

Análisis de variables climáticas del páramo la Rusia perteneciente al departamento de Boyacá

Camilo Andres Cruz Sanchez
Departamento de Ciencias Forestales
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Antioquia
cacruzs@unal.edu.co

Natali Andrea Lopez Toro
Area Curricular de Medio Ambiente
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Antioquia
naalopezto@unal.edu.co

Juan David Leon Torres
Departamento de Ciencias Forestales
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Antioquia
judleonto@unal.edu.co

Cristian Camilo Gañan Tapasco
Departamento de Ciencias Forestales
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Antioquia
ccganant@unal.edu.co

Resumen—Los páramos son ecosistemas muy complejos e importantes por el papel que juegan en la regulación y conservación del recurso hídrico por lo cual se hace necesario entender el comportamiento de las variables climáticas que se presenta en ellos, es por esto que se realiza un estudio en el páramo de La Rusia donde se toman datos de precipitación, humedad relativa, temperatura, radiación solar y velocidad del viento para 6 meses del año 2019 a través de una estación climatológica que hace parte de un complejo de estaciones climáticas que ha venido instalando el equipo de trabajo del Dr. Mark Mulligan de Kings College y dos sensores HOBO con los cuales se midieron temperatura y humedad relativa a través del páramo durante cuatro días del mes de abril. Datos con los cuales se hicieron relaciones entre las diferentes variables climáticas por medio del software R los cuales mostraron correlaciones positivas para la humedad relativa y precipitación(0.38) y correlaciones negativas entre la radiación y humedad relativa(-0.81). Para los datos de los sensores se realizó un modelo kriging ordinario de primer orden y transformación logarítmica por medio del software Arcgis, el cual mostró una disminución en la temperatura a medida que se aumentaba la altitud, pero no con una relación lineal sino que era fluctuante.

Index Terms—Páramo; Relaciones climáticas; Temperatura; Velocidad del viento; Precipitación

INTRODUCCIÓN

El páramo es uno de los ecosistemas más importantes para la captura de agua, este se encuentra presente en un 99 % en la Cordillera de los Andes, en la Sierra Nevada de Santa Marta y Costa Rica, pero también existen Páramos en África, Indonesia y Papua Nueva Guinea Cabrera and Ramírez (2014). Es por esto que los páramos ubicados en la Cordillera de los Andes han sido definidos como extensas zonas en la cima de la cordilleras, entre el bosque andino y el límite inferior de las nieves perpetuas Cabrera and Ramírez (2014), haciendo privilegiados a los pocos países

en el mundo que cuentan con este tipo de ecosistema por la riqueza acuífera que ellos representan. Para el caso de Colombia en el que se encuentran el 49 % de los páramos del mundo, ocupando el 1,7 % del territorio nacional con aproximadamente 34 páramos Cabrera and Ramírez (2014), de estos según el ministerio de ambiente, el departamento de Boyacá cuenta con el 18,7 % del total nacional. Conteniendo en 16 municipios de este departamento se encuentra el páramo de La Rusia, en el cual se centrará el presente informe con el fin de conocer y analizar las variables climáticas que allí se presentan.

La altura a la que se puede encontrar un páramo no es igual para todos los casos, pues el límite inferior de estos es variable según la latitud, la vertiente, el clima global y la actividad humana. En América se encuentran entre los 3000 y 4800 *msnm* aproximadamente, para Colombia, en las cordilleras central y occidental está a 3500 *msnm* y en la oriental a 3600 *msnm*. La zonificación típica utilizada en la alta montaña colombiana corresponde a bosque alto andino (3000 a 3200 *msnm*), páramo bajo o subpáramo (entre 3200 y 3500 o 3600 *msnm*), páramo propiamente dicho (entre 3500 o 3600 y 4100 *msnm*) y superpáramo (entre 4100 y 4500 *msnm*) Ortiz et al. (2005). Diferentes autores confirman que el clima en los páramos realmente es muy variado, aunque se presenten condiciones de altura similares y proximidad Vanegas (1998), esta variabilidad se presenta en todas las características climáticas, tales como precipitación, temperatura, radiación, velocidad del viento y humedad relativa, y aunque hay todavía pocas estaciones climáticas en todos los páramos es evidente la variación en los resultados de la medición de estos parámetros climáticos.

