

Efecto de la resolución espacial de modelos digitales de elevación en la simulación de derrames de hidrocarburos

Effect of the spatial resolution of digital elevation model on oil spill
simulations

Efeito da resolução espacial de modelos digitais de elevação na
simulação de derrames de hidrocarbonetos

Omar Javier Daza-Leguizamón¹

Enrique Vera-López²

Gladys Alcira Riaño-Cano³

Resumen

Las simulaciones de derrames de hidrocarburos sobre la superficie del terreno son útiles en estudios de impacto ambiental y de gestión de integridad de ductos. Para identificar y valorar los impactos causados por estos eventos, se han implementado simulaciones en programas de sistemas de información geográfica, considerando como datos de entrada las propiedades del fluido y las características del terreno. El relieve es generalmente representado mediante modelos digitales de elevación en formato de datos raster de diferentes tamaños de pixel. En este estudio se analizó el efecto de la resolución espacial de modelos digitales de elevación sobre la simulación de áreas afectadas por derrames de hidrocarburos. Se planteó un algoritmo implementado en el software libre GRASS GIS y luego se aplicó a una zona con cartografía base a diferentes escalas. La simulación se realizó para una zona montañosa en la zona central de Colombia suponiendo el trazado de un poliducto de 12 pulgadas de diámetro. Los efectos de la resolución espacial se analizaron mediante la comparación de la longitud máxima, el área y la curvatura del terreno para la zona afectada. Los

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá, Colombia. Contacto: omar.daza@uptc.edu.co

² Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá, Colombia. Contacto: enrique.vera@uptc.edu.co

³ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá, Colombia. Contacto: gladys.g19@gmail.com

resultados muestran que la extensión afectada es mayor para tamaños de pixel de 15 y 30 metros. Además, que la pérdida de detalle de las características del relieve para resoluciones de 15 y 30 metros puede modificar de manera significativa tanto el área afectada, como el alcance máximo y dirección del derrame.

Palabras Clave: gestión de integridad de ductos; impacto ambiental; sistemas de información geográfica; transporte de líquidos peligrosos.

Abstract

Simulations of hydrocarbon spills on the surface of the land are useful in environmental impact studies and pipeline integrity management. The identification and assessment of impacts caused by these events requires the simulation in geographic information systems software. The input data for these simulations are fluid properties and terrain characteristics. The relief is generally represented by digital elevation models in raster data format of different pixel sizes. In this study, we analyze the effect of the spatial resolution of digital elevation models on the simulation of areas affected by hydrocarbon spills. We propose an algorithm implemented in GRASS GIS free software and then apply it to an area with cartography at different scales. The simulation was performed for a mountainous zone in the central zone of Colombia, assuming a pipeline of 12 inches of diameter. The analysis of the spatial resolution effects required the comparison of the maximum length, area and curvature of the terrain for the affected area. The results show that the affected extension is larger for pixel sizes of 15 and 30 meters. In addition, the loss of detail of the features of the relief for resolutions of 15 and 30 meters can significantly modify both the affected area and the maximum reach and direction of the spill.

Keywords: environmental impact; Geographic Information Systems - GIS; hazardous liquid transport; pipeline management systems.

Resumo

As simulações de derrames de hidrocarbonetos sobre a superfície do terreno são úteis em estudos de impacto ambiental e de gestão de integridade de ductos. Para identificar e valorizar os impactos causados por estes eventos, implementaram-se simulações em programas de sistemas de informação geográfica, considerando como dados primeiramente as propriedades do fluido e as característica do terreno. O relevo é geralmente representado mediante modelos digitais de elevação em formato de dados raster de diferentes tamanhos de pixel. Neste estudo analisou-se o efeito da resolução espacial de modelos digitais de elevação sobre a simulação de áreas impactadas por derrames de hidrocarbonetos. Propôs-se um algoritmo implementado no software livre GRASS GIS e depois aplicou-se a uma zona com

	<p>cartografia baseie a diferentes escalas. A simulação realizou-se para uma zona montanhosa na zona central de Colômbia supondo o traçado de um oleoduto de 12 polegadas de diâmetro. Os efeitos da resolução espacial analisaram-se mediante a comparação da longitude máxima, a área e a curvatura do terreno para a zona impactada. Os resultados mostram que a extensão impactada é maior para tamanhos de pixel de 15 e 30 metros. Ademais, que a perda de detalhe das características do relevo para resoluções de 15 e 30 metros pode modificar de maneira significativa tanto a área impactada, como o alcance máximo e direção do derrame.</p> <p>Palavras-Chave: gestão de integridade de ductos; impacto ambiental; sistemas de informação geográfica; transporte de líquidos perigosos.</p>
--	---

INTRODUCCIÓN

Existen diferentes causas de rupturas de ductos que transportan fluidos peligrosos; principalmente asociadas a corrosión, daños por terceros o aspectos geofísicos. En caso de ruptura es muy importante establecer el volumen y rutas de derrame. Sobre el tema de volumen de derrame existe software especializados, basados en los principios de la hidráulica de tuberías, que permiten calcular con precisión estos volúmenes. Para establecer las rutas de derrame (no solo lineales sino el área afectada) no se tienen suficientes desarrollos de software aplicables a cualquier situación que permitan simular el derrame en función de las características del terreno. Este aspecto es uno de los más importantes en la gestión del riesgo en caso de liberación del líquido pues permite establecer planes de contingencia. Este estudio además de proponer el modelo de rutas de derrame evalúa el impacto en el uso de la información relacionada con el relieve del terreno a lo largo del cual transcurre el ducto. Se muestra la importancia de la resolución espacial de los modelos digitales de elevación (MDE) en este tipo de simulaciones.

Algunos de los impactos ambientales relacionados con el derrame de hidrocarburos incluyen la contaminación de corrientes hídricas, la contaminación del suelo, la mortalidad de especies animales y vegetales, la mortalidad y la morbilidad de seres humanos. La predicción del área afectada por un derrame permite incluir en los planes de contingencia las posibles alternativas de intervención, que podría incluir

una gran logística o tan solo un pequeño grupo que atienda en incidente (IPIECA & IOGP, 2015). Por otro lado, en la gestión de integridad del ducto, facilita la evaluación del riesgo para minimizar la afectación a la población, los empleados, el ambiente y los clientes (American Petroleum Institute, 2013). En ambos casos se busca orientar la toma de decisiones que permita el cumplimiento de los objetivos propuestos en planes ambientales o de integridad, reduciendo los costos asociados a las estrategias que proponga cada uno.

