



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias en Recursos Hídricos y Ambiental

“PROTOTIPO MECATRÓNICO PARA LA MODELACIÓN DE CUENCAS”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Ing. Israel Ruiz González

Dirigido por:

Dr. Martin Alfonso Gutiérrez López

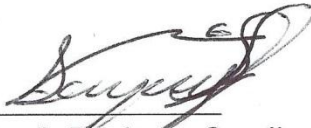
SINODALES

Dr. Martin Alfonso Gutiérrez López
Presidente

M. en I. Filiberto Luna Zúñiga
Secretario

M. en I. Guillermo San Román García
Vocal

Dr. Eduardo Álvarez Mendiola
Suplente

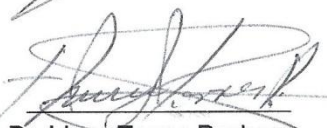

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Marzo de 2012
México

Resumen

Se construye un modelo mecatrónico que posicione motores y genere a escala reducida el relieve topográfico de una cuenca, acoplado a un simulador de lluvia; permitirá modelar la distribución idealizada del escurrimiento ocasionado por un evento de lluvia simulado.

Un modelo digital de elevaciones es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Un terreno real puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua $z = z(x, y)$ donde z representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas (x, y) y z es una función que relaciona la variable con su localización geográfica.

En Filipinas se tiene el proyecto de generar estructuras en 3d de cartón que modelan las condiciones de relieve a partir de curvas de nivel.

Los MDE son generados y manipulados en ArcGis con las herramientas para interpolación raster del programa y se exportan en formato txt. En Matlab, tiene la capacidad de leer este vector .txt y procesar los valores para normalizar y redondear, cada valor según la resolución de los motores a utilizar. Además Matlab accesa al puerto serie de la computadora y permite el intercambio de datos con microcontroladores a través de este puerto, enviando así los datos de elevación correspondientes a los controladores de los motores.

Palabras Clave: Modelo digital de elevaciones, modelación hidrológica, mecatrónica, ArcGis, Matlab.

Abstract

In this thesis, the authors build a mechatronic model that controls linear motors that simulate in reduced scale the contours of a basin, this model fitted in a rain simulator; let us know the idealized runoff distribution in a basin caused from a simulated rain event.

A digital elevation model is a numeric structure of data that represents the spatial distribution of a terrain surface altitude. A real terrain can be described in a generic form as a bivariable continuous function $z = z(x,y)$ where z represents the terrain altitude in the coordinate point (x,y) and z is a function that relates the variable with its geographic position.

In Philippines the P3DM is held, this project generates 3d cardboard structures that model the relief conditions from contours.

The DEM are generated and manipulated in ArcGis with the raster interpolation tools included in the program. These Dem are exported in .txt format to Matlab. In Matlab this .txt file is opened and processed. The elevation values are processed, the values are normalized and rounded off, each value according to the resolution is a motor in the prototype. Besides Matlab access the computer's serial port, this enables data exchange between the CPU and microcontrollers, sending elevation data for each motor.

Keywords: Digital Elevation Models, Hydrologic Modelling, Mechatronics, ArcGis, Matlab.

Agradecimientos

Por este medio quiero agradecer a las instituciones y personas que han hecho posible este trabajo:

En primer lugar, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología pues al otorgarme una beca me permitió realizar mis estudios de posgrado de la Maestría en Ciencias en Recursos Hídricos y Ambiental. Dichos estudios y la investigación correspondiente se da por concluida por medio de la redacción de la presente tesis.

A mi director de tesis, el Dr. Martin Alfonso Gutiérrez López, porque con su labor docente me introdujo a la investigación.

A mis profesores y compañeros, por los aprendizajes brindados y la oportunidad de entender lo que la Mecatrónica y la programación pueden aportar a la hidráulica y la ingeniería civil.

A mis padres, por su confianza y apoyo en todo momento.

PROTOTIPO MECATRÓNICO PARA LA MODELACIÓN DE CUENCAS

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Introducción.....	6
1.2. Justificación.....	6
1.3. Descripción del problema.....	8
1.4. Hipótesis y Objetivos.....	10
2. ANTECEDENTES	12
2.1. La modelación de hidrología de montaña: El último desafío.....	12
2.2. Disciplinas involucradas.....	13
2.3. Hidrología e Ingeniería ambiental	14
2.4. Mecatrónica.....	17
2.5. Computación	19
2.6. Participatory 3 Dimensional Modelling	20
3. METODOLOGÍA.....	23
3.1. Los modelos digitales de elevación.....	23
3.2. Construcción del MDE	27
3.3. Marco teórico (Interpolación).....	29
3.3.1 Inverso ponderado de la distancia	30
3.3.2 Kriging.....	31
3.3.3 Spline.....	33
3.3.4 El algoritmo de Hutchinson	36
3.4. Los sistemas de información geográfica	42
3.5. ArcGis	43
3.6. Matlab	43

3.7.	Arduino.....	44
3.8.	Los motores a pasos	46
3.8.1.	Motor a pasos unipolar	47
3.8.2.	Motor a pasos bipolar	49
3.9.	El puente H	50
3.10.	Conversión de movimiento angular en lineal	51
3.11.	Modelos Lluvia Escurrimiento	55
3.12.	Simulación del proceso lluvia escurrimiento.....	58
3.12.1.	Precipitación total.....	58
3.12.2.	Precipitación en exceso	59
3.12.3.	Método de Haan.....	63
3.12.4.	Método del hidrograma unitario del SCS.....	66
4.	RESULTADOS	68
4.1.	Representación de motores por píxel	68
4.2.	Conversión del MDE desde ArcGis a .txt	72
4.3.	Lectura y tratamiento de un .txt en Matlab	73
4.3.2	Microcuenca de Menchaca	75
4.3.3	Microcuenca de los Tanganos	76
4.4.	Envío de datos de control desde Matlab al Microcontrolador	78
4.5.	Algoritmo de control en el Arduino	79
4.6.	Pruebas de repetitividad en el posicionamiento	79
5.	CONCLUSIONES.....	81
6.	REFERENCIAS	82

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Se plantea construir un modelo mecatrónico que posicione motores y genere a escala reducida el relieve topográfico de una cuenca, acoplado a un simulador de lluvia; permitirá conocer la distribución real de la precipitación para caracterizar el proceso lluvia-escorrimento.

Felicísimo (1992) señala que un modelo digital de elevaciones es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Un terreno real puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua $z = z(x, y)$ donde z representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas (x, y) y z es una función que relaciona la variable con su localización geográfica. En un modelo digital de elevaciones se aplica la función anterior sobre un dominio espacial concreto, D . En consecuencia, un MDE puede describirse genéricamente como $MDE = (D, z)$. En la práctica, la función no es continua sino que se resuelve a intervalos discretos, por lo que el MDE está compuesto por un conjunto finito y explícito de elementos. Los valores de x y y suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema de coordenadas plano, habitualmente un sistema de proyección cartográfica. La generalización inherente a la discretización del modelo implica una pérdida de información que incrementa el error del MDE y, en consecuencia, se propaga a los modelos derivados. Por este motivo, se han ensayado numerosas opciones en la búsqueda de una forma de representar y almacenar la altitud que equilibre la pérdida de información y algunos efectos secundarios indeseables como el excesivo tamaño de los archivos o la dificultad de manejo.

1.2 JUSTIFICACIÓN:

En los últimos años, la degradación ambiental en México se ha convertido en un tema principal en el debate nacional. Los problemas de degradación de suelos,

deforestación, sobreexplotación y deterioro de recursos hídricos y pérdida de biodiversidad, dejaron de considerarse como simples datos estadísticos para constituir la causa de numerosos conflictos sociales. Este panorama desencadenó que en la agenda actual, temas relacionados con el agua y el manejo forestal se presenten como asuntos de seguridad nacional.

En la última década se ha fortalecido el sistema institucional para la gestión ambiental, principalmente en temas relacionados con los recursos hídricos (Cotler 2004). Sin embargo, durante este tiempo los problemas ocasionados por la escasez de agua, la disminución de su calidad y el aumento de desastres naturales se han registrado con mayor frecuencia. Considerando que los ecosistemas naturales se basan en la interacción continua de todos sus elementos, en el tiempo y en el espacio, es imposible solucionar un problema hidrológico manipulando sólo uno de ellos.

El entendimiento de la dinámica del agua en un territorio pasa por el conocimiento espacial del ciclo hidrológico. Por ello, resulta conveniente utilizar un enfoque de cuenca para entender las interrelaciones entre los recursos naturales (clima-relieve-suelo-vegetación), así como la forma en que se organiza la población para apropiarse de ellos y su impacto en la cantidad, calidad y temporalidad del agua.

En la búsqueda de instrumentos de gestión que posibiliten la interdisciplinariedad de políticas sectoriales, diversos países han encontrado en el manejo integral de cuencas un instrumento de planeación y de gestión adecuado. El manejo integral de cuencas no sólo permite la gestión equilibrada de los recursos naturales, sino también la integración de los actores involucrados en una sola problemática en lugar de atender varios problemas sectoriales dispersos. La elaboración de un enfoque integrado que supere la fragmentada visión sectorial es determinante para la optimización del recurso hídrico. La vigencia del manejo integral de cuencas ha prevalecido en América Latina a lo largo de las últimas décadas.

En México, los cambios tienden a transitar de un enfoque sectorial y centralista hacia uno integral, descentralizado y de mayor participación social. Sin embargo, las deficiencias institucionales y la ausencia de consensos entre las instituciones son aspectos que frenan el conocimiento y la gestión adecuada de las cuencas. En México

cada dependencia gubernamental del sector medio ambiental presenta una regionalización diferente ya sea hidrológica, hidrológica-administrativa, hidrológica-forestal o ecológica, lo cual, evidentemente, dificulta el consenso para la elección de una unidad territorial única para la aplicación de políticas públicas.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA:

Disponibilidad del agua en México:

La clasificación ecológica identifica a México como un país predominantemente árido o semiárido. La escasez de agua se acentúa por su muy desigual distribución tanto con relación al régimen pluviométrico y las fuentes de disponibilidad, como en relación con los centros de utilización. El promedio anual de precipitaciones es de 780 mm, equivalente a 1 532 millones de m³, sin embargo la zona norte y el altiplano, que representan 52% del territorio, no alcanzan 500 mm anuales. En el sureste, una región equivalente al 7% de la extensión nacional supera los 2000 mm por año, y en regiones de Veracruz, Tabasco y Chiapas la precipitación media anual sobrepasa los 3 200 mm. Del total de precipitación, 72% se pierde, desde un punto de vista económico, en evapotranspiración, y quedan efectivamente disponibles 410 000 millones de m³ de agua de escurrimiento superficial. Casi 60% de este caudal es aportado por siete ríos: Usumacinta, Grijalva, Pánuco, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas y Santiago, que drenan un área de 530 310 km², equivalentes a 27% de la superficie total mexicana.

El agua es uno de los recursos naturales más valiosos de cualquier país debido a los beneficios sociales y económicos que se derivan de su consciente explotación; sin embargo, junto con las ventajas existen también situaciones extremas tales como las inundaciones y las sequías.

El relieve representa un importante factor en la distribución de las lluvias, ya que actúa como una barrera o un modificador de la dirección del viento. Usualmente esta distribución de la precipitación es muy irregular entre las dos vertientes de una misma cadena montañosa, sobre todo cuando su eje es más o menos perpendicular a la dirección de los vientos húmedos dominantes (Salas 1999).

Aún antes de la aparición del hombre sobre la Tierra, el entorno físico mantenía un equilibrio: el agua que llovía en las zonas montañosas bajaba por los cauces e inundaba las zonas bajas, para luego volver a su estado inicial. Posterior a la aparición del hombre se desarrollaron asentamientos humanos en las zonas aledañas a los cuerpos de agua trayendo consigo, cuando se desborda una corriente, problemas de inundaciones. Adicionalmente, la degradación del medio ambiente, tal como la deforestación, la erosión, etc., modifica la respuesta hidrológica de las cuencas, incrementando la ocurrencia y la magnitud de inundaciones.

En muchos casos las poblaciones han perdido el contacto con su entorno, y aun dentro de la región en la que viven y trabajan, no conocen los sitios por donde escurre el agua de forma natural; el más claro ejemplo de esta situación se observa en algunas ciudades, donde las corrientes han sido canalizadas e incluso convertidas en calles o avenidas; en cuanto al agua de lluvia, al igual que el agua residual, son drenadas por el alcantarillado y la gente olvida como se produce esta situación.

La modificación del terreno en las cuencas produce daños cada vez más considerables por efecto de las inundaciones, debido a que:

- Se producen crecientes mayores que las que habían ocurrido (avenidas históricas) cuando las cuencas eran naturales o la degradación del medio ambiente era mínima.

- El tiempo que debe transcurrir para que los efectos de una inundación sean percibidos por la población ha disminuido, provocando que en ocasiones la respuesta de las autoridades y de la población se vea comprometida.

A nivel mundial las inundaciones están aumentando más rápidamente que ningún otro desastre. De acuerdo con la Cruz Roja Internacional, durante el periodo 1919-2004, han colaborado con ayuda en más eventos de inundaciones que de cualquier otro tipo, en gran medida porque el acelerado desarrollo de las comunidades modifica los ecosistemas locales, incrementando el riesgo de inundación al que están expuestas muchas poblaciones.

En México han ocurrido, por efecto de desastres, alrededor de 10,000 muertes, de 1980 a 1999, aproximadamente 500 cada año. Las pérdidas económicas calculadas alcanzan 9,600 millones de dólares, con un monto promedio anual cercano a los 500 millones de dólares (Bitrán, 2003). Una estimación de las víctimas fatales en México a consecuencia de fenómenos hidrometeorológicos arroja 2,767 personas, lo que representa un promedio cercano a los 140 individuos fallecidos anualmente. La cantidad de daños totales por este tipo de fenómenos, de 1980 a 1999, fue de 4,537 millones de dólares, lo que en promedio arroja 227 millones de dólares en pérdidas anuales.

Finalmente, es importante hacer una reflexión sobre este tipo de eventos, particularmente respecto a la situación de nuestro país: en las planicies de los grandes ríos de México, prácticamente todos los años se producen inundaciones derivadas de sus desbordamientos. La causa principal es la pérdida de la capacidad hidráulica de esas corrientes, una vez que dejan la zona de sierras y se adentran en las planicies. En contraste, en las zonas semidesérticas las inundaciones son menos frecuentes, por lo que suelen olvidarse; sin embargo, cuando se presentan causan serios problemas.

1.4 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS:

Hipótesis:

Un modelo mecatrónico que posicione motores y genere a escala reducida el relieve topográfico de una cuenca, acoplado a un simulador de lluvia; permitirá conocer la respuesta de la cuenca, en función de la precipitación para caracterizar el proceso lluvia-escurrimiento.

Objetivo General:

Diseñar un prototipo mecatrónico que posicione motores para simular un modelo digital de elevaciones de una cuenca y que acoplado a un simulador de lluvia permita conocer la respuesta de la cuenca, en función de la precipitación en la cuenca modelada.

