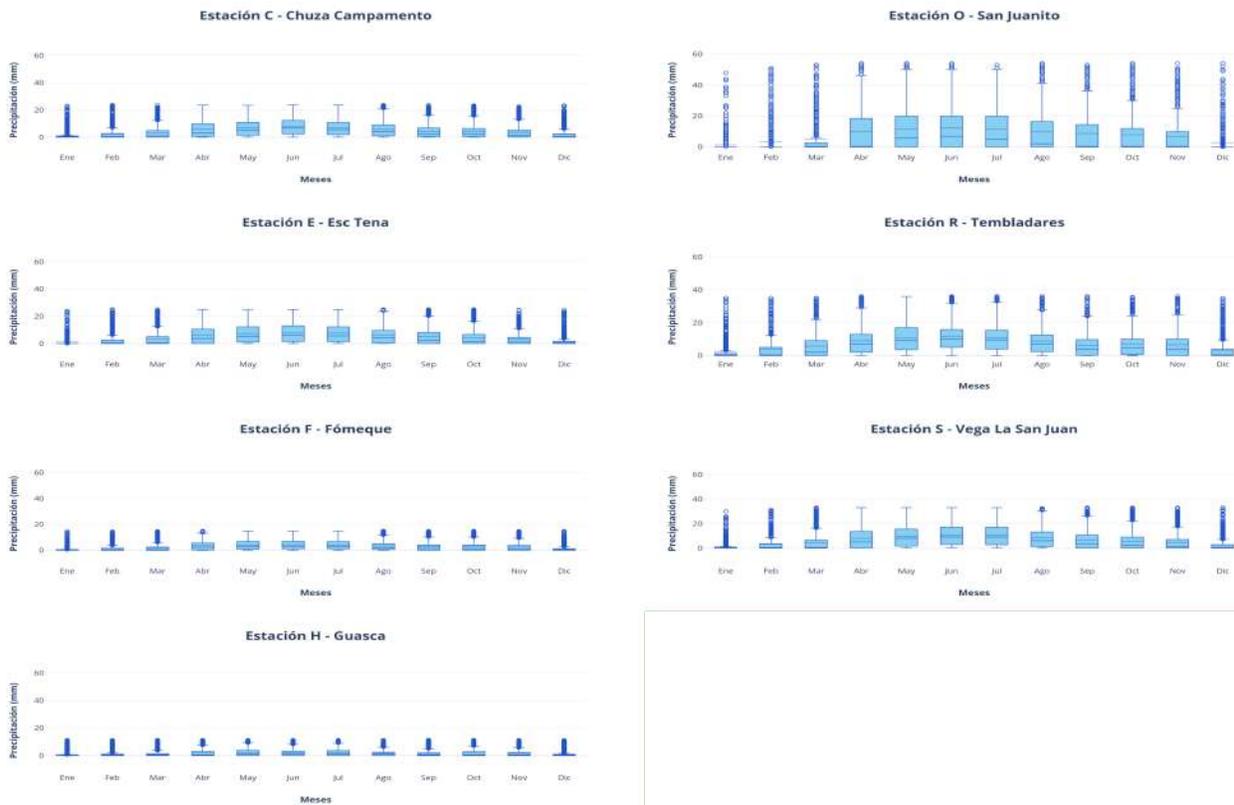


Figura 5. Estaciones meteorológicas traslapadas hacia abril

De la misma manera, como también lo señala Carreño y Ramírez [37], se determinó que las mayores precipitaciones se encuentran concentradas en los meses de mayo, junio, julio y agosto (MJJA), es decir, en el segundo cuatrimestre del año a excepción de las estaciones C, E, F, H, O, R y S, las cuales a pesar de presentar un régimen monomodal se encuentran traslapadas al mes de abril, cuya máxima diferencia no supera los 2mm de precipitación diaria multianual respecto al mes de agosto (Figura 6).



Figura 6. Régimen pluvimétrico monomodal con cúspide en mayo

Cabe mencionar que, en el total de las estaciones, la media y la mediana no tienen valores iguales. En ese sentido, presentan una distribución asimétrica ya sea sesgada a la derecha o a la izquierda, lo que significa que, aunque las mayores precipitaciones se observan en el segundo cuatrimestre, en la mayoría de los otros meses se registran valores cercanos a los promedios observados de lluvia.

D. Representación espacio-temporal del comportamiento de la precipitación

Se escogió el método de interpolación CoKriging porque representó mejor la variable meteorológica con la altura [41, 44], parámetro importante debido a que el comportamiento pluviométrico en el PNN Chingaza está relacionado a las condiciones geográficas, elevaciones y topografía [35]. La representación espacio-temporal del promedio total multianual reveló que enero y febrero son los meses menos lluviosos del año con registros desde 18 mm, a diferencia de junio y julio, en los que se observaron las mayores precipitaciones que alcanzan los 564 mm en la zona sudeste del PNN Chingaza (Figura 7). Así lo indica Parques Nacionales de Colombia [36].

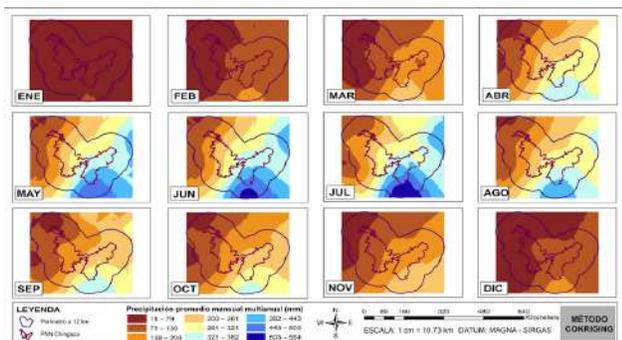


Figura 7. Representación espacio-temporal del promedio total multianual

En atención a que las mayores precipitaciones se mostraron en los meses de mayo, junio, julio y agosto, se realizó una agrupación cuatrimestral como se observa en la Figura 8. La representación espacio-temporal del promedio cuatrimestral multianual resaltó la concentración de lluvias en el segundo cuatrimestre del año (MJJA) y en la misma zona geográfica, representado el 51% de la precipitación promedio anual, mientras que el primer (EFMA) y tercer cuatrimestre (SOND) representan el 22% y 27% respectivamente, acercándose a lo reportado por Carreño y Ramírez [37].

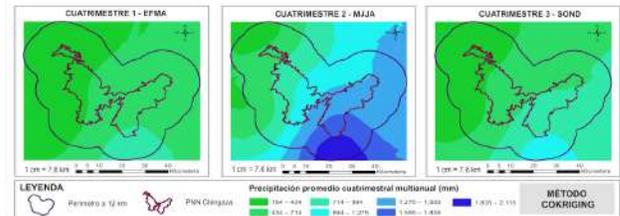


Figura 8. Representación espacio-temporal del promedio cuatrimestral multianual

En ese sentido, con el promedio anual multianual (Figura 9) se corrobora que las precipitaciones más bajas anuales promedio se presentaron en el noroeste de la zona de estudio con valores desde 575 mm hasta 1300 mm en elevaciones que oscilan entre 1900 y 3100 m.s.n.m., cuyas precipitaciones van aumentando su intensidad hacia el sudeste, donde reportan lluvias de 4194 mm en elevaciones que varían entre 480 y 1800 m.s.n.m., asemejándose a lo descrito por Carreño y Ramírez [37]. Al oeste dentro del PNN Chingaza, donde se encuentra la mayor parte del ecosistema páramo, la laguna y la represa de Chingaza, oscilan en sus precipitaciones anuales promedio entre 1300 mm y 2746 mm; mientras que, en el este dentro del parque, donde se ubica la Serranía Farallones de Medina, se obtuvieron lluvias que alcanzaban los 3470 mm, solo siendo superada por una pequeña parte en el sur dentro del área protegida que supera una precipitación promedio anual de 4100 mm.

