



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS  
VÍAS TERRESTRES

# **“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE MICROCUENCAS EN EL PROYECTO CARRETERO BASADA EN MDE”**

TESIS PROFESIONAL QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN  
LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

PRESENTA:

**ING. OSVALDO VILLALOBOS VERDUZCO**

ASESOR:

**DR. LUIS ALBERTO MORALES ROSALES**

CO-ASESOR:

**DR. RAFAEL SOTO ESPITIA**

**Morelia, Michoacán. Septiembre 2022**

# *Agradecimientos*

---

*A Jesús, por derramar tanta gracia sobre mi vida y darme la oportunidad una y otra vez de terminar lo que un día me permitió comenzar.*

*A mi amada esposa Stephany por alentarme y retarme incansablemente a continuar aún en los momentos de duda y desánimo amándome siempre por encima de todo.*

*A mis amigos, mi familia de sangre y mi familia en la fe porque no han renunciado a mostrarme su cariño y animarme a seguir perseverando.*

*Al Dr. Luis Alberto Morales por su interés de involucrarse a desarrollar este trabajo desde el día uno del Posgrado.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindar todo el apoyo económico necesario para culminar esta etapa.*



## Resumen

El drenaje superficial y transversal de un camino está compuesto por distintos tipos de obras menores (*OMD*) que proporcionan una salida adecuada a los escurrimientos generados por la precipitación y para que una *OMD* funcione adecuadamente debe dimensionarse en función del gasto proveniente de una microcuenca de aportación. En este ámbito, los *Modelos Digitales de Elevación (MDE)* funcionan como base para extraer los patrones de drenaje y con ellos delimitar las microcuencas. Desafortunadamente, cuando se genera un *MDE* se producen imperfecciones en su estructura que deben ser corregidas y para eso, se usan los algoritmos de pre-procesamiento tales como *Fill Depression (FD)*, *Depression Breaching (DB)* y *Wang&Liu (WL)*. Se generó un *MDE* de 0.5 m a partir de una nube de puntos *LiDAR* de la autopista 95D Cuernavaca-Acapulco km 278+000 - 288+000 al que se le aplicaron los algoritmos anteriormente mencionados. Como resultado, se encontró una tendencia del algoritmo *DB* de corregir por completo el *MDE* del caso de estudio. Sin embargo, se determinó que el desempeño de todos los algoritmos de corrección depende de la escala y la extensión del *MDE*. Adicionalmente, a causa del gran detalle de la realidad que proporcionan los datos *LiDAR* se generó una red de escurrimientos bastante densa lo que repercutió en tener muchas inexactitudes en la delimitación de las microcuencas debido a las múltiples opciones que se tuvieron para localizar los puntos de salida existentes de cada microcuenca por lo que se tornó contraproducente. La principal contribución es que ya no es necesaria la búsqueda manual de un pixel de flujo acumulado para colocar el punto de salida como se hace en las metodologías convencionales, aunque todavía debe llevarse a cabo una priorización de éstos a razón de acotar los escurrimientos que sean de interés modificando el algoritmo de identificación *Watershed* en *WhiteBoxTools* y delimitar de manera acertada y congruente las microcuencas. Al mismo tiempo se identificó que la existencia del camino altera notablemente la simulación de los escurrimientos superficiales en una microescala por lo que se necesita reclasificar los puntos *LiDAR* para facilitar su filtración con el fin de generar un *MDE* adecuado.

**Palabras clave:** *MDE, Microcuencas, LiDAR, WhiteBoxTools, Fill Depression, Depression Breaching, Wang&Liu.*



## Abstract

A road's superficial and transverse drainage is conformed of different types of minor works (*OMD*) which provide an adequate outlet for the runoff generated by precipitation and, for an *OMD* to work properly it must be dimensioned due to its expense that comes from a contribution microwatershed. In this area the Digital Elevation Models (*DEM*) serve as the basis for extracting the drainage patterns and with that delimit the microwatersheds. Unfortunately, when a *DEM* is generated, imperfections might occur as well within its structure, those imperfections must be corrected, and for that, algorithms such as *Fill Depression (FD)*, *Depression Breaching (DB)* and *Wang & Liu (WL)* are used. A 0.5 m *DEM* was generated from a *LiDAR* data set from Km 278+000-288+000 on 95D Cuernavaca-Acapulco highway. The before mentioned algorithms were applied. As a result, a tendency was found, the *DB* algorithm correcting the *DEM* study case. However it was found that the performance of all corrective algorithms depend on the scale and extent of the *DEM*. In addition to this, due to the great detail of the reality provided by the *LiDAR* data set, a dense runoff network was generated, which affected in having many inaccuracies in the delimitation of the micr-basins due to multiple pour points, turning it counterproductive. The main contribution is that manually search for pixel accumulated flow to place the pour points, is no longer necessary like with the conventional methodologies, although, a prioritation of these must be carried out in order to limit the runoff of interest modifying the *Watershed* Identification algorithm in *WhiteBoxTools*, accurately delimit the microwatersheds. At the same time it was identified that the existence of the road notably alters the simulation of surface runoff on a microscale, so it is necessary to reclassify the *LiDAR* data set to generate an adequate *DEM*.

**Key words:** *DEM, Microwatersheds, LiDAR, WhiteBoxTools, Fill Depression, Depression Breaching, Wang&Liu.*



## Índice General

Resumen.....	II
Abstract.....	III
Índice General.....	IV
Índice de Tablas e Ilustraciones .....	VII
Capítulo I. Introducción .....	- 11 -
I.1 . Objetivo General .....	- 12 -
I.2 . Objetivos Particulares .....	- 12 -
I.3 . Descripción del problema.....	- 13 -
I.4 . Propuesta de solución.....	- 14 -
I.5 . Justificación.....	- 14 -
I.6 . Descripción del contenido .....	- 15 -
Capítulo II. Estado del Arte.....	- 18 -
II.1. Introducción.....	- 18 -
II.2. Propiedades morfométricas extraídas de un MDE.....	- 18 -
II.3. Calidad de un MDE.....	- 21 -
II.4. Errores en un MDE .....	- 26 -
II.5. LiDAR y MDE.....	- 27 -
II.6. Desarrollo de algoritmos .....	- 27 -
II.7. Discusión .....	- 29 -
II.7.1. Tabla Resumen .....	- 29 -
II.7.2. Discusión.....	- 34 -
Capítulo III. Marco Teórico .....	- 36 -
III.1. Hidrología .....	- 36 -
III.2. Hidrología en caminos .....	- 39 -



III.3.	<i>Modelos Digitales de Elevación</i> .....	- 40 -
III.4.	<i>Algoritmos de preprocesamiento</i> .....	- 42 -
III.4.1.	<i>Depression Filling (DF)</i> .....	- 42 -
III.4.2.	<i>Depression Breaching (DB)</i> .....	- 43 -
III.4.3.	<i>Stream Burning (SB)</i> .....	- 46 -
III.4.4.	<i>Wang &amp; Liu (WL)</i> .....	- 47 -
III.5.	<i>LiDAR (Light and Detection Ranging)</i> .....	- 51 -
III.5.1.	<i>Componentes básicos del LiDAR</i> .....	- 53 -
III.5.2.	<i>Precisión en un LiDAR</i> .....	- 54 -
III.5.3.	<i>Formato de los datos LiDAR</i> .....	- 55 -
III.6.	<i>WhiteBox Tools GAT (WBT)</i> .....	- 57 -
III.6.1.	<i>Herramientas D8 Pointer y D8 Flow Accumulation</i> .....	- 58 -
III.6.2.	<i>Herramienta Extract Streams</i> .....	- 60 -
III.6.3.	<i>Herramienta Jenson Snap Pour Points</i> .....	- 60 -
Capítulo IV.	<i>Metodología</i> .....	- 63 -
IV.1	<i>Software requerido</i> .....	- 63 -
IV.1.1.	<i>WhiteboxTools GAT (WBT)</i> .....	- 63 -
IV.2	<i>Obtención de datos de elevaciones LiDAR</i> .....	- 67 -
IV.3	<i>Generación de datos</i> .....	- 69 -
IV.3.1	<i>Modelo Digital de Elevaciones (MDE)</i> .....	- 69 -
IV.3.2	<i>Rásters de flujo</i> .....	- 70 -
IV.4	<i>Procesamiento de datos</i> .....	- 71 -
IV.4.1.	<i>Corrección del MDE</i> .....	- 71 -
IV.4.2.	<i>Ajuste de los puntos de salida</i> .....	- 72 -
IV.4.3.	<i>Delimitación de microcuencas</i> .....	- 73 -



<i>Capítulo V. Análisis de Resultados</i> .....	- 76 -
V.1. <i>Caso de estudio</i> .....	- 76 -
V.2. <i>Obtención de datos: Nube de puntos LiDAR</i> .....	- 77 -
V.3. <i>Generación de datos: Modelo Digital de Elevación (MDE)</i> .....	- 78 -
V.4. <i>Procesamiento de datos</i> .....	- 79 -
V.4.1. <i>Corrección del MDE</i> .....	- 79 -
a. <i>Detección de vacíos</i> .....	- 79 -
b. <i>Aplicación del algoritmo FD y sus combinaciones (FD-DB y FD-WL)</i> .....	- 81 -
c. <i>Aplicación del algoritmo DB y sus combinaciones (DB-FD y DB-WL)</i> .....	- 81 -
d. <i>Aplicación del algoritmo WL y sus combinaciones (WL-FD y WL-DB)</i> .....	- 82 -
V.4.2. <i>Localización y ajuste de los puntos de salida</i> .....	- 85 -
V.4.3. <i>Rásters de flujo</i> .....	- 88 -
V.4.4. <i>Delimitación de las microcuencas</i> .....	- 91 -
V.5. <i>Discusión</i> .....	- 96 -
<i>Capítulo VI. Conclusiones</i> .....	- 99 -
<i>Capítulo VII. Metodología para el Análisis de Microcuencas en Proyecto Carretero basada en MDE</i> .....	- 103 -
<i>Bibliografía</i> .....	- 105 -



## Índice de Tablas e Ilustraciones

Tabla III. 1. Clasificación de las cuencas respecto a su extensión .....	- 37 -
Ilustración III. 1. Estructura interna de un MDE.....	- 41 -
Ilustración III. 2. Diferencia entre un MDE/MDT y un MDS .....	- 41 -
Ilustración III. 3. Diagrama de ejemplificación del algoritmo de inundación prioritaria	- 43 -
-	
Ilustración III. 4. Algoritmo Depression Breaching basado en la ruta de menor costo.	- 45 -
-	
Ilustración III. 5. Descripción gráfica de la rasterización de una red de corrientes vectoriales .....	- 47 -
Ilustración III. 6. Esquema gráfico del método. (a) Perfil de elevación con una salida en el punto A; (b) los valores de la elevación de derrame para las celdas entre los puntos A y C son iguales a su elevación original; (c) los valores de elevación de derrame para las celdas entre el punto C y el punto I se establecen con la elevación original del punto C, el punto más alto en la dirección aguas abajo; y (d) los valores de elevación de derrame para celdas entre el punto I y el punto H son iguales a sus valores de elevación originales, lo que da como resultado un perfil de elevación de derrame sin depresión (línea gruesa).....	- 48 -
Ilustración III. 7. Proceso computacional y diagrama de flujo del algoritmo. ....	- 50 -
Ilustración III. 8. Diferentes vistas de Panther Creek, Oregon, EE.UU. basadas en imágenes ópticas y datos LiDAR. (A) Imagen satelital y (B) DTM derivado de LiDAR Fuente: Dong & Chen, 2018.....	- 52 -
Ilustración III. 9. Diagrama de los componentes de un sistema LiDAR típico .....	- 53 -
Ilustración III. 10. Puntos láser renderizados con base en (izquierda) Elevación Z y (derecha) valores espectrales RGB de una cámara .....	- 56 -
Tabla III. 2. Clases estándar para registro de datos de puntos .....	- 56 -
Ilustración III. 11. Esquema de codificación de píxeles .....	- 58 -
Tabla III. 3. Convención de índices numéricos para la dirección del flujo .....	- 59 -
Ilustración VI.1. Diagrama de flujo de la metodología .....	- 63 -
Ilustración IV. 2. Contenido de la carpeta comprimida descargada del sitio Whitebox Geospatial Inc. ....	- 64 -





<i>Ilustración IV.3. Ventana de la Microsoft Store mostrando la aplicación Python .....</i>	<i>- 64 -</i>
<i>Ilustración IV.4. Ventana de instalación del complemento BuildTools .....</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Ilustración IV.5. Ventana del Símbolo del Sistema y de la WBT GUI .....</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Ilustración IV.6. Descripción de la GUI .....</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Ilustración IV.7. Ventana de inicio de Global Mapper .....</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Ilustración IV.8. Visualización de los mosaicos de interés en Global Mapper .....</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Ilustración IV.9. a) Ventana de exportación y b) Selección del formato del archivo de salida.....</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Ilustración IV.10. Ventana de la WBT GUI de la herramienta LidarIidwInterpolation..</i>	<i>- 69 -</i>
<i>Ilustración IV.11. MDE de alta resolución .....</i>	<i>- 70 -</i>
<i>Ilustración IV.12. Herramientas de la simulación del flujo D8 Pointer y D8 Flow Accumulation en la WBT GUI.....</i>	<i>- 70 -</i>
<i>Ilustración IV.13. Diagrama de flujo del proceso de corrección.....</i>	<i>- 71 -</i>
<i>Ilustración IV.14. Herramienta Jenson Snap Pour Points y sus componentes en la WBT GUI.....</i>	<i>- 72 -</i>
<i>Ilustración IV.15. Herramienta Watershed y sus componentes en la WBT GUI .....</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Ilustración IV.16. Herramienta Raster to Vector Polygons y sus componentes en la WBT GUI.....</i>	<i>- 74 -</i>
<i>Ilustración V.1. Localización geográfica del tramo de estudio .....</i>	<i>- 76 -</i>
<i>Ilustración V.2. Vista satelital de la nube de puntos del tramo de estudio .....</i>	<i>- 77 -</i>
<i>Ilustración V.3. MDE con resolución de 0.5 m del cadenamiento 278+000 al 288+000... -</i>	<i>78 -</i>
<i>Ilustración V.4. Diagrama de las combinaciones de algoritmos .....</i>	<i>- 79 -</i>
<i>Ilustración V.5. Vacíos detectados en el MDE del caso de estudio 278+000-288+000.... -</i>	<i>80 -</i>
<i>Ilustración V.6. Vacíos detectados tras la aplicación de las combinaciones FD, FD-DB y FD-WL.....</i>	<i>- 81 -</i>
<i>Ilustración V.7. Vacíos detectados tras la aplicación de las combinaciones DB, DB-FD y DB-WL.....</i>	<i>- 82 -</i>
<i>Ilustración V.8. Vacíos detectados tras la aplicación de las combinaciones WL, WL-FD y WL-DB.....</i>	<i>- 83 -</i>



*Tabla V.1. Resumen de los porcentajes de vacíos tras la aplicación de los algoritmos en el MDE ..... - 84 -*

*Ilustración V.9. Vista satelital de los puntos de salida identificados como OMD ..... - 85 -*

*Ilustración V.10. a) Puntos de salida calculados con Snap Pour Points y b) Puntos de salida calculados con Jenson Snap Pour Points..... - 86 -*

*Tabla V.2. Datos de las coordenadas previas y calculadas de los puntos de salida mediante los algoritmos Snap Pour Points y Jenson Snap Pour Points (WBT GUI y ArcGIS 10.5) ..... - 87 -*

*Gráfica V.1. Movimientos de los puntos de salida  $\Delta S$  y  $\Delta J$  ..... - 87 -*

*Ilustración V.11. Escurrimientos superficiales derivados de la acumulación del flujo - 89 -*

*Ilustración V.12. Ráster D8 Pointer ..... - 90 -*

*Ilustración V.13. Microcuencas delimitadas en formato .ras..... - 91 -*

*Ilustración V.14. Microcuencas delimitadas en formato .shp..... - 91 -*

*Ilustración V.14. Microcuencas delimitadas en formato .shp..... - 91 -*

*Ilustración V.14. Microcuencas delimitadas en formato .shp..... - 91 -*

*Ilustración V.14. Microcuencas delimitadas en formato .shp..... - 91 -*

*Tabla V.3. Áreas de las microcuencas delimitadas ..... - 92 -*

*Ilustración V.15. Comparación visual de las microcuencas de MDE 0.5 m, 1 m y 2m - 93 -*

*-*

*Tabla V.4. Áreas de las microcuencas delimitadas de MDE con resolución 0.5 m, 1 m y 2 m ..... - 93 -*

*Ilustración V.16. Fenómeno de barrera causado por la estructura del camino..... - 95 -*

*Ilustración VII.1. Diagrama de flujo de la Metodología para el Análisis de Microcuencas en el Proyecto Carretero basada en MDE..... - 103 -*



# Capítulo I.

## Introducción



## Capítulo I. Introducción

Dentro del amplio conjunto de estudios que se requieren para el adecuado diseño, construcción y futura conservación de una obra de infraestructura vial se encuentra el drenaje superficial y transversal que, a través de diferentes tipos de obras menores, proporciona una salida rápida y adecuada a los escurrimientos generados por la precipitación con el propósito de evitar efectos negativos sobre el sistema estructural del camino que pueden causar colapsos por socavación y un caso de ello, es lo que sucedió en 2017 en la carretera México-Cuernavaca km 93+750 donde debido a las precipitaciones de alta intensidad se inundó una obra menor de drenaje y causó un reblandecimiento del suelo que conformaba la estructura produciendo un colapso inmediato (*El País, 2017*).

Dada la importancia de tomar en cuenta los flujos de agua, el análisis hidrológico se ha vuelto imprescindible al momento de ejecutar un proyecto. Dicho análisis se lleva a cabo a través de la delimitación de microcuencas de aportación que el eje de trazo del camino cruza a lo largo de su recorrido y se permite el cálculo y la obtención de un gasto (volumen de agua por unidad de tiempo, *CONAGUA s.f.*) para el óptimo diseño, dimensionamiento y funcionamiento de un canal hidráulico. Actualmente en México, el análisis hidrológico para vías terrestres se lleva a cabo mediante procedimientos manuales que únicamente están regidos por la teoría básica de la hidrología, pero no se cuenta con una metodología establecida que dicte acciones concretas que permitan una ejecución rápida y precisa que simplifique el análisis hidrológico requerido.

Debido al crecimiento exponencial de las herramientas tecnológicas (principalmente el cálculo computacional y la simulación), las metodologías de ejecución de diversas ramas de la ingeniería han tenido actualizaciones que permiten analizar, calcular y estimar los riesgos de cualquier obra de infraestructura de una manera más rápida y precisa así que la hidrología no se ha quedado atrás. Se han desarrollado conjuntos de datos que funcionan como fundamento para extraer o producir información útil que puede manipularse para generar resultados aprovechables para el análisis y gestión de elementos. Tal es el caso de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) que contienen una retícula de píxeles asignados con datos de las elevaciones de alguna zona en



particular. Los MDE han tenido aplicaciones en diversas áreas, pero han tenido una mayor popularidad dentro del ámbito hidrológico donde a través de software desarrollados de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se manipulan y se extraen patrones de drenaje de los escurrimientos superficiales existentes que permiten delimitar la cuenca que los contiene. Dentro del proceso de la generación de los MDE se llegan a tener imprecisiones en la asignación de los valores de las elevaciones que repercuten en la resolución y precisión de los resultados que se derivan de su manipulación así que se han desarrollado técnicas de acondicionamiento que proporcionan un pre-proceso que purga las imperfecciones existentes. Las más comunes son *Depression filling* (DF), *Depression breaching* (DB) y *Stream Burning* (SB) (Woodrow, Lindsay, & Berg, 2016).

Se tienen antecedentes del desarrollo de una metodología que permite la delimitación de las microcuencas para el análisis hidrológico en las vías terrestres (Villalobos Verduzco, 2019) pero posee una falta de precisión debido a la resolución de los MDE que fungieron como entrada para la extracción de las microcuencas. Tomando en cuenta lo anterior, la investigación propuesta pretende retomar ese trabajo y complementar la metodología haciendo uso de las técnicas de acondicionamiento de pre-proceso para generar mayor precisión en los MDE base y obtener microcuencas mejor delimitadas.

### I.1 . Objetivo General

Desarrollar una metodología de procesamiento GIS que permita la generación de MDE para el análisis de microcuencas en vías terrestres.

### I.2 . Objetivos Particulares

- Analizar los algoritmos *Depression Filling* (DF), *Depression Breaching* (DB), *Stream Burning* (SB) y *Wang&Liu* (W&L) de pre-procesamiento dirigidos a la corrección de MDE para conocer su entorno de desarrollo.
- Aplicar los algoritmos a MDE provenientes de una nube de puntos LiDAR de un estudio de caso.



- Validar los resultados mediante técnicas estadísticas para proporcionar certidumbre acerca de la precisión.

### I.3 . Descripción del problema

La principal fuente de datos vectoriales disponible en México es el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Dentro del Subsistema Nacional de Información Geográfica y del Medio Ambiente se generan datos del relieve continental, que se representan a través del portal Continuo de Elevaciones Mexicano (<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>), que consiste en una base de datos de MDE generados con información topográfica vectorial procesada en el software ArcGIS 10.3. Los MDE que se ofrecen tienen 2 formatos de distribución: 1) BIL (Banda entrelazada por línea).- Forma ráster para las descargas total del territorio y por entidad federativa y 2) TIFF (Tagged Image File Format).- Para las descargas por selección de área y clave de carta. La versión actual de los MDE disponibles es la correspondiente al año 2013 y posee una resolución de 15 m x 15 m con datos de referencia geodésica ITRF92.

De acuerdo a la metodología expuesta por Villalobos (Villalobos Verduzco, 2019) en la que se delimitaron microcuencas tomando MDE del INEGI, se obtuvo una limitación en el proceso espacial debido a la resolución de los MDE base, es decir, la resolución disponible no propició una correcta delimitación por tratarse de áreas de poca superficie por lo que se procedió a crear nuevos MDE con mayor resolución utilizando curvas de nivel a cada 1 m de altura lo que permitió delimitar varias microcuencas en la forma adecuada, no obstante, algunas microcuencas siguieron presentando inconsistencias en su delimitación; lo anterior se relaciona con lo que Wu (Wu, et. al, 2019) menciona respecto a que mejorar la resolución de un MDE se traduce a un aumento en la precisión, lo que repercute en una mayor confiabilidad en los productos que se obtienen de él. Sin embargo, el proceso de generar MDE con mayor resolución es susceptible a que se produzcan imperfecciones en su estructura, como píxeles que se encuentran rodeados de píxeles con mayor elevación que ocasiona una ausencia de una salida para el flujo o píxeles vacíos sin valor alguno de elevación que de igual manera interrumpen el flujo así que ambos factores deben ser corregidos porque, así



como Wodroow (Woodrow, et. al, 2016) menciona, estas imperfecciones tienen el potencial de influenciar en gran manera la calidad y el contenido de los atributos de los MDE por lo que frecuentemente se deben someter a etapas de pre-proceso, aunque esto de cierta manera representa una desventaja, es la opción que se tiene para complementar la aplicación en la delimitación de microcuencas de aportación para el diseño de OMD.

#### I.4 . Propuesta de solución

La propuesta de solución consiste en el desarrollo de una metodología de pre-procesamiento que permita generar MDE con un contenido menor de imprecisiones (75% o más) en su estructura mediante el empleo de algoritmos desarrollados para la corrección y mejoramiento de MDE. Se propone revisar a profundidad la bibliografía existente para colocar la investigación en el contexto adecuado, después se analizarán los algoritmos de pre-proceso más comunes para comprender su entorno de desarrollo, es decir, cómo y para qué fueron creados además de conocer su funcionamiento. Posterior a ello, se obtendrán los conjuntos de datos de entrada para la experimentación que consistirá en someter los MDE generados por INEGI y los de creación propia con distintas equidistancias de curvas de nivel a los algoritmos, para evaluar el desempeño que tienen en los distintos escenarios de modelación. Por último, los resultados que se obtengan se validarán al someterlos a pruebas estadísticas para proporcionar certidumbre acerca de la precisión de la metodología.

#### I.5 . Justificación

La construcción de una carretera altera el estado natural del medio ambiente en el que se encuentra y si no se realiza el análisis hidrológico-hidráulico bajo los criterios técnicos adecuados para la localización de las OMD y la determinación de los factores que intervienen en el diseño, se ocasionarán importantes daños que representarán pérdidas económicas considerables por la reparación, la rehabilitación o la suspensión de la operación de la vía. Los factores que intervienen en el diseño de las OMD son los relacionados a la hidrología, es decir, cuánta agua fluye y de qué manera lo hace considerando las propiedades del suelo. Para ello, se realizan análisis hidrológicos con base en áreas de captación para detectar la localización del escurrimiento superficial



que definirá la orientación y localización de la OMD cuyas dimensiones son dependientes del gasto que circulará a través de ella. Las metodologías actuales para llevar a cabo el análisis hidrológico para el diseño de OMD emplean técnicas manuales que no incluyen MDE para delimitar las microcuencas de aportación y detectar las localizaciones de los escurrimientos con base en las acumulaciones del flujo que éstos pueden proporcionar. Si las metodologías se adaptaran a la utilización de esos conjuntos de datos, se tendría un análisis hidrológico más rápido y preciso para las etapas de proyecto o de revisión hidráulica para conservación. Con base en lo anterior, es importante desarrollar una metodología de pre-procesamiento para mejorar la resolución de los MDE. En este caso, considerando el análisis y el empleo de algoritmos en distintos escenarios definidos por la equidistancia de las curvas de nivel vectoriales empleadas para su creación con el propósito de realizar un análisis de microcuencas con mayor precisión.

## I.6 . Descripción del contenido

El contenido de la investigación es el siguiente:

### Capítulo I. Introducción

Presenta información general donde se explica de manera breve el panorama de la investigación, mencionando algunos antecedentes y datos básicos, así como los objetivos general y particulares acompañados de la justificación del mismo.

### Capítulo II. Estado del Arte

Para este capítulo se llevó a cabo la revisión de las investigaciones realizadas orientadas al tema de interés mostrando los principales resultados.

### Capítulo III. Marco Teórico

Se analiza la teoría en la que se basa la investigación, tomando en cuenta todas y cada una de las ramas de la ciencia que aportan al desarrollo del trabajo.

### Capítulo IV. Metodología

Se desarrollan y explican los pasos a seguir para cumplir los objetivos particulares y probar la propuesta de solución.





## Capítulo V. Análisis de Resultados

Se incluye un análisis a profundidad de los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta en un tramo de estudio.

## Capítulo VI. Conclusiones

Contiene las conclusiones derivadas de la investigación y las posibles extensiones de la misma.



# Capítulo II.

## Estado del Arte



## Capítulo II. Estado del Arte

### II.1. Introducción

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) se han convertido en un punto de interés de muchos investigadores debido a la amplia variedad de ventajas que ofrecen en los estudios hidrológicos asimismo la topografía avanzada mediante fotogrametría (LiDAR) también ha tomado relevancia debido a su alta precisión para representar digitalmente la realidad. Se han encontrado trabajos realizados desde 2005 en los que se abordan elementos comunes como la extracción de propiedades morfométricas a partir de un MDE, la evaluación de la calidad de un MDE, la explicación de la generación de errores en un MDE, la relación entre nubes de puntos LiDAR y MDE y la aplicación de algoritmos de preprocesamiento para MDE. El contenido de este capítulo es la descripción de cada una de las investigaciones llevadas a cabo en el pasado tomando en cuenta los elementos comunes mencionados anteriormente.

### II.2. Propiedades morfométricas extraídas de un MDE

Algunos de los principales trabajos enfocados a analizar las propiedades morfométricas de una cuenca son los siguientes:

*En el trabajo Mexico's National Map of Small Watersheds (Dominguez et al., 2005) se expone que la principal entrada para delimitar una unidad hidrológica tal como una cuenca, una subcuenca o incluso una microcuenca a través de un SIG es un MDE. También, se menciona que no es común comenzar el proceso de delimitación sin antes realizar un preproceso para tener certeza de la confiabilidad de la información sin embargo, las modificaciones que se llevan a cabo como el relleno o supresión de vacíos no son para distorsionar la realidad que representa el MDE sino que pretenden aproximar el modelo más a ella debido a que en el proceso de su creación se producen desviaciones del relieve que no corresponden a las condiciones naturales por la conversión de la información (fotografías aéreas, cartografía clásica, LiDAR, etc.) y dentro de éstos, se encuentran depresiones, que actúan como estructuras de retención de agua. La influencia de estas desviaciones es lo que dificulta o limita el cálculo correcto de parámetros porque detienen o alteran el flujo del agua. Los autores mencionan que se han desarrollado distintos algoritmos para lograr la corrección como el de Garbretch y Martz (1997) implementado en el software TOPAZ; aunque en su trabajo usaron ArcGIS donde está adaptado el algoritmo desarrollado en 1988 por Jenson y Domingue que*



consiste en la modificación de las elevaciones que corresponden a las depresiones existentes en el MDE.

Duke et al. (2006) argumentan que los patrones de drenaje de una cuenca extraídos de un MDE son dependientes de la calidad del mismo y las estructuras antropogénicas como caminos, alcantarillas y canales de irrigación pueden influenciar significativamente el flujo de las corrientes particularmente en relieves planos. Su investigación se centró en usar información auxiliar que permita detectar esas pequeñas fuentes de variabilidad en el drenaje de la cuenca y mencionan que aunque una buena opción puede ser interpolar el MDE con una nube de puntos topográficos LiDAR. Esta opción resulta costosa así que se sugiere el “imponer” información vectorial de algunas corrientes para mejorar las matrices de dirección, esto se logra con la disminución de la elevación de las celdas que representan el curso del agua para reforzar los patrones de drenaje conocidos en la matriz de las direcciones del flujo. La solución de los autores fue la creación del *RIDEM* (Rural Infrastructure Digital Elevation Model) que permite delimitar cuencas cuyos patrones de drenaje fueron alterados por la construcción de caminos y canales de irrigación. Para validar su metodología, compararon las áreas de las cuencas que delimitaron a partir del modelo *RIDEM* y las que obtuvieron con el algoritmo *D8-TOPAZ* aplicando el *percentage agreement statistic*. Las conclusiones principales fueron que cuando un MDE no representa la infraestructura existente en la zona de estudio, se simplifica la extracción de los patrones de drenaje y que el algoritmo *D8-TOPAZ* no fue diseñado para delimitar cuencas tomando en cuenta infraestructura carretera o de riego.

En su investigación, Das et al. (2016) exponen que los MDE han sido ampliamente utilizados para análisis morfométricos de cuencas debido a las ventajas que éstos tienen en comparación con los mapas topográficos tradicionales. También, que el encontrar una resolución óptima de las celdas que conforman el MDE ha sido un tema de interés en los últimos años. Los autores se centran en extraer las propiedades morfométricas de la cuenca en estudio (perfiles de elevación, la red de drenaje y otros aspectos del terreno) a través de distintas resoluciones de MDE (1, 30 y 90 m) para llevar a cabo una comparación entre los resultados. Dentro de su procedimiento, describen el proceso que sigue cualquier SIG para extraer las redes de flujo (algoritmo



D8 desarrollado por O'Callaghan y Mark en 1984) y mencionan dos métodos de filtrado para los datos de elevación para que el algoritmo no tome en cuenta celdas vacías y asegurar la apropiada conectividad de la red; además, hay pixeles dentro del arreglo de datos digitales que poseen valores anormalmente bajos o altos en comparación a los pixeles que se encuentran a su alrededor, son conocidos como *data sinks* y son inherentes en cualquier MDE. Como parte de sus conclusiones se tiene que la escala del mapa y la resolución del MDE son factores significativos en la determinación de los atributos morfométricos.