Objetivos Específicos:

- Determinar el número de motores adecuados para generar un modelo de una cuenca de acuerdo a la resolución del modelo digital de elevaciones
- Diseñar y acoplar una transmisión que permita convertir movimiento circular en lineal para posicionar un actuador según una altura establecida en la computadora
- Seleccionar un controlador adecuado para la manipulación del total de motores asignados al prototipo
- Programar una rutina que permita la transmisión de datos desde un modelo digital de elevaciones al controlador escogido y este genere los pulsos necesarios para posicionar los motores de acuerdo a su elevación correspondiente
- Diseñar construir y probar la transmisión, el posicionamiento y la adquisición de datos para un motor
- A partir del modelo de una cuenca obtenido en el prototipo, obtener la distribución espacial de la precipitación.
- Determinar la respuesta de la cuenca al fenómeno lluvia-escurrimiento.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

2.1 La modelación de hidrología de montaña: El último desafío

Klemes en 1990 indica que las montañas no revelan sus secretos fácilmente, esto no aplica sólo a cosas triviales como Pie grande o el Yeti sino a cosas verdaderamente importantes como la precipitación, la nieve o el tránsito de avenidas. Parece que el único camino accesible para medir los flujos en avenidas de montaña son métodos sísmicos o acústicos. En estos métodos se graba el sonido del flujo y del transporte de sedimentos (verdadera música de los Rolling Stones) y mediante análisis de señales, se conoce la magnitud del fenómeno registrado.

Es en la hidrología de montaña donde se demuestra que la modelación de problemas hidrológicos requiere de una visión multidisciplinaria (Klemes 1990). Para medir la cubierta de nieve, es necesario organizar expediciones con practicantes de ski o personas con experiencia en alpinismo, además si se quiere conocer la trayectoria de los escurrimientos, se requiere de químicos para marcar el agua.

La noción de escala es importante para la designación de un modelo como abultado o distribuido (Klemes 1983). En los modelos abultados, no es la misma escala en el plano xy que en el eje z. Esta variación de escalas es lo que determina la exageración vertical. Para conocer el comportamiento real del escurrimiento en zonas con pequeñas montañas, los modelos deben de tener una exageración vertical pequeña, mientras que en zonas de alta montaña, la exageración vertical determina la precisión en el trazo de las elevaciones. La figura 2.1 muestra las diferencias entre un modelo distribuido y un modelo abultado en cuanto a la exageración vertical.

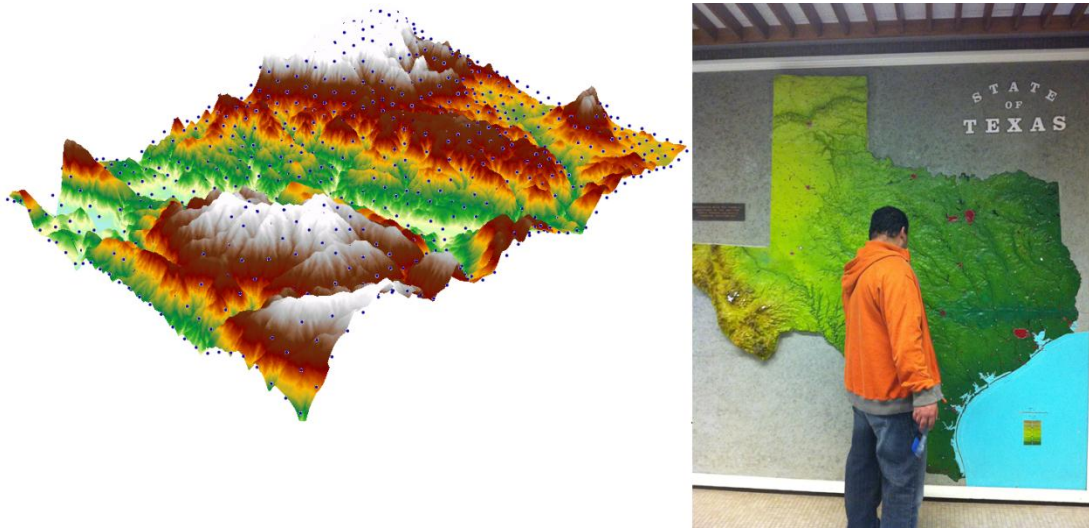


Figura 2.1.1 Modelo abultado vs modelo distribuido

Las altas pendientes y el fuerte viento afectan la interceptación de la lluvia en los pluviómetros. El clima extremo genera un mal funcionamiento en los sensores automáticos generando pérdidas de datos, además las estaciones hidrométricas trabajan en secciones transversales irregulares y variantes en el tiempo que tienen daños en los sensores ocasionados por la energía cinética de los sedimentos transportados.

En cuencas de montaña, se presentan suelos y condiciones meteorológicas más heterogéneas lo que genera problemas de repetitividad y representatividad en las mediciones. Además el uso de técnicas convencionales en la hidrología y la hidráulica para cuencas de montaña produce resultados erróneos ya que la mayoría de las técnicas hidrológicas han sido desarrolladas en ríos de poca pendiente y no erosionables (Jarret 1987).

Una ecuación de regresión demuestra que un fenómeno como “La gran crecida del río Thompson en 1976” tiene una recurrencia de aproximadamente 10 000 años (Jarret 2007). Sin embargo datos hidrométricos actuales en Colorado demuestran que el gasto alcanzado en la gran crecida, ha sido superado por gastos medidos en la última década.

2.2 Disciplinas involucradas:

El prototipo para la modelación de cuencas es un proyecto multidisciplinario, para determinar el estado del arte es importante considerar las disciplinas que intervienen en la

investigación, entre ellas se destacan la hidrología, ingeniería ambiental, computación, mecatrónica. Buscando sistemas que generen modelos como los que se esperan al final de la investigación, se encontró un proyecto en Filipinas, conocido como P3DM que genera estos modelos de forma manual, este sistema será abordado en este capítulo en el subtema 2.6.

En el presente trabajo se presentan estudios realizados en cada disciplina, la investigación muestra que hay recursos suficientes para resolver el problema particular de cada una de las disciplinas; sin embargo no existe un sistema que integre los conocimientos en las distintas áreas para resolver el problema presentado en la tesis.

2.3 Hidrología e ingeniería ambiental:

El conocimiento de variables hidrológicas es indispensable para la prevención de inundaciones, producción agrícola y para el manejo adecuado de recursos hídricos. Estas aplicaciones requieren de un pronóstico atinado independiente de espacio y tiempo en la cuenca a estudiar (Kumar et al. 2009).

Con el crecimiento de la adquisición de datos a gran escala para un terreno, los SIG son más utilizados para la gestión de cuencas (Pietroniro y Leconte, 2005). Quizá el más útil de los mapas representativos es el modelo digital de elevaciones, MDE. Los MDE presentan fácilmente la topología, la extensión y los reservorios de una cuenca (Hopkinson, Hayashi y Peddle, 2008).

Al utilizar los MDE para la predicción y manejo de cuencas, es necesario tener modelos adecuados a la realidad de lo que se está representando. Los MDE presentan distintas resoluciones para un mismo mapa, además pueden ser generados por distintos métodos, como lo son LiDAR, fotogrametría y curvas de nivel.

En geomorfología, los modelos digitales de elevación, MDE, son utilizados para extraer los parámetros de una superficie continua cuadrículada. Si se asume que el MDE es preciso, en una sola iteración se puede obtener los parámetros para un punto en la superficie. Sin embargo, los modelos no siempre son tan precisos, regularmente el modelo difiere de los datos obtenidos en una medición de campo. Los errores son

inevitables a pesar de utilizar técnicas muy sofisticadas para su elaboración, como puede ser la técnica LiDAR (Evans y Hudak, 2007).

El método LiDAR, entrega modelos con una resolución hasta de un metro mientras que la fotogrametría es sensible al dosel y la cobertura vegetal; este efecto se traduce en peor resolución y errores por efectos de sombra.

Hopkinson et al. (2008) compara MDE generados por curvas de nivel, fotogrametría y LiDAR y concluye que los modelos generados por LiDAR son los que mejor se ajustan a la realidad de una cuenca. Utilizan además el software ARCGIS para obtener los parámetros de una cuenca a través del MDE.

Las curvas de nivel presentan MDE con mayor índice de error debido a lo lejanas que están una curva respecto a las demás. Es cierto que la resolución de un mapa es ajustable por interpolación pero con menos datos, la interpolación altera el valor de elevación real. La resolución de los mapas afecta el tamaño del ráster generado, además del tiempo de procesamiento de este.

Los errores se presentan además en las mediciones de campo o en el algoritmo para la obtención del modelo, estos errores pueden presentar problemas y variaciones en el resultado final. Si se ignoran estos errores al hacer cálculos, los resultados seguramente diferirán de valores reales medidos en campo. Wechsler (2007) establece que si se ignoran los errores por interpolación de un modelo, al comparar el MDE con los valores en campo, la diferencia es importante especialmente en la determinación de parámetros hidrológicos. Un ejemplo de la diferencia de elevaciones elaborado por Hopkins et al, es presentado en la figura 2.3.1.

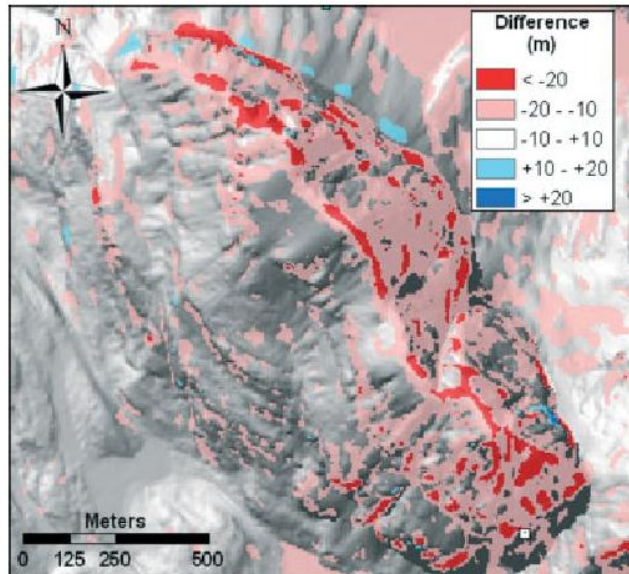


Figura 2.3.1 Diferencia entre un MDE medido y un MDE obtenido por interpolación. (Hopkins et al 2008)

Creed et al. (2003) comparó los errores de un MDE de la misma región generado por distintos métodos y encontró que un mismo modelo cambia según su origen y esto afecta las pruebas realizadas en el modelo.

Los paquetes SIG consideran la propagación del error y mediante procesos estocásticos, intentan evitar la propagación de este error. En la universidad de Aston, se ha creado un modelo para disminuir el error de propagación, esta herramienta es conocida como Data Uncertainty Engine.

Los sistemas SIG incluyen rutinas para considerar altitudes constantes, líneas de flujo y valores de altitud constantes, sin embargo se necesita tener esos datos como capa independiente pero no especifican como modificar utilizando datos medidos (Poggio y Soille 2008). Cabe señalar que el SIG ArcGis, contiene este tipo de correcciones en la herramienta topo to raster, incluyendo líneas o puntos con elevación constante.

Para el proyecto de investigación se utilizarán MDE creados y modificados en ArcGis, además se utilizarán las herramientas de Archydro para la comprensión y obtención de los resultados de las simulaciones.

Por otro lado, las herramientas estadísticas son importantes para la obtención de un modelo adecuado sin embargo en México no existe la cultura de la precisión, todo se diseña con factores de seguridad y mediciones poco confiables. Para obtener un MDE altamente confiable se requieren obtener puntos de elevación mediante LiDAR pero no se cuentan con recursos para mandar un avión a tomar muestras. Se considera adecuado el Continuo de elevaciones para la República mexicana. Este modelo es descargable desde la página del INEGI y aunque no sea del todo confiable, es el que se utiliza para modelos de investigación.

2.4 Mecatrónica:

En la actualidad las nanotecnologías exigen movimientos muy precisos en órdenes muy pequeños. En el mercado hay motores que entregan movimiento lineal. Estos motores son conocidos como: Motores lineales, actuadores magnéticos, actuadores piezoeléctricos apilables y motores lineales piezoeléctricos (Kim y Kang, 2009). Para controlar estos motores se recurre a la inducción eléctrica, el control paso a paso, los servomotores. La figura 2.4.1 describe los componentes mecánicos necesarios para el funcionamiento de un motor piezoeléctrico de movimiento lineal.

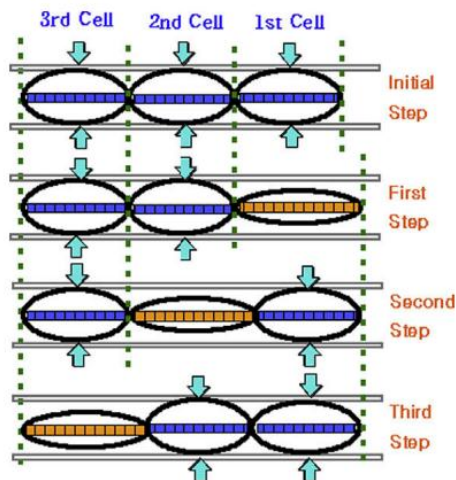


Figura 2.4.1 Mecánica de un motor piezoeléctrico.

Los actuadores lineales generalmente presentan movimientos lineales rápidos pero con mala repetitividad en posicionamiento, para corregir este error se utilizan transmisiones tipo husillo acoplados a motores de movimiento rotacional (Millán, 2006).

Un ejemplo de un sistema mecatrónico capaz de imprimir en tres dimensiones (Figura 2.4.2), es la bioimpresora creada en Japón por Nishiyama et al. (2009).

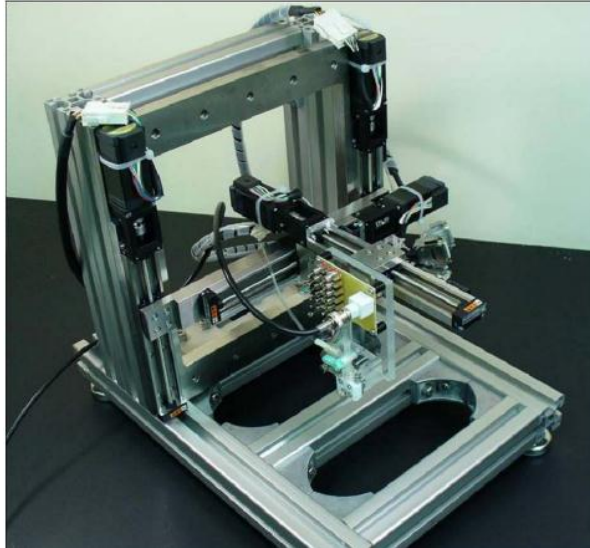


Figura 2.4.2 Bioimpresora 3d (Nishiyama et al 2009)

Los investigadores han desarrollado una nueva tecnología para producir estructuras biológicas en 3d compuestas por células vivas e hidrogel in vitro, a través de la micrométrica impresión de células con un sistema de inyección de tinta.