En las simulaciones de derrames de hidrocarburos en el suelo se tienen en cuenta estudios de infiltración, evaporación y la modelación del área afectada; integrados al uso de herramientas de análisis espacial. Para determinar la profundidad de infiltración en el suelo se han utilizado diferentes soluciones a la ecuación de Green-Ampt sobre diferentes tipos de suelo y con diferentes tipos de fluidos (Evans, 2013; Hussein, Jin, & Weaver, 2002; Simmons & Keller, 2005). Estas investigaciones han mostrado la utilidad de la ecuación de Green Ampt para la predicción del comportamiento del hidrocarburo en el suelo. Otros autores han propuesto el cálculo de la máxima infiltración en función del volumen de líquido derramado, la capacidad de retención del suelo y la viscosidad del fluido (Grimaz, Allen, Stewart, & Dolcetti, 2008). Con relación a la evaporación, se han planteado ecuaciones empíricas que no consideran los efectos de la velocidad el viento, el nivel de turbulencia, el área del derrame ni el espesor del derrame (Mervin F Fingas, 1999). Este método resulta conveniente cuando no se dispone de los datos atmosféricos necesarios para modelaciones más complejas. La simulación del área afectada se ha apoyado en programas de sistemas de información geográfica (SIG), en los que se requiere ingresar de la localización del origen del derrame, la superficie del terreno, el tipo de flujo, factores de resistencia del flujo, propiedades del suelo, propiedades del fluido, las condiciones ambientales, la cobertura del suelo y la hidrografía (Denby & Humber, 2004; Farrar, Galagan, Isaji, & Knee, 2005; Odegard & Humber, 2005; Paige, Park, & Posner, 2003). Para calcular el volumen potencial de derrame se han propuesto procedimientos también basados en el uso de herramientas SIG (Kiefer, 2008), los cuales ayudan a complementar e integrar la predicción. En este contexto

se supone que la implementación de simulaciones de derrames de hidrocarburos requiere la interacción de diversas disciplinas y la integración de información de varias fuentes y a diferentes escalas.

El nivel de detalle de los datos espaciales es determinante para cualquier análisis espacial, haciendo que los resultados sean de gran valor, o no, para la toma de decisiones. Uno de los datos de mayor importancia es el relacionado con la elevación del terreno, ya que es el que determina la dirección de flujo del fluido y el área que se puede ver afectada. Los estudios relacionados con el efecto de la resolución espacial de modelos digitales de elevación han mostrado la afectación en la precisión y las características de las superficies extraídas para mapas de susceptibilidad de deslizamientos pequeños (Mora, Lenzano, Toth, & Grejner-Brzezinska, 2014) y la importancia que tiene para el cálculo del factor de longitud de pendiente en estudios de erosión en surcos y en cárcavas. (Liu, Kiesel, Hormann, & Fohrer, 2011). En aplicaciones relacionadas con la hidrología se ha encontrado que la inclusión de los datos de entrada, para resoluciones de 50 metros a 1 kilómetro, en la simulación del balance hídrico no da lugar a errores significativos, aunque la eficiencia del modelo se reduce ligeramente (Zhao, Hörmann, Fohrer, & Gao, 2009). Mientras que otros estudios han permitido concluir que la selección de la resolución espacial del modelo digital de elevación depende la respuesta de interés dentro de la cuenca de estudio (Chaubey, Cotter, Costello, & Soerens, 2005). En el caso de las características físicas como la pendiente del cauce principal y el área de la cuenca son significativamente diferentes (Buakhao & Kangrang, 2016). Como consecuencia de estos efectos se han implementado metodologías que buscan determinar la incertidumbre de los modelos digitales de elevación (MDE) (Wechsler & Kroll, 2006) con el fin de conocer las limitaciones de los resultados obtenidos en su uso y se han planteado metodologías que relacionan los errores producidos por la resolución y la precisión de la elevación en MDE para mejorar los resultados en datos con baja resolución espacial y baja exactitud en elevación (Saksena & Merwade, 2015).

El objetivo del presente estudio es evaluar los efectos de uso de modelos digitales de elevación de diferentes resoluciones espaciales en la simulación de derrames de hidrocarburos. Se recurre a las principales fuentes de información espacial en Colombia, las cuales modelos digitales de elevación con resolución espacial de 30 metros y mapas base producidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi a escalas 1:2000 y 1:10000. La simulación se basa en el cálculo del volumen derramado para el perfil de la tubería, la simulación la ruta de derrame basado en modelos digitales de elevación, el análisis del producto retenido por causa de la porosidad del suelo y pérdidas por el efecto de la evaporación.

METODOLOGÍA

El estudio se realizó en una zona montañosa en el centro de Colombia (Figura 1), con disponibilidad de información espacial a diferentes escalas y que se tuvieran pendientes superiores a cero. La información utilizada fue mapas base a escalas 1:2.000, 1:10.000 y 1:25.000 del municipio de Tunja, en el departamento de Boyacá, producidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. La información de las características del suelo se extrajo de mapas y estudios geológicos de la zona. El primer referente fue el mapa geológico a escala 1:100.000 producido por el Servicio Geológico Colombiano y de forma complementaria se revisaron los estudios de caracterización y zonificación geotécnica (López & Reyes, 2001; Montes & Villate, 2001; Perez & Amézquita, 2003; Ramirez, 1991). El sector escogido para la modelación se ubica en un sinclinal por lo que se tienen pendientes medias y bajas. Se supone un trazado de una tubería de 12 pulgadas (30,48 cm) que transporta queroseno con un caudal de 800 m³/h y que atraviesa una zona sin cobertura vegetal. Se ubicaron cinco puntos como inicio del derrame para la simulación. Los puntos se localizan entre 2930 y 2926 metros y su ubicación se realizó teniendo en cuenta que el terreno tuviera pendientes superiores a cero, esto con el fin de evitar la modelación de encharcamientos. En cada uno de estos puntos se simuló el derrame de querosene y los parámetros requeridos para la modelación de la infiltración fueron obtenidos de Simmons y Keller (Simmons & Keller, 2005).

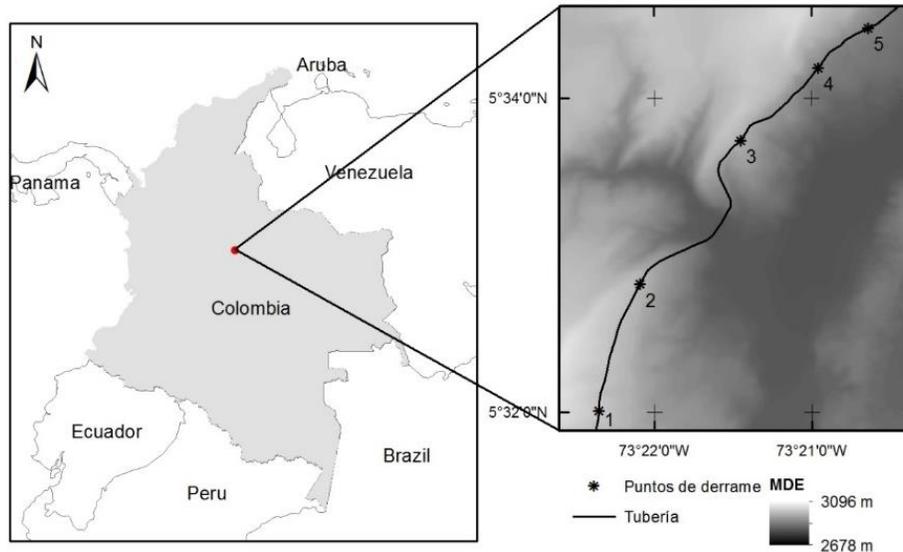


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que toda la información espacial no se encontró en el mismo formato de datos, ni en el mismo sistema de coordenadas, se transformaron e importaron de acuerdo con los requerimientos del programa y el modelo. Los datos fueron proyectados a un único sistema de coordenadas proyectadas con datum MAGNA origen Bogotá. La información se organizó en tres bases de datos diferentes teniendo en cuenta las escalas de trabajo indicadas. Finalmente se aplicaron las herramientas de análisis espacial para las tres escalas de trabajo definidas.