Por lo general en la transición de bosque y el subpáramo las temperaturas medias multianuales en algunos caso pueden ser incluso menores a 9°C, aproximadamente por encima de los 3300 *msnm*, en el páramo medio podrían

llegar a ser menores de 6°C y ya en el superpáramo cerca de las nieves perpetuas son inferiores a 3°C Morales-Rivas et al. (2019). En cuanto a la variación de la temperatura media mensual no hay grandes cambios, sin embargo en los páramos la temperatura puede variar a gran escala durante el día y la noche. En la precipitación hay una amplio rango y un gran contraste entre los páramos de Colombia, la precipitación puede variar entre los 700 y 5000 mm al año, algunos de los páramos tienen un régimen de lluvias monomodal como el páramo chingaza Morales-Rivas et al. (2019) y otros bimodal como el complejo Guantiva - La Rusia Morales-Rivas et al. (2019); los páramos secos se encuentran en las vertientes oriental de la cordillera oriental y occidental de la cordillera occidental, en cuanto a los más secos se encuentran entre la cordillera oriental Morales-Rivas et al. (2019). Los ecosistemas de páramo presenta una humedad relativa alta que es variable y estacional siendo máxima en tiempos de lluvia y mínima en tiempos secos, usualmente en un rango que comprende entre un 80 y 90 % esto debido a un factor de suma importancia en los páramos como lo es el fenómeno de niebla Morales-Rivas et al. (2019). Comúnmente la evapotranspiración en los páramos es baja pues casi siempre el ambiente es muy cercano a la saturación y se presenta un alta radiación ultravioleta sobre todo en periodos secos y abundancia de luz difusa Morales-Rivas et al. (2019). Por último los vientos en los páramos son muy variables pero regularmente los más intensos se dan en los páramos que se encuentran en las vertientes de los valles interandinos Morales-Rivas et al. (2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y descripción del área de estudio

El páramo la Rusia se encuentra ubicado en límites de los departamentos de Boyacá y Santander, en el flanco occidental de la cordillera oriental, entre los 3100 y 4280 msnm. Este páramo hace parte de un extenso corredor de páramos y bosques alto andinos denominado como Guantiva - La Rusia, complejo que incluye a los páramos de Cruz Colorada, Guina, Pan de Azúcar, Carnicerías y Guata y que tiene una extensión en área de 119,009 ha (Corpoboyacá y CAS, 2017), en el cual predomina una topografía abrupta que varía de acuerdo con la alternancia de las formaciones geológicas presentes. El páramo está influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y el movimiento de las corrientes de vientos locales e inter tropicales, lo que genera un régimen húmedo. El régimen de lluvias es bimodal, con una precipitación máxima entre abril, mayo, octubre y noviembre (UPTC, 2015)

El sitio de estudio se encuentra dentro del páramo La Rusia en la vereda San alejo, municipio de Duitama Boyacá; contiguo por el norte a los límites con el municipio de Charalá departamento de Santander con coordenadas $5^{\circ}57'48,0''\text{N}$ $73^{\circ}05'16,3''\text{W}$ y una altitud mayor a los 3500 msnm.

Levantamiento de información

Dentro del páramo de La Rusia se instalaron varias estaciones climatológicas cercadas las cuales midieron temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar. Para este artículo sólo se tuvo en cuenta una estación climatológica con datos para 6 meses del año 2019, de enero a junio, tomados cada 15 minutos para todas las variables mencionadas. La estación climática de la cual se obtuvieron los datos hace parte de un complejo de estaciones climáticas que ha venido instalando el equipo de trabajo del Dr. Mark Mulligan de Kings College, como parte de un proyecto para probar y calibrar equipos de monitoreo open source más rentables para los proyectos investigativos.

También se usaron dos sensores HOBO móviles para recolectar información de temperatura y humedad relativa en tiempo real con intervalos de 1 minuto, los cuales fueron puestos en funcionamiento a partir del día jueves 12 de marzo hasta el sábado 14 de marzo de las 8am a las 5pm y para el día domingo entre las 8am y las 3pm, llevando los sensores por parte del complejo de páramos Guantiva-La Rusia a la vez que se iban instalando las estaciones climáticas y se tomaban otros datos como caudal y muestras de suelos con el resto del grupo de trabajo, datos que no se tendrán en cuenta en este informe. Así mismo el uso del software de la misma empresa (HOBO) para dispositivos celulares en el cual se podían verificar los datos en tiempo real.