En su trabajo, Puech et al. (2019) desarrolló un programa informático con el lenguaje de programación Python para llevar a cabo estudios hidrológicos completos. La metodología está basada en toda la teoría de la hidrología: el parteaguas, características morfométricas, precipitaciones máximas diarias asociadas a un periodo de retorno, cálculo de las curvas IDF, transformación de lluvias y caudales a través de los hidrogramas. El autor menciona que los datos de elevación suelen contener errores, es decir, elevaciones que no son reales o que siendo reales no son convenientes para ser usados en el proceso de la delimitación de la cuenca y que se han desarrollado algoritmos para su corrección bajo el criterio de "Depression filling", pero argumenta que éstos pueden crear zonas planas que no representan la realidad. Así que sugiere otra forma llamada "weir erosion" en el que el punto de drenado en el ráster original permanece como el valor inicial, el vecino más cercano que no vierte al punto de drenado en el ráster original es erosionado de manera que exista una pendiente entre el punto de drenado y el punto al que vierte la celda erosionada; la ventaja que se tiene con esto es que se mantiene una pendiente más natural.



### II.3. Calidad de un MDE

Entre los principales trabajos orientados a mejorar la calidad de un MDE se encuentran los siguientes:

Pryde et al. (2007) llevaron a cabo una comparación del proceso de delimitación del parteaguas de una cuenca entre trazarla manualmente con base en mapas topográficos detallados y trazarla espacialmente mediante MDE de dos resoluciones distintas. El criterio de evaluación fue comparar las coordenadas X que componen el parteaguas trazado del mapa topográfico y los parteaguas de los MDE aplicando la regresión lineal. Además, se aplicó un t-test para determinar si existe una diferencia significativa entre las relaciones de los conjuntos de datos.

En su investigación, Saran et al. (2010) experimentaron con 4 MDE que fueron generados de distintas fuentes. Uno fue creado a partir de una imagen estéreo ASTER a través del módulo de extracción de las herramientas topográficas del software ENVI. La evaluación se llevó a cabo con la aplicación de los coeficientes de las funciones racionales (RPC's), que son funciones aplicadas en la fotogrametría y teledetección para desarrollar una transformación entre el espacio de la imagen y el espacio del objeto siempre que los modelos no estén disponibles. Otra fuente fue CARTOSAT y usaron el un módulo de análisis del software ERDAS Imagine v. 9.0. También se digitalizó un mapa topográfico SOI 1:50,000 de la cuenca en estudio, se interpoló y se generó el arreglo de píxeles. Además se descargó un MDE de la plataforma SRTM del U.S. Geological Service. Para la evaluación tomaron como variable principal la precisión vertical y la sometieron a un análisis estadístico bajo el método del error cuadrático medio donde compararon la elevación  $i$  del MDE generado contra la elevación "real"  $i$  obtenida en un levantamiento con GPS que denominaron puntos de control. Además de lo anterior, evaluaron la precisión de los 4 MDE bajo el criterio de comparar las características morfométricas que se extrajeron a través de ellos con las características morfométricas reales de la cuenca (relación de bifurcación, relación de la longitud de corrientes, densidad de drenaje, densidad de corriente y la relación de textura). Los resultados de la evaluación demostraron que la resolución de la retícula juega un rol relevante para representar de una mejor manera las elevaciones y sus características. Al final, los autores recomiendan que las resoluciones "gruesas" de la plataforma SRTM son adecuadas para estudios hidrológicos de la escala de la cuenca



Sitla Rao (5,800 ha) y las resoluciones finas de las plataformas CARTOSAT (2.5 m) y ASTER (15 m) son aplicables en los estudios hidrológicos de subcuencas.2

Roa et al. (2014) trabajaron en la evaluación de un MDE obtenido de un proceso de fotogrametría digital comparado con uno elaborado a partir de curvas de nivel existentes en cartas topográficas tomando como caso de estudio una cuenca de 3.39 km<sup>2</sup> de extensión. Para ello aplicaron geoestadística de puntos (análisis de mínima distancia, análisis de patrones espaciales, variograma y superficie variográfica). Los autores mencionan que la calidad y la precisión de la información relacionada o extraída dependen de que el MDE represente el terreno de la manera más exacta posible ya que la precisión de un MDE determina la fiabilidad del análisis morfométrico. La elaboración del MDE fotogramétrico incluyó un proceso desarrollado en el módulo LPS de ERDAS IMAGINE 9.2 desarrollando una fase de aerotriangulación por medio del método de los haces de rayos que aprovecha los principios perspectivos para determinar las coordenadas terrestres (X,Y,Z). El tamaño final de las celdas para ambos tipos de MDE fue de 2 m. Dentro de la evaluación, se expone que existe la ausencia de información sobre las características de un MDE así que la evaluación se llevó a cabo a través de un proceso comparativo de sustracción entre ambos MDE para analizar las diferencias de elevaciones definiendo puntos de control. Los autores concluyen y recomiendan el uso de la geoestadística de puntos para percibir en conjunto atributos ocultos que son imposibles de evaluar de manera separada. Este análisis permite corregir los MDE al descubrir las tendencias, las formas de distribución, la variabilidad de los datos, las características generales, las estructuras y la existencia y posible localización de los errores.

Novoa et al. (2015) se encargaron de evaluar la calidad de un MDE obtenido de una imagen proveniente del satélite World-View 2 (WV-2) contrastado con una nube de puntos levantados con GPS tomando como parámetros de evaluación la precisión vertical y las variables que interfieren en el escurrimiento superficial (depresiones del terreno, pendientes y corrientes). Haciendo referencia a lo publicado por Erskine (2007), comentan que la precisión de la información de las elevaciones es un componente importante en la modelación hidrológica ya que las variables extraíbles de los MDE tales como la dirección y acumulación del flujo del agua, las microcuencas, las corrientes y los puntos de drenado necesitan ser derivados de



modelos de elevación de alta precisión para garantizar productos derivados de buena calidad. El satélite fue lanzado en 2009 y está equipado con sensores pancromáticos multiespectro capaz de captar imágenes estereostópicas, las cuales pueden ser usadas en los procesos de extracción automática de elevaciones para la generación de MDE de hasta 1 m de resolución. La evaluación de la precisión vertical se llevó a cabo usando el error medio absoluto, el error cuadrático medio y el error lineal a un nivel de confianza del 95%. Los resultados que obtuvieron los llevaron a concluir que las imágenes provenientes del satélite WV-2 tienen el potencial de extraer elevaciones con una precisión muy alta.

Dentro del contexto de su investigación, Avello et al. (2016) caracterizan como covariables de una cuenca a la acumulación del flujo, la longitud de la pendiente, el orden de corrientes, el área de contribución, la cuenca y el índice de humedad tomando a esta última como la principal debido a que su enfoque es la gestión del suelo. Los autores argumentan que los caminos y las vías férreas provocan una alteración en la identificación de las covariables, generando crestas o pozos que definen como ruido micro-topográfico. El objetivo principal fue explicar un proceso metodológico que disminuye la influencia que tienen dichas estructuras en el análisis de las covariables. Para ello, usaron los módulos Spatial Analyst y Geostatistical Analyst Extensions del software ESRI ArcGIS y desarrollaron las covariables con la herramienta SAGA Wetness Index tanto en el MDE original como en el modificado. Su análisis de resultados fue únicamente visual, comparando el MDE modificado con el original y se observa una representación más natural.

Al-Khafaji & Al-Sweiti (2017) concluyeron que la delimitación de la cuenca, la posición de la red de corrientes y el área total son altamente afectados por la resolución del MDE que se use, especialmente en cuencas de zonas planas, esto arrojado de su investigación en la que analizaron 5 resoluciones de MDE gratuitos a través de la modelación en el software SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

Angillieri & Fernández (2017) llevaron a cabo una comparación de características morfométricas obtenidas de dos maneras distintas tras delimitar microcuencas digital y manualmente. En la asistencia manual, emplearon imágenes satelitales provenientes del SPOT 5 con 2.5 m de resolución y del IKONOS con 4 m de resolución espacial además de información topográfica Aster GDEM V2. Con la misma información se generó un MDE de 30 m de resolución para el proceso digital. Desarrollaron su experimentación en la versión 10.3 de ArcGIS donde se delimitaron las microcuencas





existentes con el algoritmo incluido eight-direction (D8) que le asigna la dirección del flujo a una celda tomando en cuenta las 8 celdas adyacentes, en la dirección de la elevación menor. Su evaluación se centró en la comparación de parámetros establecidos en la teoría de la hidrología como el área, el perímetro, la longitud, el ancho medio, las alturas máxima y mínima, el desnivel, la longitud de la corriente principal, el factor de forma, la relación de elongación y el índice de sinuosidad. Dentro de sus resultados, se tienen seis gráficas de correlaciones entre los resultados de las variables área, perímetro, longitud, longitud de la corriente principal, pendiente y gasto pico obtenidas de las cuencas delimitadas manual y digitalmente. Como conclusiones, los autores mencionan que todas las variables evaluadas dependen directamente de la microcuenca así que por ello, se vuelve esencial delimitarla lo más precisa posible, defendiendo que las microcuencas requieren pixeles pequeños para una representación adecuada de su área. Sus resultados también arrojaron que la delimitación manual es más propensa a errores debido a que depende principalmente de la experiencia y el criterio humano.

Saiz Rodríguez et al. (2017) describen la metodología para generar un MDE de alta resolución (1.0 x 1.0 m) empleando los módulos Geostatistical Analyst y ArcToolBox del software ArcGIS 10.2.2. Su base de datos está conformada por un conjunto de puntos levantados en campo con un GPS Zenith 20 GPS RTK Network Rover GSM. Esos puntos fueron usados para crear un modelo TIN (Triangulated Irregular Network) que sirve como dato de entrada para la generación del MDE. Con el propósito de validar el MDE generado, se levantaron topográficamente con una estación total Geomax serie ZT20 un conjunto de puntos en la porción baja de la zona de estudio caracterizada por pendientes pronunciadas y densa vegetación. Como proceso de evaluación y validación, se llevó a cabo una correlación entre las elevaciones correspondientes a los puntos levantados con la estación total y sus respectivas elevaciones extraídas del MDE generado con la malla de puntos; además se obtuvieron medidas de tendencia central como la media, la desviación estándar y el error cuadrático medio. Sus resultados arrojan una buena correlación entre ambos conjuntos de elevaciones y se observó una dispersión levemente mayor en los puntos de baja altitud, cuestión que los autores justifican porque en esa zona se localizan los cauces de la cuenca y la vegetación es más densa lo que dificulta la transmisión de la señal GPS. Como comentarios finales, argumentan que entre más fina sea la malla de puntos (x,y,z) menor será el tamaño del pixel con el que se pueda construir el MDE y además,



recomiendan la aplicación de su metodología propuesta en sitios donde no exista una gran densidad de vegetación.

Rathore et al. (2018) enfocaron su trabajo en el área de la gestión de cuencas donde argumentan que el extraer características como la extensión aérea, la pendiente, el relieve y las redes de drenaje de una cuenca a través de mapas topográficos es tedioso y es un proceso que consume bastante tiempo. Por ello, se proponen como objetivo principal el describir una metodología para la generación de un MDE usando los contornos del terreno para la delimitación de la cuenca y la extracción de sus características. A grandes rasgos, mencionan que en primer lugar se digitalizaron curvas de nivel provenientes de mapas topográficos produciendo datos vectoriales en 2D a través del software ILWIS (Integrated Land and Water Information System, SIG de código abierto de origen holandés desarrollado en 2007) y de manera similar, un mapa de puntos fue producido con la digitalización de elevaciones puntuales disponibles de un mapa ráster. Ambos mapas fueron rasterizados y combinados y se sometieron a una interpolación para generar un MDE con píxeles de 30 m de ancho. Por último, utilizaron el módulo ArcSWAT para delimitar la cuenca cuyo proceso está basado en el algoritmo D8 (Jenson & Domingue, 1988) el cual ya incluye el llenado de vacíos y el cálculo de la dirección y la acumulación del flujo. No llevan a cabo ninguna evaluación o comparación de los resultados, únicamente concluyen que los SIG tienen una alta aplicabilidad en la extracción de características morfométricas.

El trabajo de Rocha et al. (2020) se destaca por utilizar el software SWAT para evaluar la influencia de la resolución de un MDE en la precisión de la representación de las cuencas y sus respuestas hidrológicas argumentando que en cuanto más precisa sea la representación del terreno pueden obtenerse mejores predicciones porque de él se extrae información geomorfológica e hidrológica (pendientes, red de drenaje, delimitación de la cuenca, dirección y acumulación del flujo) así que por lo tanto, la resolución horizontal y vertical del MDE impacta en la precisión de todos esos parámetros y citando a Wu et al. (2019) mencionan que ellos concluyeron que una buena resolución incrementa los resultados de la dirección y acumulación del flujo más refinadas que producen una representación más apegada a la realidad. Para evaluar la precisión del sistema de corrientes, tomaron en cuenta como variables la densidad de drenaje (Dd), la sinuosidad y el índice de vértices.



#### II.4. Errores en un MDE

A continuación, se muestran los trabajos dirigidos a definir y analizar los diferentes tipos de errores en la estructura de un MDE.

Fisher & Tate (2006) afirman que todos los datos digitales contienen errores que en su mayoría son inciertos por lo que se investigación se centró en definir las causas y las consecuencias que tienen en un MDE. En primer lugar, argumentan que un MDE contiene errores endémicos que pueden propagarse a las propiedades que se extraigan de él por ejemplo el tamaño de la cuenca y las características de la red de corrientes. Las 3 fuentes de error más comunes son: a) variaciones de la precisión, la densidad y distribución, b) el proceso de interpolación usado para generar el MDE y c) las características de la superficie del terreno que se está modelando en relación con la representación del MDE. Al analizar los procesos de generación de un MDE, los autores comentan que aquellos producidos a partir de puntos LiDAR tienen el potencial de contar con una precisión mucho más alta que los producidos con métodos convencionales.

Wechsler (2007) explica que las fuentes de errores de los MDE están vinculadas a los métodos de generación de MDE en los que están incluidos los levantamientos de campo (usando sistemas de posicionamiento global), fotogrametría, tecnologías LiDAR, radar de apertura sintética interferométrica (IFSAR) o sonar (para datos batimétricos). También, que el flujo superficial a través de las celdas de elevación de un MDE requiere un MDE sin interrupciones, desafortunadamente, con bastante frecuencia un MDE contiene depresiones que resultan en áreas que no drenan conocidas como “vacíos”.

Callow et al. (2007) argumentan que los MDE enfrentan la dificultad de replicar adecuadamente los patrones de drenaje en planicies por lo que puede justificarse el empleo de métodos para mejorar la calidad del MDE, sin embargo, en un argumento opuesto, en su estudio demuestran que estas técnicas alteran permanentemente el MDE al momento en que quiera analizarse topográficamente así que su trabajo explora el impacto de la alteración que sufren los pixeles de un MDE en el intento de conocer la hidrología. Sus resultados muestran que sí se tiene una alteración que afecta el análisis



topográfico porque se presenta un aumento de la pendiente existente, no obstante, el algoritmo Stream Burning altera el MDE en lo más mínimo.

## II.5. LiDAR y MDE

Petroselli (2012) llevó a cabo un análisis de MDE provenientes de datos LiDAR, comparando los resultados con un MDE estándar. En base a sus resultados, comenta que los MDE generados a partir de datos LiDAR proveen más precisión en la información útil para la caracterización morfométrica. A su vez, afirma que los datos LiDAR proveen resultados con alta calidad siempre y cuando las celdas sean de tamaño pequeño porque cuando éstas incrementan de escala, el desempeño se convierte en uno comparable con los MDE de resoluciones estándar.

Li et al. (2020) se enfocaron en evaluar los efectos de la precisión y resolución de un MDE en parámetros hidrológicos empleando resolución de 1 hasta 10 m producidos de datos LiDAR comparando con un MDE convencional tomando en consideración los parámetros de elevación, delimitaciones de subcuencas, redes de drenaje y pendientes. Por los resultados obtenidos, concluyeron que la resolución del MDE domina la calidad de los parámetros hidrológicos extraídos y notaron que el MDE de 1 m fue el único que identificó claramente las propiedades buscadas.

## II.6. Desarrollo de algoritmos

De entre los algoritmos que se han desarrollado para corregir los errores que contienen los MDE se muestran los principales:

Wang & Liu (2006) desarrollaron un método para identificar y llenar depresiones contenidas en la superficie de un MDE determinando simultáneamente rutas de flujo y la partición espacial de cuencas en un paso de procesado. Los autores argumentan que el método es fundamentalmente distinto a los convencionales debido a que éstos necesitan delinear las depresiones e identificar sus puntos de salida antes de determinar cuál celda necesita ser rellenada, en contraste, el algoritmo desarrollado computacionalmente determina un valor de una frontera de derrame para cada celda.

De acuerdo a Lidberg et al. (2017) es necesario remover errores y vacíos artificiales que contienen los MDE y comenta que este paso es conocido como preprocesamiento y permite que el agua fluya de manera correcta sobre el paisaje digital. Sin embargo, se está asumiendo



el nuevo reto de la influencia que los elementos antropogénicos tienen cuando se incrementa la resolución de un MDE debido a que éstos cuentan con elevaciones superiores al terreno natural y actúan como presas artificiales. En base a lo anterior, los autores definieron como objetivos principales el evaluar el efecto de dos métodos de preprocesamiento en MDE con distinta resolución (2, 4, 8 y 16 m) y evaluar cuáles métodos de preprocesamiento conducen el agua con mayor precisión tomando en cuenta las presas artificiales por carreteras en ubicaciones reales de alcantarillas. Los autores explican que, al incrementar la resolución de un MDE, se asocian dos problemas principales: a) se incrementa drásticamente el tiempo de procesamiento y b) las intersecciones entre caminos y escurrimientos superficiales se vuelven detectables y ocasionan una barrera en el flujo del agua. Los criterios de evaluación que usaron fueron los cambios de área y volumen absoluto (suma de la diferencia absoluta de altura de todas las celdas de la cuenca antes y después del preprocesamiento multiplicado por el número total de celdas) que existe entre los MDE originales y los preprocesados, estas variables fueron sometidas a una correlación. Dentro del procedimiento, llevaron a cabo la aplicación del algoritmo Fill Sinks, el Stream Burning y una combinación de ambos a través del software GoSpatial. El MDE original fue obtenido de la base de datos nacional de Suecia usando una nube de puntos LiDAR con una densidad de 0.5-1 puntos/m<sup>2</sup> con error horizontal y vertical de 0.1 y 0.3 m con el cual se generó una resolución de 2 m y a través de la interpolación, se obtuvieron los demás MDE para la experimentación. La conclusión principal de los autores fue que la precisión de la extracción de las corrientes de la cuenca, en términos de intersecciones de alcantarillas aumentó al incrementar la resolución del MDE y mencionan que la combinación de ambos algoritmos produjo un menor impacto en la distribución estadística de los datos.



## II.7. Discusión

### II.7.1. Tabla Resumen

Trabajo	Datos	Técnicas utilizadas	Objetivo	Limitaciones
<i>Mexico's national map of small watersheds.</i> Dominguez, M. A., Ventura, E., Valdez, F., Sorani, V., & Pineda, R. F. (2005).	Mapas topográficos vectoriales escala 1:50,000 y 1:250,000.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MDE generados en ArcView 3.2</li> <li>- Llenado de vacíos por Jenson y Domingue</li> </ul>	Crear una base de datos de microcuencas para gestión de recursos naturales.	Necesidad de realizar un preproceso para tener certeza de la confiabilidad de la información. Microcuencas obtenidas con base en la red hidrográfica del INEGI.
<i>Incorporating ancillary data to refine anthropogenically modified overland flow paths.</i> Duke, G. D., Kienzle, S. W., Johnson, D. L., & Byrne, J. M. (2006).	Elevaciones de AltaLIS y MDE de 20 m.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MDE generado en ArcInfo</li> <li>- Empleo de componentes REA y CEA que permiten la incorporación de datos de alcantarillas y canales de irrigación al MDE</li> </ul>	Crear un modelo computacional para incorporar estructuras antropogénicas en la delimitación de microcuencas (RIDEM).	Resultados sin poder ser verificados debido a la inexistencia de parteaguas de alta precisión en el área de estudio.
<i>Evaluation of different digital elevation models for analyzing drainage morphometric parameters in a mountainous terrain: a case study of the Supin-Upper Tons Basin, Indian Himalayas.</i> Das, S., Patel, P. P., & Sengupta, S. (2016).	MDE de 1, 23.5, 30 y 90 m y mapas topográficos escala 1:50,000 y 1:250,000.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Superposición de información</li> <li>- Filtración de datos de elevación</li> </ul>	Comparar la extracción de redes de drenaje y aspectos topográficos de distintas fuentes disponibles.	Enfoque a cuencas de gran tamaño. La resolución y la escala son factores significativos.
<i>Desarrollo y análisis de un único programa informático para la realización de estudios hidrológicos.</i> Puech, M., Tutor, O., & Romero, C. Z (2019)	-MDE sin resolución especificada -Datos de precipitaciones máximas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dirección y acumulación del flujo obtenidos del algoritmo D8</li> <li>- Programación en Python</li> </ul>	Desarrollar un software en lenguaje Python para llevar a cabo estudios hidrológicos.	Desarrollado para estudios hidrológicos generales y no aplicado a las vías terrestres.
<i>Comparison of watershed boundaries derived from SRTM and ASTER digital elevation datasets and from a digitized topographic map.</i> Pryde, J. K., Osorio, J.,	MDE SRTM de 30 m y 90 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trazado manual</li> <li>- Digitalización</li> <li>- Proceso de delimitación de ArcGIS</li> <li>- Regresión lineal y T-test</li> </ul>	Comparar el parteaguas de una cuenca delimitado de 3 fuentes diferentes.	Uno de los MDE empleados contenía un porcentaje considerable de vacíos por lo que el resultado final dependió en su totalidad de la calidad del MDE.



<p>Wolfe, M. L., Heatwole, C., Benham, B., &amp; Cardenas, A. (2007)  <i>Evaluation of digital elevation models for delineation of hydrological response units in a Himalayan watershed.</i>                      Saran, S., Sterk, G., Peters, P., &amp; Dadhwal, V. K. (2010)  <i>Evaluation of digital elevation models for estimating erosion volumes by using spatial autocorrelation analysis in a catchment of the Venezuelan Andes.</i>                      Roa, E., Enrique, J., &amp; Grassi, A. (2014)</p>	<p>-MDE de 2.5 m y 15 m                      -Mapa topográfico SOI 1:50,000                      -MDE generado por LiDAR de 2m                      -Mapa topográfico</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Funciones racionales de fotogrametría</li> <li>- Digitalización de mapa topográfico</li> <li>- Error cuadrático medio</li> <li>- Herramientas para nubes de puntos LiDAR en ERDAS</li> <li>- Sustracción de diferencias entre MDE</li> <li>- Autocorrelación espacial</li> </ul>	<p>Experimentar y evaluar los resultados morfométricos extraídos de 4 MDE.                      Evaluar un MDE obtenido por un proceso de fotogrametría digital cotejado a su vez con un MDE elaborado a partir de la edición de curvas de nivel existentes en cartas topográficas.                      Evaluar la calidad de un MDE contrastado con una nube de puntos levantados con GPS tomando como parámetros la precisión vertical y las variables que interfieren en el escurrimiento superficial.                      Mitigar los efectos negativos en resultados extraídos de un MDE por la existencia de una vía terrestre.                      Evaluar los efectos interactivos</p>	<p>Puntos de control insuficientes para la evaluación de los resultados.                      Sin buenos resultados en terrenos con pendiente &lt;5%.                      Enfocado principalmente a los mapas relacionados al uso y tipo de suelo.                      La delimitación de la cuenca, la posición de la red de corrientes y</p>
<p>Quality assessment from a hydrological perspective of a digital elevation model derived from WorldView-2 remote sensing data.                      Novoa, Chokmani, K., Nigel, R., &amp; Dufour, P. (2015)</p>	<p>-Imagen satelital WV-2                      -MDE generado por LiDAR a 1m</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Error cuadrático medio</li> <li>- Análisis hidrológico por ArcGIS y ArcHydro</li> </ul>		
<p>Modifying digital elevation models to develop more realistic wetness index layers for soil survey applications.                      Avello, T. D., Brennan, J., &amp; Loomis, L. (2016)  <i>Integrated Impact of Digital Elevation Model and Land</i></p>	<p>-MDE sin resolución especificada                      -MDE ASTER de 50 m y 90 m</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoción y sustitución de elevaciones de la vía terrestre en cuestión</li> <li>- Simulación de escurrimiento superficial por SWAT</li> </ul>		



## DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE MICROCUENCAS EN PROYECTO CARRETERO BASADA EN MDE



<p><i>Cover Resolutions on Simulated Runoff by SWAT Model.</i> Al-Khafaji, M. S., &amp; Al-Sweiti, F. H. (2017)</p>	<p>-Imágenes digitales de cobertura de suelo</p>	<p>- Calibración y validación</p>	<p>complementarios entre las resoluciones de MDE y abertura del suelo en la escorrentía estimada para la gestión de recursos hídricos.</p>	<p>el área total son altamente afectados por la resolución del MDE.</p>
<p><i>Morphometric analysis of river basins using GIS and remote sensing of an Andean section of Route 150, Argentina. A comparison between manual and automated delineation of basins.</i> Angillieri, M. Y. E., &amp; Fernández, O. M. (2017)</p>	<p>-Imágenes satelitales SPOT 5 de 2.5 m y 4 m -Topografía ASTER GDEMv2 -MDE de 30 m</p>	<p>- Algoritmo D8 - Comparación matemática de parámetros - Correlaciones</p>	<p>Comparar características morfológicas obtenidas de dos métodos.</p>	<p>Las variables implicadas dependen directamente de la microcuenca por lo tanto, es esencial delimitarla lo más precisa posible. Las microcuencas requieren píxeles pequeños para una representación adecuada de su área.</p>
<p><i>Elaboración de un modelo digital de elevaciones de alta resolución de la cuenca experimental Torre Rayón, Sonora.</i> Saiz, Rodríguez, J. A., Miranda Torres, S. A., Castro Valencia, A., (2017)</p>	<p>Conjunto de puntos de elevación levantados en campo con GPS</p>	<p>- Interpolación triangular - Correlación de elevaciones</p>	<p>Desarrollar una metodología para generar un MDE de alta resolución (1.0 x 1.0 m) empleando los módulos Geostatistical Analyst y ArcToolBox de ArcGIS 10.2.2.</p>	<p>Existencia de densa vegetación que impide el adecuado levantamiento de los puntos de validación.</p>
<p><i>Extraction of watershed characteristics using GIS and digital elevation model.</i> Rathore, R., Kumar, V., Ranjan, A., Tiwari, S., Goswami, A. &amp; Agwan, M. (2018)</p>	<p>Curvas de nivel a 20 m</p>	<p>- Digitalización - Combinación de datos - Interpolación - Delimitación por ArcSWAT</p>	<p>Desarrollar una metodología para la generación de un MDE empleando curvas de nivel para la delimitación de la cuenca y la extracción de sus características morfológicas.</p>	<p>Poca disponibilidad de curvas de nivel a menores intervalos.</p>





## DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE MICROCUENCAS EN PROYECTO CARRETERO BASADA EN MDE



<p><i>The importance of high resolution digital elevation models for improved hydrological simulations of a Mediterranean forested catchment.</i> Rocha, J., Duarte, A., Silva, M., Fabres, S., Vasques, J., Revilla-Romero, B., &amp; Quintela, A. (2020)</p>	<p>MDE de 1, 10 y 30 m</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulación de flujos</li> <li>- Delimitación por ArcSWAT</li> </ul>	<p>Emplear software SWAT para evaluar la influencia de la resolución de un MDE en la precisión de la representación de las cuencas.</p>	<p>Las resoluciones de 10 y 30 m no produjeron simulaciones tan apegadas a la realidad como la alta resolución de 1 m.</p>
<p><i>Causes and consequences of error in digital elevation models.</i> Fisher, P. F., &amp; Tate, N. J. (2006)</p>			<p>Revisar la investigación sobre la comprensión, el modelado y la propagación de errores en los MDE, para presentar una declaración completa de los problemas que rodean estos temas.</p>	<p>Un MDE contiene errores endémicos que pueden propagarse a las propiedades que se extraigan de él por ejemplo el tamaño de la cuenca y las características de la red de corrientes.</p>
<p><i>Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: A review.</i> Wechsler, S. P. (2007)</p>			<p>Presentar temas clave de investigación asociados con los MDE aplicados a hidrología.</p>	<p>Las fuentes de errores de los MDE están vinculadas a los métodos de generación en los que están incluidos los levantamientos GPS, fotogrametría y tecnologías LiDAR.</p>
<p><i>How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis?</i> Callow, J. N., Van Niel, K. P., &amp; Boggs, G. S. (2007)</p>	<p>MDE de 10, 30 y 90 m</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Llenado de vacíos por el algoritmo Jenson y Domingue</li> <li>- Dirección del flujo por el algoritmo D8</li> <li>- Empleo de algoritmos Stream Burning, Agree y ANUDEM</li> <li>- Comparaciones visuales y estadísticas</li> </ul>	<p>Explorar el impacto de la alteración que sufren los píxeles de un MDE tras la aplicación de una técnica de mejoramiento.</p>	<p>El empleo de algoritmos para modificar las características del MDE alteran los productos que se obtienen de él.</p>
<p><i>LIDAR data and hydrological applications at the basin scale.</i></p>	<p>MDE de 1, 2.5, 20 y 30 m</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reensamble de MDE</li> <li>- Evaluación visual, numérica y estadística</li> </ul>	<p>Evaluar el desempeño de un MDE generado con</p>	<p>Los MDE generados a partir de datos LiDAR proveen mayor precisión en la información útil</p>



Petroselli, A. (2012)

*Digital elevation models for topographic characterization and flood flow modelling along low-gradient, terminal dryland rivers: A comparison of spaceborne datasets for the Rio Colorado, Bolivia.*

Li, J., Zhao, Y., Bates, P., Neal, J., Tooth, S., Hawker, L., & Maffei, C. (2020)

*An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling.*

Wang, L., & Liu, H. (2006)

*Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling.*

Lidberg, W., Nilsson, M., Lundmark, T., & Ågren, A. M. (2017)

-Base de datos TDX-12 m  
-Imágenes satelitales de alta resolución

-MDE USGS y LiDAR de distintas resoluciones

-MDE de 2, 4, 8 y 16 m

- Combinación y reensamble de datos
- Error cuadrático medio
- Modelación de flujos

- Determinación de la altura de relleno
- Búsqueda de la ruta de menor costo
- Programación en C++

- Correlaciones
- Simulación del flujo
- Aplicación de algoritmos de preprocesamiento

puntos LiDAR en contraste con MDE de resoluciones estándar. para la caracterización morfológica.

Evaluar los efectos de la precisión y resolución de un MDE en parámetros hidrológicos.

Creación de un método para identificar y llenar depresiones contenidas en la superficie de un MDE determinando simultáneamente rutas de flujo y la partición espacial de cuencas en un paso de procesado.

No está disponible en un software gratuito.

Evaluar los efectos de distintos métodos de preprocesamiento.

La existencia de estructuras como terraplenes y alcantarillas altera las características morfológicas.



### II.7.2. Discusión

La *Tabla Resumen II.7.1* presenta un análisis que considera el tipo de datos vistos para los estudios hidrológicos basados en la delimitación de cuencas, esto permite observar que diferentes resoluciones han sido explicadas. Sin embargo, aún prevalece el problema de que no existe ninguna metodología actualizada para la aplicación en vías terrestres donde se requieren resoluciones de 1m. Por otra parte, se aprecia que diferentes técnicas han sido empleadas principalmente para mejorar la calidad de un MDE. Es por ello que se tienen dos principales conclusiones:

Los MDE han ejercido un amplio terreno de aplicación debido a la alta calidad que tienen y la facilidad para ser obtenidos y/o generados. Sin embargo, se debe tener experiencia respecto a la resolución que se quiera usar dependiendo de la aplicación (análisis hidrológico o gestión de recursos naturales).

Es inminente que un MDE no presente imperfecciones y que su calidad representada por su resolución define directamente la precisión de los productos extraídos por lo que debe tenerse presente la necesidad de mejorarlo. Para ello, varios investigadores han dedicado su trabajo a desarrollar algoritmos enfocados en corregir los errores existentes para garantizar un mayor apego de la representación digital a la real.



