



# **ANÁLISIS DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS (HUMEDAD RELATIVA, TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y EVAPORACIÓN) EN LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ EN LOS AÑOS DE 1996 Y 2018**

## **ANALYSIS OF CLIMATIC VARIABLES IN THE BOGOTA RIVER BASIN IN THE YEARS 1996 AND 2018 (RELATIVE HUMIDITY, TEMPERATURE, PRECIPITATION AND EVAPORATION)**

Dana Martínez Muñoz  
3101550  
Ingeniera Catastral y Geodesta

Director trabajo de grado:  
Ing. Fredy Alberto Gutiérrez García  
MSc Gestión de la información y Tecnologías Geoespaciales  
MSc in Geographic Information Science and Systems

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA  
JUNIO DE 2022  
BOGOTÁ-COLOMBIA**

# **ANÁLISIS DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS (HUMEDAD RELATIVA, TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y EVAPORACIÓN) EN LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ EN LOS AÑOS DE 1996 Y 2018**

## **ANALYSIS OF CLIMATIC VARIABLES IN THE BOGOTA RIVER BASIN IN THE YEARS 1996 AND 2018 (RELATIVE HUMIDITY, TEMPERATURE, PRECIPITATION AND EVAPORATION)**

Dana Martínez Muñoz  
Ingeniera Catastral y Geodesta  
Candidata a Especialista en Geomática  
Universidad Militar Nueva Granada.  
Bogotá, Colombia  
est.dana.martinez@unimilitar.edu.co

### **RESUMEN**

La necesidad de determinar los efectos en la variabilidad climática por la producción de energía eléctrica y abastecimiento de agua potable; se realiza el análisis de las variables climatológicas (Humedad Relativa, Temperatura, Precipitación y Evaporación) en el área que abarca la cuenca del Río Bogotá, para los años 1996 y 2018. La información geográfica para las variables climatológicas fue adquirida en la página oficial de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca para 16 estaciones de tipo Climatológica Principal; y para el análisis geográfico se utiliza la cartografía base del IGAC, Modelo Digital de Elevación e imagen Landsat 8 de la página de la USGS del servicio geológico de los Estados Unidos. La metodología utilizada es la Geoestadística, la cual permite la estimación, predicción y simulación de los datos correlacionados espacialmente; y como métodos, son manejados los exploratorios, los estructurales, de interpolación y la regresión lineal. Los resultados obtenidos indican que en las zonas que se encuentran las 7 centrales hidroeléctricas, central térmica, represas y embalses, tienen cambios en los valores de las variables climatológicas, sin embargo; no presentan gran variabilidad. Al final del documento se realiza una regresión lineal multivariable que permitió determinar que no existe una alta relación del NDVI con las variables climatológicas (Humedad Relativa, Temperatura, Precipitación y Evaporación).

**Palabras Clave:** Geoestadística, Variables Climatológicas, NDVI, cuenca Río Bogotá.

## ABSTRACT

The need to determine the effects on climate variability due to the production of electric power and the supply of drinking water. The analysis of climatic variables is carried out (Relative Humidity, Temperature, Precipitation and Evaporation) in the area covered by the Bogota River basin in the years 1996 and 2018. The geographic information for the climatic variables was acquired from the official website of the Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca for 16 main type climatic stations. The IGAC base cartography, the Digital Elevation Model and Landsat 8 image from the USGS website of the United States Geological Survey were used for the geographical analysis. The methodology used is Geostatistics, which allows the estimation, prediction, and simulation of spatially correlated data; and the methods used are exploratory, structural, interpolation and linear regression. The results obtained show that there are changes in the values of the climatic variables for the areas where the 7 hydroelectric power plants, thermal power plants, dams and reservoirs are located. However, there is not a big variability. At the end of the document, a multivariate linear regression was performed, which allowed determining that there is not a high relationship between NDVI and climatic variables (Relative Humidity, Temperature, Precipitation and Evaporation).

**Keywords:** Geostatistics, Climatological Variables, NDVI, Bogotá River Watershed.

## INTRODUCCIÓN

Colombia se caracteriza por tener una de las capacidades hidroeléctricas más grandes de América del Sur, y, por lo tanto, se ha posicionado como uno de los sistemas energéticos más limpios y sostenibles a nivel mundial [1], es necesario indicar, que las centrales eléctricas que producen energía mediante consumo de combustible o almacenamiento de agua; modifican el microclima, alteran el paisaje, entre otros efectos [2]. En cuanto a los cuerpos de agua utilizados para la generación de energía, ya sean embalses o ríos, no tienen solamente una finalidad, sino que pueden ser utilizados en el riego de cultivos agrícolas o abastecimiento de agua potable (Ejemplos de embalses: San Rafael, Neusa, Sisga, Muña, Tominé, Chisacá) [3].

La cuenca hidrográfica<sup>1</sup> del Río de Bogotá está ubicada en el departamento de Cundinamarca, tiene una superficie de 589.143 hectáreas, que corresponden a cerca del 32 % del total de la superficie departamental [4]. En la cuenca se encuentran los cuerpos de agua: Río Juan Amarillo, Río Apulo, Río Fucha, Río Calandaima, Río Lindo, Río Tunjuelito, Río Teusacá, Río Bogotá y Río El Magdalena, Represa del Muña, Embalse de Chisacá, Represa La Regadera, Represa de Tibitó, Embalse de Tominé, Embalse del Sisga, Embalse del Neusa y Embalse San Rafael. Dicha zona hidrológica fue seleccionada, ya que en la actualidad con las aguas del río Bogotá se produce energía que llega a beneficiar alrededor de 2,5 millones de bogotanos, para esto Enel-

---

<sup>1</sup> El código Nacional de Recursos Naturales (Decreto Ley 2811 de 1974), define la cuenca hidrográfica como “el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales...” [18], [6].

Emgesa utiliza siete centrales eléctricas (Laguneta, Salto II, Tequendama, Charquito, Dario Valencia, Guaca y Paraíso) y una central térmica (Martín del Corral) [5].

Teniendo en cuenta lo anterior, los recursos hídricos superficiales, la producción de energía hidroeléctrica y el abastecimiento de agua potable han ocasionado una serie de afectaciones en las variables hidrometeorológicas y efectos sobre el sector agrícola; por ejemplo, si los regímenes de lluvia aumentan las probabilidades de fracaso de las cosechas, reduce el rendimiento y producción de los cultivos. Por consiguiente, establecer el comportamiento y el cambio a las que son sometidas las variables objeto de estudio (Humedad Relativa<sup>2</sup>, Temperatura<sup>3</sup>, Precipitación<sup>4</sup> y Evaporación<sup>5</sup>) permitirán la construcción y elaboración de normas que ayuden a mitigar los impactos sobre el ecosistema [6].

Para realizar el análisis de las variables anteriormente mencionadas se utiliza la Geoestadística, la cual es una rama de la estadística espacial que permite procesar y obtener resultados a partir de datos georreferenciados. Aspectos que la hacen útil para encontrar los patrones de distribución espacial, de variables numéricas continuas en el espacio, desarrollar procesos de interpolación<sup>6</sup> que permitan la generación de mapas o instrumentos de análisis y generar modelos de regresión lineales multivariados [1].

En antecedentes; Angie Pinzón en el trabajo denominado “Efectos sobre la precipitación y Escorrentía de la Cuenca del Río Guavio asociados a un embalse”, explora las consecuencias que tiene sobre la cantidad de agua lluvia en la cuenca del Río Guavio, el embalse principal de la zona; dicho trabajo fue estructurado en 5 partes: en la primera, la autora realiza la recolección de la información; en la segunda delimita las cuencas, subcuencas y determina las estaciones que se van a utilizar; en la tercera ejecuta la interpolación de la variable precipitación y obtiene el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)<sup>7</sup>; en la cuarta parte hace el análisis de tendencias y en la quinta parte genera el test de correlación entre el NDVI, la precipitación y la temperatura a escalas mensuales. Como resultado, Pinzón, concluye que no fue posible determinar el grado de influencia que tiene el embalse en el cambio de las variables climatológicas, pero fue posible identificar que el NDVI y las variables precipitación y temperatura presentan una correlación estadísticamente significativa. Es relevante indicar que en la anterior investigación se realizó el análisis del NDVI, ya que en [2] (citado [3]), en una zona de Mongolia, China, evalúan el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y encuentran una autocorrelación alta con los factores climáticos (temperatura y precipitación).