Procesamiento de los datos recolectados

Los datos climáticos pueden proporcionar una gran cantidad de información sobre el medio ambiente atmosférico que afecta a casi todos los aspectos del esfuerzo humano Balasubramanian (2017), es por ello que es importante el análisis estos, para determinar tendencias en las variables que se puedan interpretar buscando entender el comportamiento y así tomar decisiones que más convengan. Buscando el filtrado y análisis de los datos se utilizó **R versión 3.6.1**. Para los datos de precipitación se usó la suma de los los valores diarios por mes y para los demás (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) los valores promedio. Se graficaron las variables por separado buscando propensiones para la descripción de cada una de ellas, luego se buscaron relaciones estadísticas entre variables con el fin de determinar acaso alguna dependencia entre los datos. Con los datos de temperatura del sensor HOBO se realizó un modelo kriging ordinario de primer orden y transformación logarítmica en el software Arcgis versión 10.5 esto con el fin de observar un comportamiento aproximado de la variable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Fig.1** se puede observar la precipitación mensual discriminada por la cantidad de precipitación de cada día (representados en colores), en esta escala no se percibe todo el ciclo anual pero si la temporada de lluvias entre

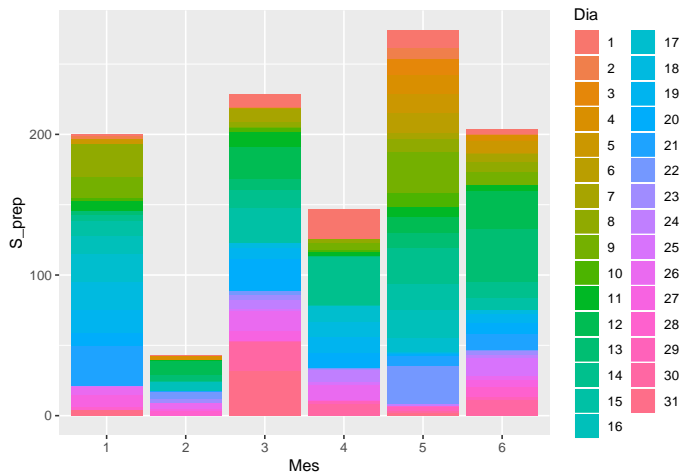


Figura 1. Tendencia Diaria de precipitación

marzo y mayo y parte de una temporada seca a la que se debe la baja precipitación en febrero, lo que responde al régimen bimodal del páramo La Rusia. La precipitación total de estos 6 meses suma $1096,2mm$, una precipitación alta, característica de las laderas orientadas al occidente, pues las laderas internas de los Andes están altamente influenciadas por efectos de sombra de lluvia, para las lluvias que llegan tanto desde la cuenca del Amazonas como de la costa del Pacífico ?.

En la **Fig.2**, se observa la variación de la temperatura alrededor del promedio de los seis meses de $9,2^{\circ}C$ con una temperatura máxima de $19,5^{\circ}C$ y una mínima de $1,6^{\circ}C$, sin embargo la fluctuación de mayor densidad se encuentra entre los $8^{\circ}C$ y $10^{\circ}C$. La variación diurna de la temperatura resulta del ciclo de insolación superficial ?, la cual es mayor entre las 11:00 a.m. y la 1:00 p.m. Debido a su localización cercana a la línea ecuatorial, la radiación solar diaria es casi constante todo el año. Esta constancia resulta en una baja variabilidad estacional en temperatura media del aire, en contraste con el ciclo diario, el cual es totalmente marcado ?; en la **Fig.3** se muestra distribución de la temperatura a lo largo del periodo de medición, es notable una **normal**, de esto es fácil deducir que los valores tienden a un valor medio, es decir, que generalmente los valores de temperatura estarán en el rango de $9a10^{\circ}$, hay ocasiones como en el mes 1 en donde la variable tiende a un valor más bajo de temperatura.

En la **Fig.4** se presenta la distribución de la humedad relativa, esta es parecida a una **Fisher** sin embargo no tiene relación con el caso pues no se está comparando poblaciones, más bien parece haber la tendencia a que en el páramo haya una alta humedad relativa centrada en valores $> 90\%$ lo cual es relacionable con la variable anterior pues a mayor temperatura del aire hay mayor capacidad en retener humedad Jaramillo Robledo (2005), se puede inferir entonces que la temperatura del páramo es fría solo con mirar su humedad relativa, este comportamiento está presente en los datos pues hay un valor bajo