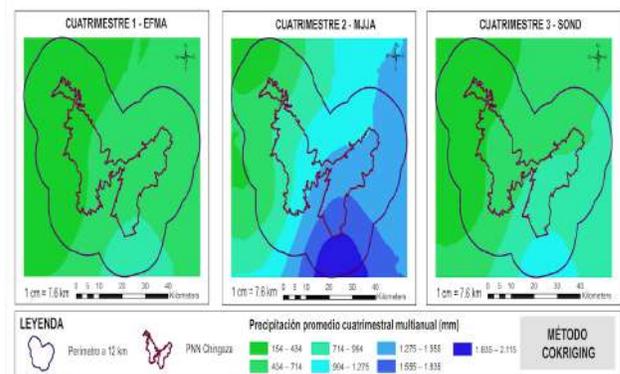


Figura 9. Representación espacio-temporal del promedio anual multianual

E. Análisis de índices de extremos climáticos y procesamiento espacio-temporal

En cuanto a las tendencias de los índices extremos climáticos respectivos a cada estación meteorológica se presentan por década en la Tabla IV, donde el signo positivo expresa la tendencia de incremento del índice, el signo negativo corresponde a la tendencia de disminución y con uno o dos asteriscos se especifica el nivel de significancia estadística del valor de la tendencia. Es preciso señalar que, a diferencia de todas las estaciones, la estación M no presentó precipitaciones anuales totales que superaran el percentil 99; caso similar ocurrió en el índice R20, debido a que hubo 7 estaciones en las cuales sus valores máximos no alcanzaban una precipitación de 20mm.

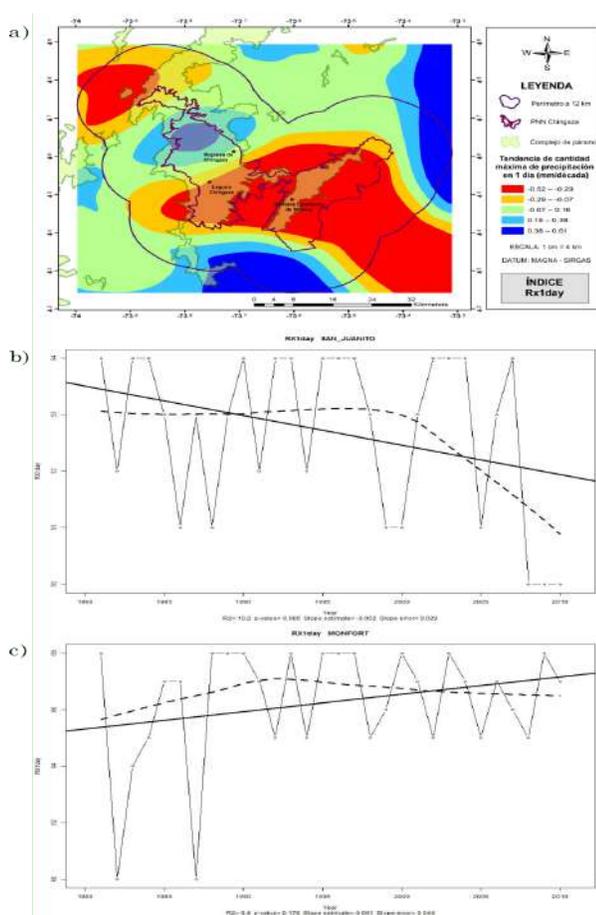


Figura 10. (a) Tendencia espacio-temporal, máximo valor de tendencia negativa (b) y positiva (c) del índice Rx1day

A continuación, se describen en detalle los índices de extremos climáticos junto a su distribución espacial. Asimismo, se presentan ejemplos gráficos del mayor valor de la tendencia positiva que se refiere a un aumento de la denominación del índice como el de la tendencia negativa que indica una disminución, donde las unidades de precipitación se denotan en mm. Cabe mencionar que la representación espacio-temporal se encuentra en función de la Tabla IV y los gráficos en función de la tendencia.

1) Cantidad máxima de precipitación en un día (Rx1day)

El 63% de las estaciones presentó una tendencia positiva, expresando su valor máximo en la estación K con 0.61 mm/década, como se puede observar en el comportamiento del sur del PNN Chingaza y en la zona noroeste dentro del parque, que podría afectar la estabilización física en áreas de mayor altura y/o el desprendimiento de tierras [33]. El 37% restante, manifestó una tendencia negativa cuyo valor máximo es de -0.52 mm/década en la estación O, comprendiendo el este y el sudoeste hasta la laguna de Chingaza dentro del área protegida (Figura 10).

2) Cantidad máxima de precipitación en cinco días consecutivos (Rx5day)

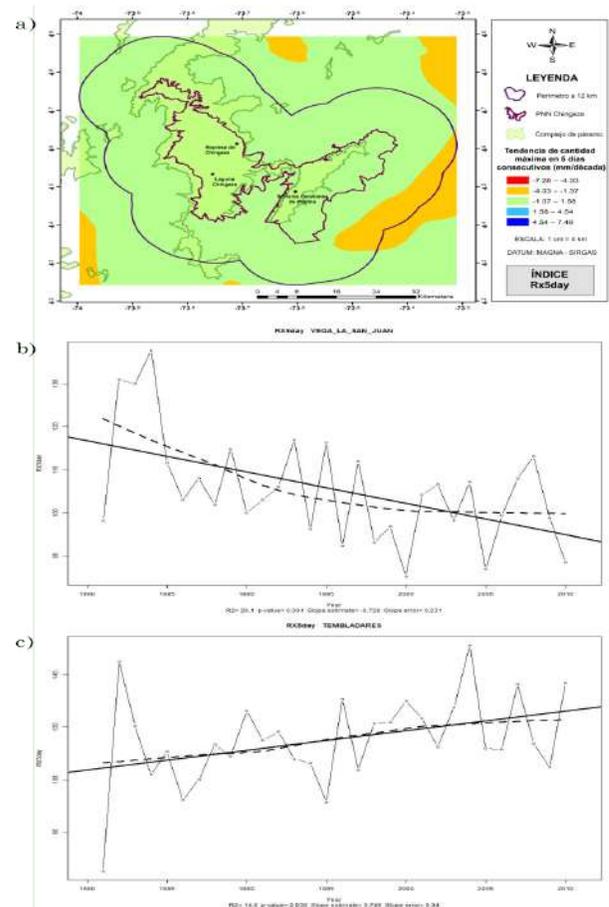


Figura 11. (a) Tendencia espacio-temporal, máximo valor de tendencia negativa (b) y positiva (c) del índice Rx5day

