

## Modelo digital de elevaciones de una zona urbana para la simulación hidrológica

Divaldo Domingos da Silva

Departamento de Ingeniería y Tecnología, Instituto Superior Politécnico de Tecnologías y Ciencias, ISPTEC. Luanda, Angola.

e-mail: [divaldo.silva@ispotec.co.ao](mailto:divaldo.silva@ispotec.co.ao)

Emilio Ricardo Escartín Sauleda

Departamento de Geociencias. Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE. La Habana, Cuba.

e-mail: [escartin@civil.cujae.edu.cu](mailto:escartin@civil.cujae.edu.cu)

Gerardo Crescencio Jiménez Sáez

Departamento de Ingeniería Vial. Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE. La Habana, Cuba.

e-mail: [gjimenez@civil.cujae.edu.cu](mailto:gjimenez@civil.cujae.edu.cu)

### RESUMEN

En el presente artículo se discute el procedimiento empleado y los resultados alcanzados en la construcción del modelo digital de elevaciones (MDE) correspondiente al barrio Marzal, de la ciudad de Luanda, Angola, a partir de datos provenientes de diversas fuentes y escalas, de manera que se cumpla con los requisitos que exigen los modelos de simulación, adecuados para el estudio de los procesos hidrológicos en un ambiente urbano. Se utilizaron datos del Plan Director de Saneamiento de la ciudad, el estudio topográfico realizado por la Unidad Técnica de Gestión y Saneamiento de Luanda, la carta topográfica 1:25000 del sector y una imagen satelital de la ciudad. El MDE adecuado para la simulación hidrológica se elaboró utilizando herramientas de modelación espacial del ámbito de la Geomática.

**Palabras clave:** modelo digital de elevaciones, modelo hidrológico urbano, Luanda, relieve llano.

## Building the digital elevation model of an urban zone for hydrological simulation

### ABSTRACT

The applied procedure and the achieved results in building a digital elevation model (DEM) corresponding to Marzal neighborhood, Luanda, Angola, according to the requirements of hydrological modeling for the study of hydrological processes in an urban environment are presented and discussed in this paper. The data used came from different sources and scales. Data from the Director Plan, detailed surveying, topographic maps with a scale of 1:25000, and satellite images were employed. The adequate DEM for hydrological simulation was created using spatial modeling tools from Geomatics domain.

**Keywords:** digital elevation model, urban hydrological model, Luanda, flat relief.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento de los núcleos urbanos está íntimamente ligado al desarrollo social. Este crecimiento trae aparejada la necesidad de disponer de servicios públicos tales como el abastecimiento de agua potable, fluido eléctrico, sistemas de drenaje pluvial y sanitario, por solo citar algunos. Con frecuencia, las necesidades sociales provocan que dicho desarrollo no se produzca de forma ordenada, y esto puede repercutir en la calidad de los servicios públicos antes mencionados. Este escenario es típico de países subdesarrollados, donde existe una pobre o nula sistematización de la información y su grado de dispersión es tal que hace muy difícil su gestión mediante técnicas y procedimientos adecuados.

La ciudad de Luanda, capital de Angola, no escapa a estos problemas. Sin embargo, hoy en día crece una conciencia generalizada de que es necesario corregir la evolución urbanística condicionada en las últimas décadas por factores financieros y organizacionales que fueron consecuencia del conflicto armado por el que atravesó Angola, lo cual se tradujo en una marcada escasez de recursos y el aumento de la presión demográfica dentro del perímetro urbano.

El Gobierno Provincial de Luanda y la Empresa de Limpieza y Saneamiento de Luanda, ELISAL, con el apoyo del consorcio SOGREAH-COBA han presentado un Plan Director de Saneamiento de dicha ciudad muy abarcador, por lo que constituye un gran desafío para los próximos años acompañar el crecimiento poblacional y sanear las patologías existentes, entre las que se destacan por su vital importancia:

- Recuperar infraestructuras existentes, localizadas mayoritariamente en el centro de Luanda. Actualmente los sistemas son unitarios y existen serios problemas de obstrucción parcial o total producto de desechos sólidos.
- Dotar a la zona periférica de Luanda de sistemas de drenaje pluvial. Estas zonas se caracterizan por tener pequeños declives y no pocas depresiones, lo que origina que las aguas pluviales no escurran libremente, y permanezcan estancadas por mucho tiempo.
- Dotar a la zona periférica de Luanda de sistemas separativos, donde se recolecten las aguas residuales domésticas, con el objetivo de alcanzar elevados patrones de calidad ambiental y de servicios.

Con el propósito de mejorar esta infraestructura de servicios, es necesario utilizar todos los recursos que la tecnología moderna hace disponibles en materia de análisis y simulación de los procesos de la realidad. Uno de los elementos claves identificados es la introducción de las técnicas de modelación y simulación hidrológica e hidráulica para sustentar los análisis y la toma de decisiones.

La simulación de procesos hidrológicos comenzó en la década de los años 50 con el advenimiento de las primeras computadoras digitales. Entre las variadas aplicaciones de los modelos de simulación hidrológica pueden mencionarse: el pronóstico de caudales, el diseño, el diagnóstico de peligrosidad por inundaciones, la extensión de registros de caudales, etc.

Los primeros modelos hidrológicos fueron “agregados” desde el punto de vista espacial, es decir, representaban la respuesta efectiva de una cuenca entera, sin caracterizar explícitamente la variabilidad espacial de la respuesta. Bajo este enfoque, la cuenca se discretiza en un conjunto de subcuencas, en donde los parámetros se consideran como homogéneos desde el punto de vista

hidrológico. Los modelos espacialmente agregados son todavía ampliamente usados, aunque no son capaces de representar adecuadamente la variabilidad espacial de los procesos hidrológicos y de los parámetros de la cuenca.

En las últimas dos décadas se ha venido desarrollando una segunda generación de modelos de simulación hidrológica: los modelos “distribuidos”, los cuales representan explícitamente la variabilidad espacial de las características superficiales de la cuenca y de las precipitaciones. Se representan por mallas de celdas regulares de igual tamaño en donde la unidad de análisis es la celda. La resolución espacial está dada por el tamaño de la celda.