El proceso de análisis espacial propuesto en la figura 2 ilustra las herramientas de análisis utilizadas y los resultados intermedios. Los datos de entrada son las curvas de nivel (o el modelo digital de elevación), el punto de inicio del derrame y la zonificación de la infiltración y la evaporación. Se inicia con la interpolación espacial a partir de las curvas de nivel para la obtención del modelo digital de elevación, el cual será la base para determinar la dirección y área ocupada por el derrame. El procedimiento de análisis se implementó en el programa libre GRASS GIS (GRASS Development Team, 2015) utilizando un script en Shell. El script se basó principalmente en la aplicación de la calculadora de mapas del programa y los datos de entrada fueron capas raster de elevación, punto de inicio del derrame, infiltración

y evaporación. La herramienta *r.mapcalc* de GRASS permite la implementación de cálculos sobre píxeles de capas raster (Larson & Tweddale, 1991) y para el caso de este estudio se basaron en análisis de vecindad (Shapiro & Westervelt, 1992) sobre una ventana de 3x3 píxeles.

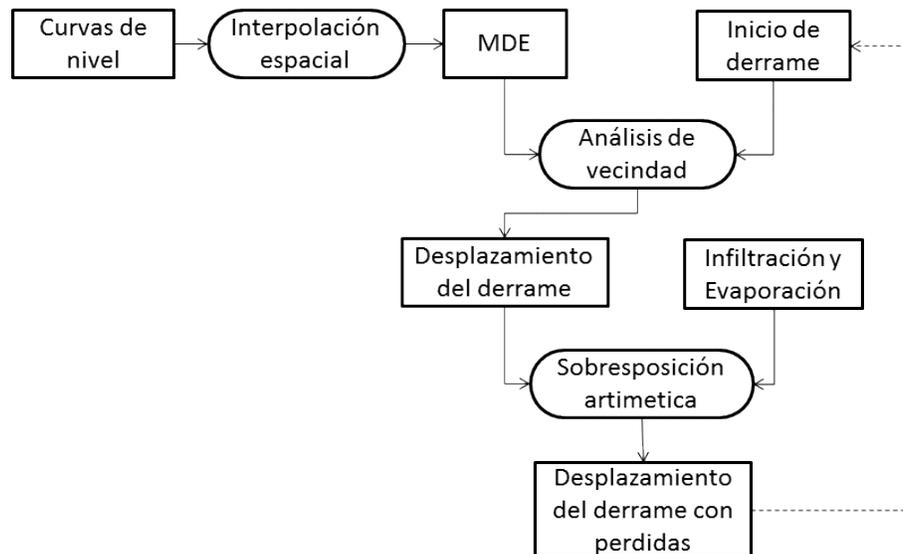


Figura 2. Proceso de análisis espacial empleado para la simulación de derrames.

Fuente: Elaboración propia

Considerando la variación en los resultados de la interpolación espacial para la generación de modelos digitales de elevación (Arun, 2013; Bosque & García, 2001), se utilizaron los métodos IDW (Inverse Distance Weighted) (Philip & Watson, 1982), ANUDEM (Hutchinson, Xu, & Stein, 2011) y Spline (Franke, 1982). Se utilizaron 67 puntos con elevación conocida y extraídos del mapa con mayor detalle para realizar la evaluación del MDE calculando el error medio cuadrático (RMS) de la interpolación. Las curvas de nivel de la cartografía 1:10.000 tienen una equidistancia de 25 metros y las correspondientes curvas de nivel de la cartografía 1:2.000 tienen una equidistancia de 2 metros. La generación de modelos digitales de elevación para las dos escalas fue realizada teniendo en cuenta los tamaños de píxel que corresponden a 5 metros para escala 1:2.000 y 15 metros para escala 1:10.000. El modelo con resolución espacial de 30 metros fue obtenido a través de la Gobernación de Boyacá. Con la comparación de la elevación para los puntos geodésicos conocidos y los obtenidos para cada modelo, se determinó el error medio

cuadrático con los resultados que se muestran en la Tabla 1. Para la simulación del derrame se utilizó el modelo con menor error medio cuadrático.

Tabla 1. Errores medios cuadráticos para los métodos de interpolación utilizados

Escala	Resolución	IDW	SPLINE	ANUDEM
1:2.000	5 m	1.74 m	0.92 m	1.69 m
1:10.000	15 m	12.86 m	16.46 m	12.98 m

Para los cinco puntos de inicio del derrame se calculan los volúmenes disponibles de derrame. Se supone una ruptura de 5 centímetros de diámetro que equivalente a aproximadamente el 15% del diámetro de la tubería. Para este diámetro se calculan los volúmenes disponibles de derrame para los cinco puntos seleccionados para duraciones de 75, 150 y 300 minutos. El volumen se calcula para una situación en la que se mantiene la presión de operación durante el derrame, utilizando la ecuación de Torricelli como lo propone Kutukov et al (Kutukov, Bakhtizin, Nabiev, Pavlov, & Vasiliev, 2001).

$$V = \mu At \sqrt{2gh} \quad (1)$$

En donde V el volumen derramado (m^3), μ es el coeficiente de descarga a través del orificio, t es el tiempo durante el cual ocurre el derrame (s), g es la constante de la aceleración de la gravedad (m/s^2) y h es la presión del fluido (m). Los volúmenes calculados fueron para el punto 1 575,4 m^3 , 1150,7 m^3 y 2301,4 m^3 ; para el punto 2 603,5 m^3 , 1206,9 m^3 y 2413,8 m^3 ; para el punto 3 606,4 m^3 , 1212,8 m^3 y 2425,6 m^3 ; para el punto 4 634,9 m^3 , 1269,8 m^3 y 2539,5 m^3 ; y para el punto 5 633,9 m^3 , 1267,3 m^3 y 2534,5 m^3 .

A partir del MDE, se realizó un análisis de vecindad iniciando en el pixel donde se localiza el derrame, con el cual se identifican los pixeles de menor elevación para repartir el volumen derramado en proporciones que dependen de la diferencia de

elevación entre el pixel central y sus vecinos, de acuerdo con lo propuesto por Machado (Machado, 1999). El análisis de vecindad se realiza para una ventana de 3x3 pixeles, para la cual se identifican los pixeles de menor elevación mediante la comparación del valor del pixel central con los ocho pixeles que lo rodean (Figura 3(a)). En este se muestra la ventana correspondiente al punto de inicio del derrame, por lo que este pixel de inicio coincide con el pixel central (Figura 3 (b)) y se tiene un volumen de 100 unidades. El volumen disponible en pixel central se distribuye proporcionalmente a la diferencia de elevación con los pixeles vecinos de menor elevación (Figura 3(c)). Por último, se restan las cantidades de líquido que se evaporan y se infiltran en el suelo (Figura 3(d)), quedando un volumen disponible para ser distribuido en los pixeles de menor elevación.

