

**APLICACIÓN DE METODOS DE INTERPOLACIÓN PARA EL CÁLCULO DE  
PRECIPITACIÓN POR MODELAMIENTO GEOESTADISTICO Y ANÁLISIS  
ESPACIAL PARA EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA.**

**APPLICATION OF INTERPOLATION METHODS FOR THE CALCULATION OF  
PRECIPITATION THROUGH MODELING AND SPATIAL ANALYSIS  
GEOSTATISTICAL FOR DEPARTMENT CUNDINAMARCA.**

Jenny Mariluz Rodríguez Santos  
Ingeniera Catastral y Geodesta, DANE  
**afrojenny@gmail.com**

**RESUMEN**

La Geoestadística es la rama de la estadística que se encarga del análisis de fenómenos espaciales que exhiben un comportamiento estructural, en este caso se centrado en el análisis de la variable precipitación a partir de cuatro métodos de interpolación que permitan obtener una delimitación más acorde del área de estudio. Para ellos se analiza una serie de estaciones pluviométricas que están ubicadas en el departamento de Cundinamarca las cuales arrojan una serie de datos que fueron agrupados mediante precipitación anual, permitiendo un modelamiento y estudio a partir de análisis geoestadístico. Por otro lado se cuenta integrado con un modelo digital que describe la geomorfología de la zona estudio, pero como tal no estará asociado a las ecuaciones a modelar. El estudio planteado está enfocado en el desarrollado por técnicas de análisis espacial que cuenta con la información de 136 estaciones pluviométricas tomando como base el año 1986, estas se encuentran previamente georeferenciadas. Este análisis tiene como premisa extraer un modelo geoestadístico mediante el uso de métodos como el Kriging ordinario ( $Z(X) = \lambda Z(X) + \lambda Z(X) + \lambda Z(X) + \dots + \lambda_n Z(X_n)$ ), el cual se reconoce como un método de interpolación exacto que suaviza la función del modelo de error de medición, permitiendo así investigar de manera espacial el nivel de correlación por métodos estadísticos. Todo esto permite resaltar mediante el error estándar y error medio cuadrático la predicción de la información de precipitación obtenida. Luego del análisis se planteara cuál de los métodos estudiados es el que presenta una mejor predicción de áreas de precipitación y cual presentó menor error.

Para el tratamiento de la información se utilizó el software ArcGIS. En un primer paso se realizó un análisis exploratorio de los datos y un esquema de clasificación visualizando claramente la distribución espacial de la variable de estudio. Luego, de ello se realizó el análisis geoestadístico que evidencia el comportamiento a nivel espacial de los distintos modelos, para llegar al objetivo planteado.

**Palabras clave:** Kriging, IDW, ArcGis, Datos, Lognormal.

## ABSTRACT

Geostatistics is a branch of statistics that deals with the analysis of spatial phenomena that exhibit structural behavior, in this case focused on the analysis of rainfall varying from four interpolation methods to output a definition more in keeping with the area study. For them a number of rainfall stations that are located in the department of Cundinamarca which show a series of data were grouped by using annual rainfall and allowing modeling study using geostatistical analysis is discussed. On the other hand there is integrated with a digital model that describes the geomorphology of the study area, but as such will not be associated to equations modeling. The proposed study is focused on the developed spatial analysis techniques that have information of 136 rainfall stations based on the year 1986, these are previously geotagged. This analysis is premised extract a geostatistical model using methods like ordinary Kriging  $Z(x) = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \dots + \lambda_n Z(x_n)$ , which is recognized as a method for accurate interpolation function that smoothes the measurement error model, allowing spatially investigate the correlation level by statistical methods. This allows controlled highlighting standard error and mean squared error of prediction information obtained precipitation. After the analysis is raised which of the methods studied is having a better prediction of precipitation and areas which showed a lower error.

For information processing software used ArcGIS. In a first step an exploratory data analysis and classification scheme clearly visualizing the spatial distribution of the variable of study. Then geostatistical analysis of this evidence that spatially behavior of the different models was performed, to reach the stated goal.

**Keywords:** Kriging, IDW, ArcGIS, Data, Lognormal.

## INTRODUCCIÓN

La precipitación es considerada como uno de los recursos naturales de gran valor, que permiten plantear estudios que apoyen el proceso de planificación a largo plazo en diferentes sectores, en este caso en particular el análisis del departamento de Cundinamarca, que tendrá como premisa el análisis por métodos de interpolación de las estaciones puntuales el cual permita obtener un resultado óptimo para el recurso hídrico establecido para esta zona.

Es de resaltar que a medida que ha transcurrido el tiempo se han creado diversos metodologías de interpolación, así como también diferentes autores han realizado propuestas que explique adecuadamente métodos que ajusten la variable precipitación, lo que se busca es mostrar que estos análisis no solo dependen de una metodología precisa sino de factores externos tales como lo son las características geomorfológicas del sector.

El objetivo principal es el desarrollo de cuatro métodos de interpolación que permitan estimar las áreas de predicción de precipitación a partir de información anual, estimados a partir del análisis de error generado por metodología en la aplicación puntual del área de estudio, resaltando que la elección del mejor modelo cumple con un margen de confiabilidad.

El área de estudio está localizada en el departamento de Cundinamarca el cual se encuentra situado en la parte central del país, entre los  $03^{\circ}40'14''$  y  $05^{\circ}50'11''$  de Latitud Norte y  $73^{\circ}03'08''$  y  $74^{\circ}53'35''$  de Longitud Oeste. Cuenta con una superficie de 24.210 km<sup>2</sup> lo que representa el 2.12 % del territorio nacional. Limita por el Norte con el departamento de Boyacá; por el Este con los departamentos de Boyacá y Meta; por el Sur con los departamentos de Meta, Huila y Tolima, y por el Oeste con el río Magdalena, que lo separa de los departamentos de Tolima y Caldas. [1]

En cuanto a la parte hidrológica al occidente del departamento, se encuentra el Río Magdalena el cual emerge como el principal afluente fluvial del departamento, especialmente en el puerto de Girardot. Otro río muy importante es el Bogotá, que nace en el alto de la Calavera Villapinzón y desemboca en el Magdalena, luego de pasar por el Salto del Tequendama, ubicado a 30 km al suroeste de Bogotá, a 2.467 metros sobre el nivel del mar, con una caída de agua de aproximadamente 157 metros. Se encuentran como relevantes los ríos Guavío y Humaca.

