

MODELACIÓN GEOESPACIAL EXPLORATORIA EN CUENCAS DE LLANURA: CASO DE APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL ARROYO DULCE, BUENOS AIRES, ARGENTINA

• María Lourdes Lima •

Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina

• John Fernando Escobar •

Universidad de Antioquia, Colombia

• Héctor Massone • Daniel Martínez •

Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina

Resumen

Este trabajo presenta una evaluación de las técnicas y los procesos que pueden emplearse en la tarea de levantamiento y ajuste de geodatos y procesos de geomodelación asociados a la construcción de modelos espaciales con propósitos hidrológicos e hidrogeológicos. Igualmente se hace un análisis de la información y técnicas disponibles, y su influencia en los resultados obtenidos. Se utilizó como información antecedente los modelos de elevación digital obtenidos del sensor SRTM y los elaborados a partir de las curvas de nivel obtenidas de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional, escala 1:50 000, a través de las técnicas TIN to Raster con corrección con la herramienta *Arc Hydro* y *Topo to Raster*. Los resultados obtenidos fueron modelos geoespaciales tanto de superficie como de subsuelo de la cuenca del Arroyo Dulce. El uso de estas herramientas de modelación en conjunto con algoritmos modificados muestra su potencial para la obtención de modelos hidrológicos e hidrogeológicos.

Palabras clave: modelación geoespacial, modelos de elevación digital, sistemas de información geográfica.

Introducción

Los sistemas de información geográfica, también conocidos con el acrónimo SIG, se componen de una base de datos espacialmente referenciada y de un conjunto de instrucciones y procedimientos que permiten operar sobre ella (Burrough y McDonnell, 1998). Los SIG y los modelos hidrológicos han experimentado una evolución lenta en el tiempo para llegar a la situación actual. Fotheringham y Rogerson (1994) indicaron que por casi dos décadas, 1960 y 1970, los SIG y los modelos hidrológicos se desarrollaron en paralelo con pocas interacciones.

Las primeras interacciones de los SIG con los modelos hidrológicos se presentaron en los

albores de la década de 1980. Este proceso motivó en la comunidad SIG un esfuerzo continuado, dirigido a mejorar las capacidades analíticas de estos sistemas (Goodchild *et al.*, 1992) y, en la comunidad de hidrólogos, la demanda por una representación digital del terreno de mayor exactitud (Singh y Fiorentino, 1996), (Clark, 1998). Actualmente los usuarios de los SIG y los hidrólogos han reconocido el mutuo beneficio de la integración a partir de los éxitos de los últimos años (Gossel *et al.*, 2004). El avance en la tecnología computacional y las metodologías geoinformáticas, basadas en el modelamiento hidrológico, han permitido una integración efectiva en la hidrología contemporánea (Lanza *et al.*, 1997; Su y Troch, 2003; Schmugge *et al.*, 2002; USGS, 2007-2010).

Partiendo del hecho que el modelo hidrológico conceptual es un insumo necesario para proveer soluciones a los problemas hidrológicos de gran escala, los SIG tienen una gran capacidad tanto para procesar el modelo de elevación del terreno (MDT) como la información de las unidades hidrogeológicas, dando a los modeladores una nueva plataforma para el manejo de datos y visualización de los mismos, permitiéndoles clarificar el modelo conceptual concebido. En la literatura pueden encontrarse varias referencias de la integración del SIG con los modelos hidrológicos, donde se reconocen sus ventajas (Maidment, 1993; McDonnell, 1996; Morad y Triviño-Pérez, 2001; Samper *et al.*, 2005; Belmonte y Núñez, 2006).

En la actualidad, el uso de los SIG como herramienta de preprocesamiento en problemas hidrológicos e hidrogeológicos se constituye más en una regla que en una novedad, es así como surgen aplicaciones de amplio uso como el modelo *Arc Hydro*, desarrollado por el Centro de Investigación sobre Recursos Hídricos (CRWR) de la Universidad de Texas, el cual es usado para representar las características hidrológicas de una región determinada en un SIG, sustentándose en una representación cartográfica básica de las características hidrológicas superficiales, permitiendo la integración de estas características con modelos de simulación hidrológicos e hidráulicos (GISWR, 2004).

No menos importante es la integración de nuevos métodos de modelación y fuentes de geoinformación disponibles en la última década, que entran a suplir necesidades sensibles de información e incluso permiten corregir errores y falencias de algunas fuentes utilizadas normalmente y que, por el estado tecnológico en el cual fueron levantadas, no cumplen con los requerimientos de los modelos que actualmente se desarrollan. En estas innovaciones sobresalen el algoritmo *Topo to Raster*, que consiste en una función *spline* que permite generar modelos de elevación a partir del manejo simultáneo de puntos muestrales, isopletas y redes de drenaje; y la información

topográfica proveniente de la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) que aporta mediciones de los cambios de altura en regiones extensas para casi todo el planeta.

En este trabajo se exploran las técnicas que pueden emplearse en la obtención de modelos de elevación útiles en la concepción de modelos hidrológicos e hidrogeológicos a partir de fuentes de información convencionales, como las curvas de nivel y cuerpos hídricos, y las nuevas fuentes de información topográfica, como las imágenes SRTM. Se utilizan las herramientas de amplio uso como son el SIG *Arc Gis* y el aplicativo *Arc Hydro*, en conjunto con algoritmos espaciales simples que están al alcance de los analistas de problemas hidrológicos, aunque estos no tengan una formación avanzada en el manejo de sistemas de información geográfica. La zona piloto utilizada para este caso de estudio fue la cuenca del Arroyo Dulce, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Área de estudio

La cuenca del Arroyo Dulce cubre una superficie aproximada de 1 000 km² y se encuentra ubicada al sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, abarcando el este del Partido de Balcarce y el sur del Partido de Mar Chiquita. El Arroyo Dulce nace en la Sierra El Volcán y desemboca en la laguna costera de Mar Chiquita, la cual fue declarada en 1996 Reserva Natural de Uso Múltiple Parque Atlántico Mar Chiquita por el programa Man and the Biosphere (MAB, UNESCO) (Iribarne, 2001). El Arroyo Dulce tiene una longitud de 112 km y sus principales afluentes son los arroyos Las Negras y de Los Huesos (figura 1).

El área se caracteriza por tener un clima de tipo “templado-húmedo”, según la clasificación de Köppen o de tipo “sub-húmedo-húmedo, mesotermal, sin deficiencia de agua” de acuerdo con el método de Thornthwaite (Kruse, 1986). El análisis de los datos pluviométricos de la Estación Mar del Plata-Mar del Plata Aero del Servicio Meteorológico Nacional ha