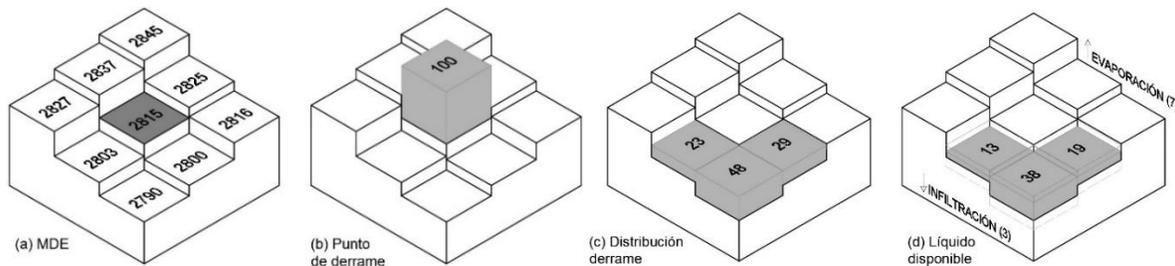


Figura 3. Análisis de proximidad en una ventana de 3x3 pixeles. Fuente: Elaboración propia

Para la cuantificación de la infiltración se utilizó el modelo de Green-Ampt que se presenta en la ecuación 1. Para este caso la porosidad, el frente húmedo y la conductividad hidráulica fueron tomados de los estudios adelantados por Simmons y Keller (Simmons & Keller, 2005).

$$\emptyset \left(\frac{d}{dt} z \right) = K \left(\frac{h + h_f + z}{z} \right) \quad (2)$$

En donde \emptyset es la porosidad, h_f es la succión en el frente húmedo (m), h es la profundidad del líquido sobre el terreno (m), z es la profundidad de infiltración (m) y K la conductividad hidráulica (m/s). Para las características del suelo en la zona de

estudio se tiene una porosidad de 0,82, la succión en el frente húmero es de 179,9 cm y una conductividad hidráulica de $1,15 \times 10^{-4}$ cm/s. Para estimar la profundidad del fluido sobre el suelo se utiliza la ecuación de Chezy para estimar la velocidad del derrame un asumiendo una sección triangular ancha se puede calcular la profundidad (h) de la ecuación (1). Para la sección triangular en la que el ancho es mucho mayor a la profundidad se puede aproximar el radio hidráulico como $R=h/2$. Y considerando el área de la sección como $A_t=h^2a$, en donde a es semi-ancho del canal simétrico de una profundidad unitaria. Con estas consideraciones la ecuación de Chezy se expresa como:

$$q = \frac{ah^{8/3}S^{1/2}}{2^{2/3}n} \quad (3)$$

En donde q es el caudal del derrame (m^3/s) y se puede estimar utilizando la ecuación (1), S es la pendiente del canal, calculada como la pendiente media en la dirección principal del derrame obtenida del MDE, y n es el coeficiente de rugosidad de Manning. La profundidad h del derrame sobre la superficie es de 3 centímetros para todos los puntos.

Para la evaporación del fluido derramado, se utilizan como referencia los estudios realizados por Fingas (Merv F. Fingas, 2013; Mervin F Fingas, 1999), de los que se obtienen ecuaciones para dos tipos de fenómenos de evaporación. Para nuestro caso se utilizó la siguiente expresión:

$$\%Ev = [0,59 + 0,013T]\sqrt{t} \quad (4)$$

En donde T es la temperatura ($^{\circ}C$) y t el tiempo (minutos). En este caso se consideran tiempos de una hora, dos horas y media y cinco horas, y una temperatura media de $13^{\circ}C$ para la zona de estudio. Una vez se modeló el desplazamiento del derrame del pixel central a sus vecinos, se resta a estos valores la infiltración y evaporación calculadas.

La evaluación del efecto de la resolución espacial se realizará calculando la longitud máxima, el área, el factor de forma, el índice de forma, las pendientes dentro del área del derrame y la curvatura plana. La longitud máxima del derrame se mide desde el punto de inicio siguiendo la ruta por la que se desplaza la mayor cantidad de líquido hasta el punto en el que se infiltra la totalidad del derrame. El área se calculará utilizando las herramientas propias del programa de SIG utilizado y corresponde con el número de píxeles sobre los cuales ocurre el derrame multiplicado por el área del píxel para cada resolución espacial. En el caso de las pendientes y la curvatura transversal (Moore, Grayson, & Ladson, 1991) se analizan de forma visual sobreponiendo el área afectada por el derrame. La curvatura transversal permite identificar la forma y medir la convergencia y divergencia del terreno (Wilson & Gallant, 2000), para analizar si esta forma tiene algún efecto sobre la distribución del derrame en MDE de tamaño de píxel de 15 y 30 metros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La simulación utilizando modelos digitales de elevación para predecir la dirección del flujo superficial, sumado a la cuantificación de pérdidas del líquido derramado por efectos de la evaporación y la infiltración permite identificar las áreas que posiblemente se afectarían en un evento de fuga de una tubería de transporte de líquidos peligrosos. La tubería considerada para este estudio para por el borde de una zona urbana y en la figura 4 se muestra el área potencialmente afectada para la simulación de un derrame ocurrido durante 300 minutos y con un modelo digital de elevación de 5 metros. El derrame se dirige directamente hacia la población, luego alcanza un canal natural, atraviesa una carretera y finalmente se distribuye en un área con edificaciones. Es importante aclarar que, aunque no se tuvieron en cuenta detalles del relieve causados por la infraestructura como las cunetas, las calles y las alcantarillas, el resultado muestra una buena aproximación a las áreas que podrían ser afectadas.

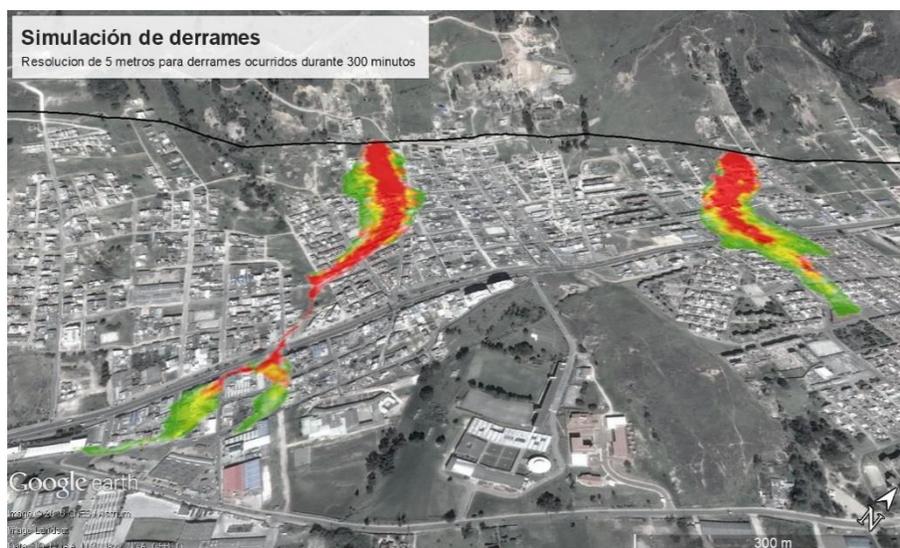


Figura 4. Sobreposición de los derrames sobre imágenes de satélite en Google Earth.