Los trasplantes de órganos cada vez son más solicitados, desafortunadamente pocas personas obtienen un trasplante a tiempo. Se ha estudiado la creación de tejidos a partir de la incubación de células con resultados exitosos, como en el caso de la córnea o del epitelio; sin embargo en tejidos más complicados e inclusive en órganos, no se han realizado estudios exitosos. Por esto se diseña la bioimpresora para la producción de tejidos donde es básica la ubicación exacta de células determinadas.

Una vez inyectadas las células es necesario que permanezcan en su sitio para por medio de la reproducción, generar tejidos y órganos. Para lograr esto, se recurre a un catalizador llamado hidrogel.

Las células son inyectadas a través de estructuras de hidrogel producidas con el dispositivo llamado bioimpresora 3d (Figura 2.4.3). En este estudio se utiliza una sal ácida alginosa obtenida de la reacción de sodio con clorito de calcio. Para la construcción de

este dispositivo, se utilizaron impresoras de inyección de las marcas SEA-Jet, Seiko Epson Corp., Suwa, Japan.

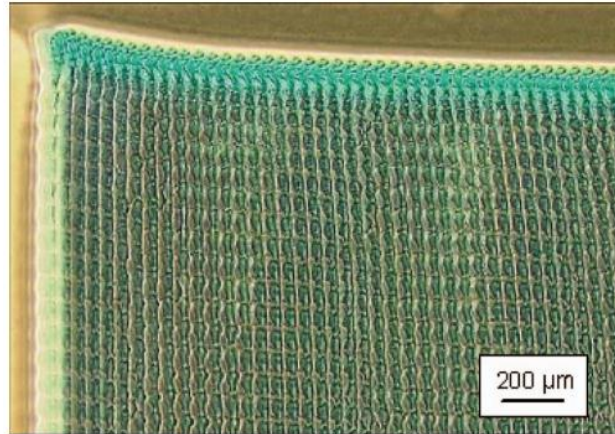


Figura2.4.3 Estructuras biológicas para inyección de células

La impresora seleccionada por presentar el menor índice de salpicadura es la Epson, en esta impresora hay doce canales para la inyección de tinta; sin embargo solo tiene un depósito para líquidos por lo que solo se puede utilizar un mismo fluido. Esta impresora sólo permite el posicionamiento en dos dimensiones, sin embargo se realizó el ajuste para poder posicionar el sistema de inyección en las tres dimensiones.

La bioimpresora se posiciona en las tres dimensiones mediante motores a pasos (ASC35AK Oriental motor) con una transmisión tipo husillo que entrega precisión micrométrica. La impresora es controlada desde una PC y el aspensor del fluido mediante un micro controlador H8/3052 Renesas Technology. Con el sistema de transmisión utilizado, se logran movimientos con una resolución de 0.2 micrómetros a una velocidad de 130 mm/s.

Con la bioimpresora, se han fabricado estructuras complejas de células como líneas, planos, estructuras laminares, tubos y finalmente, se han transportado exitosamente estas estructuras a otros laboratorios.

2.5 Computación:

Actualmente se cuentan con los recursos computacionales necesarios para la elaboración del sistema.

Los MDE son generados y manipulados en ArcGis con las herramientas para interpolación raster del programa. Así mismo convirtiendo el raster del MDE a una capa de puntos, se obtiene una tabla de datos, exportable en formato .txt, con el valor de elevación para cada punto georreferenciado.

El programa Matlab, tiene la capacidad de leer este vector .txt y procesar los valores para normalizar y redondear, cada valor según la resolución de los motores a utilizar. Además Matlab accesa al puerto serie de la computadora y permite el intercambio de datos con microcontroladores a través de este puerto, enviando así los datos de elevación correspondientes a los controladores de los motores.



Figura 2.5.1 Software necesario para el prototipo

Como se observa, no se necesita investigación en cuanto a recursos informáticos, simplemente se utilizaran las herramientas para el correcto control del prototipo.

2.6 Participatory 3-Dimensional Modelling P3DM

En Filipinas se tiene el proyecto de generar estructuras en 3d de cartón que modelan las condiciones de relieve a partir de curvas de nivel (Rombaldi y Callosa-Tarr, 2002).

A través de un proceso participativo, la elaboración de modelos participativos en 3D (P3DM) combina la información espacial convencional (curvas de nivel) con los mapas mentales de las personas, estos modelos hacen que la información sea tangible y significativa para todos, y visualiza a escala y georreferenciado, el conocimiento territorial indígena. (Figura 2.6.1)



Figura 2.6.1 Mapa resultante del P3DM

El objetivo del P3DM es crear lo que Weiner y Harris (1999) establecen como un SIG integrado de una comunidad CiGIS.

El modelo integra el conocimiento de los habitantes de la comunidad con un modelo geográfico a partir de las curvas de nivel.

Como lo muestra la figura 2.6.2 en el modelo se dibujan los mapas de curvas de nivel en cartón, después este cartón se recorta y se va pegando en capas generando así un MDE, posteriormente el MDE se colorea con pintura plástica y con los conocimientos de la gente se resaltan atributos de cada región en el mapa. El reporte de este modelo, señala que se necesitan más de 50 personas trabajando en el modelo además de que al ser hecho a mano, presenta errores inherentes a la metodología de construcción.



Figura 2.6.2 Elaboración de un mapa para el P3DM

En función de su conocimiento espacial, los dibujantes describen características del terreno tales como: el uso del suelo y la cubierta u otras características del modelo con el uso de marcadores (puntos), hilos (líneas) y pintura (polígonos). Una vez que el modelo se completa una red de escala se aplica a la transposición espacial y datos georeferenciados en los SIG. La red ofrece, por un lado la oportunidad para agregar datos georeferenciados generados por las lecturas de GPS u obtenida de fuentes secundarias para el modelo, y por otro lado para tomar coordenadas aproximadas en el modelo y verificar estas en campo por medio de lecturas de GPS. Esto es muy útil cuando los modelos se utilizan para apoyar las negociaciones de límites.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Los Modelos digitales de elevación

Un modelo digital de elevaciones es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Figura 3.1.1). Un terreno real puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua $z = z(x, y)$ donde z representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas (x, y) y z es una función que relaciona la variable con su localización geográfica. En un modelo digital de elevaciones se aplica la función anterior sobre un dominio espacial concreto, D. En consecuencia, un MDE puede describirse genéricamente como $MDE = (D, z)$. En la práctica, la función no es continua sino que se resuelve a intervalos discretos, por lo que el MDE está compuesto por un conjunto finito y explícito de elementos. Los valores de x e y suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema de coordenadas plano, habitualmente un sistema de proyección cartográfica. La generalización inherente a la discretización del modelo implica una pérdida de información que incrementa el error del MDE y, en consecuencia, se propaga a los modelos derivados. Por este motivo, se han ensayado numerosas opciones en la búsqueda de una forma de representar y almacenar la altitud que equilibre la pérdida de información y algunos efectos secundarios indeseables como el excesivo tamaño de los archivos o la dificultad de manejo.

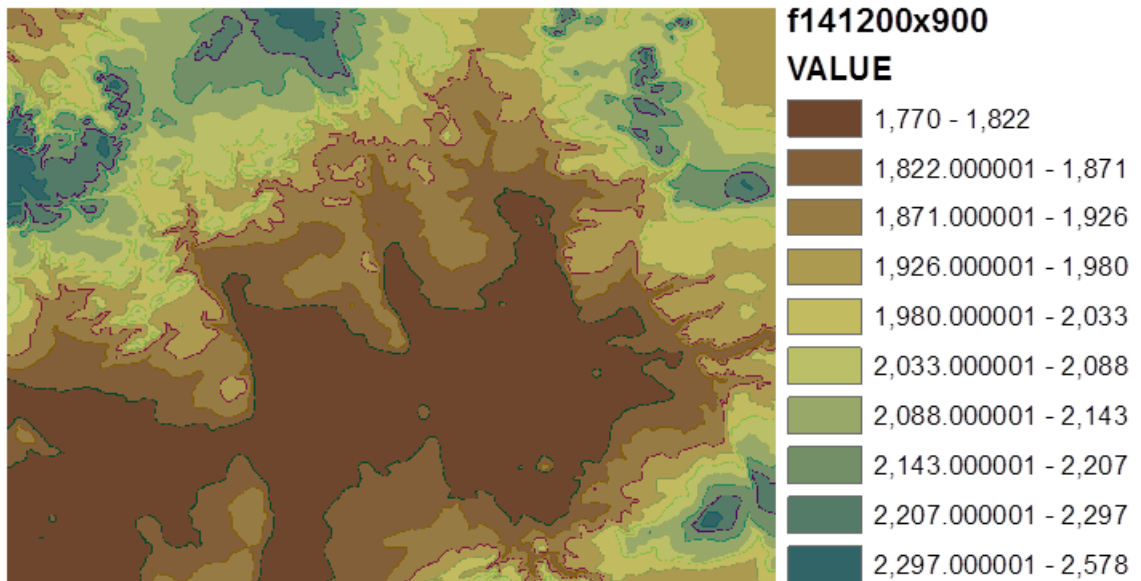


Figura 3.1.1 Modelo digital de elevaciones de la carta f14c65 escala 1:50000

Estructuras de datos en el MDE:

De forma general, la unidad básica de información en un MDE es un punto acotado, definido como una terna compuesta por un valor de altitud, z , al que acompañan los valores correspondientes de x y y . Las variantes aparecen cuando estos datos elementales se organizan en estructuras que representan las relaciones espaciales y topológicas. Mientras que los mapas impresos usan casi exclusivamente una única convención, las curvas de nivel, para la representación de la superficie del terreno, en los MDE se han utilizado alternativas algo más variadas. Históricamente, las estructuras de datos en los sistemas de información geográfica y, por extensión, en los modelos digitales del terreno, se han dividido en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectorial y ráster:

- El modelo de datos vectorial está basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices

- El modelo de datos ráster está basado en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se les asigna el valor de la variable para la unidad elemental de superficie.

En el modelo vectorial los atributos del terreno se representan mediante puntos, líneas o polígonos con sus respectivos atributos. Los puntos se definen mediante un par de valores de coordenadas con un atributo de altitud, las líneas mediante un vector de puntos y los polígonos mediante una agrupación de líneas.

En el modelo ráster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que encuadran al terreno con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada.

Estas unidades se llaman celdas o teselas y, si se admite la analogía con los términos usados en proceso de imágenes, píxeles.

Tipos de MDE:

Los MDE pueden tener representación en formato vectorial y en formato ráster. Dentro de los MDE en formato vectorial, se suelen representar como modelos de contornos y como redes Tin (redes de triángulos), mientras que en los ráster como matrices regulares y matrices imbricadas en una estructura jerárquica (quadtree).

Modelo vectorial: contornos.

La estructura básica de un modelo de contornos es la polilínea definida como un vector de n pares de coordenadas (x, y) que describe la trayectoria de las curvas de nivel o isohipsas. El número de elementos de cada vector es variable; la reducción de éste a un único elemento, $n=1$, permite incorporar elementos puntuales (cotas) sin introducir incoherencias estructurales. Una curva de nivel concreta queda definida, por tanto, mediante un vector ordenado de puntos que se sitúan sobre ella a intervalos adecuados para garantizar la exactitud necesaria del modelo. La localización espacial de cada elemento es explícita, conservando los valores individuales de coordenadas. En el caso más sencillo, el MDE está constituido por el conjunto de las curvas de nivel que pasan por la zona representada, separadas generalmente por intervalos constantes de altitud, más un conjunto de puntos acotados que definen lugares singulares como: cimas, fondos de colinas, depresiones, etc. Por medio de interpolación se construye el MDE en formato vectorial de polígonos de Querétaro a partir del raster del INEGI. Este mapa se presenta en la figura 3.1.2.

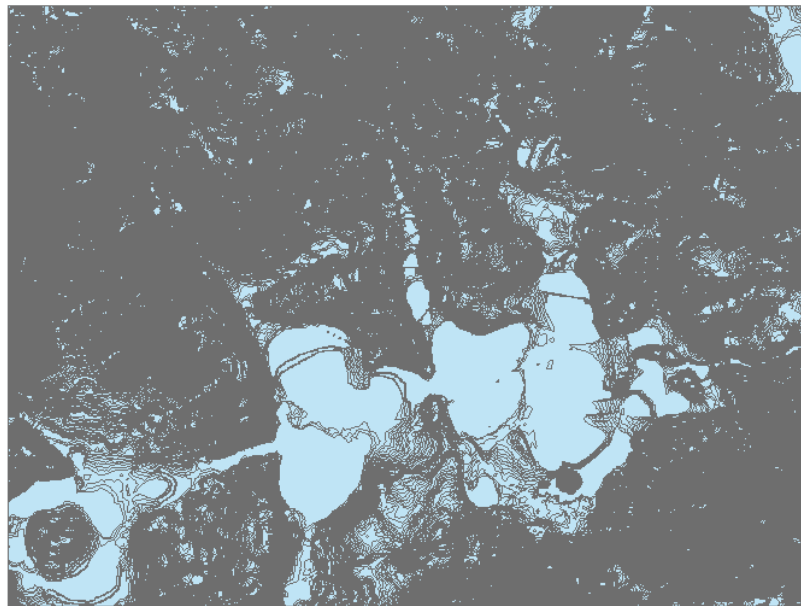


Figura 3.1.2 MDE en formato vectorial (polígonos)

Modelo vectorial: redes de triángulos irregulares (TIN)

Esta estructura de datos se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados y que suele identificarse por las siglas de su denominación inglesa: triangulated irregular network, TIN (Peucker et al., 1978). Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve. Se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a un conjunto previo de puntos. El MDE de Querétaro se puede observar en la figura 3.1.3.

