COMPARACION DE ALGORITMOS DE INTERPOLACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE MDE EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ UTILIZANDO PUNTOS GEODÉSICOS.

Jairo Fabián Niño Ortiz
Ingeniero Catastral y Geodesta.
Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada.
Especialización en Geomática.
Bogotá, Colombia
jaironinoo@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se generan varios modelos digitales de elevación (MDE) a través de distintos métodos de interpolación utilizando la posición y altura de un conjunto de puntos geodésicos distribuidos en la ciudad de Bogotá y posteriormente se realiza la comparación del resultado de estos métodos contra el modelo digital de elevación obtenido a través de sensores remotos, para el caso de este ejercicio corresponde al satélite ASTER, a continuación se analizan las diferencias obtenidas para así poder determinar cuál es el algoritmo que más se ajusta al obtenido y plantear la viabilidad de usar las coordenadas de puntos obtenidos de levantamientos en campo como insumo para la rápida y efectiva generación de MDE que se aproximen suficientemente a la realidad geográfica.

Palabras Clave: Modelo Digital de Elevación, puntos geodésicos, Bogotá, Aster.

ABSTRACT

In this job several digital elevation models (MDE) are generated through different interpolation methods using the position and height of a set of geodetic points that are distributed all around Bogotá and then the comparison of these methods' results with the digital elevation model obtained through the use of remote sensors is made; For this specific case, we used ASTER satellite. Then, the differences obtained are analyzed to be able to determine which is the algorithm that best adapts to the obtained one and to propose the viability to use the points' coordinates obtained through the field surveys as an input for the fast and effective generation of DEM that are sufficiently nearly to geographic reality.

INTRODUCCION

Un modelo es una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades (Joly, 1988), de esta definición se puede decir que el modelo pretende mostrar una característica o atributo especifico del elemento que está representando. “Los modelos se construyen estableciendo una relación de correspondencia con la realidad cuyas variantes pueden producir modelos de características notablemente diferentes” (Turner, 1970). Un modelo simbólico llega a un nivel de abstracción superior porque el objeto real queda representado mediante simbolización matemática, geométrica o estadística. Los modelos digitales del terreno se incluyen en esta última categoría y, consecuentemente, las relaciones de correspondencia que se establecen con el objeto tienen la forma de algoritmos o formalismos matemáticos. En este caso, los MDT presentan algunas ventajas sobre el resto de tipos de modelos, derivadas de su naturaleza numérica: no ambigüedad, posibilidad de modelización de procesos con una deducción estricta, verificabilidad y repetibilidad de los resultados.”[1]

Un MDE[2] es un tipo de MDT[3], es una herramienta de gran utilidad para la extracción de diversa información tal como:

- Mapa de pendientes.
- Curvas de nivel.
- Mapa de sombras.
- Mapa de visibilidad.
- Mapa de orientación.
- Trazados de perfil.

Los diferentes métodos que existen para construir un MDE se dividen en directos e indirectos.
Hacen parte de los métodos directos la restitución fotogramétrica y la digitalización, así como también los métodos directos mediante sensores remotos y los métodos directos sobre el terreno, estos últimos serán los usados para este documento ya que los puntos utilizados fueron obtenidos en terreno lo que permite estimaciones bastante precisas de latitud, longitud y altitud. Es importante resaltar que el principal inconveniente de realizar un trabajo de campo para la toma de estos puntos es el costo elevado que esto conlleva[4].

---

[1] A. M. Felicísimo, «Modelos Digitales del Terreno,» *Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales,* 1994.
[2] http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.
[3] A. M. Felicísimo, «Modelos Digitales del Terreno,» *Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales,* 1994. un MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua.
[4] Los datos de los puntos fueron suministrados por el IGAC.

Normalmente los MDE se obtienen a partir de información que se extrae de diversas fuentes, como:

- LIDAR.
- Satelites (TerraSAR-X).
- Interferometría.
- Procesos fotogramétricos.
- Digitalizando curvas de nivel previamente existentes.
- Coordenadas geodésicas y alturas de puntos.

Generar un MDE para un mismo sector geográfico a partir de estos insumos, hace que se presenten diferencias en la resolución debido a la variación en la distancia que existe ente los puntos adyacentes del MDE, cambiaria además, la cobertura geográfica ya que la disponibilidad y fiabilidad de los datos se alteraría de acuerdo a la forma en la cual se haya adquirido la información, no es igual generar un MDE a partir de datos adquiridos a través del satélite ASTER que generarlo a partir de puntos con coordenadas conocidas, porque estos puntos puede que no estén distribuidos apropiadamente en la zona de interés.

En la actualidad, buena parte de los MDE con los que se trabaja se obtienen a través de interferometría de radar (InSAR)[5], aunque en este trabajo de especialización se plantea la viabilidad de una alternativa diferente, como la de utilizar datos de coordenadas geodésicas y alturas niveladas para generar un MDE de toda la ciudad de Bogotá, no obstante, se debe tener presente la verificación de la influencia que tiene la densidad de puntos en la fiabilidad del producto final.

Con lo expuesto anteriormente se plantean los MDE como productos sumamente útiles para los profesionales de las ciencias de la tierra y que últimamente ha adquirido relevancia para profesionales de distantes ramas.

1. Objetivos.

1.1. General

Generar un MDE para la zona de Bogotá utilizando coordenadas de puntos geodésicos y estereoscópicos a través de diferentes algoritmos y comparar estos resultados con un MDE generado a partir del satélite ASTER.

1.2. Específicos.

1.2.1. Generar un MDE para Bogotá utilizando Kriging[6].

---

[5] Euillades Pablo et al (2002), «MODELOS DIGITALES DE ELEVACION PARA SIMULACION COMPUTACIONAL DE INUNDACIONES: INTERFEROMETRIA VS CARTOGRAFIA
El principio de la construcción de modelos de elevación a partir de imágenes satelitales radar se basa en los patrones de interferencia que se construyen a partir de dos imágenes radar coherentes de una misma zona tomadas desde ángulos diferentes. Estos patrones estarán directamente relacionados con la topografía de la zona y por lo tanto la información de altura puede ser obtenida a partir los mismos.

[6] Kriging: Método geoestadístico de interpolación en el cual se tiene en cuenta la autocorrelación entre los puntos medidos y de esta forma la superficie generada se puede considerar como una superficie predicha.

1.2.2. Generar un MDE para Bogotá utilizando IDW Distancia Inversa Ponderada.[7]
1.2.3. Generar un MDE para Bogotá utilizando SPLINE[8].
1.2.4. Generar un MDE para Bogotá utilizando Natural Neighbor.[9]
1.2.5. Comparar los MDE generados anteriormente con el MDE generado por el satélite ASTER**.**

1 Materiales y métodos.

Para este trabajo se contó con información de 1310 puntos que hacen parte de las redes de nivelación de Colombia las cuales han sido establecidas por el IGAC, de estos puntos se conocen sus coordenadas geodésicas (latitud y longitud) además de su altura nivelada, esta se define como la distancia vertical medida entre dos puntos mediante observaciones ópticas de los desniveles existentes entre ellos. Esta altura puede ser geométrica o trigonométrica. Algunos de estos puntos poseen altura nivelada GPS, la cual en las mejores condiciones es equivalente a la altura nivelada trigonométrica.[10] Para contextualizar en la definición de una red geodésica se debe indicar los niveles de precisión definidos a continuación:

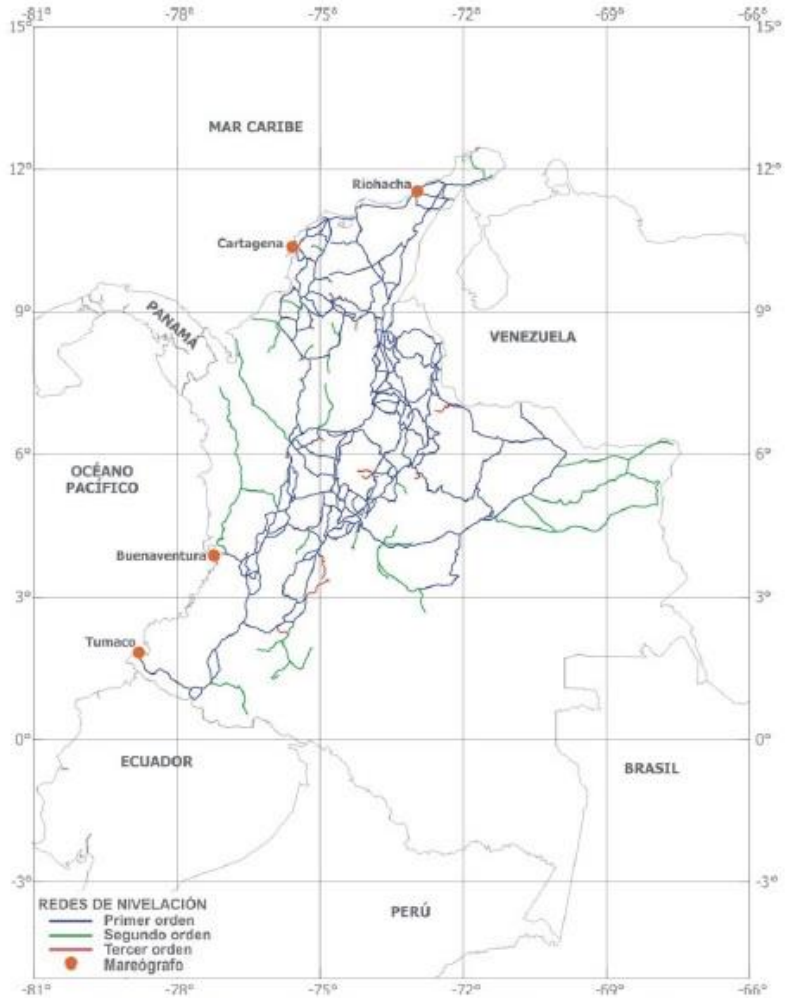
- Red de nivelación de primer orden: contiene los circuitos básicos de nivelación, cuyo diámetro promedio es de 100 km. Estos han sido medidos con métodos geodésicos de alta precisión (nivelación geométrica o spirit levelling) y sus puntos se han materializado con monumentos de concreto o incrustaciones de bronce en lugares geológicamente estables. La distancia entre puntos consecutivos varia de 1,2 km. en áreas montañosas hasta 2,5 km. en zonas planas. La diferencia entre las mediciones en el sentido de avance de la nivelación y de regreso, para un mismo circuito deben tener un error medio menor a $\pm 4mm\sqrt{s}[km]$.
- Líneas de nivelación de segundo orden: estas deben densificar los circuitos de primer orden, de modo que se cuente, en las ciudades medianas y pequeñas, con puntos de nivelación que sirvan de apoyo para la agrimensura. Las diferencias entre las mediciones de ida y vuelta deben estar alrededor de $\pm 8mm\sqrt{s}[km]$. A esta clase también pertenecen aquellos circuitos que han sido nivelados con métodos de alta precisión (nivelación geométrica), pero en un solo sentido (sin regreso).