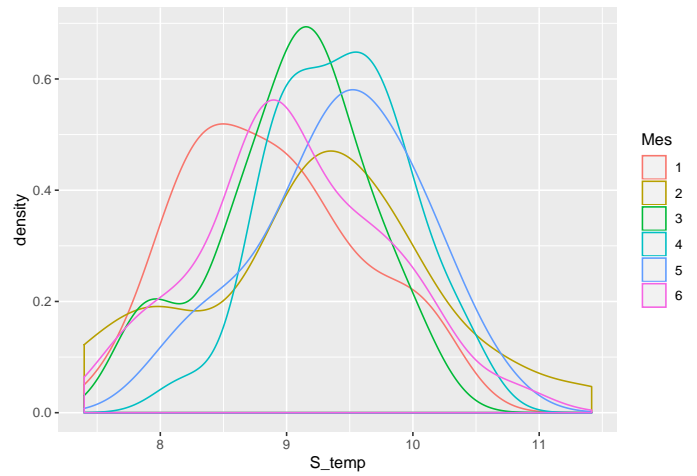


Figura 2. Distribución de la temperatura

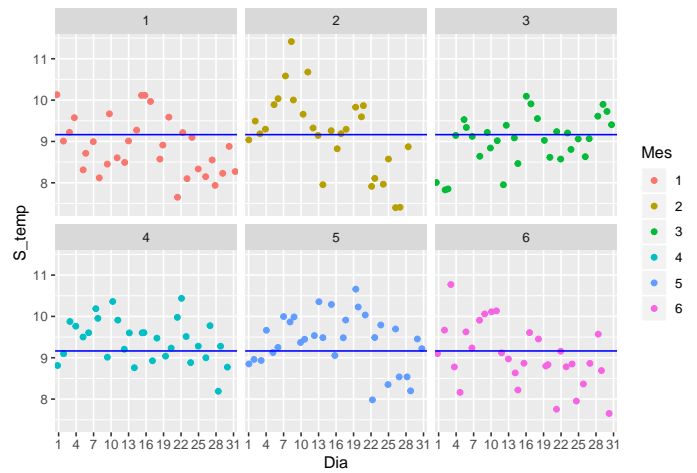


Figura 3. Tendencia de la temperatura mensual

de temperatura con un alto porcentaje de humedad.

En la **Fig.5** se muestra la distribución de la velocidad del viento, los valores medios oscilan entre 50 y $100 \frac{m}{s}$, este parámetro es relacionado con la precipitación pues si hay grandes vientos estos pueden desplazar las masas de aire disminuyendo la probabilidad del evento Tobón (2017), por ejemplo, el mes 2 fue el que tuvo menor precipitación la velocidad del viento para esa fecha es variable lo cual no explicaría la baja precipitación en ese mes, sin embargo, al mirar la **Fig.6** distribución de la radiación solar, es fácil ver como en la fecha el sol no fue constante lo que favoreció a su vez que la humedad relativa presenta los valores más pequeños en todo el registro, las masas de aire entonces se calientan cuando hay una temperatura mayor por ende más radiación solar, estas ascienden y la velocidad del viento puede o no llevarlas a otro lugar controlando así la precipitación en el sitio Tobón (2017).

En la **Fig.7** se puede observar la correlación para las distintas variables climáticas, presentando así una correlación positiva entre la precipitación y humedad relativa (0,38),