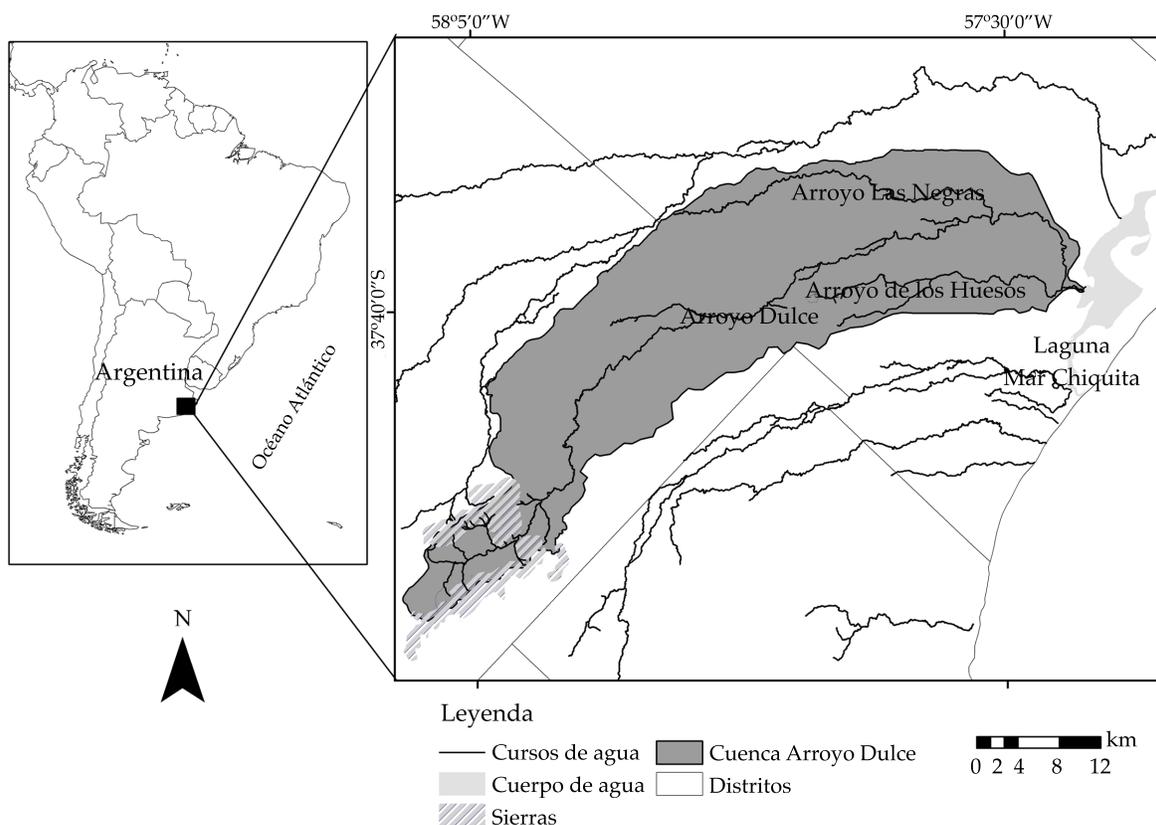


Figura 1. Ubicación de la cuenca del Arroyo Dulce.

permitido determinar que el módulo pluviométrico histórico del siglo XX es de 861.3 mm. Mientras que si consideramos el periodo 1971-2007, la media pluviométrica anual para la misma estación meteorológica es de 929 mm. y para la Estación EEA-Balcarce es de 924 mm. En cuanto a las temperaturas, en la estación Mar del Plata-Mar del Plata Aero se ha registrado una media anual para el periodo 1971-2007 de 14.04 °C, mientras que para la Estación EEA-Balcarce se registró 13.8 °C.

La configuración geomorfológica en la región se caracteriza por la presencia de las Sierras de Tandilia, que conforman un sistema de “montañas en bloques”, separados por amplios valles y limitados por fracturación de muy alto ángulo (Sui y Maggio, 1999) y

una extensa región plana que se extiende desde el piedemonte hasta el mar. En el área de estudio es posible reconocer tres grandes sistemas geomorfológicos: sierras, lomadas periserranas y llanura fluvioeólica. Las sierras se encuentran en la cabecera de la cuenca y tienen una altura máxima de 357 metros sobre el nivel del mar (msnm) y están conformadas por estratos subhorizontales de roca cuarcítica; las lomadas están conformadas por sedimentos “loessoides”, limos y arenas muy finas, y tienen una altura de 100 msnm, aproximadamente. La llanura predomina a lo largo de toda la cuenca y se caracteriza por una pendiente muy baja (< 2.4 %).

La cuenca del Arroyo Dulce es sustento de actividades agrícolas y ganaderas, caracte-

rísticas de la región pampeana, y posee al recurso hídrico subterráneo como única fuente de abastecimiento para todos sus usos. En el sector periserrano ondulado predomina la actividad agrícola, con aplicación de riego en algunos sectores, y en la zona de llanura predominan suelos alcalinos, con problemas de drenaje y altos valores de pH, por lo cual son considerados suelos aptos para la actividad ganadera. A su vez, en este paisaje se distinguen en forma de “parches” suelos argiudoles acucios, argialboles y hapludoles tauto árgicos, donde es posible el establecimiento de cultivos agrícolas (INTA, 1989; Teruggi y Kilmurray, 1980).

Metodología

Para elaborar y procesar la información hidrológica de la cuenca del Arroyo Dulce se utilizó el sistema de información geográfica ArcGis 9.3 (ESRI, 2007). Esta herramienta se ha utilizado anteriormente por varios autores, entre ellos Konadu y Fosu (2009) y Ozdemir y Bird (2009) brindando una base de datos hidrológicos con información espacial y temporal utilizada en modelos de gestión y análisis de escenarios de cuencas.

El procedimiento aplicado consistió en la generación de diferentes modelos de elevación del terreno (MDT), los cuales son sometidos a pruebas simples de coherencia hidrogeomórfica. El primer modelo se elaboró a partir de la digitalización de las curvas de nivel, con equidistancias de 2.5, 5 y 10 m, obtenidas de las cartas topográficas, las cuales permiten obtener la estructura denominada Triangulated Irregular Network (TIN) (Peucker *et al.*, 1978) y, a partir de ella, una matriz regular denominada Grid. En la figura 2 se muestran las secuencias previas para obtener el MDT generado a partir de las curvas de nivel.

Posteriormente, y en un proceso de uso habitual en los análisis hidrológicos, se usa la extensión Arc Hydro en la obtención de un nuevo MDT corregido llamado AgreeDEM, el cual minimiza las depresiones y los picos

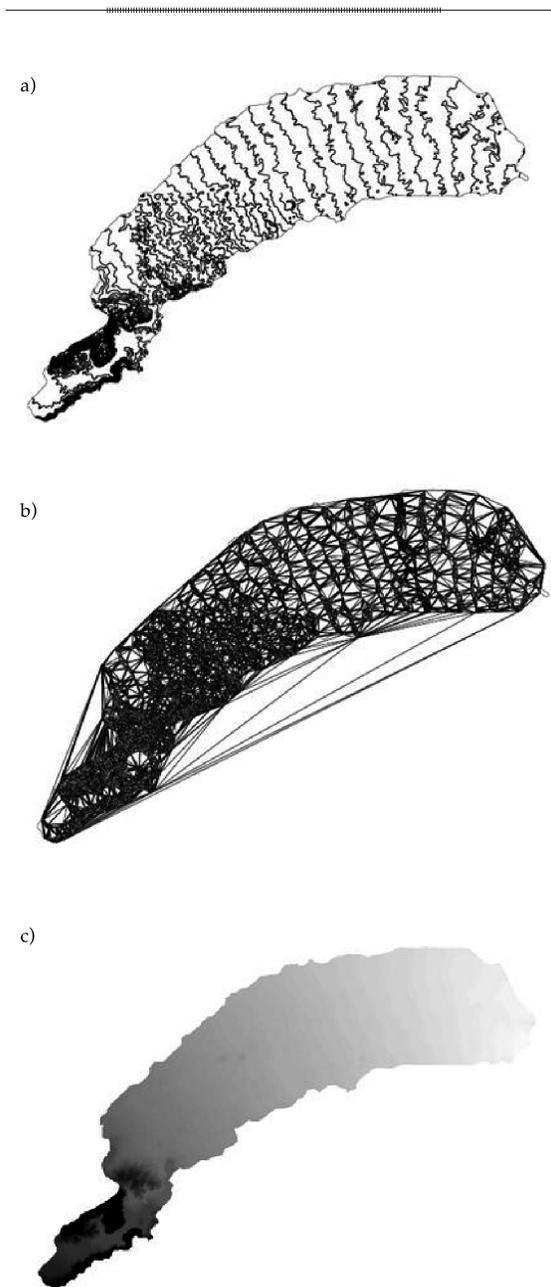


Figura 2. Representación del MDT: a) curvas de nivel, b) Triangulated Irregular Network (TIN) y c) Grid modelo de elevación.

anómalos en la elevación y disminuye las discontinuidades de la red de drenaje, por medio de una reubicación altitudinal de las celdas en la vecindad de la red de drenajes

proveniente de la cartografía básica de la zona de estudio.