---

[7] IDW Distancia Inversa Ponderada: Método de interpolación en el cual se considera que la influencia de la variable a tratar es inversamente proporcional a la distancia a la cual se encuentran los valores conocidos.
[8] SPLINE: Este método ajusta la superficie interpolada sobre una determinada cantidad de puntos de entrada y es más útil cuando las diferencias en los puntos muestreados no son grandes.
[9] Natural Neighbor: En este método se usa un subconjunto de muestra alrededor de los puntos para generar alturas que se encuentren en el rango de las alturas de entrada.
[10] http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/5c9cb480469f7a7eb00eb8923ecdf8fe/obtencion+de+alturas+5.pdf?MOD=AJPERES

- Líneas de nivelación de tercer orden: estas densifican las redes de primer y segundo orden para aplicaciones de precisiones menores. Sus errores de cierre no deben ser mayores que $\pm 12mm\sqrt{s}[km]$.

Dado que la precisión de las alturas niveladas satisface las especificaciones de la cartografía, el efecto del campo de gravedad terrestre fue omitido; lo que significa que las alturas actuales (oficiales) son cantidades puramente geométricas, sin reducciones gravimétricas, que en circuitos de nivelación han sido ajustadas como redes verticales[11]. (Ver mapa 1)



Mapa 1 Redes de nivelación y mareógrafos en Colombia.
Fuente: L. Sanchez, «Determinación de la superficie vertical de referencia para Colombia. Dresde, 2003.»

[11] Sánchez Laura 2003 http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/d24c2900469f78a2b006b8923ecdf8fe/modelo+geoidal+GEOCOL+2004.pdf?MOD=AJPERES

Estos datos fueron generados por el IGAC, así mismo se debe tener en cuenta que la toma de datos de alturas verticales para todo el país por parte del IGAC inició en los años cuarenta siguiendo estándares técnicos geodésicos internacionales fijados por la IAGS - Inter American Geodetic Service

El procedimiento que se va a desarrollar consiste en realizar un análisis espacial de los datos de nivelación, interpretar los resultados obtenidos y posterior a esto generar superficies interpoladas por diferentes métodos a partir de dichos puntos y por último verificar las diferencias obtenidas en los valores de altura entre estas superficies y el MDE con resolución espacial de 30 metros descargado libremente desde la página http://earthexplorer.usgs.gov. El análisis geoestadístico de los datos se va a realizar utilizando el software ArcMAP 10.4.1 el DATUM es MAGNA-SIRGAS y la proyección Gauss-Krüger a usar es Bogotá.

Origen	Coordenadas Elipsoidales		Coordenadas Gauss-Krüger	
	Latitud (N)	Longitud (W)	Norte [m]	Este [m]
Bogotá-MAGNA	4° 35' 46,3215"	74° 04' 39,0285"	1 000 000,0	1 000 000,0
Este Central - MAGNA	4° 35' 46,3215"	71° 04' 39,0285"	1 000 000,0	1 000 000,0
Este Este - MAGNA	4° 35' 46,3215"	68° 04' 39,0285"	1 000 000,0	1 000 000,0
Oeste - MAGNA	4° 35' 46,3215"	77° 04' 39,0285"	1 000 000,0	1 000 000,0
Oeste Oeste - MAGNA	4° 35' 46,3215"	80° 04' 39,0285"	1 000 000,0	1 000 000,0

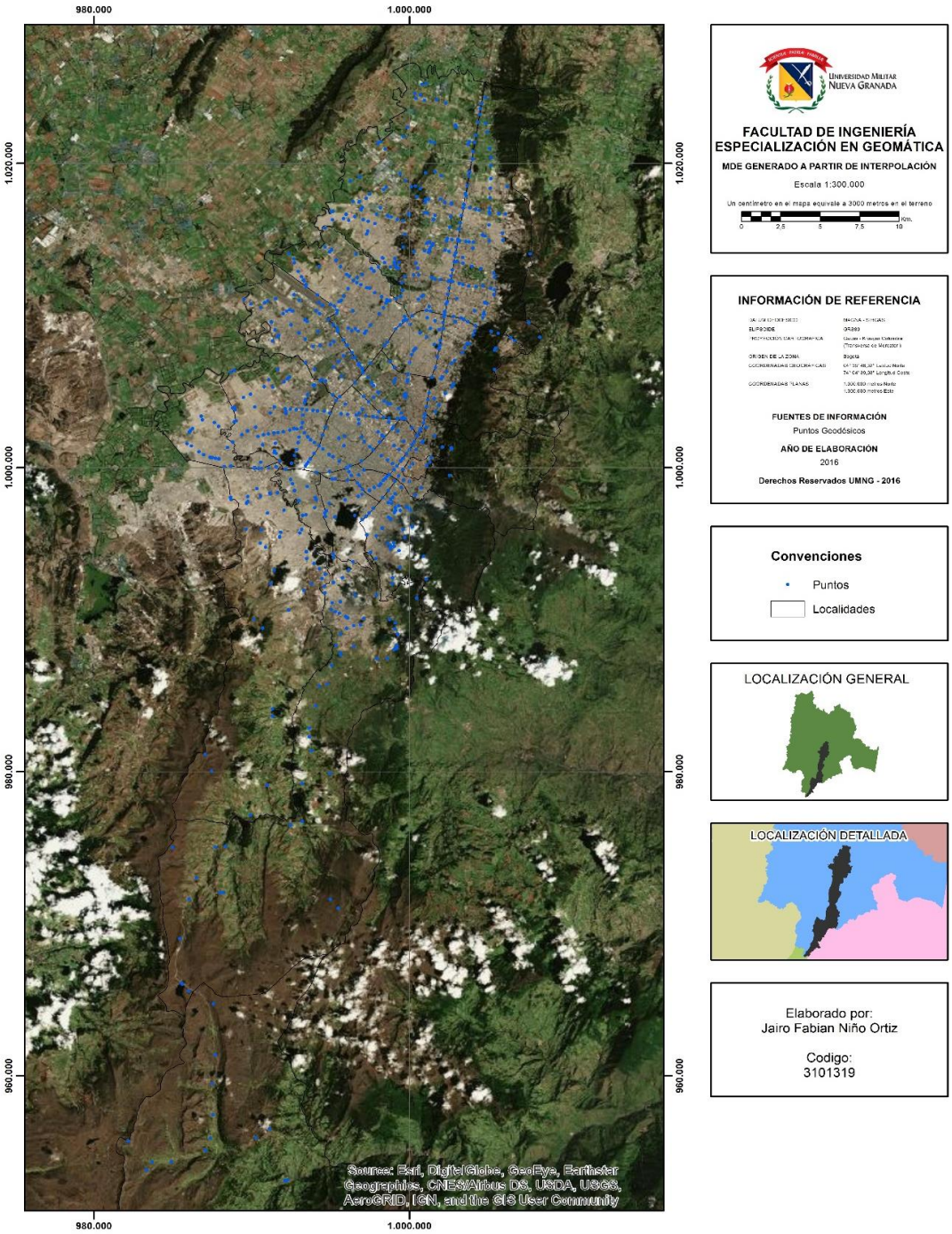
Tabla 1 Orígenes Gauss-Krüger utilizadas en Colombia.
Fuente: L. Sanchez Aspectos prácticos de la adopción del marco geocéntrico nacional de referencia magna-sirgas como DATUM oficial de Colombia[12]

Resultados.