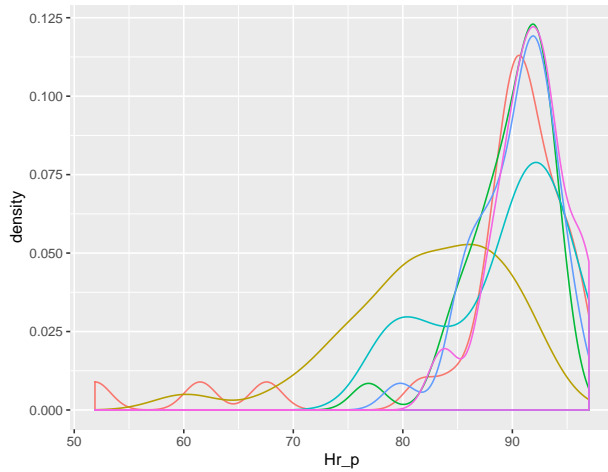


Figura 4. Distribución de la Humedad relativa

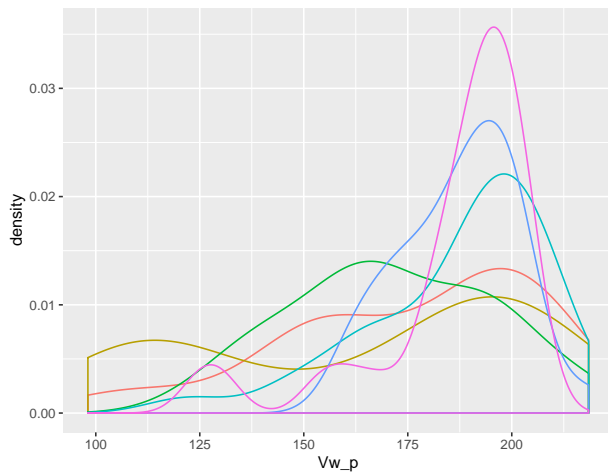


Figura 5. Distribución de la velocidad del viento

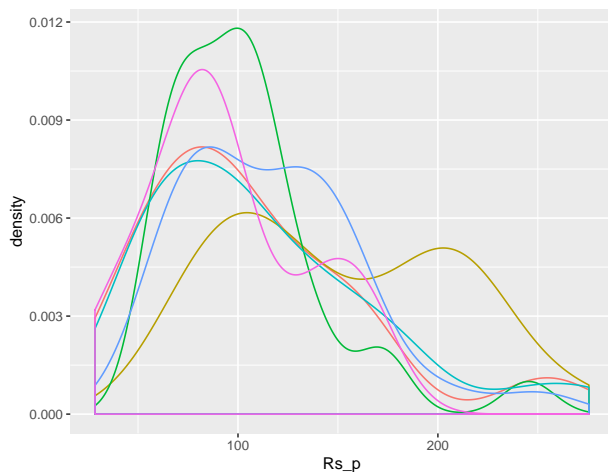


Figura 6. Distribución de la radiación solar media

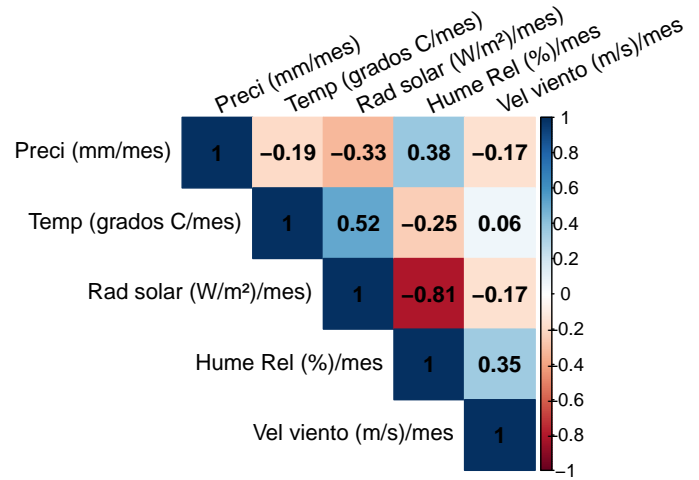


Figura 7. Matrix de correlación para las variables climáticas

esto puede darse ya que en épocas de lluvia la humedad relativa es constantemente alta y tiende a la saturación en eventos de precipitación y además suele presentarse el fenómeno de niebla. Morales-Rivas et al. (2019), dato que se puede corroborar en la **Fig.10** que muestra la relación entre precipitación y humedad relativa, que presenta una línea de tendencia con un aumento muy rápido en la humedad relativa mientras inicia la precipitación y luego se mantiene constante en el evento de lluvia tendiendo a la saturación del ambiente. Lo mismo ocurre con las variables de radiación solar y temperatura que tienen una correlación positiva de 0,52, la cual puede darse por el gran aumento de insolación solar y temperatura que se presenta a medio día en el páramo ya que se encuentra muy cerca de la línea ecuatorial y recibe una gran radiación diaria todo el año mientras se tenga un cielo despejado ?. Esto se puede ver en la **Fig.9** que muestra la relación entre temperatura y radiación solar, donde la línea de tendencia muestra una relación directa en el aumento de la radiación y temperatura. Caso contrario cuando se analiza la correlación entre radiación solar y humedad relativa ($-0,81$) o temperatura y humedad relativa ($-0,25$), obteniendo valores negativos; esto se pudo evidenciar en campo, pues mientras la temperatura era más alta el aire se sentía mucho más seco. Como se puede ver en la **Fig.8** que muestra la relación entre temperatura vs humedad relativa, donde la línea de tendencia disminuye a medida que la temperatura aumenta.