# Capítulo III.

## Marco Teórico



## Capítulo III. Marco Teórico

El marco teórico en el que se basa la investigación está compuesto por cuatro apartados principales: 1. Hidrología, en donde se detalla la teoría básica como la definición y delimitación de una cuenca, sus características y los métodos semi-empíricos para el cálculo de gastos; 2. Hidrología en caminos en donde se menciona la relación y la aplicación de la hidrología en las vías terrestres; 3. Modelos Digitales de Elevación que al ser el principal punto de enfoque se describe su proceso de creación, sus características y sus funciones y por último: 4. Técnicas de acondicionamiento o mejoramiento que debido al entorno en el que se genera un MDE se obtienen imprecisiones en la asignación de las elevaciones en las celdas que lo componen.

### III.1. Hidrología

Debido al importante rol que el agua tiene en el desarrollo biológico de todas las especies animales y vegetales del mundo, los científicos se han preocupado por estudiar de forma profunda su comportamiento y gracias a ese interés surgió la hidrología y a lo largo del avance de su estudio se han desarrollado múltiples definiciones de su significado y relevancia. Durante la Reunión Intergubernamental de Expertos para el Decenio Hidrológico Internacional (UNESCO, 1964) se definió como la ciencia que trata de las aguas terrestres, de sus maneras de aparecer, de su circulación y distribución en el globo, de sus propiedades físicas y químicas y sus interacciones con el medio físico y biológico, sin olvidar las reacciones a la acción del hombre. También se estableció que la ciencia de la hidrología está relacionada a otras áreas de generación o aplicación del conocimiento como la ingeniería civil, la edafología o la geología pero a pesar de ello, la hidrología en su conjunto termina siendo individual y distinta.

Para comprender su estudio, se definió a la cuenca como su unidad básica de estudio. El hidrólogo Francisco Aparicio definió a la cuenca como una zona de la superficie terrestre y bajo la suposición de una impermeabilidad total, las gotas de la precipitación escurrirían sobre ella a través de corrientes tributarias hacia un único punto de salida (Mijares, 1989). Tomando en cuenta lo anterior, las cuencas pueden clasificarse bajo ese criterio en 4 tipos:



- Arréicas: Aquellas que no logran drenar a un río, mar o lago sus aguas se pierden por evaporación o infiltración sin llegar a formar escurrimiento subterráneo.
- Criptorréicas: Las redes de drenaje superficial existentes no poseen un sistema organizado o aparente y se producen flujos subterráneos.
- Endorreicas: Aquellas en las que sus aguas drenan a un embalse o lago sin llegar al mar.
- Exorreicas: Aquellas cuando sus corrientes conducen el flujo a un sistema mayor de drenaje como un gran río o el mar.

Una cuenca está delimitada por un parteaguas que se define como la línea imaginaria formada por los puntos de mayor elevación topográfica y que separa la cuenca de las vecinas. De acuerdo a Jardí (Jardí, 1985) existen cuatro características fundamentales en el estudio de una cuenca: el tamaño o superficie, la simetría, la elongación y el perímetro. El área de la cuenca se define como la superficie proyectada horizontalmente por el parteaguas. El conocimiento de este valor permite la obtención de otras variables morfométricas pero también ayuda a desarrollar criterios para una clasificación. De acuerdo a la densidad de la red de drenaje se obtienen unidades menores de estudio como subcuencas y microcuencas donde una subcuenca es toda área que dirige su drenaje al curso principal de la cuenca y una microcuenca es toda área que dirige directamente su drenaje al curso principal de una subcuenca. A raíz de esto, surgió la necesidad de establecer intervalos para adoptar una correcta clasificación respecto a su tamaño. La Tabla 2.1.1 muestra el criterio propuesto por Faustino y Jiménez:

<b>Unidad</b>	<b>No. de orden</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>
Microcuenca	1, 2, 3	10 - 500
Subcuenca	4, 5	500 - 2000
Cuenca	6, 7 o más	Más de 2000

*Tabla III. 1. Clasificación de las cuencas respecto a su extensión  
Fuente: Faustino & Jiménez, 2000*



Cabe mencionar que esta clasificación es relativa y puede no ser aplicable a casos o regiones específicas donde los rangos de las magnitudes pueden ser muy variables así que se aconseja que especialistas evalúen si los intervalos de clasificación deben aumentar o disminuir. Al igual que en el caso de la superficie, la medición de la longitud del parteaguas se lleva a cabo sobre su representación en un plano horizontal. Este parámetro por sí solo no aporta información respecto al tamaño o forma de la cuenca, sino que es una de las muchas otras que interfieren.

La corriente principal de una cuenca es la corriente que fluye por el punto de salida y donde las corrientes tributarias desembocan. La longitud de la corriente principal es una característica importante de una cuenca ya que ésta conduce todo el flujo hacia la salida. Consecuentemente, una cuenca con una corriente principal larga tendrá una respuesta lenta a una precipitación dada que una cuenca con una corriente principal más corta. La densidad de drenaje posee una fuerte influencia en la respuesta espacial y temporal de una cuenca ante un evento de precipitación. Si una cuenca está bien cubierta por un patrón de corrientes de drenaje interconectadas, y el tiempo del escurrimiento superficial es relativamente corto, la cuenca responderá más rápidamente que si fuera una esparcidamente drenada y el tiempo del escurrimiento superficial fuera relativamente largo. Un escurrimiento superficial se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre la superficie terrestre y que desemboca a una corriente para finalmente ser drenada a través de un punto de salida. El escurrimiento de una cuenca puede considerarse como el producto del ciclo hidrológico, el cual está influenciado por dos grupos importantes de factores: climatológicos y fisiográficos. Los primeros incluyen principalmente los efectos de la lluvia y la evapotranspiración. Los segundos pueden dividirse en las características geométricas y físicas de la cuenca y del cauce. En cuencas pequeñas, los gastos máximos son generalmente causados por tormentas de corta duración debido a que una parte de la precipitación se pierde a través del proceso de la interceptación, evapotranspiración e infiltración.



### III.2. Hidrología en caminos

Las obras menores de drenaje (OMD) de una carretera se definen como estructuras localizadas debajo de los terraplenes construidas transversalmente al cruce con el eje del camino con el propósito de conducir y desalojar por gravedad los escurrimientos superficiales naturales a través del cuerpo del terraplén. Se clasifican como rígidas y flexibles, se construyen con claros máximos horizontales de 6.00 m en diferentes secciones geométricas definidas por el área hidráulica necesaria, la altura del terraplén, la sección hidráulica, la pendiente del cauce, la capacidad de carga del suelo de desplante y los materiales existentes en la zona (SCT, 2016).

Según su propósito y ubicación, las obras menores de drenaje se clasifican como:

- Alcantarillas tubulares de concreto. - Son estructuras rígidas constituidas por tubos de concreto reforzado en una o varias líneas y según el terreno donde se construyan pueden ser en zanja, en zanja con terraplén o en terraplén.
- Alcantarillas de lámina corrugada de acero. - Son estructuras flexibles constituidas por tubos o arcos de lámina corrugada de acero y según su geometría se clasifican en alcantarillas de tubo circular, de tubo abovedado o de bóveda y según su modo de ensamble se clasifican en anidables o seleccionables.
- Alcantarillas de tubo corrugado de polietileno de alta densidad. - Son estructuras flexibles constituidas por tubos de este tipo colocados sobre el terreno en una o varias líneas y según el terreno donde se construyan pueden ser en zanja, en zanja con terraplén o en terraplén y según su ubicación se clasifican en normal y esviada.
- Alcantarilla de losa de concreto hidráulico. - Son estructuras rígidas construidas con una losa de concreto hidráulico reforzado apoyada sobre muros de concreto hidráulico reforzado o mampostería. Cuentan con aleros en la entrada y en la salida de la obra de drenaje para evitar la erosión del terraplén y encauzar el flujo hacia el interior de la misma.
- Alcantarillas de cajón. - Son estructuras rígidas constituidas por un marco de concreto hidráulico reforzado y se utilizan para repartir en un área relativamente





grande los esfuerzos ocasionados por las cargas transmitidas por la estructura al suelo de cimentación cuando éste tiene baja resistencia al esfuerzo cortante.

- Alcantarilla de bóveda. - Son estructuras rígidas construidas con diversos materiales como mampostería, concreto reforzado, concreto presforzado, lámina corrugada y polietileno de alta densidad para dar paso libre al agua de un lado a otro de la vialidad. Están formadas de una parte inferior rectangular y una superior de arco circular simple o compuesto.

### III.3. Modelos Digitales de Elevación

Un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) consiste en una representación digital de la topografía de una zona a través de la captura de las elevaciones en pixeles organizados en columnas y renglones de una resolución dada (*Ilustración III.1*). Cabe mencionar que las elevaciones que se toman en cuenta no incluyen las elevaciones de estructuras existentes, vegetación o cualquier otro objeto que se encuentre sobre la superficie terrestre. Debido a ello, existe una variedad de definiciones topográficas relacionadas a un MDE (Croneborg, et. al, 2015) y se mencionan a continuación:

- Modelo Digital del Terreno (MDT). Este término es un sinónimo de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) donde la palabra “terreno” hace referencia a la superficie de la Tierra. Los MDT son una versión más refinada de los MDE donde durante los procedimientos adicionales se representan características del terreno con mayor precisión. Un MDE/MDT es el producto estándar que se utiliza para el análisis topográfico, mapeo de escurrimientos y planeación urbana.
- Modelo Digital de la Superficie (MDS). En caso contrario, un MDS suele confundirse con un MDE. Este tipo de modelo contiene los puntos con mayor elevación reflejados en el radar en un área específica, es decir, están incluidos todos los objetos expuestos y cualquier superficie existente. Cuando la onda láser es lanzada, interactúa con el primer objeto que detecta (la copa de un árbol, un edificio o el suelo desnudo) y un MDE retiene únicamente las elevaciones del terreno (*Ilustración III.2*).

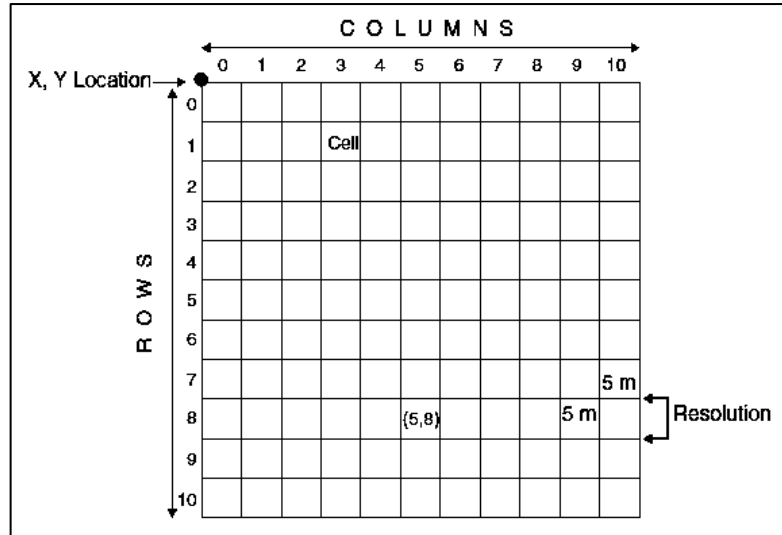


Ilustración III. 1. Estructura interna de un MDE  
Fuente: Bajjali, 2018

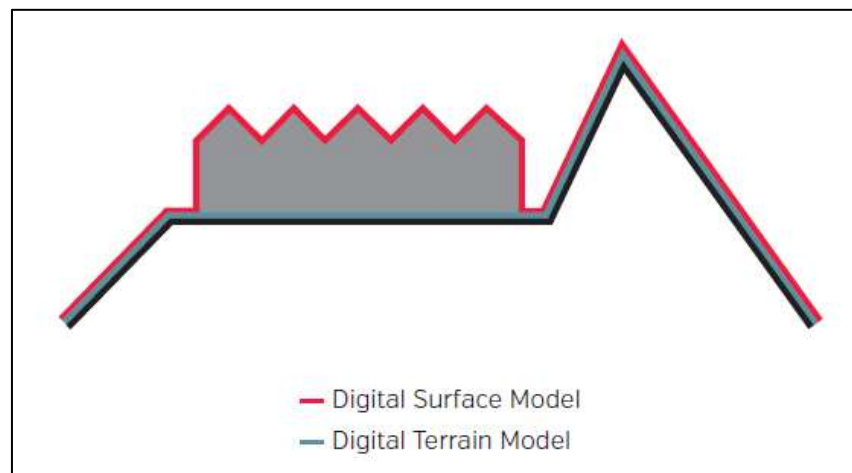


Ilustración III. 2. Diferencia entre un MDE/MDT y un MDS  
Fuente: Croneborg, et. al , 2015

- Canopy Height Model (CHM). Es un modelo que toma en cuenta las elevaciones para determinar la presencia de vegetación. Un CHM puede ser expresado como la diferencia entre la elevación total existente (MDS) y la capa inferior de la topografía (MDE o MDT).
- Modelo de Altura de Estructuras. Este término es análogo al CHM ya que, en lugar de medir la vegetación, detecta la altura de cualquier estructura que sea objeto de un análisis.



- Triangulated Irregular Network (TIN). Consiste en una superficie digital de elevaciones que no está definida por una retícula de píxeles sino por un conjunto de series conectadas de triángulos contiguos no superpuestos. Un modelo TIN representa uno de las estructuras de datos más utilizados dentro de los Sistemas de Información Geográfica para la modelación de superficies.

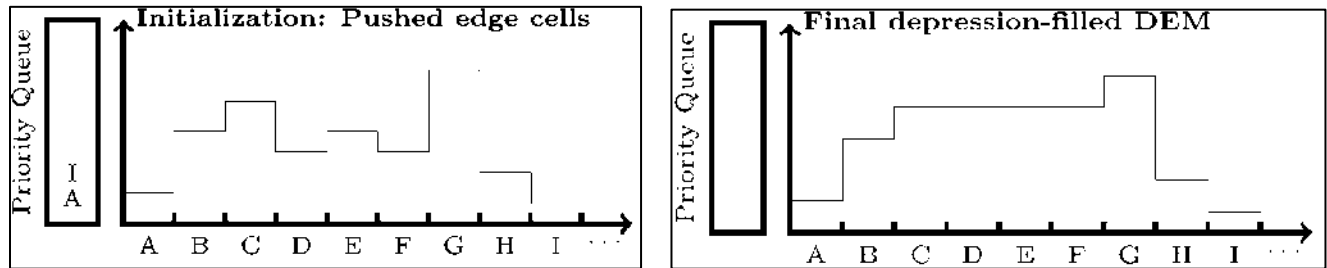
### III.4. Algoritmos de preprocesamiento

Las técnicas de acondicionamiento son algoritmos que se han desarrollado para mitigar la falta de precisión que contienen los MDE empleados en los análisis hidrológicos. Los más comunes se detallan a continuación.

#### III.4.1. Depression Filling (DF)

Barnes (Barnes et al., 2014) comenta que se han desarrollado diversos algoritmos para extraer propiedades de una región hidrológica a partir de un MDE como son la humedad del suelo, la estabilidad del terreno, el potencial erosivo y la infiltración y para todo ello se requiere 1) que cada una de las celdas que contiene el MDE debe tener una dirección del flujo definida y 2) que siguiendo las direcciones de flujo de una celda a otra, siempre sea posible llegar al borde del MDE. Estos requisitos se ven comprometidos cuando existen depresiones o también conocidos como vacíos o pozos que se definen como regiones de drenado internas de un MDE que no poseen una salida. Aunque la traducción del nombre de este algoritmo hace referencia al llenado de las depresiones existentes realmente se trata de establecer una inundación prioritaria en las celdas del MDE. Este algoritmo se desarrolló por primera vez en 1989 y a partir de ese momento se comenzaron a añadir mejoras a su proceso. El algoritmo de inundación prioritaria consiste en insertar las celdas de borde de un MDE en una fila de prioridad y se van ordenando al ir aumentando la elevación. La celda que contiene la elevación más baja es lanzada hacia afuera de la fila y es manipulada. Tomando en cuenta lo anterior, cada celda vecina que no haya sido considerada por el algoritmo es manipulada y añadida a la fila de prioridad y el algoritmo continúa hasta que ésta quede vacía.

La *Ilustración III.3* muestra el trabajo del algoritmo en 9 celdas ubicadas en columnas de la A a la I y sus respectivas elevaciones donde cada vez se va tomando la que posee la elevación menor, se va añadiendo a la fila de prioridad, se manipula y se le asigna una nueva elevación y se repara la depresión que existe.



*Ilustración III. 3. Diagrama de ejemplificación del algoritmo de inundación prioritaria*

*Fuente: Barnes, et. al, 2014*

#### III.4.2. Depression Breaching (DB)

Es un algoritmo de pre-procesamiento desarrollado por Lindsay y Dhun (Lindsay & Dhun, 2015) con el objetivo de dar solución a situaciones donde los patrones de drenaje de una cuenca son alterados debido a la existencia de infraestructura carretera como los pasos subterráneos en los terraplenes y las obras de drenaje. Ambos autores hacen referencia a que se ha demostrado que la construcción de estas obras en las vías terrestres (carreteras y ferrocarriles) ocasiona un aumento en la densidad de drenaje lo que produce un incremento en el volumen del flujo de la tormenta repercutiendo en una respuesta hidrológica de la cuenca más llamativa. Regularmente, los MDE que se generan no toman en cuenta las elevaciones generadas por los terraplenes, es decir, no toman en cuenta la infraestructura existente y únicamente se rigen por las elevaciones del terreno natural pero la inclusión de esta infraestructura antropogénica en MDE de alta resolución provee el potencial de mejorar sustancialmente la modelación de la red de drenaje de una cuenca. Se analiza que los MDE generados en una alta resolución presentan problemas para la correcta modelación de las direcciones del flujo porque si bien pueden tomar en cuenta la superficie del camino no incluye los pasos a desnivel como lo son las alcantarillas y los puentes. La presencia de terraplenes en un MDE usualmente causa la creación de



numerosas “presas o embalses” que bloquean el flujo de la simulación, es decir, digitalmente, crean una barrera que impide la circulación del flujo simulado y provoca un estancamiento; en la vida real, se compararía con el proceso de llenado de una presa pero para los fines de interés, eso redundaría a un error bastante considerable. Anterior a esta técnica de acondicionamiento, la de mayor aplicación era la técnica *Depression Filling* pero los autores mencionan que desafortunadamente, esta técnica de mejoramiento no es la adecuada para resolver los problemas que se generan por los pasos subterráneos en los terraplenes que no se representan en los MDE lo que resulta en datos erróneos.

La técnica de *Depression Filling* produce una solución que siempre permanece contenida en el MDE, en cambio, la operación que ejecuta la técnica *breaching* produce una solución externa. Básicamente, se crea un canal de ruptura que conecta una celda de la retícula con pendiente nula (celda vacía) con una celda de menor elevación (celda destino) así que puede haber muchas celdas objetivo y muchos canales de ruptura hacia ellos por lo que la única restricción que tiene esta técnica es que, si las celdas objetivo de menor elevación se encuentran más allá de los límites de la retícula, podría no generarse el canal de ruptura necesario.

La técnica de *Depression Breaching* lleva a cabo un análisis de ruta de menor costo (least-cost path, LCP) para determinar el canal de conexión entre celdas (Lindsay & Dhun, 2015). La *Ilustración III.4* muestra el diagrama de flujo del algoritmo.

El MDE es la entrada del algoritmo, se analiza y se identifican las celdas o píxeles que se encuentren vacíos y se agrupan en una lista y a partir de ahí, permanecerán en un ciclo de decisión regido por dos respuestas que llevan a dos procesos distintos. Al tomar un elemento vacío de la lista, éste se lleva a un proceso donde se examina su condición respecto a las celdas vecinas, se crea una superficie de acumulación costo-distancia y se interrumpe el camino con mayor pendiente desde la celda vacía hasta la celda objetivo.

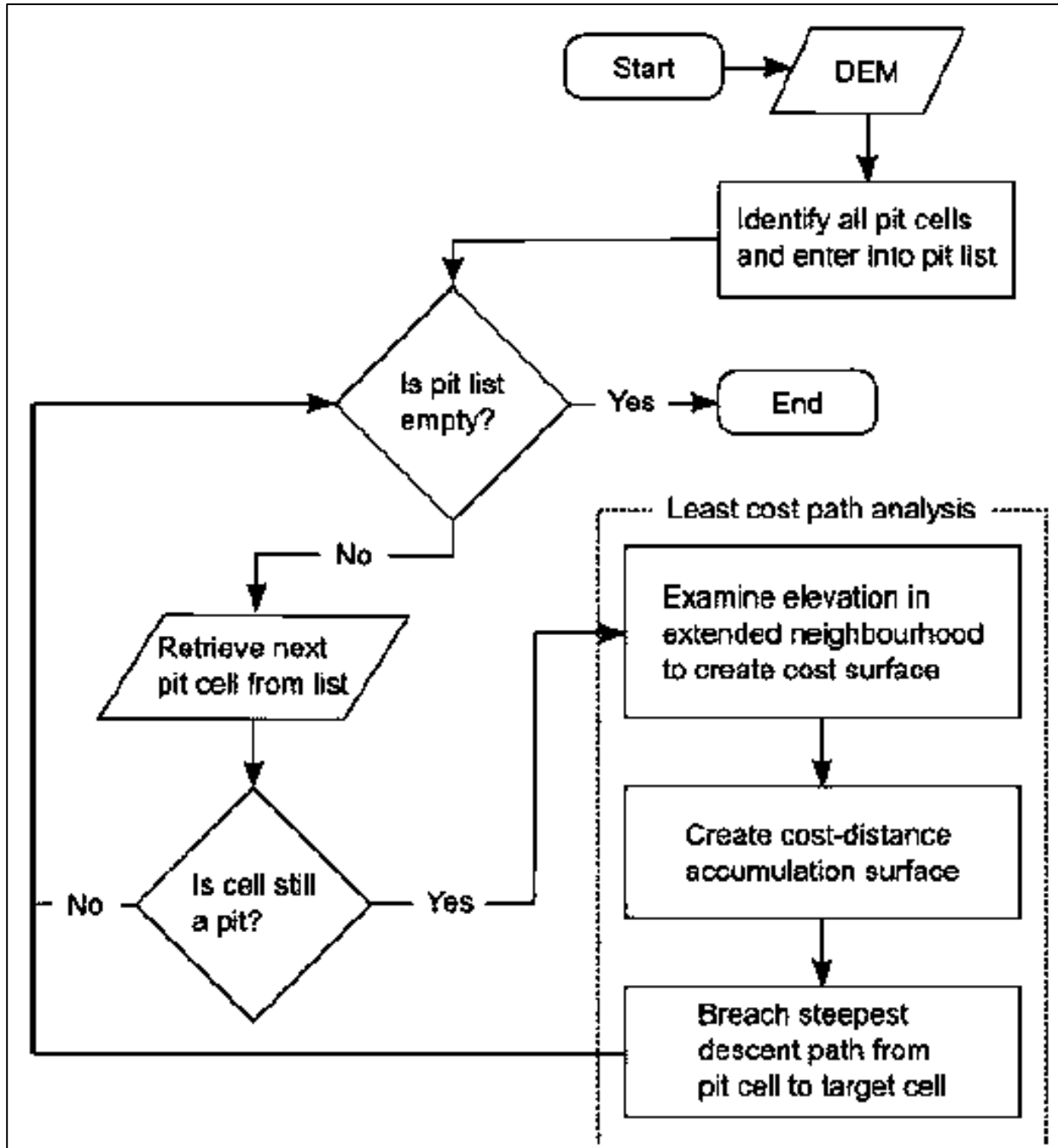


Ilustración III. 4. Algoritmo Depression Breaching basado en la ruta de menor costo

Fuente: Lindsay & Dhun, 2015

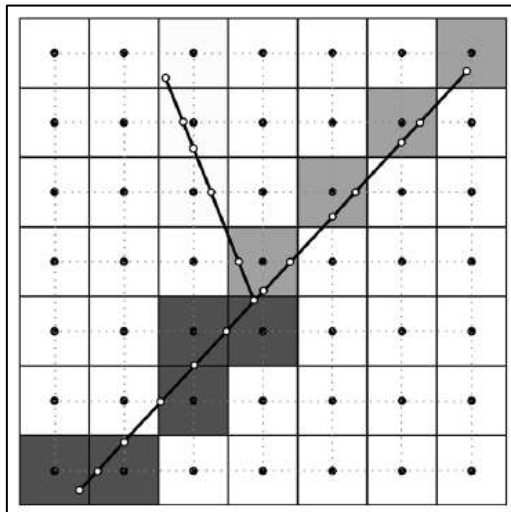


### III.4.3. Stream Burning (SB)

De acuerdo a Lindsay (Lindsay, 2016) no se tiene certeza del origen exacto de esta técnica pero se tienen indicios de que sus raíces están en trabajos de investigación realizados en el Centro de Investigación de Recursos Hídricos de la Universidad de Texas a partir de la mitad y hasta el final de la década de 1990. El término de la técnica hace referencia al procedimiento de grabado durante el cual se coloca un recubrimiento resistente al ácido sobre una hoja de metal con un patrón de diseño creado por raspar el recubrimiento en algunas zonas. Esas secciones metálicas desprotegidas se queman al entrar en contacto con el ácido, cortando o rebajando la superficie en esas zonas así que esta técnica de acondicionamiento trabaja como una analogía digital a este proceso.

La técnica del *Stream Burning* surge con el objetivo de dar solución a la problemática que se genera cuando la red de corrientes que se obtiene a partir de un MDE, usualmente definida por un conjunto de píxeles o celdas con valores elevados del flujo acumulado, no coincide con la red de corrientes mapeada fotogramétricamente, es decir, lo que se obtiene digitalmente difiere de lo que existe en la realidad. Aunque la técnica ha pasado por algunas actualizaciones, la mayoría sigue poseyendo el procedimiento común. En primer instancia, una red de corrientes en formato vectorial se convierte a formato raster produciendo una cuadrícula de corrientes en la misma resolución y extensión que posee el MDE (*Ilustración III.5*) entonces las elevaciones pertenecientes a las celdas de los arroyos se separan de las celdas del terreno adyacentes, ya sea disminuyendo las elevaciones de las corrientes o aumentando de manera equivalente las del terreno (Lindsay, 2016).

Después, el MDE con las elevaciones separadas entre corrientes y terreno se somete a un procedimiento de mejoramiento para eliminar depresiones y zonas planas. El resultado de esto es un MDE hidrológicamente corregido con una trayectoria de flujo descendente que conecta cada celda de la cuadrícula con las corrientes extraídas que coinciden con la red de corrientes mapeada. Este modelo de elevaciones resultante puede ser usado para el modelado de una red de drenaje donde se incluye el cálculo de la dirección del drenaje local, la acumulación del flujo y la delimitación de la cuenca.



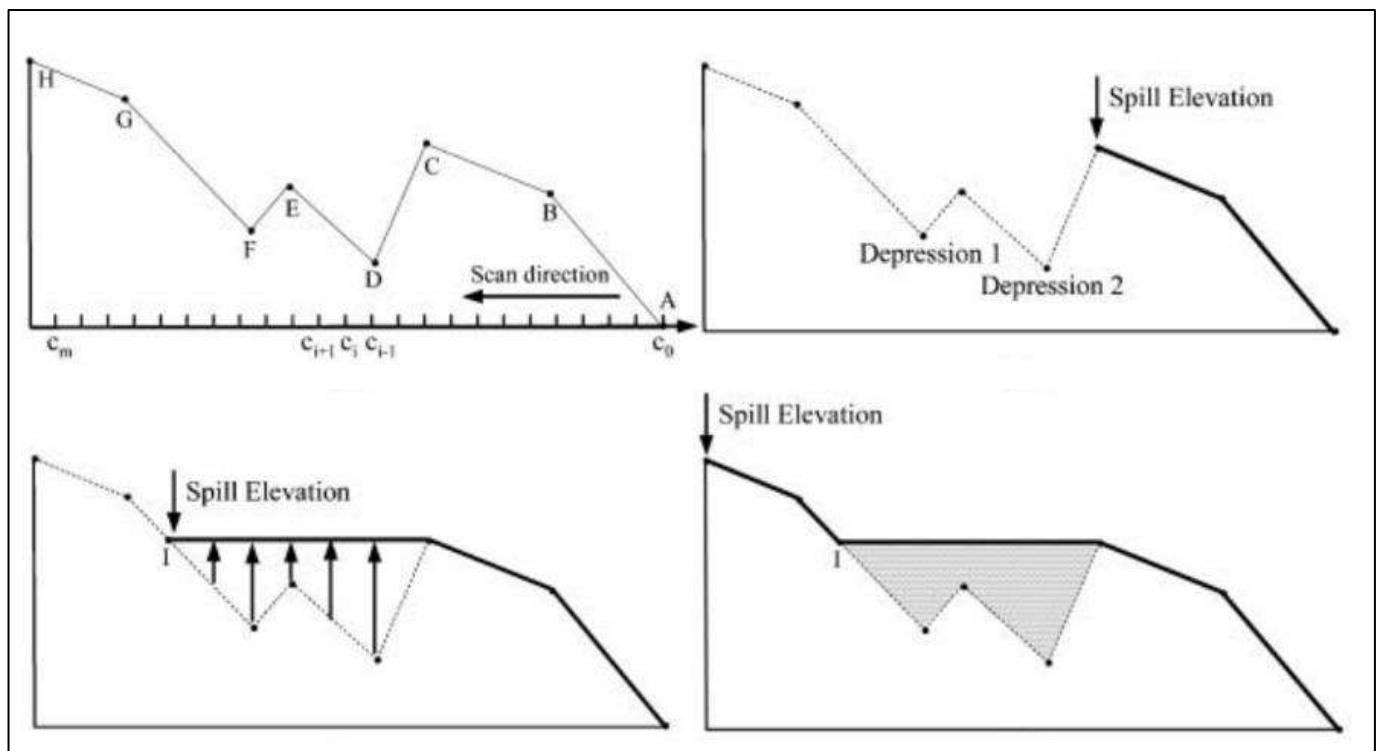
*Ilustración III. 5. Descripción gráfica de la rasterización de una red de corrientes vectoriales*  
*Fuente: Lindsay, 2016*

#### III.4.4. Wang & Liu (WL)

Es un algoritmo desarrollado a principios de los 2000 que simultáneamente puede determinar direcciones de flujo y delimitar espacialmente cuencas en un paso de procesado computacional gracias a los conceptos de la elevación de derrame/vertido y la búsqueda de las rutas de menor costo. El objetivo del algoritmo surge debido a que una práctica común es localizar y remover las depresiones existentes en un MDE como primer paso dentro de un análisis hidrológico, en el cual, de 0.9 a 4.7% de los píxeles pueden ser depresiones. Los desarrolladores argumentan que, aunque ya existen algoritmos que rellenan las depresiones tales como *O' Callaghan and Mark (1984)*, *Jenson & Domingue (1988)*, *Martz and Jong (1988)* y *Planchon and Darboux (Planchon & Darboux, 2002)* éstos se han vuelto inadecuados e imprácticos debido a que el número de depresiones superficiales incrementa drásticamente en los MDE de alta resolución.



Los ejes principales del método son, como se había mencionado antes, la introducción del concepto elevación de derrame/vertido y la construcción progresiva rutas óptimas de derrame basadas en técnicas de menor costo. La elevación de derrame de una celda en un DEM se define como el valor de elevación mínimo que la celda debe elevarse para que el agua se derrame desde esa celda hacia una salida en el borde del MDE. Si la elevación de una celda es lo suficientemente alta para establecer un flujo hacia abajo a través de una salida en el borde del MDE, esa celda no necesita ser elevada sino que su elevación de derrame es la misma que la elevación original en el MDE. a *Ilustración III.6* muestra el esquema del rellenado de depresiones por este método.