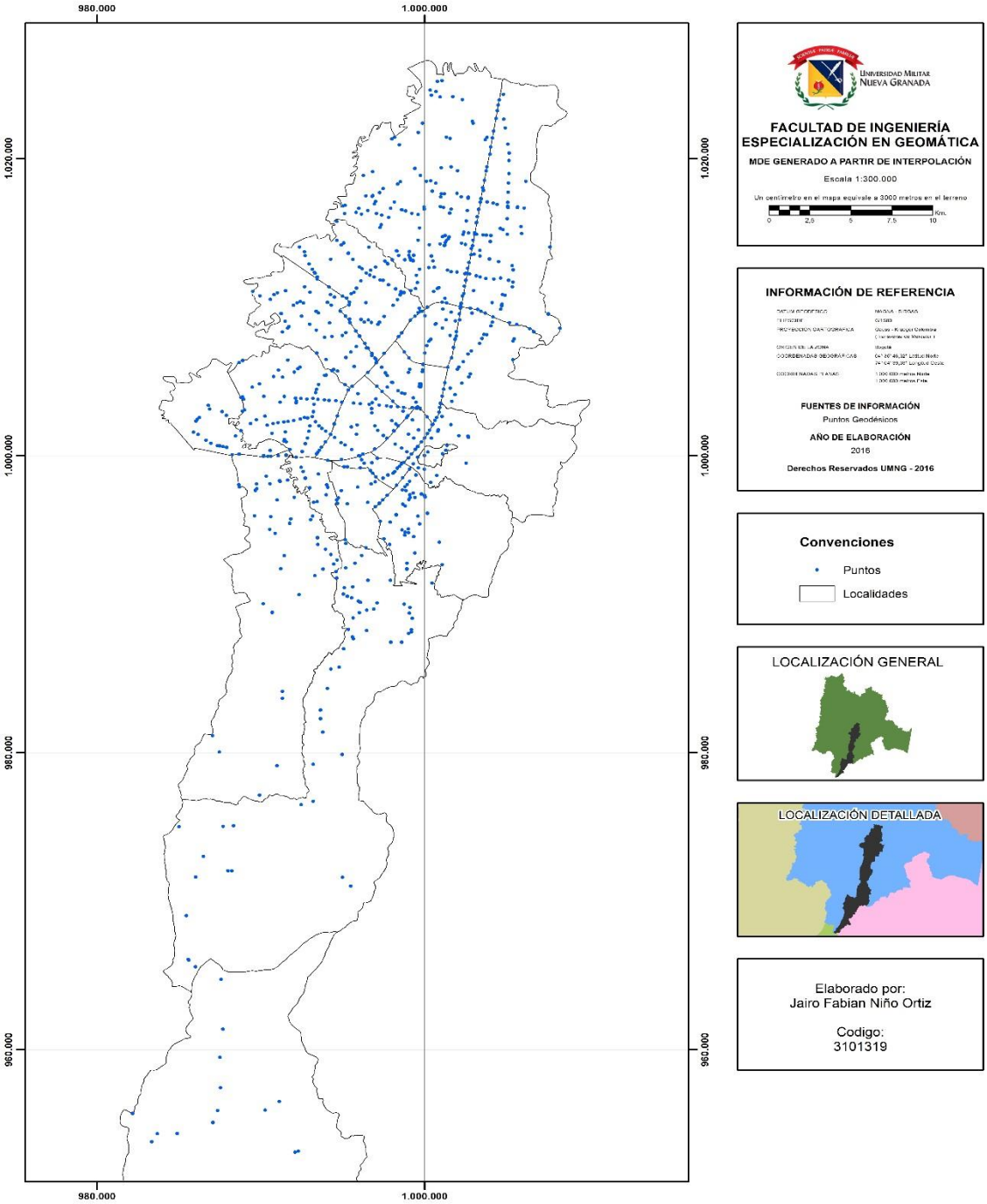
Una vez obtenida la información de los 1310 puntos de nivelación se hace necesario efectuar el análisis espacial a través de las herramientas de ArcMAP Analyzing Patterns, Mapping Clusters y Measuring Geographic Distributions, que hacen parte de la caja de herramientas Spatial Analyst que a su vez requiere tener habilitada la extensión Spatial Analyst, el atributo que se va a tener en cuenta para este trabajo va a ser la altura nivelada, la cual se expresa en metros sobre el nivel del mar, también se va a establecer la distancia Manhattan[13] como el método de distancia utilizado, debido a que los puntos de nivelación se ubican en las vías urbanas de la ciudad de Bogotá y la distancia Manhattan es útil cuando el desplazamiento no se realiza en línea recta si no siguiendo el desplazamiento entre calles y carreras.

[12] L. Sanchez, «ASPECTOS PRÁCTICOS DE LA ADOPCIÓN DEL MARCO GEOCÉNTRICO NACIONAL DE REFERENCIA MAGNA-SIRGAS COMO DATUM OFICIAL DE COLOMBIA
[13] Distancia Manhattan: también conocida como geometría Taxicab en la cual se define que la distancia entre dos puntos es obtenida a través de la sumatoria de las diferencias absolutas de las coordenadas.

En los mapas 2 y 3 se muestra la distribución espacial de los puntos a trabajar.

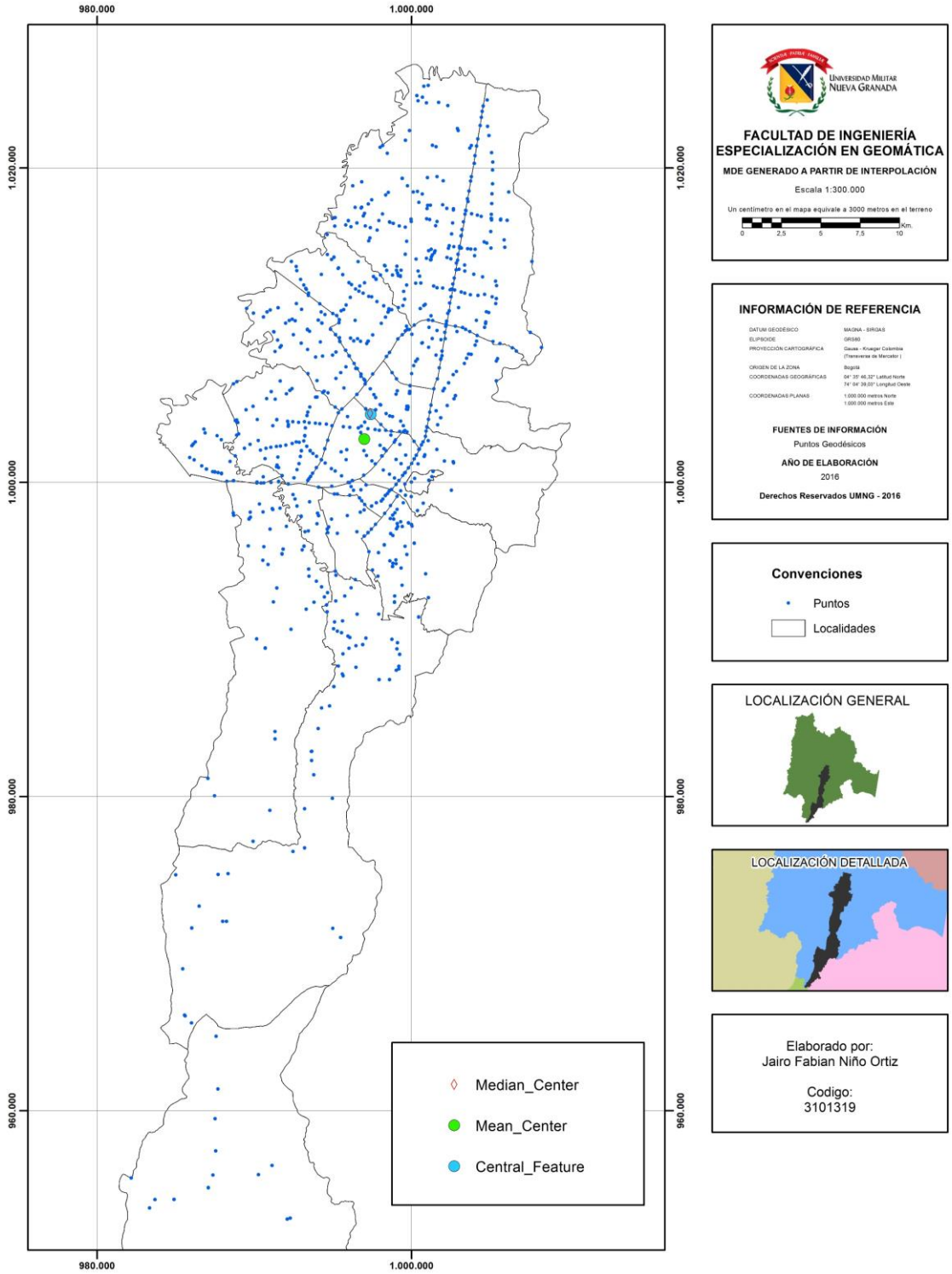


Mapa 2 Distribución de los puntos con nivelación en la ciudad de Bogotá.
Fuente: Elaboración propia 2016.