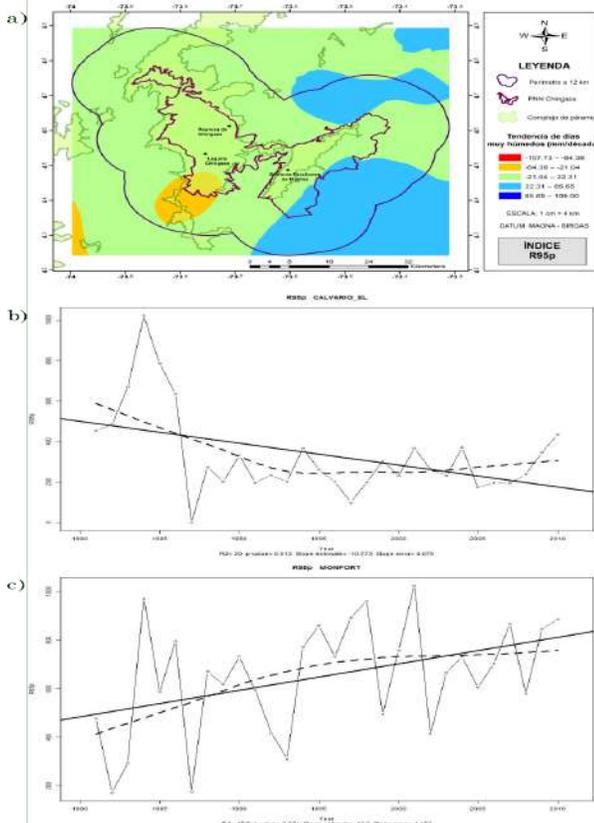
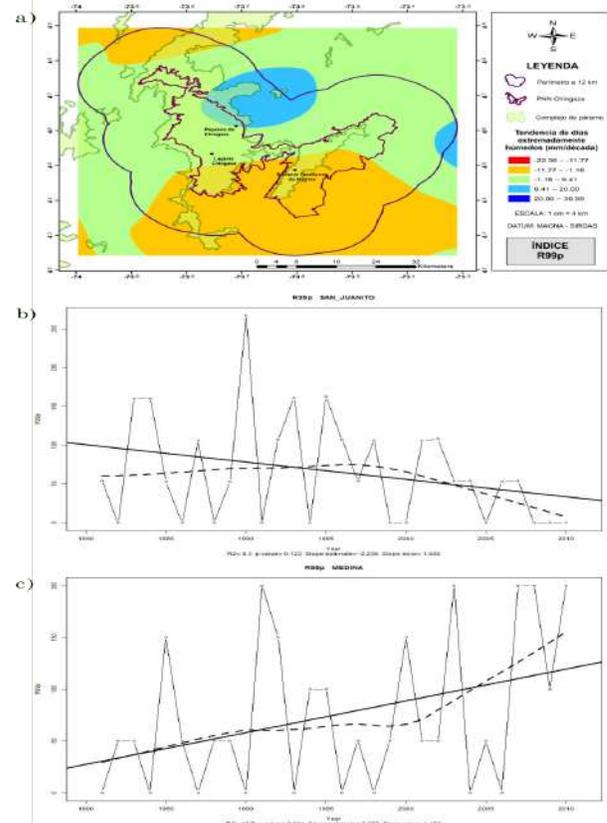
Contrario al índice Rx1day, el 63% de las estaciones reveló una reducción en la cantidad máxima de lluvia durante 5 días seguidos, incluso de -7.28 mm/década en la estación S, coincidiendo con lo señalado por IDEAM et al [58] en la zona oriental. Asimismo, presentó un incremento en el 37% restante con valores que alcanzan los 7.49 mm/década en la estación R. Sin embargo, a razón de que la mayoría de estaciones presentaron valores agrupados en la tercera clase (-1.37 - 1.58 mm/década), se reconoció dicho comportamiento en la totalidad del área protegida (Figura 11).

Tabla 4. Tendencia decadal y nivel de significancia estadística de los índices extremos climáticos

Nom	Índice extremo (Unidad por década)									
	Rx1day (mm)	Rx5day (mm)	R95p (mm)	R99p (mm)	PRCPTOT (mm)	SDII (mm)	R10 (días)	R20 (días)	CDD (días)	CWD (días)
A	(+34	(-4.70**	(-107.73*	(-16.4	(-318.41*	(-1.65*	(-19.2*	(-10.0*	(-0.4	(-12.3*
B	(+0.07	(-0.50	(+10.12**	(+4.29	(-15.59	(+0.05	(-0.7	(+1.0	(+2.5**	
C	(+0.28**	(+4.55*	(+33.59*	(+25.33*	(+109.27*	(+0.35*	(+5.2*	(+1.4*	(+0.1	(+2.0
D	(-2.21**	(-0.61	(-25.83**	(-7.92	(+45.44	(+0.05	(+3.5	(-0.5	(+0.7	(+3.0**
E	(+0.05	(-1.81	(+8.51	(+22.33*	(-10.06	(+0.01	(-1.6	(-0.8	(+0.5	(-2.2
F	(-0.13	(-0.44	(-13.74	(+4.50	(-49.94	(-0.66*	(-7.9*		(-2.8	(+3.2
G	(+0.07	(-1.13	(+14.26	(+10.27**	(-13.88	(+0.07	(-2.3	(+0.2	(-1.1	(-1.9
H	(-0.11	(+0.19	(+5.62	(-5.44*	(+26.54**	(+0.06	(+0.4		(+4.1**	(-0.02
I	(+0.32	(-5.32**	(-31.8	(+30.59*	(+14.19	(-3.10*	(+1.6	(-1.9	(-5.3	(+4.2*
J	(-0.08**	(-6.44*	(+51.19**	(-15.83**	(-278.11*	(+0.12	(-17.3*	(-0.9	(+3.6**	(-20.3*
K	(+0.61**	(+1.22	(+109.00*	(+9.96	(+101.94	(+1.47**	(+5.5	(+6.8**	(+2.4**	(-14.9*
L	(+0.06	(-1.18	(+11.19**	(+3.06	(+0.77	(+0.05	(+0.6		(+2.9**	(-1.6
M	(+0.05	(+5.55**	(+80.72*		(+79.34	(-1.02*	(-4.8**	(+3.8**	(-2.5**	(+8.6*
N	(-0.12**	(-0.49	(-9.11	(-7.09	(-49.32**	(-0.15**	(-1.8		(+2.7**	(+5.9*
O	(-0.52**	(+5.62**	(+66.98*	(-22.36**	(-27.67	(+1.70*	(-1.3	(+3.9	(+5.9**	(-0.9**
P	(-0.35**	(-2.43**	(+2.74	(-0.28	(-2.68	(-0.4*	(-1.7		(+5.2*	(+3.5
Q	(+0.02	(+2.04**	(-2.14	(-1.02	(+72.48*	(-0.14	(+0.3		(+0.3	(+5.4*
R	(+0.12	(+7.49*	(+58.69**	(+24.69*	(+106.32	(+0.68*	(+3.7	(+4.2**	(+3.8**	(+5.2**
S	(+0.01	(-7.28*	(-24.77**	(-3.17	(-59.96	(-0.61*	(-6.4*	(-2.7**	(-1.2	(+1.8