Ambos tipos de modelos presentan limitaciones, en tanto constituyen simplificaciones de la realidad, para describir correctamente los comportamientos de las cuencas. Los modelos agregados hacen una simplificación demasiado grande, mientras los modelos distribuidos requieren enorme cantidad de datos que en la realidad no siempre pueden ser obtenidos.

Como consecuencia, aparecen modelos que combinan aspectos positivos de ambos, llamados “cuasi-distribuidos” (Burns et al. 2004). Estos modelos dividen la cuenca en subcuencas (partiendo de las celdas), agrupándolas en unidades de análisis, donde los parámetros tienen similares características hidrológicas.

Algunos de los factores que se han tenido en cuenta en la difusión de los modelos distribuidos y los cuasi-distribuidos son:

- La disponibilidad en soporte digital de los datos topográficos y de otros parámetros del suelo y la cobertura.
- El desarrollo de técnicas de procesamiento rápido de datos espaciales e imágenes de satélite.

Todas estas herramientas de simulación utilizan modelos de digitales de elevación como dato básico de entrada, para poder estimar el comportamiento del escurrimiento tanto en magnitud como en orientación y sentido.

Las herramientas de modelación espacial (HME) juegan un papel fundamental en este sentido, no solo en la integración de la información, sino en la capacidad operatoria en materia de procesamiento espacial, que permite la extracción automática de los parámetros a incluir en la modelación hidrológica a partir del MDE. A su vez, las HME permiten enlazar esta información con modelos o paquetes de modelos hidrológicos y realizar el post-proceso; es decir, recuperar las salidas de los modelos y graficarlas en el mismo ambiente HME. Tal es el caso de los programas AutoCAD, Global Mapper, Surfer, y otros que pueden ser usados conjuntamente con un SIG o utilizados de manera autónoma, con el propósito de construir los MDE, extraer parámetros de los MDE, armar archivos de entrada y correr una simulación hidrológica en segundo plano, para luego visualizar los resultados en el mismo entorno SIG.

Como último elemento, y no por eso menos importante, se debe destacar que el problema de la simulación hidrológica en un contexto urbano impone una serie de requisitos a los datos empleados y al modelo resultante, entre los que se destaca una alta resolución espacial del MDE.

## **DATOS, HERRAMIENTAS Y PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS**

Los datos de que se dispone, la información que de ellos pueda extraerse y las herramientas para su manipulación, representan los insumos o materiales para llevar a cabo la aplicación de la metodología aquí descrita para la construcción de un MDE a una escala mayor que 1:25000, que resulte adecuado para representar la dinámica del flujo de aguas en una zona urbana predominantemente llana, que corresponde a la zona del barrio Marzal, en Luanda, capital de la República de Angola.

Las cuencas de llanura se caracterizan por su baja energía de relieve, con divisorias poco definidas y acumulación de agua en la superficie. El movimiento del agua se realiza mayormente en forma vertical, y el escurrimiento se inicia una vez que el agua ha llenado las depresiones superficiales, que actúan como reservorios que retardan el escurrimiento y favorecen la permanencia del agua en la superficie (Gabazza y Ruberto 2007).

A continuación se hace una descripción de los datos disponibles sobre el área de interés, y se describen los procedimientos empleados para la modelación espacial del terreno y la construcción del MDE (Felicísimo 1994), (Fallas 2007).

### **Datos disponibles**

Para el caso tratado se dispone de relativamente pocos datos, aunque las fuentes de esos datos son variadas. Se utilizan la cartografía en papel, digitalizada y georreferenciada, a escala 1:25000 (hoja N° 89-D-1 Cacuaco), producida por el Instituto de Geodesia y Catastro de Angola (IGCA), la ortofoto satelital de la ciudad de Luanda (sector Marzal), digitalizada y georreferenciada, los levantamientos de Planimetría y Altimetría, realizados y proporcionados por la Unidad Técnica de Saneamiento y Gestión de Luanda (UTSGL) en dos soportes digitales diferentes (cotas en puntos aislados y curvas de nivel del terreno en archivos de dibujo de AutoCAD, y tablas de coordenadas (X, Y, Z) medidas en puntos aislados en archivos de Excel), la documentación del plan Director de Saneamiento de la provincia de Luanda y por último el proyecto de reanimación del barrio Marzal, proporcionado también por la UTSGL.

### **Software empleado**

La preparación y organización de los datos cartográficos digitales disponibles y los análisis espaciales para construir el MDE se realizaron mediante las herramientas AutoCAD, Global Mapper, Surfer y Excel. Estas herramientas de software permiten la visualización de los datos, proporcionan facilidades de manejo e integración de datos de diferentes fuentes y escalas para realizar análisis avanzados, la georreferenciación, la interpolación y remuestreo de mallas regulares e irregulares, la automatización de operaciones y creación de imágenes y mapas con una alta calidad visual.

### **Métodos**

La realidad inevitable (y relativamente frecuente) de no contar con recursos ni posibilidades para obtener nuevos datos a partir de fuentes independientes, como son las fotos aéreas, imágenes de satélite, levantamientos fotogramétricos, levantamientos topográficos de detalle, o la utilización de GPS de alta precisión, provoca que sea necesario contar con una metodología para crear modelos del relieve con la calidad requerida para simulaciones hidrológicas a partir de los datos disponibles, combinados conjuntamente con criterios de naturaleza independiente de

los datos, como son los criterios matemáticos, ingenieriles, históricos, geomorfológicos y cualesquiera otros disponibles eventualmente. Este tipo de procedimiento ha sido suficientemente discutido en la literatura (Harmar and Clifford 2007), (Quintero et al. 2009).

El área relativamente pequeña del barrio Marzal (perímetro= 3,521 km; área= 0,759 km<sup>2</sup>) y la escasa información altimétrica brindada por la cartografía a escala 1:25000, por ser una zona relativamente llana, exigió hacer uso de todas las fuentes alternativas de datos disponibles.

La estrategia seguida para la creación del MDE en este trabajo se basó primero en formular y luego satisfacer los requisitos exigidos al modelo de elevación por el problema de simulación planteado.