Por otra lado se tiene el río Sumapaz nace en el páramo del mismo nombre, el más alto del mundo. Este hace parte del Parque nacional natural Sumapaz, que se extiende al departamento del Meta.

Es de resaltar la presencia de otros cuerpos de agua tales como lagunas del Guatavita, Fúquene, Chisacá, Sibaté, Tominé, La Regadera, El Hato y las represas de Chingaza, Néusa, Sisga y el Guavio. Esta última, conocida como la Central Hidroeléctrica del Guavio es la represa más grande de Colombia.

El territorio corresponde a la Cordillera Oriental que penetra por el sur formando el complejo de los páramos de Sumapaz y de Cruz Verde; en su parte media presenta la altiplanicie de la Sabana de Bogotá; y más al norte el valle de Ubaté y Simijaca. Los sectores planos y cálidos del departamento corresponden al valle del Magdalena y la parte de los Llanos Orientales.

## 1. METODOLOGÍA

Como primera medida se hace un análisis previo sobre los datos a estudiar, este proceso es de vital importancia ya que de estos depende un buen resultado. Para ello se debe crear un Shape de puntos a partir de datos de coordenadas geográficas o planas.

Para ello tanto las estaciones como el límite de la zona de estudio se deben encontrar dentro del sistema de coordenadas Magna Sirgas, de no ser así se puede arrojar como resultado, que la anisotropía que se presenta en la precipitación que describe cada una de las estaciones, la cual describe el comportamiento de la variable se encuentra en sentido contrario a la geomorfología de la zona lo que podría arrojar como primera conclusión preliminar que las estaciones se encuentran mal sembradas como lo muestra la grafica a continuación:

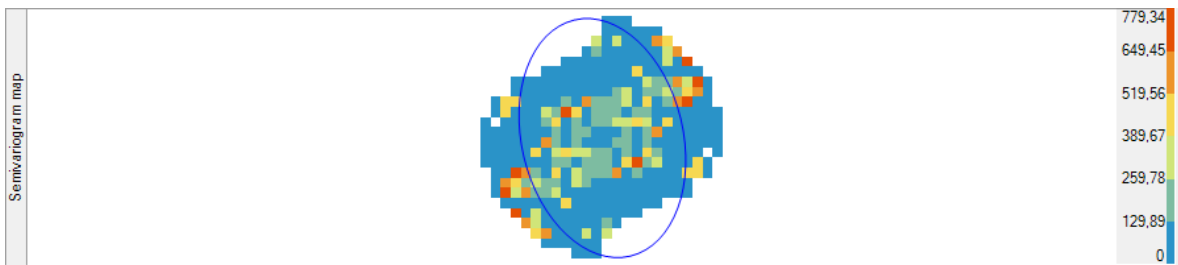


Figura 1 Anisotropía

Pero si revisamos la información base nos muestra que no nos encontramos dentro del origen correspondiente al Departamento de Cundinamarca sino dentro de los Departamentos del Casanare y Vichada. Una vez proyectada la información a modelar se puede proceder a realizar el análisis adecuado, aclarando previamente que no se presentaba un problema del sembrado de las estaciones sino de sistema de coordenadas.



Figura 2 Zona de Estudio

Para este estudio se utilizó información promedio anual como se nombro anteriormente, la cual es proveniente de 136 estaciones integradas en la base de datos del IDEAM pluviométricas agrupadas entre los 180 y los 3477 msnm, agrupando información como lo son el código de la estación, nombre, Municipio al que pertenece, nombre de la Subcuenca, elevación a la que se encuentra la estación, con sus respectivas coordenadas (Latitud y Longitud) y la precipitación anual arrojada por estación.

Los municipios de precipitación más baja corresponden a Subate y Lenguazaque y los más altos corresponde a Medina y Guayabetal.

Tabla 1 Información 136 Estaciones

CODIGO	NOMBRE	SUBCUENCA	MPIO	ELEVACION *	LATITUD *	LONGITUD *	PREC_AN
2312019	LOS PINOS	NEGRO	TAUSA	3477	5,2444	-74,0378	1359
2401055	EL HATO N 4	EL HATO	CARMEN DE CARLU	3465	5,2286	-73,9561	1400
2401054	EL HATO N 3	EL HATO	CARMEN DE CARLU	3398	5,2597	-73,9625	838
2401058	EL HATO N 7	EL HATO	CARMEN DE CARLU	3271	5,2394	-73,9231	1008
2120174	MANJUI	BALSILLAS	FACATATIVA	3260	4,8069	-74,3906	1060
2120106	PANTANO REDON	FRIO	ZIPAQUIRA	3160	5,0414	-74,0411	711
2120138	ENCANTO EL	SUTA	TAUSA	3150	5,1717	-73,8932	646
2120088	SALITRE_EL_NEUS	NEUSA	TAUSA	3140	5,1833	-74	856
2401044	TRES_ESQUINAS	SUSA	SUSA	3130	5,3833	-73,85	461
2401057	EL HATO N 6	EL HATO	CARMEN DE CARLU	3105	5,2431	-73,945	1700
2120122	STA_CRUZ_DE_SI	SIECHA	GUASCA	3100	4,8333	-73,8833	1400

La bondad de ajuste de los métodos de interpolación depende de múltiples factores característicos de la zona de estudio, como el tamaño, la forma, la orientación, la orografía, así como de la naturaleza de las variables que se quieran interpolar, la densidad de datos existentes y la escala temporal de las variables que se elijan para realizar.