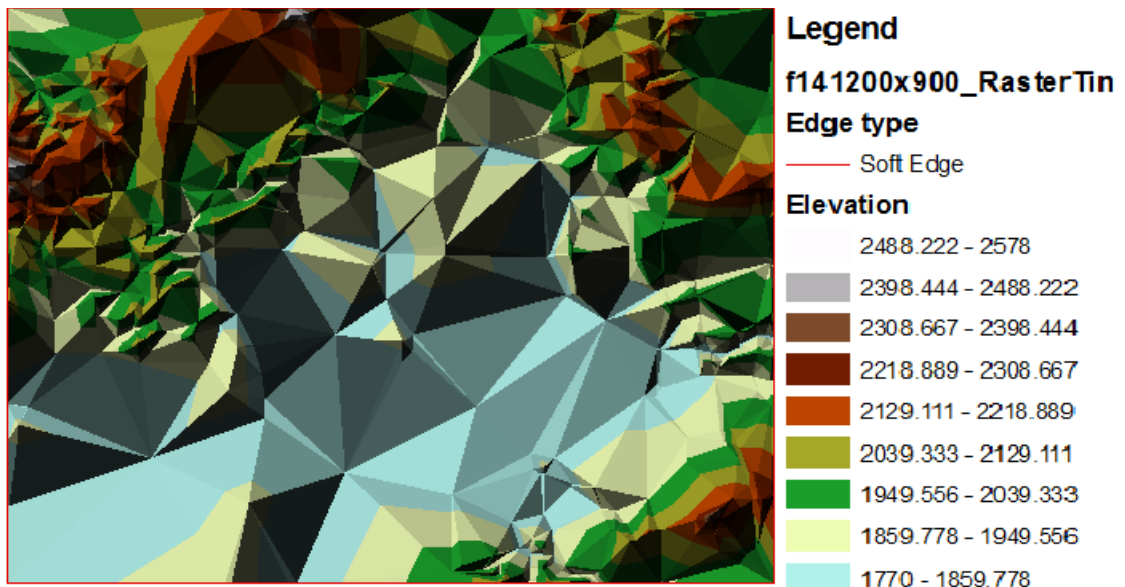


Figura 3.1.3 MDE en formato TIN

Modelo ráster: matrices regulares

La estructura matricial tiene antecedentes relativamente remotos: Chapman (1952) propone ya métodos de análisis topográficos basados en matrices regulares. Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La retícula adopta normalmente la forma de una red regular de malla cuadrada. En esta estructura, la localización espacial de cada dato está determinada de forma implícita por su situación en la matriz, una vez definidos el origen y el valor del intervalo entre filas y columnas. El mayor interés de las matrices jerárquicas está en que permiten solucionar el principal problema de las matrices regulares: su

resolución espacial constante. En este tipo de matrices los elementos pueden ser, bien datos elementales, como en las matrices regulares, o bien, a su vez, matrices de 2x2 con una distancia entre filas y columnas mitad de la del nivel anterior. La estructura final es un árbol jerárquico de matrices elementales de 2x2 con una profundidad en principio arbitraria y cuya resolución espacial se duplica en cada nivel. Esta estructura, denominada originalmente quadtree, se ha utilizado ocasionalmente en el tratamiento de variables nominales (Samet et al., 1984) con el fin de reducir el tamaño de almacenamiento.

2.2 La construcción del MDE

La captura de la información hipsométrica constituye el paso inicial en el proceso de construcción del MDE, e incluye la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos. Se trata de una fase de gran trascendencia porque la calidad de los datos es el principal factor limitante para los tratamientos que se realicen posteriormente. Tras obtener los datos, éstos deben ser estructurados para formar el MDE de alguna de las formas presentadas en el apartado anterior.

Captura de datos

Los métodos básicos para la conseguir los datos de altitudes pueden dividirse en dos grupos: directos cuando las medidas se realizan directamente sobre el terreno real, e indirectos cuando se utilizan documentos analógicos o digitales elaborados previamente. La jerarquía de los métodos más usuales es la siguiente:

Métodos directos: medida directa de la altitud sobre el terreno (fuentes primarias)

- Altimetría: altímetros radar o laser transportados por plataformas aéreas o satélites
- GPS: global positioning system, sistema de localización por triangulación
- Levantamiento topográfico: estaciones topográficas con salida digital

Métodos indirectos: medida estimada a partir de documentos previos (fuentes secundarias)

- Restitución a partir de pares de imágenes
 1. Estéreo-imágenes digitales: imágenes tomadas por satélites
 2. Estéreo-imágenes analógicas: imágenes fotográficas convencionales
 3. Interferometría radar: imágenes de interferencia de sensores radar

- Digitalización de mapas topográficos
 1. Automática: mediante escáner y vectorización
 2. Manual: mediante tablero digitalizador

Los MDE manejados por los SIG actuales permiten solamente un valor de altitud por lugar geográfico, es decir, no se admiten pliegues ni estructuras estrictamente verticales. Los MDE no son, por tanto, modelos 3D verdaderos, como los usados habitualmente en CAD. Aunque se han diseñado SIG capaces de manejar datos en tres dimensiones reales, aún no se han generalizado y han quedado restringidos a prototipos experimentales, generalmente de aplicación geológica. Antes de comenzar la operación propiamente dicha de generación del MDE, el fichero resultante de la digitalización debe someterse a una serie de operaciones de estructuración y asignación de atributos que, en resumen, son las siguientes:

- Estructuración topológica, mediante la cual se crea la base de datos necesaria para mantener y gestionar las relaciones línea-nodo
- Asignación de altitudes a las líneas y puntos, ya que este atributo puede no transferirse durante la digitalización
- La generalización, un proceso de filtrado selectivo mediante el cual se eliminan la información innecesaria o redundante en función del error admisible
- Asignación de códigos a las estructuras auxiliares que hayan sido digitalizadas como información complementaria

Una vez realizadas estas operaciones es posible abordar la creación del MDE según métodos diversos. La experiencia ha mostrado que la calidad de un MDE puede mejorarse significativamente introduciendo datos auxiliares de diversos tipos como, por ejemplo:

- Curvas de nivel o contours, que habitualmente se descomponen en puntos acotados, mass point, previa generalización o reducción de la densidad de vértices de la línea.
- Puntos acotados singulares o vips, de very important points, que definen puntos con información relevante; por ejemplo, cumbres de picos o fondos de colinas. En ocasiones ambos tipos de datos, cumbres y sumideros deben ser diferenciados claramente debido a su diferente tratamiento.
- Líneas estructurales, que definen elementos lineales con valores de altitud asociados a cada vértice y utilizados para asegurar el ajuste de la superficie topográfica; por

ejemplo, la red fluvial o las líneas de cresta (este tipo de líneas han sido utilizadas frecuentemente para la representación del terreno en libros de viajes o mapas excursionistas).

- Líneas de inflexión o rotura (breaklines), utilizadas para definir la posición de elementos lineales sin valores de altitud explícitos que rompen la continuidad de la superficie; por ejemplo, bordes de acantilados.

Estas líneas no aportan valores de altitud pero sí intervienen en el comportamiento de los algoritmos de interpolación bloqueando la búsqueda de datos. Una parte de las líneas de inflexión pueden ser extraídas de mapas geomorfológicos.

- Zonas de altitud constante, definidas por polígonos que encierran una superficie plana de altitud única; por ejemplo, la superficie de un lago.

- Zonas de recorte, que define los límites externos del MDE por fuera de los cuales cualquier dato existente se ignora.

- Zonas vacías, donde las circunstancias impiden la obtención y asignación de cotas; por ejemplo, zonas inundadas, cubiertas de nieve o donde los datos de origen son de calidad dudosa.

3.3 INTERPOLACIÓN

Se denomina interpolación a la obtención de nuevos puntos partiendo del conocimiento de un conjunto discreto de puntos.

En ingeniería y algunas ciencias es frecuente disponer de un cierto número de puntos obtenidos por muestreo o a partir de un experimento y pretender construir una función que los ajuste.

Otro problema estrechamente ligado con el de la interpolación es la aproximación de una función complicada por una más simple. Si tenemos una función cuyo cálculo resulta costoso, podemos partir de un cierto número de sus valores e interpolar dichos datos construyendo una función más simple. En general, por supuesto, no obtendremos los mismos valores evaluando la función obtenida que si evaluásemos la función original, si bien dependiendo de las características del problema y del método de interpolación usado la ganancia en eficiencia puede compensar el error cometido.

En todo caso, se trata de, a partir de n parejas de puntos (x_k, y_k) , obtener una función f que verifique:

$$f(x, k) = y_k, k = 1, \dots, n$$

A esta función se le conoce como función interpolante de dichos puntos. A los puntos x_k se les llama nodos.

Algunas formas de interpolación que se utilizan con frecuencia son la interpolación lineal, la interpolación polinómica (de la cual la anterior es un caso particular), la interpolación por medio de spline o la interpolación polinómica de Hermite.

Interpolación de los datos:

La construcción de un MDE entendido como matriz regular a partir de la información vectorial mencionada anteriormente es básicamente un problema de interpolación: se definen las localizaciones de los puntos problema, intersecciones de filas y columnas, y se estima la altitud de cada uno de ellos en función de los datos del entorno existentes en el modelo vectorial. Los algoritmos de interpolación deben tener en cuenta, asimismo, las diversas estructuras auxiliares para introducir variantes en los mecanismos de cálculo. El planteamiento global del problema podría ser, por tanto, como sigue: dado un conjunto de puntos con coordenadas (x, y, z) , distribuidos irregularmente, generar un nuevo conjunto de puntos localizados en los nodos de una red regular de forma que la superficie interpolada sea una representación de la original con una pérdida mínima de información. En el caso de la creación de una estructura TIN, en lugar de interpolar, se realiza una selección de puntos descartando los que no aporten una información relevante para la descripción de la altitud. Sin embargo, en un modelo vectorial como el que forma el mapa topográfico digitalizado, acceder directamente a un dato por su posición espacial no es sencillo. Por este motivo, la localización de los datos incluidos en el entorno del punto problema es una operación clave, que debe ser bien diseñada dado el enorme número de datos que suele componer el mapa original.

Para interpolar los datos, ARCGIS cuenta con tres algoritmos establecidos: Inverso ponderado de la distancia, Spline y Kriging.

3.3.1 Interpolación por inverso ponderado de la distancia:

La fórmula general de la interpolación en función inversa de la distancia es:

$$z_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} z_i$$

donde z_j es el valor estimado para el punto j ; n es el número de puntos utilizados en la interpolación; el valor del punto i -ésimo y el peso asociado al dato i en el cálculo del nodo j . Los pesos k varían entre 0 y 1 para cada dato y la suma de ellos es la unidad. Para observar las diferencias en los ráster creados por interpolación, se crean mapas con los distintos algoritmos de interpolación partir de una capa de puntos de 50 filas por 67 columnas. La figura 3.3.1.1 presenta el mapa obtenido mediante interpolación por inverso ponderado de la distancia.

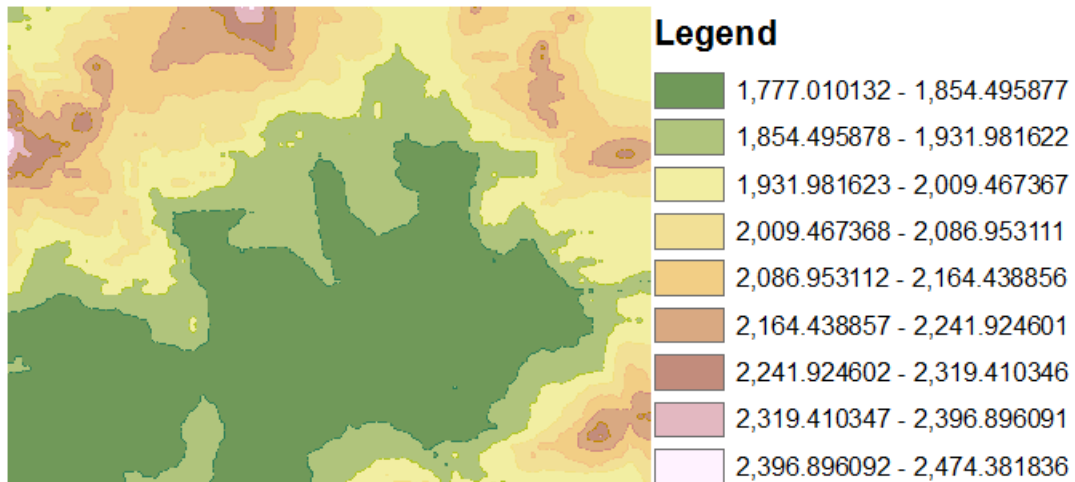


Figura 3.3.1.1 Mapa obtenido mediante interpolación por inverso ponderado de la distancia.

3.3.2 La hipótesis de la variable regionalizada (Método Kriging):

Término construido a partir del nombre de D.G. Krige, uno de los pioneros del método---en español se utilizan también las expresiones "krigeado" y "krigeage"---. El kriging es un método de interpolación con la misma expresión general que los mencionados en el apartado anterior. La diferencia básica es que asume que la altitud puede definirse como una variable regionalizada. Esta hipótesis supone que la variación espacial de la variable a representar puede ser explicada al menos parcialmente mediante funciones de correlación espacial: la variación espacial de los valores de z puede deducirse de los valores circundantes de acuerdo con unas funciones homogéneas en toda el área. Con este método, las funciones pueden deducirse analizando la correlación espacial entre los datos en función de la distancia entre ellos. En efecto, en el caso de los MDE, es razonable suponer que el valor de altitud en un punto está relacionado de alguna manera con el valor de los puntos vecinos, distribuidos a distancias variables. Puede suponerse, asimismo, que la "influencia" de los puntos más lejanos es

menor que la de los más próximos. El kriging estima esta dependencia mediante un estadístico: la semivarianza entre datos separados por distancias diferentes. La semivarianza adquiere valores diferentes en función de la distancia entre los datos (a más separación, menos correlación entre los valores de altitud). La función que relaciona la semivarianza γ con la distancia h se denomina semivariograma y muestra, por tanto, la variación de la correlación entre los datos en función de la distancia. La expresión más usual para representarla es (Oliver y Webster, 1990)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (z_i - z_{i+k})^2$$

Donde n es el número de pares de valores separados por una distancia h . Cambiando progresivamente este último valor, es posible elaborar el semivariograma empírico para la zona concreta que trabajemos. Normalmente, este semivariograma no se utiliza directamente sino que se examina un conjunto de funciones teóricas y se usa la de mejor ajuste con los datos reales. Finalmente, los pesos k correspondientes a cada distancia entre datos se estiman a partir de los valores del semivariograma.

El kriging permite obtener dos valores de interés:

En primer lugar, el semivariograma nos permite conocer el valor de distancia h para el cual los datos pueden considerarse ya independientes entre sí. Este valor de distancia pone un límite superior al área del entorno alrededor del punto problema, ya que la inclusión de puntos situados a distancias mayores no aportaría información de interés.

El otro parámetro estimado es el valor del error esperado para cada punto, que es función de los valores de semivarianza observados para los datos y que puede ser calculado sin dificultad. Aunque el kriging es un método de estimación óptimo desde el punto de vista estadístico, presenta algunas dificultades a la hora de ser utilizado como método de construcción de los MDE.

La más importante es que la teoría exige que el semivariograma sea de validez general para toda el área del MDE; esto quiere decir que la interdependencia entre los datos debe ser función exclusivamente de la distancia entre ellos y no de su localización espacial absoluta. Los patrones de variación de z deben ser, por tanto, homogéneos. Esta condición no suele cumplirse y, además, no permite el tratamiento de

discontinuidades topográficas que supongan cambios bruscos, como rupturas de pendiente. Las variables en las que está indicado el uso del kriging son aquellas cuya distribución tiene una fuerte componente estocástica o que son resultado de un conjunto de procesos sometido a la interacción de múltiples variables concurrentes. Por ejemplo, en la distribución de un contaminante atmosférico influyen complejas causas meteorológicas a muy diferentes escalas y sometidas a fenómenos de turbulencia. A pesar de que la modelización de estos procesos puede ser muy compleja, los valores puntuales pueden ser descritos satisfactoriamente mediante el kriging dado que este tipo de variables cumple las condiciones anteriormente mencionadas. La figura 3.3.1.2 muestra el MDE con una Kriging ordinario y semivariograma esférico.