*Nivel de significancia estadística menor o igual a 0.05

**Nivel de significancia estadística menor o igual a 0.02


Figura 12. (a) Tendencia espacio-temporal, máximo valor de tendencia negativa (b) y positiva (c) del índice R95p

Figura 13. (a) Tendencia espacio-temporal, máximo valor de tendencia negativa (b) y positiva (c) del índice R99p

3) Días muy húmedos (R95p)

El 63% de las estaciones mostró un ascenso en la precipitación anual total, donde la cantidad diaria de lluvia es mayor al percentil 95 con un valor de hasta 109 mm/década en la estación K al sudeste del PNN Chingaza como también en el nordeste; allí se encuentran agrupadas estaciones entre los 1000 y 2000 m.s.n.m. Esto, junto al aumento de temperaturas y actividades antrópicas, podría causar la degradación acelerada de los suelos [16]. Por otro lado, el 37% restante reveló un descenso que alcanza los -107.73 mm/década correspondiente a la estación A (Figura 12).

4) Días extremadamente húmedos (R99p)

La mitad de las estaciones manifestó una tendencia de aumento en la precipitación anual total, donde la cantidad diaria de lluvia es mayor al percentil 99. La otra mitad presentó una tendencia a la disminución como se identifica en el comportamiento de la zona sur dentro del área protegida, oscilando entre -22.36 y 30.59 mm/década. En ese sentido, el comportamiento de la zona mencionada podría afectar el enriquecimiento de las turberas para que posteriormente realicen la captación de CO₂ y el mejoramiento de la calidad del aire [3] (Figura 13).

5) Precipitación total anual en los días húmedos (PRCP-TOT)

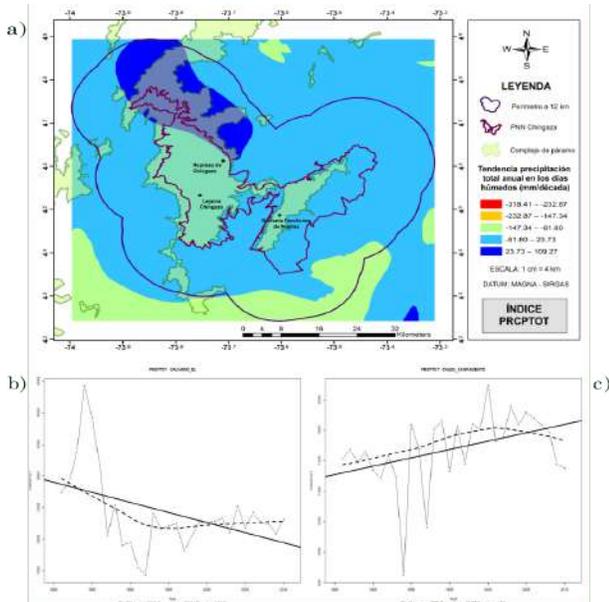


Figura 14. (a) Tendencia espacio-temporal, máximo valor de tendencia negativa (b) y positiva (c) del índice PRCP-TOT

El 53% de las estaciones mostró una tendencia al descenso de la precipitación total anual en los días húmedos, con un valor máximo de -318.41 mm/década en la estación A y el 47% con una tendencia de ascenso de hasta 109.27 mm/década correspondiente a la estación C. Dado que la mayoría de las estaciones se agrupan

en la clase cuatro (-61.80 - 23.73 mm/década), el PNN Chingaza varía entre tendencia positiva y negativa, a excepción de la zona norte, donde se encuentran alturas entre 2750 y 3100 m.s.n.m. Aquí se evidencia la tendencia de los mayores aumentos en la precipitación total anual (Figura 14). Dicha tendencia negativa reafirma lo mencionado en el informe técnico [58].

En el área de estudio se espera que para el año 2030 algunas zonas (estaciones C, D, H, I, K, L, M, Q y R) aumenten la precipitación promedio anual en el orden del 7% y otras zonas (A, B, E, F, G, J, N, O, P y S) disminuyan en el orden del 8% respecto al periodo actual de estudio. Del mismo modo, para el año 2040 se estima una disminución del orden del 12%, aproximándose a lo reportado en los escenarios por IDEAM et al [38] y un incremento del 10% de la precipitación promedio anual en las mismas zonas mencionadas.

6) Índice simple de intensidad diaria (SDII)

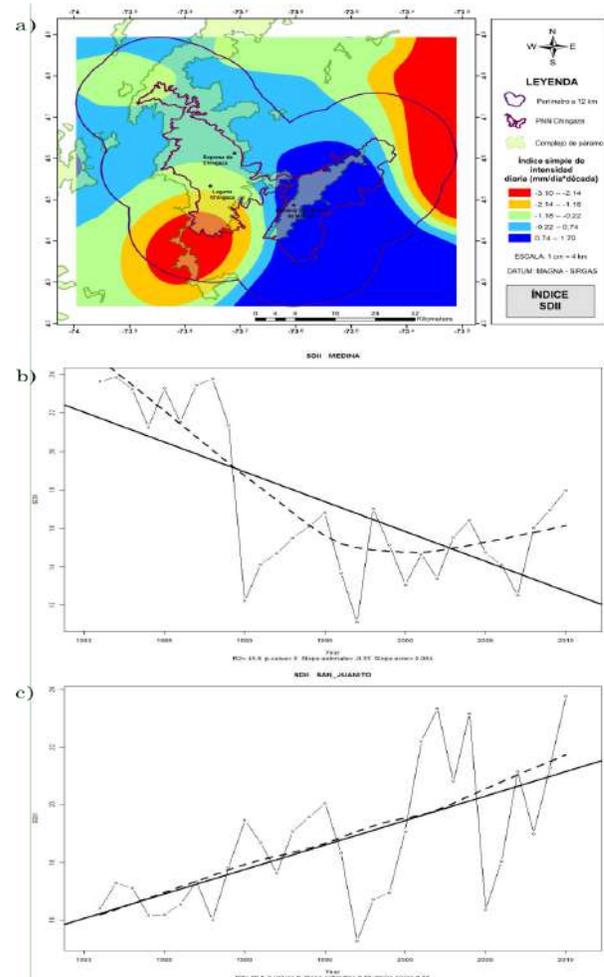


Figura 15. (a) Tendencia espacio-temporal, máximo valor de tendencia negativa (b) y positiva (c) del índice SDII

En el 58% de las estaciones se identificó un incremento en la intensidad de lluvia diaria presentando hasta 1.70 mm/década, correspondiente a la estación O y al com-

portamiento de la zona este dentro del PNN Chingaza, lo cual podría alterar el servicio ecosistémico de soporte del páramo [33]. Por otra parte, el 42% restante reveló una disminución de incluso -3.10 mm/década identificada en la zona sudoeste dentro del área protegida (Figura 15).