*Ilustración III. 6. Esquema gráfico del método. (a) Perfil de elevación con una salida en el punto A; (b) los valores de la elevación de derrame para las celdas entre los puntos A y C son iguales a su elevación original; (c) los valores de elevación de derrame para las celdas entre el punto C y el punto I se establecen con la elevación original del punto C, el punto más alto en la dirección aguas abajo; y (d) los valores de elevación de derrame para celdas entre el punto I y el punto H son iguales a sus valores de elevación originales, lo que da como resultado un perfil de elevación de derrame sin depresión (línea gruesa)*

Fuente: Wang & Liu, 2006



Las celdas conectadas en el perfil topográfico desde la salida A hasta el H están denotadas como  $c_0, c_1, \dots, c_m$ . Para una celda  $c_i$ , su elevación de derrame  $S(c_i)$  debe ser mayor o igual que la elevación de derrame  $S(c_{i-1})$  de su celda vecina inmediata aguas abajo  $c_{i-1}$ . En caso de que la elevación original  $E(c_i)$  de la celda  $c_i$  sea más alta que la elevación de derrame  $S(c_{i-1})$  de su vecino aguas abajo, su elevación original  $E(c_i)$  se fija como su elevación de derrame  $S(c_i)$ . De lo contrario, su elevación de derrame  $S(c_i)$  se establece en la elevación de derrame  $S(c_{i-1})$  de su celda vecina aguas abajo  $c_{i-1}$ . Al propagar la elevación de derrame de esta manera, se construye un camino sin depresión desde la salida A hasta la celda interior  $c_i$ . Esta ruta está definida por una serie de valores de elevación de derrame  $S(c_0), S(c_1), \dots, S(c_i)$  y se garantiza que no decrecerá. La elevación de derrame  $S(c_i)$  de una celda interior  $c_i$  puede interpretarse como la elevación más alta de todas las celdas ubicadas en el camino aguas abajo hacia la salida definida.

Además, se implementa el algoritmo de búsqueda de menor costo (*Hart et al. 1968*) para llevar a cabo la identificación de la dirección correcta y establecer una ruta de flujo para cada celda de la cuadrícula en un MDE.

Se comienza con las salidas en los bordes y se vinculan progresivamente a las celdas interiores utilizando una estrategia de búsqueda hacia aguas arriba. Un camino desde una salida hasta una celda interior específica comprende una secuencia de celdas en la que cada celda sucesiva está conectada a su predecesora. Debido a que cada celda interior tiene ocho direcciones de flujo potenciales en el espacio bidimensional del MDE, existen numerosos caminos posibles que conectan una salida con una celda interior específica. Diferentes caminos conducirán a diferentes valores de elevación de derrame para la celda interior específica. Nuestra ruta óptima objetivo es la que resulta en la elevación de derrame de menor valor de entre todos los caminos candidatos.

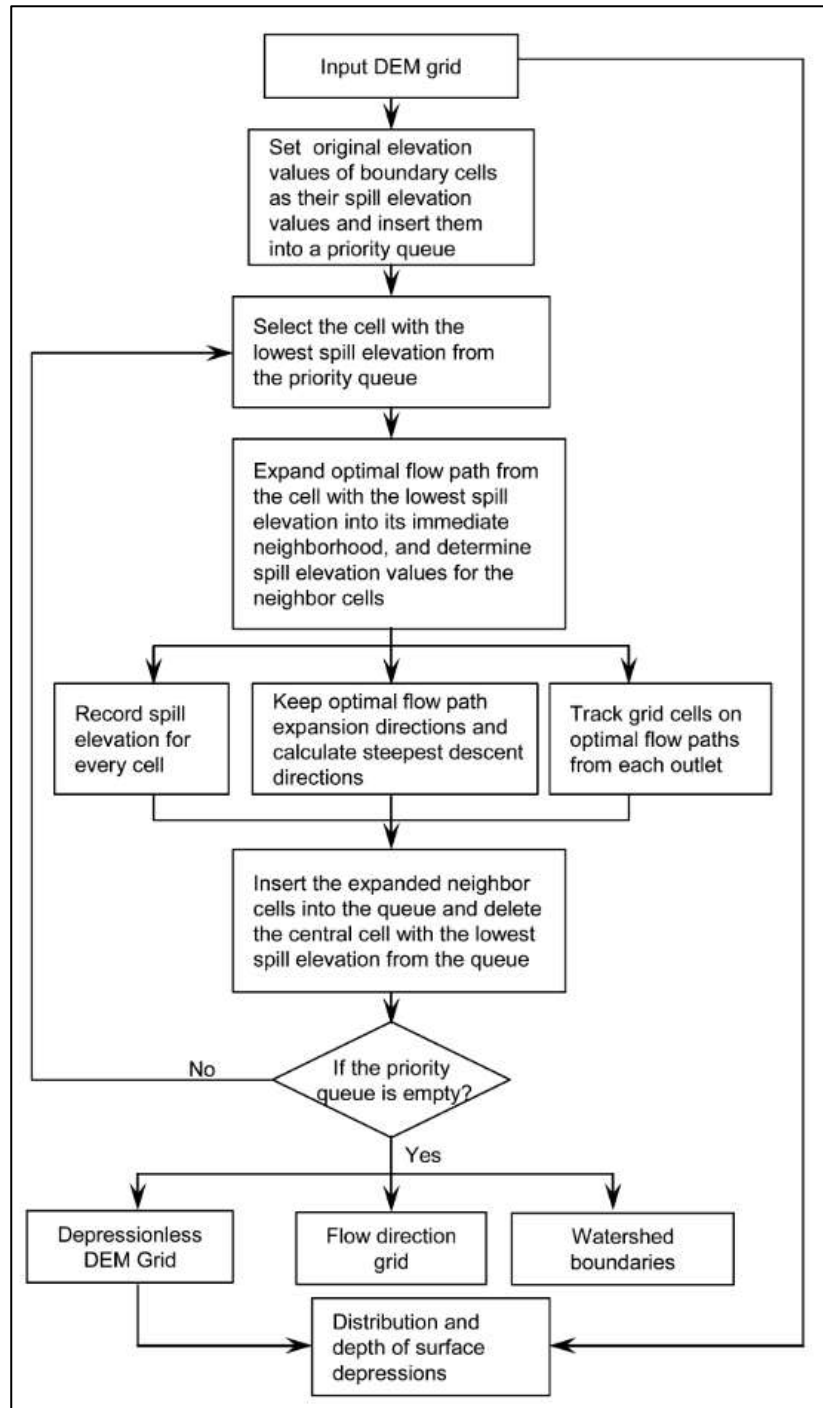


Ilustración III. 7. Proceso computacional y diagrama de flujo del algoritmo.

Fuente: Wang and Liu, 2006



El camino óptimo se entiende como el camino de elevación de derrame más bajo. Con la ruta de elevación de derrame más baja, la celda interior sólo necesita elevarse a la elevación más pequeña posible que haga que el agua se derrame hacia una salida. El camino óptimo es también el camino de menor costo en el sentido de que el costo del escurrimiento superficial para llenar las depresiones es mínimo. El objetivo de la búsqueda se puede establecer como: dado un número de puntos en el borde del MDE, encuentre las rutas óptimas desde estas salidas hasta las celdas interiores que den como resultado valores mínimos de elevación de derrame para cada celda interior. En la perspectiva de la teoría de grafos, los caminos óptimos que unen una sola salida a todas las celdas interiores constituyen un árbol (Cormen et al., 2009) La salida es la raíz del árbol, los enlaces dirigidos entre dos celdas adyacentes son los bordes del árbol y las celdas interiores en los caminos óptimos son los nodos del árbol. Para un MDE con múltiples salidas, las rutas óptimas comprenden un bosque de árboles, y el número de árboles en el bosque es igual al número de salidas. Se emplea el algoritmo de búsqueda de menor costo (Hart et al., 1968) para minimizar el tiempo de búsqueda para establecer el árbol o bosque de caminos óptimos. La búsqueda de menor costo también se conoce como búsqueda prioritaria.

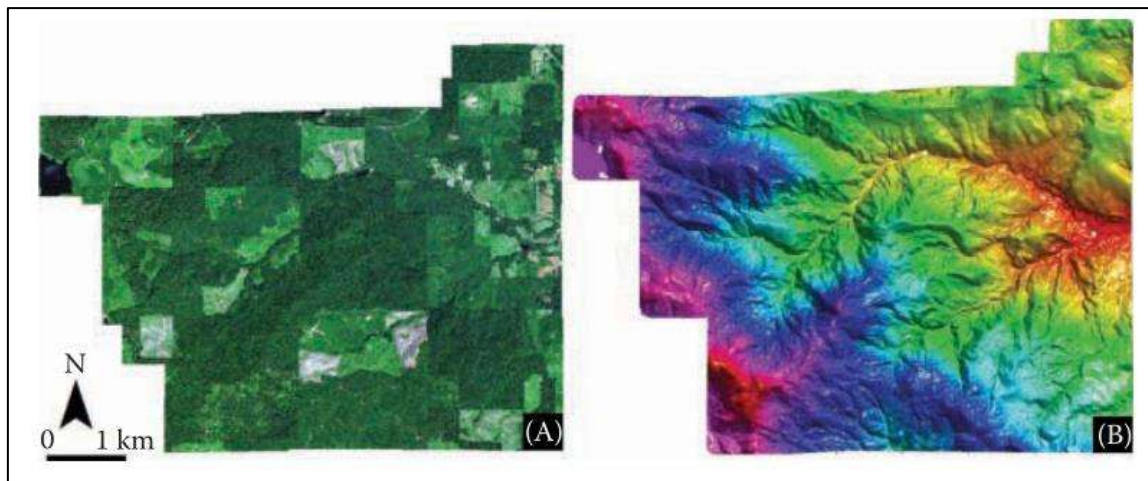
### III.5. LiDAR (Light and Detection Ranging)

Los levantamientos topográficos a través de sensores LiDAR representan una nueva etapa tecnológica de la topografía por la versatilidad y la alta resolución que poseen. Los sensores LiDAR empleados actualmente para la fotogrametría, son los sucesores históricos de las fotografías aéreas destinadas para objetivos bélicos durante los conflictos internacionales del siglo XX. A partir de entonces, el uso de fotografías aéreas mejoró la eficiencia de muchas aplicaciones cartográficas porque (1) las fotografías aéreas hicieron posible el mapeo de las características del suelo en áreas donde la investigación de campo era difícil debido a la poca accesibilidad; (2) las estereofotografías aéreas ayudaban a la interpretación de las características del terreno mediante la incorporación de información topográfica; y (3) las fotografías aéreas infrarrojas en color brindaron información espectral más allá de la visión humana. En 1987, Sabins definió a la teledetección como métodos que emplean

energía electromagnética para detectar, registrar y medir las características de un objetivo tal como la superficie de la Tierra (Dong & Chen, 2018).

LiDAR es la sigla en inglés de *Light Detection and Ranging*, una tecnología que mide distancias (o rangos) en función del tiempo entre la transmisión y la recepción de señales láser. Un sistema de detección remota LiDAR aerotransportado generalmente consiste de (a) un telémetro láser que detecta rangos de alcance y (b) un sistema de posicionamiento y orientación que mide la ubicación y la orientación del sensor, que en combinación puede derivar una vista tridimensional (3D) con las coordenadas de los objetos que detecta. Dado que el LiDAR puede medir directamente el entorno geográfico en tres dimensiones, no tiene el problema de la distorsión geométrica asociado con las imágenes que tienen que proyectar el mundo 3D en un espacio de imagen bidimensional. De otra manera, el usuario no tiene que preocuparse por el tema de la georreferenciación lo que es una de sus principales ventajas así como también que la información puede ser recolectada a cualquier hora del día e incluso durante la noche siempre y cuando no haya niebla densa, humo, niveles elevados de humedad a causa de lluvia o nieve ni nubes entre el sistema láser y el objetivo.

La *Ilustración III.8* muestra una comparación entre dos vistas de Panther Creek, Oregon, Estados Unidos basadas en fotografía aérea y datos LiDAR.



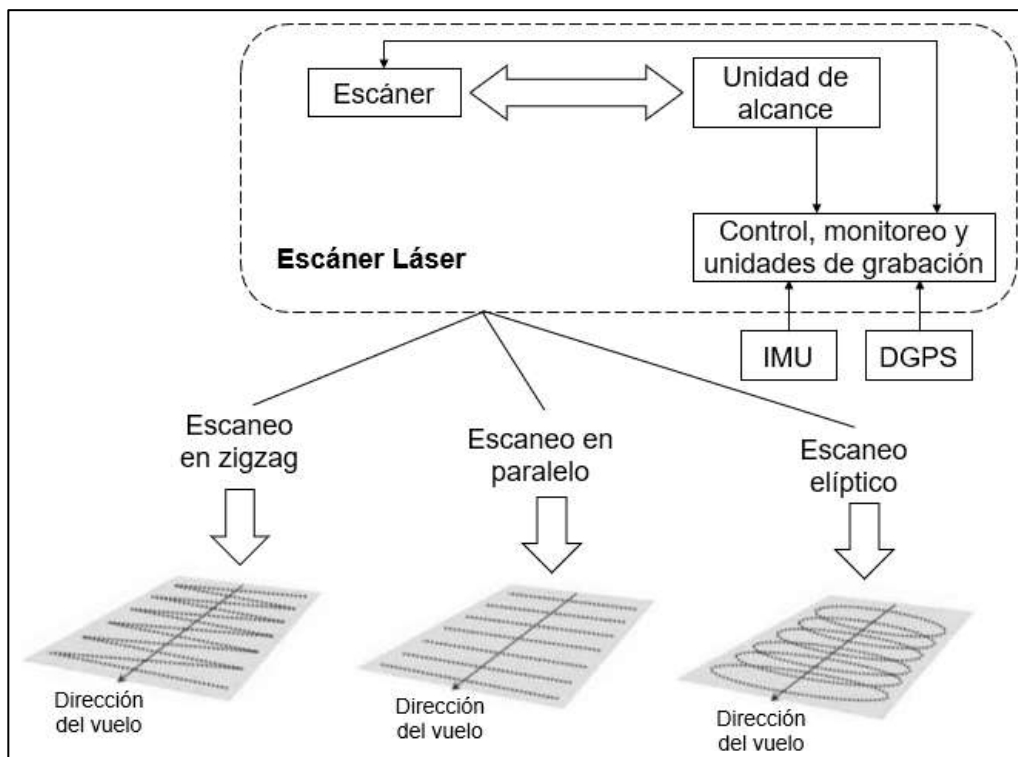
*Ilustración III. 8. Diferentes vistas de Panther Creek, Oregon, EE.UU. basadas en imágenes ópticas y datos LiDAR. (A) Imagen satelital y (B) DTM derivado de LiDAR*

*Fuente: Dong & Chen, 2018*

Los sensores LiDAR pueden tomar medidas de retorno discretas con múltiples registros por pulso emitido de una señal de retorno a intervalos de tiempo fijos, como 1 ns (alrededor de 15 cm de distancia de muestreo). El LiDAR de forma de onda completa se usa principalmente en aplicaciones forestales, mientras que el LiDAR de retorno discreto se puede usar en muchos campos.

### III.5.1. Componentes básicos del LiDAR

Los láseres con una longitud de onda de 500 a 600 nm se usan normalmente en sistemas LiDAR terrestres, mientras que los láseres con una longitud de onda de 1000 a 1600 nm se usan en sistemas LiDAR aerotransportados. Un sistema LiDAR aerotransportado típico se compone de un escáner láser, una unidad de alcance, unidades de control, seguimiento y registro; sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) y una unidad de medida inercial (IMU) (*Ilustración III.5.2*). Un sistema DGPS/IMU integrado también se denomina sistema de posición y orientación que genera información precisa de posición (longitud, latitud y altitud) y orientación (balanceo, cabeceo y rumbo). Los patrones de escaneo láser pueden ser en zigzag, paralelos o elípticos (*Ilustración III.9*). Con base en rangos y ángulos de escaneo, datos DGPS e IMU, datos de calibración y parámetros de montaje. Los puntos láser recolectados pueden procesarse y asignárseles coordenadas (x, y, z) en un sistema de coordenadas geográficas.



*Ilustración III. 9. Diagrama de los componentes de un sistema LiDAR típico*  
Fuente: Dong & Chen, 2018



### III.5.2. Precisión en un LiDAR

La precisión de LiDAR comúnmente se determina mediante la comparación estadística entre puntos conocidos y puntos láser medidos y generalmente se mide como la desviación estándar y el error cuadrático medio. Las metodologías para determinar y reportar la precisión vertical y horizontal de los datos LiDAR de retorno discreto deben seguir los estándares descritos en FGDC-STD-007 (Comité Federal de Datos Geográficos 1998) y NGS-58 (NOAA 1997). Para la superficie de tierra desnuda en pendientes bajas a moderadas, los datos LiDAR deben cumplir con un estándar de precisión mínimo de menos de 15 cm en vertical y 55 cm en horizontal. Las principales fuentes de errores de medición LiDAR incluyen a aquellos que son inducidos por láser, problemas con la unidad de navegación inercial (INU) para estimar posiciones GPS, problemas con la IMU para monitorear la dirección de puntería del láser, filtrado inducido. Los errores inducidos por láser normalmente son causados por el ruido y los cambios en la altura de los puntos en la superficie del terreno en un ángulo estrecho (como crestas y zanjas). Los errores de GPS/INU/IMU pueden ser causados por errores de inicialización y variaciones en las mediciones. Los errores de filtrado están relacionados con la eliminación incompleta o excesiva de puntos láser. Además, las lecturas falsas de algunas características del suelo, como cuerpos de agua, también pueden causar errores de medición LiDAR. Se pueden obtener precisiones verticales superiores a 15 cm cuando la altitud del sensor es inferior a 1200 m y de hasta 25 cm cuando la altitud del sensor está entre 1,200 y 2,500 m.



### III.5.3. Formato de los datos LiDAR

En la época inicial de la recopilación de datos LiDAR, muchas empresas usaban un sistema genérico de intercambio de archivos del Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información (ASCII, siglas en inglés). Se ha determinado que los archivos de intercambio ASCII tienen varios problemas importantes: (1) la lectura e interpretación de archivos puede ser muy lenta, incluso para pequeñas cantidades de datos LiDAR, (2) se pierde gran parte de la información útil y (3) el formato no es estándar. Para un mejor intercambio de datos de nubes de puntos LiDAR, la Sociedad Estadounidense de Fotogrametría y Detección Remota (ASPRS) introdujo un formato de archivo LASer binario secuencial (LAS) para contener LiDAR u otros registros de datos de nubes de puntos. Cada archivo LAS podría consistir en un bloque de encabezado, cualquier número de Registro Variable de Longitud (VLR), registros de datos de puntos. El bloque de encabezado almacena información de resumen básica como el número y el límite de los puntos. Los VLR almacenan información como proyección de mapas y otros metadatos. Cada registro de datos de puntos almacena información como las coordenadas (x, y, z), intensidad, número de retorno, número de retornos (de un pulso dado), dirección de escaneo, clasificación, tiempo de GPS, fuente puntual, etc. El número de retornos indica cuántos retornos se recibieron para un pulso de transmisión dado, mientras que el número de retorno indica si un punto es el primero, segundo o último retorno del pulso. Al integrarse una cámara digital con un sistema LiDAR, cada punto láser se puede vincular con un píxel de imagen en base a técnicas fotogramétricas. En ese caso, un registro de datos de puntos también podría almacenar los valores espectrales (en azul, verde, rojo e infrarrojo cercano) del píxel asociado. Dicha información espectral es muy útil para visualizar de manera realista los paisajes escaneados en tres dimensiones (*Ilustración III. 10*).



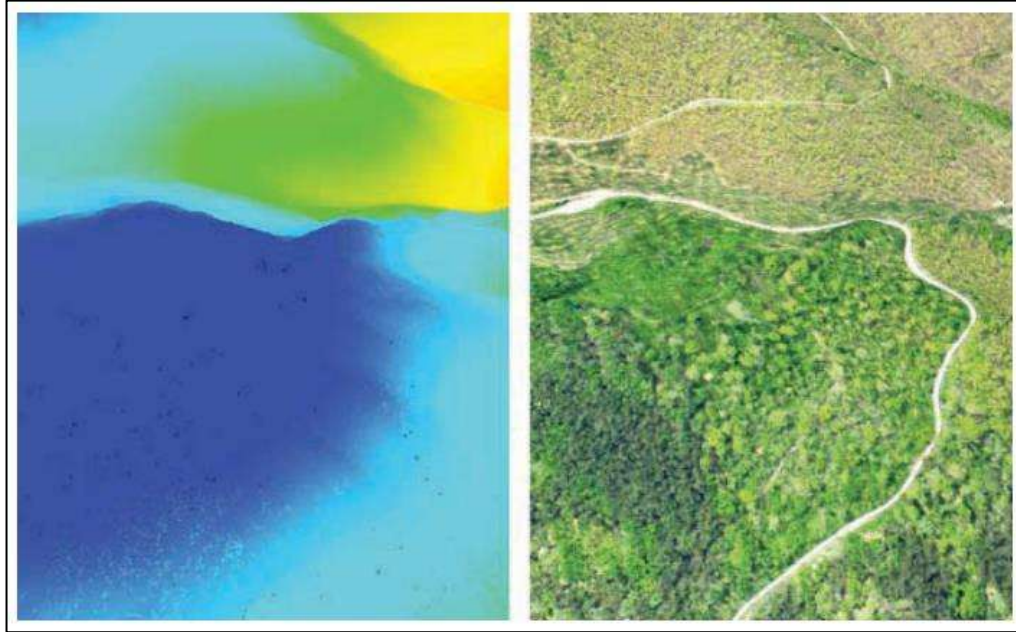


Ilustración III. 10. Puntos láser renderizados con base en (izquierda) Elevación Z y (derecha) valores espectrales RGB de una cámara  
Fuente: Dong & Chen, 2018

Valor de clasificación	Significado
0	Creado, nunca clasificado
1	Desclasificado
2	Suelo
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Edificio
7	Punto bajo (ruido)
8	Reservado
9	Agua
10	Carril
11	Superficie de un camino
12	Reservado
13	Alambre (protección)
14	Alambre (conductor)
15	Torre de transmisión
16	Conector de estructura
17	Cubierta de un puente
18	Ruido intenso
19-63	Reservado
64-255	Definible por el usuario

Tabla III. 2. Clases estándar para registro de datos de puntos  
Fuente: Dong & Chen, 2018



A pesar de la diversidad de formatos de datos para almacenar puntos láser en un archivo LAS, un atributo clave que debe tener cada registro es la clasificación del punto, que indica si el punto láser se devuelve desde el suelo, la vegetación, una edificación, un cuerpo de agua, etc. (*Tabla III.2*). Dicha tabla es un ejemplo de un esquema de clasificación estándar que se define para los formatos de registro de datos de puntos 6–10. Para un punto láser, la clase es probablemente la segunda información más importante, después de las coordenadas X, Y y Z del punto. Si los puntos láser no están clasificados (es decir, el valor de clase es 0 o 1), un conjunto de datos LiDAR se limita en gran medida a la visualización 3D de las nubes de puntos. Por el contrario, una nube de puntos clasificados permite a un analista realizar muchos análisis útiles, como la generación de modelos digitales del terreno (DTM) utilizando puntos clasificados como tierra desnuda (valor de clase de 2), el mapeo de vegetación utilizando puntos con valores de clase de 3 a 5 y extracción de la huella del edificio usando puntos con valor de clase de 6.

### III.6. WhiteBox Tools GAT (WBT)

Es un software desarrollado por la Universidad de Guelph, Canadá enfatizado en el análisis de datos digitales de elevación buscando dos metas principales: (a) proporcionar un entorno para el análisis avanzado de datos geoespaciales con aplicaciones en la investigación ambiental y en la industria de la geomática en general y (b) proporcionar una herramienta que se pueda utilizar para la educación basada en la geomática. Whitebox GAT se desarrolla utilizando una combinación de lenguajes de programación dirigidos al entorno de tiempo de ejecución de Java (JRE) incluidos Java, Groovy, Jython (la implementación de Python para Java) y Javascript. El software es multiplataforma y está dirigido a todos los principales sistemas operativos que ofrecen un JRE. Si bien muchas de las herramientas complementarias utilizadas para el análisis de datos se han desarrollado utilizando los lenguajes de secuencias de comandos admitidos de Groovy, Python y Javascript, los componentes principales de Whitebox GAT, incluida la interfaz de usuario, se desarrollan utilizando el lenguaje de programación Java. Una encuesta de uso mostró que Whitebox GAT se descargó 14,932 veces desde el 1 de enero de 2014, con una tasa de descarga reciente promedio de 840 por mes. Las descargas del software se originaron en 150 países de

todo el mundo con los diez países principales, que representan casi el 59 % de las descargas, incluidos Estados Unidos, Canadá, Italia, Reino Unido, India, Alemania, Australia, España, Francia y Brasil.

Otra característica importante es la filosofía única de desarrollo de acceso abierto adoptada por el proyecto Whitebox GAT, que se presta a experimentar con el desarrollo de algoritmos geoespaciales. El software de acceso abierto puede verse como una extensión complementaria del modelo tradicional de desarrollo de software de código abierto (OSS). El concepto de acceso abierto se definió previamente en el contexto de la publicación de literatura académica de una manera que elimina las barreras de acceso financieras, legales y técnicas para la transferencia de conocimiento.

### III.6.1. Herramientas *D8 Pointer* y *D8 Flow Accumulation*

Ambas herramientas se basan en la teoría desarrollada por (O'Callaghan, 1984) que consiste en definir las direcciones del flujo tomando en cuenta la elevación Z de cada pixel analizando las elevaciones menores de las celdas vecinas y asignándoles una codificación numérica (*Ilustración III.11*). Si una celda es más baja que sus vecinas, a esa celda se le asigna el valor de su vecina más baja y el flujo se define hacia esta celda. Si varias vecinas poseen el valor más bajo, a la celda se le otorga este valor igualmente. Ahora bien, si una celda posee el mismo cambio en el valor Z en varias direcciones y esa misma celda es parte de un sumidero, la dirección de flujo se conoce como indefinida. En tales casos, el valor de esa celda en el ráster de dirección de flujo de salida será la suma de esas direcciones. Por ejemplo, si el cambio en el valor Z es el mismo hacia la derecha (dirección de flujo = 1) y hacia abajo (dirección de flujo = 4), la dirección de flujo de esa celda es  $1 + 4 = 5$ .

32	64	128
16		1
8	4	2

*Ilustración III.11. Esquema de codificación de pixeles*

*Fuente: ArcGIS Pro Web, 2018*



La herramienta *D8Pointer* se utiliza para generar una cuadrícula de punteros o indicadores de flujo con base en un Modelo Digital de Elevación (MDE) que se haya corregido hidrológicamente y la salida ráster de dirección de drenaje local de esta herramienta sirve como entrada necesaria para varias otras herramientas de análisis de red de escurrimientos superficiales e hidrología espacial. Los punteros de flujo D8 utilizan la siguiente convención de índice numérico de base 2 en el sentido de las agujas del reloj:

<b>64</b>	<b>128</b>	<b>1</b>
<b>32</b>	0	2
<b>16</b>	8	4

Tabla III. 3. Convención de índices numéricos para la dirección del flujo  
Fuente: O'Callaghan & Mark, 1984

Se observa que a las celdas de cuadrícula que no tienen vecinos inferiores se les asigna una dirección de flujo igual a cero. En un MDE que ha sido preprocesado para eliminar todas las depresiones y áreas planas, esta condición solo ocurrirá a lo largo de los bordes de la cuadrícula.

De manera similar, la herramienta *D8FlowAccumulation* se usa para generar una cuadrícula de acumulación de flujo (es decir, un área de captación). Este algoritmo es un ejemplo del método de dirección de flujo único (SFD) porque el flujo que ingresa a cada celda de la cuadrícula se enruta solo a un vecino pendiente abajo, es decir, no se permite la divergencia de flujo. La acumulación de flujo de salida puede ser: 1) *cells* (es decir, el número de celdas de cuadrícula entrantes), 2) *catchment area* (es decir, el área de pendiente ascendente) o 3) *specific contributing area* (el área de captación dividida por el ancho del flujo). El tipo predeterminado de salida es *cells*.



### III.6.2. Herramienta *Extract Streams*

Esta herramienta se utiliza para extraer o mapear las celdas de flujo probables de una imagen de acumulación de flujo de entrada. El algoritmo aplica un umbral de canalización a la imagen de acumulación de flujo de entrada de modo que se considera que las corrientes son todas las celdas de cuadrícula con valores de acumulación mayores que el umbral especificado. Como tal, este umbral representa el área mínima (el área se usa aquí como sustituto de la descarga) requerida para *iniciar y mantener un canal*. Los valores de umbral más pequeños dan como resultado redes de flujo más extensas y viceversa. Desafortunadamente, hay muy poca orientación con respecto a un método apropiado para determinar el umbral del área de iniciación del canal. Con frecuencia se determina examinando mapas o datos de imágenes o experimentando hasta que se identifica una red de canales adecuada o deseable. Debe tenerse en cuenta que el valor del umbral será único para cada paisaje y conjunto de datos (incluida la fuente y la resolución de la cuadrícula), lo que complica aún más su valor. También hay evidencia de que en algunos paisajes el umbral es una función combinada de área de pendiente ascendente. Generalmente, un umbral más bajo es apropiado en climas húmedos y un umbral más alto es apropiado en áreas sustentadas por un lecho rocoso más resistente. El clima y la resistencia del lecho rocoso son dos factores relacionados con la densidad del drenaje, es decir, la medida en que los canales de drenaje diseccionan un paisaje.

### III.6.3. Herramienta *Jenson Snap Pour Points*

Esta herramienta se utiliza para mover la ubicación de los puntos de salida del conjunto vectorial (es decir, las salidas utilizadas en una delimitación de una microcuenca hidrográfica) a la ubicación que coincida con el valor de celda de flujo más cercano dentro de una distancia máxima especificada.. Cuando la salida de la herramienta *JensonSnapPourPoints* se utiliza junto con la herramienta de delimitación, el ráster de corrientes debe generarse extrayendo las corrientes mediante el algoritmo D8FlowAccumulation. También se debe especificar la distancia de captura, medida en unidades de mapa (por ejemplo, metros). Esta distancia servirá como el radio de búsqueda ubicado alrededor de cada punto de fluidez durante la búsqueda de la celda de flujo más cercana.



Lindsay et al. (2008) brindan una discusión detallada de la técnica *Jenson Snap Pour Points* y algunas otras técnicas menos sofisticadas pero comúnmente utilizadas (*SnapPourPoints*) para ajustar las ubicaciones de los puntos de fluidez que se usan en las operaciones de delimitación de cuencas hidrográficas. En la mayoría de los casos, se recomienda preferir la herramienta *JensonSnapPourPoints* a *SnapPourPoints* debido a que el método de *Jenson* reubica los puntos de salida a la celda de corriente más cercana, mientras que *SnapPourPoints* reubica las salidas al celda de flujo más grande (corriente designada por el mayor valor de acumulación de flujo). En la situación común en la que las celdas de salida se colocan cerca del punto de confluencia de las corrientes tributarias más pequeñas, la herramienta *SnapPourPoints* puede reubicar las salidas en la corriente del tronco principal, lo que resultará en una delineación incorrecta de la cuenca de las subcuencas.

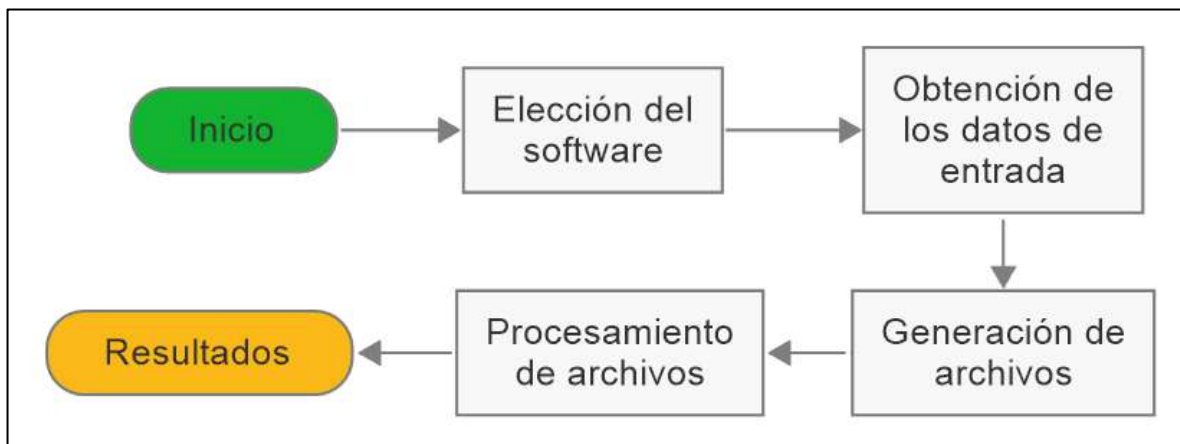


# Capítulo IV.

## Metodología

## Capítulo IV. Metodología

Este capítulo describe las etapas del desarrollo del proceso que se realizó para fundamentar la investigación y alcanzar los objetivos de la propuesta de solución que se están persiguiendo. La metodología está compuesta por 4 partes principales: 1) la elección de los paquetes del software necesarios para ejecutar los procesos, 2) la obtención de los datos de entrada, 3) la generación de archivos y 4) el procesamiento de los mismos para producir resultados (*Ilustración IV.1*).