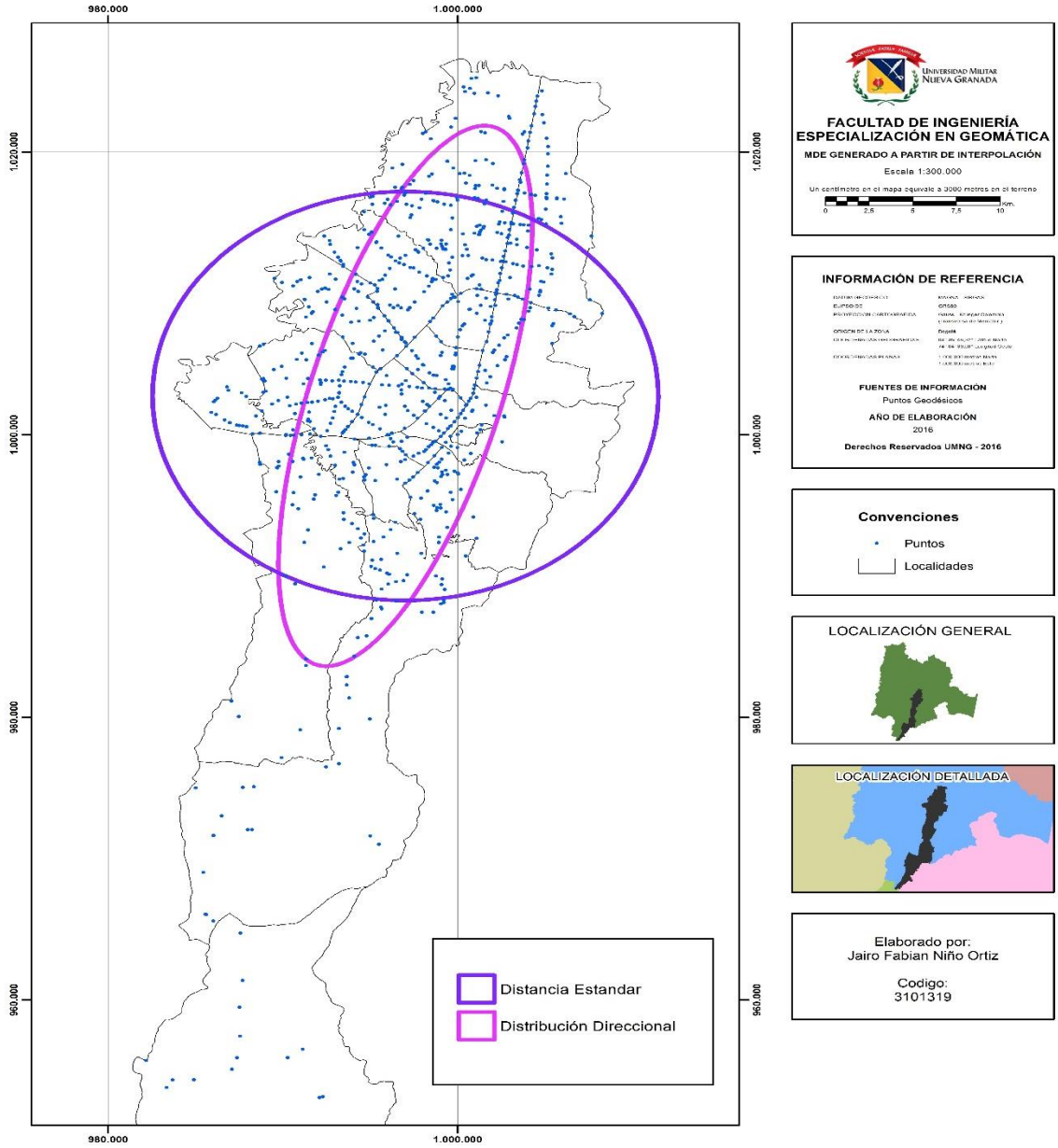
Mapa 3 Distribución de los puntos con nivelación en la ciudad de Bogotá.
Fuente: Elaboración propia 2016.

En el mapa 4 se presenta el punto que se ubica en el centro de la muestra (punto azul), el punto que se encuentra a menor distancia euclidiana de los demás puntos (rombo rojo) y el centro geográfico de la muestra (punto verde).



Mapa 4 Ubicación de puntos representativos de la muestra.
Fuente: Elaboración propia 2016.

En el mapa 5 se observa la distribución direccional de la muestra, la cual indica que la información es abundante en la dirección norte sur y menor en la dirección oriente occidente. La interpretación de la distancia estándar expresa como están concentrados los puntos a partir del punto central, como se indica hay una distribución uniforme.

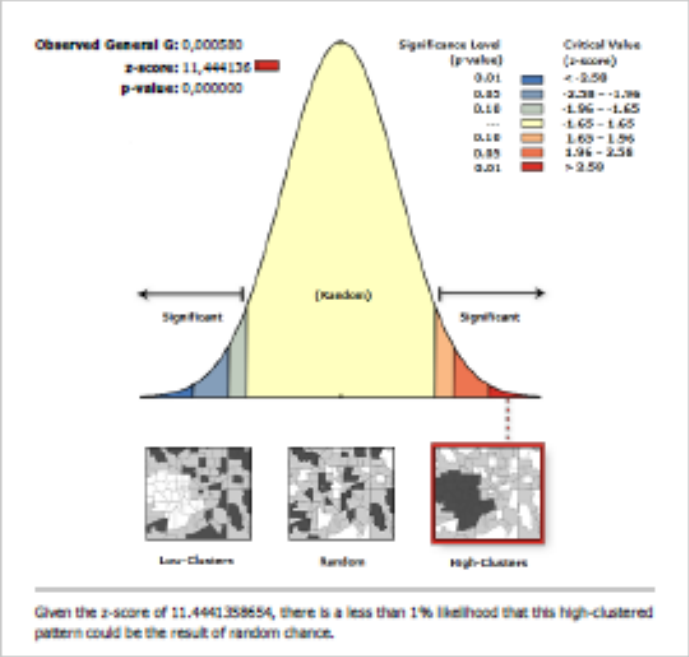


Mapa 5 Distribución direccional y distancia estándar.
Fuente: Elaboración propia 2016.

.

Los puntos de la muestra se encuentran altamente agrupados (Clustered) tal como lo indican las figura 5 y 6.

High-Low Clustering Report



General G Summary

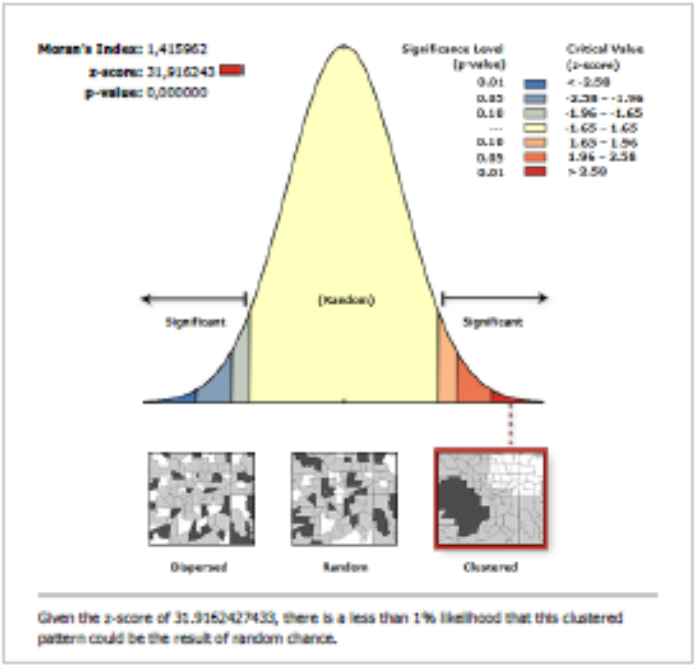
Observed General G:	0,000580
Expected General G:	0,000556
Variance:	0,000000
z-score:	11,444136
p-value:	0,000000

Dataset Information

Input Feature Class:	Puntos_DEM
Input Field:	ALTURANIVE
Conceptualization:	INVERSE_DISTANCE
Distance Method:	MANHATTAN
Row Standardization:	False
Distance Threshold:	1871,4869 Meters
Weights Matrix File:	None
Selection Set:	False

Figura 1 High-Low Clustering Report
Fuente: Elaboración propia 2016.