7) Número de días con precipitación intensa (R10mm)

El 58% de las estaciones expresó una disminución en el número de días donde la precipitación es mayor o igual a 10 mm, reafirmando la tendencia negativa reportada por IDEAM et al [58], cuya cantidad máxima es de 19 días/década observada en la estación A dentro del comportamiento al sudoeste del PNN Chingaza. Por el contrario, el 42% manifestó un aumento de incluso 5 días/década como se identificó en la estación K en el noroeste dentro del área protegida donde se encuentra la represa de Chingaza (Figura 16). Así pues, en lo restante del parque donde se ubican la laguna Chingaza y la Serranía Farallones de Medina, la tendencia varía entre positiva y negativa.

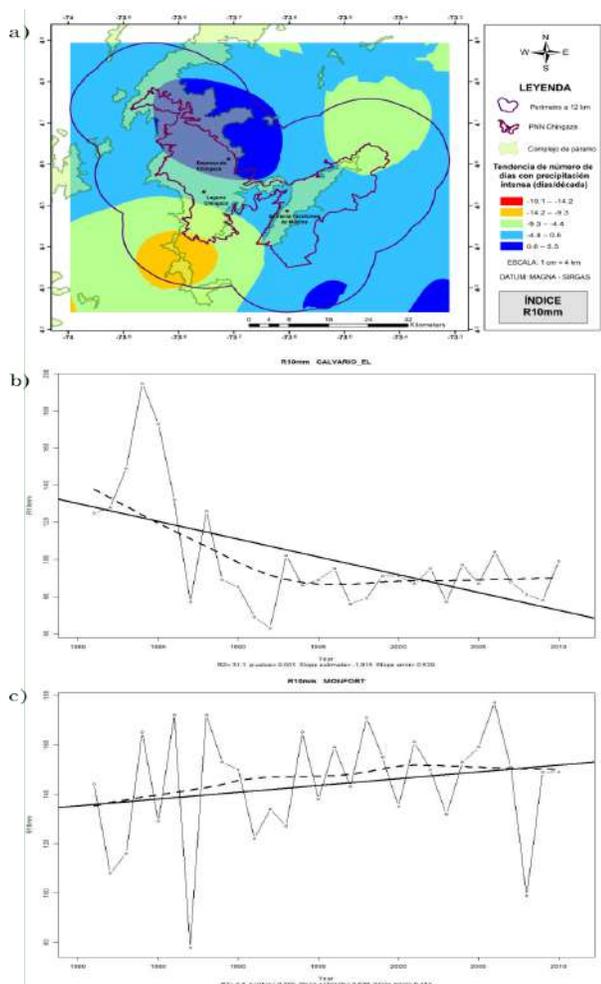


Figura 16. (a) Tendencia espacio-temporal, máximo valor de tendencia negativa (b) y positiva (c) del índice R10mm

8) Número de días con precipitación muy intensa (R20mm)

Teniendo en cuenta que 7 estaciones no cuentan con valores de precipitación que alcancen los 20 mm en un día, la mitad de las estaciones presentó una tendencia negativa y la otra mitad una tendencia positiva, oscilando entre -10 y 7 días/década, valores extremos observados en la estación A en el sudoeste y noreste del PNN Chingaza y la estación K en el sudeste, respectivamente. En ese sentido, el comportamiento en el sudoeste y noreste del parque podría implicar una alteración en el servicio ecosistémico de regulación hídrica [33] (Figura 17).

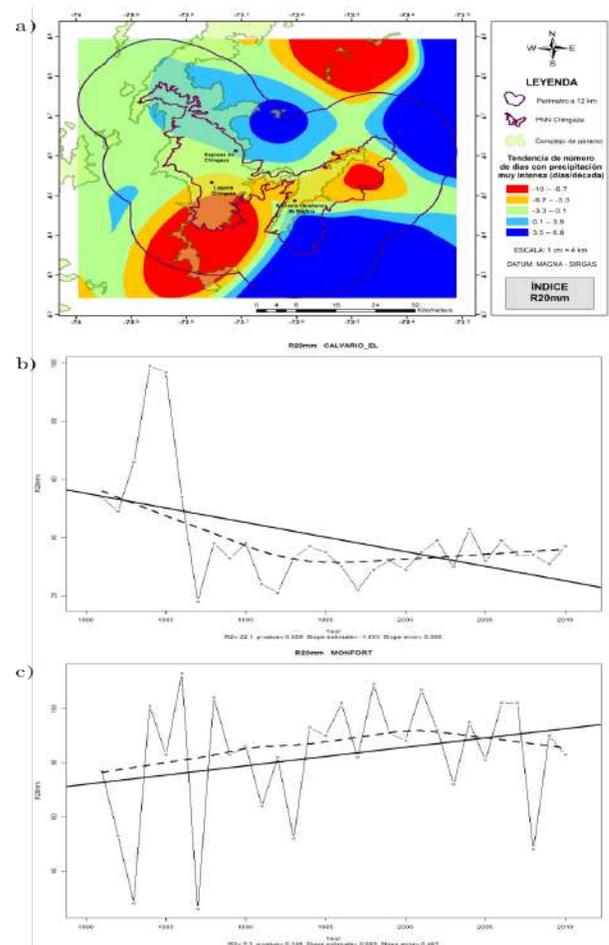


Figura 17. (a) Tendencia espacio-temporal, máximo valor de tendencia negativa (b) y positiva (c) del índice R20mm

9) Días secos consecutivos (CDD)

El 68% de las estaciones manifestó un incremento de hasta 6 días/década en la cantidad máxima de días consecutivos con precipitación menor a 1 mm. Así lo indica el informe técnico [58] que comprende el comportamiento de la totalidad de la zona este dentro del PNN Chingaza, y tal resultado podría implicar una reducción en el suministro de agua [21, 22]. En comparación, el 32% restante presentó un decrecimiento que alcanza los 5 días/década (Figura 18).

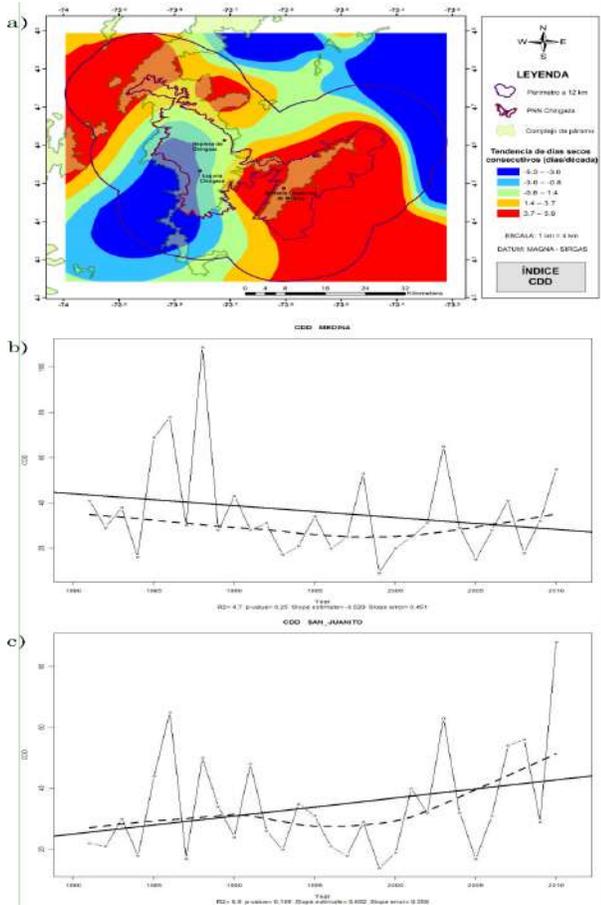


Figura 18. (a) Tendencia espacio-temporal, máximo valor de tendencia negativa (b) y positiva (c) del índice CDD