Para la ejecución de estos métodos se realizó desde el Software ArcGis 10.1 con la herramienta Geostatistical Analyst la cual permite explorar la variabilidad de datos examinando tendencias globales y permitiendo investigar a su vez la autocorrelación y la correlación entre los datos seleccionado así como también crear predicciones y calcular errores de predicciones que es el fin de este proyecto.

Es de resaltar que la tendencia de los datos son un gran indicador para realizar un análisis estructural ya que tanto como el número de estaciones como la información arrojada en cada estación pueden influir en la realización del modelo geoestadístico.

El primer método utilizado de Interpolación corresponde al de distancia inversa ponderada (IDW) como primera instancia para generar los mapas de distribución espacial de precipitación anual. Este método interpola los datos de una muestra dándole mayor peso a los valores que se ubican más cerca y menos a los lejanos.

Por lo que se considera que el peso de cada muestra es inversamente proporcional a la distancia desde el punto que se está tomando la muestra.

Luego de obtener el resultado por IDW, se hace una estimación mediante otro método de optimización que se encargue de predecir el valor de la variable precipitación en las diferentes zonas donde se encuentran ubicadas las estaciones de Cundinamarca, este procedimiento analítico se realiza mediante el método de Kriging, en cual se caracteriza por tener en cuenta no sólo la distancia entre las muestras, sino también la estructura espacial de los datos, se centra en minimizar la varianza del error esperado (diferencia entre el valor real y el valor estimado), además de esto ofrece dos tipos de estimación: puntual o en bloque y permitir la incorporación de variables auxiliares, establece la calidad de la predicción en cada punto, mediante el cálculo de la respectiva varianza de la estimación [1], método que al compararlo con IDW presenta más propiedades para delimitar las áreas de predicción y de error.

Para utilizar Kriging se pueden realizar combinaciones lineales o no lineales de los valores de las muestras como se describe a continuación: [1]

Kriging simple: Válido cuando los fenómenos son estacionarios, de esperanza ( $m$ ) y covarianza conocidas y constantes

$$Z(X_0) = \sum_i m_i * Z(X_i)$$

Kriging ordinario: Útil para estudiar procesos estacionarios, de esperanza ( $m$ ) constante y desconocida..

$$Z(X) = \lambda_0 Z(X_0) + \lambda_1 Z(X_1) + \lambda_2 Z(X_2) + \dots + \lambda_n Z(X_n)$$

Kriging Lognormal: Se caracteriza por ser la aplicación del Kriging Ordinario a los logaritmos de los datos originales.

$$Y(X_0) = \sum_i Y(X_i)$$

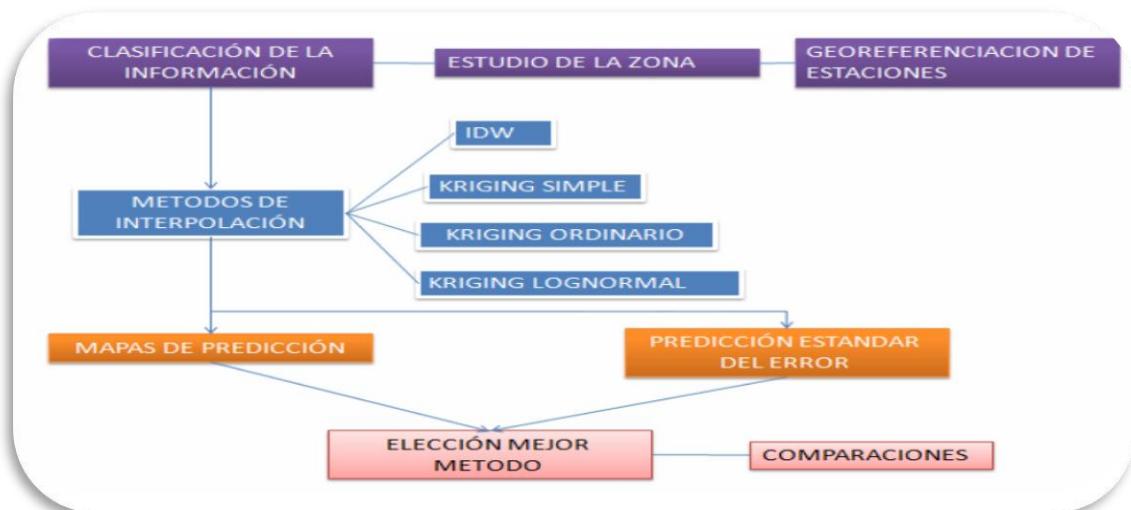


Figura 3 Metodología

## 2. RESULTADOS

Las graficas descritas a continuación muestran como se agruparon los datos arrojados por cada estación, mostrando un rango dentro de los 376 6825 mm de precipitación anual los cuales corresponden a las 136 estaciones sembradas en la zona de estudio. Para ello cada método hace una predicción de estos datos mostrando una tendencia previa muy parecida dentro de los 4 modelos establecidos;