El segundo modelo se basa en el algoritmo *Topo to Raster*, el cual consiste en un proceso iterativo de interpolación de diferencias finitas a través de una función *spline* finamente discretizada, en la cual la penalización sobre la rugosidad ha sido modificada para permitir que el MDT resultante acoja cambios bruscos en el terreno, como los que pueden producirse en las depresiones debidas a los arroyos en la vecindad de topografías empinadas provenientes de las curvas de nivel (ESRI, 2007), al tiempo que se garantiza que el potencial hidráulico en una celda i , sobre cada drenaje, es menor que el de la celda $i-1$. Por esto su uso requiere de al menos las curvas de nivel y una red de drenajes de alta confianza, actualidad y sentidos de flujo ajustados. La figura 3 ilustra el procedimiento y resultados de este modelo.

El tercer modelo consiste en una fuente topográfica obtenida a partir de la imagen SRTM. Estas imágenes son una medida de las alturas del terreno y no una estimación, esta propiedad presenta algunos inconvenientes en zonas donde la cobertura altera el patrón de alturas muestreado, esto es especialmente sensible en las zonas de llanura en las cuales los manchones de bosque y los bosques de galería (alrededor de los ríos y drenajes) pueden representar rizos inexistentes en la topografía, con un efecto particularmente adverso, representado por una sobre-elevación en los canales de los arroyos en los cuales se presentaría una zona de evacuación en lugar de una zona de acumulación, como se ve en el ejemplo de la figura 4.

Tales singularidades en esta fuente de información no necesariamente constituyen una barrera para su uso, ya que es posible obtener un modelo topográfico corregido recuperando la línea base del suelo a través de la eliminación de estas protuberancias. Una estrategia sencilla consiste en aplicar el algoritmo de llenado de depresiones al inverso del MDT. El modelo de elevaciones corregido de esta forma muestra una importante reducción, aunque no total,

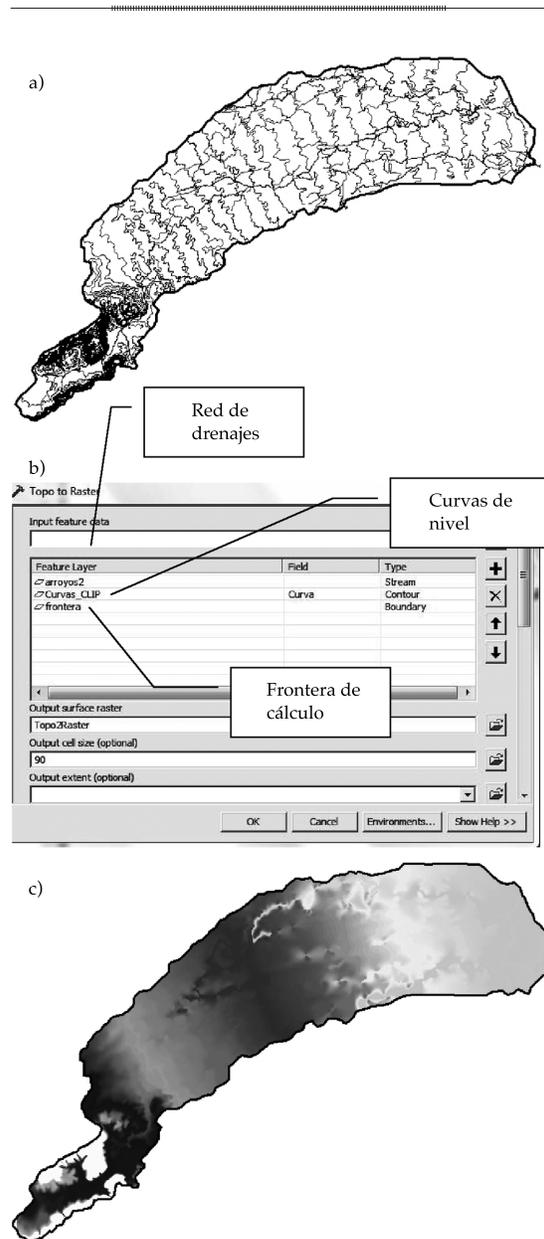


Figura 3. Representación del MDT proveniente del algoritmo Topo to Raster. A. Curvas de nivel, red de drenajes y frontera de cálculo B. Formulario de parametrización del modelo y C. Grid Modelo de Elevación.

de las sobre-elevaciones provocadas por las manchas y cinturones boscosos.

Sin embargo, este MDT todavía no tendrá un comportamiento hidrológico que cubra las expectativas del analista, dado que no se