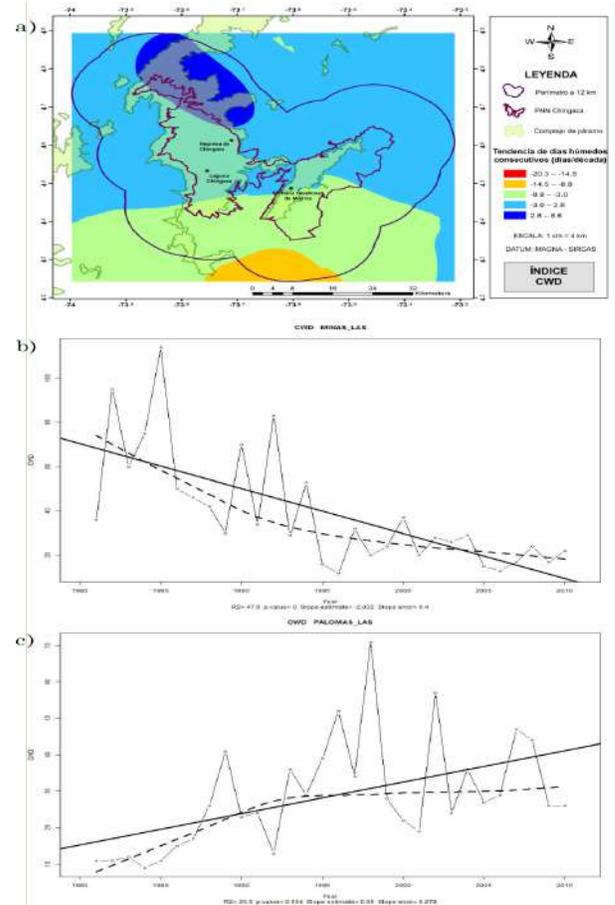


Figura 19. (a) Tendencia espacio-temporal, máximo valor de tendencia negativa (b) y positiva (c) del índice CWD

10) Días húmedos consecutivos (CWD)

El 53% de las estaciones mostró un aumento de hasta 9 días/década en la cantidad máxima de días consecutivos con precipitación mayor a 1mm en el comportamiento de la zona noroeste del PNN Chingaza, y el 47% restante reveló una disminución incluso de 20 días/década hacia el sur del área protegida (Figura 19).

IV. Conclusiones

En el PNN Chingaza se sigue presentando un régimen pluviométrico monomodal con mayores precipitaciones en el segundo cuatrimestre del año, revelando una precipitación promedio anual en la zona de estudio con valores desde 575 mm en el noroeste con alturas incluso de 3100 m.s.n.m. De igual forma, lluvias que van aumentando hasta 4194 mm en el sudeste donde se encuentran alturas inferiores.

Teniendo en cuenta que el comportamiento pluviométrico del parque está fuertemente relacionado a las condiciones geográficas, alturas y topografía, la mejor representación espacio-temporal se obtuvo con el método de interpolación CoKriging, puesto que permitió utilizar la elevación como covariable.

En cuanto a los índices extremos de precipitación no se agruparon en una tendencia positiva o negativa en el periodo de 1981-2010. La tendencia de aumento se presentó en la cantidad máxima de precipitación en un día (Rx1day) en el noroeste dentro del PNN Chingaza; en los días muy húmedos (R95p) hacia el sudeste del parque; en la intensidad de lluvia en un día (SDII) en la zona este, al igual que el máximo de días secos consecutivos (CDD), cuya tendencia fue más fuerte que el máximo de días húmedos consecutivos (CWD). Mientras que, por otra parte, se manifestó una tendencia de disminución en la cantidad máxima de precipitación en cinco días consecutivos (Rx5day), cantidad de días con precipitación de 10 mm (R10) en la zona noroeste dentro del área protegida y en la precipitación anual total en los días húmedos (PRCPTOT), de la cual se estimó un decrecimiento del orden del 12% para el año 2040. Sin embargo, en otras zonas específicas, hay una tendencia de crecimiento.

En ese sentido, los resultados presentados pueden ser aprovechados para los tomadores de decisiones y establecer umbrales iniciales de extremos de precipitación para medidas preventivas por la disminución del suministro de agua y/o medidas para la adaptación basada

en ecosistemas (AbE) y mitigación frente al cambio climático en ecosistemas de alta montaña, en particular el PNN Chingaza.

V. Trabajos futuros

Se sugiere completar el análisis del ETCCDI teniendo en cuenta los índices extremos climáticos que se relacionan con la variable meteorológica de temperatura en otros ecosistemas de alta montaña.

Se podría complementar con un análisis de curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) para determinar la ocurrencia de precipitaciones intensas y periodos de sequía.

VI. Agradecimientos

Los autores agradecen al equipo de consultoría estadística de la Universidad Nacional de Colombia a cargo del D. Sc. Jimmy Antonio Corzo, al IDEAM y al Ing. Fabio Rubiano de la EAAB por habernos proporcionado la información meteorológica relacionada.