---

<sup>2</sup> Indica el porcentaje de humedad que contiene el aire [16], [17].

<sup>3</sup> Medida de grado de calor o frío de un cuerpo, con escala media multianual [16], [17].

<sup>4</sup> Medida de agua Lluvia que pasa a través de una superficie en un tiempo determinado [16], [17].

<sup>5</sup> Indica la emisión de vapor desde una superficie líquida de agua libre a temperatura inferior al punto de ebullición [16], [17].

<sup>6</sup> La interpolación consiste en la estimación de los valores que alcanza una variable en un conjunto de puntos con pares de coordenadas, Los más reconocidos son Kriging e IDW [1]

<sup>7</sup> El NDVI es un índice normalizado que permite generar una imagen que muestra donde existe vegetación [18]



dichos valores fueron capturados en 16 estaciones climatológicas principales y descargados de la página principal de “Histórico de series hidrometeorológicas” [5], para dos años en específico (1996 y 2018). Para el análisis y generación de resultados se utiliza el software ArcGIS 10.8.2 y Excel, en cuanto a la referencia de sistema de coordenadas se utiliza el de Origen Nacional.

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE ESTACIÓN	CATEGORÍA	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN
2119514	UNIVERSIDAD FUSAGASUGA UDEC	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,335694	-74,37025	1725
2120516	RAMADA LA	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,703222	-74,17722	2571
2120540	CHECUA	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	5,116861	-73,86144	2603
2120557	PRIMAVERA LA	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,857861	-74,21194	2623
2120559	APTO GUAIMARAL-USTA	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,791	-74,05347	2603
2120562	GUATAVITA	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,908861	-73,86561	2679
2120629	VENECIA	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,844139	-74,39953	2686
2120630	DONA JUANA	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,500861	-74,13736	2800
2120639	MESA LA	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,624639	-74,48175	1215
2120641	ESC SAMPER MADRID	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,473139	-74,53572	541
2120644	ARGELIA	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,357611	-74,75078	315
2120646	MESITAS	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,578833	-74,43906	1057
2120647	ESPERANZA LA	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	4,706083	-74,43028	1391
2306507	INST. AGRIC. ESC. VOCACIONAL	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	5,158667	-74,12883	1940
2401515	CARRIZAL	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	5,203944	-73,76756	2885
2401519	NOVILLEROS	CLIMATOLOGICAS PRINCIPALES	5,335667	-73,78492	2590

Tabla 1. Datos básicos de 16 estaciones hidrológicas. Fuente CAR [5].

Respecto al método, se tendrá en cuenta el siguiente diagrama:

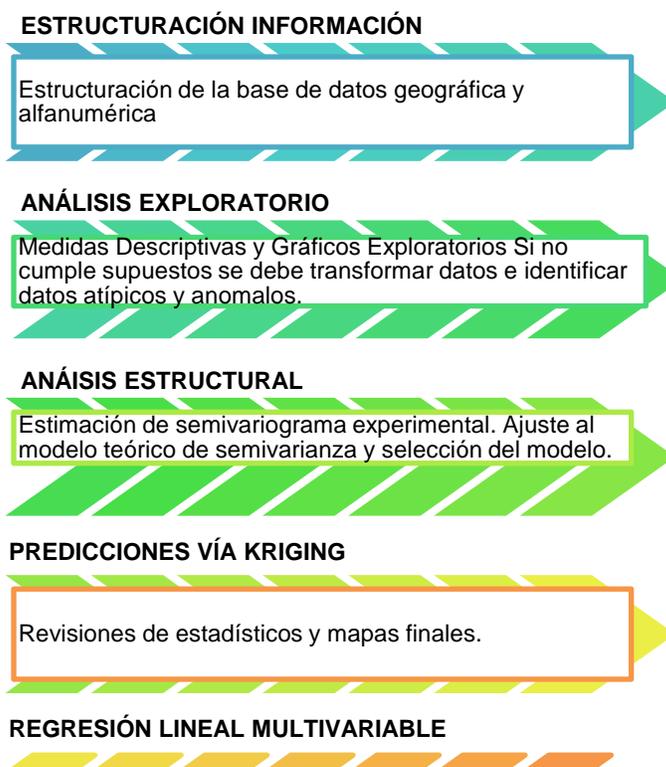


Ilustración 2. Diagrama método para análisis de variables meteorológicas. Fuente [6]

## 1.1. ESTRUCTURACIÓN DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La información primaria que se obtuvo de la página de Histórico de series hidrometeorológicas de la CAR [5], son archivos que tienen una hoja de libro de Excel con los datos por mes y año desde que fueron instaladas las estaciones. Por lo tanto, para la estructura de la muestra de datos, primero se eliminaron las estaciones que no se encuentran en la zona de estudio o que no se caracterizan por la completitud y consistencia de la información adquirida en los años 1996 y 2018. Cuando se identificaron la totalidad de estaciones a analizar, se realizó el promedio de todas las observaciones por año, y se obtuvieron las siguientes tablas.

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE ESTACIÓN	EVAPORACIÓN (mm)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
2120559	APTO GUAYMARAL	77,758	60,750	76,367	14,675
2120644	ARGELIA	64,473	68,545	96,158	27,573
2401515	CARRIZAL	75,642	72,417	62,642	12,242
2120540	CHECUA	106,325	69,000	60,883	14,775
2120630	DOÑA JUANA	72,875	70,083	63,625	11,175
2120641	ESC SAMPER MADRID	78,233	81,917	129,108	23,925
2306507	ESC VOCACIONAL PACHO	72,567	80,000	126,658	16,633
2120647	ESPERANZA LA	81,300	81,667	139,792	21,008
2120562	GUATAVITA	98,525	66,091	87,308	15,409
2120639	MESA LA	68,811	71,250	121,400	21,567
2120646	MESITAS	77,120	72,583	105,158	23,183
2401519	NOVILLEROS	69,292	76,889	70,258	14,867
2120557	PRIMAVERA LA	69,500	74,833	66,425	11,700
2120516	RAMADA LA	71,925	68,250	61,658	14,333
2119514	UNIV. FUSAGASUGA	93,560	76,200	74,283	20,650
2120629	VENEZIA	75,267	73,083	82,375	12,117

Tabla 2. Datos organizados para 16 estaciones climatológicas principales, para las variables de evaporación, humedad relativa, precipitación y temperatura para el año 1996. Fuente CAR

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE ESTACIÓN	EVAPORACIÓN (mm)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
2120559	APTO GUAYMARAL	40,233	81,667	65,833	14,008
2120644	ARGELIA	90,492	69,833	83,408	28,642
2401515	CARRIZAL	78,817	83,583	67,758	11,792
2120540	CHECUA	94,683	83,500	56,808	14,208
2120630	DOÑA JUANA	58,180	79,417	58,208	12,792
2120641	ESC SAMPER MADRID	120,633	78,250	96,883	26,142
2306507	ESC VOCACIONAL PACHO	78,767	75,167	119,425	17,900
2120647	ESPERANZA LA	72,250	84,917	140,017	21,125
2120562	GUATAVITA	73,183	75,111	58,150	13,867
2120639	MESA LA	94,200	74,500	96,033	23,558
2120646	MESITAS	106,592	78,083	128,342	23,175
2401519	NOVILLEROS	78,458	83,083	70,375	13,625
2120557	PRIMAVERA LA	68,650	86,167	77,733	14,050
2120516	RAMADA LA	72,217	82,625	71,508	13,958
2119514	UNIV. FUSAGASUGA	88,125	79,333	93,800	19,125
2120629	VENEZIA	82,150	92,167	88,467	12,133

Tabla 3. Datos organizados para 16 estaciones climatológicas principales, para las variables de evaporación, humedad relativa, precipitación y temperatura para el año 2018. Fuente CAR

Para la espacialización de las variables, se utilizó la herramienta join, que permitió unir la base de datos de las variables climatológicas para los años 1996 y 2018 al shapefile de las estaciones.