### **Requisitos del modelo de elevaciones que se debe crear**

La condición de zona urbana y la existencia de calles estrechas en el barrio exigen que la resolución espacial del MDE sea no menor que 3 metros, ya que una resolución menor podría no ser capaz de reproducir las calles y pasos estrechos entre edificaciones.

La necesidad de alcanzar esta alta resolución espacial condiciona la necesidad de utilizar una cantidad de puntos suficiente para satisfacer los requisitos cartográficos de cantidad de puntos por unidad de área del levantamiento.

La pequeña extensión del área de interés impide la aplicación extensiva de criterios geomorfológicos para mejorar la escala, pues la zona es eminentemente llana y la red de drenaje natural está completamente alterada por la acción antrópica.

Los métodos de interpolación espacial que se deben emplear deben ser los más precisos, aunque simultáneamente deben tener poca influencia sobre los datos, por lo que se decidió utilizar las herramientas de la Geoestadística: el método de interpolación de Kriging, por la calidad de sus resultados. Esta decisión impone la necesidad de estudiar la variografía de los datos en diferentes direcciones, para determinar y aprovechar la anisotropía de los datos.

Los procedimientos aquí descritos para mejorar la calidad de un MDE son aplicables a zonas con relieve suave o llano, de las que se tiene cartografía básica a escala 1:25000, pero en las que el uso de los métodos de interpolación espacial típicos no producen resultados adecuados, como en el caso especial de las zonas fuertemente antropizadas, como son las zonas urbanas, por lo que se hace indispensable utilizar procedimientos alternativos que permitan construir el MDE con una resolución espacial mayor que la de la cartografía original 1:25000. A continuación se describen los procedimientos empleados.

## **EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS CARTOGRÁFICOS DISPONIBLES**

### **Análisis cualitativo de los datos a escala 1:25000**

Este paso consiste en analizar la información planimétrica y altimétrica de los datos cartográficos disponibles a escala 1:25000. Este análisis permitió establecer que la zona de interés, el barrio Marzal, está ubicado en un área predominantemente llana, con valores de cotas



alrededor de 70 m y generalmente menores que dicho valor, con relieve ligeramente en forma de silla de montar. La figura 1 muestra un fragmento del mapa topográfico de Luanda, correspondiente al barrio Marzal.



**Figura 1. Análisis preliminar de datos planimétricos y altimétricos sobre el mapa 1:25000. Se superpone la ortofoto satelital sobre la cartografía. El polígono delimita el barrio Marzal. Obsérvense las escasas curvas de nivel en el área de interés**

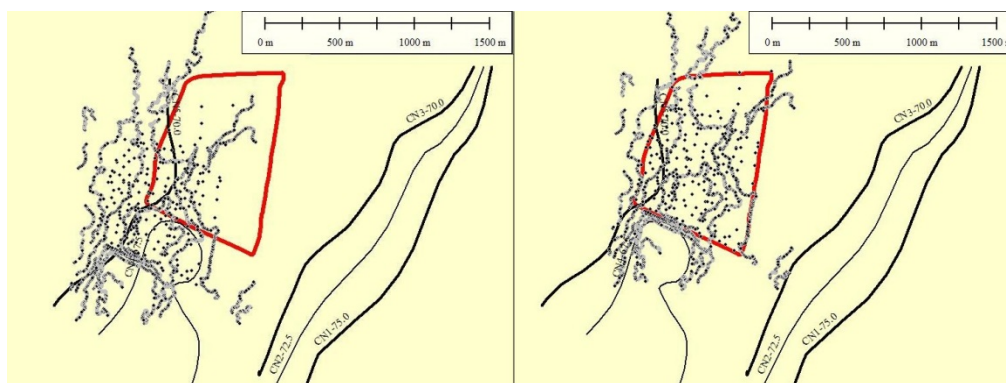
### **Preprocesamiento de los datos**

El siguiente paso para la utilización de datos con origen en diferentes fuentes es prepararlos para que sean totalmente compatibles planimétricamente y con el proceso al que serán sometidos. La acción consistió primero en transformar las curvas de nivel en puntos aislados, que coinciden con los nodos de las curvas.

Luego se hizo la representación gráfica conjunta de todos los datos planimétricos: mapa cartográfico a escala 1:25000 georreferenciado; ortofoto georreferenciada de la ciudad de Luanda; puntos aislados con cotas y puntos de curvas de nivel tomadas de archivos de dibujo y puntos aislados con cotas tomados de tablas. Esta representación permitió descubrir que los datos cartográficos y los datos originados en levantamientos de ingeniería no se correspondían con la misma proyección cartográfica.

Para corregir este defecto en los datos se escogió como proyección única para todos los datos una de las proyecciones empleadas en la cartografía angolana, la UTM, zona 33 Sur, datum Camacupa, cuyos parámetros pueden ser tomados de la Base de Datos de Parámetros Geodésicos, versión 8.3 (EPSG 2013), proyección que resulta adecuada para la ciudad de Luanda.

La figura 2 muestra el gráfico de la superposición de datos de diferentes fuentes de origen. Antes del preprocesamiento los puntos de las fuentes de levantamientos de ingeniería presentaban un error en el posicionamiento planimétrico que debió ser corregido.



**Figura 2. Superposición de datos de diferentes fuentes de origen.**  
**A la izquierda, antes del preprocesamiento (datum de los puntos: WGS84, diferente del datum de la cartografía 1:25000).**  
**A la derecha, después del preprocesamiento (datum de los puntos: Camacapa, el mismo de la cartografía 1:25000)**

### Evaluación de la calidad de los datos de diferentes fuentes de origen

Este paso resultó necesario para evaluar la compatibilidad altimétrica de los datos provenientes de diferentes fuentes. La tabla 1 muestra el resultado del análisis estadístico de los datos altimétricos disponibles.