Los resultados de la simulación de un derrame muestran diferencias entre el área afectada para modelos digitales de elevación de 5, 15 y 30 metros. En el primer caso para el cálculo del derrame para un tiempo de 75 minutos las áreas afectadas para el modelo digital de elevación de 30 metros de resolución espacial fueron superiores a las calculadas para los modelos de 10 y 15 metros de tamaño de pixel. En la figura 5 se pueden ver las diferencias en el cálculo del área para los tres casos. En los puntos 1, 2 y 5 se presentan diferencias menores al 14% en las áreas para las diferentes resoluciones espaciales. Diferencias que están relacionadas directamente relacionadas con el tamaño del pixel y con terrenos con poca curvatura y con pendientes uniformes. Con relación a la distancia máxima alcanzada por el derrame para los puntos 2 y 5 se presenta un incremento de esta distancia, inferior al 20%, a medida que se reduce el tamaño de pixel. Para el caso del punto 1 se presenta una reducción de la distancia máxima entre los tamaños de pixel de 30 y 15 metros. Esta diferencia es del 2,5 % y es causada principalmente por el tamaño del pixel. En términos generales, en estos tres casos los efectos son principalmente de disminución de área e incremento de la distancia máxima alcanzada por el derrame con la reducción del tamaño de pixel.

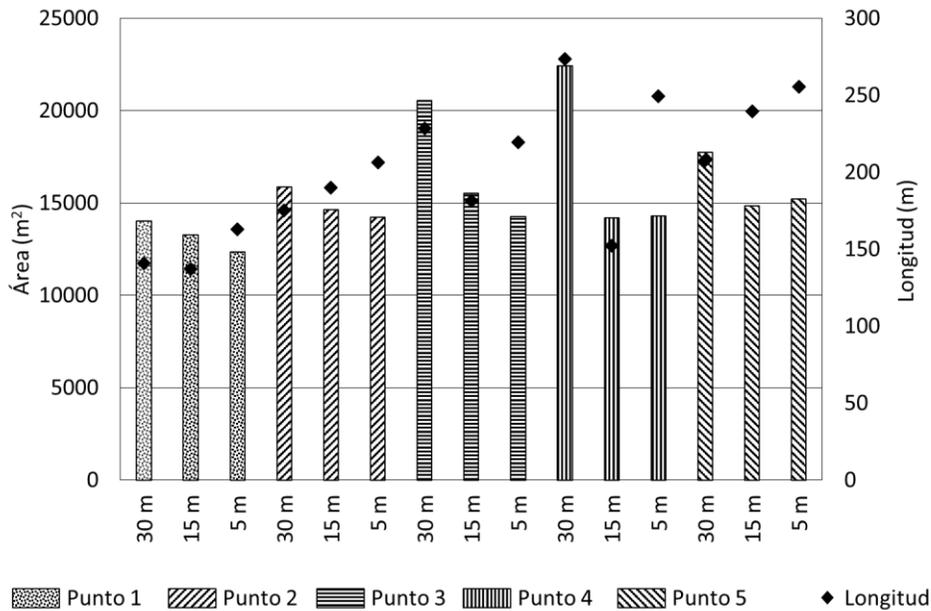


Figura 5. Área y distancia máxima para líquido liberado en 75 minutos.

Para el caso de los puntos 3 y 4 se presentan diferencias de área superiores al 30 %, lo cual es causado, además del tamaño del pixel, por la curvatura del terreno. Se presentan pequeñas convergencias y divergencias del terreno que son representadas en el modelo de mayor resolución espacial, pero que a medida que se aumenta el tamaño del pixel se pierden estos detalles del terreno. En la figura 6 se muestran las áreas afectadas para la simulación del derrame desde el punto 4 sobrepuestas con la curvatura del terreno obtenido del MDE de 5 metros. Como se indica en la figura, se presenta una zona cóncava, representada por los tonos grises claros, que limita el avance del derrame. Esta característica del terreno no es tan notable para la resolución espacial de 15 metros y desaparece para la resolución espacial de 30 metros. Por lo anterior, se tiene un avance en esta dirección del derrame que causa un incremento en el área afectada. Esta situación causa también que la distancia máxima alcanzada por el derrame para tamaños de pixel de 30 y 5 metros tengan variaciones menores al 9 %. Para los puntos 3 y 4 se presentan similitudes en el total de área afectada y la distancia del derrame, aunque como se puede ver en la figura su distribución y dirección presentan diferencias.

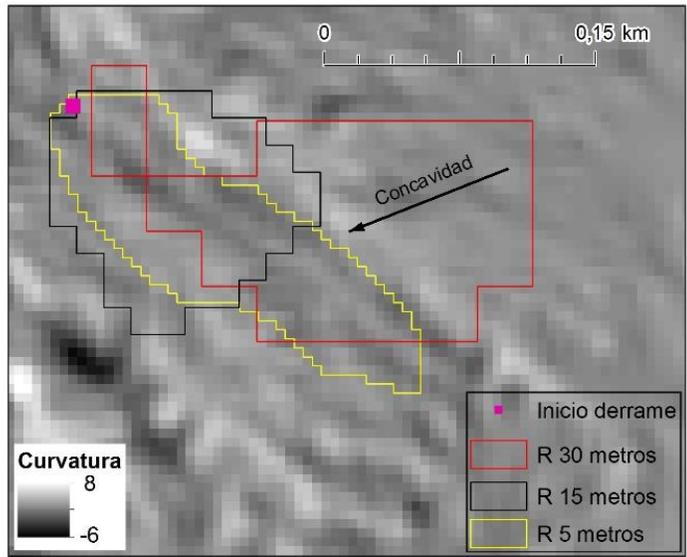
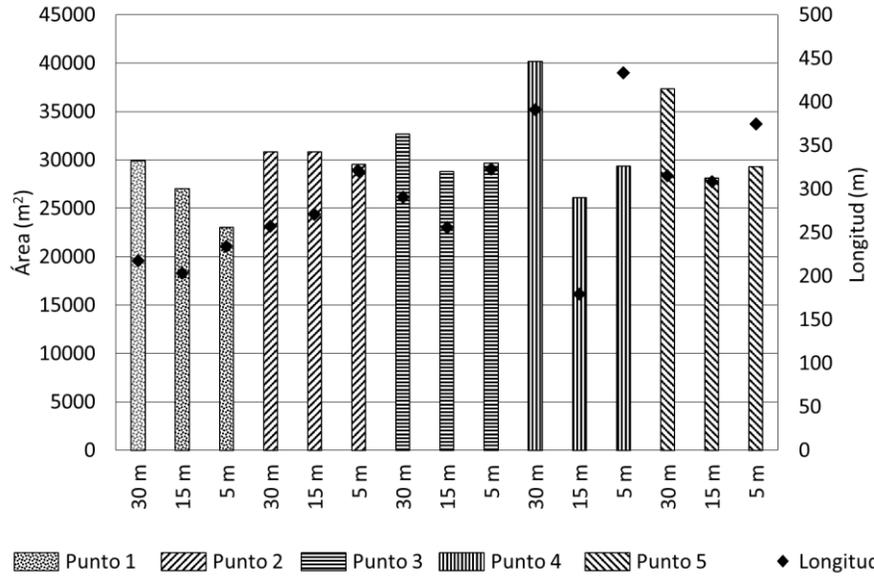


Figura 6. Simulación de derrames para líquido liberado en 75 minutos en el punto 4.