Spatial Autocorrelation Report



Global Moran's I Summary

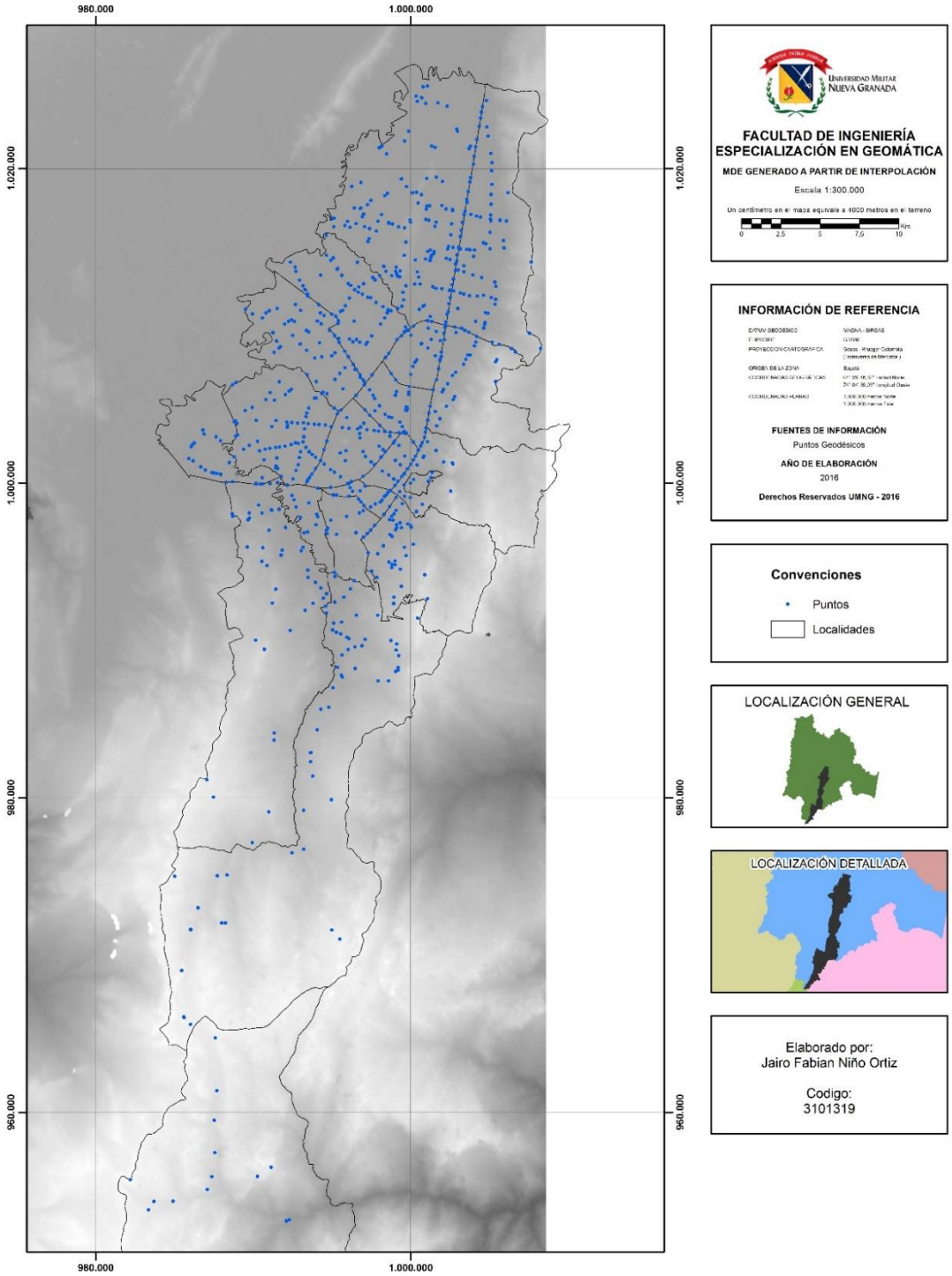
Moran's Index:	1,415962
Expected Index:	-0,000764
Variance:	0,001970
z-score:	31,916243
p-value:	0,000000

Dataset Information

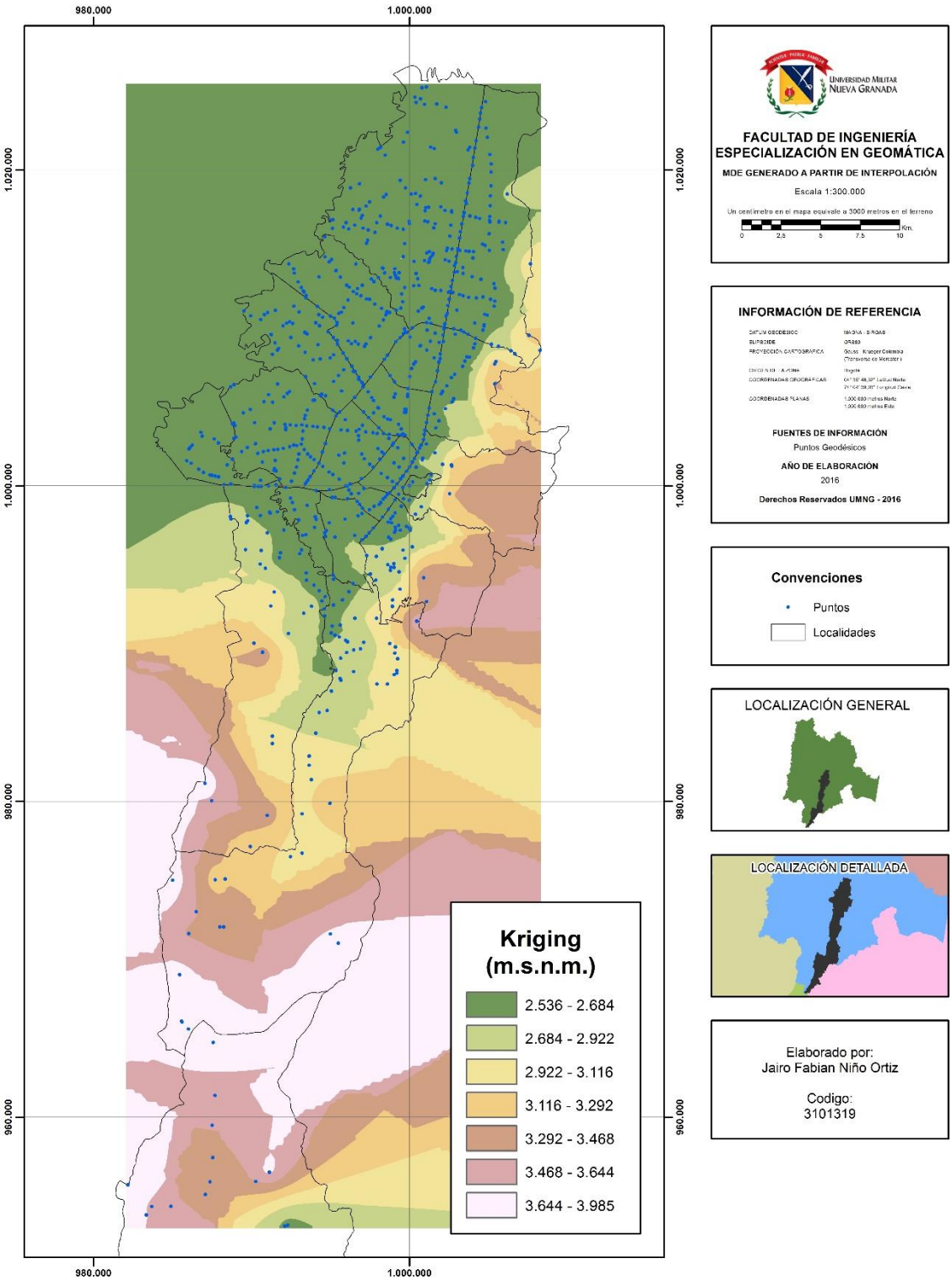
Input Feature Class:	Puntos_DEM
Input Field:	ALTURANIVE
Conceptualization:	INVERSE_DISTANCE
Distance Method:	MANHATTAN
Row Standardization:	False
Distance Threshold:	1871,4869 Meters
Weights Matrix File:	None
Selection Set:	False

Figura 2 Spatial Autocorrelation Report
Fuente: Elaboración propia 2016.

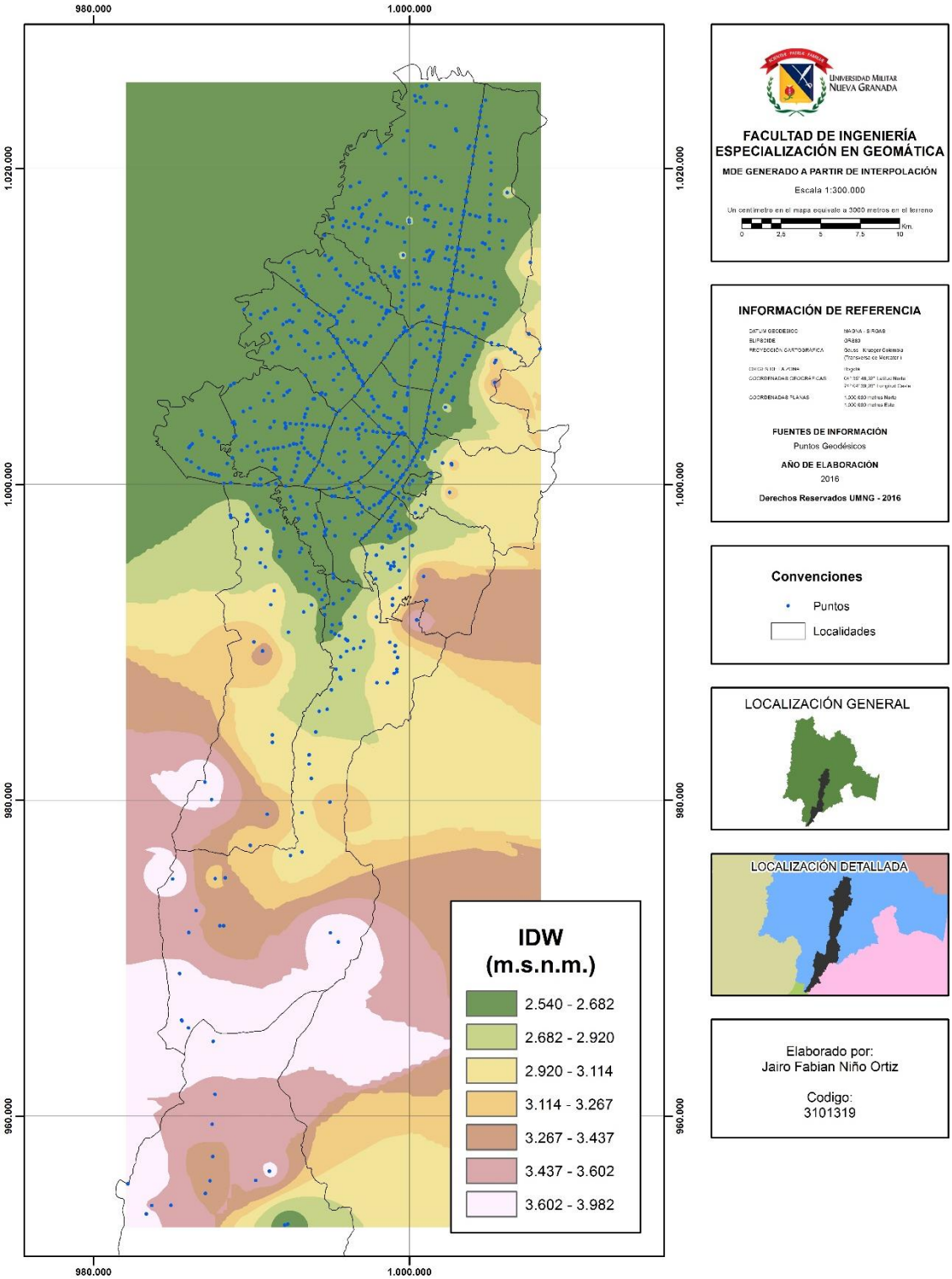
En los mapas que van desde el 6 hasta el diez, se presentan los MDE generados con información obtenida a través del satélite ASTER y por los diferentes métodos de interpolación.