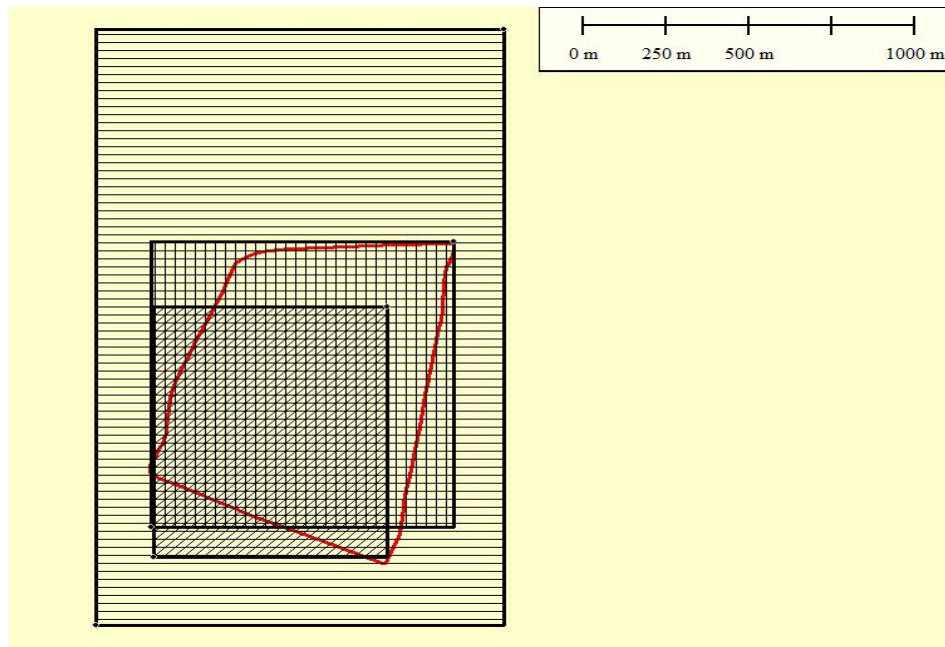
**Tabla 1. Resumen del análisis estadístico de los datos altimétricos**

Estadígrafo	Curvas de Nivel CN	Puntos de Dibujo DW	Puntos de Tablas XL
Cota Media	69,479561	69,5168067	69,7167606
Desv. Estándar	1,04163166	0,64942208	0,70517632
Recorrido	5,5	3,3	3,3
Mínimo	66,0	67,6	67,8
Máximo	71,5	70,9	71,1
Conteo	3645	119	71

Como se puede apreciar en la tabla 1, los datos provenientes de las tres fuentes tienen valores de cotas medias y desviaciones estándar similares.

Los datos de curvas de nivel son los más abundantes (3645 puntos), pero se extienden en un área algo mayor que el barrio Marzal. Las diferencias en los valores medios de las cotas de las tres fuentes no superan los 25 cm, lo cual ha sido interpretado como que todos los datos están calificando adecuadamente la altimetría de la zona de interés.

Los valores comparables de las desviaciones estándar y el resto de los estadígrafos refuerzan este criterio. La figura 3 muestra el gráfico de la extensión planimétrica de los datos.



**Figura 3. Extensión planimétrica de los datos. El rayado horizontal corresponde a los datos de curvas de nivel (CN, 3645 puntos). El rayado vertical corresponde a puntos de dibujo (DW, 119 puntos). El rayado inclinado corresponde a puntos tabulados (XL, 71 puntos). Como referencia, se incluye el contorno del barrio Marzal**

## **DEFINICIÓN DE PROCEDIMIENTOS Y CREACIÓN DE NUEVOS DATOS A PARTIR DE CRITERIOS MATEMÁTICOS**

En este apartado se discuten los procedimientos aplicados sobre los datos para crear los modelos intermedios y el modelo final.

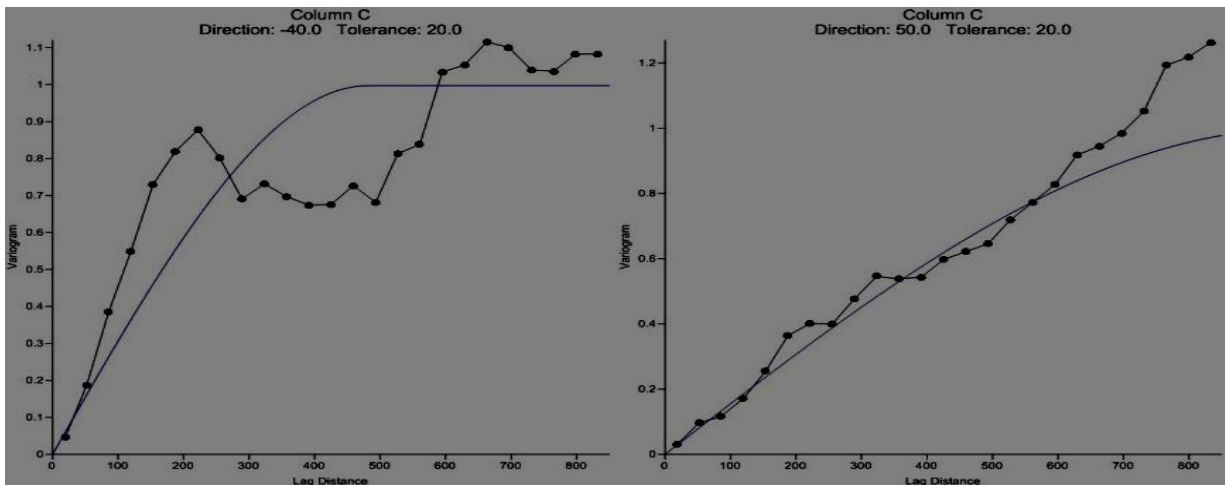
### **Análisis geoestadístico espacial y construcción de variogramas del conjunto de todos los datos**

Los métodos de la Geoestadística se emplean para analizar y describir los datos espaciales que serán sometidos a procesos de interpolación. Una de las herramientas fundamentales es la construcción de los variogramas, que son gráficos que expresan el grado de semejanza o diferencia entre pares de muestras con la distancia. Los variogramas permiten estimar las direcciones de mínima y máxima variabilidad y la orientación de los ejes de la anisotropía, los que permiten determinar pesos óptimos durante las futuras interpolaciones (Burrough and McDonnell 1998).