En la **Fig.8** se puede observar la reacción que se encontró para los parámetros climáticos temperatura y humedad relativa durante el periodo del que se tienen los datos. La gráfica de dispersión ilustra un comportamiento inverso entre las dos variables con una línea de tendencia que en general es decreciente, a medida que comienza a ascender la temperatura la humedad relativa comienza a descender lo que es normal pues a medida que el ambiente se torna más caliente, el aire se torna más seco lo que en un páramo

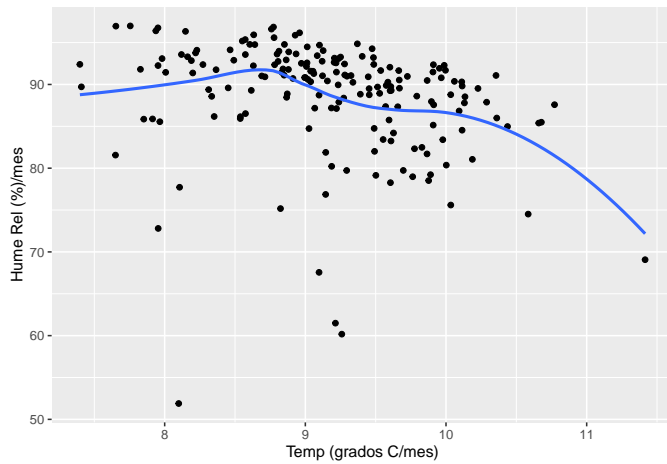


Figura 8. Temperatura vs Humedad relativa

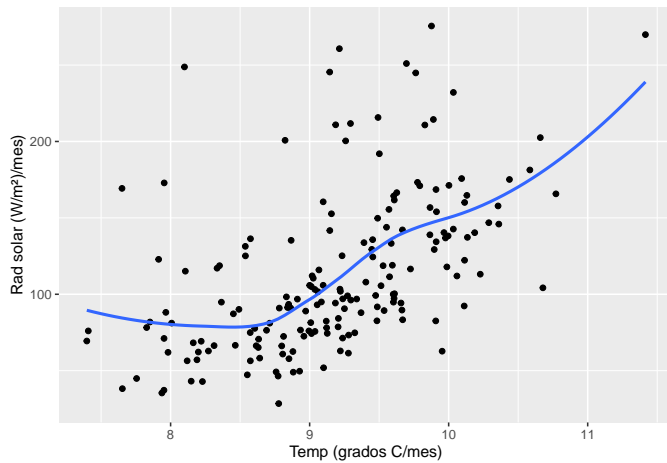


Figura 9. Temperatura vs Radiación solar

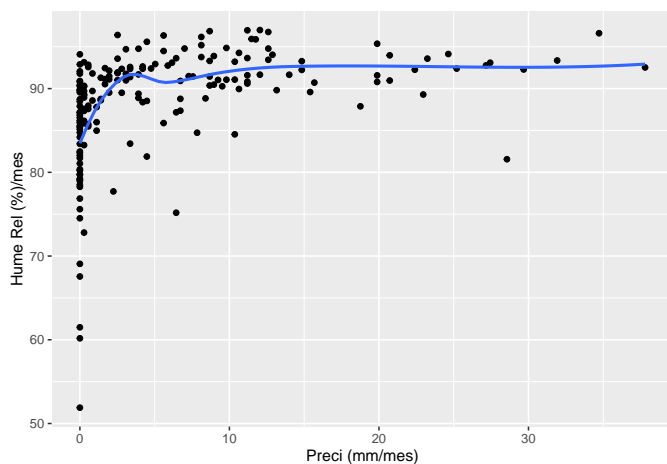


Figura 10. Precipitación vs Humedad relativa

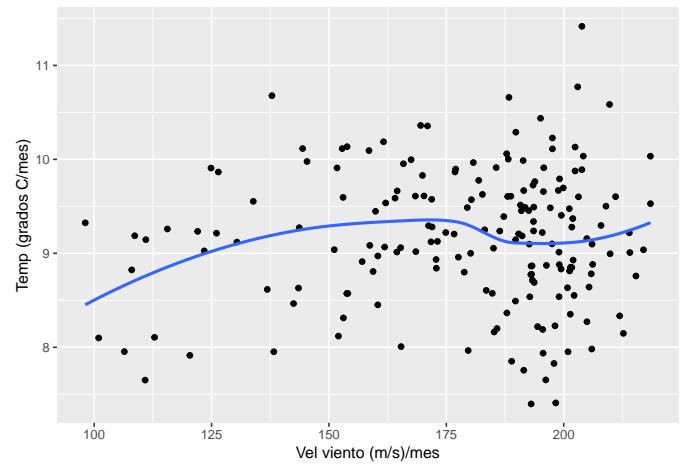


Figura 11. Velocidad del viento vs Temperatura

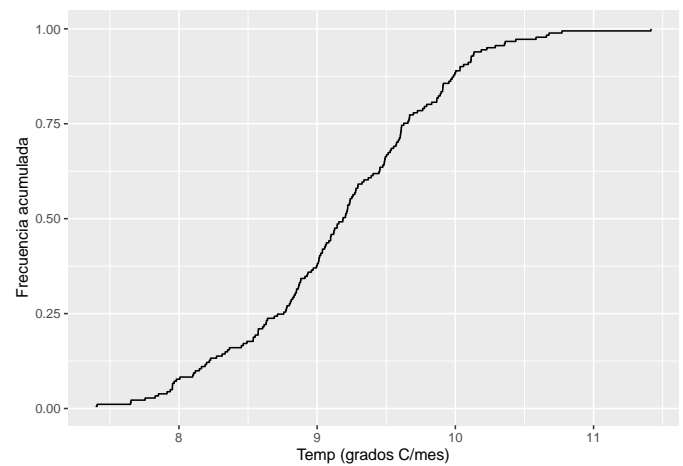


Figura 12. Distribución empírica acumulada de temperatura

está sujeto a la estacionalidad, pues la humedad relativa es variable y estacional Hofstede et al. (2017), así en épocas de lluvia habrá mayor humedad relativa que en épocas secas o de verano, la variación de este factor está estrechamente ligada a los fenómenos de niebla que en un páramo pueden presentarse con mayor o menor frecuencia dentro de un periodo de tiempo. En síntesis la gráfica no se sale del comportamiento normal de estos dos parámetros climatológicos (humedad relativa y temperatura), debido a que estos son normalmente inversos, cabe destacar que la humedad relativa extrañamente baja a valores menores de 70 lo que es característico de estos ecosistemas. Hofstede et al. (2017)

En la **Fig.9** se observa la relación entre la temperatura y la radiación solar, de la gráfica se deduce que estos dos parámetros son casi siempre directamente proporcionales pues en la mayoría del tiempo a medida que la temperatura aumenta la radiación solar comienza también a aumentar, y es que esto mientras se tengan las condiciones necesarias (como un cielo despejado) es normal en un páramo pues debido a su altitud y cercanía con el ecuador

la radiación solar que reciben estos ecosistemas es alta mientras no haya nubosidad Montenegro Díaz (2015).