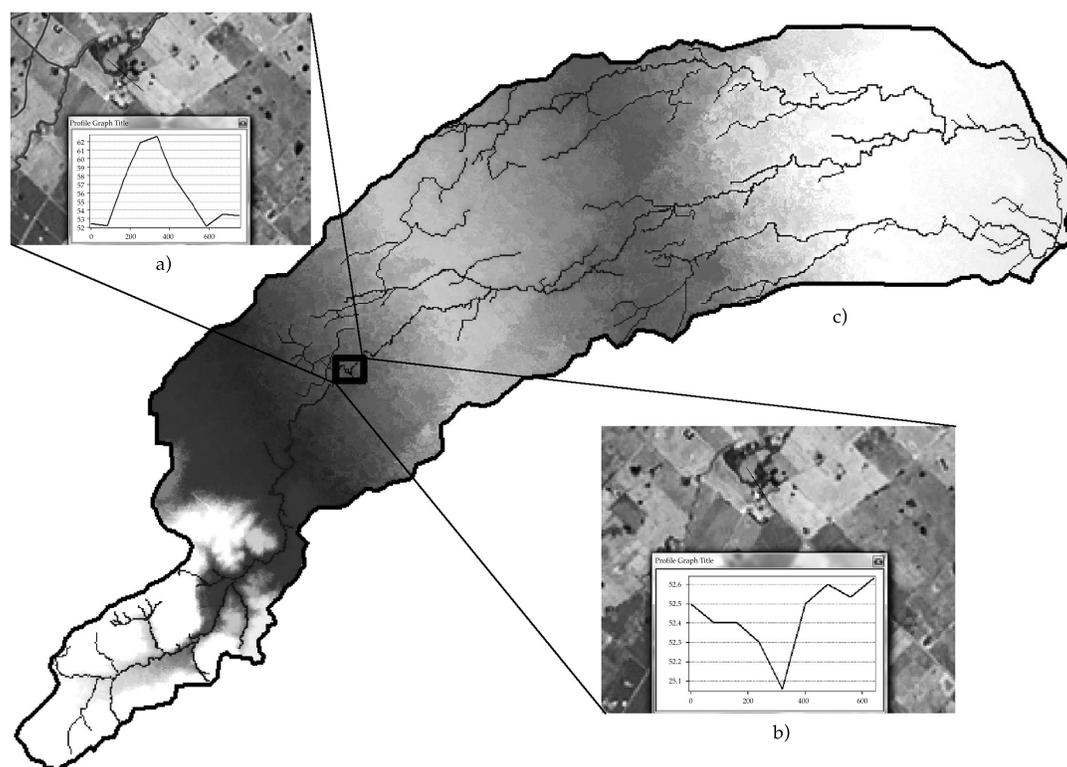


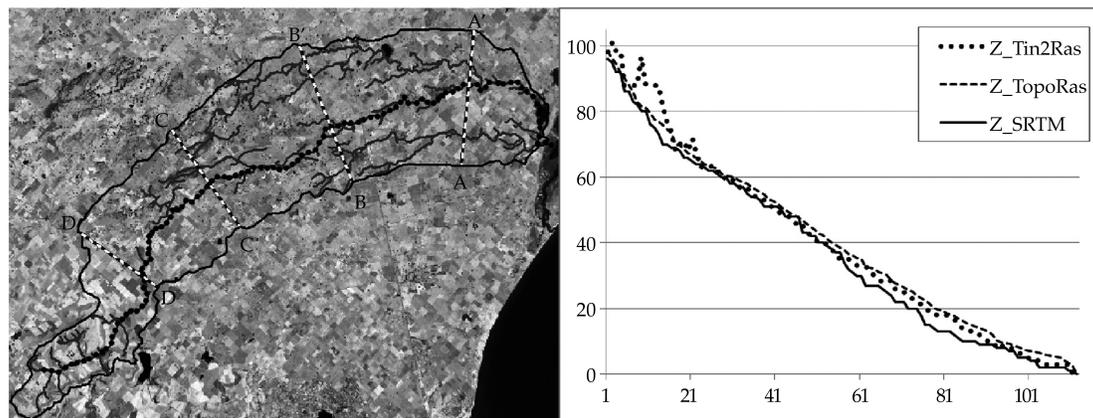
Figura 4. Representación del MDT proveniente de la fuente SRTM: a) sobre-elevaciones producidas por la vegetación arbórea; b) corrección por remoción de sobre-elevaciones y “quemado” de red de drenajes de alta confianza, y c) *Grid* modelo de elevación corregido.

ha integrado la red de drenajes. Cuando se tiene un MDT conocido, pero con patrones de drenaje contraevidentes y una red de drenajes de suficiente confianza, se puede aplicar la técnica denominada como “quemado” de la red de drenajes. Esta técnica debe ser usada con precaución, ya que se deben cumplir unos requisitos mínimos de coincidencia espacial y temporal; es decir, la red de drenajes utilizada debe ser próxima en creación o ajustes al año 2000, que es la fecha en la cual se registró la fuente SRTM.

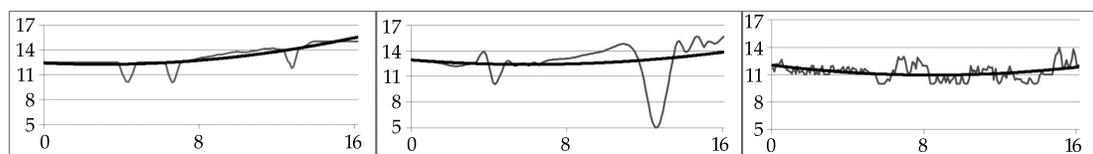
Una vez obtenidos los modelos de elevaciones se procede a su análisis y comparación a través de cortes transversales y longitudinales, con el fin de corroborar la coherencia hidrogeomórfica de cada modelo; para tal efecto se seleccionaron cuatro cortes perpendiculares al eje del cauce principal, ubicados preferencialmente en la llanura

aluvial, y un corte longitudinal a lo largo del mismo cauce, tal como se muestra en la figura 5.

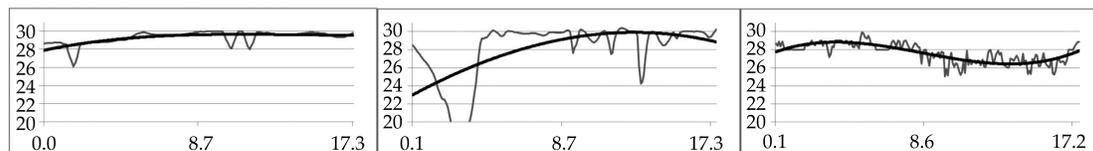
Sobre la base del MDT que cubra las expectativas del analista, se procede a la generación del modelo geoespacial de la cuenca, en el cual la herramienta *Arc Hydro Tools* oferta las utilidades requeridas en la obtención de los mapas de dirección y acumulación de flujos, la red de drenaje, la segmentación de canales, la definición de las zonas de captación (subcuencas) y los puntos de drenaje de cada subcuenca. Esta herramienta se aplicó sólo a dos MDT: el proveniente del modelo TIN y el proveniente de la imagen SRTM, ya que el modelo *Topo to Raster* presentaba algunas inconsistencias, que se explicarán más adelante. En general, el procedimiento aplicado consistió en:



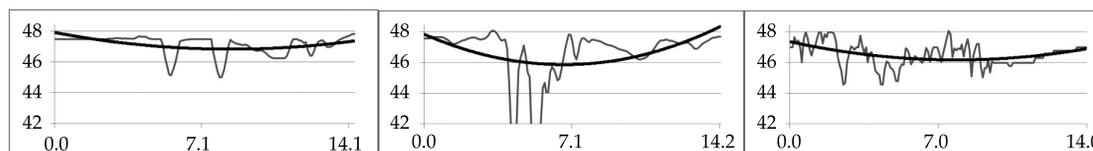
Corte A-A'



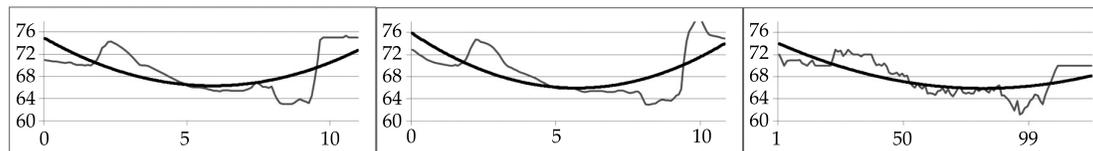
Corte B-B'



Corte C-C'



Corte D-D'



TIN to RASTER + Arhydro Tools

TOPO to RASTER

SRTM + Quemado de Drenajes

Figura 5. Comportamiento hidrogeomórfico en tres MDT. Arriba-izquierda: ubicación de los cortes transversales (líneas discontinuas) y longitudinal a lo largo del drenaje principal (línea punteada). Arriba-derecha: comportamiento de la cota (en metros) a lo largo del drenaje principal (en kilómetros). Abajo: comportamiento transversal de la cota (línea gris: perfil; línea negra: tendencia general).

1. Cálculo de las direcciones del flujo en la cuenca, el cual define, para cada píxel, la dirección del flujo, según la elevación de los píxeles vecinos.
2. Cálculo de la acumulación del flujo a partir de la matriz de dirección de flujo.
3. Obtención de la red de drenaje sintética obtenida con la función de definición de

drenajes, adoptando el valor umbral de 15 km², el cual se consideró apropiado para la superficie del área de estudio.