Para la simulación de derrame con un tiempo de liberación de 150 minutos se presentan comportamientos similares a los ya descritos para los puntos 1, 2 y 5. El área afectada es menos para los puntos 1 y 2 con resoluciones espaciales de 5 metros (Figura 7). Para estos mismos puntos y con la mayor resolución espacial la longitud de derrame es la máxima. El punto 2 presenta mayor similitud en el área afectada para las tres resoluciones, con una variación menor al 5%. Para este punto el terreno no presenta formas que sirvan de canal para el derrame por lo que se puede distribuir uniformemente en dirección descendente. En el punto 5 la diferencia entre las áreas afectadas alcanza el 21% causado por la pérdida del detalle de las características del terreno que hace que en la simulación en líquido derramado se infiltre a menores distancias del punto de origen. La distancia máxima tiene una tendencia creciente con la disminución del tamaño de pixel para el punto 2, aunque para los demás la mínima distancia ocurre para la resolución espacial de 15 metros. Siendo el punto 4 el que presenta mayor diferencia. Para este segundo volumen, se empiezan a notar

diferencias entre la resolución espacial de 15 metros y las otras dos, particularmente



en los puntos 1, 3 y 4.

Figura 7. Área y distancia máxima para líquido liberado en 150 minutos.

Retomando el análisis para la distribución espacial del derrame para el punto 4 y con un volumen liberado en 150 minutos, se tienen diferencias importantes causadas por la generalización de los datos de elevación. Se pueden ver en la figura 8 tres áreas de afectación diferentes. Para la resolución espacial de 30 metros el derrame se dirige en dirección este y después de los primeros 130 metros si distribuye uniformemente al llegar a una zona de poca curvatura. El área simulada para la resolución espacial de 15 metros presenta la menor distancia ya que el terreno para este MDE no presenta mayores curvaturas y hay una distribución uniforme desde el punto de inicio del derrame. Finalmente, la simulación para el MDE de 5 metros se ajusta a las curvaturas del terreno, por lo que inicialmente avanza con una dirección sureste y luego de 300 metros cambia hacia el sur. Para este volumen derramado el efecto de la pérdida de detalle de las características del relieve causa un efecto que afectaría la efectividad de la toma de decisiones para controlar el derrame.

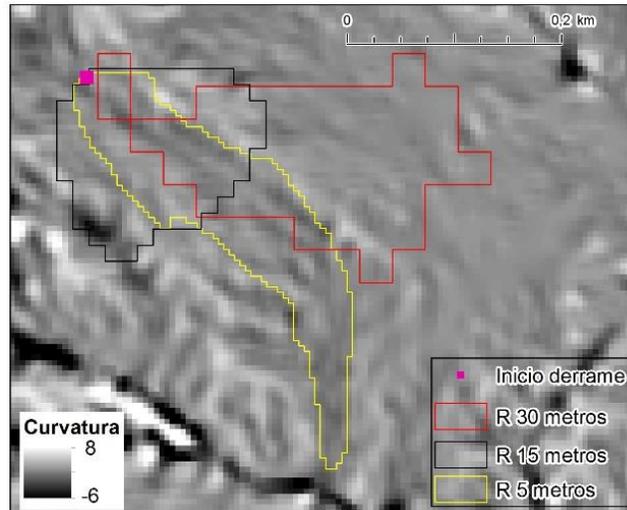


Figura 8. Simulación de derrames para líquido liberado en 150 minutos en el punto 4.

Finalmente, las áreas y distancias máximas de los derrames simulados para los cinco puntos, correspondientes a volúmenes producidos durante un tiempo de 300 minutos se muestran en la figura 9. Para este caso las áreas afectadas presentan menores diferencias para las tres resoluciones espaciales. La máxima diferencia ocurre nuevamente para el punto 4, en el cual el área afectada para la simulación con un MDE de 30 metros difiere en un 20% con la simulación del MDE de 15 metros. Al igual que en la simulación con menor volumen derramado, las mayores áreas se presentan para el modelo digital de elevación de 30 metros. También las distancias máximas alcanzadas por el derrame se presentan para el MDE de mayor resolución espacial, siendo los puntos 3 y 4 con que presentan mayores diferencias. Nuevamente las diferencias son causadas por la pérdida de detalle de la curvatura del terreno. Los puntos con menor diferencia coinciden con zonas de baja curvatura del terreno mientras que en los puntos 3, 4 y 5 el derrame alcanza canales naturales en las que se transporte el líquido y permite alcanzar distancias mayores.

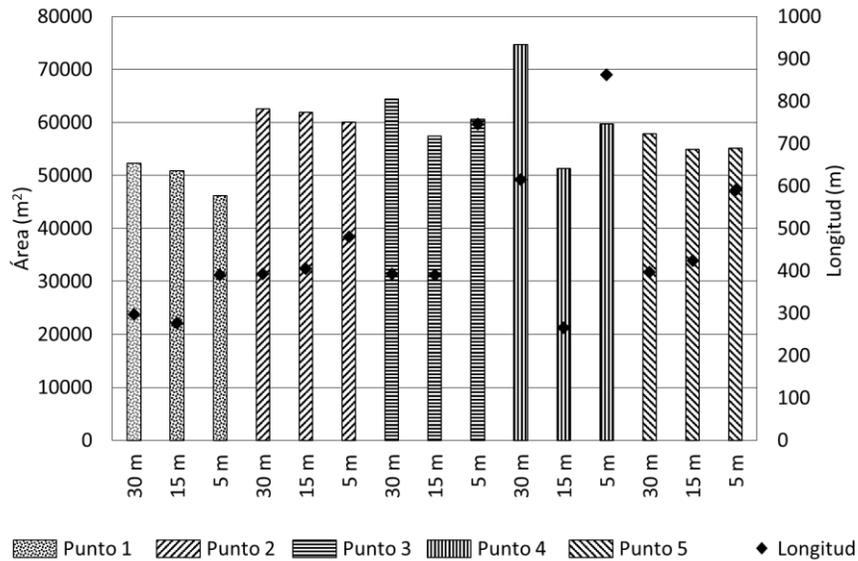


Figura 9. Área y distancia máxima para líquido liberado en 150 minutos.