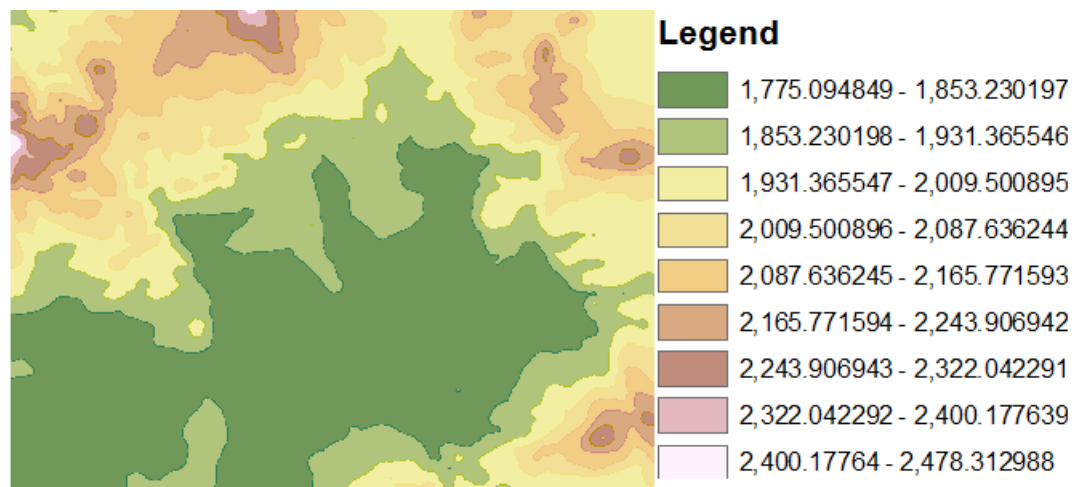


Figura 3.3.2.1 Mapa obtenido mediante el algoritmo de Kriging

3.3.3. Interpolación Spline:

El término spline hace referencia a una amplia clase de funciones que son utilizadas en aplicaciones que requieren la interpolación de datos, o un suavizado de curvas. Los splines son utilizados para trabajar tanto en una como en varias dimensiones. Las funciones para la interpolación por splines normalmente se determinan como minimizadores de la aspereza sometidas a una serie de restricciones.

Interpolación segmentaria lineal:

Este es el caso más sencillo. En él, se interpola una función $f(x)$ de la que se dan un número N de pares $(x, f(x))$ por los que tendrá que pasar la función polinómica $P(x)$.

Esta serie de funciones van a ser lineales, esto es, con grado 1: de la forma $P(x) = ax + b$. Se define una de estas funciones por cada par de puntos adyacentes, hasta un total de $(N-1)$ funciones, haciéndolas pasar obligatoriamente por los puntos que van a determinarlas, es decir, la función $P(x)$ será el conjunto de segmentos que unen nodos consecutivos; es por ello que la función será continua en dichos puntos, pero no derivable en general.

Interpolación segmentaria cuadrática:

En este caso, los polinomios $P(x)$ a través de los que se construye el Spline tienen grado 2. Esto quiere decir, que va a tener la forma $P(x) = ax^2 + bx + c$. Como en la interpolación segmentaria lineal, se tienen $N-1$ ecuaciones (donde N son los puntos sobre los que se define la función). La interpolación cuadrática va a asegurar que la función que se genera a trozos con los distintos $P(x)$ va a ser continua, ya que para sacar las condiciones que ajusten el polinomio, se van a determinar como condiciones:

- Que las partes de la función a trozos $P(x)$ pasen por ese punto. Es decir, que las dos $P_n(x)$ que rodean al $f(x)$ que queremos aproximar, sean igual a $f(x)$ en cada uno de estos puntos.
- Que la derivada en un punto siempre coincida para ambos "lados" de la función definida a trozos que pasa por tal punto común.

Esto sin embargo no es suficiente, y se necesita una condición más. ¿Por qué? Se tienen 3 incógnitas por cada $P(x)$. En un caso sencillo con $f(x)$ definida en tres puntos y dos ecuaciones $P(x)$ para aproximarla, vamos a tener seis incógnitas en total. Para resolver esto se necesitarían seis ecuaciones, pero solo se tienen tan sólo cinco: cuatro que igualan el $P(x)$ con el valor de $f(x)$ en ese punto (dos por cada intervalo), y la quinta al igualar la derivada en el punto común a las dos $P(x)$. Se necesita una sexta ecuación, ¿de dónde se extrae? Esto suele hacerse con el valor de la derivada en algún punto, al que se fuerza uno de los $P(x)$.

Interpolación segmentaria cubica:

En este caso, cada polinomio $P(x)$ a través del que se construyen los Splines en $[m, n]$ tiene grado 3. Esto quiere decir, que va a tener la forma $P(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$. En este caso se tienen cuatro variables por cada intervalo (a, b, c, d) , y una nueva condición para cada punto común a dos intervalos, respecto a la derivada segunda:

Que las partes de la función a trozos $P(x)$ pasen por ese punto. Es decir, que las dos $P_n(x)$ que rodean al $f(x)$ que queremos aproximar, sean igual a $f(x)$ en cada uno de estos puntos.

Que la derivada en un punto siempre coincida para ambos "lados" de la función definida a trozos que pasa por tal punto común.

Que la derivada segunda en un punto siempre coincida para ambos "lados" de la función definida a trozos que pasa por tal punto común.

Como puede deducirse al compararlo con el caso de splines cuadráticos, ahora no falta una sino dos ecuaciones (condiciones) para el número de incógnitas que se tienen. La forma de solucionar esto, determina el carácter de los splines cúbicos. Así, se puede usar: Splines cúbicos naturales: La forma más típica. La derivada segunda de P se hace 0 para el primer y último punto sobre el que está definido el conjunto de Splines, esto son, los puntos m y n en el intervalo $[m, n]$. Dar los valores de la derivada segunda de m y n de forma "manual", en el conjunto de splines definidos en el intervalo $[m, n]$.

Hacer iguales los valores de la derivada segunda de m y n en el conjunto de splines definidos en el intervalo $[m, n]$

Splines cúbicos sujetos: La derivada primera de P debe tener el mismo valor que las derivada primera de la función para el primer y último punto sobre el que está definido el conjunto de Splines, esto son, los puntos m y n en el intervalo $[m, n]$.

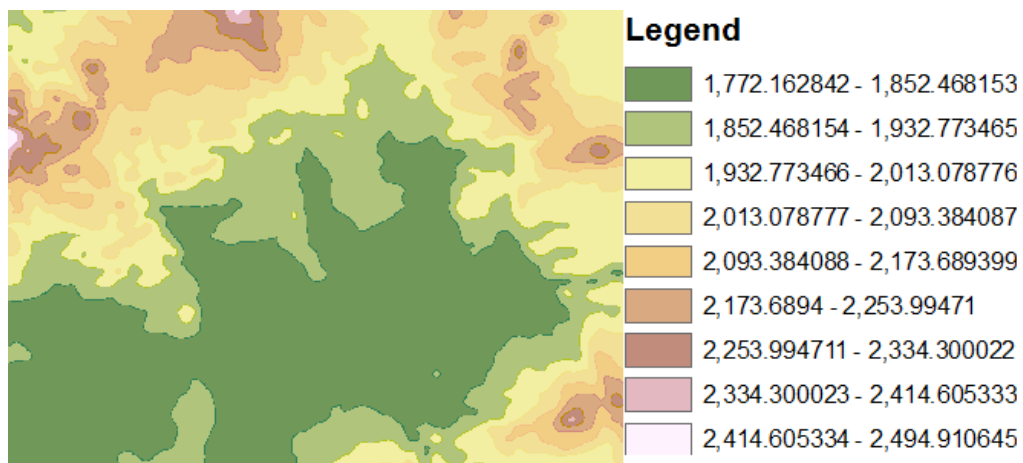


Figura 3.3.3.1 Mapa obtenido mediante el algoritmo de Spline

3.3.4 El algoritmo de Hutchinson

El algoritmo de Hutchinson nos permite generar MDE con interpolación lineal que considera las condiciones del terreno, nos permite encontrar discontinuidades, conservar ríos y lagos, utilizar mascarar para definir límites y es considerado el mejor algoritmo para fines hidrológicos.

El algoritmo esta implementado en el software ArcGis como la función topo to raster y además en un software comercializado por el mismo Hutchinson y conocido como ANUDEM.

La herramienta De topo a ráster es un método de interpolación diseñado específicamente para crear modelos digitales de elevación (DEM) hidrológicamente correctos. Está basado en el programa ANUDEM desarrollado por Michael Hutchinson (1988, 1989). En Hutchinson (1993) se brinda un breve resumen de ANUDEM y algunas aplicaciones. La versión actual de ANUDEM utilizada en ArcGis es 4.6.3.

El algoritmo de Hutchinson interpola los valores de elevación para un ráster mientras se imponen restricciones que aseguran:

- Una estructura de drenaje conectado
- La correcta representación de crestas y arroyos a partir de los datos de curvas de nivel de entrada

El proceso de interpolación

El procedimiento de interpolación se diseñó para aprovechar los tipos de datos de entrada comúnmente disponibles y las características conocidas de las superficies de elevación. Este método utiliza una técnica de interpolación de diferencia finita iterativa. Se optimiza para tener la eficacia computacional de los métodos de interpolación local, como la interpolación de distancia inversa ponderada (IDW), sin perder la continuidad de la superficie de los métodos de interpolación global, como Kriging y Spline. Es, esencialmente, una técnica de spline de lámina delgada discretizada (Wahba, 1990) a la cual se le modificó la penalización por rugosidad para permitir que el DEM ajustado siga los cambios abruptos en el terreno, como arroyos y crestas.

El agua es la principal fuerza erosiva que determina la forma general de la mayoría de los paisajes. Es por esto que la mayoría de los paisajes tienen varias cumbres (máximos locales) y pocos sumideros (mínimos locales), lo que resulta en un patrón de drenaje conectado. El algoritmo de Hutchinson utiliza este conocimiento de las superficies e impone restricciones al proceso de interpolación que resulta en una estructura de drenaje conectado y la correcta representación de crestas y arroyos. Esta condición de drenaje impuesto produce superficies con mayor precisión y menos datos de entrada. La cantidad de datos de entrada puede ser de hasta un orden de magnitud menor que lo que se requiere normalmente para describir de manera adecuada una superficie con curvas de nivel digitalizadas, lo que minimiza aún más las expensas de obtener MDE confiables.

La condición de drenaje global también elimina prácticamente cualquier necesidad de edición o postproceso para quitar los sumideros espurios de la superficie generada.

El programa actúa de manera conservadora en la eliminación de sumideros y no impone condiciones de drenaje en las ubicaciones que podrían contradecir los datos de elevación de entrada. Estas ubicaciones suelen aparecer en el archivo de diagnóstico como sumideros. El proceso de aplicación de drenaje.

El propósito del proceso de aplicación de drenaje es quitar todos los puntos de sumideros en el MDE de salida que no se identificaron como sumideros en el dataset de entidades de sumidero de entrada. El programa presupone que todos los sumideros no identificados son errores, ya que, por lo general, es poco común encontrarlos en paisajes naturales (Goodchild y Mark, 1987).

El algoritmo de aplicación de drenaje intenta eliminar los sumideros espurios modificando el MDE, infiriendo las líneas de drenaje a través del punto de collado más bajo en el área de drenaje que circunda cada sumidero espurio. No intenta eliminar los sumideros reales suministrados por la función Sumidero. Como la eliminación de sumideros está sujeta a la tolerancia de elevación, el programa es conservador al intentar eliminar los sumideros espurios. Es decir, no elimina los sumideros espurios que puedan contradecir los datos de elevación de entrada por más del valor de Tolerancia 1.

La aplicación de drenaje también se puede complementar con la incorporación de los datos de línea de corriente. Esto es útil cuando se requiere una ubicación más precisa de los arroyos.

Es posible desactivar la aplicación de drenaje, en cuyo caso, se ignora el proceso de eliminación de sumideros. Esto puede ser útil si se tienen datos de curvas de nivel de algo diferente a la elevación (por ejemplo, la temperatura) para los que desea crear una superficie.

Uso de los datos de curvas de nivel

Las curvas de nivel eran originalmente el método más común para el almacenamiento y la presentación de la información de elevación. Lamentablemente, este método también es el más difícil de utilizar de manera adecuada con las técnicas de interpolación general. La desventaja radica en el submuestreo de la información entre las curvas de nivel, en especial en las áreas de relieve bajo.

Al comienzo del proceso de interpolación, el algoritmo de Hutchinson emplea información inherente a las curvas de nivel para construir un modelo de drenaje generalizado. Al identificar las áreas de curvatura local máxima en cada curva de nivel, se identifican las áreas de pendiente más empinada y se crea una red de arroyos y crestas (Hutchinson, 1988). Esta información se utiliza para garantizar propiedades hidrogeomorfológicas adecuadas del DEM de salida y también para verificar la precisión del DEM de salida.

Una vez que se determina la morfología general de la superficie, los datos de curvas de nivel también se utilizan en la interpolación de valores de elevación en cada celda.

Cuando estos datos se usan para interpolar información de elevación, se leen y generalizan todos los datos de curvas de nivel. Se lee un máximo de 50 puntos de datos de estas curvas de nivel dentro de cada celda. Después de la resolución final, se utiliza sólo un punto crítico para cada celda. Por esta razón, es redundante tener una densidad de curvas de nivel con varias curvas de nivel que cruzan las celdas de salida.

Interpolación de varias resoluciones.

El programa utiliza un método de interpolación de varias resoluciones, que comienza con un ráster grueso y sigue con la resolución más fina especificada por el usuario. En cada resolución, se aplican las condiciones de drenaje, se lleva a cabo la interpolación y se registra la cantidad de sumideros restantes en el archivo de diagnóstico de salida.

Procesar datos de arroyos

El algoritmo de Hutchinson requiere que los datos de la red de arroyos tengan todos los arcos apuntando hacia abajo y que no haya polígonos (lagos) o arroyos trenzados en la red.

Los datos de arroyos deben estar compuestos por arcos individuales en un patrón dendrítico, con todos los arroyos trenzados, bancos de arroyos paralelos, polígonos de lago, etc. limpiados a través de la edición interactiva. Al editar polígonos de lago fuera de la red, se debe ubicar un arco individual desde el principio al final del área contenida. El arco debe seguir la ruta de un lecho fluvial histórico si se conoce o existe uno. Si se conoce la elevación del lago, el polígono del lago y su elevación se pueden utilizar como entrada de curva de nivel.