*Ilustración VI.1. Diagrama de flujo de la metodología*

### IV.1 Software requerido

Este apartado describe el software empleado en la metodología y el proceso de instalación. Así como una breve explicación de su funcionamiento y una descripción de los componentes de su interfaz.

#### IV.1.1. WhiteboxTools GAT (WBT)

Como se mencionó en el apartado III.6, WBT es un software enfatizado en el análisis de datos digitales de elevación que proporciona un entorno para el análisis avanzado de datos geospaciales desarrollado en Python. Dentro del ámbito de la información geoespacial *Woodrow (2016)*, *Lidberg (2017)* y *Wu (2019)* han utilizado las herramientas de *WBT* disponibles para desarrollar sus trabajos y aunque es un software disponible en el mercado bajo un costo de licencia, los desarrolladores han puesto a disposición gratuita una interfaz gráfica de usuario (*GUI, Graphic User*



*Interface*) que contiene los códigos de todas las herramientas contenidas. La única desventaja es que no pueden visualizarse los resultados, no obstante, los archivos resultantes mantienen formatos comunes que pueden visualizarse en otros SIG.

Esta GUI puede descargarse desde el sitio web oficial de *Whitebox Geospatial Inc*<sup>1</sup> mediante una carpeta comprimida que contiene el archivo *wb\_runner.py* (Ilustración IV.2) capaz de desplegar la GUI. Adicionalmente, para poder ejecutarlo es necesario instalar en el equipo dos aplicaciones complementarias: a) Python 3.10 para Windows disponible en la Microsoft Store de forma gratuita con instalación automática (Ilustración IV.3) y b) *Microsoft Build Tools 2015* cuya función es proporcionar las herramientas básicas para la compilación de aplicaciones administradas en el sistema y puede descargarse directamente de la página de Microsoft<sup>2</sup> y requiere una instalación manual ejecutando como administrador el archivo *BuildTools\_Full.exe* (Ilustración IV.4).

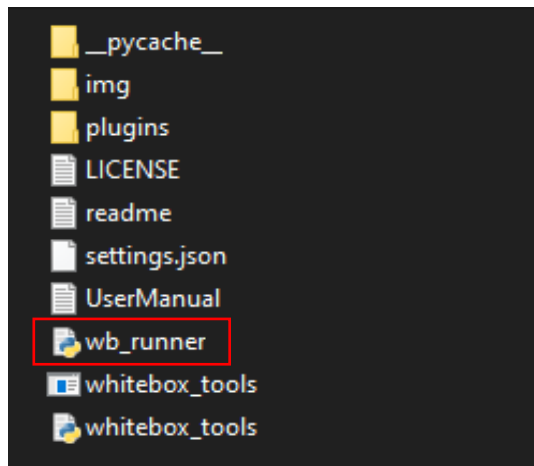


Ilustración IV. 2. Contenido de la carpeta comprimida descargada del sitio *Whitebox Geospatial Inc*.



Ilustración IV.3. Ventana de la Microsoft Store mostrando la aplicación *Python*

<sup>1</sup> <https://www.whiteboxgeo.com/>

<sup>2</sup> <https://www.microsoft.com/es-ES/download/details.aspx?id=48159>

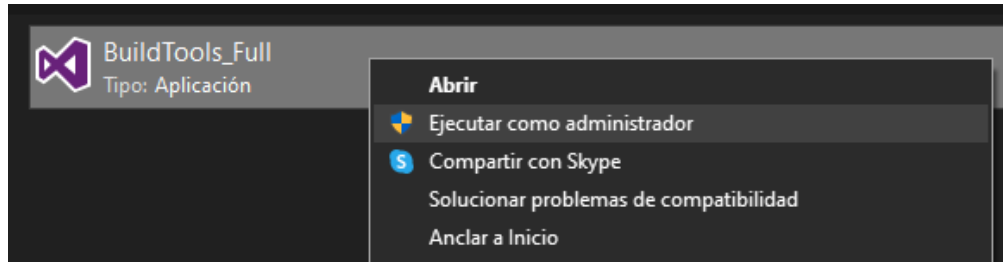


Ilustración IV.4. Ventana de instalación del complemento BuildTools

Una vez descargado e instalado lo anterior, el archivo `wb_runner.py` debe ejecutarse en la ventana del Símbolo del Sistema del equipo únicamente arrastrándolo y presionando la tecla ENTER y enseguida se desplegará la GUI (Ilustración IV.5). Todos los directorios de trabajo se almacenarán de manera local lo que representa una ventaja ante ejecutarlo en los sitios virtuales de Python donde se produjeron varios errores en la definición de esos directorios.

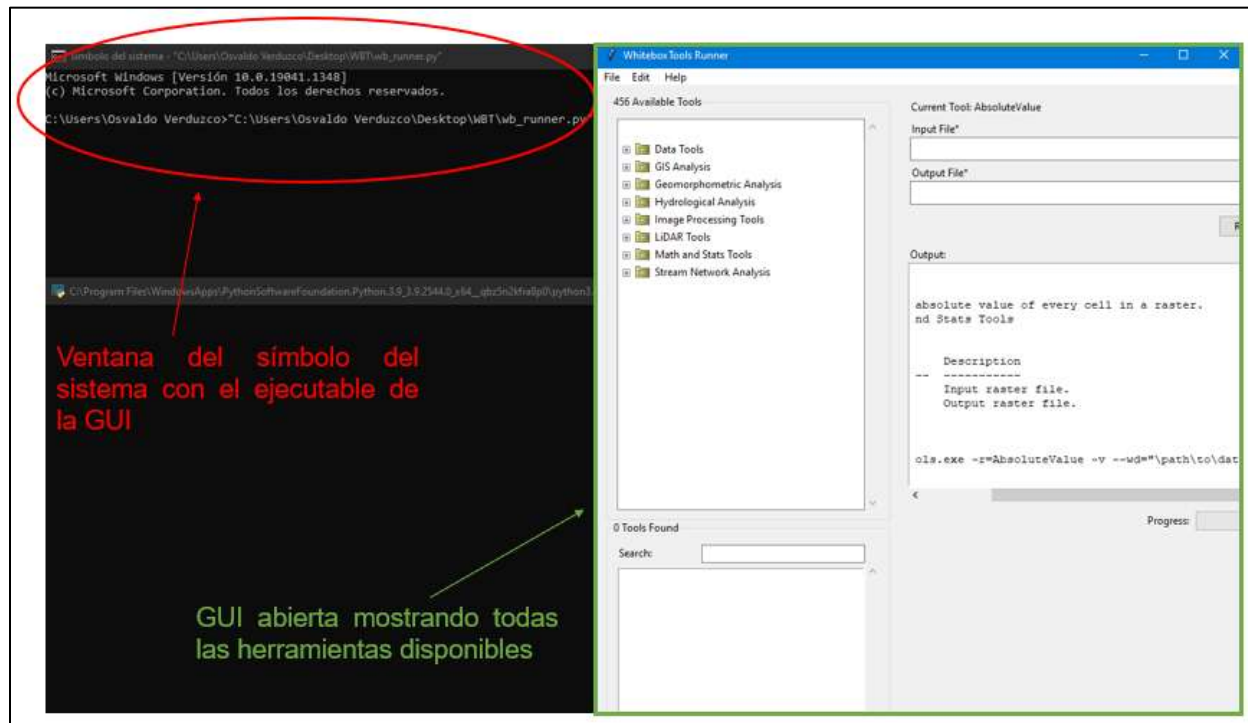


Ilustración IV.5. Ventana del Símbolo del Sistema y de la WBT GUI

La GUI cuenta con áreas bien delimitadas que permiten un claro entendimiento de las 485 herramientas disponibles que se encuentran divididas en grupos principales de acuerdo a su uso, estos grupos son: *Data Tools*, *GIS Analysis*, *Geomorphometric Analysis*, *Hydrological Analysis*, *Image Processing Tools*, *LiDAR Tools*, *Math and Stats Tools* y *Stream Network Analysis*. Para cualquier herramienta que se desee usar, ésta se busca en el índice desplegable o también por alguna palabra clave y posible leer la descripción del código de cada herramienta. Aunque todas las herramientas son distintas el uso de la GUI es el mismo, es decir, en cualquier proceso se tiene que introducir un dato de entrada para generar los datos resultantes mediante la definición de parámetros según se requiera y de la ruta donde éstos se guardarán. La *Ilustración IV.6* muestra la distribución de la GUI.

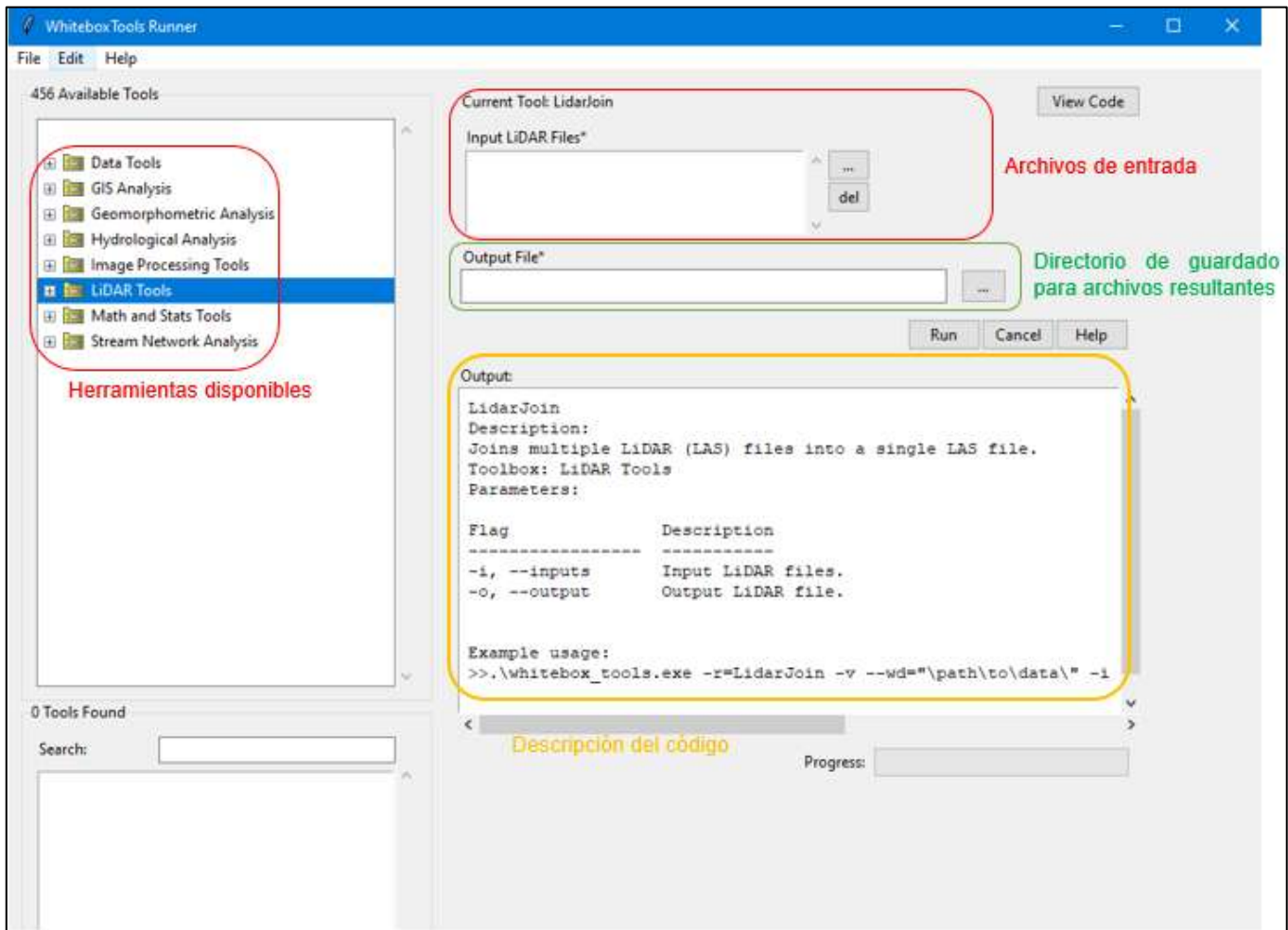


Ilustración IV.6. Descripción de la GUI

## IV.2 Obtención de datos de elevaciones LiDAR

Se comienza con la obtención de una base de datos de puntos LiDAR en formato .LAS o .LAZ y debido a que son conjuntos pesados, es común que la nube de puntos se encuentre dividida en sectores de cierta extensión, es decir, que la zona de interés está conformada por mosaicos de puntos por lo que deben visualizarse para identificar los mosaicos que conforman la zona de interés y seleccionarlos. Aunque hay muchos SIG que pueden visualizar LiDAR tales como *FugroViewer*<sup>3</sup> y *LASTools*<sup>4</sup> resultó más viable utilizar *GlobalMapper* debido a su mayor accesibilidad y diversidad de herramientas espaciales. A través de *GlobalMapper* se visualizan todos los mosaicos contenidos en la base de datos y con apoyo del eje de trazo del camino en formato vectorial .shp deben seleccionarse aquellos que representen las elevaciones del terreno correspondientes. Esto se logra cargando los mosaicos al panel general del GlobalMapper mediante el apartado *Open data files* de la ventana de inicio (*Ilustración IV.7*).

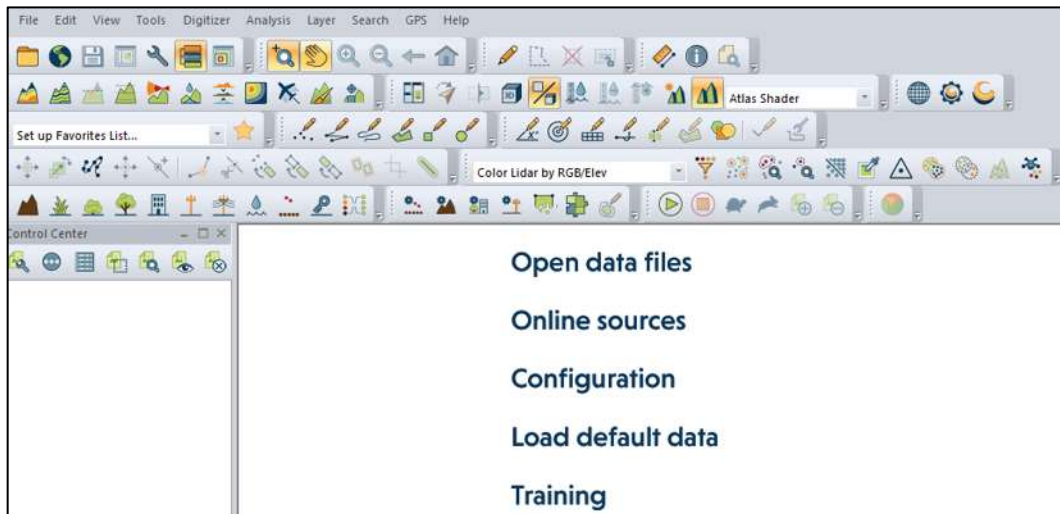
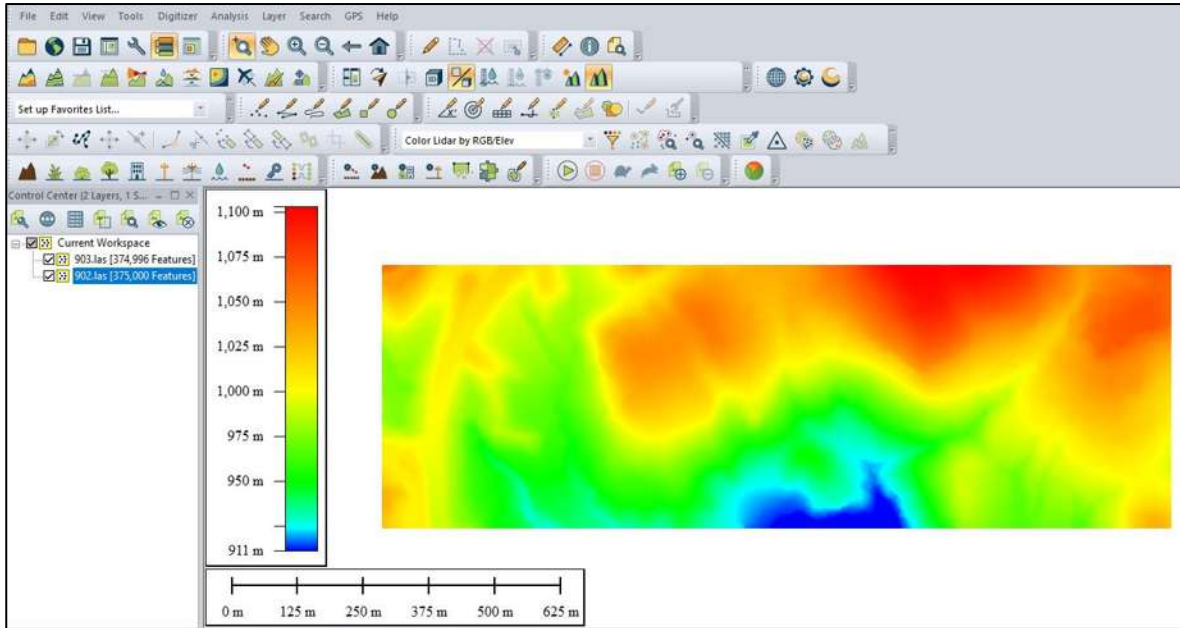


Ilustración IV.7. Ventana de inicio de Global Mapper

<sup>3</sup> <https://www.fugro.com/>

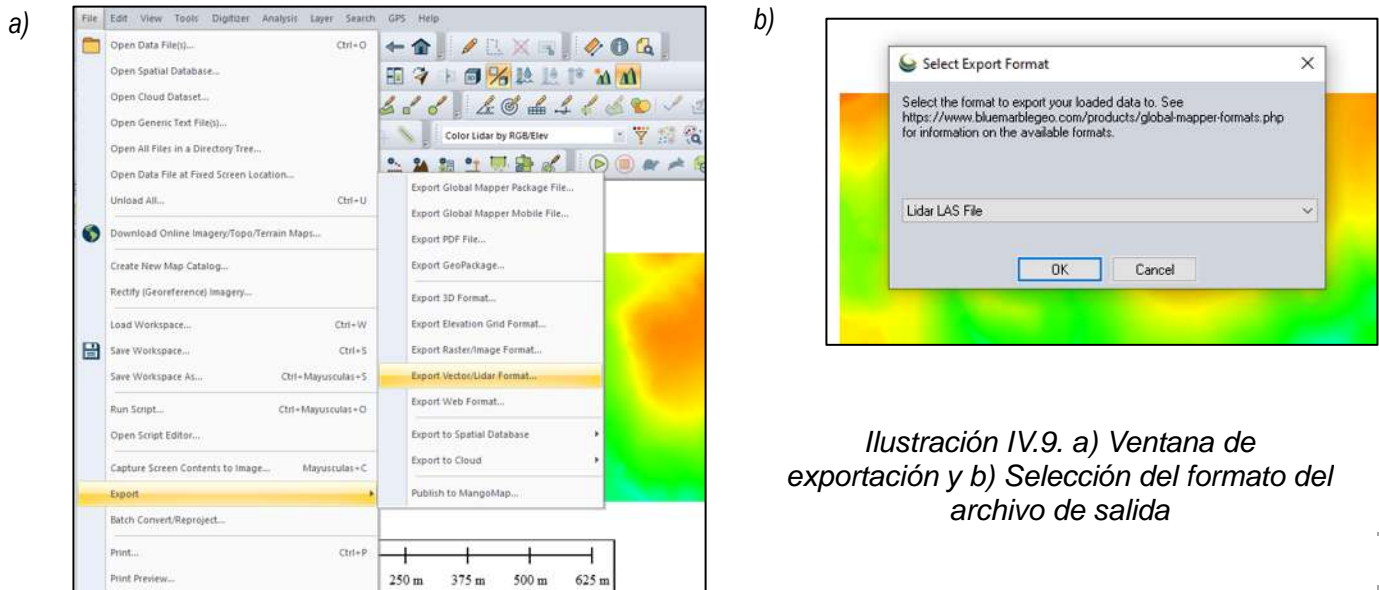
<sup>4</sup> <https://rapidlasso.com/lastools/>

Para generar un MDE es necesario que la nube de puntos se encuentre en un archivo único así que una vez que los mosaicos han sido visualizados y seleccionados (*Ilustración IV.8*) deben exportarse a un nuevo archivo .LAS en el que se unirán.



*Ilustración IV.8. Visualización de los mosaicos de interés en Global Mapper*

La unión se alcanza empleando la herramienta *Export Vector/Lidar Format* del apartado *Export* de la pestaña *File* de la interfaz. Una vez seleccionada la herramienta se desplegará una ventana para definir el formato del archivo vectorial resultante y debe seleccionarse *Lidar LAS File* y presionar OK y dejar los parámetros por default (*Ilustración IV.9. a) y b)*)



*Ilustración IV.9. a) Ventana de exportación y b) Selección del formato del archivo de salida*

### IV.3 Generación de datos

En este apartado se generan los archivos que forman la base de la metodología para obtener resultados tales como el Modelo Digital de Elevación de 0.5 m de resolución, así como los ráster que simulan la acumulación de los flujos de agua.

#### IV.3.1 Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

La nube de puntos LiDAR obtenida en el apartado IV.2 es la entrada para generar el MDE base para la toda la simulación y extracción hidrológica. En el apartado *LiDAR Tools* de la ventana *WhiteBox* se emplea la herramienta *Lidar IDW Interpolation* cuyo proceso es el interpolar los puntos de elevaciones y así generar una superficie de elevaciones en formato ráster resultando un MDE. En la ventana desplegada de la herramienta es necesario especificar la ruta de guardado del archivo resultante, así como la resolución del mismo que es el parámetro más importante y debe presionarse *Run* (Ilustración IV.10).

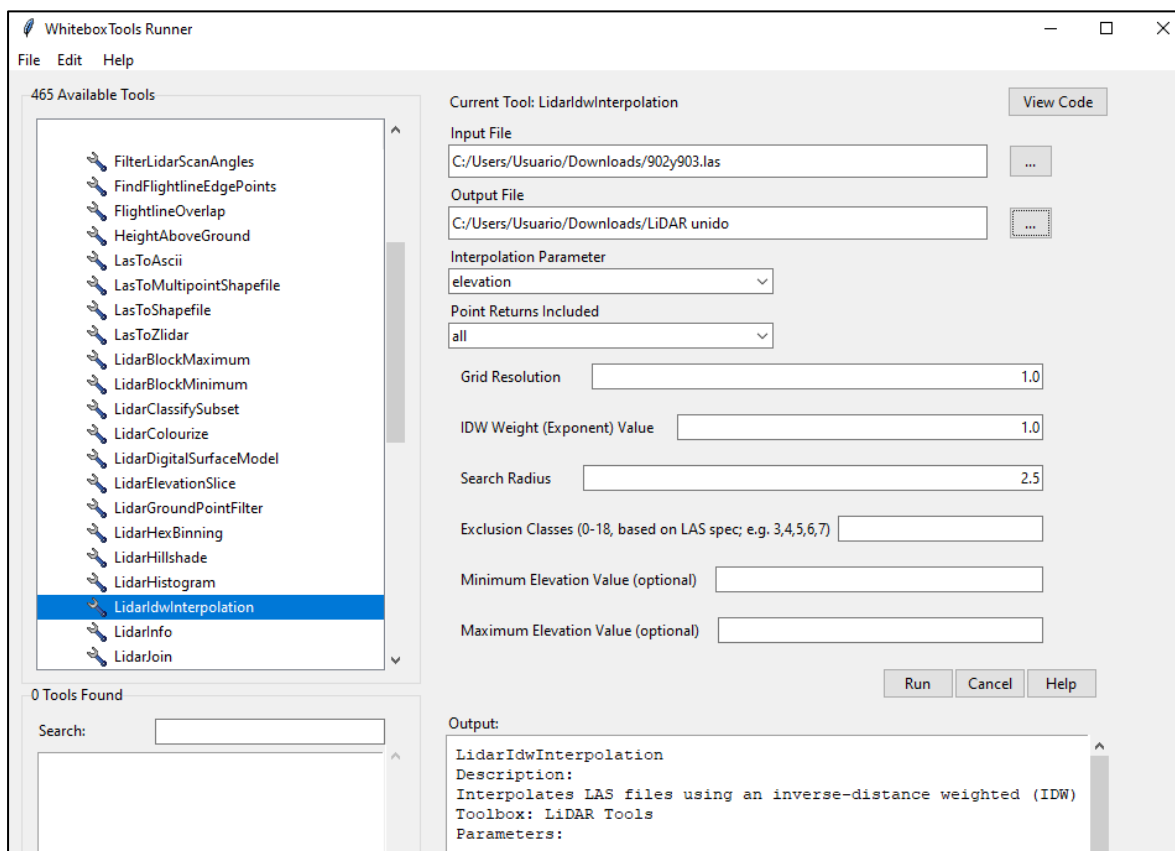
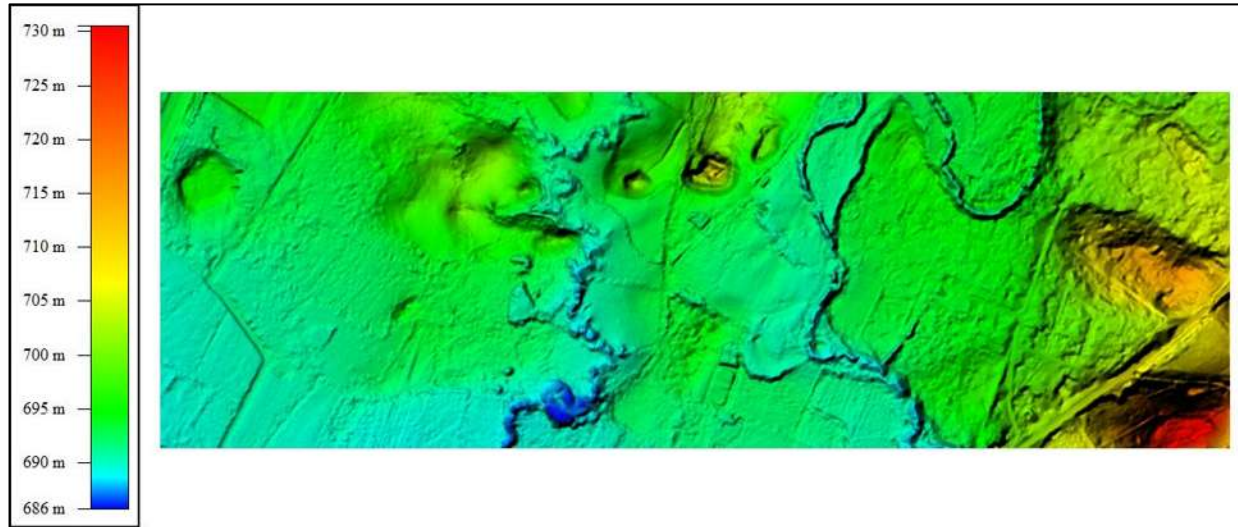


Ilustración IV.10. Ventana de la WBT GUI de la herramienta *LidarIdwInterpolation*

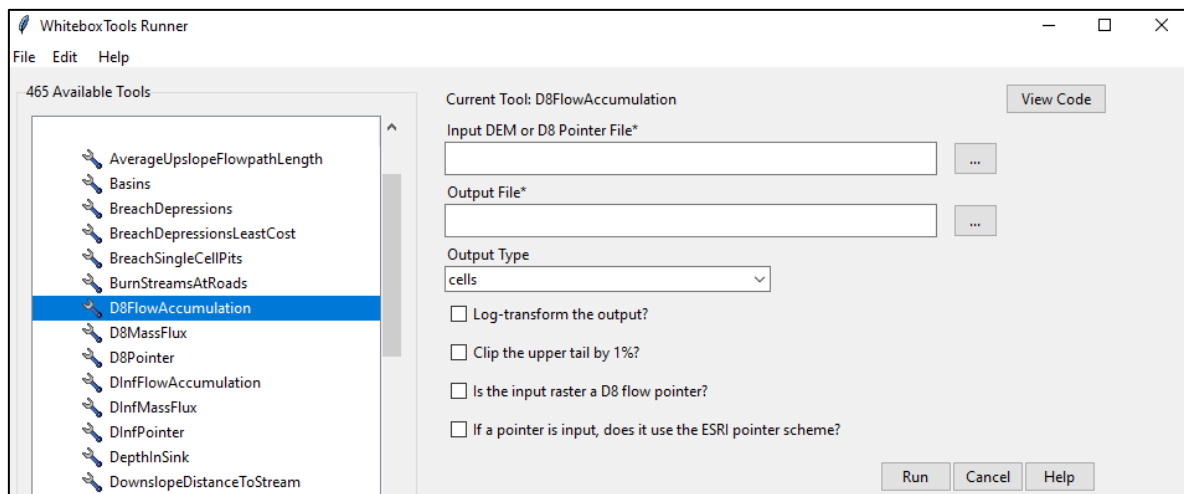
El resultado es un MDE de resolución especificada por el usuario de gran resolución (*Ilustración IV.11*).



*Ilustración IV.11. MDE de alta resolución*

### IV.3.2 Rásters de flujo

La simulación del flujo superficial es una serie de pasos mediante 3 herramientas del apartado *Hydrological Analysis* en el que se generan 3 archivos ráster que representan las direcciones en que el agua circula sobre la superficie; éstos son el *D8 Pointer*, *D8 Flow Accumulation* y *Streams Network*. Para generarlos se toma como dato de entrada el MDE generado y corregido y deben especificarse las rutas de guardado de los archivos resultantes (*Ilustración IV.12*).



*Ilustración IV.12. Herramientas de la simulación del flujo D8 Pointer y D8 Flow Accumulation en la WBT GUI*

#### IV.4 Procesamiento de datos

Los archivos generados del apartado IV.3 se someten a una serie de procesos para evaluar sus resultados con el propósito de lograr el objetivo de la metodología.

##### IV.4.1. Corrección del MDE

Se formuló la teoría de que un algoritmo por sí mismo no tiene el desempeño suficiente por lo que se lleva a cabo un proceso de corrección en el que se evalúa el contenido de vacíos que son detectados con la herramienta *Sinks* de *WBT*. La evaluación consiste en analizar la disminución del porcentaje de vacíos contenidos en el MDE. Esto se logra convirtiendo los pixeles vacíos a formato *.shp*, midiendo sus áreas de cobertura y comparando su suma con el área total de cobertura del MDE. El porcentaje de vacíos (*e*) debe ser igual a cero para corregir por completo el MDE.