4. Delimitación de las subcuencas. Este proceso se realiza con la función segmentación de canales, donde cada píxel que pertenece al mismo segmento de arroyo tiene el mismo valor de identificación, y la función definición de zonas de captación, que asocia a cada canal el área correspondiente de captación.
5. Definición de subcuencas anidadas y sus puntos de control a la salida de cada subcuenca. En la figura 6 se presenta el esquema del sistema de información hidrológica utilizado en la cuenca

del Arroyo Dulce para los dos MDT mencionados.

El modelo geoespacial de superficie permite obtener un modelo geométrico de las unidades hidrogeológicas presentes, siempre y cuando se cuente con una base de datos estratigráfica que permita inferir el comportamiento de los topes y la bases de éstas. Para ello se parte inicialmente de las unidades hidrogeológicas y de la información hidroestratigráfica. El proceso clave en la creación de este modelo geométrico es la función de interpolación que se use, ya que se busca generar superficies pseudocontinuas a partir de datos discretos; sin embargo la selección de un tipo determinado de

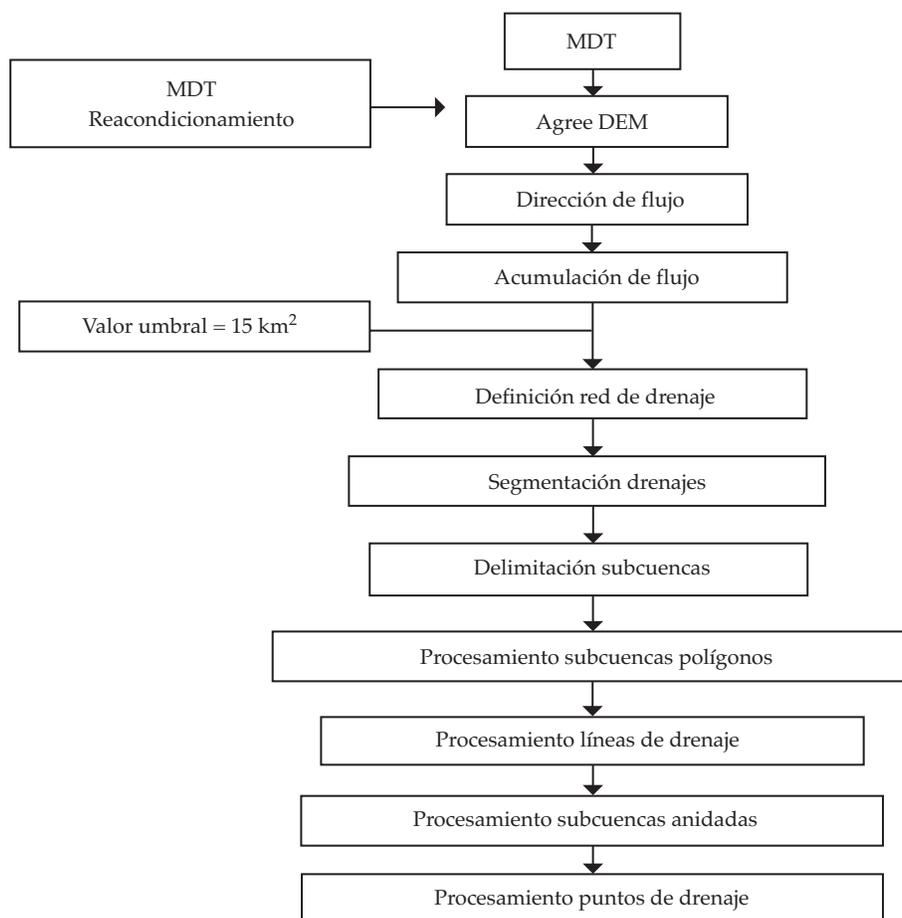


Figura 6. Esquema del sistema de información hidrológica utilizado en la Cuenca del Arroyo Dulce.

interpolación es condicionada por el número y la representatividad de los datos disponibles.

En la interpolación espacial, y especialmente la asociada al estudio de formaciones del subsuelo, se tienen dos opciones: la primera representada por los modelos geoestadísticos y la segunda por los determinísticos. La primera se basa en el método Kriging, el cual asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés; la segunda está representada por los métodos determinísticos de los cuales los más usados son el de ponderación de distancias inversas y los métodos "Spline". Una explicación de la selección de un método dado para el caso de estudio puede exceder la extensión razonable de este artículo. En nuestro caso no fue posible la aplicación del método Kriging, ya que no se pudo establecer la estacionalidad de primero y segundo orden para los datos hidroestratigráficos, por lo cual se usaron funciones *spline* con fronteras condicionadas, siguiendo el procedimiento que se detalla en resumen a continuación:

- Se establece el dominio geográfico de las funciones a modelar.
- Se identifican subdominios y para cada uno de ellos se fija una condición de frontera extendida, en la cual la variable modelada existe en todo el dominio.
- Se define una condición de frontera de cada subdominio, éstas pueden asumir dos estados: la frontera es cerrada cuando la variable se reduce paulatinamente hasta desaparecer (por ejemplo, contactos entre formaciones), o la frontera es abierta, cuando la variable finaliza abruptamente, como puede ser el caso de una falla o el límite geográfico de la cuenca. Esta condición no necesariamente indica que la variable no exista por fuera del dominio, sino que puede ser que no se conoce su estado más allá, o que sencillamente no reviste interés con respecto a la zona de estudio.
- Se determina el comportamiento espacial de una variable de control, la cual debe ser una variable de valores absolutos, como el espesor, y a partir de ella se genera "una matriz pseudocontinua de un fenómeno continuo a partir de valores discretos, basados en los puntos muestrales" coleccionados en un archivo de puntos de información estratigráfica.
- Se construyen paleotopografías que responden a las lógicas de existencia o ausencia del fenómeno, y en los espacios geométricos de existencia se resuelve la variable a través de interpolaciones espaciales con fronteras condicionadas.

Para representar los resultados se construyeron dos instrumentos de modelación. El primero se basa en elementos finitos tipo prisma que interpretan dos variables básicas: el espesor de la formación y la base de cada unidad. El segundo se basa en elementos unidimensionales construidos a partir del centroide de cada celda inicial, por lo tanto estos elementos tendrán una resolución relativamente igual al tamaño de la celda que los originales. Estos elementos unidimensionales permiten además operaciones de análisis efectivas con procedimientos simples, como cortes transversales y diagramas de paneles, que pueden generarse interactivamente a partir de polilíneas sobre las que se desee reproducir un corte prediseñado por los hidrogeólogos.

Resultados

Las figuras 2 a 4 muestran los posibles modelos de elevaciones que pueden obtenerse usando tres técnicas alcanzables en la mayoría de los Sistemas de Información Geográfica. Estos modelos y su revisión a través de análisis hidrológicos y cortes altitudinales permiten definir cuál se acerca más a las expectativas del analista, e igualmente permiten definir cuáles técnicas pueden resultar inadecuadas, dadas las condiciones particulares de una zona.

En el caso de estudio de la cuenca de Arroyo Dulce, se identifica que los modelos de elevación provenientes del modelo TIN obtenido de curvas de nivel, remuestreado como matriz y ajustado con *Arc Hydro Tools* y el obtenido de la imagen SRTM ajustada y nivelada con algoritmos de llenado de sumideros, remoción de sobre-elevaciones y quemado de la red de drenajes, son los que presentan una mayor coherencia hidrogeomórfica.