Crear rásters adyacentes y realizar mosaicos con ellos

A veces es necesario crear MDE a partir de teselas adyacentes de datos de entrada. Generalmente, esto ocurre cuando las entidades de entrada se derivan de una serie de hojas de mapa o cuando, debido a limitaciones de memoria, los datos de entrada deben procesarse en varias partes.

El proceso de interpolación utiliza datos de entrada de las áreas circundantes para definir la morfología y el drenaje de la superficie, e interpolar los valores de salida. Sin embargo, los valores de celda de los bordes de cualquier MDE de salida no son tan confiables como los del área central ya que están interpolados con la mitad de la información.

Para realizar las predicciones más precisas en los bordes del área de interés, la extensión de los datasets de entrada debe ser mayor que el área de interés. El parámetro Margen en celdas proporciona un método para acortar los bordes de los MDE de salida según una distancia especificada por el usuario. Los bordes de las áreas superpuestas deben tener al menos 20 celdas de ancho.

Debe haber un poco de superposición de los datos de entrada en las áreas adyacentes cuando se combinan varios DEM de salida en un ráster único. Sin esta superposición, es posible que los bordes de los DEM fusionados no sean suaves. Las extensiones de los datasets de entrada de cada una de las interpolaciones deben tener un área aún más grande que si sólo se fuera a hacer una interpolación para una interpolación simple, de forma de asegurar que los bordes se puedan prever de manera tan precisa como sea posible.

Después de crear los DEM, se pueden combinar mejor utilizando la herramienta de geoprocésamiento Mosaico con las opciones Combinar o Valor medio. Esta función proporciona opciones para administrar áreas superpuestas a fin de suavizar la transición entre los datasets.

Evaluar la salida

Cada superficie creada se debe evaluar para asegurar que los datos y parámetros suministrados al programa resulten en una representación realista de la superficie. Hay varias formas de evaluar la calidad de una superficie de salida, según el tipo de entrada disponible para crear la superficie.

La evaluación más común es crear curvas de nivel a partir de la superficie nueva con la herramienta Curva de nivel y compararlas con los datos de curvas de nivel de entrada. Es mejor crear estas curvas de nivel nuevas a la mitad del intervalo de la curva de nivel original para examinar los resultados entre éstas. Dibujar las curvas de nivel originales y las nuevas una sobre la otra puede ayudar a identificar los errores de interpolación.

Otro método de comparación visual es comparar la cubierta opcional de drenaje de salida con arroyos y crestas conocidos. La clase de entidad de drenaje contiene los

arroyos y las crestas que se generaron mediante el programa durante el proceso de aplicación de drenaje. Estos arroyos y crestas deben coincidir con los arroyos y las crestas conocidos del área. Si se utilizó una clase de entidad de arroyo como entrada, los arroyos de salida deben superponerse casi perfectamente con los arroyos de entrada, aunque pueden ser levemente más generalizados.

Un método común para evaluar la calidad de una superficie generada es retener un porcentaje de los datos de entrada del proceso de interpolación. Después de generar la superficie, la altura de estos puntos conocidos se puede sustraer de la superficie generada para examinar con qué precisión la superficie nueva representa la superficie real. Estas diferencias se pueden usar para calcular una medida de error para la superficie, como el error cuadrático medio (RMS).

El archivo de diagnóstico opcional se puede usar para evaluar con qué efectividad los ajustes de tolerancia eliminan los sumideros de los datos de entrada. Disminuir los valores de las tolerancias puede hacer que el programa se comporte de forma más conservadora al eliminar los sumideros.

Influencia de las curvas de nivel

Existe una influencia menor en el algoritmo de interpolación que hace que las curvas de nivel de entrada tengan un efecto más fuerte en la superficie de salida en la curva de nivel. Esta influencia puede resultar en un aplanamiento leve de la superficie de salida cuando cruza la curva de nivel. Esto puede generar resultados confusos al calcular la curvatura del perfil de la superficie de salida pero no es notable de otro modo.

Se realiza un MDE desde el shape de puntos de 67x50 mediante el algoritmo de Hutchinson. Como no se tienen capas de lagos, ríos o puntos importantes para ingresarlos como condiciones, se calcula el raster solo con las condiciones internas del algoritmo. Este mapa es el presentado en la figura 3.3.4.1.

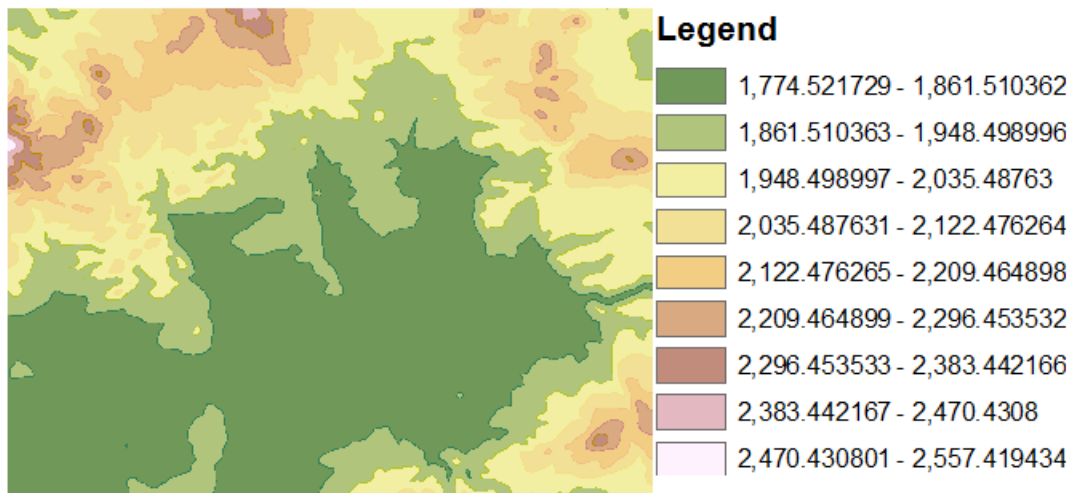


Figura 3.3.4.1 MDE interpolado con el algoritmo de Hutchinson

3.4 Los sistemas de información geográfica

Un Sistema de Información geográfico (SIG) particulariza un conjunto de procedimientos sobre una base de datos no gráfica o descriptiva de objetos del mundo real que tienen una representación gráfica y que son susceptibles de algún tipo de medición respecto a su tamaño y dimensión relativa a la superficie de la tierra. A parte de la especificación no gráfica el SIG cuenta también con una base de datos gráfica con información georreferenciada o de tipo espacial y de alguna forma ligada a la base de datos descriptiva. La información es considerada geográfica si es medible y tiene localización.

En un SIG se usan herramientas de gran capacidad de procesamiento gráfico y alfanumérico, estas herramientas van dotadas de procedimientos y aplicaciones para captura, almacenamiento, análisis y visualización de la información georreferenciada.

La mayor utilidad de un sistema de información geográfico está íntimamente relacionada con la capacidad que posee éste de construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales, esto se logra aplicando una serie de procedimientos específicos que generan aún más información para el análisis.

La construcción de modelos se convierte en una valiosa herramienta para analizar fenómenos que tengan relación con tendencias y así poder lograr establecer los diferentes factores influyentes.

La distribución espacial es inherente tanto a los fenómenos propios de la corteza terrestre, como a los fenómenos artificiales y naturales que sobre ella ocurren. Todas las sociedades que han gozado de un grado de civilización han organizado de alguna manera la información espacial.

3.5 ARCGIS

ArcGis es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGis se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. Estas aplicaciones se engloban en familias temáticas como ArcGis Server, para la publicación y gestión web, o ArcGis Móvil para la captura y gestión de información en campo.

ArcGis Desktop, la familia de aplicaciones SIG de escritorio, es una de las más ampliamente utilizadas, incluyendo en sus últimas ediciones las herramientas ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene y ArcGlobe, además de diversas extensiones. ArcGis Desktop se distribuye comercialmente bajo tres niveles de licencias que son, en orden creciente de funcionalidades y de precio: ArcView, ArcEditor y ArcInfo.

3.6 Matlab

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con

otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolbox); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blockset).

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

3.7 Arduino

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida.³ Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños.

Por otro lado el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque (boot loader) que corre en la placa.

Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software del ordenador (por ejemplo: Macromedia Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data). Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.

Al ser open-hardware, tanto su diseño como su distribución son libres. Es decir, puede utilizarse libremente para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto sin haber adquirido ninguna licencia.

El prototipo se controla mediante una placa Arduino Mega 2560. Esta es una placa microcontrolador basada ATmega2560. Tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 14 proporcionan salida PWM), 16 entradas digitales, 4 UARTS (puertos serie por hardware), un cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, entrada de corriente, conector ICSP y botón de reset. Contiene todo lo necesario para hacer funcionar el microcontrolador. La distribución física de la placa se muestra en la figura 3.7.1.

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (limite)	6-20V
Pines E/S digitales	54 (14 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	16
Intensidad por pin	40 mA
Intensidad en pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB de las cuales 8 KB las usa el gestor de arranque (bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz



Figura 3.7.1 La placa Arduino Mega 2560

3.8 Los motores a pasos

Los motores a pasos (Figura 3.8.1) son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos.

La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de tan solo 1.8° , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso (90°) y 200 para el segundo caso (1.8°), para completar un giro completo de 360° .

Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas está energizada, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

Existen 3 tipos fundamentales de motores paso a paso: el motor de reluctancia variable, el motor de magnetización permanente, y el motor paso a paso híbrido.

Principio de funcionamiento

Básicamente estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator.

Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deber ser externamente manejada por un controlador.



Figura 3.8.1 Ejemplo de un motor a pasos

Tipos de motores paso a paso

El motor de paso de rotor de imán permanente: Permite mantener un par diferente de cero cuando el motor no está energizado. Dependiendo de la construcción del motor, es típicamente posible obtener pasos angulares de 7.5, 11.25, 15, 18, 45 o 90°. El ángulo de rotación se determina por el número de polos en el estator

El motor de paso de reluctancia variable (VR): Tiene un rotor multipolar de hierro y un estator devanado laminado, y rota cuando los dientes del rotor son atraídos a los dientes del estator electromagnéticamente energizados. La inercia del rotor de un motor de paso de reluctancia variable es pequeña y la respuesta es muy rápida, pero la inercia permitida de la carga es pequeña. Cuando los devanados no están energizados, el par estático de este tipo de motor es cero. Generalmente, el paso angular de este motor de paso de reluctancia variable es de 15°

El motor híbrido de paso: Se caracteriza por tener varios dientes en el estator y en el rotor, el rotor con un imán concéntrico magnetizado axialmente alrededor de su eje. Se puede ver que esta configuración es una mezcla de los tipos de reluctancia variable e imán permanente. Este tipo de motor tiene una alta precisión y alto par y se puede configurar para suministrar un paso angular tan pequeño como 1.8°.

3.8.1 Motor a pasos unipolar

El motor unipolar (Figura 3.8.1.1) normalmente dispone de 5 o 6 cables dependiendo si el común está unido internamente o no, para controlar este tipo de motores existen tres métodos con sus correspondientes secuencias de encendido de bobinas, el común irá conectado a +Vcc o masa según el circuito de control usado y luego tan solo se alimenta la bobina correcta para que avance o retroceda el motor según avance o retroceso en la secuencia.

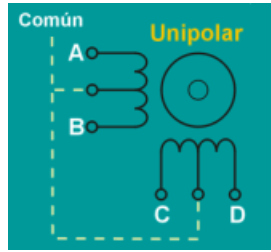


Figura 3.8.1.1 embobinado de un motor a pasos unipolar

Las secuencias son las siguientes:

Paso simple:

Esta secuencia de pasos es la más simple de todas y consiste en activar cada bobina una a una y por separado, con esta secuencia de encendido de bobinas no se obtiene mucha fuerza ya que solo es una bobina cada vez la que arrastra y sujeta el rotor del eje del motor

Paso	A	B	C	D
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

Paso doble:

Con el paso doble activamos las bobinas de dos en dos con lo que hacemos un campo magnético más potente que atraerá con más fuerza y retendrá el rotor del motor en el sitio. Los pasos también serán algo más bruscos debidos a que la acción del campo magnético es más poderosa que en la secuencia anterior, pero

Paso	A	B	C	D
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

Medio Paso:

Combinando los dos tipos de secuencias anteriores podemos hacer moverse al motor en pasos más pequeños y precisos y así pues tenemos el doble de pasos de movimiento para el recorrido total de 360° del motor.

3.8.2 Motor a pasos bipolar

Este tipo de motor lleva dos bobinados (Figura 3.8.2.1) independientes el uno del otro, para controlar este motor se necesita invertir la polaridad de cada una de las bobinas en la secuencia adecuada, para esto se utiliza un puente "H" para cada bobina y de este se tiene una tabla de secuencias como la siguiente:

Paso	A	B	C	D
1	+Vcc	Gnd	+Vcc	Gnd
2	+Vcc	Gnd	Gnd	+Vcc
3	Gnd	+Vcc	Gnd	+Vcc
4	Gnd	+Vcc	+Vcc	Gnd

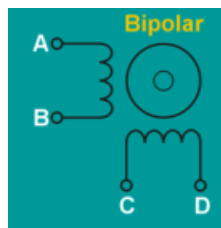


Figura 3.8.2.1 embobinado de un motor a pasos bipolar

Cada inversión en la polaridad provoca el movimiento del eje, avanzando este un paso, la dirección de giro se corresponde con la dirección de la secuencia de pasos, por

ejemplo para avanzar el sentido horario la secuencia seria 1-2-3-4,1-2-3-4.... y para sentido anti-horario seria; 4-3-2-1,-4-3-2-1...

3.9 Puente H

Un Puente H o Puente en H es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos, avance y retroceso. Son ampliamente usados en robótica y como convertidores de potencia. Los puentes H están disponibles como circuitos integrados, pero también pueden construirse a partir de componentes discretos.

El término "puente H" proviene de la típica representación gráfica del circuito. Un puente H se construye con 4 interruptores (mecánicos o mediante transistores). Cuando los interruptores S1 y S4 están cerrados (y S2 y S3 abiertos) se aplica una tensión positiva en el motor, haciéndolo girar en un sentido. Abriendo los interruptores S1 y S4 (y cerrando S2 y S3), el voltaje se invierte, permitiendo el giro en sentido inverso del motor. La figura 3.9.1 muestra la representación gráfica de un puente H y las combinaciones con los interruptores.

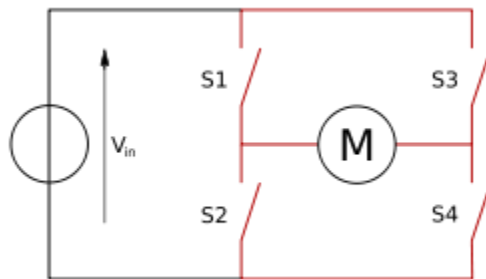


Figura 3.9.1 Interruptores en el puente H

Con la nomenclatura utilizada, los interruptores S1 y S2 nunca podrán estar cerrados al mismo tiempo, porque esto cortocircuitaría la fuente de tensión. Lo mismo sucede con S3 y S4.