## **1.2. ANÁLISIS EXPLORATORIO**

En esta parte de la metodología se realizan estadísticas descriptivas, análisis de gráficos, análisis de tendencias y semivariogramas experimentales. Se inicia con la exploración de las medidas de tendencia central, variabilidad y forma; en cuanto a los gráficos se realizan histogramas y gráficos de cajas. Teniendo en cuenta que los datos que están siendo analizados corresponden a escalas cuantitativas, las medidas de resumen son: El promedio o media, la cual suma todos los valores individuales y la divide entre el número total de datos, esta medición representa el punto de equilibrio de la distribución de los datos; la mediana representa la cifra valor que divide la muestra en dos mitades, es decir, el valor donde el 50 % está por encima o por debajo del mismo; la desviación estándar es la medida de dispersión más común que indica que tan dispersos se encuentran los datos con respecto a la media, mientras mayor es la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos; los cuartiles dividen la muestra de datos en cuatro partes iguales, con esta medida se puede identificar rápidamente la dispersión y la tendencia central de un conjunto de datos; la última medida de dispersión es el rango o intervalo entre el valor mínimo y máximo, el cual se obtiene de la resta del mayor valor y el mínimo [7], [8].

En cuanto a las medidas de forma se utilizaron la curtosis y el coeficiente de simetría, la primera determina el grado de concentración de los valores, y la segunda muestra la proporción de la distribución de una variable respecto a la media aritmética [7].

En general, el análisis exploratorio engloba las técnicas para determinar los esquemas de asociación espacial, concentraciones locales en un conjunto de datos. Cuando los datos no siguen una distribución de tipo normal se deben aplicar transformaciones, para volver a verificar que los datos cumplen con una distribución normal, las pruebas que se pueden aplicar son: Kolmogorov- Smirnov, Shapiro- Wilk's y la de bondad de ajuste [6].

## **1.3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL**

Lo que se busca es ajustar el semivariograma experimental a un modelo válido. Para esto, primero se debe buscar la presencia de anisotropía o isotropía, teniendo en cuenta la tendencia de la variable. Si se encuentra anisotropía, se identifica que existe correlación dependiendo la dirección y, por lo tanto, se debe realizar una transformación para eliminar la variabilidad de los datos. Es importante tener en cuenta, que para el estudio de la variable se debe determinar si el fenómeno que se estudia se comporta como un proceso estacionario, es decir, que la media y la varianza no varían a lo largo del tiempo [6]. Para encontrar el semivariograma que mejor se ajuste se debe analizar los modelos teóricos (efecto nugget, esférico, exponencial y gaussiano), los modelos que más se manejan son el esférico, el cual tiene un comportamiento lineal a distancias de separación pequeñas cerca del origen y el modelo exponencial, el cual tiende a alcanzar el sill asintóticamente. [6].

## 1.4. INTERPOLACIÓN CON KRIGING

Kriging es un interpolador muy flexible, utiliza modelos estadísticos que posibilitan una variedad de superficies de salida que incluyen predicciones, errores estándar de predicción, probabilidad y cuantil [6]. Se utiliza este método de interpolación ya que permite la transformación de datos, eliminación de tendencias y proporciona medidas de error [9].

## 2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 2.1. ESTRUCTURACIÓN DE LA INFORMACIÓN

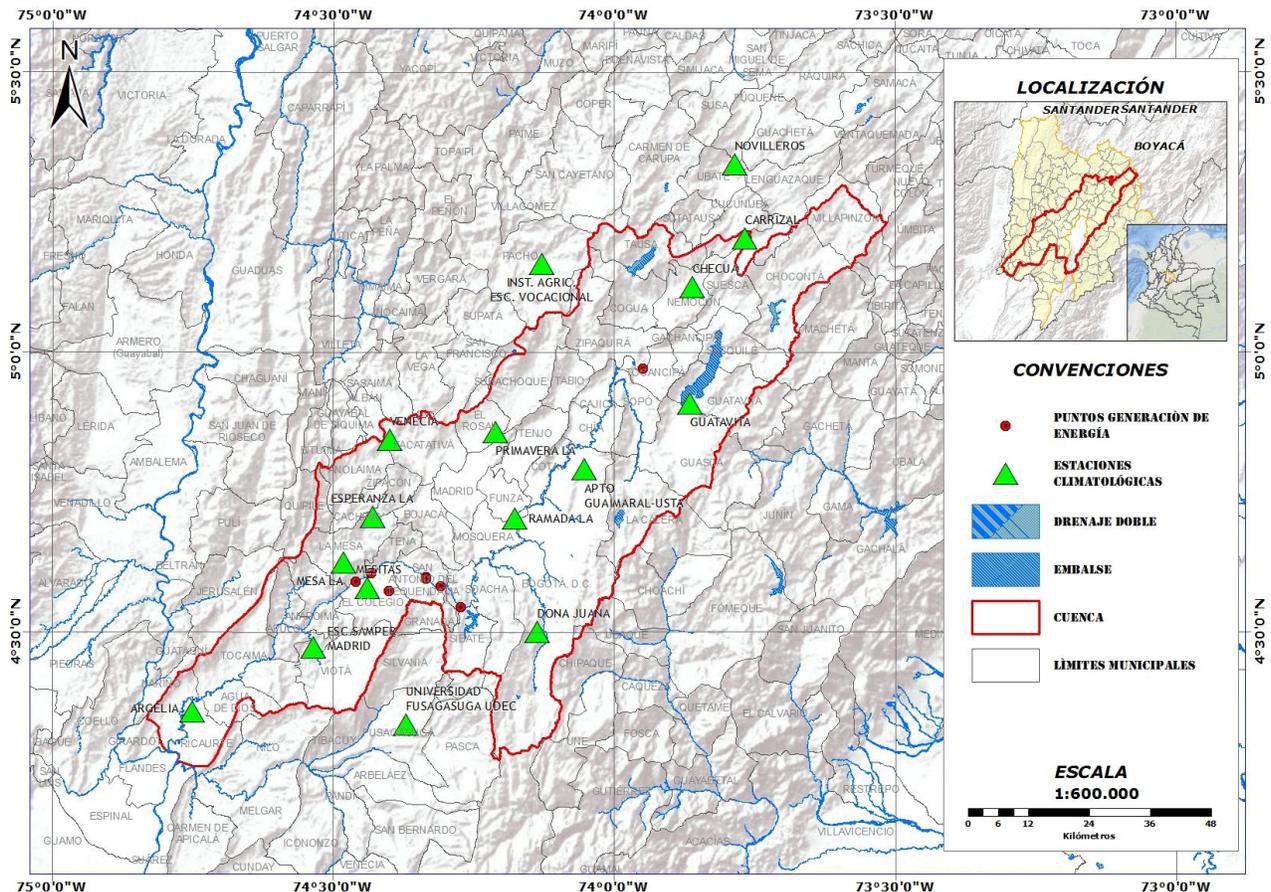


Ilustración 3. Resultado de la espacialización de las centrales hidroeléctricas. Fuente CAR

### 2.2. ANÁLISIS EXPLORATORIO Y ESTRUCTURAL

Para el presente análisis, contamos con un número limitado de estaciones meteorológicas, por lo tanto, es importante analizar que la ubicación de los diferentes puntos de muestreo sea homogénea, y que no presenten sitios con variaciones espaciales significativas sin información. El análisis estructural, permite identificar si la

variable presenta estacionariedad, isotropía, anisotropía y el grado de la función de la tendencia; dichos parámetros son analizados para realizar la interpolación [6].

En la ilustración 3, observamos la localización de 16 estaciones meteorológicas, de las cuales 11 recaen en la cuenca del Río Bogotá y 5 se encuentran fuera de la zona de estudio. El área se caracteriza por tener un comportamiento de norte a sur descendente, por lo que en los resultados de análisis exploratorios de las 4 variables (Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa y Evaporación) se puede llegar a identificar tendencias en el comportamiento de las categorías. Se visualiza que la cuenca está dividida en dos zonas de elevación; al norte, por encima de los 2800 m hasta 4155; y al sur por debajo de los 2800 m hasta 164 m. En cuanto a la organización de las estaciones, se determina una distribución homogénea, ya que los puntos de observación muestral no están concentrados en un solo lugar y se encuentran en la mayoría de los niveles altitudinales.