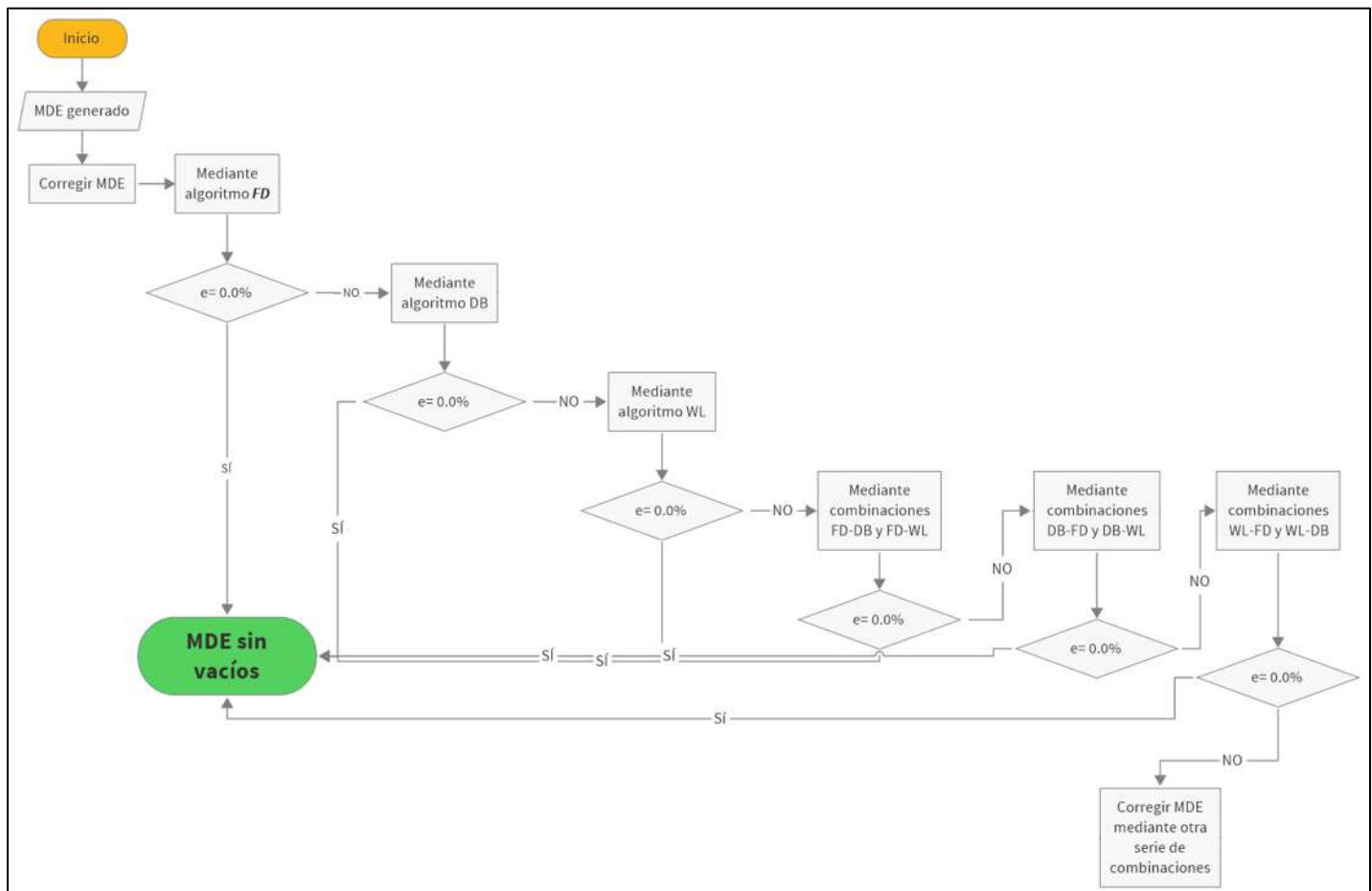


Ilustración IV.13. Diagrama de flujo del proceso de corrección

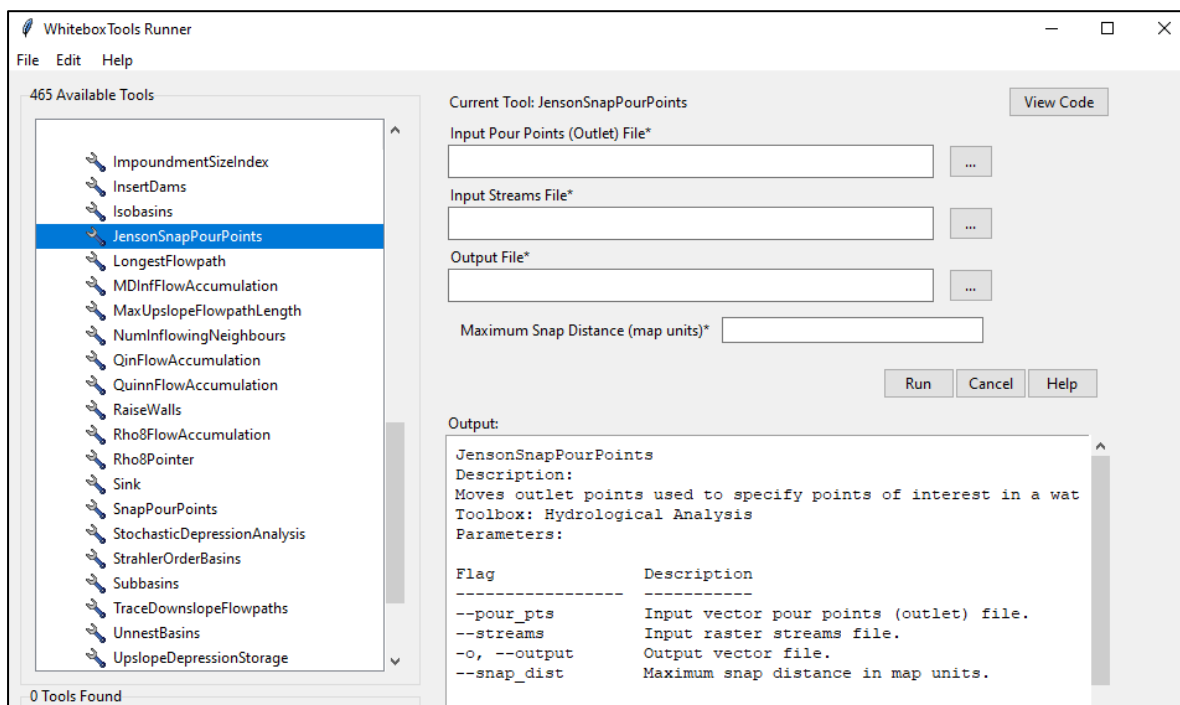


La *Ilustración IV.13* muestra el proceso de la corrección en un contexto de decisiones en el que si no se tiene el resultado esperado se analiza la siguiente opción hasta evaluar todas las combinaciones con el propósito de evaluar diferentes opciones y obtener el desempeño más favorable que se representa como un MDE sin vacíos.

A través de WBT es posible aplicar los algoritmos de corrección empleados comúnmente como lo son *Fill Depressions*, *Depression Breaching* y *Wang&Liu* y evaluar el MDE resultante.

#### IV.4.2. Ajuste de los puntos de salida

Para asegurar la correcta delimitación de las microcuencas, sus respectivos puntos de salida deben estar ubicados sobre un pixel en el que se encuentre reconocida la acumulación del flujo por lo que se recomienda reubicar dichos puntos de salida con base en el ráster de acumulación del flujo, técnica estudiada por (Lindsay et al., 2008). Esto se lleva a cabo con la herramienta *Jenson Snap Pour Points* del apartado *Hydrological Analysis* en el cual los datos de entrada son: un archivo .shp que contenga los puntos de salida que delimitan las microcuencas de drenado, un archivo .ras de la red de corrientes y un radio de búsqueda y movimiento (*Ilustración IV.14*).



*Ilustración IV.14. Herramienta Jenson Snap Pour Points y sus componentes en la WBT GUI*

#### IV.4.3. Delimitación de microcuencas

Esta es la etapa final de la metodología y las entradas necesarias son: los archivos .ras de la simulación del flujo y los puntos de salida identificados como obras menores de drenaje en formato .shp con su localización ajustada. Las microcuencas se delimitan con la herramienta *Watershed* del apartado *Hydrological Analysis* produciendo un conjunto de elementos resultantes en formato .ras (*Ilustración IV.15*).

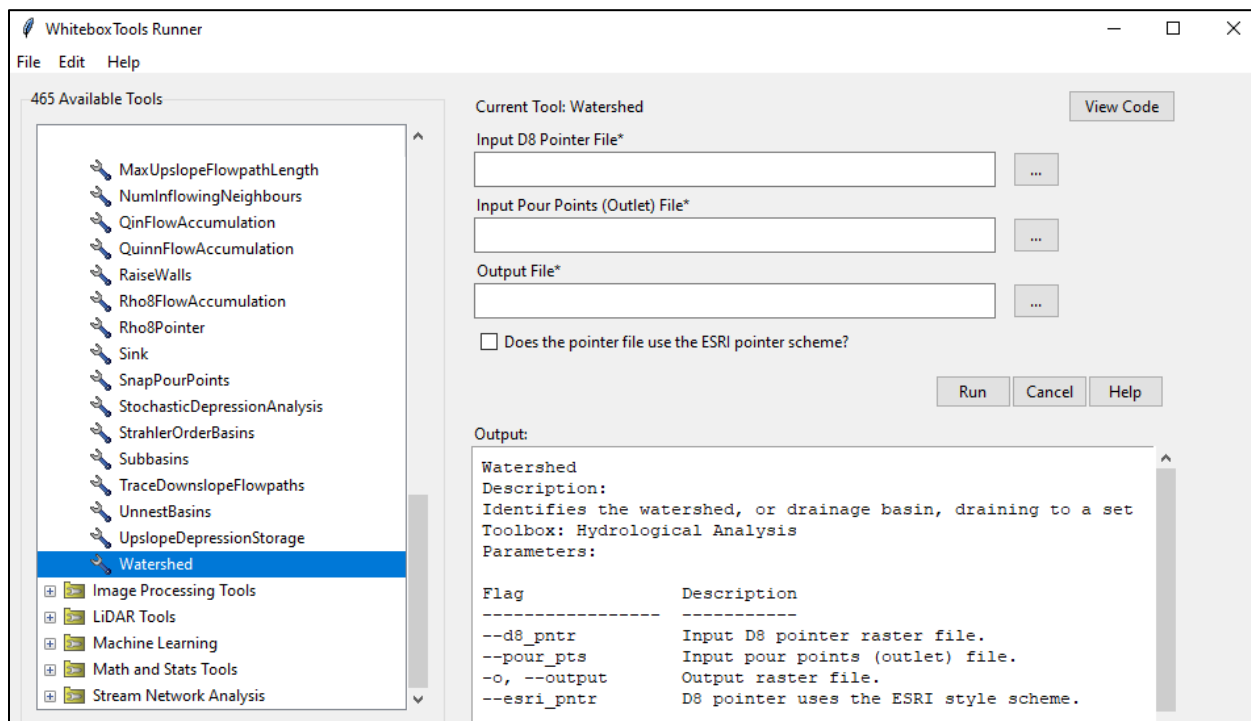
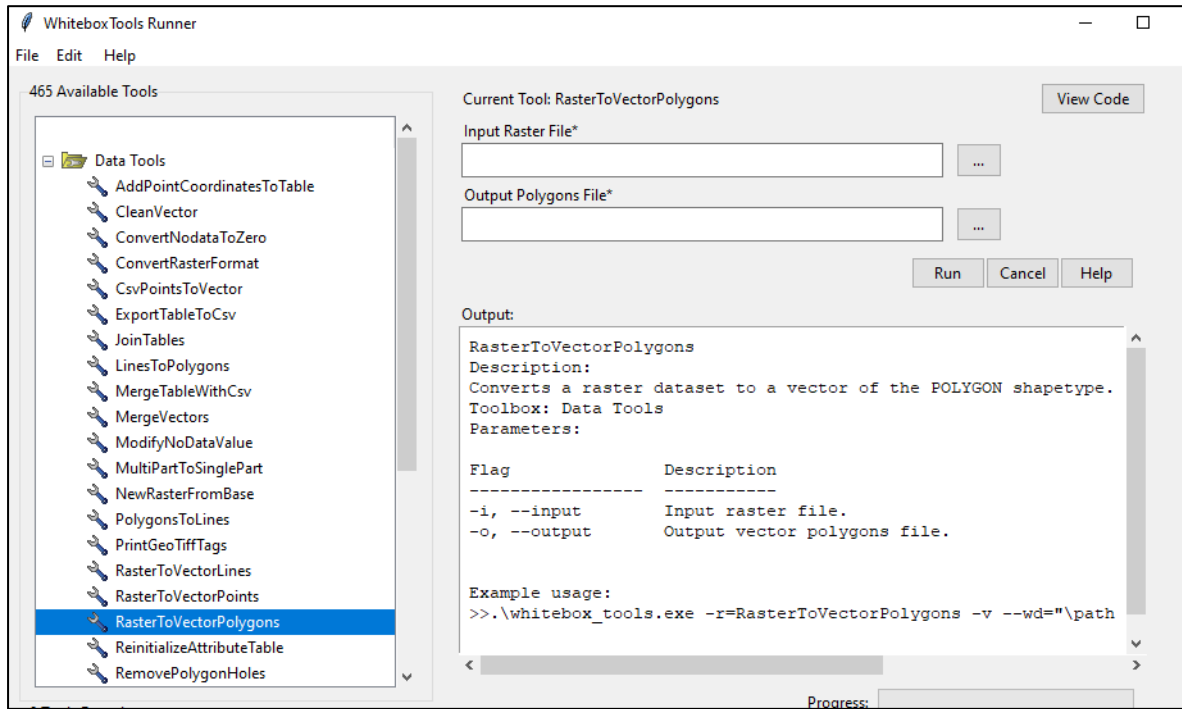


Ilustración IV.15. Herramienta Watershed y sus componentes en la WBT GUI

Ahora bien, debido al formato ráster, los elementos no pueden ser manipulables por lo que es necesaria su conversión a formato vectorial .shp para que sea posible la medición de sus áreas así como también exportarlas a otros formatos comunes como .dwg (AutoCAD) o .kmz (Google Earth). En el apartado *Data Tools* existe la herramienta *Raster to Vector Polygons* para llevarlo a cabo (*Ilustración IV.16*).



*Ilustración IV.16. Herramienta Raster to Vector Polygons y sus componentes en la WBT GUI*



# Capítulo V.

## Análisis de Resultados

## Capítulo V. Análisis de Resultados

Se describe el análisis a profundidad de los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta en un caso de estudio. Los resultados mostrados fueron obtenidos de la aplicación de la metodología para el análisis de microcuencas presentada en el Capítulo IV.

### V.1. Caso de estudio

Los resultados se obtuvieron con base en la experimentación sobre un tramo de estudio perteneciente a la carretera federal de cuota número 95 que conecta la Ciudad de México con el puerto de Acapulco, Guerrero a través de 367 km clasificada como una Tipo A4 y A4S con ancho de corona de 10.50 m, ancho de calzada de 7.00 m y acotamientos de 2.50 m 1.00 m en el interior. Se abarcaron 10 km de longitud desde el cadenamiento 278+000 en el límite de la zona urbana de Chilpancingo, Gro. hasta el cadenamiento 288+000 donde ya hay varias obras de drenaje existentes. La *Ilustración*

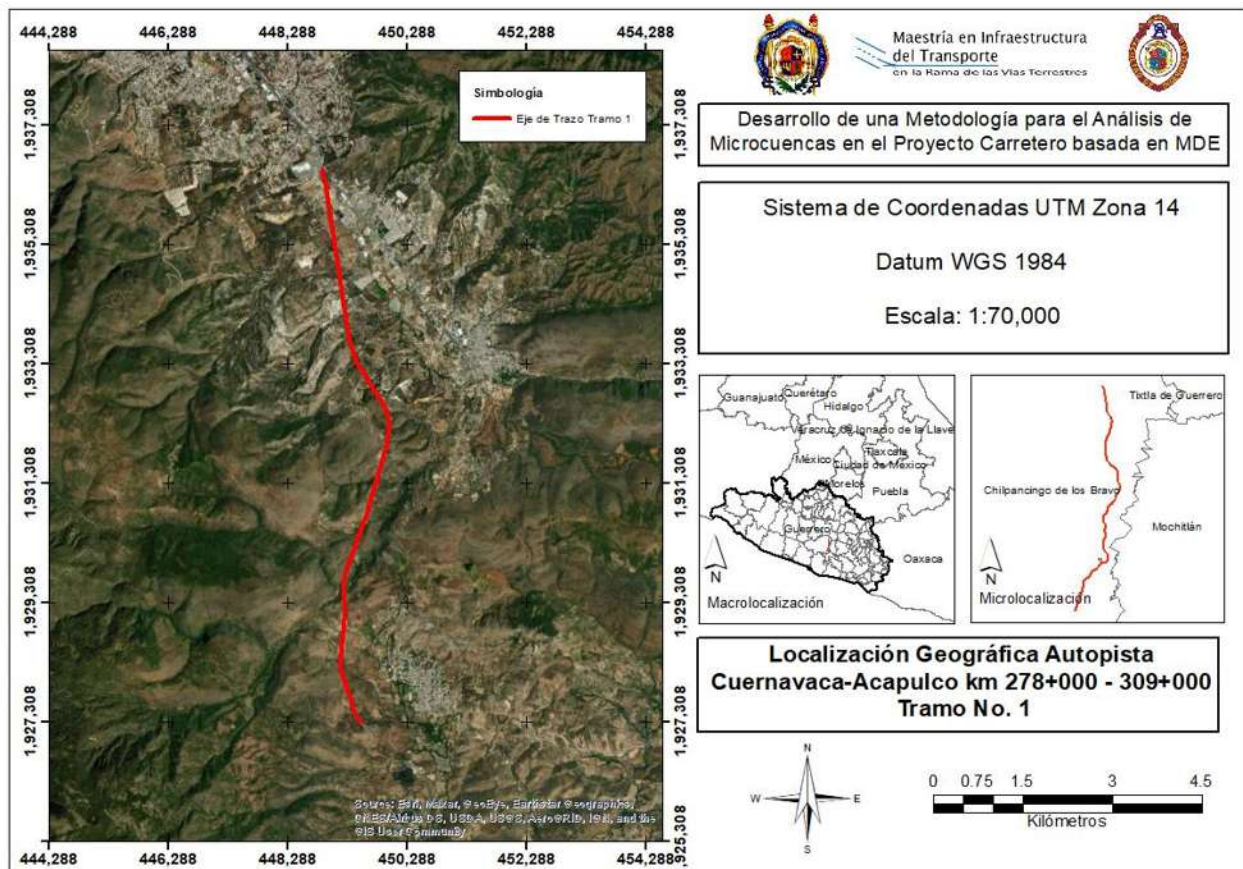
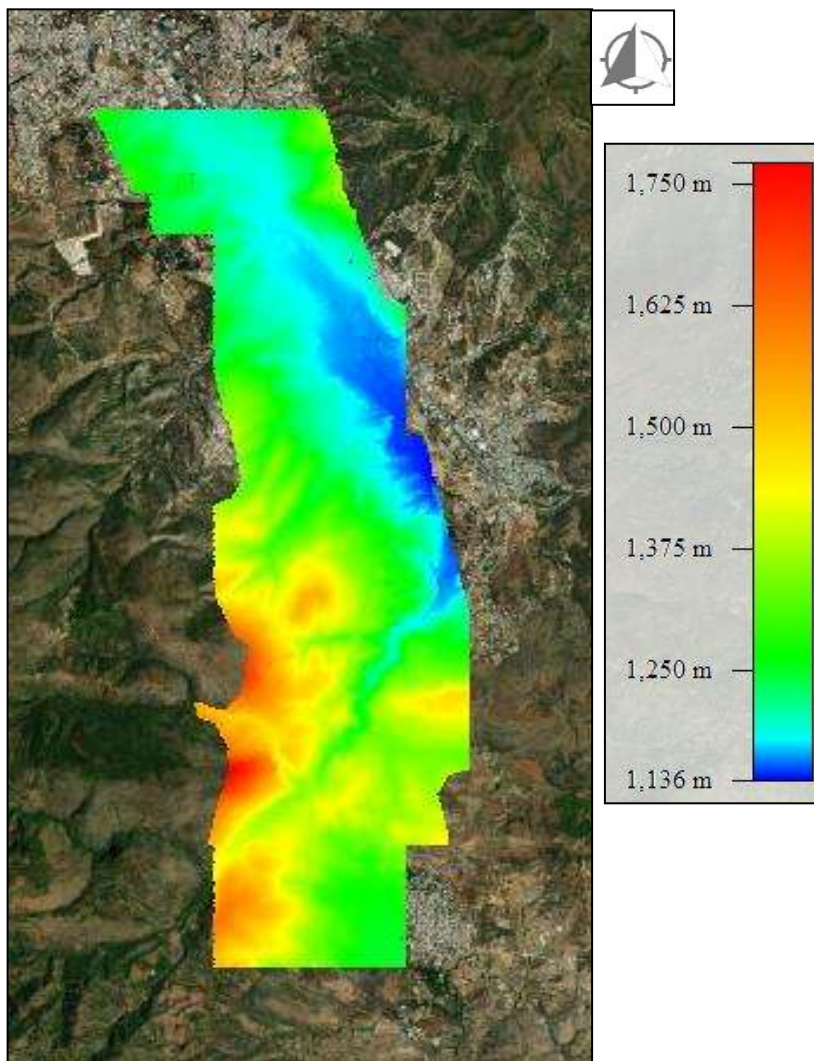


Ilustración V.1. Localización geográfica del tramo de estudio

## V.2. Obtención de datos: Nube de puntos LiDAR

En 2014, *Ágil Soporte y Soluciones S.A. de C.V.* fue contratada por CAPUFE (Caminos y Puentes Federales) con el propósito de hacer un estudio de cortes y terraplenes así como un estudio hidrológico enfocado al diseño del pavimento de la carretera Cuernavaca-Acapulco e implementaron la fotogrametría para levantar topográficamente la zona de estudio. Dicha fotogrametría se realizó mediante un plan de vuelo que siguió 128 líneas recorriendo un total de 833 millas variando la altura sobre el nivel del mar pero manteniendo una altitud media de 6,352 pies a una velocidad media de 150 nudos. Después de un proceso de filtrado de información se colectó una nube de puntos LiDAR distribuida en mosaicos en formato .LAS. El tramo de estudio está cubierto por 79 mosaicos compuestos de 375,000 puntos cada uno lo que representa una densidad de 0.9 puntos/m<sup>2</sup>. La *Ilustración V.2* muestra la vista satelital de la nube de puntos con su respectiva barra de elevaciones.



*Ilustración V.2. Vista satelital de la nube de puntos del tramo de estudio*

### V.3. Generación de datos: Modelo Digital de Elevación (MDE)

Con base en las instrucciones del apartado IV.3.1. de la metodología se generó un MDE con resolución de 0.5 m con una extensión superficial de 28.88 km<sup>2</sup>. La ilustración V.3 muestra el MDE generado en la *WhiteBoxTools GUI*.

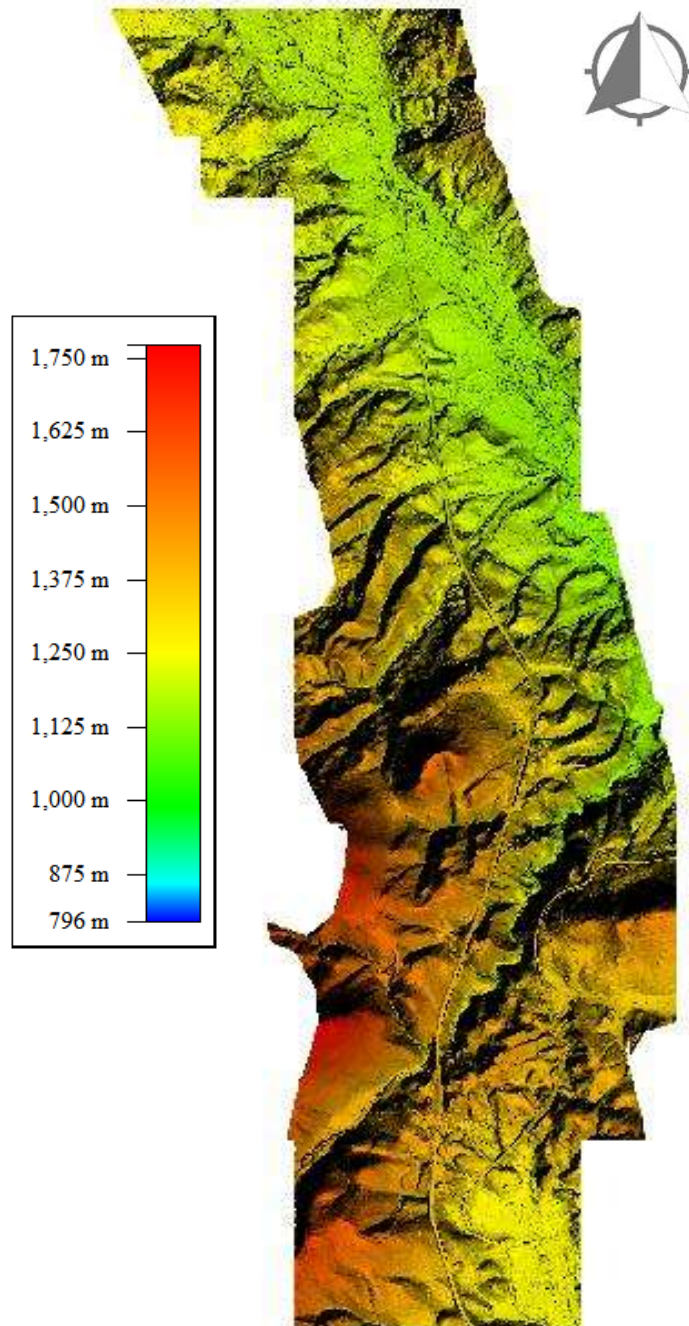


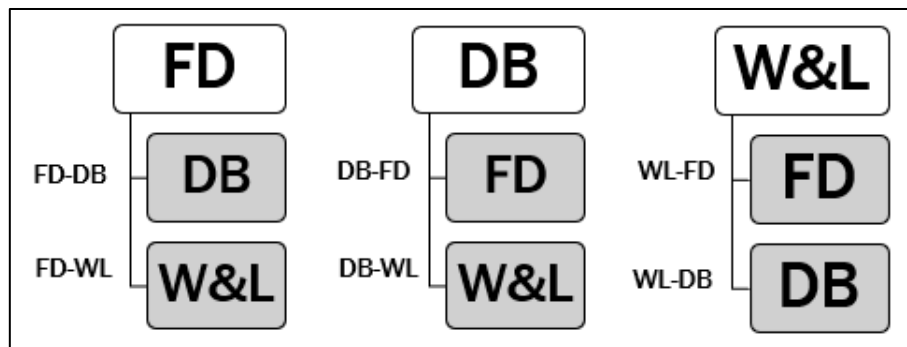
Ilustración V.3. MDE con resolución de 0.5 m del cadenamiento 278+000 al 288+000

#### V.4. Procesamiento de datos

En este apartado los datos generados y de entrada se someten a una serie de procesos para evaluar sus resultados con el propósito de lograr el objetivo de la metodología.

##### V.4.1. Corrección del MDE

Bajo la teoría de que un algoritmo de pre-procesamiento no posee un desempeño suficiente para corregir un MDE se formuló una serie de combinaciones de algoritmos que consistió en someter el MDE base a la aplicación de los algoritmos: Fill Depressions (FD), Depression Breaching (DB) y Wang&Liu (WL). Consecutivamente el MDE resultante de cada una de estas aplicaciones fue sometido a una combinación con los otros dos algoritmos. El diagrama de la *Ilustración V.4.* representa las combinaciones aplicadas.



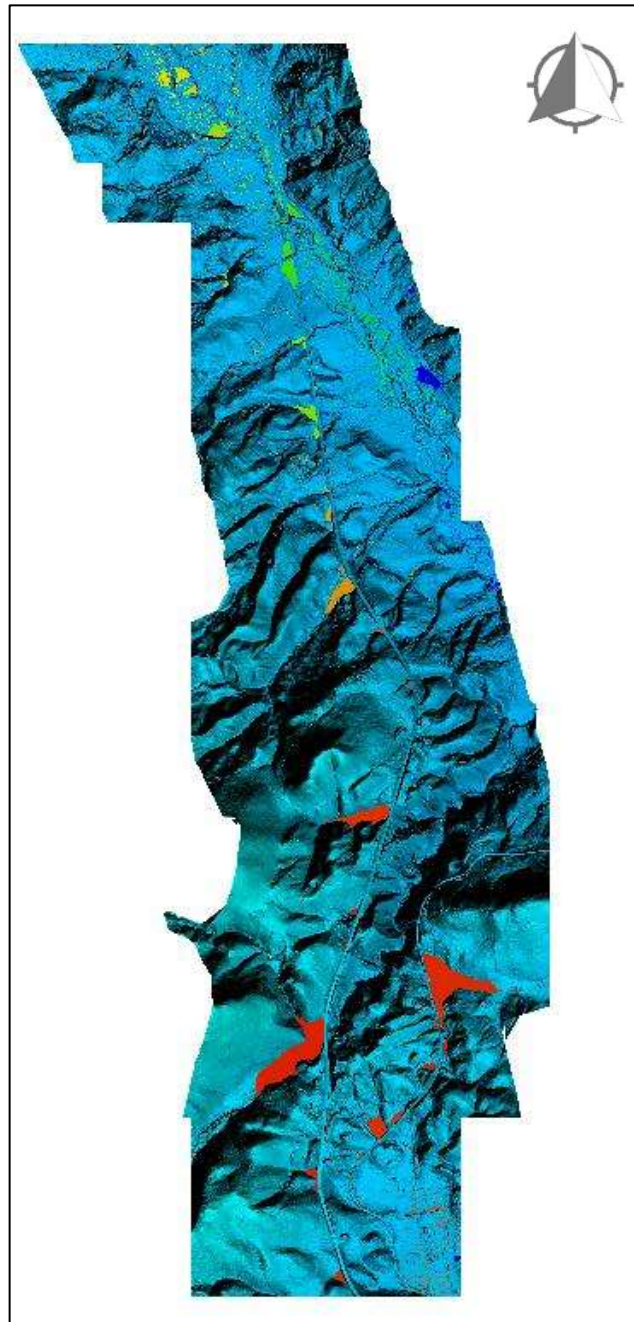
*Ilustración V.4. Diagrama de las combinaciones de algoritmos*

##### a. Detección de vacíos

Para la detección de los vacíos se empleó un algoritmo de reconocimiento de *WBT* que se encarga de identificar los pixeles anómalos contenidos en el MDE. Para crear un parámetro de medición, los pixeles detectados como vacíos fueron transformados a formato *.shp* para calcular sus superficies lo que permitió una comparación entre el área total de cobertura del MDE y la superficie detectada como vacíos. Con lo anterior, el objetivo fue reducir esa relación matemática expresada en porcentaje. El MDE inicial se muestra en la *Ilustración V.5* y el porcentaje de vacíos que contiene es del 3.15%



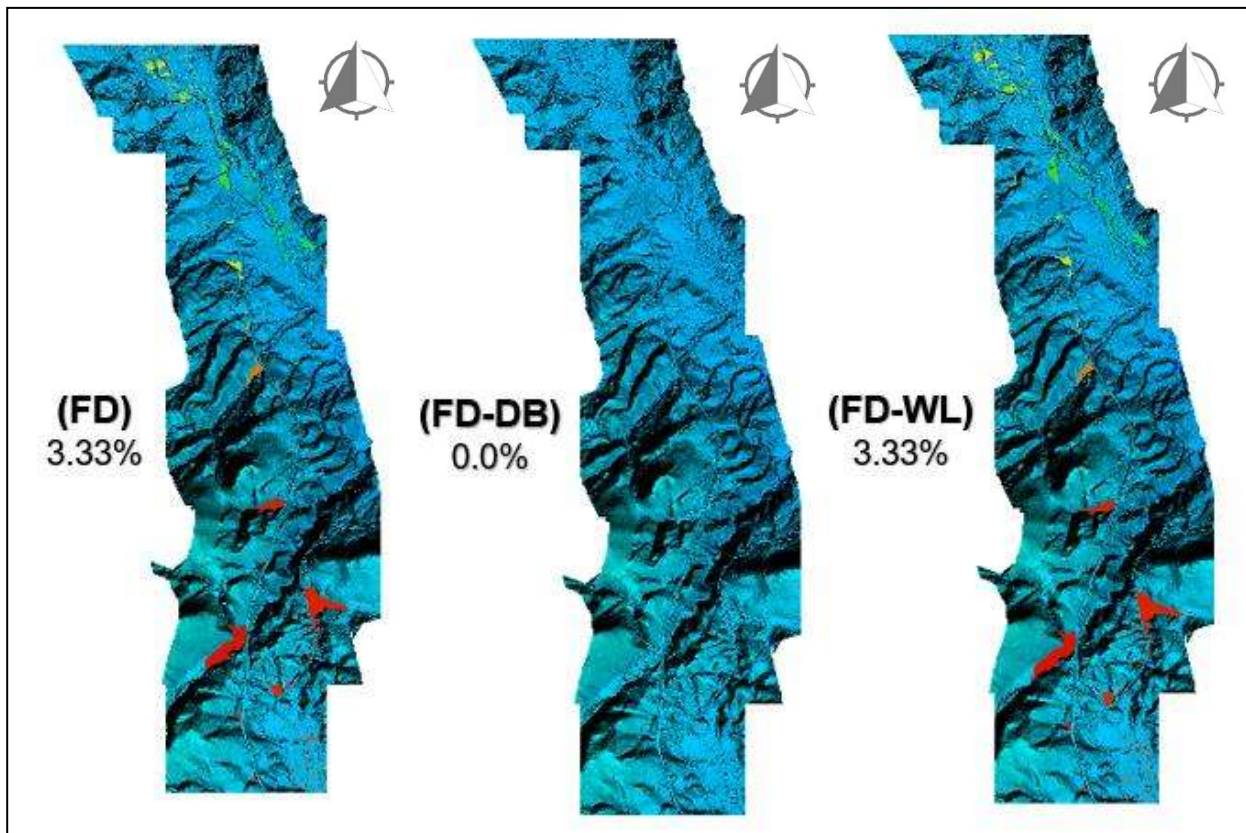
por lo cual se encuentra dentro de lo propuesto por *Tarboton (1991)* quien afirma que un MDE contiene entre 0.9 y 4.7% de vacíos.