En el prototipo se utiliza una placa con los componentes necesario para hacer funcionar el L298n que es un puente H para 2 A integrado en un encapsulado. El encapsulado se muestra en la figura 3.9.2.

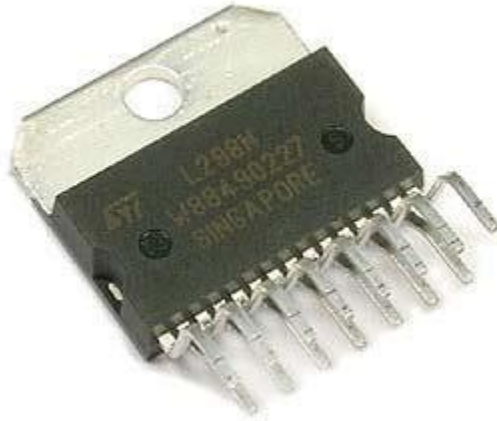


Figura 3.9.2 Circuito integrado L298n

3.10. Conversión del movimiento angular a lineal

En estos mecanismos, el tipo de movimiento que tiene el elemento de entrada del mecanismo es diferente del tipo de movimiento que tenga el elemento de salida, es decir, el tipo de movimiento se transforma en otro distinto, de ahí el nombre de mecanismo de transformación.

Los mecanismos de transformación pueden ser, a su vez, agrupados en dos grandes grupos:

1. Mecanismos de transformación circular-lineal: En este caso, el elemento de entrada tiene movimiento circular, mientras que el elemento de salida tiene movimiento lineal. Ejemplo: El mecanismo piñón-cremallera.

2. Mecanismos de transformación circular-alternativo: En este caso, el elemento de entrada tiene movimiento circular, mientras que el elemento de salida tiene movimiento alternativo. Ejemplo: El mecanismo de biela-manivela.

La leva

En mecánica, una leva es un elemento mecánico hecho de algún material (madera, metal, plástico, etc.) que va sujeto a un eje y tiene un contorno con forma especial. De este modo, el giro del eje hace que el perfil o contorno de la leva toque, mueva, empuje o conecte una pieza conocida como seguidor.(Figura 3.10.1)

Permite obtener un movimiento alternativo, a partir de uno circular; pero no permite obtener el circular a partir de uno alternativo (o de uno oscilante). Es un mecanismo no reversible, es decir, el movimiento alternativo del seguidor no puede ser transformado en un movimiento circular para la leva.

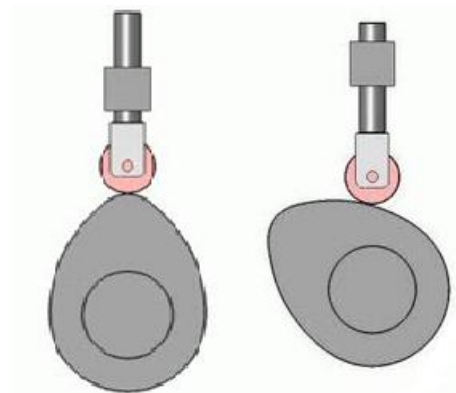


Figura 3.10.1 Mecánica de una leva

Este mecanismo se emplea en: motores de automóviles (para la apertura y cierre de las válvulas), programadores de lavadoras (para la apertura y cierre de los circuitos que gobiernan su funcionamiento), carretes de pesca (mecanismo de avance-retroceso del carrete), depiladoras,

Un automóvil posee múltiples cilindros (normalmente cuatro) con sus respectivas válvulas. Éstas deben abrirse y cerrarse siguiendo una secuencia periódica muy precisa y perfectamente sincronizada con el resto de los elementos del motor. Es por esto que todas las levas van montadas sobre un mismo elemento llamado árbol de levas. Por otra parte, cada una de las levas obliga a su correspondiente seguidor, llamado taqué, a un movimiento alternativo que se transmite hasta válvula a través de una palanca llamada balancín.

Piñón-cremallera

Este mecanismo convierte el movimiento circular de un piñón en uno lineal continuo por parte de la cremallera, que no es más que una barra rígida dentada. Este mecanismo es reversible, es decir, el movimiento rectilíneo de la cremallera se puede convertir en un movimiento circular por parte del piñón. En el primer caso, el piñón al girar y estar engranado a la cremallera, empuja a ésta, provocando su desplazamiento lineal. La mecánica de este mecanismo está ilustrada en la figura 3.10.2.



Figura 3.10.2 Mecanismo piñón cremallera

Aunque el sistema es perfectamente reversible, su utilidad práctica suele centrarse solamente en la conversión de circular en lineal continuo, siendo muy apreciado para conseguir movimientos lineales de precisión (caso de microscopios u otros instrumentos ópticos como retroproyectors), desplazamiento del cabezal de los taladros sensitivos, movimiento de puertas automáticas de garaje, sacacorchos, regulación de altura de los trípodes, movimiento de estanterías móviles empleadas en archivos, farmacias o bibliotecas, cerraduras..

Biela Manivela

Este mecanismo transforma el movimiento circular de la manivela en un movimiento alternativo del pie de una biela, que es una barra rígida, cuyo extremo está articulado y unido a la manivela (Figura 3.10.3). Este sistema también funciona a la inversa, es decir, transforma el movimiento alternativo de la biela en un movimiento de rotación de la manivela. Este mecanismo es esencial, pues se utiliza en motores de combustión interna, máquinas de vapor, máquinas de coser, herramientas mecánicas, etc. En el caso de los motores de los coches, la manivela es sustituida por el cigüeñal, que arrastra los pistones del motor a través de las bielas.

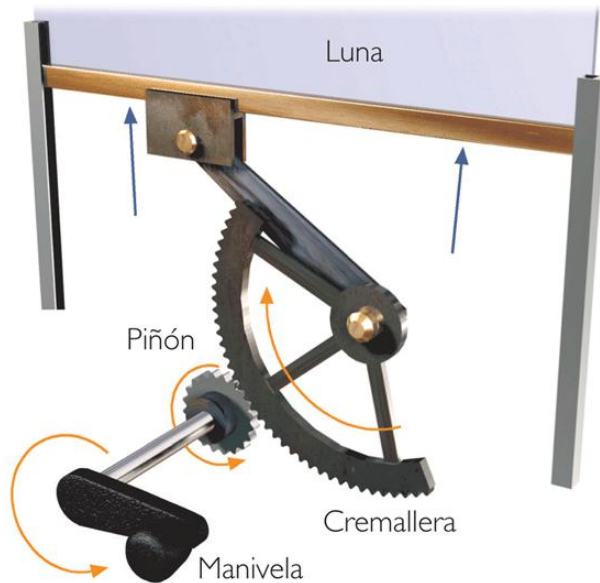


Figura 3.10.3 Mecanismo biela manivela

Mecanismo de tornillo-tuerca

El mecanismo tornillo-tuerca, conocido también como husillo-tuerca es un mecanismo de transformación de circular a lineal compuesto por una tuerca alojada en un eje roscado (tornillo).

Si el tornillo gira y se mantiene fija la orientación de la tuerca, el tornillo avanza con movimiento rectilíneo dentro de ella.

Por otra parte, si se hace girar la tuerca, manteniendo fija la orientación del tornillo, aquella avanzará por fuera de ésta (Figura 3.10.4). Este mecanismo es muy común en nuestro entorno, pues lo podemos encontrar en infinidad de máquinas y dispositivos.



Figura 3.10.4 Mecanismo tuerca husillo

Evidentemente, este mecanismo es irreversible, es decir, no se puede convertir el movimiento lineal de ninguno de los elementos en circular.

El avance depende de dos factores:

- La velocidad de giro del elemento motriz.
- El paso de la rosca del tornillo, es decir, la distancia que existe entre dos crestas de la rosca del tornillo. Cuando mayor sea el paso, mayor será la velocidad de avance.

3.11 Modelos Lluvia Escurrimiento

Los modelos lluvia-escurrimiento son una representación simplificada de los fenómenos reales y su objetivo es estudiar el comportamiento de los procesos relacionados con este fenómeno y predecir su respuesta. Las entradas y salidas del modelo son variables hidrológicas cuantificables (sean datos o valores por determinar), cuya relación o estructura es un conjunto de ecuaciones que las conectan entre sí. Por lo general, casi todas las variables hidrológicas pueden ser expresadas como funciones espacio-temporales o al menos como funciones de tiempo (Chow et al., 1988).

En realidad, el avance en el modelado del fenómeno lluvia-escurrimiento se ha desarrollado por más de 150 años. Actualmente, los esfuerzos se centran en la aplicación de programas de modelos matemáticos, y hasta la fecha se han alcanzado pocos adelantos teóricos. Aunque modelos y métodos de diseño han tenido gran éxito, todavía existen problemas significativos por superar, especialmente incertidumbres causadas por la variabilidad espacial de la lluvia, entre otros (Aranda, 2002).

El desarrollo y aplicación de modelos lluvia-escurrimiento ha sido un problema de la hidrología durante muchas décadas. En general, el desarrollo de estos modelos busca cumplir dos propósitos: el primero es ampliar el conocimiento sobre el proceso hidrológico involucrado en la transformación de lluvia a escurrimiento; y el segundo es proveer soluciones prácticas a los problemas relacionados con el manejo de los recursos ambientales e hídricos (Knight y Shamseldin, 2006). Dependiendo del grado de abstracción del mundo real, la estructura del modelo lluvia-escurrimiento puede clasificarse en tres tipos:

a) Modelos de sistemas distribuidos con bases físicas. Toman en cuenta la complejidad de las leyes físicas que explican el comportamiento espacio-temporal de los

procesos involucrados, generalmente como un sistema no lineal de ecuaciones diferenciales parciales.

b) Modelos de “caja negra”. Se refiere a la formulación de funciones empíricas de transferencia que relacionan en el tiempo las entradas (normalmente la lluvia) y salidas del sistema (usualmente gastos).

c) Modelos conceptuales semifísicos. Ocupan una posición intermedia respecto a los dos modelos anteriores en términos de complejidad y datos requeridos.

Los componentes más importantes de los modelos lluvia-escorrentía son: la precipitación (usualmente considerada como dato de entrada al modelo), abstracción hidrológica (o infiltración, determinada por las propiedades del suelo, y supuesta como salida del sistema), escorrentía superficial (escorrentía o precipitación efectiva), almacenamiento de superficie, evaporación y evapotranspiración, sólo por mencionar algunas. Sin embargo, la complejidad de los modelos lluvia-escorrentía aumenta cuando se habla de cuencas urbanas, donde el área tributaria tiene que ser discretizada en subcuencas y, adicionalmente, conectar las mismas mediante la modelación de un sistema de redes de drenaje (Rivas y Roesner, 2009).

En la evaluación de eventos de tormenta, la atención se concentra en una selección o cálculo preciso de los coeficientes de escorrentía así como en una revisión o análisis detallado de las intensidades de precipitación. Sin embargo, otro punto importante a considerar es la estimación de las pérdidas, principalmente por infiltración. En la mayoría de los casos, las pérdidas están relacionadas con las propiedades del suelo en la cuenca, mientras que el tiempo de respuesta está asociado con características físicas como la longitud y pendiente del cauce principal. Actualmente se utiliza la regionalización de hidrogramas unitarios, lo cual implica la determinación de parámetros tales como el tiempo pico, tiempo base y tiempo de concentración (Cuevas 2012). Esta regionalización permite caracterizar los hidrogramas unitarios con base en información topográfica y modelos simples de pérdida para estimar el volumen de escorrentía, gasto y tiempo de ocurrencia con la mínima información de la cuenca y mediante datos de fácil acceso u obtención para los ingenieros (Cleveland et al., 2008).

Respecto al estudio del fenómeno lluvia-escorrentía, con énfasis en la evaluación de caudales a la salida de cuencas donde pueda ocurrir uno o varios eventos de tormenta, existen muchas formulaciones que se han propuesto para analizar este fenómeno, desde los conocidos métodos del hidrograma unitario (Sherman, 1941), el modelo racional modificado (Crobeddu et al., 2007), y el método de la SCS, aún utilizados en la actualidad, hasta esquemas numéricos sofisticados que, mediante programas de cómputo, simulan el comportamiento espacio-temporal de todas las variables hidrológicas.

Los nuevos modelos hidrológicos constituyen un instrumento de trabajo que proporciona un medio adecuado para responder a cuestiones relacionadas con los componentes espaciales de la escorrentía. Facilitan el tratamiento de la información hidrológica gracias a que incluyen procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelación y presentación de datos georeferenciados. Se utilizan además para suministrar: características topológicas (configuración) de la red de drenaje, secciones transversales de cauces, recorridos superficiales de flujo del agua, coeficientes de resistencia (como el de Manning), etcétera. Los más actuales ofrecen la facilidad para ser integrados a sistemas de información geográfica (SIG) a través de interfaces (Maidment y Djokic, 2000) o han sido desarrollados de manera integral bajo esta clase de plataformas.

Uno de los modelos más utilizados en la actualidad es el HEC-HMS (desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos). Este modelo simula el proceso lluvia-escurrimiento al separar el ciclo hidrológico en partes y representar cada una de ellas como un modelo matemático. Las partes son conectadas según la cuenca de interés. Cada parte del ciclo hidrológico tiene varios métodos de estimación, hacer la elección correcta requiere el conocimiento de la cuenca, los objetivos del estudio hidrológico, los datos disponibles y el criterio del ingeniero (USACE, 1992)

Es importante que las formulaciones matemáticas para simular los procesos hidrológicos inherentes a un evento lluvia-escorrentía tengan suficiente sustento físico y, de preferencia, hayan sido verificadas de manera experimental (a nivel de laboratorio o de cuencas prototipo debidamente instrumentadas); esto porque una gran cantidad de información fisiográfica (de las cuencas) y meteorológica (de las tormentas) no asegura

por sí misma la confiabilidad en la respuesta de los esquemas de simulación (Jácome, 2009).

Es cierto que la teoría lluvia-escorrimento ha buscado esclarecer el escenario y aclarar deficiencias en los modelos, pero se requieren investigaciones futuras que incluyan: variabilidad de la lluvia, distribución espacial de las condiciones precedentes de humedad, representación de la morfología impuesta por la mancha urbana, registros de la escorrentía superficial, interfases de ajuste con respecto a modelos inicialmente concebidos para cuencas naturales, etcétera.

3.12 Simulación del proceso lluvia-escorrimento

3.12.1 Precipitación total

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los gastos resultantes se calculan mediante modelos de simulación del proceso lluvia-escorrimento y tránsito de avenidas. Una tormenta de diseño se puede definir como una altura de precipitación en un punto, esto es un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación en cierto lugar durante una tormenta o también ser expresada como un mapa de isoyetas que represente el patrón espacial de su distribución (García, 2006).

Las tormentas de diseño se pueden basar en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse conforme a las características generales de la precipitación observada en regiones cercanas. Su aplicación va desde valores puntuales de precipitación, por ejemplo en el método racional para determinar gastos máximos, hasta hietogramas de tormenta para analizar el fenómeno completo de lluvia-escorrimento.