La figura 7 muestra los resultados para estos dos MDT. En la sección a) pueden verse las matrices de alturas en las cuales, a pesar de conservarse los rangos, es notoria las microtexturas de la fuente SRTM, ya que los algoritmos de suavizado no “aplanan” el MDT, sólo corrigen los comportamientos contraevidentes, como son las sobre-elevaciones en los drenajes o sumideros inexistentes.

La sección b) ilustra las direcciones de flujo, las cuales nuevamente muestran más detalles en los resultados obtenidos de la fuente SRTM, mientras que en la imagen proveniente del modelo llamado *TIN to Raster* tienden a reproducirse planos inclinados que se originan desde el modelo TIN.

La sección c) muestra que las redes de drenaje sintetizadas con *Arc Hydro* son similares en ambos modelos; sin embargo, el modelo obtenido de las curvas de nivel no logra resolver la confluencia en la desembocadura y presenta dos ramales de evacuación (ver detalle a); en forma similar, en la zona norte se presentan algunas incertidumbres, ya que mientras que el modelo TIN muestra dos ramales claramente divididos, el modelo SRTM muestra dos ramales paralelos con direcciones de flujo opuestas. Por último, en el nivel d) se presentan las 27 subcuencas obtenidas con el modelo TIN versus las 20 obtenidas con el modelo SRTM para el mismo valor umbral de 15 km².

Finalmente, la figura 8 presenta el modelo geométrico del acuífero freático, el cual se obtuvo a partir de 49 datos puntuales bien distribuidos en la cuenca, los cuales fueron interpolados utilizando funciones *spline* y

que en general muestran que el paquete sedimentario aumenta su espesor desde cerca de 20 metros en la cabecera a cerca de 130 m en la desembocadura, con una tendencia general a presentar mayor espesor en la frontera sur (120 m en promedio) que en la frontera norte (90 m en promedio).

Discusión y conclusiones

EL Arc Hydro obtiene en forma automática la red de drenaje a partir del modelo de elevación digital del terreno. Este procedimiento ha sido estudiado por muchos autores (Band, 1986; López-García y Camarasa-Belmonte, 1999; Ozdemir y Bird, 2009) y se ha demostrado que la técnica automática depende de la buena calidad de resolución del MDT. Esta técnica puede ser apropiada para las cabeceras de las cuencas, donde se encuentran los mayores valores de altitud, pero no siempre es adecuada para las áreas de llanura, ya que la precisión del MDT afecta la precisión de la red de drenaje. Es recomendable corroborar la red de drenaje obtenida por la herramienta *Arc Hydro* con las cartas topográficas del área de estudio y con contrastaciones con imágenes de satélite y fotografías aéreas.

En la figura 5 se muestra una comparación de los posibles modelos digitales de elevación que pueden obtenerse utilizando técnicas de geomodelación. Al observar la variación del gradiente a lo largo del cauce principal, es evidente que el modelo *TIN to Raster* hereda pequeñas incongruencias del MDT obtenido de la red de triángulos irregulares, es así como se presentan ascensos del agua en cercanías de los 10 y 20 km; este hecho es contraevidente desde el punto de vista hidrológico, o de presentarse deberían existir en estos sitios pruebas de un embalsamiento o un flujo subterráneo, lo cual no es el caso en la zona de estudio.

Por otro lado, el modelo *Topo to Raster* muestra un gradiente más adecuado, pero introduce errores laterales, ya que el algoritmo acumula el gradiente y en algunos casos (ver cortes A-A', B-B' y C-C'), la única forma de

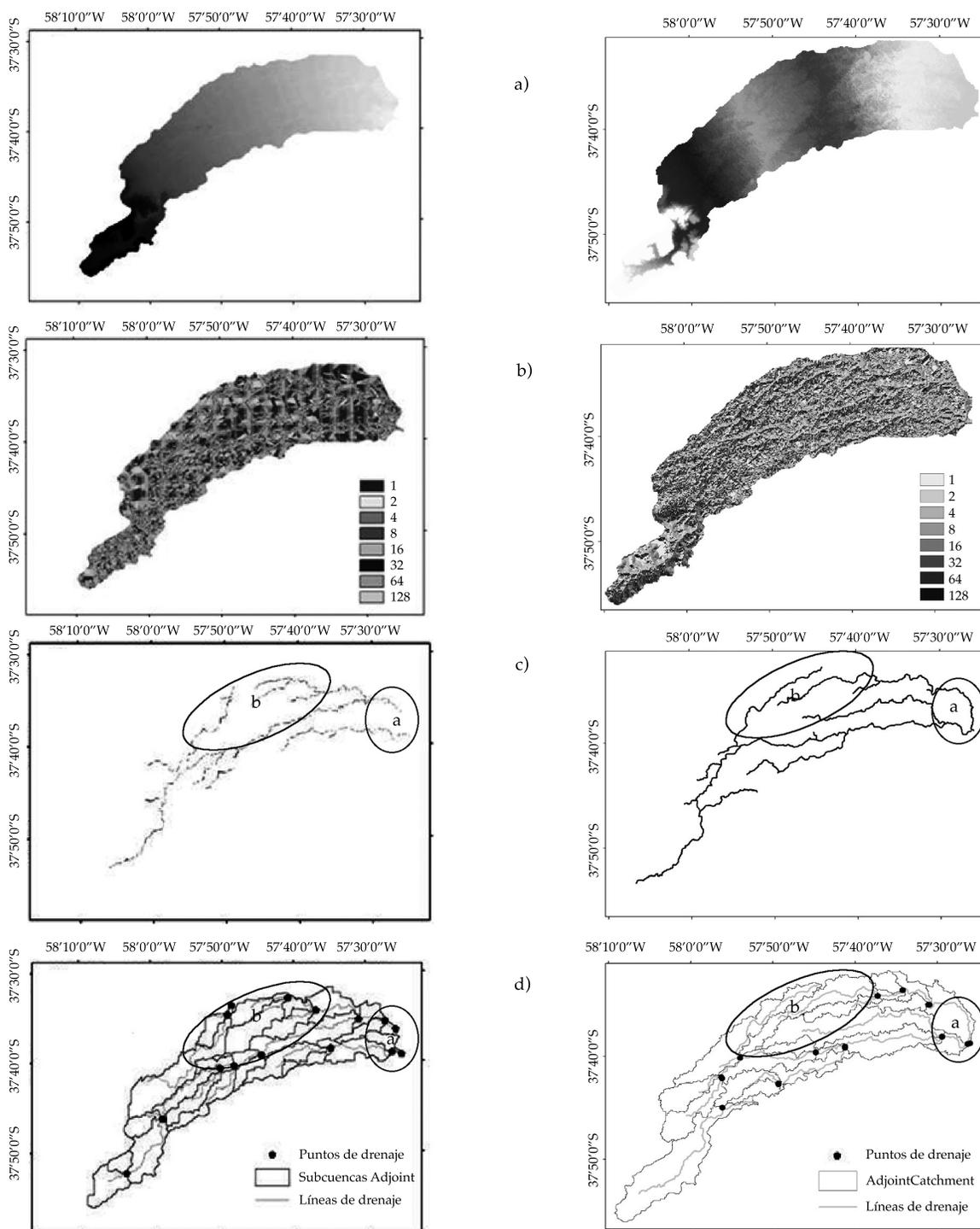


Figura 7. Sistema de Información Hidrológica de la cuenca del Arroyo Dulce-comparación de dos modelos hidrológicos obtenidos de curvas de nivel (izquierda) y de la fuente SRTM (derecha); a) AgreeDEM; b) dirección de flujo; c) red de drenaje; d) puntos de drenaje - subcuencas Adjoint-líneas de drenaje.