*Ilustración V.5. Vacíos detectados en el MDE del caso de estudio 278+000-288+000*

b. Aplicación del algoritmo FD y sus combinaciones (FD-DB y FD-WL)

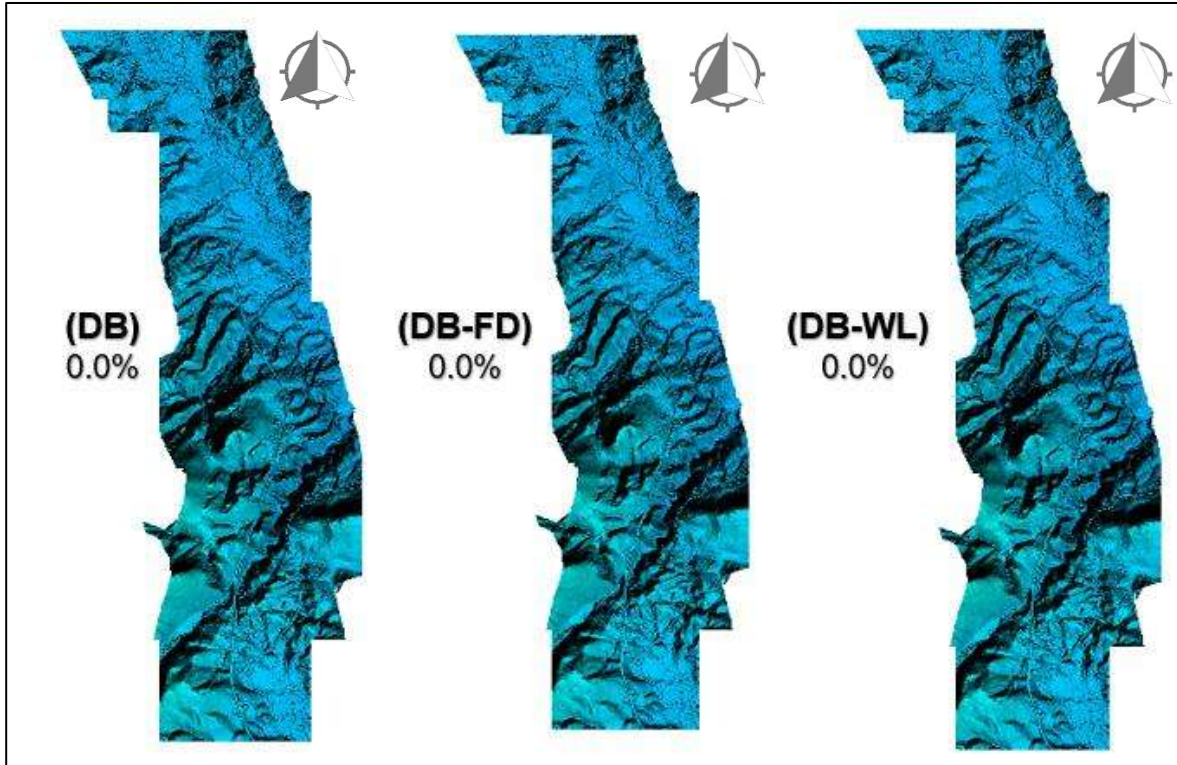
La *Ilustración V.6* muestra los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo *Fill Depressions (FD)* y sus respectivas combinaciones en las que se revela que el algoritmo por sí mismo no tiene un desempeño suficiente ni tampoco su combinación con el algoritmo *Wang&Liu (W&L)* que incluso aumentaron la cantidad de vacíos al 3.33%. La combinación FD-DB presenta un 0.0% de vacíos, sin embargo, presenta anomalías visuales en su estructura por lo que descarta su desempeño.



*Ilustración V.6. Vacíos detectados tras la aplicación de las combinaciones FD, FD-DB y FD-WL*

c. Aplicación del algoritmo DB y sus combinaciones (DB-FD y DB-WL)

La *Ilustración V.7* muestra los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo *Depression Breaching (DB)* y sus respectivas combinaciones en las que se revela que este algoritmo se desempeña satisfactoriamente reduciendo los vacíos a 0.0%.



*Ilustración V.7. Vacíos detectados tras la aplicación de las combinaciones DB, DB-FD y DB-WL*

d. Aplicación del algoritmo WL y sus combinaciones (WL-FD y WL-DB)

La *Ilustración V.8* muestra los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo *Wang&Liu (WL)* y sus respectivas combinaciones en las que se revela que el algoritmo por sí mismo no tiene un desempeño suficiente por su porcentaje de 3.33% mayor al porcentaje inicial ni tampoco su combinación con el algoritmo *Fill Depression (FD)* que cuenta con el mismo porcentaje y aunque la combinación WL-DB redujo la cantidad de vacíos al 1.94% sigue sin ser un desempeño suficiente para el objetivo buscado.

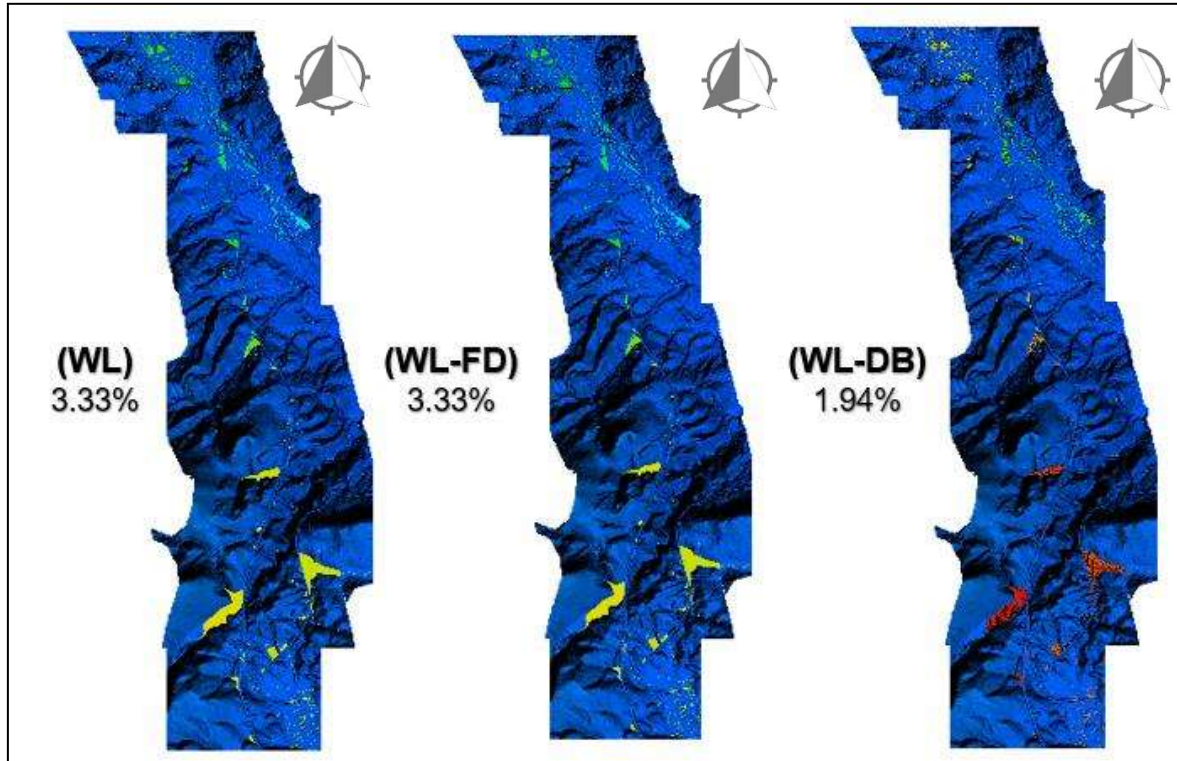


Ilustración V.8. Vacíos detectados tras la aplicación de las combinaciones WL, WL-FD y WL-DB

La *Tabla V.1* contiene el resumen de los porcentajes resultantes de las combinaciones de algoritmos. Se resalta una tendencia del algoritmo DB en la que todos los MDE poseen una reducción del contenido de sus vacíos y esto se debe al funcionamiento del algoritmo pues toma en cuenta las elevaciones de la infraestructura existente como carreteras, alcantarillas, pasos a desnivel y vías férreas ya que se ha comprobado que la presencia de éstas altera la densidad de drenaje y las direcciones de los flujos por lo que considerar sus elevaciones mejora sustancialmente la modelación de la red de drenaje. Por lo tanto, al hacer una separación entre elevaciones del terreno y elevaciones de alguna obra de infraestructura se obtiene una mejor elección de píxeles para corregir su elevación y su dirección de flujo. Por esta razón, a partir de ahora las propiedades hidrológicas para la delimitación de las microcuencas se llevará a cabo con los *MDE* corregidos con el algoritmo *Depression Breaching (DB)*.



<b>Combinaciones de algoritmos</b>	<b>Porcentaje de vacíos (%)</b>
Condición inicial	3.15
FD	3.33
FD-DB	0.0
FD-WL	3.33
DB	0.0
DB-FD	0.0
DB-WL	0.0
WL	3.33
WL-FD	3.33
WL-DB	0.0

*Tabla V.1. Resumen de los porcentajes de vacíos tras la aplicación de los algoritmos en el MDE*



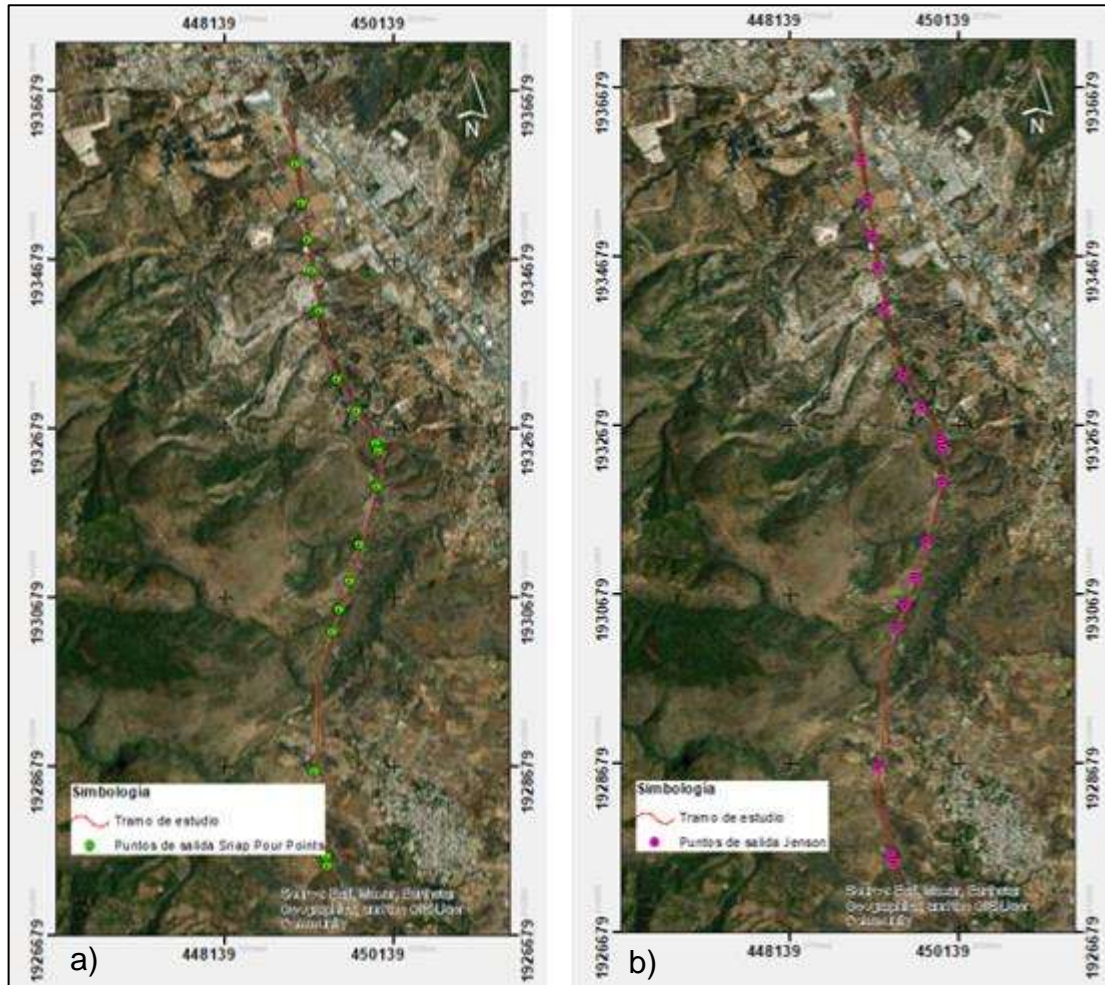


Ilustración V.10. a) Puntos de salida calculados con Snap Pour Points y b) Puntos de salida calculados con Jenson Snap Pour Points

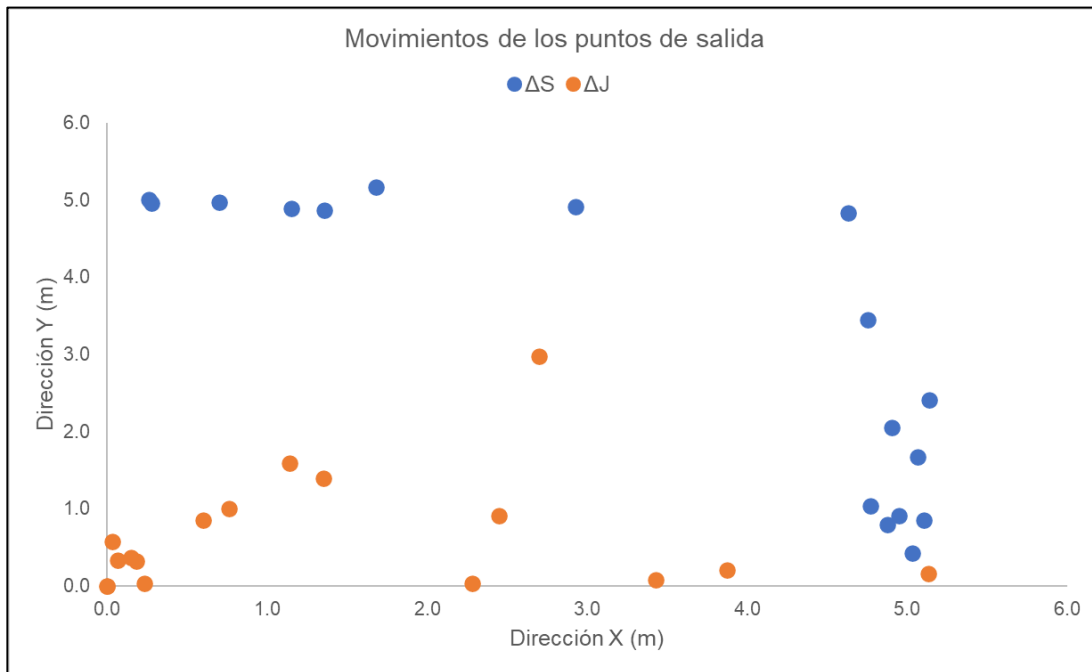
El ajuste de los puntos de salida se llevó a cabo mediante las herramientas *Snap Pour Points* y *Jenson Snap Pour Points*, tal como lo indica el apartado IV.4.2 de la metodología. La *Ilustración V.10 a) y b)* muestra gráficamente el resultado de ambos procesos. Ahora bien, para analizar la reubicación se obtuvieron las coordenadas geográficas UTM de cada punto con *ArcGIS 10.5* en su estado previo y posterior tras la aplicación del ajuste *Snap* y *Jenson*. Las coordenadas resultantes se observan en la *Tabla V.2* compuesta por las columnas que detallan el número de punto de salida, su cadenamamiento, el tipo de obra de drenaje que representa, las coordenadas identificadas como previas, las coordenadas calculadas mediante *Snap Pour Points*, las coordenadas calculadas mediante *Jenson Snap Pour Points* y las diferencias absolutas



entre ellas ( $\Delta S$  y  $\Delta J$ ) mientras que la *Gráfica V.1* ilustra la comparación de los movimientos.

No.	Cadenamiento	Previas		Snap Pour Points		$\Delta S$ (m)		Jenson Snap Points		$\Delta J$ (m)	
		Coordenadas UTM Zona 14		Coordenadas UTM Zona 14				Coordenadas UTM Zona 14			
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y		
1	LC 278+768	448,986.780	1,935,808.826	448,981.750	1,935,809.250	5.030	0.424	448,986.750	1,935,808.250	0.030	0.576
2	PSG 279+236	449,059.123	1,935,346.047	449,054.250	1,935,345.250	4.873	0.797	449,055.250	1,935,346.250	3.873	0.203
3	LC 279+670	449,124.528	1,934,916.284	449,124.250	1,934,921.250	0.278	4.966	449,122.250	1,934,916.250	2.278	0.034
4	PSG 280+034	449,175.198	1,934,557.663	449,170.250	1,934,556.750	4.948	0.913	449,172.750	1,934,556.750	2.448	0.913
5	LC 280+532	449,258.825	1,934,065.330	449,261.750	1,934,070.250	2.925	4.920	449,262.250	1,934,065.250	3.425	0.080
6	PSG 281+369	449,477.650	1,933,260.199	449,472.750	1,933,262.250	4.900	2.051	449,477.650	1,933,260.199	0.000	0.000
7	TC 281+803	449,707.851	1,932,893.394	449,702.750	1,932,894.250	5.101	0.856	449,707.250	1,932,894.250	0.601	0.856
8	2TC 282+254	449,929.098	1,932,503.357	449,930.250	1,932,508.250	1.152	4.893	449,927.750	1,932,504.750	1.348	1.393
9	TC 282+351	449,957.814	1,932,412.921	449,952.750	1,932,411.250	5.064	1.671	449,957.750	1,932,413.250	0.064	0.329
10	BC 282+785	449,942.949	1,931,988.280	449,942.250	1,931,993.250	0.699	4.970	449,940.250	1,931,991.250	2.699	2.970
11	LC 283+495	449,744.888	1,931,302.835	449,739.750	1,931,305.250	5.138	2.415	449,743.750	1,931,301.250	1.138	1.585
12	TC 283+941	449,627.431	1,930,875.076	449,625.750	1,930,880.250	1.681	5.174	449,627.250	1,930,874.750	0.181	0.326
13	2TC 284+304	449,503.004	1,930,534.304	449,498.250	1,930,537.750	4.754	3.446	449,503.004	1,930,534.304	0.000	0.000
14	TL 284+584	449,416.509	1,930,267.744	449,416.250	1,930,272.750	0.259	5.006	449,415.750	1,930,268.750	0.759	1.006
15	TC 286+250	449,194.396	1,928,633.121	449,195.750	1,928,628.250	1.354	4.871	449,194.250	1,928,632.750	0.146	0.371
16	TC 287+298	449,340.379	1,927,614.587	449,335.750	1,927,609.750	4.629	4.837	449,335.250	1,927,614.750	5.129	0.163
17	TC 287+410	449,366.018	1,927,499.286	449,361.250	1,927,498.250	4.768	1.036	449,366.250	1,927,499.250	0.232	0.036
<b>M=</b>						<b>3.385</b>	<b>3.132</b>	<b>M=</b>		<b>1.432</b>	<b>0.638</b>

Tabla V.2. Datos de las coordenadas previas y calculadas de los puntos de salida mediante los algoritmos Snap Pour Points y Jenson Snap Pour Points (WBT GUI y ArcGIS 10.5)



Gráfica V.1. Movimientos de los puntos de salida  $\Delta S$  y  $\Delta J$



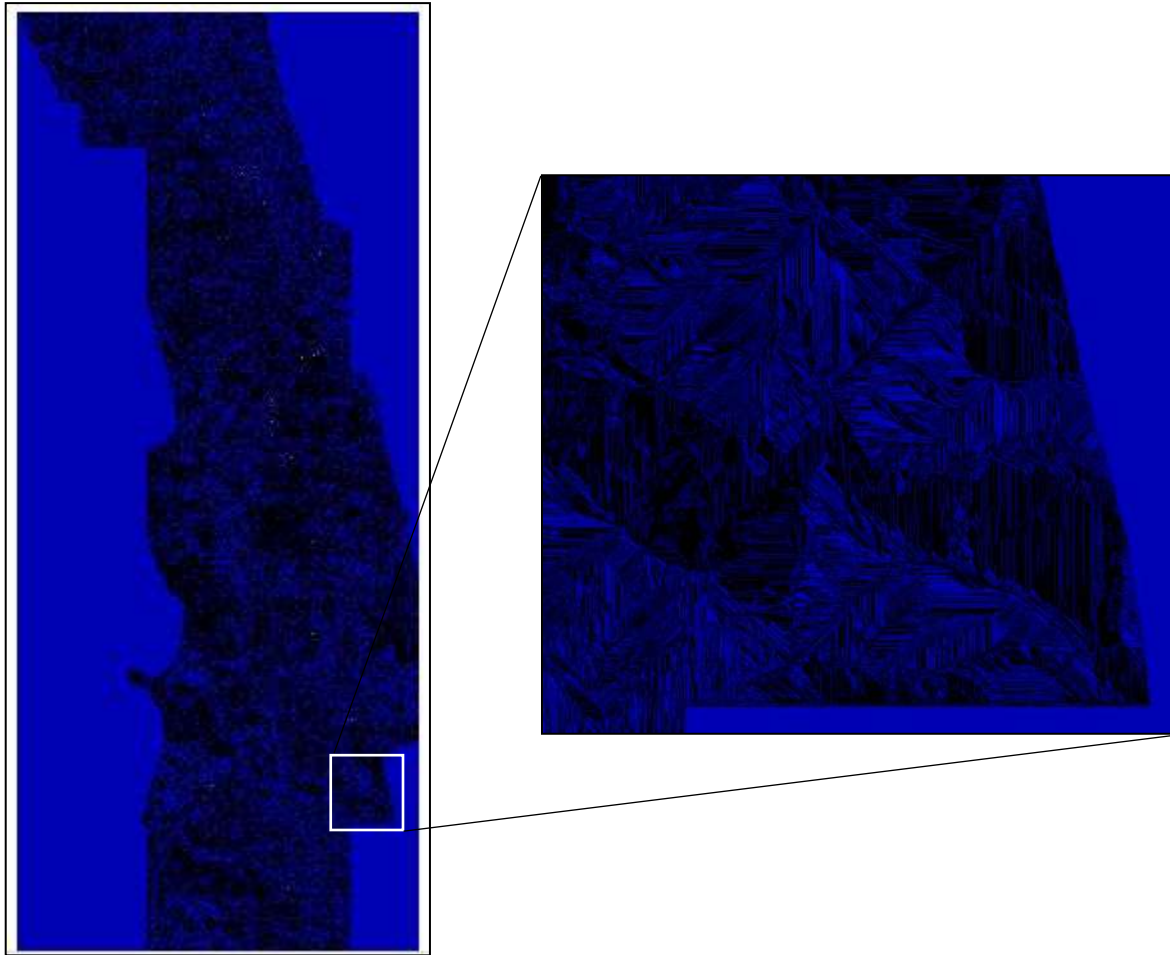


Las diferencias algebraicas entre ambos conjuntos de coordenadas se denominaron  $\Delta S$  (Snap Pour Points) y  $\Delta J$  (Jenson Snap Points) y reflejan la reubicación sobre los píxeles de la acumulación del flujo. Las mediciones indican desplazamientos promedio menores de 1.432 m en dirección  $X$  y 0.638 m en dirección  $Y$  por parte de la técnica Jenson. Lo anterior se observa en la *Gráfica V.1* y además se visualiza la tendencia que tienen ambas variables:  $\Delta S$  tiende a estar más alejada de cero mientras que la mayoría de los valores  $\Delta J$  tienden a estar más cerca lo que indica un mejor desempeño. Por lo tanto, el algoritmo Jenson tiene una mejor detección de los píxeles adecuados para colocar los puntos de salida. Sin duda resultaría más difícil poder acertar en la localización exacta de los puntos de salida debido a que tendría que observarse minuciosamente el ráster de la acumulación del flujo y mover individual y manualmente todos los puntos de interés, no obstante, la técnica Jenson ha sido desarrollada para automatizar este proceso.

#### V.4.3. Rásters de flujo

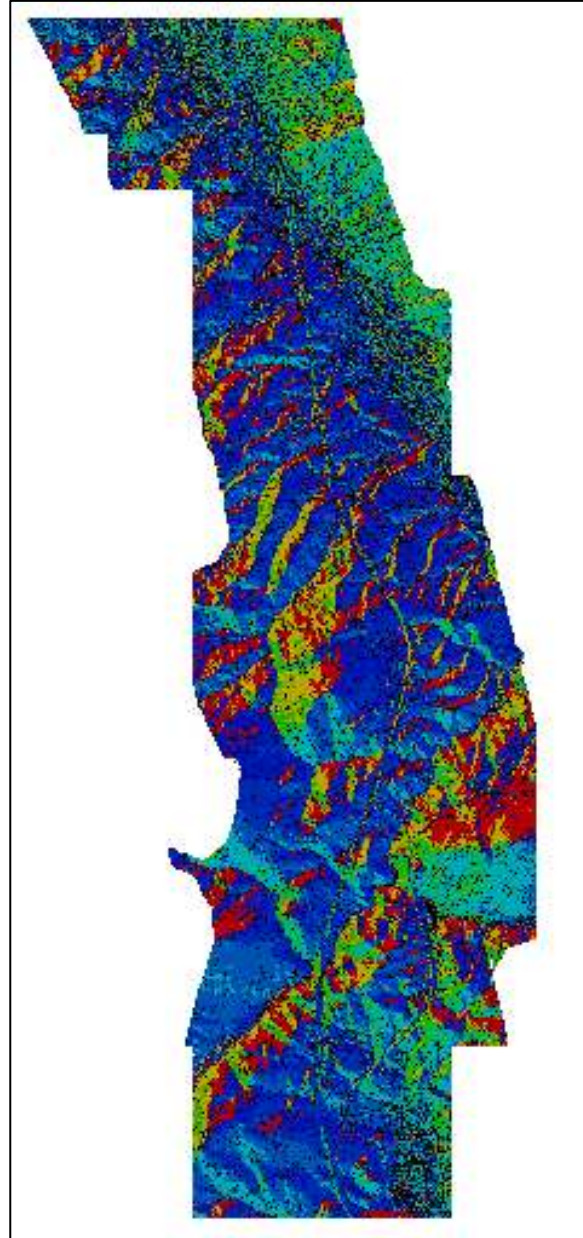
Estos resultados corresponden a las instrucciones del apartado IV.3.2. de la metodología en el que se indica que éstos son parte de los datos de entrada para la delimitación de las microcuencas. Uno de los archivos ráster más destacable es el correspondiente a la acumulación del flujo ya que, como se mencionó anteriormente en el apartado V.4.2, los puntos de salida trabajan en conjunto con los píxeles donde se acumula el flujo para delimitar las microcuencas.

La *Ilustración V.11* es una representación de todas las corrientes superficiales que fueron identificadas en la acumulación del flujo. Cada una de las líneas negras que se observan sobre el fondo azul es una secuencia de píxeles por los cuales circula el agua de manera superficial y debido a la alta resolución del MDE se produce una alta concentración de escurrimientos.



*Ilustración V.11. Esguimientos superficiales derivados de la acumulación del flujo*

Otro de los archivos ráster clave en la delimitación de las microcuencas es el D8 Pointer (*Ilustración V.12*) porque como se indica en el apartado IV.4.3 de la metodología, éste es el dato de entrada que junto al archivo *.shp* de los puntos de salida ajustados fungen como datos de entrada para delimitar las microcuencas. El algoritmo de identificación de microcuencas *Watershed* usa los píxeles D8 para simular las acumulaciones de los flujos superficiales y definir la red de drenaje para que en conjunto con los puntos de salida, identifique las microcuencas a delimitar.

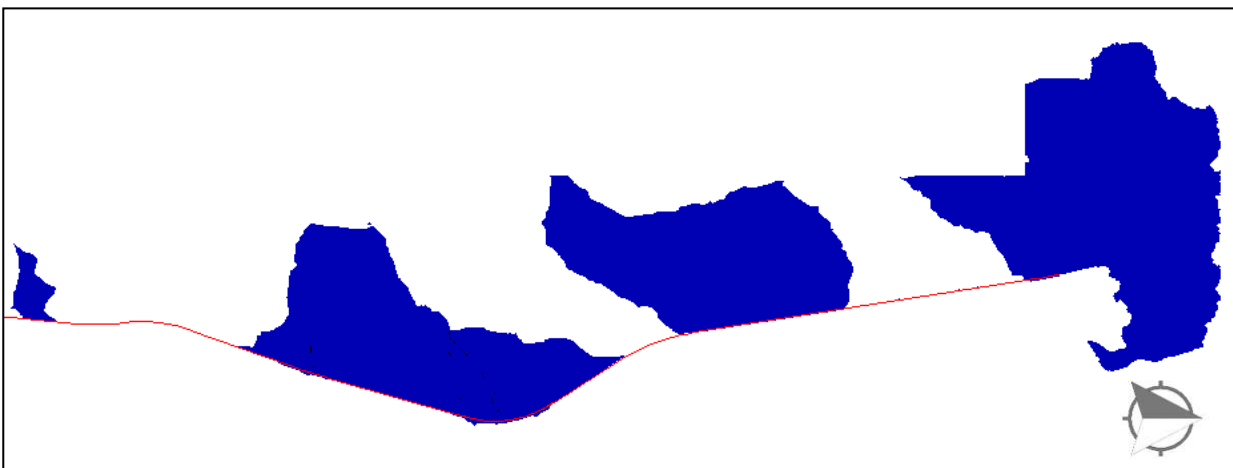


*Ilustración V.12. Ráster D8 Pointer*

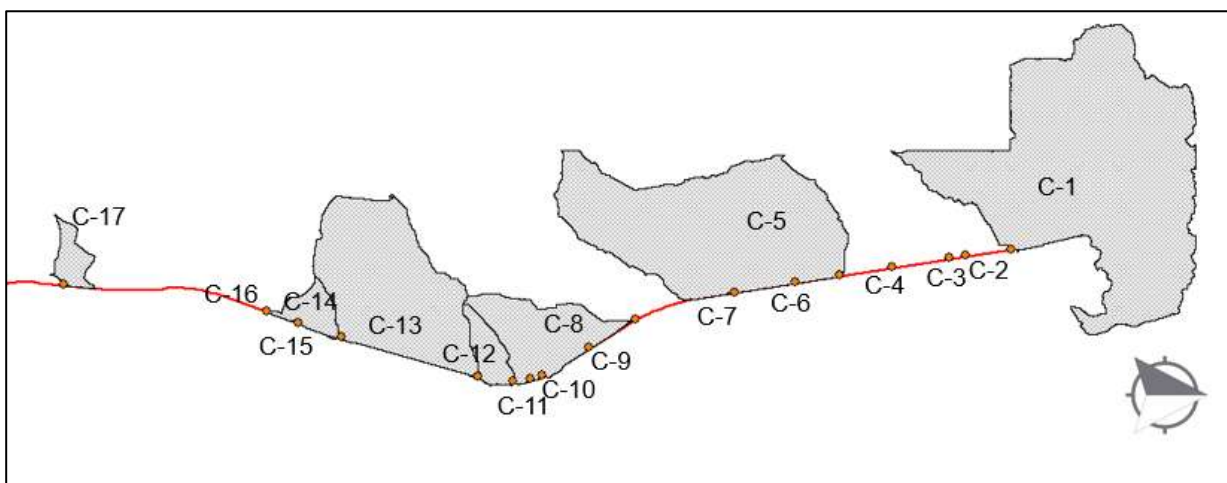
#### V.4.4. Delimitación de las microcuencas

De acuerdo al apartado IV.4.3 de la metodología, una vez que se han generado los ráster de flujo y ajustado los puntos de salida, se emplea el algoritmo de identificación *Watershed* de la *WBT GUI*.