A continuación, se realizará el análisis exploratorio de cada variable:

### 2.2.1. PRECIPITACIÓN

#### a. Histogramas

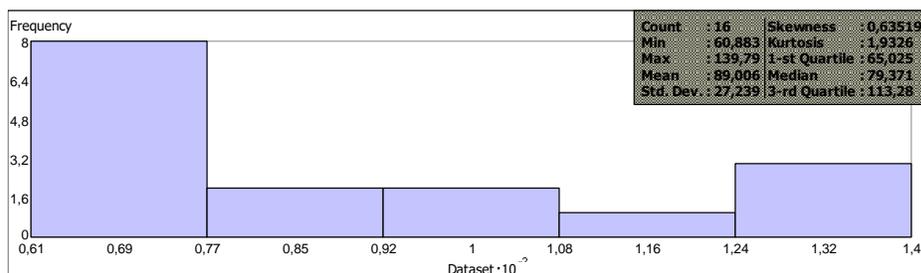


Ilustración 4. Histograma de la variable precipitación, para el año 1996, sin transformación. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

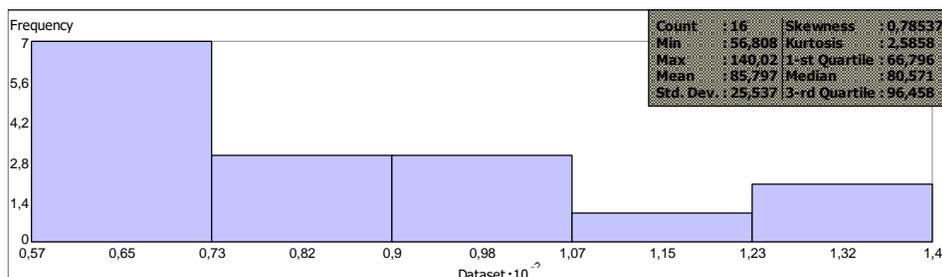


Ilustración 5. Histograma de la variable precipitación, para el año 2018, sin transformación. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

## b. Mapas de Voronoi

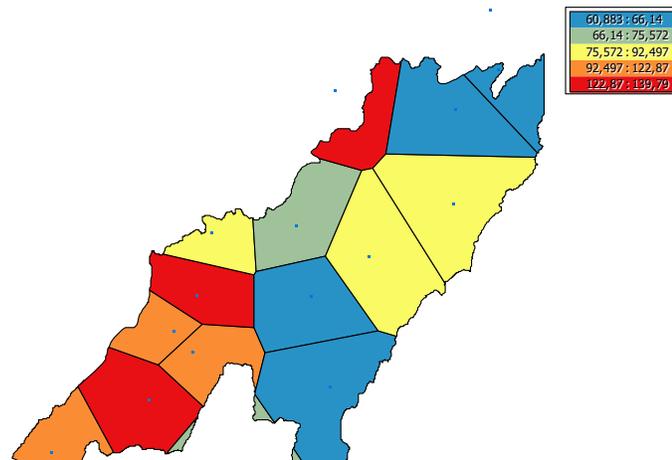


Ilustración 6. Mapa de Voronoi Simple para la variable precipitación en el año 1996. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

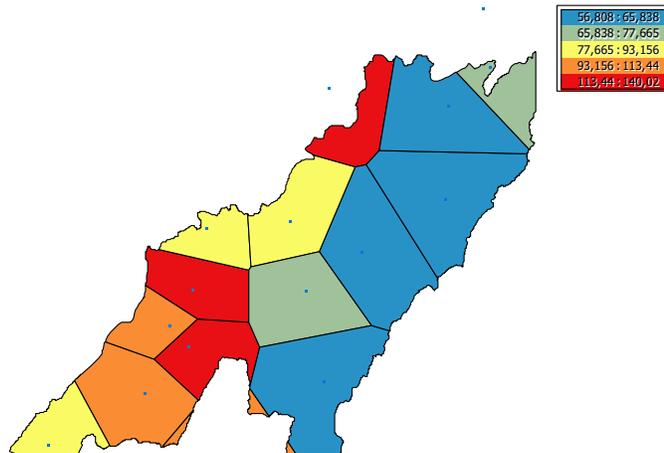


Ilustración 7. Mapa de Voronoi Simple para la variable precipitación en el año 2018. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

Para el año 1996 se tiene como valor mínimo 60.883 mm, valor máximo 139.79 mm; el promedio en lluvias para el año 1996 fue de 89.006 litros por metro cuadrado; la desviación estándar indica que puede variar en 27.39 mm, respecto a la media. Los datos presentan una asimetría positiva, con valor de Skewness 0.63; la curtosis es positiva (1.93) lo que significa que los datos tienden a una curva con pico alto (Leptocúrtica). Teniendo en cuenta lo anterior, la distribución no es normal, por lo tanto, para realizar la interpolación se debe realizar una transformación Box-Cox con un parámetro de 0,01. Del mapa de Voronoi con método simple, se identifica que al norte las precipitaciones son bajas y al sur son altas, se observa una correlación espacial, teniendo en cuenta las alturas de la zona.

En el año 2018 el valor mínimo es 56.808 mm, el valor máximo es 140.02 mm; el promedio en lluvias para el año 2018 fue de 85.797 litros por metro cuadrado; la desviación estándar indica que puede variar en 25.537 mm, respecto a la media. El

valor del sesgo es positivo (0.78), por lo tanto, se observa un sesgo a la izquierda con asimetría positiva, es decir, los valores se concentran en valores de precipitación bajos; la curtosis es de 2.58, por lo que se observa un pico en la curva más alto (Leptocúrtica) respecto al año 1996. Para que la variable sea interpolada, se aplica la transformación de Box-Cox con un parámetro -1.

## 2.2.2. TEMPERATURA

### a. Histogramas

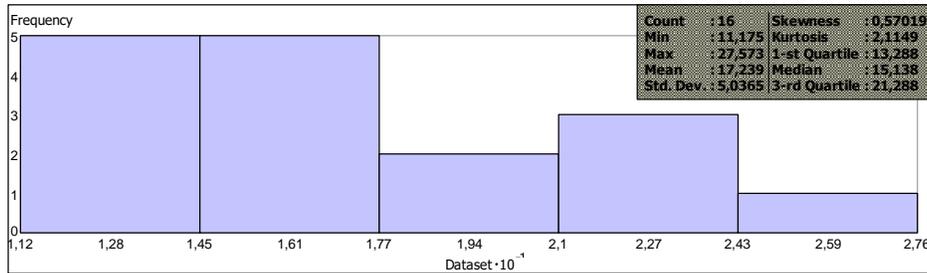


Ilustración 8. Histograma de la variable temperatura, para el año 1996, sin transformación. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

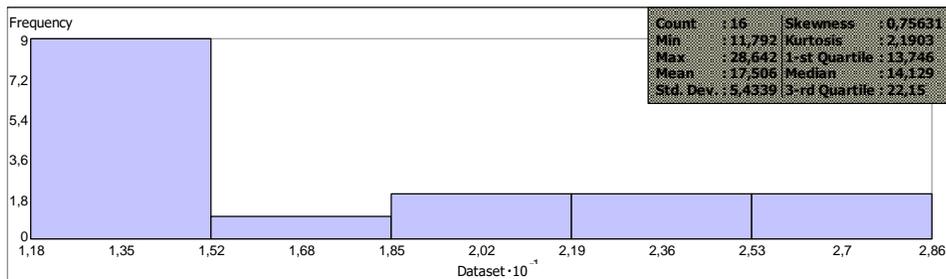


Ilustración 9. Histograma de la variable temperatura, para el año 2018, sin transformación. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

## b. Mapas de Voronoi

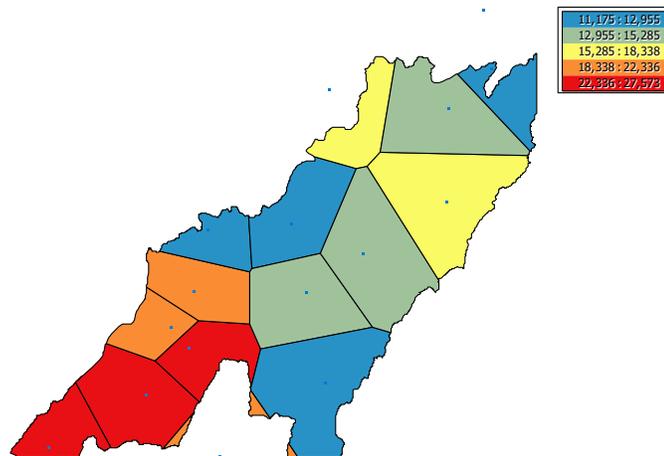


Ilustración 10. Mapa de Voronoi Simple para la variable temperatura en el año 1996.  
Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