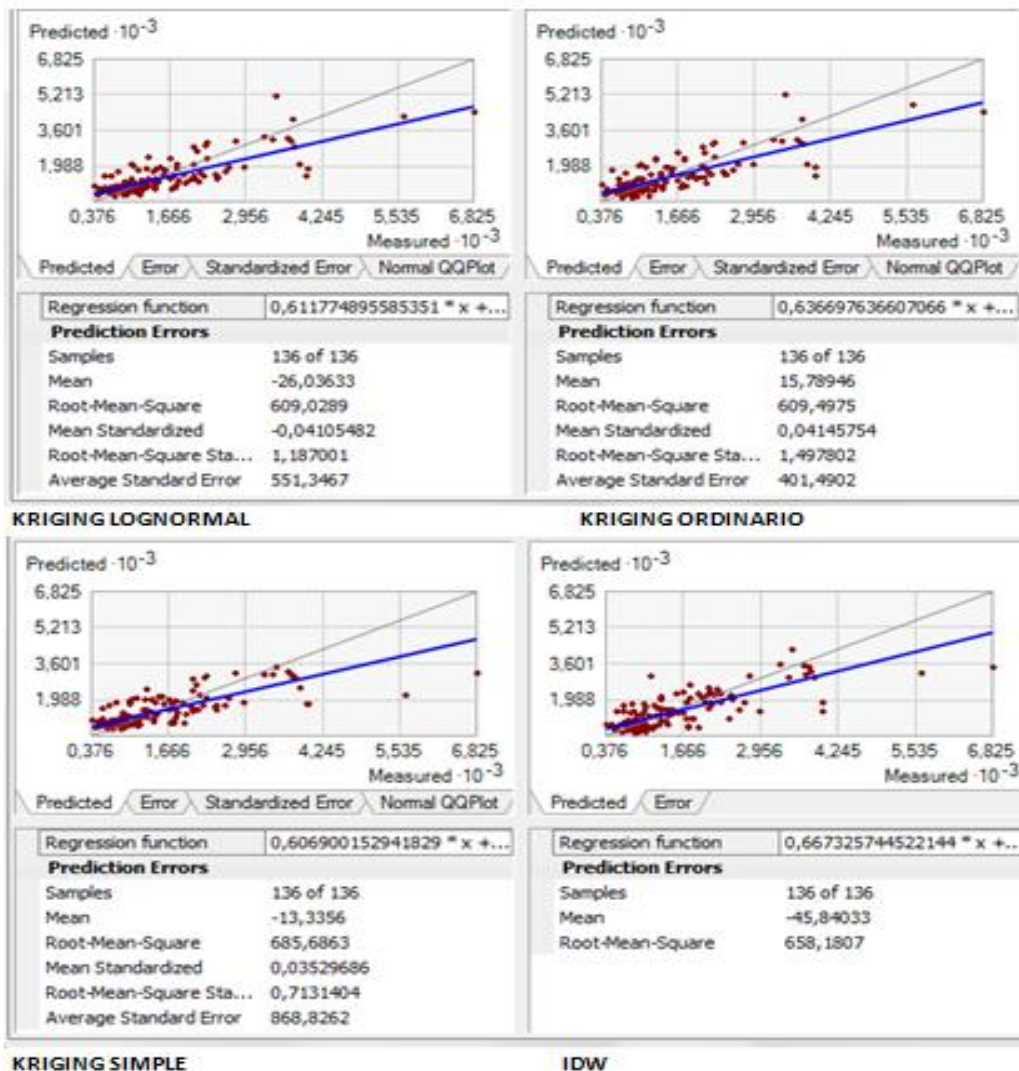


Figura 4 Predicción Métodos Interpolación

Aunque en las graficas de la predicción no representan muy bien las diferencias entre los métodos, estas se visualizaran mas al detalle en la generación de mapas de



interpolación y se podrá observar cual es la mejor muestra una mejor selección de áreas mediante el error estándar.

Calculado el error medio cuadrático se analiza que entre menor sea el error de cada una de las predicciones arrojadas de las 136 estaciones mejor será el ajuste del modelo y mejor será la calidad del mapa. Por ende se generara una mejor clasificación de la predicción de áreas por zonas por lo cual se considera por previa aproximación el mapa de clasificación Kriging Lognormal, como se describe en la tabla a continuación:

Tabla 2 Error Estándar Modelos

<i>IDW</i>	<i>KRIGING SIMPLE</i>			<i>KRIGING ORDINARIO</i>			<i>KRIGING LOGNORMAL</i>		
Error	Error	StdError	Stdd_Error	Error	StdError	Stdd_Error	Error	StdError	Stdd_Error
-396,120144	-186,820288	221,04658	-0,845163	-334,688608	411,236191	-0,81386	-62,494066	198,445784	-0,314918
-545,641883	18,096296	272,30311	0,066456	-150,628905	401,520294	-0,375146	-199,271633	215,921837	-0,922888
-120,674858	90,943555	255,198231	0,356364	-363,665442	390,953753	-0,930201	-471,953517	201,158192	-2,346181
-270,906607	296,223755	268,248985	1,104287	-95,244486	376,37536	-0,253057	-28,307915	223,879903	-0,126442
-343,89131	-184,666859	264,302139	-0,698696	-512,296786	379,503936	-1,349912	-205,672981	210,557931	-0,9768
-322,958297	30,685476	309,10822	0,099271	-66,500633	413,349485	-0,160882	-132,011326	210,432746	-0,627333
-301,663407	290,082089	311,013671	0,932699	-225,454363	380,195113	-0,592996	282,150125	212,203758	1,329619
-252,289888	193,645761	308,719625	0,627254	-140,928966	379,707944	-0,371151	125,371963	219,83795	0,570293
-71,505479	-50,570413	358,417435	-0,141094	276,077419	382,242148	0,722258	80,763122	236,396233	0,341643
123,282314	-37,891049	325,32328	-0,116472	106,513538	375,567476	0,283607	-50,342752	243,40493	-0,206827
-215,146132	-23,660752	365,194208	-0,06479	143,406968	371,750424	0,385761	-246,719963	241,960394	-1,019671
-55,350333	-312,598838	358,811575	-0,871206	189,94793	371,834661	0,51084	195,051228	231,824029	0,841376
-1075,7402	387,550157	337,30298	1,148967	293,595404	375,297164	0,782301	-157,478087	251,107565	-0,627134
-132,849195	-74,198925	350,104302	-0,211934	-15,527653	377,614109	-0,04112	307,441531	236,93211	1,297593
-192,897896	-28,043763	359,312736	-0,078048	-233,07266	383,881248	-0,607148	231,985428	249,945684	0,928143

### Validación de los mapas

Para evaluar el ajuste de los modelos de interpolación se realiza sobre una área específica sin la utilización de mascara que permite delinear el límite del Departamento, todo esto debido a que se realizaron pruebas y estas dejaban zonas sin representación generando variación en los rangos arrojados por cada métodos, para ello se hace un clip, el cual hace el corte del límite sin hacer cambio alguno sobre las clases. Cada uno de ellos agrupando rangos de predicción que deben estar acordes a las características de la zona y de los datos descritos por cada estación.