Continuando con el análisis del punto 4, las diferencias resultan ser más evidentes cuando se visualiza la distribución espacial del volumen derramado. En la figura 10 la simulación realizada con el MDE de 5 metros muestra una afectación del derrame inicial con un ancho máximo de 150 metros, luego llega a un canal natural en el cual el ancho es de 10 metros y luego alcanza una zona de baja pendiente en la que el ancho del derrame se vuelve a incrementar. Esto resulta ser muy diferente al resultado de la simulación de en los MDE de 15 y 30 metros. La simulación en el máximo tamaño de pixel llega hasta una zona cóncava del terreno (canal natural) pero por la pérdida de este detalle el derrame continuo en la dirección inicial. En el caso de la resolución espacial de 15 metros la distancia resulta ser muy corta, situación causada por factores ya mencionados como la pérdida de detalle de las características del terreno, y los efectos de los métodos de interpolación espacial utilizados.

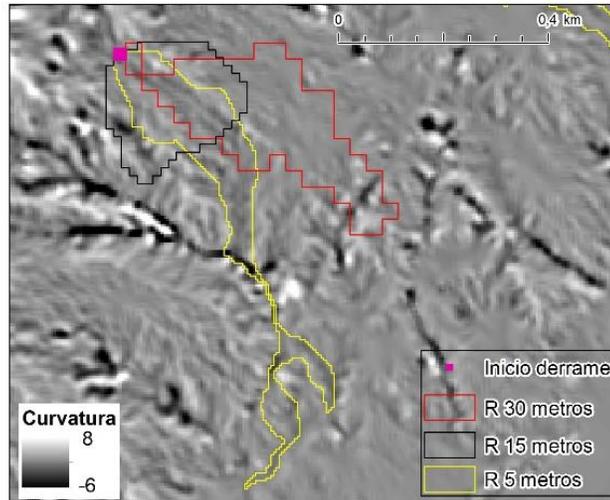


Figura 10. Simulación de derrames para líquido liberado en 150 minutos en el punto 4.

CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó el efecto de modelos digitales de elevación de resoluciones de 5, 15 y 30 metros sobre la modelación de derrames de hidrocarburos. Se identifican cambios significativos en los resultados de la modelación para algunos de los puntos. Estos cambios en los resultados de la modelación son causados principalmente por la pérdida de los detalles del relieve y por otro lado por el efecto del tamaño del pixel. Estos resultados resultan ser útiles para poder precisar la implementación de acciones que reduzcan el impacto ambiental causado por este tipo de eventos.

En los puntos en los que las diferencias en el área total afectada y la distancia máxima alcanzada por el derrame presentaron pocas diferencias son aquellos en los que el terreno presenta pendientes uniformes con pocos cambios de curvatura. Por otro lado, en los puntos con mayores diferencias se tienen curvaturas que desaparecen con la reducción de la resolución espacial. El efecto de la resolución espacial del MDE, en este segundo caso resulto ser significativamente alto. Por lo tanto, no es posible generalizar un efecto para cualquier simulación de derrame sobre la superficie del suelo. Se deben tener en cuenta estos resultados en los casos que no se disponga de información detallada del terreno, y realizar trabajos adicionales de verificación en campo.

Los análisis se limitaron a zonas con pendientes superiores a 5% por lo que no se deben interpretar para zonas con pendientes bajas o para planicies. En futuros estudios se podrían implementar modelaciones en áreas con características topográficas específicas con el fin de poder identificar posibles formas de corregir las modelaciones de baja resolución espacial. De igual forma se podrían incluir en la modelación variables como la velocidad de avance del derrame. Esto permitirá evaluar el tiempo de respuesta de forma más confiable. Otro aspecto a considerar es el análisis detallado de eventos de derrame en zonas de muy baja pendiente en donde los modelos digitales de elevación de baja resolución espacial pierden características topográficas de gran importancia.

En cuanto a la aplicabilidad de las ecuaciones de infiltración y evaporación, se encontró que para la infiltración se tienen limitaciones relacionadas con los parámetros del modelo Green-Ampt, ya que se requieren estudios específicos para su determinación experimental y solo se podrían utilizar valores de referencia que fueron obtenidos para condiciones muy cercanas al caso particular de estudio. De igual forma, para una adecuada estimación de la infiltración se requiere una zonificación de las características del suelo, datos que no podrían ser difíciles de adquirir. En este sentido se podrían explorar tecnologías de sensoramiento remoto hiperespectral para la caracterización del suelo, partiendo de las observaciones hechas por (Camacho-Velasco, Vargas-García, Rojas-Morales, Castillo-Castelblanco, & Arguello-Fuentes, 2015).

Por otro lado, la determinación de la evaporación con la ecuación referenciada, tendría como única limitante que se debe asumir un tiempo de referencia, ya que la determinación del tiempo de evaporación depende de fenómenos como la velocidad del flujo superficial y su infiltración del fluido; y para análisis de grandes extensiones, donde se presente variación en la temperatura, se requeriría información climatológica que permita espacializar la temperatura, lo cual no sería viable para áreas con pocas estaciones de medición de esta variable. Situación que también podría demandar la adquisición de mayores volúmenes de información, que sumada al volumen de datos requeridos para caracterizar el suelo por sensoramiento remoto, podrían requerir el

tratamiento de otras tecnologías que no afecten el desarrollo (Vega, 2012; Castro-Romero, Gonzalez-Sanabria; Callejas-Cuervo; 2012).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Petroleum Institute. (2013). *Managing Systems Integrity for Hazardous Liquid Pipelines*. Wanshington D.C.
- Arun, P. V. (2013). A comparative analysis of different DEM interpolation methods. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16(2), 133–139. <http://doi.org/10.1016/j.ejrs.2013.09.001>
- Bosque, J., & García, R. (2001). Metodos de interpolacion para la elaboracion de un modelo digital de elevaciones. *Estudios Geográficos*, LXII(245), 605–620. <https://doi.org/10.3989/egeogr.2001.i245.268>
- Buakhao, W., & Kangrang, A. (2016). DEM Resolution Impact on the Estimation of the Physical Characteristics of Watersheds by Using SWAT. *Advances in Civil Engineering*, 2016, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/8180158>
- Camacho-Velasco, A., Vargas-García, C. A., Rojas-Morales, F. A., Castillo-Castelblanco, S. F., & Arguello-Fuentes, H. (2015). Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana. *Revista Facultad de Ingeniería (Rev. Fac. Ing.)*, 24(40), 17–29. <https://doi.org/10.19053/01211129.3845>
- Castro-Romero, A., Gonzalez-Sanabria, J. S., & Callejas-Cuervo, M. (2012). Utilidad y funcionamiento de las bases de datos NoSQL. *Revista Facultad de Ingeniería (Rev. Fac. Ing.)*, 21(33), 21–32.
- Chaubey, I., Cotter, A. S., Costello, T. A., & Soerens, T. S. (2005). Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty. *Hydrological Processes*, 19(3), 621–628. <http://doi.org/10.1002/hyp.5607>
- Denby, A., & Humber, J. (2004). Overland Flow: Comparison of Modelling Methods. In *12th Annual GIS for Oil & Gas Conference and Exhibition* (pp. 1–6). Houston.
- Evans, C. M. (2013). *Modelling the 2D Infiltration of Oil in Porous Media Including vertical percolation and lateral spreading*. UNIVERSITY OF LONDON. Retrieved from <https://www.kcl.ac.uk/sspp/departments/geography/study/masters/dissertations/Di>