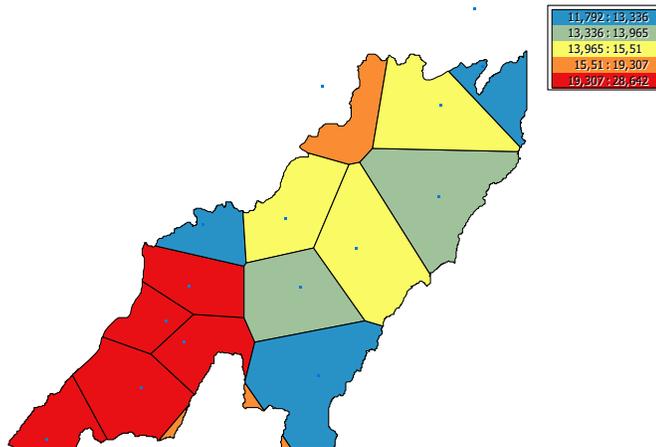


Ilustración 11. Mapa de Voronoi Simple para la variable temperatura en el año 2018.  
Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

La temperatura en el año 1996 presenta como valor mínimo 11.17 °C; el valor máximo es 27.57 °C; el promedio de temperatura es de 17.23°C; la desviación estándar indica que la variable puede variar 5.03°C con relación a la media. El valor del sesgo (0.57) es aproximado a 0, por lo que se puede indicar que tiene un leve sesgo a la izquierda; la curtosis es de 2.11, es decir, la curva es leptocúrtica. Teniendo en cuenta los anteriores valores, los datos no se distribuyen normalmente, por lo que la transformación que se debe aplicar para la interpolación es de Box-Cox con un parámetro de -1.

Para el año 2018, se tiene como valor mínimo 11.79 °C; valor máximo 28.64 °C; el promedio de la temperatura es de 17.50 °C; la desviación estándar es de 5.43 °C. El valor de la asimetría es 0.7, y la curtosis es 2.19, por consiguiente, se tiene una curva con sesgo a la izquierda y leptocúrtica, es decir, no tiene una distribución normal;

entonces se revisa que la mejor transformación para la variable es Box- Cox con un parámetro de -0.5.

### 2.2.3. HUMEDAD RELATIVA

#### a. Histogramas

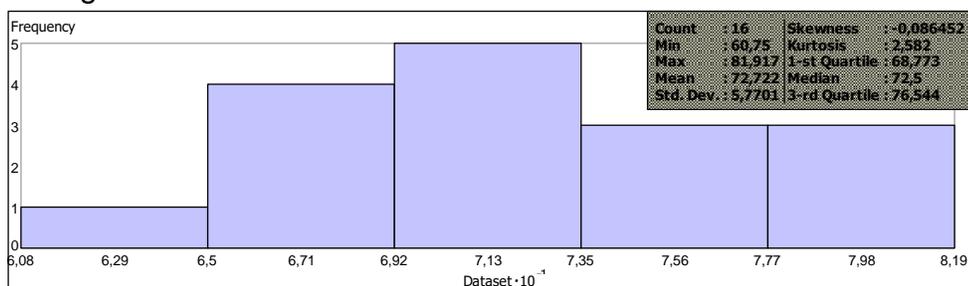


Ilustración 12. Histograma de la variable humedad relativa, para el año 1996, sin transformación. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

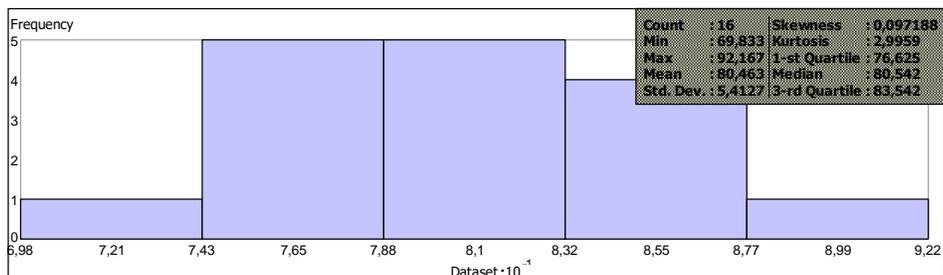


Ilustración 13. Histograma de la variable humedad relativa, para el año 2018, sin transformación. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

#### b. Mapas de Voronoi

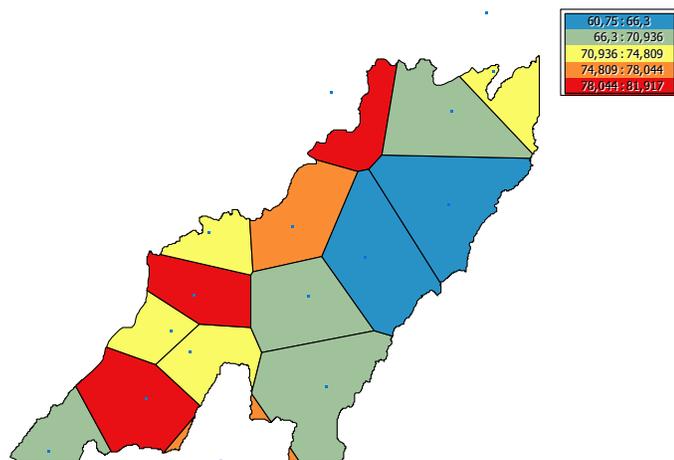


Ilustración 14. Mapa de Voronoi Simple para la variable humedad relativa en el año 1996. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

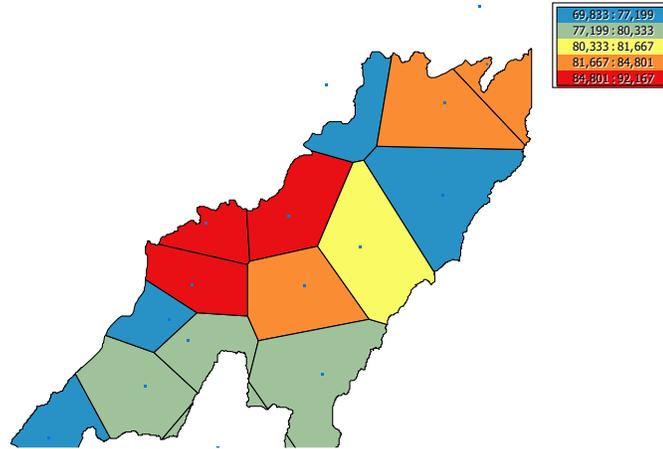


Ilustración 15. Mapa de Voronoi Simple para la variable humedad relativa en el año 2018. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

Para el análisis exploratorio, en el año 1996, el valor mínimo de la humedad relativa es 60.75%; el valor máximo es 81.91%; la media aritmética es de 72.72%; la desviación estándar señala que los datos pueden variar en 5.77 % respecto a la media. En cuanto a la tendencia de la curva de la distribución, se tiene que el skewness es aproximado a cero y la curtosis es de 2.58, por lo que los datos son simétricos con colas pesadas (leptocúrticas). Se presume que la variable tiene una distribución normal, por lo tanto, no se deben aplicar transformaciones para realizar la interpolación.

Para el año 2018, se tiene como valor mínimo 69.83%; valor máximo 92.16%; el promedio de la humedad es de 80.46%; la desviación estándar es de 5.41%. El valor de la asimetría es 0.09, y la curtosis es 2.99, por consiguiente, se tiene una curva simétrica y leptocúrtica, se puede indicar que tiene una distribución normal, pero se identifican varias modas en el histograma; por lo tanto, se revisa que la mejor transformación para la variable es Logarítmica.