La *Ilustración V.13* muestra en formato *.ras* las microcuencas que se delimitaron a partir de los puntos de salida de las *OMD* ajustadas con el método *Jenson* y de las acumulaciones de flujo mientras que la *Ilustración V.14* las muestra convertidas a formato *.shp* además de su correspondiente punto de salida.



*Ilustración V.13. Microcuencas delimitadas en formato .ras*



*Ilustración V.14. Microcuencas delimitadas en formato .shp*



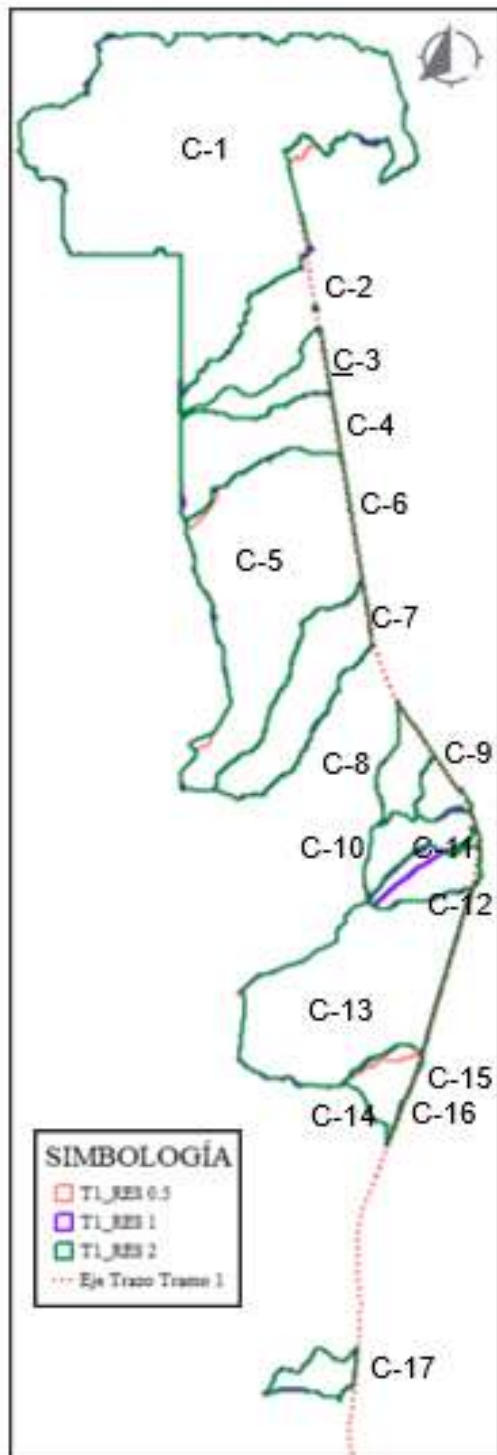
Como lo indica la Normativa del Instituto Mexicano del Transporte (N-PRY-CAR-4-01-002/16) para el diseño de OMD las microcuencas que se toman en cuenta son todas aquellas cuya área de drenado es menor a 5 km<sup>2</sup>. Con base en lo anterior, se calcularon las áreas de todos los polígonos y las cifras se muestran en la *Tabla V.3*.

<b>Cadenamiento</b>	<b>ID Microcuenca</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>
LC 278+768	C-1	3.0910
PSG 279+236	C-2	0.0001
LC 279+670	C-3	0.0005
PSG 280+034	C-4	0.0002
LC 280+532	C-5	1.8970
PSG 281+369	C-6	0.0001
TC 281+803	C-7	0.0005
2TC 282+254	C-8	0.4880
TC 282+351	C-9	0.0001
BC 282+785	C-10	0.0002
LC 283+495	C-11	0.0002
TC 283+941	C-12	0.1384
2TC 284+304	C-13	1.2207
TL 284+584	C-14	0.1298
TC 286+250	C-15	0.0005
TC 287+298	C-16	0.0002
TC 287+410	C-17	0.1090

*Tabla V.3. Áreas de las microcuencas delimitadas*

Como se observa, todas las microcuencas son aceptables bajo el criterio impuesto por la Normativa Mexicana. Sin embargo, se observó un comportamiento irregular en cuanto a la delimitación de los elementos ya que solamente 7 de los 17 elementos generados (41.2%) mantienen coherencia con la realidad, es decir, sí representan un área de captación útil para el diseño de OMD.

Con el propósito de encontrar una explicación se llevaron a cabo dos experimentaciones adicionales de la metodología con dos MDE de diferente resolución (1 y 2 m) y la *Ilustración V.15* muestra la transposición de todos los elementos para compararlos visualmente. Por otro lado, la *Tabla V.4* resume los datos de sus áreas de drenado.



ID	Área (km <sup>2</sup> )		
	0.5 m	1.0 m	2.0 m
C-1	3.09171	3.07702	3.07650
C-2	0.00010	0.00070	0.00071
C-3	0.00051	0.00093	0.17391
C-4	0.00018	0.43090	0.43268
C-5	1.89726	1.42887	1.42939
C-6	0.00011	0.00011	0.00013
C-7	0.00050	0.48822	0.48736
C-8	0.48845	0.15304	0.15236
C-9	0.00007	0.08531	0.08264
C-10	0.00017	0.19226	0.19232
C-11	0.00022	0.05880	0.01201
C-12	0.13847	0.13884	0.18582
C-13	1.22065	1.19348	1.19490
C-14	0.12983	0.15537	0.15440
C-15	0.00049	0.00049	0.00055
C-16	0.00016	0.00018	0.00011
C-17	0.10897	0.11036	0.10831

*Tabla V.4. Áreas de las microcuencas delimitadas de MDE con resolución 0.5 m, 1 m y 2 m*

*Ilustración V.15. Comparación visual de las microcuencas de MDE 0.5 m, 1 m y 2m*



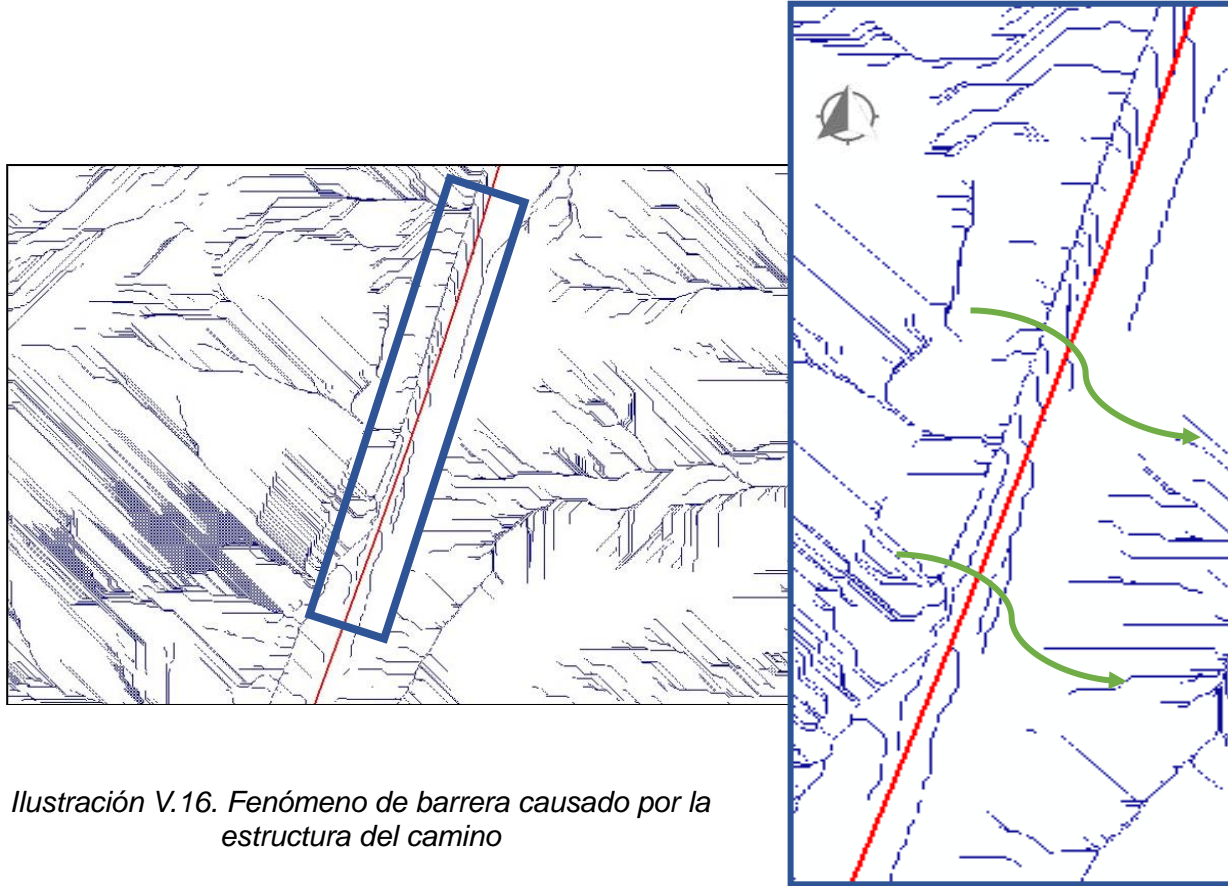
Al analizar los datos anteriores se percibió que hay muy poca diferencia al variar la resolución por lo que se descubrió que este no es un factor que altere la delimitación por lo que se tomó la decisión de analizar los datos del preproceso en dos direcciones principales: los datos LiDAR y la escala del ráster de flujo. Al realizarlo, se detectaron dos problemas asociados:

- ◆ Se produce una alteración de la simulación del escurrimiento superficial debido a la existencia del camino lo que produce un efecto barrera que interrumpe la circulación natural del agua sobre el terreno. Esto se debe a la inadecuada clasificación de los puntos porque como se mencionó en la *Tabla III.2* del apartado *III.5.3. Formato de los datos LiDAR*, a éstos se les puede asignar una clave de reconocimiento que permite visualizar la realidad digitalmente conociendo los puntos que conforman ciertas extensiones características de la zona como el terreno natural, vegetación carreteras y azoteas de edificios. En este caso, todos los puntos están catalogados como terreno natural por lo que al momento de simularse los flujos, todos ellos son tomados en cuenta como parte de la superficie y alteran el resultado. Los terraplenes que conforman el camino crean una especie de barrera que impide la circulación natural del flujo de agua (*Ilustración V.16*).

El eje del camino está representado por la línea roja y todas las líneas azules representan los escurrimientos superficiales que se detectaron. Aunque la imagen refleja solamente una fracción del camino, el fenómeno ocurre en casi toda su longitud. Tomando en cuenta la topografía a una mayor escala y la red hidrográfica del *SIATL INEGI*<sup>5</sup> se determinó que la dirección de los flujos debería ser Sur-Este sin embargo se aprecia que por la existencia del camino la dirección de los escurrimientos cambia de forma abrupta e incluso circulan sobre la calzada del camino siguiendo las elevaciones marcadas por la rasante. Por ello, la delimitación de las microcuencas se altera debido a esta incompatibilidad con la realidad.

---

<sup>5</sup> [https://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/](https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/)



*Ilustración V.16. Fenómeno de barrera causado por la estructura del camino*

- ◆ Se carece de una adecuada priorización de los píxeles de flujo acumulado. Como se mencionó en el apartado V.4.2 de este capítulo, es esencial la correcta localización de los puntos de salida sobre los píxeles en los que se acumula el flujo porque éstos determinan la dirección del escurrimiento. Debido a esto y con base en las experimentaciones se descubrió que dependiendo de la localización del punto de salida se delimitan microcuencas con características distintas e incluso se delimitan microcuencas sin coherencia con la realidad. Una de las mayores ventajas que proporciona el uso de datos LiDAR es recrear con mayor detalle la realidad lo que produce un beneficio sobre la detección de los escurrimientos superficiales detectados con resoluciones convencionales sin embargo, en la metodología ha resultado contraproducente porque implica tener muchas opciones dónde localizar los puntos de salida lo que resulta en un alta cantidad de inexactitudes por lo que debe de saberse priorizar los píxeles de flujo acumulado que delimiten las microcuencas de forma acertada para el interés del proyecto de OMD.





## V.5. Discusión

Aunque en la actualidad los levantamientos topográficos mediante LiDAR son costosos, la tendencia mundial dentro de esta área de la ingeniería civil indica un crecimiento de su uso por lo que representa una ventaja el desarrollar metodologías que los empleen. *Whitebox Tools GAT* resultó ser un software con bastante potencial debido a la alta variedad de herramientas disponibles y la fácil accesibilidad de su interfaz gráfica y los códigos abiertos de cada una de las herramientas que permite analizar cada paso y modificar el algoritmo para mejorarlo o adecuarlo a casos particulares. Se ha comprobado que la generación de un MDE implica la pérdida o daño de datos de elevaciones lo que repercute en la calidad de sus productos extraídos sin embargo el uso de los algoritmos de corrección promovió un desempeño positivo y aunque se obtuvieron distintos porcentajes en la de vacíos en el proceso de corrección se notó una tendencia de desempeño adecuado por parte del algoritmo *Depression Breaching (DB)* que por sí mismo pudo eliminar los vacíos existentes por lo que se consideró el adecuado para ejecutar la metodología.

La localización de los puntos de salida es un dato de entrada crucial para la delimitación de las microcuencas y está estrechamente relacionada con los píxeles que reciben la acumulación del flujo en la simulación del ráster *D8 Flow Accumulation*.

Se ha demostrado que el uso de los datos *LiDAR* proporciona una mayor cercanía a la realidad pues pueden analizarse características con mayor detalle que en cualquier resolución de MDE convencional no obstante, también se demostró que resulta contraproducente contar con mucho detalle porque se abre un amplio panorama de opciones en dónde localizar los puntos de salida y de esto se derivaron las inexactitudes en la delimitación de las microcuencas puesto que no existe una coincidencia con los patrones de microcuencas delimitadas con métodos convencionales así que sigue siendo un problema abierto por lo que debe desarrollarse o modificarse el algoritmo de la herramienta *Watershed* en WBT para acotar la escala de detección de los escurrimientos y priorizar los píxeles de flujo acumulados de acuerdo a los interés del proyecto de diseño de OMD.



Además, la existencia del camino repercute de gran manera en los resultados porque altera la acumulación de los flujos a microescala con el fenómeno barrera por lo que debe buscarse la manera de asignar la clasificación adecuada a todos los puntos LiDAR para que sean posibles los procesos de filtrado y sustitución de los mismos para una adecuada generación de MDE.



# Capítulo VI.

## Conclusiones



## Capítulo VI. Conclusiones

En este capítulo se expresan las conclusiones derivadas de la investigación y las posibles extensiones de la misma.

- ◆ La revisión del estado del arte mostró principalmente que:
  - Los Modelos Digitales de Elevación (*MDE*) tienen una basta aplicación en los análisis hidrológicos; sin embargo, no se encontraron antecedentes de su aplicación a las vías terrestres.
  - Los levantamientos topográficos mediante sensores *LiDAR* van tomando ventaja ante los levantamientos topográficos convencionales debido a: 1) la rapidez de su ejecución porque están montados sobre una aeronave que permite cubrir grandes extensiones en un tiempo menor y 2) la alta calidad con la que representan la realidad del terreno de manera digital ya que es posible apreciar elementos sobre la superficie que no se perciben con otras técnicas topográficas.
  - Los algoritmos de corrección tales como *Fill Depressions (FD)*, *Depression Breaching (DB)*, *Stream Burning (SB)*, *Wang and Liu (W&L)* y *Flow Path Constraint (FPC)* fueron desarrollados para ser la solución al inherente problema de las imperfecciones contenidas en la estructura interna del MDE cuando éste se genera partiendo de datos *LiDAR*.
  
- ◆ El análisis de resultados mostró que:
  - Los algoritmos de mejoramiento aplicados (*FD*, *DB* y *W&L*) se desarrollaron para corregir y mejorar un *MDE* brindando solución a los errores e imprecisiones que comúnmente se tienen en su estructura. Todos ellos se encontraron disponibles en la *WBT GUI* lo que propició determinar cuáles tienen mayor desempeño positivo evaluando el contenido de pixeles vacíos en la transformación de datos *LiDAR* a un *MDE*. En experimentos preliminares se determinó que un solo algoritmo no posee el desempeño suficiente para corregir por completo los vacíos del *MDE* debido a que tras la aplicación de los algoritmos seguían



existiendo pixeles vacíos e incluso se produjeron nuevos pixeles, por otra parte, fue distinto cuando se aplicó la metodología al caso de estudio pues se encontró que el algoritmo *DB* y sus respectivas combinaciones corrigieron al 100% el *MDE*.

Esto se debe a su funcionamiento ya que toma en cuenta las elevaciones de la infraestructura existente como carreteras, alcantarillas, pasos a desnivel y vías férreas. A comparación de otros algoritmos como el *FD*, *DB* funciona con base en la ruta de menor costo para analizar las elevaciones, es decir, crea un canal de ruptura que conecta un pixel con pendiente nula (celda vacía) con un pixel de menor elevación (celda destino) y al considerar las elevaciones de este modo, se mejora sustancialmente la modelación de la red de drenaje. Así que con base en las evaluaciones de los porcentajes de vacíos en los resultados de las combinaciones se determinó que, en este caso, el algoritmo *DB* por sí mismo pudo eliminar los vacíos existentes por lo que se considera el adecuado para ejecutar la metodología y que el desempeño de todos los algoritmos de corrección dependen de la escala y la extensión del *MDE*.

- Es esencial la correcta localización de los puntos de salida sobre los pixeles en los que se acumula el flujo porque éstos determinan la dirección del escurrimiento.

Debido a esto y con base en los resultados se descubrió que la localización del punto de salida es un factor determinante porque al no encontrarse correctamente colocados se delimitan microcuencas con características inusuales tales como la discontinuidad de los parteaguas y la variación de las áreas lo que deriva en microcuencas digitales sin coherencia con la realidad.

- Una de las mayores ventajas que proporciona el uso de datos *LiDAR* es recrear con mayor detalle la realidad lo que proporciona una ventaja mayor en comparación con la detección de los escurrimientos



superficiales con resoluciones convencionales. Sin embargo, en la metodología ha resultado contraproducente porque implica tener muchas opciones dónde localizar los puntos de salida lo que resulta en una alta cantidad de inexactitudes por lo que debe de explorarse el cómo automáticamente determinar cuáles pixeles de flujo acumulado delimitan las microcuencas de forma acertada para el interés del proyecto de *OMD*; por consiguiente, una solución sería la modificación o adecuación de la herramienta *Watershed WBT* en la que sea posible implicar el parámetro *CT (Channelization Threshold)* cuyo valor define la densidad del drenaje existente. Se observó que cuando éste aumenta su valor, la densidad es menor y se definen menos microcuencas; en caso contrario, cuando su valor es bajo se extraen muchas más corrientes que *WBT* interpreta como microcuencas por lo que el poder acotar este parámetro dentro del algoritmo de delimitación de las microcuencas es crucial. No obstante, esto se cataloga como trabajo futuro.

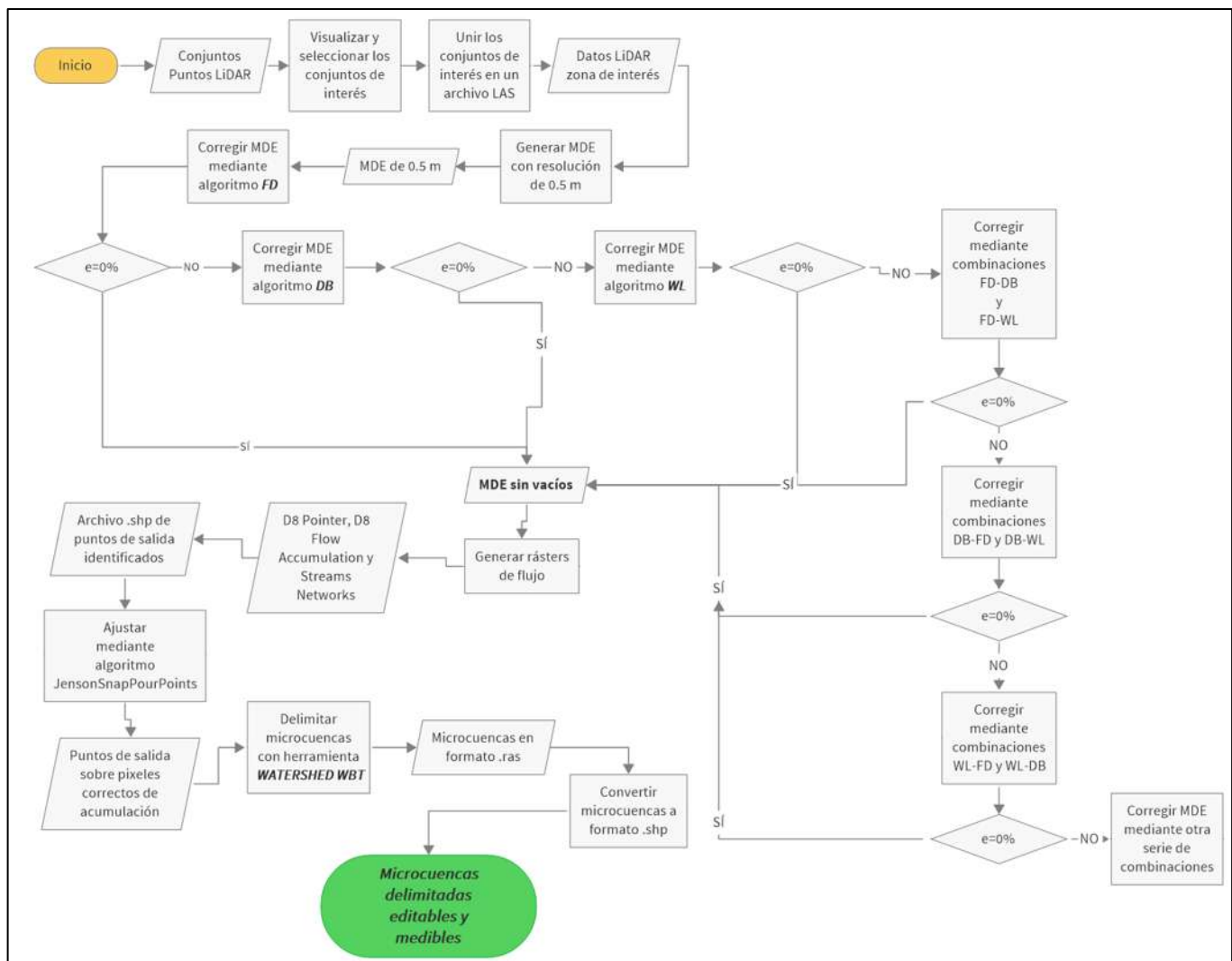
- La existencia de la estructura de un camino altera la simulación de los flujos superficiales en una microescala porque crea un fenómeno de barrera que interrumpe la circulación natural de los cauces por lo que, al tratar con datos *LiDAR* es importante que se tenga bien ejecutada la clasificación de los puntos que permita usar filtros para la adecuada generación de *MDE*. Sin embargo, aunque es posible reclasificar la nube de puntos esto se considera como un trabajo futuro.



Capítulo VII.  
Metodología para el  
Análisis de  
Microcuencas en  
Proyecto Carretero  
basada en MDE

## Capítulo VII. Metodología para el Análisis de Microcuencas en Proyecto Carretero basada en MDE

La unión de los pasos metodológicos de cada uno de los procesos realizados se concentra en el diagrama de flujo mostrado en la *Ilustración VII.1* en el que se señalan los datos de entrada, los procesos y las decisiones tomadas en la metodología. Los procesos que involucran los datos *LiDAR* durante la primera etapa se consideran como un pre-proceso ya que su resultado dirige el resto de los procesos. Posteriormente, los demás pasos dependen de la serie de decisiones que engloban el obtener un *MDE* sin vacíos porque permite la correcta simulación de la acumulación del flujo de agua y el adecuado posicionamiento de los puntos de salida para la correcta delimitación de las microcuencas.



Ilustración VII.1. Diagrama de flujo de la Metodología para el Análisis de Microcuencas en el Proyecto Carretero basada en MDE





# Bibliografía



## Bibliografía

- Al-Khafaji, M. S., & Al-Sweiti, F. H. (2017). *Integrated Impact of Digital Elevation Model and Land Cover Resolutions on Simulated Runoff by SWAT Model*. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, November, 1–26.
- Angillieri, M. Y. E., & Fernández, O. M. (2017). *Morphometric analysis of river basins using GIS and remote sensing of an Andean section of Route 150, Argentina. A comparison between manual and automated delineation of basins*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34(2), 150–156. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.2.482>
- Avello, T. D., Brennan, J., & Loomis, L. (2016). *Modifying Digital Elevation Models to Develop More Realistic Wetness Index Layers for Soil Survey Applications*. *NCSS Newsletter*, May, 11.
- Barnes, R., Lehman, C., & Mulla, D. (2014). *Priority-flood: An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models*. *Computers and Geosciences*, 62, 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.024>
- Callow, J. N., van Niel, K. P., & Boggs, G. S. (2007). *How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis?* *Journal of Hydrology*, 332(1–2), 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.020>
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms, 3rd Edition (The MIT Press)*. In *Discrete Mathematics for Computer Science*.
- Das, S., Patel, P. P., & Sengupta, S. (2016). *Evaluation of different digital elevation models for analyzing drainage morphometric parameters in a mountainous terrain: a case study of the Supin–Upper Tons Basin, Indian Himalayas*. *SpringerPlus*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3207-0>
- Dominguez, M. A., Ventura, E., Valdez, F., Sorani, V., & Pineda, R. F. (2005). *Mexico's national map of small watersheds*.
- Dong, P., & Chen, Q. (2018). *LiDAR Remote Sensing and Applications*. Taylor & Francis Group.



- Duke, G. D., Kienzle, S. W., Johnson, D. L., & Byrne, J. M. (2006). *Incorporating ancillary data to refine anthropogenically modified overland flow paths. Hydrological Processes*, 20(8), 1827–1843. <https://doi.org/10.1002/hyp.5964>
- Edgar, C., Roa, C., Enrique, J., & Grassi, A. (2014). *Evaluation of digital elevation models for estimating erosion volumes by using spatial autocorrelation analysis in a catchment of the Venezuelan.* 17(1), 40–59. <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/article/view/4963/8770>
- Fisher, P. F., & Tate, N. J. (2006). *Causes and consequences of error in digital elevation models. Progress in Physical Geography*, 30(4), 467–489. <https://doi.org/10.1191/0309133306pp492ra>
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). *A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. In IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics (Vol. 4, Issue 2, pp. 100–107).* <https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>
- Jardí, Monserrat. (1985). *Analisis de las variables morfométricas que nos la definen. Revista de Geografía*, 19(1), 41–68.
- Jenson, S., (1991). *Applications of Hydrologic Information automatically extracted from Digital Elevation Models. Hydrological Processes* 5 (31-44), doi: 0885-6087/91/010031
- Li, J., Zhao, Y., Bates, P., Neal, J., Tooth, S., Hawker, L., & Maffei, C. (2020). *Digital Elevation Models for topographic characterization and flood flow modelling along low-gradient, terminal dryland rivers: A comparison of spaceborne datasets for the Río Colorado, Bolivia. Journal of Hydrology*, 591(September), 125617. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125617>
- Lidberg, W., Nilsson, M., Lundmark, T., & Ågren, A. M. (2017). *Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling. Hydrological Processes*, 31(26), 4660–4668. <https://doi.org/10.1002/hyp.11385>
- Lindsay, J. B. (2016). *The practice of DEM stream burning revisited. Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5), 658–668. <https://doi.org/10.1002/esp.3888>



- Lindsay, J. B., & Dhun, K. (2015). *Modelling surface drainage patterns in altered landscapes using LiDAR*. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(3), 397–411. <https://doi.org/10.1080/13658816.2014.975715>
- Lindsay, J. B., Rothwell, J., Davies, H. (2008). *Mapping outlet points used for watershed delineation derived stream networks*, *Water Resources*, 44, doi: 0.1029/2007WR006507
- Mijares, F. J. A. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie (Vol. 1, Issue 69)*.
- Novoa, J., Chokmani, K., Nigel, R., & Dufour, P. (2015). *Evaluation dans une perspective hydrologique de la qualité d'un modèle numérique de terrain provenant de données télédéteectées par WorldView-2*. *Hydrological Sciences Journal*, 60(2), 218–233. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.875179>
- O'Callaghan, J., Mark, D. (1984). *The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data*. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28(323-344).
- Petroselli, A. (2012). *LIDAR data and hydrological applications at the basin scale*. *GIScience and Remote Sensing*, 49(1), 139–162. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.49.1.139>
- Pryde, J. K., Osorio, J., Wolfe, M. L., Heatwole, C., Benham, B., & Cardenas, a. (2007). *Comparison of watershed boundaries derived from SRTM and ASTER digital elevation datasets and from a digitized topographic map*. *ASABE Annual International Meeting*, 0300(072093), 1–10.
- Planchon, O., & Darboux, F. (2002). *A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models*. *Catena*, 46(2–3), 159–176. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00164-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00164-3)
- Puech, M., Tutor, O., & Romero, C. Z. (2019). *Autor: Miguel Puech de Oriol Tutor: Carmen Zarzuelo Romero*.
- Rathore, R., Kumar, V., Ranjan, A., Tiwari, S., Goswami, A., & Agwan, M. (2018). *Extraction of watershed characteristics using GIS and digital elevation model*. *International Journal of Research in Engineering*, 1(7), 62–65. [www.ijresm.com](http://www.ijresm.com)



- Rocha, J., Duarte, A., Silva, M., Fabres, S., Vasques, J., Revilla-Romero, B., & Quintela, A. (2020). *The importance of high-resolution digital elevation models for improved hydrological simulations of a mediterranean forested catchment*. *Remote Sensing*, 12(20), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs12203287>
- Saiz Rodríguez, J. A., Miranda Torres, S. A., Castro Valencia, A., Saiz Rodríguez, R., & Saiz Hernández, J. A. (2017). *Elaboración De Un Modelo Digital De Elevaciones De Alta Resolución De La Cuenca Experimental Torre Rayón, Sonora*. *Epistemus*, 11(22), 13–19. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v11i22.41>
- Saran, S., Sterk, G., Peters, P., & Dadhwal, V. K. (2010). *Evaluation of digital elevation models for delineation of hydrological response units in a himalayan watershed*. *Geocarto International*, 25(2), 105–122. <https://doi.org/10.1080/10106040903051967>
- SCT. (2016). *Libro* : 1–88.
- UNESCO. (1964). *Informe de la Reunión Intergubernamental de Expertos para el Decenio Hidrológico Internacional*. [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000017099\\_spa.locale=es](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000017099_spa.locale=es)
- Wang, L., & Liu, H. (2006). *An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling*. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2), 193–213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>
- Wechsler, S. P. (2007). *Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: A review*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(4), 1481–1500. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007>
- Wu, T., Li, J., Li, T., Sivakumar, B., Zhang, G., & Wang, G. (2019). *High-efficient extraction of drainage networks from digital elevation models constrained by enhanced flow enforcement from known river maps*. *Geomorphology*, 340, 184–201. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.022>