ssertation-2013-Evans.pdf

- Farrar, W., Galagan, C., Isaji, T., & Knee, K. (2005). GIS Technology Applied to Modeling Oil Spills on Land. In *25th Annual Esri International User Conference*. San Diego, California: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc05%20papers/pap2129.pdf>.
- Fingas, M. F. (1999). THE Evaporation of Oil Spills : Development and Implementation of New Prediction Methodology. In *Intenational Oil Spill Conference* (pp. 281–287). Seattle, Washington. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-1999-1-281>
- Fingas, M. F. (2013). *Modeling Oil and Petroleum Evaporation*. *Journal of Petroleum Science Research* (Vol. 2). <http://doi.org/10.1002/9781118989982.ch7>
- Franke, R. (1982). Smooth interpolation of scattered data by local thin plate splines. *Computers and Mathematics with Applications*, 8(4), 273–281. [http://doi.org/10.1016/0898-1221\(82\)90009-8](http://doi.org/10.1016/0898-1221(82)90009-8)
- GRASS Development Team. (2015). Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Open Source Geospatial Foundation. Retrieved from <http://grass.osgeo.org>
- Grimaz, S., Allen, S., Stewart, J. R., & Dolcetti, G. (2008). Fast prediction of the evolution of oil penetration into the soil immediately after an accidental spillage for rapid-response purposes. In *3rd International Conference on Safety & Environment in Process Industry*. Rome. Retrieved from <http://www.aidic.it/CISAP3/>
- Hussein, M., Jin, M., & Weaver, J. W. (2002). Development and verification of a screening model for surface spreading of petroleum. *Journal of Contaminant Hydrology*, 57(3–4), 281–302. [http://doi.org/10.1016/S0169-7722\(01\)00220-0](http://doi.org/10.1016/S0169-7722(01)00220-0)
- Hutchinson, M., Xu, T., & Stein, J. (2011). Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. *Geomorphometry*, 19–22.
- IPIECA, & IOPG. (2015). *Oil spills: Inland Responde*. London.
- Kiefer, R. (2008). GIS Method for Calculating Maximum Potential Spill Volume Due to Natural Landforms Ryan Kiefer, D. Retrieved from <http://www.gis.smumn.edu/GradProjects/KieferR.pdf>
- Kutukov, S., Bakhtizin, R., Nabiev, R., Pavlov, S., & Vasiliev, A. (2001). Simulation Method of Pipeline Sections Ranking by Environmental Hazard Due to Oil Damage Spill. *Oil and Gas Business Journal*, (2). Retrieved from

<http://ogbus.com/article/simulation-method-of-pipeline-sections-ranking-by-environmental-hazard-due-to-oil-damage-spill/>

- Larson, M., & Tweddale, S. (1991). *Performing Map Calculations on GRASS Data : r.mapcalc Program Tutorial*. Retrieved from https://grass.osgeo.org/uploads/grass/history_docs/mapcalc.pdf
- Liu, H., Kiesel, J., Hormann, G., & Fohrer, N. (2011). Effects of DEM horizontal resolution and methods on calculating the slope length factor in gently rolling landscapes. *Catena*, 87(3), 368–375. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2011.07.003>
- López, L., & Reyes, A. (2001). *Caracterización geomecánica suelos de Tunja sector 1*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Machado, D. (1999). Desarrollo de un SIG en plataforma Arc-Info, para Modelar Espacialmente Derrames de Petróleo en Tierra. Caso de estudio: Campos Petroleros de la Región Oriental de Venezuela. In *VI Conferencia Latinoamericana de usuarios ARC/INFO y ERDAS*. Caracas. Retrieved from <http://proceedings.esri.com/library/userconf/latinproc99/ponencias/ponencia21.html>
- Montes, A., & Villate, J. (2001). *Caracterización geotécnica preliminar - suelos de Tunja Sector 2*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, R. (1991). Digital Terrain Modeling : A Review of Hydrological Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30. <http://doi.org/DOI: 10.1002/hyp.3360050103>
- Mora, O. E., Lenzano, M. G., Toth, C. K., & Grejner-Brzezinska, D. a. (2014). Analyzing the Effects of Spatial Resolution for Small Landslide Susceptibility and Hazard Mapping. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1(November), 293–300. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-293-2014>
- Odegard, L., & Humber, J. (2005). Comprehensive Modeling : Inventorying Directly and Indirectly Affected High Consequence Areas. In *Geo Tech Event 2005* (pp. 1–6). Retrieved from <http://www.docstoc.com/docs/150342753/Inventorying-Directly-and-Indirectly-Affected-High-Consequence-Areas>
- Paige, D., Park, N., & Posner, J. (2003). Modeling pipeline spill determines impact on HCAs. *Oil and Gas Journal*, 101(12), 72–77. Retrieved from

<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0037463705&partnerID=tZOtx3y1>

- Perez, G., & Amézquita, L. (2003). *Estudio geotécnico para la restauración morfológica de antiguas zonas de explotación de arcilla en el noroccidente de la ciudad de Tunja*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Philip, G. M., & Watson, D. F. (1982). A precise method for determining contoured surfaces. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 22(1), 205–2012. <https://doi.org/10.1071/AJ81016>
- Ramirez, O. (1991). Zonificación geotécnica de Tunja. *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*, 4(1), 107–114.
- Saksena, S., & Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 530, 180–194. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.069>
- Shapiro, M., & Westervelt, J. (1992). *An Algebra for GIS and Image Processing*. Retrieved from https://grass.osgeo.org/uploads/grass/history_docs/mapcalc-algebra.pdf
- Simmons, C. S., & Keller, J. M. (2005). *Liquid Spills on Permeable Soil Surfaces: Experimental Confirmations*. Richland, Washington. <https://doi.org/10.2172/888713>
- Vega, O. A., (2012). Efectos colaterales de la obsolescencia tecnológica. *Revista Facultad de Ingeniería (Rev. Fac. Ing.)*, Enero-Abril, 21(32), 55-62.
- Wechsler, S. P., & Kroll, C. N. (2006). Quantifying DEM Uncertainty and its Effect on Topographic Parameters. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(9), 1081–1090. <http://doi.org/10.14358/PERS.72.9.1081>
- Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley.
- Zhao, G. J., Hörmann, G., Fohrer, N., & Gao, J. F. (2009). Impacts of spatial data resolution on simulated discharge, a case study of Xitiaoqi catchment in South China. *Advances in Geosciences*, 21, 131–137. <http://doi.org/10.5194/adgeo-21-131-2009>