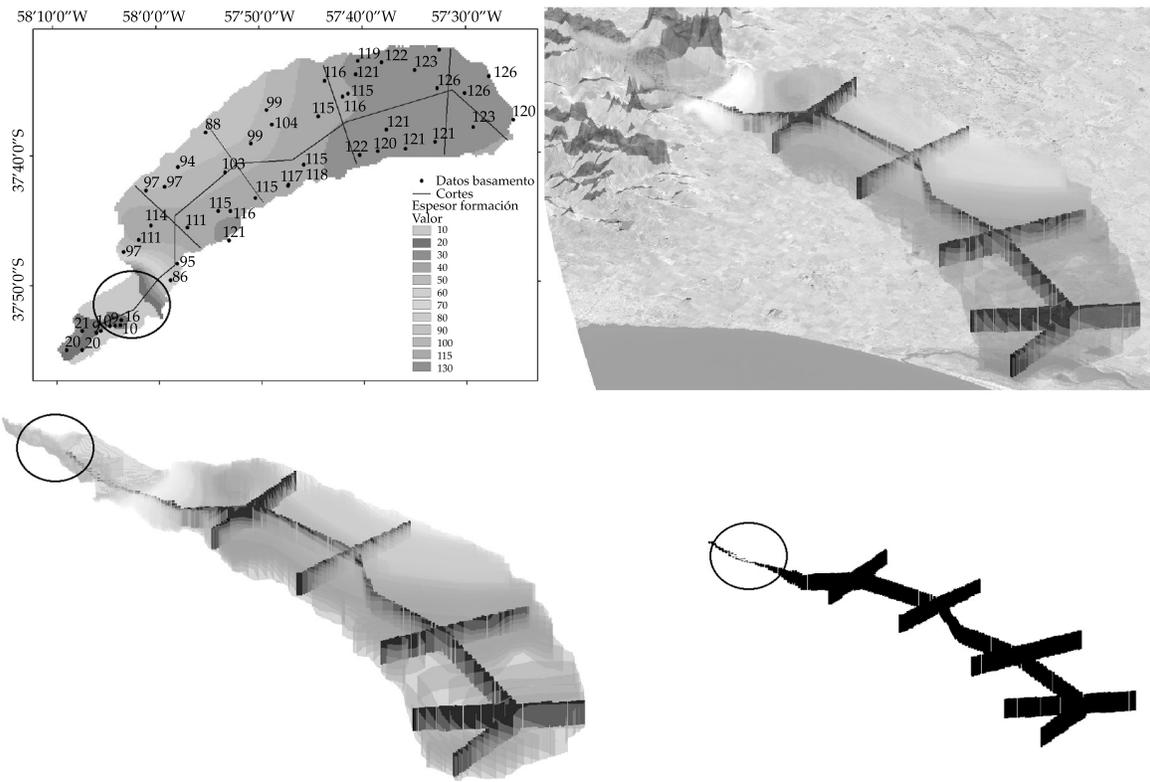


Figura 8. Sistema de Información Hidrológica de la cuenca del Arroyo Dulce. Arriba-izquierda: puntos muestrales y cortes prediseñados sobre la superficie de espesores del acuífero freático. Arriba-derecha: escenificación de acuífero freático subyacente a una imagen Landsat de la zona de estudio. Abajo-izquierda: prismas que interpretan el acuífero con cortes verticales, longitudinales y transversales. Abajo-derecha: diagrama de paneles escenificados con elementos unidimensionales multi-Z.

mantener dichas variaciones es profundizando los cauces en magnitudes que superan los 10 metros. Con respecto a la fuente SRTM con quemado de cauces, se encuentra una variación coherente, pero escalonada, lo que se debe a la resolución de la fuente que puede conseguirse en forma libre a través de la Web.

Con respecto al comportamiento en los cortes transversales, se encuentra que en general existe una reproducción de la “cubeta”, pero con singularidades que requieren mayor verificación; por ejemplo, en el corte A-A’, el modelo TIN muestra un gradiente lateral decreciente con dirección norte que está ausente en los demás modelos; igualmente, el corte B-B’ muestra una posible depresión en cercanía

de los 4 km norte-sur, lo cual puede indicar una diferencia substancial en la divisoria de aguas identificada.

La figura 7 muestra las subcuencas delimitadas en el área de estudio para el valor umbral de 15 km²; cuanto más pequeño es el valor umbral de acumulación de flujo, más densa es la red de drenaje y mayor el número de subcuencas que la conforman.

La función Cuencas Anidadas define nuevas subcuencas, sumando las subcuencas aguas arriba; esta función, en conjunto con la función puntos de drenaje, permite obtener los flujos que se aportan en un punto determinado en la cuenca, lo que resulta muy útil en estudios de calidad de agua y prevención de

la contaminación. Estos puntos de drenaje asociados con cada subcuenca son puntos de control de suma importancia, porque son los lugares estratégicos donde se deben ubicar las estaciones hidrométricas o puntos de salidas de presas. Sin embargo, tal como se observa en los detalles a y b de la sección d) de la figura 7. El modelo obtenido de las curvas de nivel muestra dos puntos adicionales de evacuación del flujo, lo cual de hecho configuraría otras cuencas. Esta situación alerta sobre la necesidad de estudios de mayor detalle y una exploración más profunda de las potencialidades del producto SRTM.

En la figura 8 puede verse un modelo geométrico de las formaciones acuíferas que subyacen en el área de estudio. Este modelo fue obtenido utilizando 49 puntos, cuya distribución es adecuada, pero que no necesariamente permite identificar las variaciones de rango corto o delimitar con certeza el flujo del agua subterránea. Un ejemplo del primer caso puede observarse en la garganta tridimensional que se resalta con los círculos en la figura 8, ya que la ausencia de datos en esta área sólo permite inferir su forma. En el segundo caso, el conocimiento de la base de la formación acuífera no garantiza que la cuenca superficial y subterránea coincidan; más aún, las diferencias detectadas en los MDT alertan sobre la necesidad de explorar con mayor profundidad las divisorias subterráneas.

Finalmente pueden establecerse tres recomendaciones útiles a este trabajo y otros asociados con modelos exploratorios:

La modelación geoespacial aporta “respuestas posibles” en el establecimiento de modelos hidrológicos e hidrogeológicos, pero igualmente genera nuevas preguntas y necesidades de información. En este proceso, los hidrólogos e hidrogeólogos son los críticos y analistas de los modelos generados, los cuales es recomendable que siempre estén en prueba y sean sometidos a procesos continuos de actualización y revisión.

Con respecto a la zona de estudio, es conveniente continuar con la implementación

del modelo para la cuenca del Arroyo Dulce en su componente de agua subterránea y calidad de agua para complementar la *geodatabase* hidrológica, y con ello tener la plataforma de datos que se requiere en estudios asociados con la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, así como en modelos de evaluación de escenarios a futuro.

La preparación de un sistema de información hidrológica utilizando la modelación espacial tiene claras ventajas a la hora de obtener información hidrológica e hidrogeológica a partir de información escasa, ya que es una forma sencilla de proveer información con una estructura de datos sistemática y eficiente para la ejecución de proyectos de diversa índole.