En la **Fig.12** se observa la distribución empírica acumulada de la temperatura, es evidente notar que la probabilidad de encontrar temperaturas menores a 11°C es alta, lo contrario pasa con valores muy bajos del parámetro, es poco probable encontrar valores cercanos a cero de hecho los valores más comunes giran en torno al rango de 8 a 11°C .

En la **Fig.13** se muestra el modelo de temperatura construido a partir de los datos del sensor HOBO, cabe la pena aclarar que este es un aproximación y no es un modelo que ajuste bien los datos, es válido decir esto dada la cantidad de puntos utilizados (8), son pocos, pues se tomaron las coordenadas de los instrumentos instalados. Se puede notar el gradiente mostrado en el mapa, sugiere la variabilidad de la temperatura en el páramo; los rangos mostrados difieren en aproximadamente 3°C , al mirar este comportamiento, se procedió a verificar si la altura tenía influencia en la temperatura, lo esperado sería que este parámetro tuviera influencia Basantes and García (2018), para determinar la relación se hace un test de correlación arrojando un resultado de $-0,46$ lo cual indica que mientras una variable aumenta la otra disminuye, sin embargo, el mismo valor en sí es deja enduda si es una relación lineal, pues se encontró un R^2 de 0,22, lo que demuestra que si bien hay relación en entre los parámetros esta puede fluctuar y no ser constante, es decir, pueden haber lugares altos pero con temperaturas más altas de lo normal, este comportamiento no sigue descrito por van der Hammen (1974) la tasa de cambio en el promedio de temperatura con respecto a la altitud, está típicamente entre $0,6$ y $0,7^{\circ}\text{C } 100\text{ m}^{-1}$, esto tiene explicación pues la subida de temperatura, causada por el efecto invernadero de varios gases antropogénicos de los cuales el CO_2 es el más conocido, es el proceso fundamental global del cambio climático, esto viene acompañado de otros efectos secundarios Buytaert et al. (2014) los cuales no serán tratados acá.

CONCLUSIONES

Las variables climáticas están íntimamente relacionadas, una depende la otra como un ciclo que necesita de su entorno, las influencias pueden variar de manera positiva o negativa, es decir, que si una aumenta la otra disminuye o viceversa, es urgente entonces prestar atención a fenómenos como el cambio climático que modifica algunas variables del ambiente, esto repercute en el entorno alterando las fases naturales y llevando consigo la disminución de la calidad de vida para todos los seres vivos.