Para tener más coherencia con la información descrita se hizo una representación del Departamento, mediante un modelo digital de terreno (DEM), como se visualiza en la figura



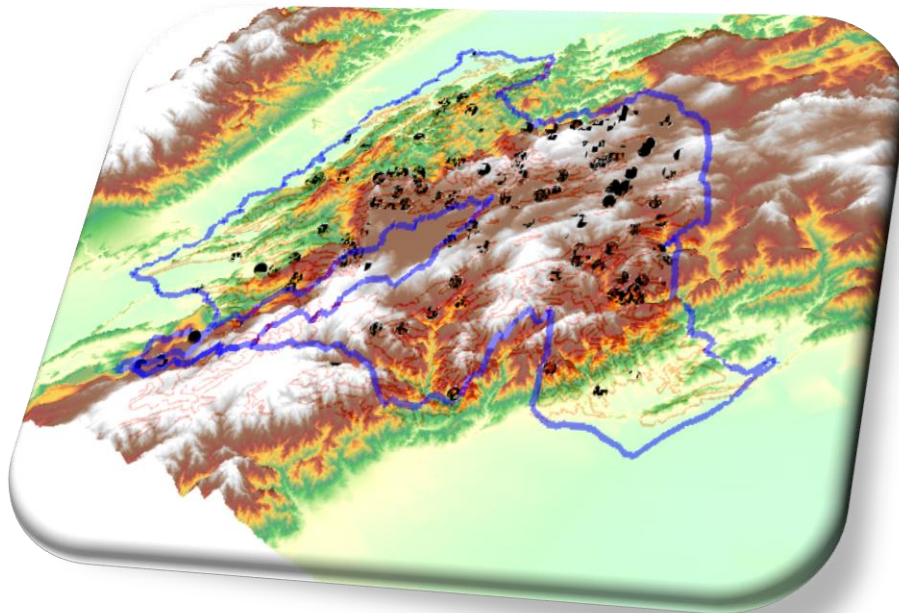


Figura 5 DEM Cundinamarca

Mostrando así la coincidencia de la Anisotropía la cual describe una dirección acorde con la geomorfología de la zona de estudio.

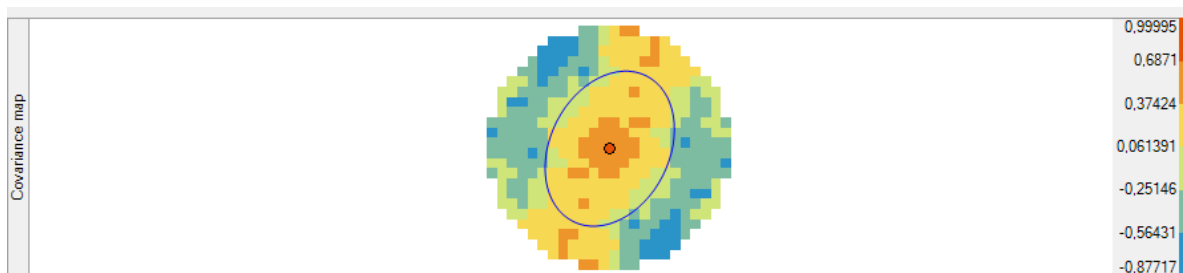


Figura 6 Anisotropía Ideal

Los rangos definidos por la herramienta ArcMap en las extensión de Geoestadística fueron clasificados en 10 clases para los cuatro métodos ejecutados, donde los colores de la clase roja es donde se produce mayor intensidad de precipitación y el azul es la clase de menor rango, según la veracidad del modelo estos deben que coincidir con las zonas descritas.

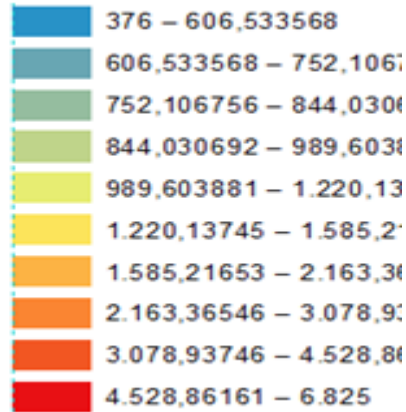


Figura 7 Rangos Clasificación

Los resultados arrojados a continuación que aseguran la calidad del mapa fueron evaluados mediante la técnica de validación cruzada dentro del software ArcGis este muestra dos grandes ventajas; primero la estimación del error no tiende a ser muy variable dependiendo de cuáles datos quedan en la tabla de aprendizaje es decir representa una estimación del error mucho más estable. Segundo no se tiende a sobrestimar la estimación del error, es decir, es mucho mayor el error en la tabla de iteraciones que en toda la tabla de datos. por ende los mapas arrojados dieron el siguiente resultado, realizando una comparación con respecto a la predicción del error obtenemos.