En el caso de los datos altimétricos de la zona del barrio Marzal, el estudio de los variogramas observados se resume en la figura 4. Como se puede apreciar, se manifiesta una evidente anisotropía en los datos altimétricos, correspondiendo al acimut  $130^\circ$  (dirección  $-40^\circ$ ) la menor distancia de correlación, de 400 m, y al acimut  $50^\circ$  (dirección  $50^\circ$ ) la mayor distancia de correlación, de 800 m. Esta información revelada por los variogramas será empleada ventajosamente en el proceso de interpolación para crear la malla regular, al definir el entorno de búsqueda de los puntos vecinos para calcular los puntos de la malla. En este caso, se define un área de búsqueda de forma elíptica, con radio mayor igual a 800 m correspondiente al acimut



130° y radio menor igual a 400 m con acimut igual a 50 °. La construcción y estudio de los variogramas se hizo con el software Surfer.



**Figura 4. Resultados del estudio de los variogramas. A la izquierda, variograma en la dirección de mayor variabilidad. A la derecha, variograma en la dirección de menor variabilidad de los datos altimétricos**

### Interpolación

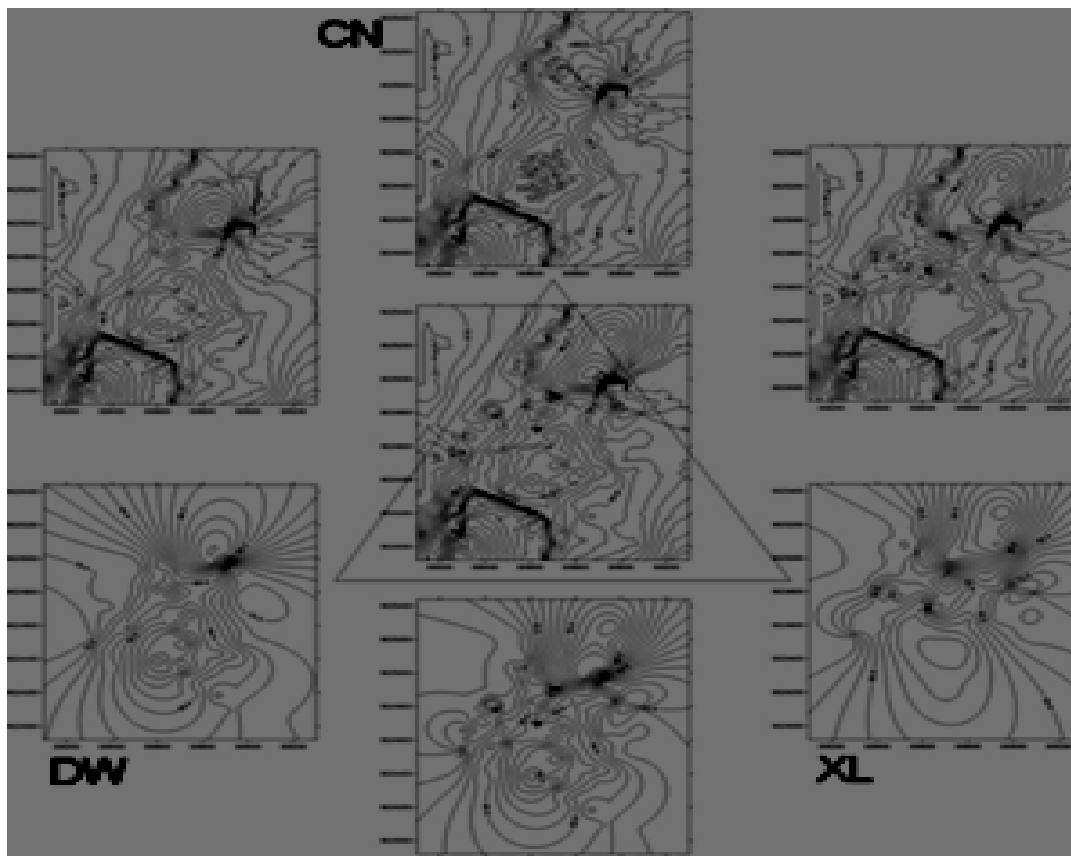
La construcción de un modelo raster o malla regular se hace mediante un proceso de interpolación de los datos. En el caso de los datos del barrio Marzal se empleó el método de interpolación óptima basado en la Geoestadística, conocido como krigging ordinario (Burrough and McDonnell 1998), teniendo en cuenta los resultados de la variografía. La resolución espacial escogida para la malla regular inicial fue de 10 m, teniendo en cuenta la densidad superficial de los puntos de datos. La interpolación se hizo en el software Surfer.

La figura 5 muestra los resultados alcanzados en el proceso de interpolación de los datos de diferentes orígenes. En los vértices del triángulo central están los modelos interpolados a partir de los datos puros de diferentes orígenes. En el vértice superior, la interpolación de datos de curvas de nivel CN; abajo a la izquierda, a partir de dibujos DW; abajo a la derecha, a partir de las tablas XL. En los lados del triángulo, los modelos con datos combinados de parejas de orígenes. Arriba a la izquierda, curvas de nivel y dibujos. Arriba a la derecha, curvas de nivel y tablas. Abajo al centro, dibujos y tablas. Al centro del triángulo, el modelo resultante de la combinación de los datos de las tres fuentes, que fue el resultado escogido para continuar el procesamiento. Lo que más resalta en esta figura es que los principales rasgos del relieve dentro del área de interés se expresan de manera similar en los modelos creados con los datos de las tres fuentes independientes, lo que constituye una evidencia de que todas las fuentes reflejan características y visiones similares de la misma realidad.

### Filtrado pasa bajas del modelo con resolución espacial de 10 m

El propósito de cualquier filtración pasa bajas es eliminar las fluctuaciones (en este caso, espaciales) locales de pequeñas dimensiones (o lo que es lo mismo, de frecuencias altas) para suavizar las asperezas de las superficies. Como para una simulación interesa conservar

esencialmente las tendencias de la superficie, este paso resulta no solo conveniente, sino prácticamente imprescindible.