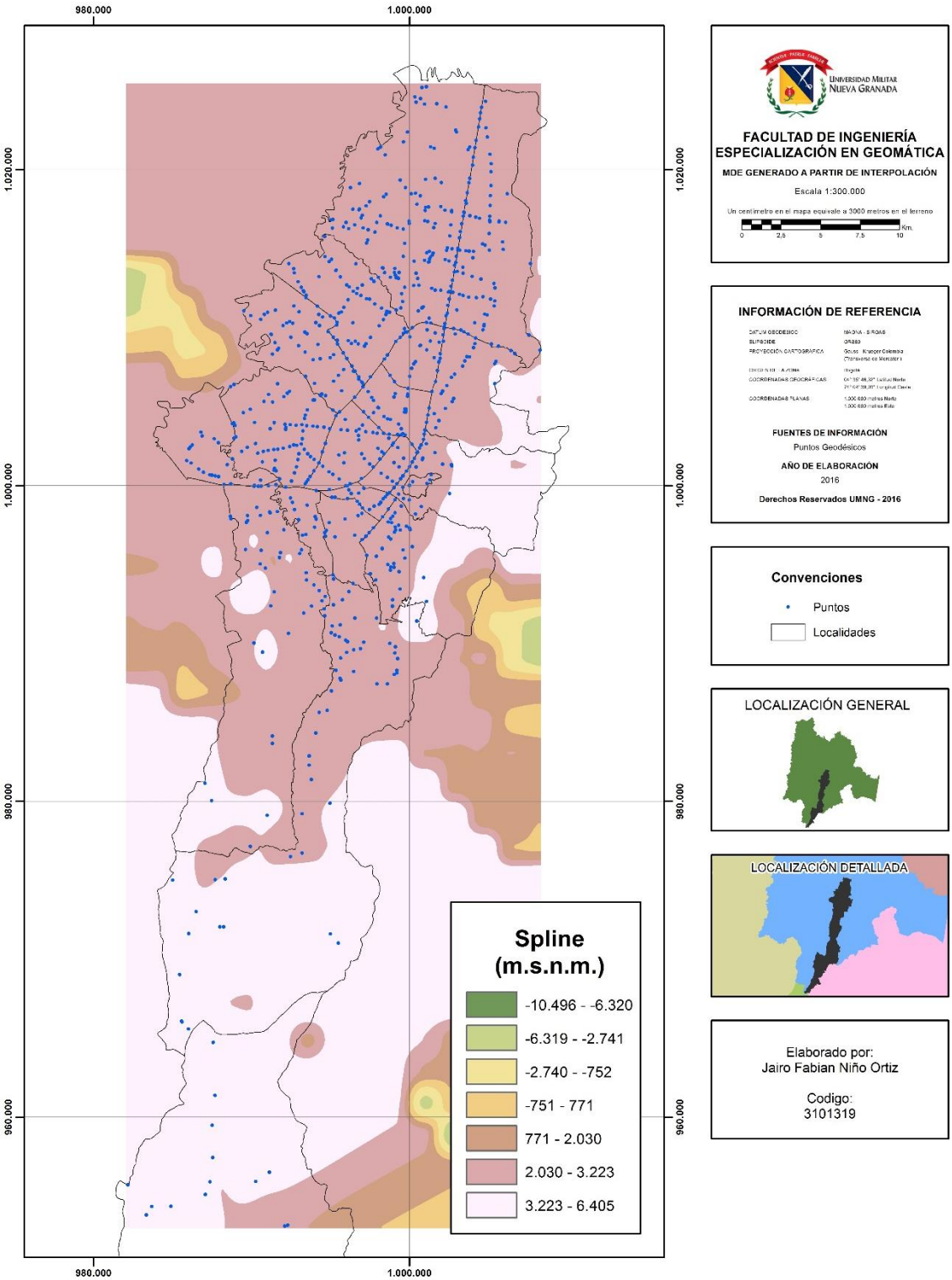
Mapa 6 MDE obtenido a través del sensor ASTER
Fuente: Elaboración propia 2016



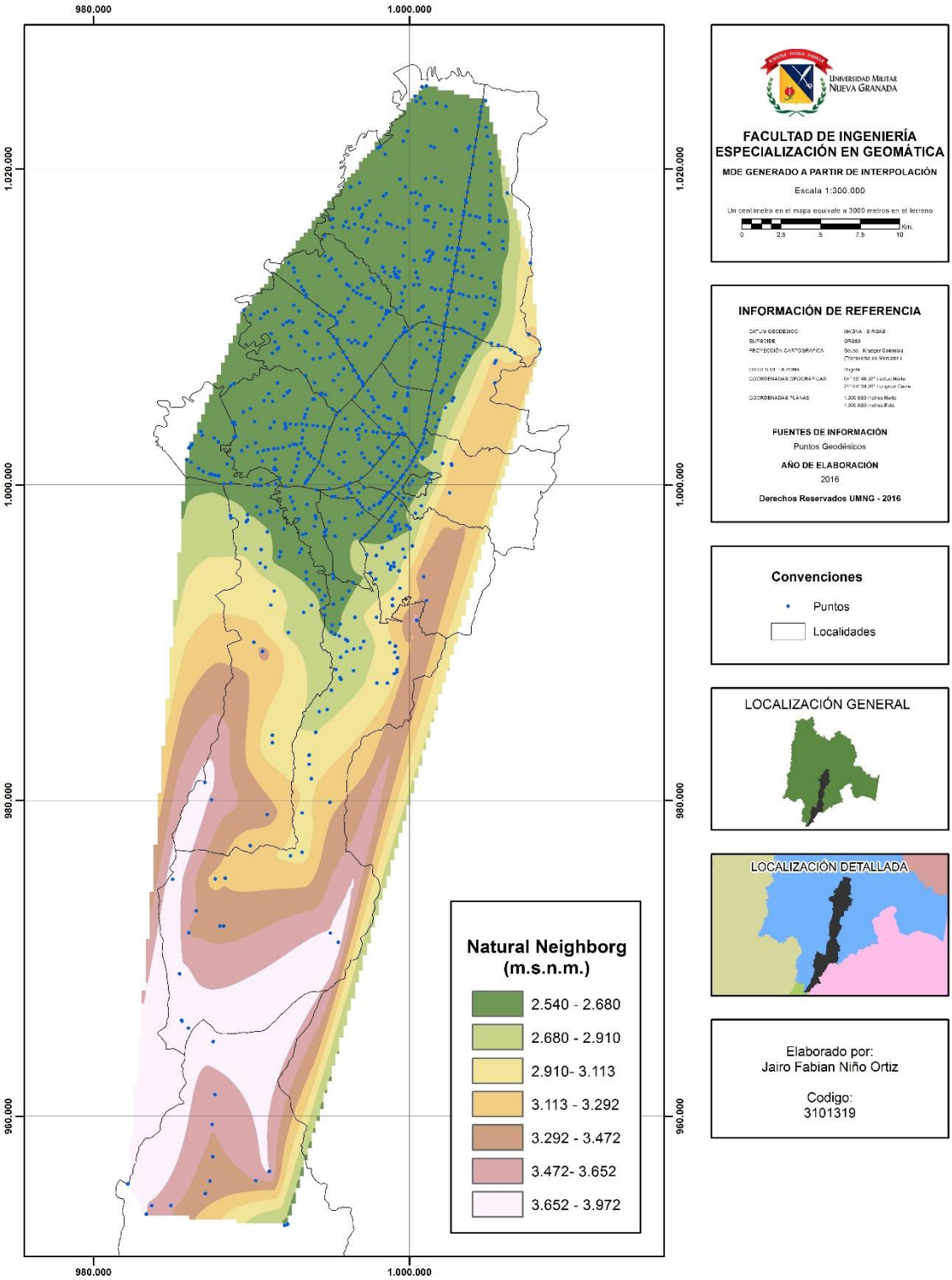
Mapa 7 MDE generado a través de Kriging.
Fuente: Elaboración propia 2016.