Recibido: 01/09/10

Aceptado: 03/11/11

Referencias

- BAND, L.E. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resource Research*. Vol. 22, 1986, pp. 15-24.
- BELMONTE, S. y NÚÑEZ, V. Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG. *GeoFocus* (informes y comentarios). Núm. 6, 2006, pp. 15-27.
- BURROUGH, P.A. and McDONNELL, R.A. *Principals of Geographical Information Systems*. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- CLARK, M.J. Putting water in its place: A perspective on GIS in hydrology and water management. *Hydrological Processes*. Vol. 126, 1998, pp. 823-834.
- ESRI. Enviroment System Research Institute. *World Wide Web*: <http://www.esri.com>, 2007a.
- ESRI. Using the Topo to Raster tool. ArcGis Desktop Help. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Using%20the%20Topo%20to%20Raster%20tool,22007b>.
- FOTHERINGHAM, A.S. and ROGERSON, P.A. (editors). *GIS and Spatial Analysis: Introduction and Overview. Spatial analysis and GIS*. Bristol: Taylor & Francis Inc., 1994, pp. 1-10.
- GISWR. Center for Research in Water Resources (CRWR) of the University of Texas at Austin. Geographic Information System in Water Resources, 2004. World Wide Web: <http://www.crrw.utexas.edu/giswr/hydro/>.
- GOODCHILD, M.F., GUOQING, S., and SHIREN, Y. Development and Test of an Error Model for Categorical

- Data. *International Journal of Geographical Information Systems*. Vol. 6, No. 2, 1992, pp. 87-104.
- GOSEL, W., EBRAHEEM, A.M., and WYCISK, P. A very large scale GIS-based groundwater flow model for the Nubian sandstone aquifer in Eastern Sahara (Egypt, Northern Sudan and Eastern Libya). *Report-Hydrogeology Journal*. Vol. 12, No. 6, 2004, pp. 698-713.
- INTA. *Carta de Suelos de la República Argentina 1:50.000. Hojas 3760; 3757 y 3957*. Buenos Aires: INTA, 1989.
- IRIBARNE, O. *Reserva de Biosfera Mar Chiquita: características físicas, biológicas y ecológicas*. Mar del Plata, Argentina: Editorial Martín, 2001, 320 pp.
- KONADU, D.D. and FOSU, C. *Digital Elevation Models and GIS for Watershed Modelling and Flood Prediction- A Case Study of Accra Ghana*. Yanful, E.K. (editor). *Appropriate Technologies for Environmental Protection in the Developing World*, University of Western Ontario, Canada, 2009.
- KRUSE, E. Aspectos geohidrológicos de la región sudoriental de Tandilla. Cuencas de los Aos. Vivoratá, las Brusquitas y el Durazno. *Revista Asociación Geológica Argentina*. Tomo 41, núm. 3-4, Buenos Aires, 1986, pp. 367-374.
- LANZA, L.G., SCHULTZ, G.A., and BARRETT, E.C. Remote sensing in hydrology: some downscaling and uncertainty issues. *Physics and Chemistry of the Earth*. Vol. 22, No. 3-4, 1997, pp. 215-219.
- LÓPEZ-GARCÍA, M.J. and CAMARASA-BELMONTE, A.M. Use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM. Comparison between automated extraction and photointerpretation methods in the Carraixet catchment. *ITC Journal, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Editorial Board. No. 3-4, 1999, pp. 187-195.
- MAIDMENT, D. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS. In: *Applications of GIS in hydrology and water resources*. Kovar, K. and Nachtenebel, H. (editors). *Proceedings of Vienna Conf. IAHS publ.*, No. 211, April, 1993, pp. 181-192.
- MCDONNELL, R.A. Including the spatial dimension: using geographical information systems in hydrology. *Progress in Physical Geography*. Vol. 20, 1996, pp. 159-177.
- MORAD, M. y TRIVIÑO-PÉREZ, A. Sistemas de Información Geográfica y Modelizaciones Hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación. *Boletín de la AGE*. Núm. 31, 2001, pp. 23-46.
- OZDEMIR, H. and BIRD, D. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. *Environmental Geology*. Vol. 56, 2009, pp. 1405-1415.
- PEUCKER, T.K., FOWLER, R.J., LITTLE, J.J., and MARK, D.M. The triangulated irregular network. *Proceedings of the ASP Digital Terrain Models (DTM) Symposium, American Society of Photogrammetry*. Falls Church, Virginia, 1978, pp. 516-540.
- SAMPER, J., GARCÍA-VERA, M.A., PISANI, B., ALVARES, D., VARELA, A. y LOSADA, J.A. Modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica para la estimación de los recursos hídricos: aplicación de GIS-balan a varias cuencas españolas. *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo*. Vol. VII. Samper, J. y Paz, A. (editores). La Coruña, España: Universidade da Coruña, 2005.
- SCHMUGGE, T.J., KUSTAS, W.P., RITCHIE, J.C., JACKSON, T.J., and RANGO, A. Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources*. Vol. 25, No. 8-12, 2002, pp. 1367-1385.
- SINGH, V.P. and FIORENTINO, M. *Geographical Information Systems in Hydrology*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- SU, Z.B. and TROCH, P.A. Applications of quantitative remote sensing to hydrology. *Physics and Chemistry of the Earth*. Vol. 28, No. 1-3, 2003, pp. 1-2.
- SUI, D.Z. and MAGGIO, R.C. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. *Computers, Environment and Urban Systems*. Vol. 23, No. 1, 1999, pp. 33-51.
- TERUGGI, M.E. y KILMURRAY, J. *Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires*. II Simp. Geol. Reg. Arg. Tomo II. Acad. Nac. de Ciencias, Córdoba, 1980, pp. 919-965.
- USGS. *Shuttle Radar Topography Mission, Escena 3 Arcosegundos SRTM_ffB03_p224r086 filled finished B, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland [en línea]*. ESDI: 2010. Consultas: 2007 a 2010.

Abstract

LIMA, M.L., ESCOBAR, J.F., MASSONE, H. & MARTÍNEZ, D. *Exploratory geospatial modeling in lowland basins: application case in the Dulce Creek basin, Buenos Aires, Argentina*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, No. 2, April-June, 2012, pp. 51-65.

This paper presents an evaluation of the techniques and processes that can be used to collect and adjust geodata and geomodeling processes for spatial hydrological modeling and hydrogeological purposes. An analysis of the available information and techniques and their influence on the obtained results was also performed. Background information used included digital elevation models derived from the SRTM sensor and from contour topographic maps (National Geographic Institute, scale 1:50 000), with TIN to Raster techniques and correction using the Arc Hydro tool and Topo to Raster. The results obtained were geospatial models of both the surface and subsurface of the Dulce Creek basin. The use of these modeling tools with modified algorithms shows their potential for developing hydrological and hydrogeological models.

Keywords: geospatial modeling, digital elevation models, geographic information systems.

Dirección institucional de los autores

*Ing. María Lourdes Lima
Dr. Héctor Massone
Dr. Daniel Martínez*

Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario
Universidad Nacional de Mar del Plata, ARGENTINA
Casilla de correo 722, 7600
Teléfono: +54 (223) 4754 060
Fax: +54 (223) 4753 150
limalourdes@yahoo.com.ar
hmassone@mdp.edu.ar
demartit@mdp.edu.ar

Dr. John Fernando Escobar

Universidad de Antioquia
Calle 67, núm. 53-108, Medellín, COLOMBIA
jfescob@yahoo.com