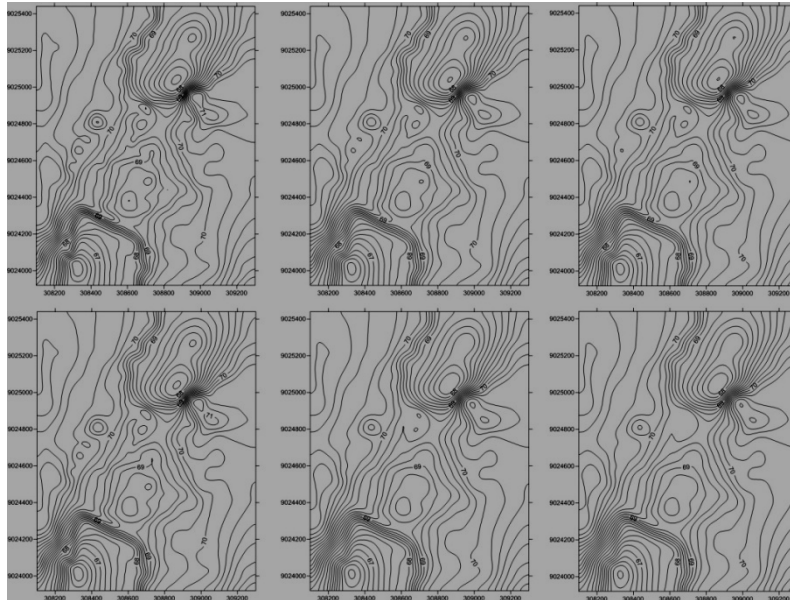
**Figura 5. Resultados de la interpolación de los datos espaciales. Identificados con CN, DW y XL están los modelos con los datos puros de diferentes orígenes. En el centro y los lados del triángulo, los modelos resultantes de la combinación de datos de las tres fuentes**

Para escoger el filtro más conveniente y el modo de aplicarlo, se hicieron varias pruebas con el software Surfer. Se probaron los filtros pasa bajas gaussiano y de promediación de tamaño  $3 \times 3$  (9 términos) y se aplicaron diferentes cantidades de veces sobre el modelo resultante de la interpolación. La figura 6 muestra el resultado de la prueba de los filtros. Como modelo se escogió el graficado debajo a la derecha, por presentar las características geométricas visuales más agradables, resultantes de aplicar 10 veces consecutivas el filtro de promediación de  $3 \times 3 = 9$  términos. La filtración se hizo en el software Surfer.

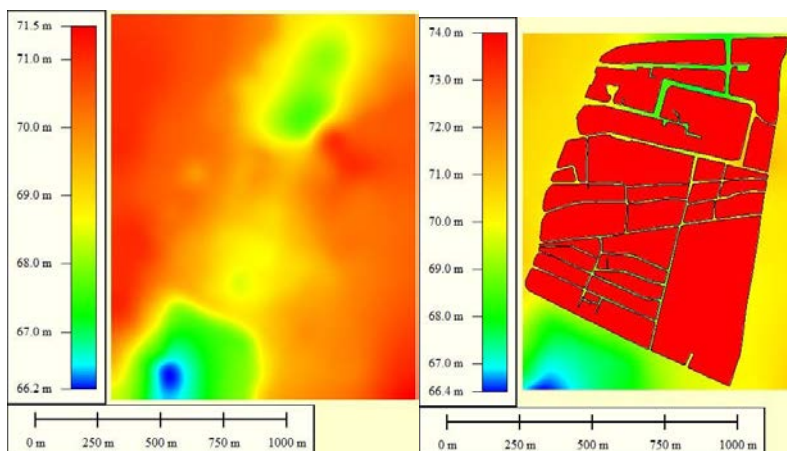
### **Remuestreo del modelo para aumentar la resolución espacial final a 2 m**

El remuestreo de un modelo con baja resolución para crear un nuevo modelo con mayor resolución espacial es un proceso que debe ser realizado con precaución, pues aunque desde el punto de vista práctico las herramientas de software existentes pueden realizar cómodamente esta operación, existen algunos inconvenientes teóricos asociados con este proceso. Sin embargo, en los casos como el de este trabajo, este paso resulta indispensable para poder modelar las entidades de pequeñas dimensiones presentes en el área estudiada. El hecho de tratarse de un MDE correspondiente a una zona llana, con valores mínimos y máximos de las cotas muy

próximos (ver tabla 1), es una particularidad que admite el remuestreo sin muchos riesgos de crear rasgos espaciales artificiales. Una vez que se ha obtenido un MDE de resolución baja, se hace el remuestreo para obtener una nueva malla con alta resolución. Es conveniente que este proceso se realice con una herramienta que asegure una interpolación adecuada entre los nodos del modelo de baja resolución, como es el caso del software empleado, Global Mapper. La figura 7 (a la izquierda) muestra el modelo de elevaciones final con resolución espacial de 2 m.



**Figura 6. Resultados de las pruebas de filtración. Fila de arriba, filtro gaussiano. Fila de abajo, filtro de promediación. Columna a la izquierda, filtro aplicado una vez; al centro, 5 veces; a la derecha, 10 veces**



**Figura 7. Representación gráfica del modelo de elevaciones. A la izquierda, el modelo con resolución espacial de 2 m. A la derecha, el modelo final, con las áreas construidas superpuestas. Obsérvese la presencia de la red vial**

#### Superposición de la red vial y las áreas construidas al modelo de elevaciones

Para dar acabado al MDE para las simulaciones hidrológicas se hace necesario superponer las áreas construidas a la superficie del terreno. Este paso se puede hacer con mayor o menor detalle,

según los datos de que se disponga. En el caso que se estudia, se trabajó con la ortofoto satelital, y se optó por considerar como espacio construido las parcelas o manzanas de terreno entre las calles principales del barrio, sin entrar en los detalles relacionados con la separación entre las edificaciones individuales. Sin embargo, esta cuestión queda a la consideración de los especialistas, ya que de la misma ortofoto se pueden extraer rasgos con diferentes niveles de detalle del ambiente construido. En la figura 7 (a la derecha) se muestra el MDE definitivo con las áreas construidas superpuestas.

## ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL MDE OBTENIDO

A continuación se discute la aplicación de diferentes criterios cartográficos, ingenieriles e históricos independientes, para analizar y evaluar la calidad del MDE obtenido.