## 2.2.4. EVAPORACIÓN

### a. Histogramas

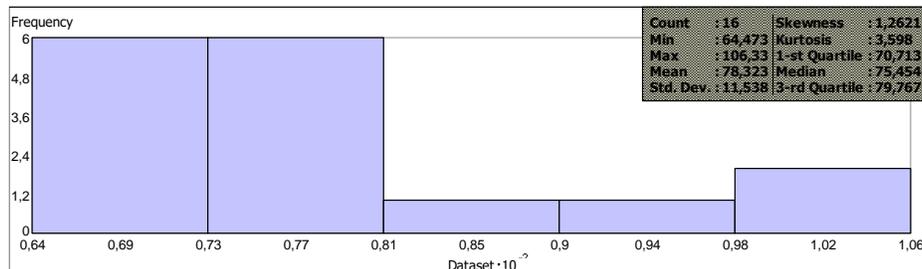


Ilustración 16. Histograma de la variable evaporación, para el año 1996, sin transformación. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

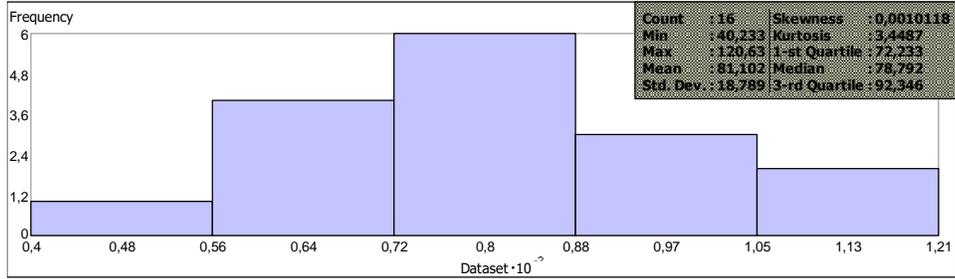


Ilustración 17. Histograma de la variable evaporación, para el año 2018, sin transformación. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

b. Mapas de Voronoi

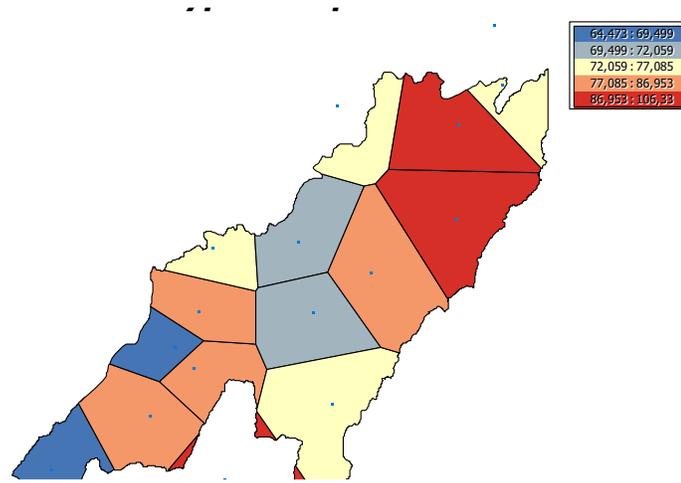


Ilustración 18. Mapa de Voronoi Simple para la variable evaporación en el año 1996. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

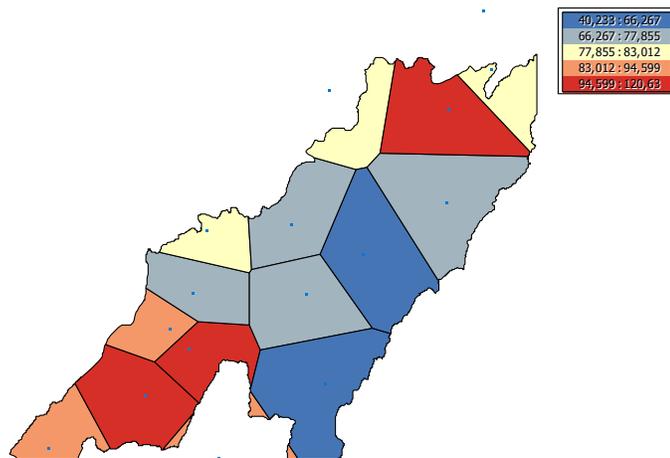


Ilustración 19. Mapa de Voronoi Simple para la variable evaporación en el año 2018. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

Para la variable evaporación en el año 1996, se observa un valor mínimo de 64.47 %, valor máximo de 106.33%; la media es de 78.32%, la desviación estándar muestra que los datos pueden variar en 11.53% del valor de la media (78.32%). La muestra indica una distribución asimétrica positiva o hacia la derecha con un skewness de 1.26, es decir, que los valores de evaporación son bajos; la curtosis presenta un valor de 3.59, lo que significa que tiene un valor positivo leptocúrtico. Teniendo en cuenta, que no se tiene una distribución normal, se utiliza la transformación de Box- Cox, con parámetro -1.

En el año 2018, los datos se distribuyen normalmente. El valor mínimo es 40.23%; el valor máximo en el rango de datos es 120.63%; la media es 81.10%; de la variabilidad respecto a la media es 18.78%. El valor de skewness es 0 y la curtosis 3.44, por lo que la forma de la curva es simétrica y leptocúrtica. No se aplica ninguna transformación, ya que al probar con el método Box- Cox o Logarítmica, cambia el comportamiento de los datos.

## 2.3. PREDICCIÓN- INTERPOLACIÓN KRIGING SIMPLE

### 2.3.1. PRECIPITACIÓN

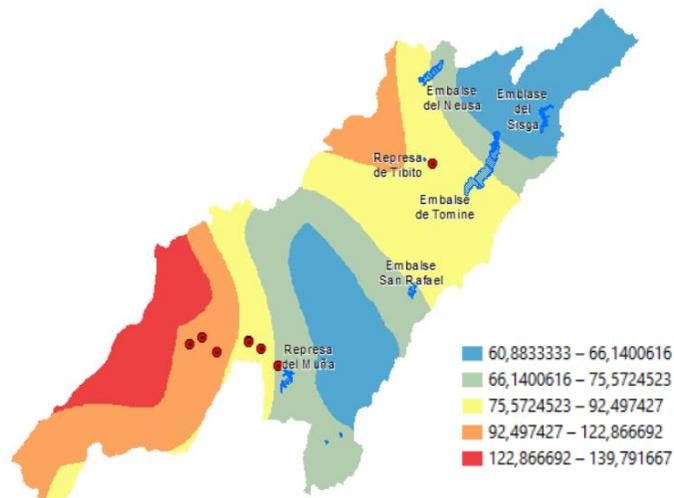


Ilustración 20. Interpolación con el método Kriging Simple de la variable precipitación para el año 1996. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

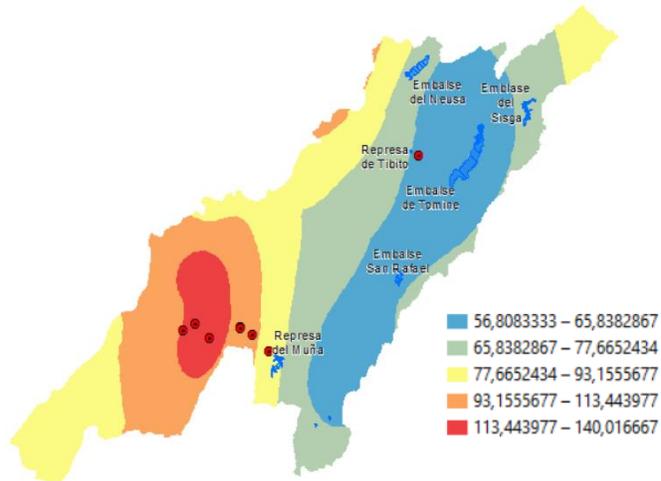


Ilustración 21. Interpolación con el método Kriging Simple de la variable precipitación para el año 2018. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

Al revisar el comportamiento de la variable precipitación en los años 1996 y 2018, no se presenta gran variabilidad; en general, la zona norte que se caracteriza por tener mayor altura respecto al nivel del mar mantiene valores bajos; y la zona sur conserva los valores altos; a destacar, en el 2018 disminuye la variabilidad en los datos y aumenta el rango. En la zona que se encuentran los embalses del Tominé y El Sisga disminuyen las precipitaciones y en la zona de las centrales hidroeléctricas muestra un aumento en las precipitaciones.