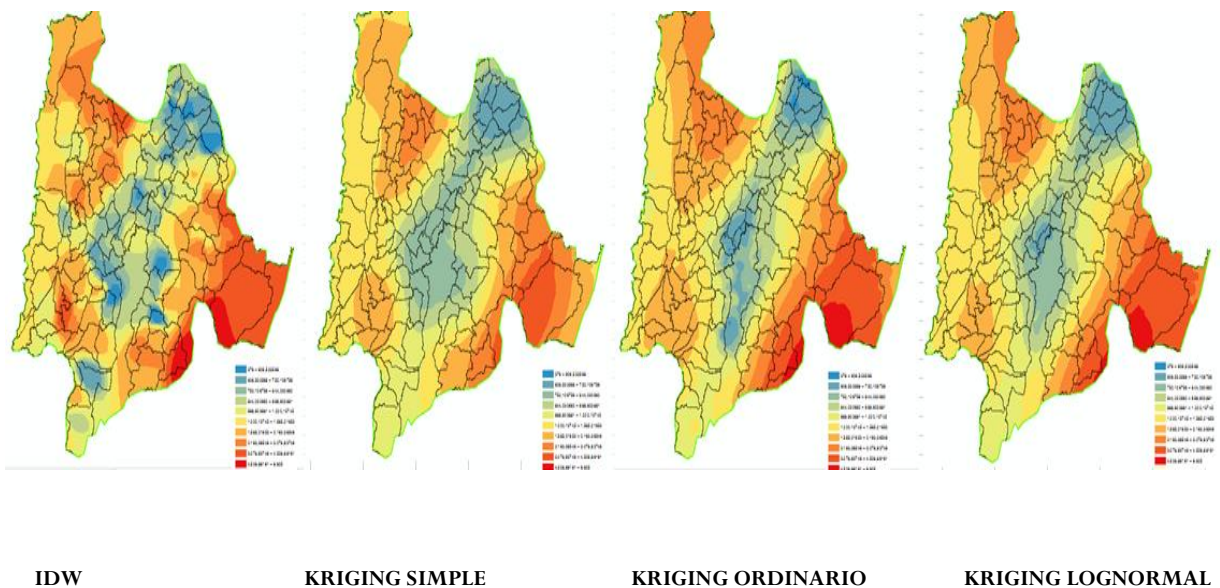


Figura 8 Mapas Predicción Precipitación

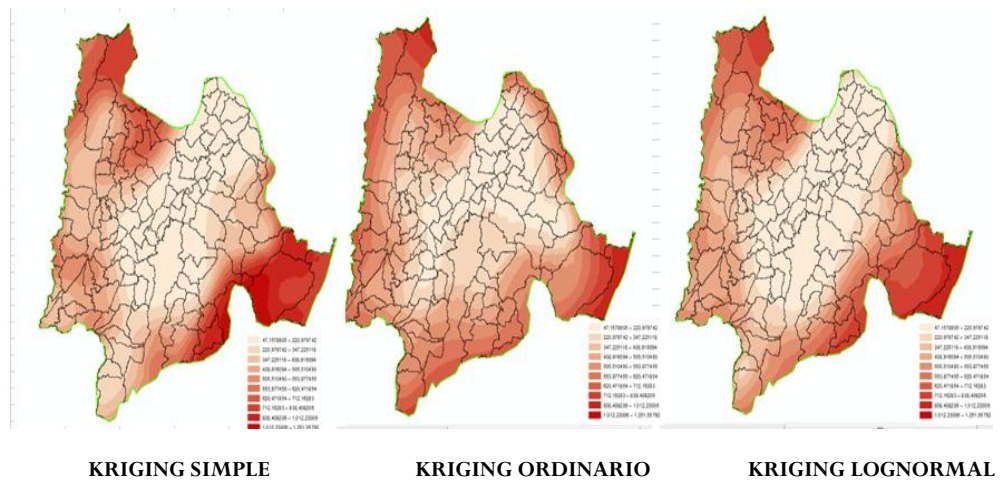


Figura 9 Mapas Predicción Error

Con el método IDW se presenta mayor variabilidad espacial para las estaciones con valores extremos y con Kriging se obtuvieron mapas con un grado de mayor suavizado evidente en los tres últimos modelos,

En este estudio preliminar se muestra que para caracterizar las áreas de predicción de precipitación, el método Kriging genera una reducción en la variabilidad pero en términos generales es el más adecuado para generar mapas que describen la distribución espacial de áreas con diferente cantidad de eventos. Sin embargo, para otro tipo de estudio se debe realizar un análisis más detallado en las variables que se quieran estudiar, teniendo en cuenta la ocurrencia de datos aleatoria y puntual como en el caso de este modelo que se centro en la precipitación anual.

Dado que en este caso el número de estaciones estaba distribuido de manera el irregular el IDW se considera como con una representación con un variabilidad puntual optima la cual es bueno que se muestre este tipo de variables. Pero con el fin de estudiar de forma correcta la variabilidad de la zona el método Kriging es el más acertado en ese caso.

La observación detallada del mapa resultante del método Kriging Lognormal comparado con los otros métodos se considera finalmente con el mejor método para este tipo de análisis, ya que error medio cuadrático es menor en el área de estudio, lo que indica que el modelamiento de la información fue mejor distribuida, mostrando como los valores originales de las estaciones se pueden transformar para que sigan una distribución normal estándar.

Por otro lado se quiso comprobar si el método elegido es igual de eficiente para la información de unas estaciones sembradas dentro de la cuenca del río Bogotá con información de precipitación diaria.

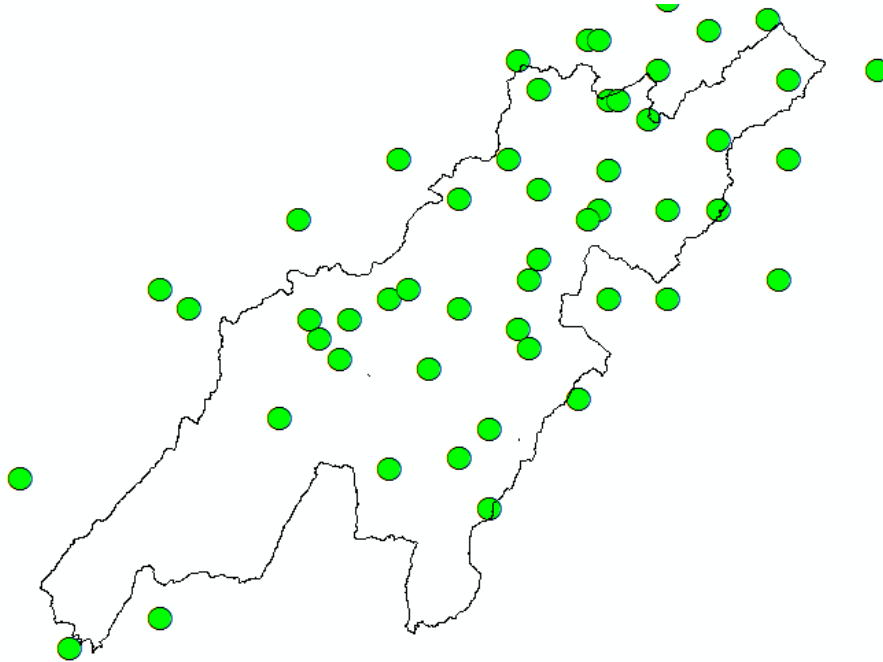


Figura10 Zona Comparación Modelo

Se tomaron 51 estaciones distribuida de manera irregular como se hizo inicialmente.