### Análisis de la compatibilidad del modelo con los datos a escala 1:25000

La compatibilidad del MDE de alta resolución con la cartografía a escala 1:25000 se puede evaluar superponiendo las curvas de nivel del mapa a la escala citada sobre el MDE. La figura 8 muestra el resultado de esta superposición. Las diferentes resoluciones de ambos modelos entraña la necesidad de aceptar discrepancias naturales. Se aprecia que el mínimo al Sur-Oeste del modelo está rodeado adecuadamente por la curva de nivel de 67,5 m. También se aprecia que en la esquina Sur-Este del modelo hay una elevación coincidente con la curva de nivel 70,0 m, y que la curva de nivel 70,0 m que corre del Sur-Oeste hacia el Norte refleja la tendencia predominante en el límite Oeste de la “silla de montar”. Este análisis muestra que el MDE obtenido es compatible con los datos cartográficos a escala 1:25000. Es importante destacar dos zonas de mínimo presentes en el barrio Marzal: un mínimo no muy profundo, completamente interior y cercano al límite sur del barrio, y otro mínimo, más pronunciado, cercano al límite Norte del barrio y que se extiende más al Norte de este límite.

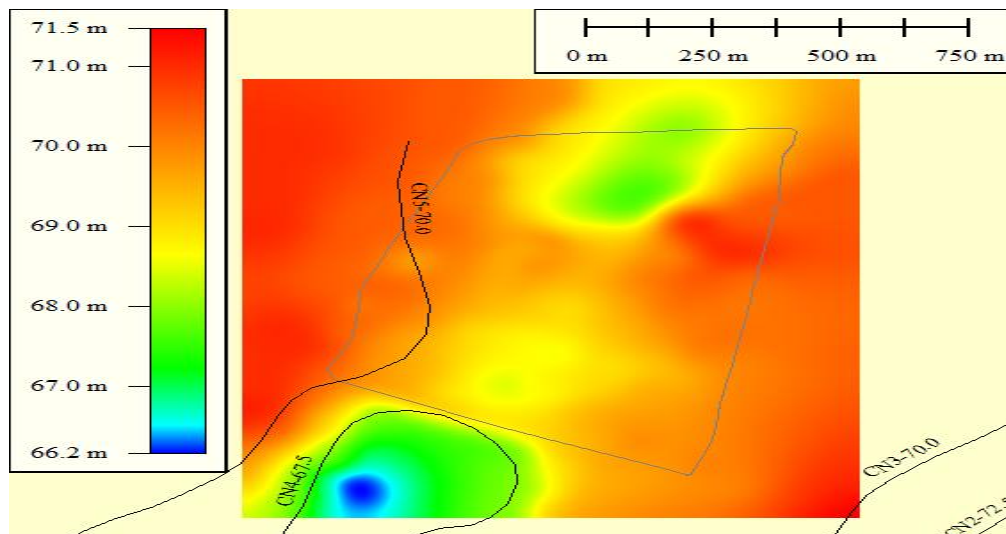


Figura 8. Compatibilidad del MDE con los datos a escala 1:25000

### Validación recíproca

La validación recíproca es un método que se emplea cuando es imposible realizar la medición de las coordenadas X, Y y Z de nuevos puntos después de haberse construido el modelo de

elevaciones. Para aplicarlo, basta con excluir algunos pocos puntos del conjunto de datos originales, que no serán considerados para la creación del modelo, sino solo para comparar su coordenada Z observada con la coordenada Z predicha por el modelo, lo cual sirve para evaluar la calidad del MDE. En el caso que se estudia, se escogieron tres puntos, uno de cada fuente de origen, localizados, respectivamente, al norte, centro y sur del barrio Marzal. La tabla 2 muestra el resultado de la validación recíproca del modelo. Obsérvense las pequeñas diferencias entre los valores observado y predicho de las cotas. La presencia de diferencias positivas y negativas es un indicio de la aleatoriedad de los residuos o errores del modelo. La calidad de la validación se mejora en la medida que se utilicen más puntos, lo cual resultó poco conveniente en este ejemplo, por la poca cantidad de puntos con que se contaba inicialmente.

**Tabla 2. Resultados de la validación recíproca del MDE. Coordenadas en metros**

Punto	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z obs.	Coord. Z pred.	Residuo Zo- Zp
1 (CN)	308740,769	9024675,606	69,0	69,154	-0,154
2 (DW)	308587,754	9024289,511	68,8	68,827	-0,027
3 (XL)	308749,141	9025119,262	68,6	68,545	0,055

### Evaluación de los residuos

Se les llama residuos a las diferencias entre las cotas de los datos observados y las cotas, para esos mismos puntos planimétricos, estimadas mediante la interpolación. La tabla 3 presenta el resumen del análisis estadístico de los residuos obtenidos para los 1522 puntos interiores a los límites del barrio Marzal.

Con los valores de los residuos ( $r$ ) puede determinarse su desviación estándar, equivalente al error esperado en la interpolación, cuyo valor fue evaluado en la ecuación (1).

$$e_e = \pm \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{n-1}} = \pm 0,117 \text{ m.} \quad (1)$$

Este resultado puede considerarse satisfactorio si se tiene en cuenta que el elemento más confiable de toda la región es el plano con curvas de nivel de equidistancia 0,5 m, cuyo error de acuerdo con las normas establecidas para un terreno llano es del orden de  $\pm 0,5/3$  m. La inclusión de 190 puntos adicionales obtenidos por levantamiento directo ayuda a reducir el error, pero no de forma significativa, toda vez que la cantidad mayor de puntos en el plano aportados por las curvas de nivel (3645), tiene mucho mayor peso en el resultado.

Los levantamientos topográficos del plano se realizan con una densidad que depende de la escala del plano y la equidistancia entre curvas de nivel del terreno, estableciéndose de manera general, aunque no de forma absoluta, que la equidistancia es una milésima del denominador de la escala (IGME 2006). Se está tratando de escalas de proyecto, sobre todo 1:1000 y 1:500, que son las necesarias para la modelación espacial del terreno con vista a aplicarlas en un modelo hidrológico, y poder evaluar con adecuada exactitud las láminas de escurrimiento para el pronóstico de riesgos de vulnerabilidad, en presencia de lluvias intensas.

Sobre la densidad de los puntos que se toman para definir la altimetría se recomiendan densidades que estén dentro de 25 a 100 puntos por ha para equidistancias de 1 a 0,5 m, respectivamente (Lemohtov and Mettelman 1978), que es suficiente para alcanzar las precisiones



para las que están elaborados los planos a esas escalas; es decir, la tercera parte de la equidistancia como se expresó anteriormente.