Mapa 8 MDE generado a través de IDW.
Fuente: Elaboración propia 2016.

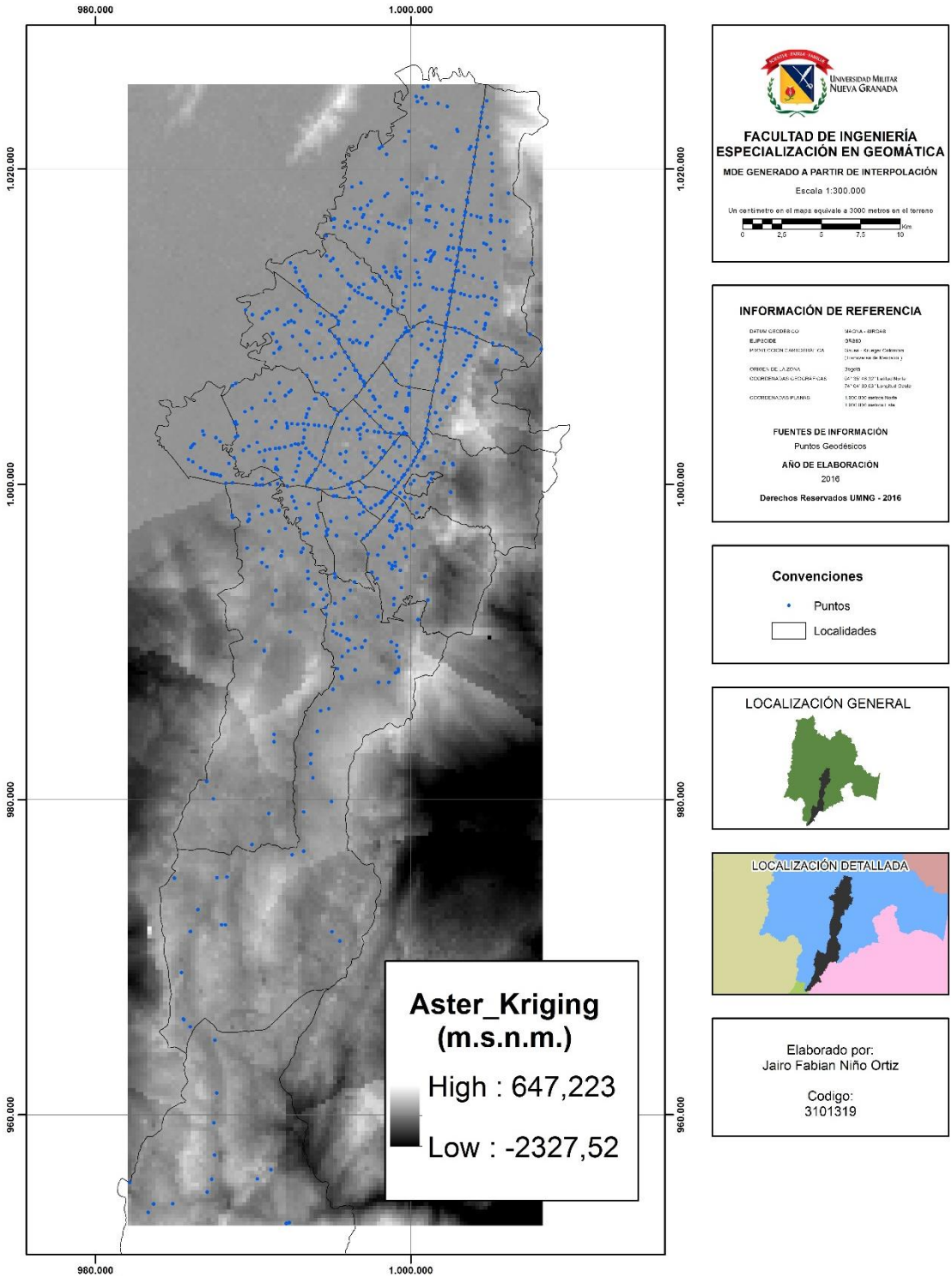


Mapa 9 MDE generado a través de SPLINE.
Fuente: Elaboración propia 2016.

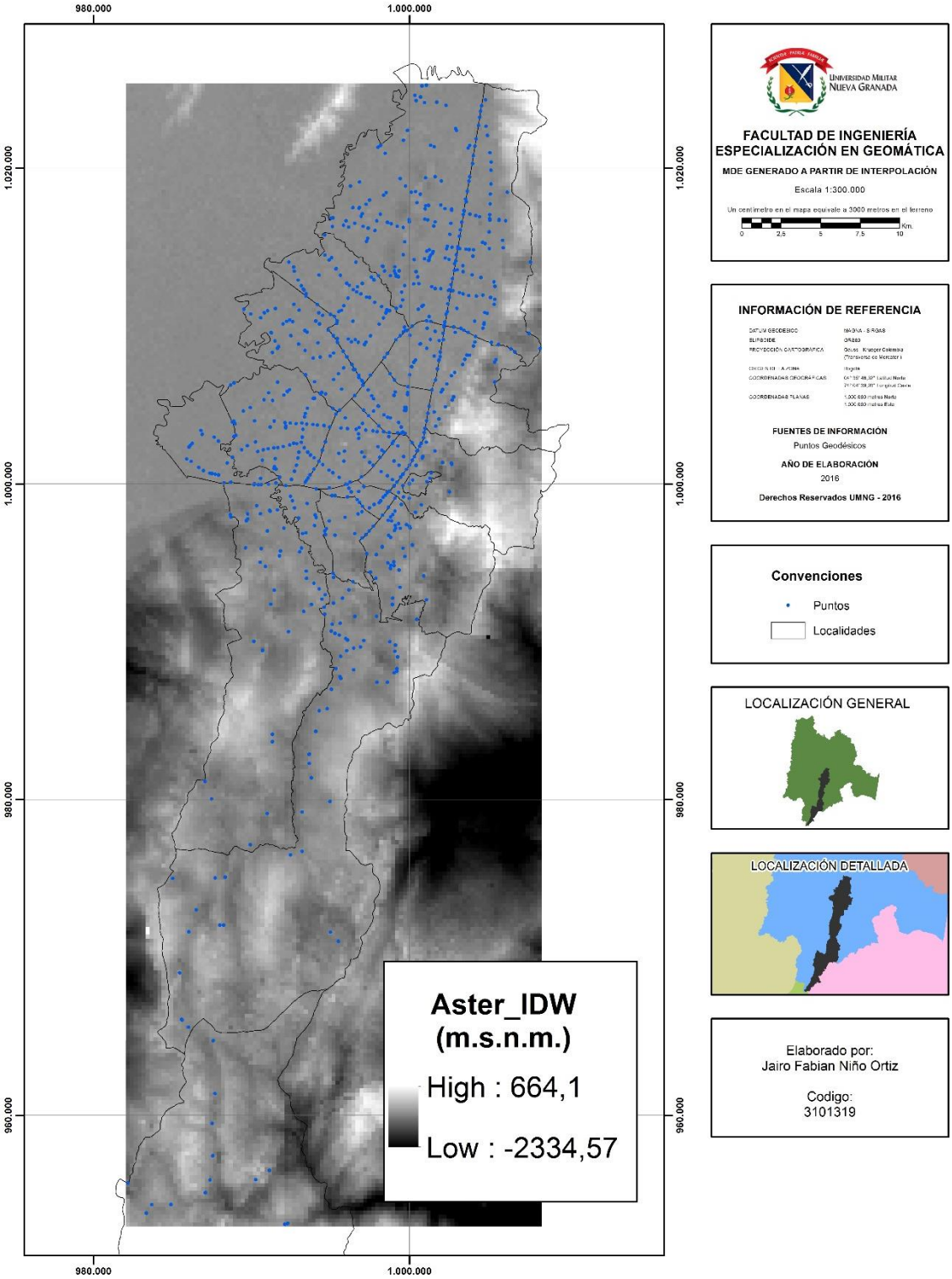


Mapa 10 MDE generado a través de Natural Neighborg.
Fuente: Elaboración propia 2016.