### 2.3.2. TEMPERATURA

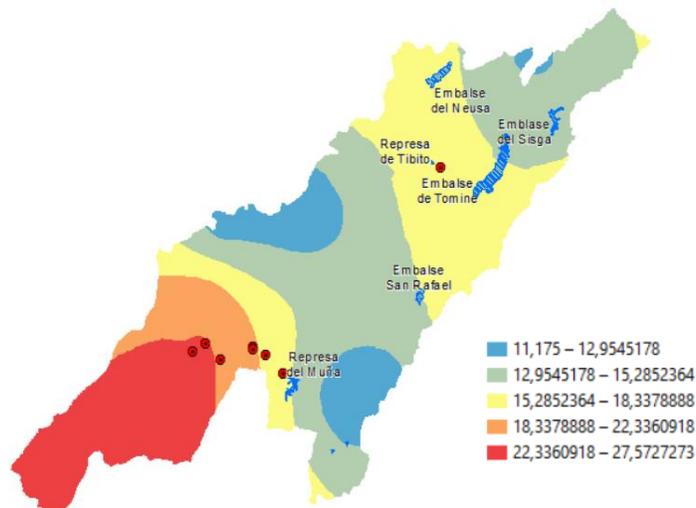


Ilustración 22. Interpolación con el método Kriging Simple de la variable temperatura para el año 1996. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

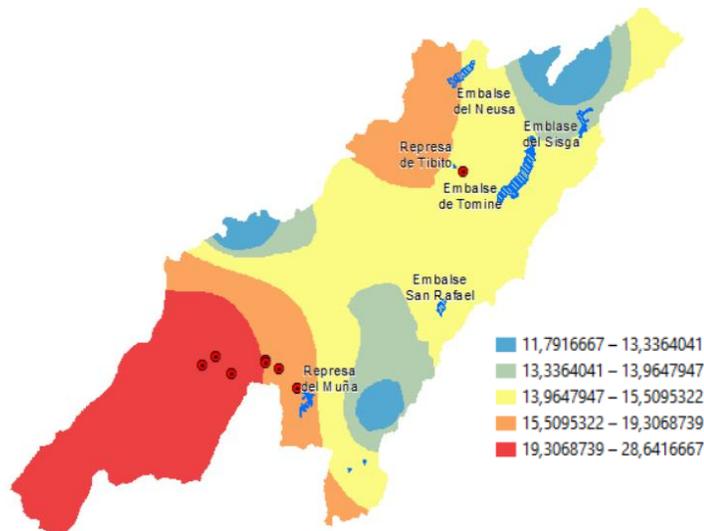


Ilustración 23. Interpolación con el método Kriging Simple de la variable temperatura para el año 2018. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

Al realizar el paralelo entre los dos años (1996 y 2018), la temperatura no tiene gran variabilidad; en los dos mapas de interpolación, se encuentra que al norte se presentan temperaturas bajas y al sur temperaturas altas. La variación y promedio de los datos son muy aproximados, y el rango entre las diferentes muestras tiene una diferencia cercana a un grado centígrado. Si bien, los datos tienen un comportamiento homogéneo, en la zona donde se encuentran los embalses incrementa la temperatura, otro cambio notable es el acrecentamiento de la temperatura al sur de la cuenca del Río Bogotá.

### 2.3.3. HUMEDAD RELATIVA

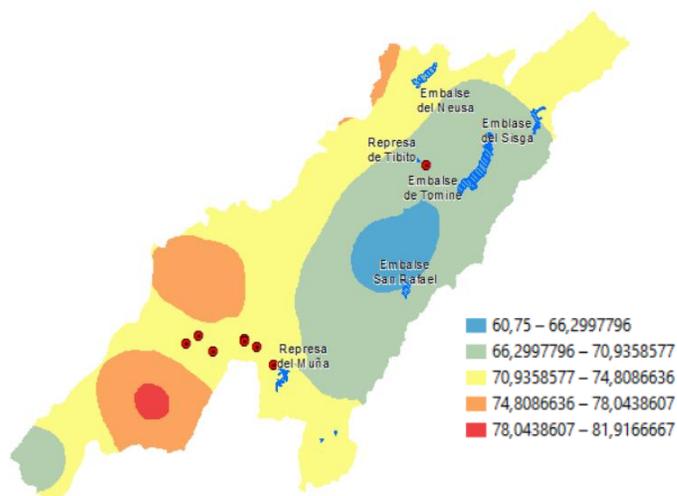


Ilustración 24. Interpolación con el método Kriging Simple de la variable humedad relativa para el año 1996. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

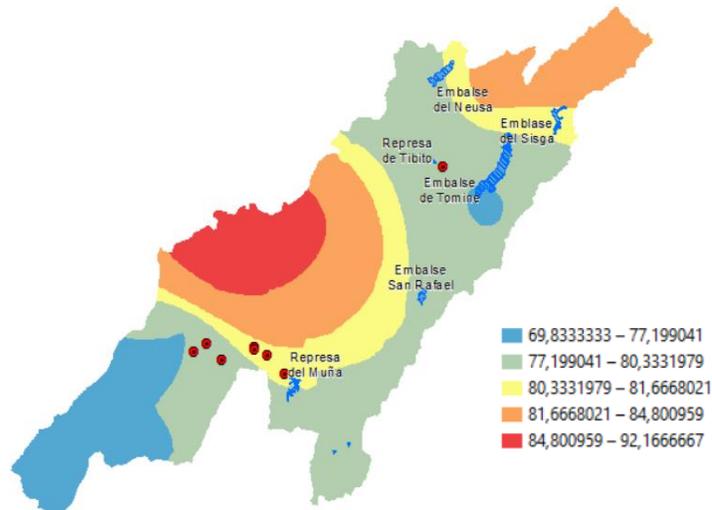


Ilustración 25. Interpolación con el método Kriging Simple de la variable humedad relativa para el año 2018. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

Para esta variable, se evidencian cambios significativos, la humedad relativa tuvo una variación aproximada del 10 %, los valores mínimos y máximos, aumentaron, sin embargo, la variabilidad entre las observaciones se mantiene. En la zona norte aumentó la humedad, excepto en el área donde recae el Embalse del Sigga y el Embalse de Tominé, en toda la zona sur disminuyó la humedad, es decir que la zona es seca.

### 2.3.4. EVAPORACIÓN

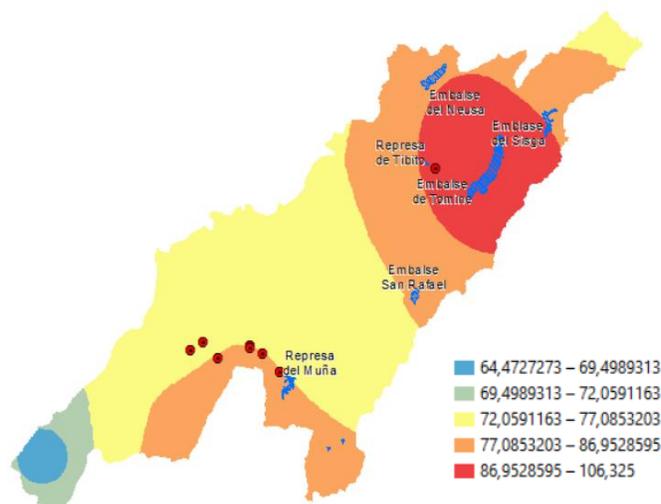


Ilustración 26. Interpolación con el método Kriging Simple de la variable evaporación para el año 1996. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

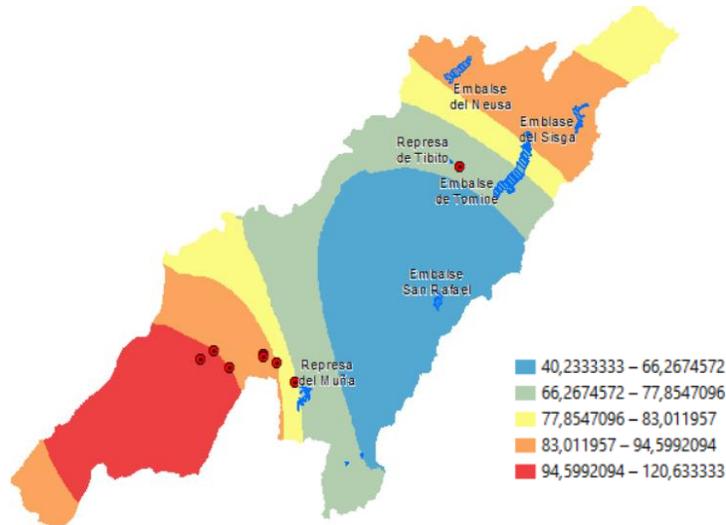


Ilustración 27. Interpolación con el método Kriging Simple de la variable evaporación para el año 2018. Fuente: Interfaz Geostatistical Analyst

Al revisar los datos para cada grupo muestral, se evidencia que presenta mayor variabilidad, incrementó la evaporación en un 16% aproximadamente, la media aumentó en un 3%; y la variabilidad entre los datos observados creció en un 7%. Al revisar los mapas se encuentra que al sur de la cuenca del Río Bogotá aumenta la evaporación, y al norte disminuye.