El clima en el páramo de La Rusia presenta la variabilidad esperada con su temperatura máxima de $19,5^{\circ}\text{C}$ a medio día y una mínima de $1,6^{\circ}\text{C}$ en la madrugada, una humedad relativa constantemente alta en excepción del tiempo donde se tiene la temperatura más elevada haciendo de este un páramo muy húmedo, que si se tiene

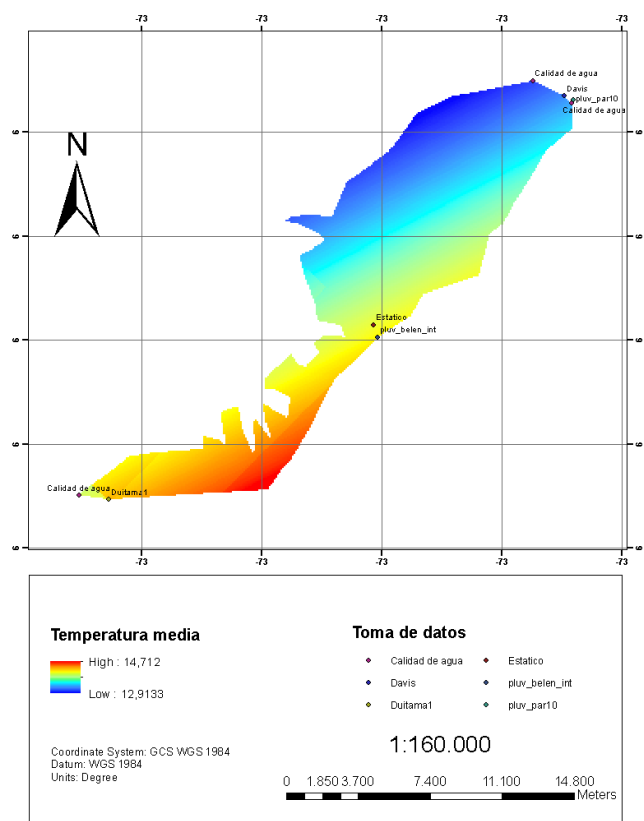


Figura 13. Modelo de temperatura

una buena regeneración del ecosistema con unos suelos ricos en porosidad y óptimos en infiltración, ayudado de la vegetación, puede ser muy importante para la captura de agua y alimentación de los acuíferos subterráneos y ríos, proporcionando así una buena oferta hídrica. Por lo que se hace necesario estudios más detallados para la conservación de estos ecosistemas sobre todo en un país como Colombia que tiene la mitad de páramos del mundo en el cual cae la responsabilidad en sus ciudadanos para un manejo óptimo y sostenible.

REFERENCIAS

- Balasubramanian, A. (2017). Climate data management.
- Basantes, A. C. N. and García, E. H. (2018). Altitud, variables climáticas y tiempo de permanencia de las personas en plazas de ecuador. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 10(2):414–425.
- Buytaert, W., Sevink, J., Cuesta, F., et al. (2014). Cambio climático: la nueva amenaza para los páramos. *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. CONDESAN, Lima.
- Cabrera, M. and Ramírez, W. (2014). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

- Hofstede, R., Calles, J., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Cerra, M., et al. (2017). Los páramos andinos qué sabemos, estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo.
- Jaramillo Robledo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia*. Number Doc. 21237) CO-BAC, Bogotá.
- Montenegro Díaz, P. F. (2015). Estimación de la radiación solar y neta a partir de la temperatura en ecosistemas de páramo y comparación con sensores a nivel del suelo.
- Morales-Rivas, M., Otero Garcia, J., Hammen, T. v. d., Torres Perdigón, A., Cadena Vargas, C. E., Pedraza Peñaloza, C. A., Rodríguez Eraso, N., Franco Aguilera, C. A., Betancourth Suárez, J. C., Olaya Ospina, É., et al. (2019). Atlas de páramos de colombia.
- Ortiz, M. A. D.-G., González, J. D. N., and López, T. S. (2005). Páramos: hidrosistemas sensibles. *Revista de ingeniería*, (22):64–75.
- Tobón, C. (2017). *Curso de hidrologia forestal*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Antioquia.
- van der Hammen, T. (1974). The pleistocene changes of vegetation and climate in tropical south america. *Journal of Biogeography*, pages 3–26.
- Vanegas, M. V. (1998). Paramos estrategia acuifera y paisajistica de gran valor ecologico. *Respuestas*, 3(1):38–42.