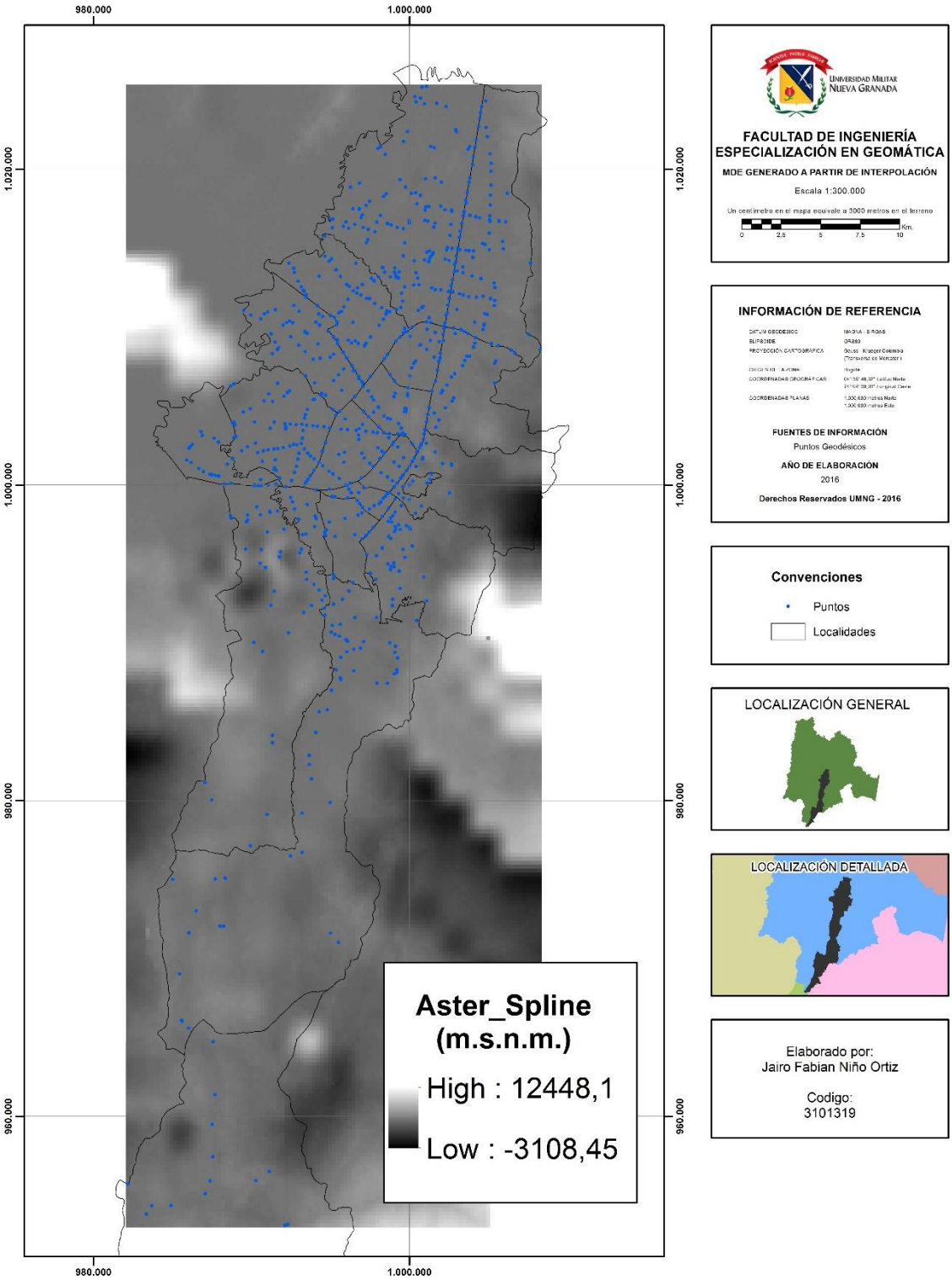
Desde el mapa 11 hasta el mapa 14 se muestran las capas raster que presentan las diferencias en los valores de elevación obtenidos por cada método de interpolación, estas diferencias se calculan usando algebra de mapas.



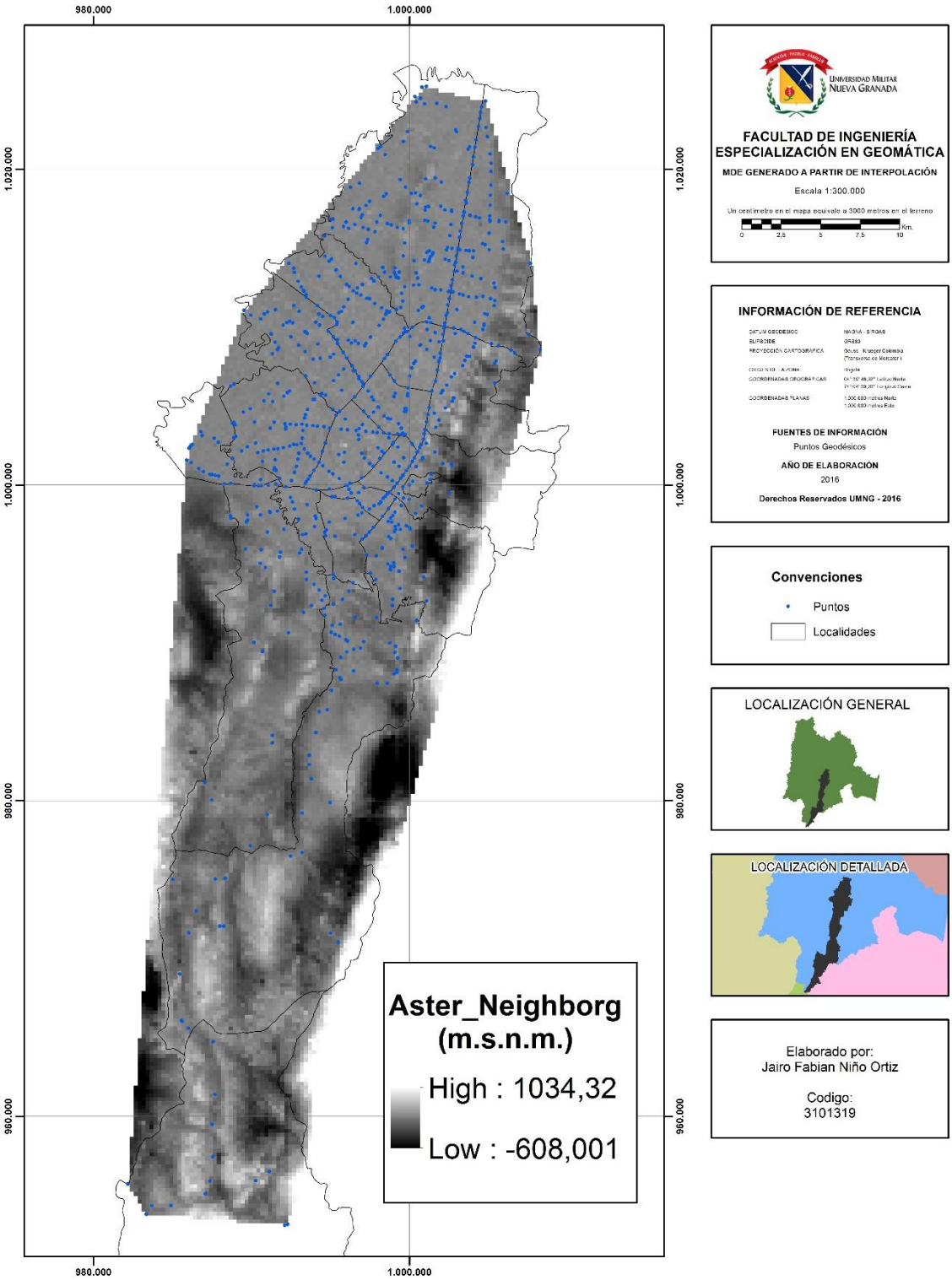
Mapa 11 Comparación entre Kriging y ASTER.
Fuente: Elaboración propia 2016.



Mapa 12 Comparación entre IDW y ASTER.
Fuente: Elaboración propia 2016.



Mapa 13 Comparación entre SPLINE y ASTER.
Fuente: Elaboración propia 2016.



Mapa 14 Comparación entre Natural Neighbor y ASTER.
Fuente: Elaboración propia 2016.

En la tabla 2 se presentan los valores de desviación estándar y la media de cada una de las capas, donde existe menor desviación estándar se afirma que estos datos son menos dispersos que la media.

	Media	Desviación Estándar
ASTER-IDW	-63,78561051993535	238,6894995617915
ASTER-KRIGING	-117,1573484163331	257,9220903111785
ASTER- NATURAL NEIGHBORG	-21,30994853139137	136,3683777638708
ASTER-SPLINE	224,4326122465588	1370,735799860194

Tabla 2 Desviación estándar y media de las capas resultantes.
Fuente: Elaboración propia 2016.

De lo anterior se infiere que con los datos disponibles el método de interpolación más aproximado a la realidad para la generación de MDE es el Natural Neighborg (Vecino Natural).

Conclusiones y recomendaciones.

- Es posible generar MDE a partir de puntos geodésicos que se aproximen a los generados a través de sensores remotos.
- Es recomendable contar con una red más densa de puntos geodésicos debido a que estos son los insumos fundamentales que permiten tener una representación más fiel de la realidad, ya que los datos acá trabajados no están distribuidos igualmente en todas las localidades, esto se nota más en la localidad de Sumapaz, ya que tiene muy pocos puntos, esta situación está relacionada con la densidad poblacional de estas localidades.
- Es válido generar MDE a partir de puntos geodésicos como ejercicio académico pero por costos y tiempo es mejor obtener los MDE a través de sensores remotos (satélites).