#### 2.4. REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIADA

Para la generación del modelo de regresión lineal, se obtiene primero el NDVI en la zona de la cuenca del río Bogotá, para esto se utilizaron las bandas 4 y 5 de la imagen Landsat 8, y obtuvo el siguiente resultado:

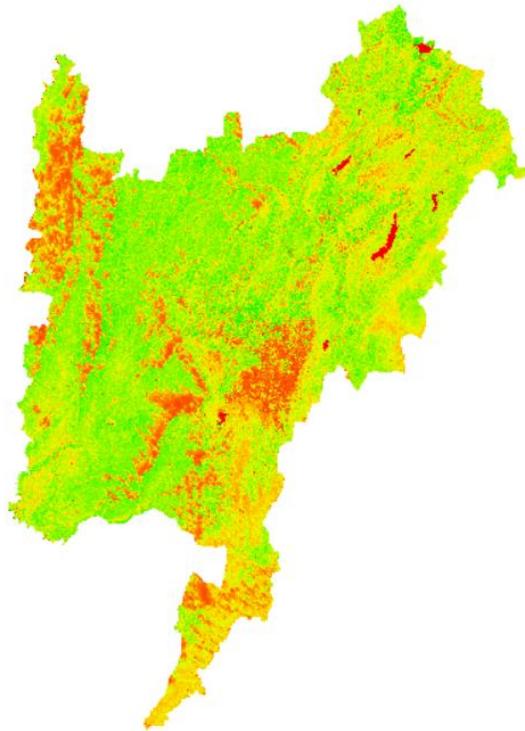


Ilustración 28. NDVI. Fuente Landsat 8 de la página de la USGS del servicio geológico de los Estados Unidos

Estadísticas de la regresión								
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,54509818							
R <sup>2</sup> ajustado	0,37967934							
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	superior 95,0%
Intercepción	-0,82008658	0,53858633	-1,52266505	0,15605887	-2,0055071	0,36533394	-2,0055071	0,36533394
EVAPORAC_1	-1,9402E-05	0,00157918	-0,01228611	0,99041735	-0,00349516	0,00345636	-0,00349516	0,00345636
HUMEDAD_RE	0,01316235	0,00620276	2,12201428	0,0573692	-0,00048984	0,02681453	-0,00048984	0,02681453
PRECIPIIT_1	0,00143975	0,00120346	1,19633742	0,25671472	-0,00120905	0,00408854	-0,00120905	0,00408854
TEMPERAT_1	-0,0012788	0,0088396	-0,14466744	0,88759002	-0,02073462	0,01817702	-0,02073462	0,01817702

Ilustración 29. Regresión Líneal Multivariable. Fuente: Excel con complemento de Análisis de datos

El modelo de regresión explica el 0,54 % de la varianza. El coeficiente de determinación representa la variación de la variable respuesta que explica la relación con más variables. El R ajustado no es significativo para la regresión. Lo que implica que la variación en la variable dependiente no se explica por las independientes. Los estadísticos t no son valores significativos. Las variables independientes no explican el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

### 3. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los mapas generados con el método de interpolación Kriging, para las variables de precipitación, temperatura, humedad relativa y evaporación para los años de 1996 y 2018, se evidenció que en las zonas donde operan las centrales hidroeléctricas, la central térmica y los embalses para suministro de agua potable, se presentan cambios en el comportamiento de las variables. Sin embargo, se considera necesario realizar el estudio con otras variables climatológicas, como brillo solar y radiación ya que aportaría información sobre la tendencia climatológica de la zona.

Las variables que presentaron mayor desviación estándar del año 1996 al 2018 fueron la humedad relativa y evaporación. La precipitación y la temperatura no mostraron mayor variabilidad en el comportamiento. Estructuralmente se identificó, que, para realizar un estudio de este tipo, se debe contemplar la topografía de la zona, ya que teniendo en cuenta las pendientes y alturas se puede visualizar puntos de observación bien distribuidos. En este caso, si bien las mediciones estaban ubicadas homogéneamente, el área estaba caracterizada por dos espacios específicos, la del norte y la del sur, en el cambio de dichas alturas no se tenían puntos apropiados de medición, por lo que no fue posible obtener modelos de interpolación con errores bajos.

Mediante el análisis exploratorio de datos espaciales, se determina que existe auto correlación espacial para cada una de las variables analizadas. Sin embargo, se considera que mejoraría el análisis de las variables climatológicas, el aumentar la cantidad de observaciones y así también mejorar la muestra, ya que para las variables de precipitación, humedad relativa y evaporación no fue posible estructurar un modelo idóneo para la interpolación.

En cuanto a la información geográfica de la CAR encontrada para la zona de estudio, es evidente que es escasa, por lo tanto, se recomienda para otras investigaciones, buscar fuentes adicionales que permitan tener una muestra significativa para el análisis.

Para todas las variables se utilizaron 5 categorías de intervalos, las cuales fueron obtenidas por medio de la regla de sturges, para el análisis exploratorio se utilizaron los histogramas y mapas de voronoi, en cuanto a las tendencias, se observó que en las variables no existe estacionariedad y hay anisotropía de norte a sur.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fundación Estatal para la formación en el Empleo, ¿Qué es la geoestadística y cuáles son los principales análisis geoestadísticos?, Geoinnova, 11 julio 2019. En : <https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-la-geoestadistica-analisis-geoestadisticos/>. (03 marzo 2022).
- [2] Pei Z., Fang S.Y.W., Wang L., Wu M., Zhan Q., Han W. y Dao K., The Relationship between NDVI and Climate Factors at Different Monthly Time Scales: A Case Study of Grasslands in Inner Mongolia, China (1982–2015), Sustainability, vol. 11, nº 7243, p. 24, 17 diciembre 2019.
- [3] Pinzón P.A., Efectos sobre la Precipitación y Escorrentía de la Cuenca del Río Guavio asociados a un Embalse (Trabajo de Grado) (2021) Universidad Santo Tomás. Bogotá.
- [4] Alvarez R. y Isabel A., Identificación de Impactos en el sector agrícola y en la energía disponible de Central Hidroeléctrica AES Chivor, asociados a la variación en el mesoclima producto de la formación antrópica de la lámina de agua del embalse La Esmeralda (Trabajo de Grado) (2015), Universidad La Salle. Bogotá.
- [5] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca- CAR, «Histórico de series hidrometeorológicas,» CAR, En: <https://www.car.gov.co/vercontenido/2524>. (06 marzo 2022).
- [6] Boada A., «Presentación Power Point Geoestadística,» (2021) Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.
- [7] Pinzón A., Estudio de la tasa de mortalidad por COVID 19 y pobreza multidimensional mediante el análisis de autocorrelación espacial en el departamento de Cundinamarca (Trabajo de Grado) (2021), Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.
- [8] Macías R., Estadística Descriptiva, Revista Alergia, México, vol. 63, nº 4, pp. 397-407, 2016.
- [9] Ortiz L., Análisis multitemporal de la temperatura media y precipitación total determinados por métodos geoestadísticos desde años 2005 a 2019 de Bogotá D.C, Colombia (Trabajo de Grado) (2020). Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.

- [10] International Hydropower Association, «IHA,» 2022. En: <https://www.hydropower.org/country-profiles/colombia>. (01 marzo 2022).
- [11] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, «Picocentrales Hidroeléctricas. Instructivo de Instalación y Montaje.,» Bogotá, 1998.
- [12] Palacios R. A., Inventario Documentado de Represas en Colombia, Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2013.
- [13] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca- CAR, «Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá,» Bogotá, 2006.
- [14] Alcaldía Mayor de Bogotá, «-Así se genera energía con las aguas del Río Bogotá.,» Secretaria de Ambiente de Bogotá, 24 junio 2020. En: <https://oab.ambientebogota.gov.co/asi-se-genera-energia-con-las-aguas-del-rio-bogota/>. (03 marzo 2022).
- [15] IDEAM, «Atlas Climático de Colombia,» Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá, 2005.
- [16] IDEAM, «Metodología de la Operación Estadística Variables Meteorológicas,» Bogotá, 2018.
- [17] «Decreto 2811 de 1974, por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Tenovables y Protección del Medio Ambiente,» 18 diciembre 1974. En: [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=1551](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=1551). (03 marzo 2022).
- [18] ESRI, Función NDVI, ArcMap, En: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/ndvi-function.htm>. ( 02 03 2022).
- [19] ENEL, «Nuestras Centrales,» ENEL, 2018. En: <https://www.enel.com.co/es/conoce-enel/enel-generacion/centrales-electricas.html>. (05 marzo 2022).