Entonces puede asegurarse que el MDE elaborado con un error medio cuadrático de 0,12 m cumple con los requisitos necesarios para la modelación espacial hidrológica e hidráulica de la zona de Marzal.

**Tabla 3. Resumen del análisis estadístico de los residuos**

<b>Estadígrafo</b>	<b>Valor</b>
ResiduoMedio	0,000944
Error típico	0,003754
Mediana	-0,00665
Moda	-0,0604
Desviaciónestándar	0,146466
Varianza de la muestra	0,021452
Mínimo	-0,6695
Máximo	1,5097
Suma	1,4372
Cuenta	1522

### **Criterios cualitativos de conocedores de la ciudad**

Este último criterio aplicado consistió en recorrer los lugares identificados como máximos y mínimos en el modelo, y la entrevista y consulta a vecinos y conocedores del barrio, para confirmar si los accidentes presentes en el MDE definitivo obtenido, coinciden o no con las zonas del barrio que presentan mayores niveles de encharcamiento. Para esto se presentó la información obtenida en el MDE por sectores de las calles y en relación con las edificaciones próximas, para que fueran reconocidas fácilmente por los entrevistados. Este criterio arrojó que el MDE obtenido refleja con bastante fidelidad los fenómenos de encharcamiento conocidos históricamente en el barrio Marzal.

### **CONCLUSIONES**

El estudio de inundaciones en áreas de llanura urbanizadas exige la utilización de MDE con una resolución espacial no menor que 3 m, lo que permite que se expresen en el modelo los accidentes y rasgos propios de una zona urbana, como son las calles y pasos entre edificaciones, que suelen tener dimensiones comparables con este valor. Generalmente se parte de datos de fuentes con menores resoluciones espaciales; es decir, correspondientes a escalas más pequeñas, como es el caso de los obtenidos a partir de la cartografía 1:25000. Estos modelos originales son modificados o enriquecidos con nuevos datos, con el propósito de contemplar tanto la red de drenaje superficial y subterráneo, así como el trazado de obras viales y ferroviarias que eventualmente actúan como divisorias de las aguas o como red de drenaje artificial.

En particular en este trabajo y por la potencialidad de los SIG en la realización de operaciones espaciales, se alteró el modelo de elevaciones original mediante la interpolación por el método Kriging, la filtración de la superficie y el aumento de la resolución espacial mediante el remuestreo, imponiéndole la red de drenaje a lo largo de las obras viales y las “barreras antrópicas”, procedimiento usado fundamentalmente para mejorar la representación de la dinámica hídrica, ya que al ser una zona urbana llana, el modelo de elevaciones original no llega a representar bien las líneas de flujo para determinadas situaciones.

El proceso empleado en este trabajo mantiene una atención constante a la evaluación de la calidad del modelo, desde antes de la integración de los datos iniciales, hasta el modelo final propuesto, para asegurar que el modelo refleje la realidad “real”, y que las inferencias hechas a partir de los resultados de las simulaciones hidrológicas basadas en este modelo sean verdaderamente aplicables en la práctica social y no se deriven de “artefactos” creados artificialmente en un modelo “virtual”, que no refleje debidamente la realidad.

El avance en el tratamiento de la información permite un aumento en la resolución espacial del modelo, agilizando el análisis de distintas escalas espaciales para la desagregación de la cuenca en forma rápida y sencilla. Este análisis permite estudiar la variación espacial de factores que al usar modelos concentrados se deben considerar como constantes.

## RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a las autoridades del Gobierno Provincial de Luanda, al consorcio SOGREA-H-COBA y a la Unidad Técnica de Saneamiento y Gestión de Luanda (UTSGL) por el apoyo brindado para hacer posible este trabajo.

## REFERENCIAS

- Burns I. S., Semmens D. J., Scott S. N., Levick, L. R., Goodrich, D. C. and Kepner W.G.** (2004). “The automated geospatial watershed assessment (AGWA) tool - enhanced capabilities of just released version 1.4”. Proc. Arizona Hydrological Soc. 17th Annual Sym. Tucson, Arizona, USA.
- Burrough P. A. and McDonnell R. A.** (1998). “Principles of Geographical Information Systems”. Oxford University Press. New York, USA.
- EPSG** (2013). “Base de Datos de Parámetros Geodésicos EPSG, versión 8.3”. European Petroleum Survey Group. Extraído de: [http://www.epsg.org/databases/Discv8\\_3.html](http://www.epsg.org/databases/Discv8_3.html) Parámetros del Datum Camacupa, código EPSG 22033, disponible en <http://spatialreference.org/ref/epsg/22033/html/>.
- Fallas J.** (2007). “Modelos digitales de elevación: teoría, métodos de interpolación y aplicaciones”. Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional, Costa Rica.
- Felícísimo A. M.** (1994). “Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales”. Extraído de <http://etsimo.uniovi.es/feli/>.
- Gabazza S. E. y Ruberto A. R.** (2007). “Metodología para el trazado de cuencas urbanas de llanura. Estudio de caso: Cuenca de la Avenida Urquiza, Resistencia, Chaco”. Terceras Jornadas de Comunicación Científica y Técnica. Facultad de Ingeniería. UNNE, Argentina.
- Harmar O. P. and Clifford N. J.** (2007). “Geomorphological explanation of the long profile of the Lower Mississippi River”. *Geomorphology* 84, Elsevier. Extraído de <http://www.sciencedirect.com>.
- IGME** (2006). “Especificaciones técnicas generales para la realización de cartografía topográfica a cualquier escala”. Instituto Geográfico Militar del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Lemohtov L. and Mettelman E. Ya.** (1978). “The use of digital terrain model for automated relief drawing”. Symposium of National Committee of Photogrammetry. Moscow, USSR.
- Quintero D. A., Montoya D. M., y Betancur T.** (2009). “Aplicación metodológica para obtener modelos digitales de elevación – MDE – de escala local en zonas de humedales”. *Revista Gestión y Ambiente*, Vol. 12, No. 2. ISSN 0124.1777X. Medellín, Colombia.