Tabla 3 Estaciones Comparativas

CODIGO	ESTACION	TIPO	ELEV	PREC. DIA
21170020	LAS DOS AGUAS	PM	306	0
21190210	NILO	PM	490	0
21190410	LA GRANJA HDA	PM	1120	0
21200260	VENTALARGA	PG	3062	12
21200270	SAUCIO	PG	2670	6
21200430	VILLAPINZON	PG	2723	0
21200440	PRADERA LA	PM	2703	29
21200690	TESORO-VERTIENTES	PM	2610	8
21200710	MARGARITAS LAS	PM	2606	7
21200740	ZIPAQUIRA	PG	2655	0
21200750	BOJACA	PM	2603	0
21200770	TORCA	PM	2579	10
21200800	SAN JOSE	PG	2700	0
21200850	CHISACA	PM	2880	2,8
21200880	SALITRE EL - NEUSA	PG	3140	17,3
21200960	CONSUELO EL	PG	2960	0
21201030	STA TERESA	PG	3080	2,9
21201040	TOCANCIPA	PM	2580	3,5

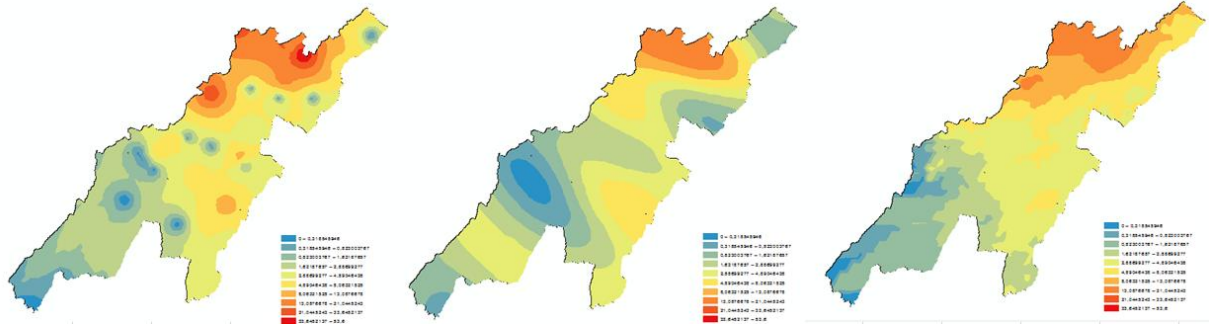
Los resultados obtenidos describen un margen de error menor en el método Kriging Ordinario.



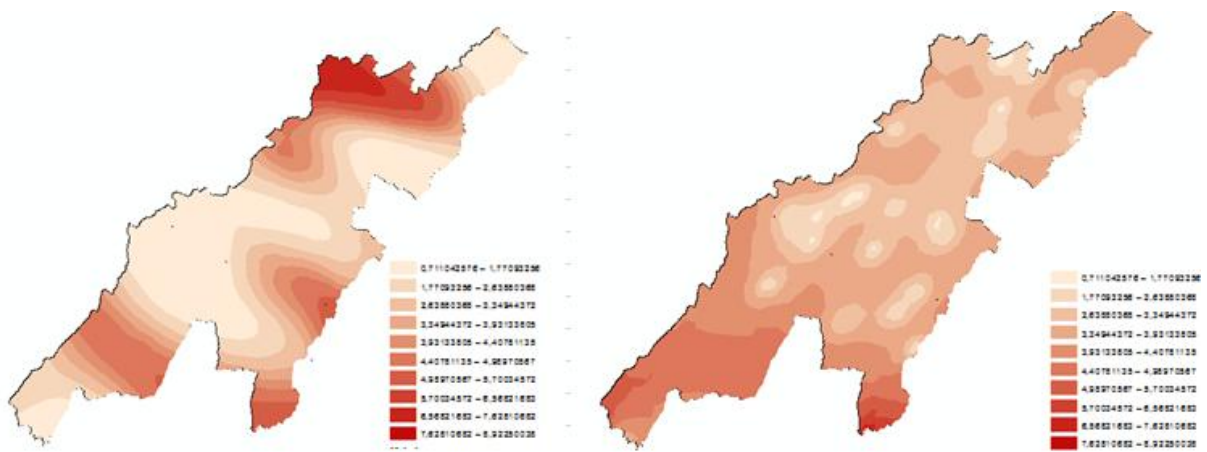
Figura 11 Predicción Métodos Interpolación Comparativo

La generación de mapas de interpolación describen como este tiene un mejor suavizado con Kriging Simple, aunque el error sea menor en Kriging Ordinario, con respecto a los otros modelos, pero centrados en el Kriging Lognormal se concluye que el modelo elegido no es aplicable a este planteamiento, ya que la precipitación diaria en diferentes estaciones arroja información sin dato alguno, lo que es normal porque cuando se produce el fenómeno no necesariamente debe ocurrir en toda la zona donde se encuentran las estaciones y matemáticamente no es válido este tipo de procedimiento.