Referencias

- [1] C. Castaño, L. Franco, and C. Rey, "Colombia," in *Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos*. Quito, Ecuador: Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia, 2003, pp. 39–86.
- [2] IDEAM, INVEMAR, SINCHI, IIAP, and IAvH, "Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales 2015. Documento Síntesis," in *IDEAM*. Bogotá D. C., Colombia: IDEAM, 2016.
- [3] M. Morales, J. Otero, T. Van Der Hammen, A. Torres, C. E. Cadena, C. A. Pedraza, N. Rodríguez, C. A. Franco, J. C. Betancourth, E. Olaya, E. Posada, and L. Cárdenas, *Atlas de páramo de Colombia*. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2007.
- [4] A. Grêt-Regamey, S. Brunner, and F. Kienast, "Mountain ecosystem services: Who cares?" *Mount. Res. Develop.*, vol. 32, no. S1, pp. 23-34, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-10-00115.S1>.
- [5] M. B. Bush, "Distributional change and conservation on the andean flank: a palaeoecological perspective." *Glo. Eco. Biogeo.*, vol. 11, no. 6, pp. 463-473, 2002. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2002.00305.x>.
- [6] T. Van der Hammen, J. D. Pabón, H. Gutiérrez, and J. C. Alarcón, "El Cambio Global y los Ecosistemas de Alta Montaña en Colombia," in *Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor*. Bogotá D. C., Colombia: IDEAM, 2002, pp. 163–209.
- [7] C. Castaño, "Colombia Alto Andina y la Significancia Ambiental del Bioma Páramo en el contexto de los Andes Tropicales: una aproximación a los efectos de un tensor adicional por el Cambio Climático Global (Global Climatic Tensor)," in *Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor*. Bogotá D. C., Colombia: IDEAM, 2002, pp. 27–51.
- [8] J. R. Malcolm, C. Liu, R. P. Neilson, L. Hansen, and L. Hannah, "Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots." *Conserva. Bio.*, vol. 20, no. 2, pp. 538-548, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00364.x>.
- [9] H. O. Benavides and G. E. León, *Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático*. Bogotá D. C., Colombia: IDEAM, 2007.
- [10] B. E. Young, K. R. Young, and C. Josse, "Vulnerability of Tropical Andes ecosystems to Climate Change," in *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*, S. K. Herzog, R. Martinez, P. M. Jorgensen y H. Tiessen, Eds. Paris, France: MacArthur Foundation, InterAmerican Institute for Global Change Research, Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 2011, pp. 195–208.
- [11] F. Flores-López, S. E. Galaitsi, M. Escobar, and D. Purkey, "Modeling of andean páramo ecosystems hydrological response to environmental change." *Water*, vol. 8, no. 3, p. 94, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w8030094>.
- [12] J. Samper-Villareal, A. Vincent, C. Álvarez, and G. A. Gutiérrez, "I simposio sobre cambio climático y biodiversidad: hacia el fortalecimiento de la resiliencia y acciones requeridas ante el cambio climático en latinoamérica." *Cuad. Inve. UNED*, vol. 11, no. 1, pp. 7-17, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22458/urj.v11i1.2315>.
- [13] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS, *Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos-PNGIBSE*. Bogotá D. C., Colombia: Instituto Alexander von Humboldt, 2012.
- [14] T. Kohler and D. Maselli, *Mountains and Climate Change-From Understanding to Action*. Bern: Geographica Bernensia, the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC), and an international team of contributors, 2009.
- [15] R. Hofstede, "Los páramos en el mundo: su diversidad y sus habitantes," in *Los páramos del mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos*.

- Quito, Ecuador: Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia, 2003.
- [16] O. Vargas Ríos, “Disturbios en los páramos andinos,” in *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos*. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2013, pp. 39–57.
- [17] N. Rodríguez-Eraza, J. D. Pabón-Caicedo, N. R. Bernal-Suárez, and J. Martínez-Collantes, *Cambio Climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos*. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2010.
- [18] A. Jarvis, J. L. Touval, M. Castro, L. Sotomayor, and G. Graham, “Assessment of threats to ecosystems in south america.” *Jour. Nat. Conserv.*, vol. 18, no. 3, pp. 180-188, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2009.08.003>.
- [19] IDEAM, “Aspectos del cambio climático y adaptación en el ordenamiento territorial de alta montaña,” in *Guía metodológica, Caso piloto, Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático -INAP- componente B*. Bogotá D. C., Colombia: IDEAM, Conservación Internacional, 2011.
- [20] O. A. León, D. I. Jiménez, and C. Marín, “Marco conceptual para la identificación de la zona de transición entre bosque altoandino y páramo,” in *Transición bosque-páramo. Bases conceptuales y métodos para su identificación en los Andes colombianos*, C. E. Sarmiento Pinzón y O. A. León Moya, Eds. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2015, pp. 13–63.
- [21] E. P. Anderson, J. Marengo, R. Villalba, S. Halloy, B. Young, D. Cordero, F. Gast, E. Jaimes, and D. Ruiz, “Consequences of Climate Change for Ecosystems and Ecosystem Services in the Tropical Andes,” in *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. Paris, France: MacArthur Foundation, InterAmerican Institute for Global Change Research, Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 2011, pp. 1–18.
- [22] W. Buytaert, F. Cuesta-Camacho, and C. Tobón, “Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions.” *Glob. Eco. Biogeo.*, vol. 20, no. 1, pp. 19-33, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>.
- [23] L. Franco, J. Delgado, and G. Andrade, “Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático global.” *Cuad. geo. rev. colomb. geo.*, vol. 22, no. 2, pp. 69-86, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v22n2.37018>.
- [24] IPCC, Climate Change and Biodiversity. *IPCC Technical Paper V*, H. Gitay, A. Suárez, R. T. Watson y D. J. Dokken, Eds. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2002.
- [25] M. Álvarez Hernández, “Modelos de Nicho Ecológico: Una Herramienta para Evaluar el Efecto del Cambio Climático en Ecosistemas Altoandinos,” in *Ecología y Cambio Climático en Ecosistemas de Alta Montaña en Colombia*, J. H. Solorza-Bejarano, Ed. Bogotá D. C., Colombia: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, 2018, pp. 57–61.
- [26] A. M. Cleef, “Origen, evolución, estructura y diversidad biológica de la alta montaña colombiana,” in *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos*. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2013, pp. 3–21.
- [27] R. Hofstede, J. Calles, V. López, R. Polanco, F. Torres, J. Ulloa, A. Vásquez, and M. Cerra, *Los páramos andinos ¿qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. Quito, Ecuador: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales -UICN-, 2014.
- [28] D. Serrano and R. Galárraga, “El páramo andino: características territoriales y estado ambiental. aportes interdisciplinarios para su conocimiento.” *Estudios Geográficos*, vol. 76, no. 278, pp. 369-393, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201513>.
- [29] J. O. Rangel-Ch, “La biodiversidad de Colombia: significado y distribución regional.” *Rev. Acad. Colomb. Cien. Exact., Fís. Nat.*, vol. 39, no. 151, pp. 176-200, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefy.136>.
- [30] C. Sarmiento, A. Osejo, P. Ungar, and J. Zapata, “Páramos habitados: desafíos para la gobernanza ambiental de la alta montaña en Colombia.” *Biodiv. práct.*, vol. 2, no. 1, pp. 122-145, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/2ABgmel>.
- [31] Parques Nacionales Naturales de Colombia, *Parques Nacionales Naturales de Colombia*, B. Villegas, Ed. Bogotá D. C., Colombia: Villegas Editores, 2018.
- [32] W. Buytaert, R. Céleri, B. D. Bièvre, F. Cisneros, G. Wyseure, J. Deckers, and R. Hofstede, “Human impact on the hydrology of