**IDW**                      **KRIGING SIMPLE**                      **KRIGING ORDINARIO**  
 Figura 12 Mapas Áreas Predicción Comparativo



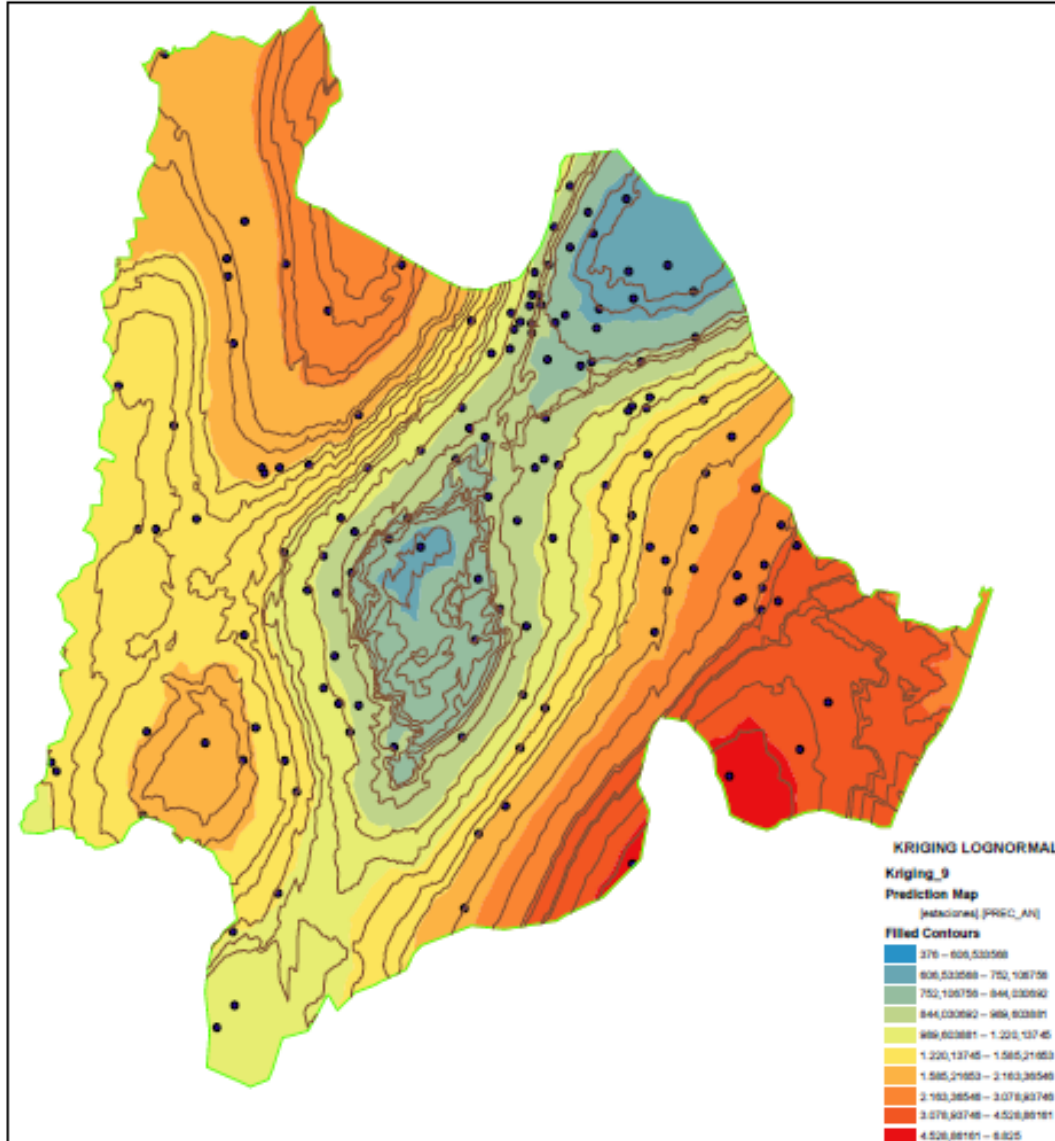
**KRIGING SIMPLE**                      **KRIGING ORDINARIO**

Figura 13 Mapas Predicción Error Comparativo

Por ende se elige para esta discusión el Kriging Simple, lo que permite resaltar como cada variable tiene un comportamiento único, dependiendo de diferentes factores arrojando resultados de distintas clases.

# SALIDA MODELO FINAL

## MAPA DE AREAS DE PREDICCIÓN DE PRECIPITACIÓN PARA EL DPTO DE CUNDINAMARCA



REPÚBLICA DE COLOMBIA



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
Especialización en Geomática



KRIGING LOGNORMAL

2014



### **3. CONCLUSIONES**

En diferentes estudios muestran como el método de interpolación Inversa de la Distancia Ponderada, se usa normalmente para el análisis de precipitación, para proporcionar información de precisión, pero como se pudo comparar existen distintos factores como lo es la geomorfología, orografía entre otros que pueden cambiar el modelamiento de este tipo de estudios.

Al haber realizado cuatro métodos de interpolación y comparando resultados con nuestro dato objetivo (precipitación anual) vemos como estadísticamente mediante la validación cruzada y cartográficamente con la generación de mapas de áreas por interpolación los métodos evaluados por Kriging contribuyen más por distintos factores.

Primero se consiguen un resultado estadístico más acertado, con un margen de error menor y segundo se presenta un mejor suavizado de los mapas lo que permite una distinción más precisa dentro de la zona con respecto a los 10 rangos clasificados.

Por ende solo queda resaltar como las aplicaciones en Geoestadística nos pueden brindar grandes aportes en el campo de la Geomática ligada por medio de un análisis espacial generando un buen modelamiento para el Departamento de Cundinamarca . Llegando a cumplir con el mejor ajuste del modelo y por ende mejor calidad del mapa de predicción de áreas de precipitación.

### **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia por su incondicional apoyo, a los Ingenieros Jorge Corredor y Jorge Valero por las enseñanzas impartidas y sobre todo a Dios por ser mi guía diaria.

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] J. A. Valero Fandiño, TOPICOS GEOESTADISTICA, Bogotá: UMNG, 2014.

[2] A. Matinez, «Departamento Cundinamarca,» *Toda Colombia*, 2011.