- the andean páramos.” *Ear.-Sci. Rev.*, vol. 79, no. 1-2, pp. 53-72, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.earscrev.2006.06.002>.
- [33] Parques Nacionales Naturales de Colombia, *Reformulación Participativa del Plan de Manejo Parque Nacional Natural Chingaza*. Bogotá D. C., Colombia: Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2016.
- [34] M. F. Cárdenas and C. Tobón, “Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia.” *Rev. UDCA Actualidad Div. Cientí.*, vol. 20, no. 2, pp. 403-412, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.381>.
- [35] O. Vargas and P. Pedraza, “Localización y ambiente físico del Parque Nacional Natural Chingaza,” in *El Parque Nacional Natural Chingaza*. Bogotá D. C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, 2003, pp. 24-44.
- [36] Parques Nacionales Naturales de Colombia, *Colombia Parques Naturales*, B. Villegas, Ed. Bogotá D. C., Colombia: Villegas Editores, 2006.
- [37] J. G. Carreño and M. Ramírez, *Contribución al Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Chingaza. Estudio Hidro-Climático*. Tesis de grado. Bogotá D. C., Colombia: Fundación Universitaria Jorge Tadeo Lozano. Facultad de Ingeniería Geográfica, 1979, p. 209.
- [38] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, and CANCELILLA, *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100. Herramientas científicas para la toma de decisiones - Enfoque Nacional - Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá D. C., Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales, 2015.
- [39] Q. Tan and X. Xu, “Comparative analysis of spatial interpolation methods: an experimental study.” *Sens. Transdu.*, vol. 165, no. 2, pp. 155-163, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/2ZhAsog>.
- [40] E. Rojas, B. Arce, A. Peña, F. Boshell, and M. Ayarza, “Cuantificación e interpolación de tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de cundinamarca y boyacá (Colombia).” *Corpoica. Cien. Tecno. Agrope.*, vol. 11, no. 2, pp. 173-182, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/2ZjhmhA>.
- [41] B. Saghafian and S. R. Bondarabadi, “Validity of regional rainfall spatial distribution methods in mountainous areas.” *Jour. Hydro. Engin.*, vol. 13, no. 7, pp. 531-540, 2008. [Online]. Available: <https://bit.ly/2AKGZxJ>.
- [42] D. L. Phillips, J. Dolph, and D. Marks, “A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain.” *Agricu. Fore. Meteo.*, vol. 58, no. 1-2, pp. 119-141, 1992. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90114-J](https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90114-J).
- [43] P. Goovaerts, “Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall.” *Jour. Hydro.*, vol. 228, no. 1-2, pp. 113-129, 2000. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00144-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00144-X).
- [44] R. Giraldo, *Introducción a la geoestadística: Teoría y aplicación*. Bogotá D. C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [45] IPCC, *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, Q. Dahe, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor y P. M. Midgley, Eds. Cambridge University Press, 2012.
- [46] T. R. Karl, N. Nicholls, and A. Ghazi, “CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary,” in *Weather and Climate Extremes*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 3-7. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-94-015-9265-9_2.
- [47] T. C. Peterson, C. Folland, G. Gruza, W. Hogg, A. Mokssit, and N. Plummer, *Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs 1998-2001*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2001.
- [48] X. Zhang and F. Yang, “Rclimdex (1.0) user manual,” *Climate Research Branch Environment Canada*, vol. 22, 2004.
- [49] WMO, *The role of climatological normals in a changing climate*. WMO/TD- No. 1377; WCDMP-No. 61, O. Baddour y H. Kontongomde, Eds. World Meteorological Organization, 2007.
- [50] S. K. Baidya, M. L. Shrestha, and M. M. Sheikh, “Trends in daily climatic extremes of temperature and precipitation in nepal.” *Jour. Hydro. Meteorol.*, vol. 5, no. 1, pp. 38-51, 2008. [Online]. Available: <http://soham.org.np/wp-content/uploads/2008/03/v5-38-51.pdf>.
- [51] I. Keggenhoff, M. Elizbarashvili, A. Amiri-Farahani, and L. King, “Trends in daily temperature and precipitation extremes over georgia, 1971-2010.” *Weath. Clim. Extre.*, vol. 4, pp. 75-85, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.05.001>.
- [52] A. Ávila, F. Justino, A. Wilson, D. Bromwich, and M. Amorim, “Recent precipitation

- trends, flash floods and landslides in southern brazil.” *Environ.l Resea. Lett.*, vol. 11, no. 11, 2016. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/11/114029>.
- [53] M. Rahimi, N. Mohammadian, A. R. Vanashi, and K. Whan, “Trends in indices of extreme temperature and precipitation in iran over the period 1960-2014.” *Op. Jour. Eco.*, vol. 8, no. 7, pp. 396-415, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/oje.2018.87024>.
- [54] M. C. Pinilla and C. Pinzón, “Caracterización de eventos extremos asociados a la precipitación usando RClimdex, en la parte central del Departamento de Santander, Colombia,” in *Camb. Clima.. Extr. Impac.* C. Rodríguez Puebla, A. Ceballos Barbancho, N. González Reviriego, E. Morán Tejada y A. Hernández Encinas, Eds. Madrid, España: Asociación Española de Climatología, 2012, pp. 593-601.
- [55] J. D. Pabón, “Cambio climático en colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo xx y escenarios posibles para el siglo xxi.” *Rev. Acad. Colomb. Cien. Exac., Fís. y Nat.*, vol. 36, no. 139, pp. 261-278, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/2TmwU0m>.
- [56] G. E. Armenta and J. F. Ruiz, *Indicadores de eventos extremos en los escenarios de cambio climático para el periodo 2011-2040*. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2012.
- [57] J. A. Aragón and B. D. Lerma, “Análisis espacio temporal (1981-2010) de la precipitación en la ciudad de bogotá: avances en la generación de índices extremos.” *Rev. Fac. Ing.*, vol. 28, no. 51, pp. 51-71, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n51.2019.9123>.
- [58] IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguvio, Instituto Alexander von Humboldt, MADS, and DNP, *Algunas señales de cambio climático por medio del monitoreo de índices de extremos climáticos stardex para la Región Bogotá - Cundinamarca*. Bogotá D.C., Colombia: IDEAM, PNUD, 2012.
- [59] C. Lora, “El Parque Nacional Natural Chingaza,” in *I Simposio Taller de Investigación para la región de PNN Chingaza*. Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Medio Ambiente, 1999, p. 10.
- [60] WMO, *Guide to Climatological Practices . WMO-No. 100*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2011.
- [61] L. Llanos, *RClimTool: Manual del usuario*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR); Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS), 2014.
- [62] WMO, *Guide to the Global Observing System. WMO-No. 488*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2007.
- [63] S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J. I. López-Moreno, M. A. García-Vera, and P. Stepanek, “A complete daily precipitation database for northeast spain: reconstruction, quality control, and homogeneity.” *Inter. Jour. Clima.*, vol. 30, no. 8, pp. 1146-1163, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/joc.1850>.
- [64] G. T. Ferrari and V. Ozaki, “Missing data imputation of climate datasets: implications to modeling extreme drought events.” *Rev. Bras. Mete.*, vol. 29, no. 1, pp. 21-28, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862014000100003>.
- [65] F. C. Collins and P. V. Bolstad, “Comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation,” in *Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. Santa Fe, New Mexico: National Center for Geographic Information and Analysis, 1996, pp. 122-134.
- [66] WMO, *Guide to Climatological Practices. WMO-No. 100*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2011.
- [67] F. W. Chen and C. W. Liu, “Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (idw) in the middle of taiwan.” *Pad. Wat. Enviro.*, vol. 10, no. 3, pp. 209-222, 2012. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10333-012-0319-1>.
- [68] R. McGill, J. W. Tukey, and W. A. Larsen, “Variations of box plots.” *Amer. Statisti.*, vol. 32, no. 1, pp. 12-16, 1978. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dYAPiS>.
- [69] C. Sievert, T. Hocking, S. Chamberlain, K. Ram, M. Corvellec, and P. Despouy, “Plotly for r.” *Plotly Technologies*, 2018. [Online]. Available: <https://plotly-r.com>.