La magnitud de la tormenta se puede entonces analizar con valores de lluvia total (h_p , en mm) o bien con intensidades o pulsos de precipitación (i , en mm/h). La duración se refiere al tiempo en que ocurre la precipitación y, en hidrología, se consideran cortas

las lluvias que tardan entre 5 y 120 minutos, mientras que las de larga duración exceden de 2 horas (García, 2006).

3.12.2 Precipitación en exceso

Cuando hay precipitación, una parte del agua contribuye al almacenamiento superficial (humedad del suelo, retención en cuerpos de agua y detención en zonas de planicie). Otras partes se evaporan y otras son retenidas por la vegetación. Después de cierto tiempo, se inicia un flujo en la zona no saturada del suelo (subsuperficial), otro hacia partes más profundas (subterráneo) y uno más que forma la escorrentía superficial con los volúmenes excedentes (una vez que el suelo se ha saturado).

Horton (1933) planteó que la escorrentía superficial se produce cuando la intensidad de la lluvia i es mayor que la capacidad de infiltración del suelo f . A la diferencia $i - f$, que representa tal escorrentía, Horton le dio el nombre de “exceso de lluvia” (precipitación en exceso, o excedente, P_e o Q). En la realidad son raros los casos en que $i > f$. Más bien, para que exista escurrimiento, es necesario que el suelo se vaya saturando y sólo en áreas saturadas se producen volúmenes excedentes de escorrentía superficial. Sin embargo, en el caso de zonas urbanas se presentan fenómenos peculiares. La lluvia es interceptada parcialmente por la vegetación. Al llegar la lluvia al suelo comienza a mojarse la superficie, llenando depresiones. Este llenado continúa hasta formarse un tirante suficiente que rompe la tensión superficial y se inicia así el escurrimiento (Breña, 2003).

Existen varios métodos para determinar el escurrimiento producido por una tormenta en determinadas condiciones de humedad y cobertura vegetal. El método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos es uno de los más utilizados.

Se trata de una formulación semiempírica que sirve para estimar la precipitación en exceso que produce la escorrentía, después de restar “las pérdidas”, pero sin evaluar su variabilidad temporal. Se le conoce también como método de la curva CN o método de las abstracciones. En la hidrología urbana se acostumbra denominar pérdidas a la parte del volumen precipitado que no escurre por la superficie de la cuenca y sus componentes

son: intercepción, almacenamiento en depresiones e infiltración. En la práctica, los componentes de las pérdidas son difíciles de separar y para efectos del cálculo del escurrimiento en zonas urbanas se estiman en forma conjunta (Breña, 2003).

Consideremos que una tormenta dada genera una altura de precipitación P . Al contacto con el suelo, una parte la será retenida inicialmente (abstracción inicial antes del encharcamiento), de modo que la escorrentía potencial se limita a la cantidad $P - la$. Supongamos también que la cuenca tiene una capacidad máxima de retención, o retención potencial S . En realidad, durante el fenómeno, se tendrá una escorrentía menor o precipitación excedente Pe y una retención parcial o menor, Fa . La hipótesis básica del método establece que la relación entre las cantidades de escorrentía real y potencial es similar al cociente entre retención real y potencial (Chow *et al.*, 1988):

$$\frac{Fa}{S} = \frac{Pe}{P - la} \quad (3.1)$$

Del principio de continuidad, se cumple que:

$$P = Pe + la + Fa \quad (3.2)$$

si derivamos esta ecuación respecto al tiempo t y renombramos variables se tiene lo siguiente:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dPe}{dt} + \frac{dFa}{dt} \quad (3.3)$$

$$h = q + \frac{dFa}{dt} \quad (3.4)$$

donde $h = \frac{dP}{dt}$ es la tasa de precipitación o intensidad, $q = \frac{dPe}{dt}$ es la tasa de precipitación efectiva o escurrimiento directo.

Al estudiar los resultados de muchas cuencas experimentales pequeñas, se encontró la siguiente relación empírica para la :

$$Ia = 0.20 \cdot S \quad (3.5)$$

Entonces, combinando las tres ecuaciones y resolviendo para Pe , se llega a la ecuación fundamental buscada:

$$Pe = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + 0.8 \cdot S} \quad (3.6)$$

Para estandarizar el método, se define el número adimensional N , tal que $0 \leq N \leq 100$, siendo máximo para superficies impermeables y menor para terrenos naturales. Este número y la retención potencial S , en mm, se relacionan por:

$$S = 254 \left(\frac{100}{N} - 1 \right) \quad (3.7)$$

El SCS propuso valores de N tabulados en función del tipo y uso del suelo, de modo que para cuencas heterogéneas, con diversos tipos de suelo y usos, se puede calcular un valor compuesto (ponderado). Además de lo anterior, el método contempla una corrección de valores N , según las condiciones antecedentes de humedad (CAH). Se tendrán así CAH secas (I), normales (II) o saturadas (III). Los valores de las tablas se asocian a las condiciones normales y, para las otras, se tienen las relaciones siguientes:

$$N_I = \frac{4.2 N_{II}}{10 - 0.058 N_{II}} \quad (3.8)$$

$$N_{III} = \frac{23 N_{II}}{10 + 0.13 N_{II}} \quad (3.9)$$

Por otro lado, al utilizar las ecuaciones 3.5 y 3.6 y resolverlas para Fa , se puede obtener una ecuación derivable con respecto al tiempo que proporcione una forma de distribución temporal de la retención parcial Fa :

$$Fa = \frac{S(P - Ia)}{P - Ia + S} \quad (3.10)$$

$$\frac{dFa}{dt} = \frac{S^2 h}{[(P + 0.8S)]^2}, \quad P \geq Ia \quad (3.11)$$

donde, $h = dP/dt$ corresponde a la intensidad de la lluvia.

Al ocurrir un evento de precipitación, $dFa/dt \rightarrow 0$ cuando $P \rightarrow \infty$, pero al tener a la intensidad en el numerador parecería que la retención parcial habría de incrementarse al inicio de una tormenta. A pesar que Morel-Seytoux y Verdin en 1981 (Chow, 1994) señalaron tal inconsistencia, se pudo comprobar que ésta ocurre fuera del rango de validez (antes de que $P \geq Ia$, o previo a la saturación) y que sólo parece influir en la forma de la curva de ascenso del hidrograma (Mobayed, 2001). Al aceptar entonces la expresión 3.15 y sustituirla en la ecuación 3.7, se obtiene una expresión del gasto de escorrentía q en función del tiempo t :

$$q(t) = i(t) = h(t) \left(1 - \frac{S^2}{(p(t) + 0.8S)^2} \right) \quad (3.12)$$

en unidades similares a h (por ejemplo, mm/min). Como se sabe, la precipitación en exceso es tan sólo la entrada a un sistema de cuenca, razón por la que q es en ocasiones reemplazada por la variable $i(t)$, típicamente usada para expresar entradas. Naturalmente, también se ve que es necesario conocer $h(t)$ y el número de escurrimiento, según las características de la cuenca y sus condiciones antecedentes de humedad. Con $h(t)$, se obtiene $P(t)$ que es el área bajo la curva de h ; y con N se calcula la retención potencial S , de acuerdo con la ecuación 3.7.

La variación temporal de la intensidad $h(t)$ se puede suponer, por ejemplo, conforme a la forma del hietograma instantáneo (Chow, 1994) o potencial; pero, evidentemente, la mejor alternativa es contar con registros de la lluvia conforme transcurre una tormenta, esto es en cantidades parciales de lluvia $p(k)$ para diferentes intervalos de tiempo $d(k)$, donde k es el contador de intervalos. Un caso así se reduce a las expresiones siguientes:

$$h(t) = \frac{p(k)}{d(k)}, \text{ v\u00e1lido para el intervalo } k \quad (3.13)$$

$$P(t) = \sum_{m=1}^k p(m) \quad t = \sum_{m=1}^k d(m) \quad (3.14)$$

Las ecuaciones se sustituyen en la ecuaci\u00f3n 3.16 y se obtiene as\u00ed la variaci\u00f3n de la precipitaci\u00f3n en exceso cuando los datos de entrada corresponden a un hietograma de tormenta. Puede incluso resolverse la ecuaci\u00f3n para los incrementos de tiempo que necesite el modelo, por ejemplo Δt , en cuyo caso se mantendr\u00e1 fijo el valor de $h(k)$ mientras el tiempo de simulaci\u00f3n quede comprendido en el intervalo $d(k)$. La sumatoria de $P(t)$ puede igualmente discretizarse seg\u00fan dicho incremento.

3.12.3 M\u00e9todo de Haan

Cuando se efect\u00fa el escalado fisiogr\u00e1fico de una cuenca y las unidades de aportaci\u00f3n pasan de celdas cuadriculares a microcuencas, la tasa de precipitaci\u00f3n en exceso que generan, o intensidad efectiva, no necesariamente equivale al caudal de escorrent\u00eda directa. En otras palabras, cuando el \u00e1rea de drenaje es m\u00ednima (o sea que se genera un hidrograma incipiente) la suposici\u00f3n de $i(t)=q(t)$ puede resultar cierta; pero esto no parece v\u00e1lido cuando la superficie es m\u00e1s grande, y obliga a considerar el efecto de regulaci\u00f3n del \u00e1rea en el tr\u00e1nsito de los escurrimientos. Ante esta situaci\u00f3n, se presenta la siguiente alternativa de c\u00e1lculo:

- a) Escalar siempre la cuenca con elementos de drenaje m\u00ednimos, para los cuales se cumpla invariablemente la igualdad anterior, o sea $i(t)=q(t)$.
- b) Aplicar un modelo de transito agregado (no distribuido, pues se caer\u00eda justo en el esquema anterior) que permita inferir el hidrograma $q(t)$ a la salida de la microcuenca, en funci\u00f3n de la entrada $i(t)$ y las caracter\u00edsticas f\u00edsicas del \u00e1rea.

Particularmente se ha considerado m\u00e1s atractiva la segunda opci\u00f3n, en tanto que puede permitir un escalamiento de la cuenca en \u00e1reas m\u00e1s grandes, y porque una fragmentaci\u00f3n excesiva, derivada de la primera opci\u00f3n, no necesariamente garantiza una

solución mejor respecto a la que ofrecen, por ejemplo, los modelos agregados convencionales.

Con respecto a la manera de aplicar un modelo de tránsito a la tasa de precipitación en exceso (ecuación 3.16), existe la alternativa de usar funciones de convolución o tipo impulso-respuesta o la posibilidad de emplear formas de salida conocidas, como el hidrograma unitario triangular o el adimensional propuesto por el SCS (1972). Por sus características y facilidad de adecuación al caso de respuestas rápidas, como las del escurrimiento pluvial en zonas urbanas, se ha valorado la ventaja de aplicar las expresiones propuestas por Haan (1970) para generar, como en la ecuación 3.12, el gasto de escorrentía q en función del tiempo t .

En 1970, Haan propuso la siguiente relación adimensional para generar hidrogramas de distintas formas, como una función del tiempo de pico t_p , el gasto máximo q_p y un parámetro adimensional K :

$$\frac{q(t)}{q_p} = \left[\frac{t}{t_p} \exp\left(1 - \frac{t}{t_p}\right) \right]^K \quad (3.15)$$

Puesto que el área bajo la curva anterior es el volumen \forall del hidrograma, o Pe , se puede comprobar que:

$$\forall = q_p t_p \left(\frac{e}{K}\right)^K \Gamma(K) \quad (3.16)$$

Siendo e el número de Euler y $\Gamma(K)$ la llamada función gamma. Al escribir la ecuación en forma adimensional, el autor representó las variaciones del parámetro $(q_p t_p) / \forall$ con respecto al coeficiente K y propuso el siguiente ajuste:

$$K \approx 6.5 \left(\frac{q_p t_p}{\forall} \right)^{1.92} \quad (3.17)$$

Haan comprobó, por ejemplo, que el conocido hidrograma unitario adimensional propuesto por el SCS (Chow et al., 1994) se construye adecuadamente cuando $K \approx 3.77$. Con la relación de Haan, entonces, es factible determinar la respuesta de una microcuenca o área de aportación sobre la que ocurre un evento de precipitación dado. El algoritmo de cálculo se completa con el método de la SCS, que es el más práctico para estimar el volumen de escurrimiento y, de paso, el llamado tiempo de retardo.

El procedimiento consiste en estimar la precipitación en exceso por medio de la ecuación 3.10, dado un volumen de precipitación P , que incide en un área de aportación, y su número de escurrimiento característico N con el cual se estima el valor de S .

Puesto que la esorrentía inicia una vez que ha llovido el volumen de abstracción I_a , el tiempo de retardo estaría asociado al momento en que ha terminado de precipitarse dicho volumen, esto es cuando:

$$\int_0^{tr} h(t) dt = I_a = 0.2S \quad (3.18)$$

Para un hietograma de intensidades $h(t)$, dado o supuesto, es factible determinar el tiempo de retardo cuando el área bajo la curva resulte igual a la abstracción I_a . Se entiende que si el rango de integración es igual a la duración de la tormenta, el volumen acumulado es igual a P .

Otro dato necesario se refiere al tiempo de concentración que para este procedimiento se denomina tiempo pico, t_p . Para calcularlo, se puede emplear la fórmula que propone la SCS para el tiempo de retraso, y que en áreas pequeñas se puede igualar con el tiempo pico (en el presente trabajo, el retado se evalúa conforme a la forma arriba descrita). La ecuación siguiente, desarrollada inicialmente para superficies agrícolas, ha sido también adoptada para aplicarse en zonas urbanizadas:

$$t_c = 0.0136 \frac{L^{0.8}}{S_0^{0.5}} \left(\frac{1000}{N} - 9 \right)^{0.7} \quad (3.19)$$

donde L es la distancia de recorrido del agua desde el punto más alejado del área de aportación hasta la entrada del cauce principal, en m; S_0 es la pendiente media de dicho

recorrido, expresada en forma adimensional; y N el número medio de escurrimiento. El tiempo de concentración esta dado en minutos.

Posteriormente, aceptando que $Pe=\nabla$, es fácil despejar el gasto pico q_p de la relación (3.17) y suponer que el coeficiente K constituye otro parámetro de ajuste del modelo hidrológico:

$$q_p \approx 0.377 \left(\frac{Pe}{t_p} \right) K^{0.521} \quad (3.20)$$

Finalmente, una vez definidas las variables q_p y t_p , se aplica la ecuación 3.15 para obtener el hidrograma incipiente $q(t)$ que produce un área de aportación con un retardo t_r , dada su geometría (L , S_0), número de escurrimiento (N) y el parámetro seleccionado ($K \approx 3.77$). No debe olvidarse, por cierto, multiplicar el resultado por la superficie del área para convertir el caudal (mm/min o m/s) a unidades más apropiadas (m^3/s).

3.12.4 Método del hidrograma unitario del SCS

La gráfica adimensional tiempo-gasto del SCS es un hidrograma unitario sintético donde el caudal se expresa como una fracción del gasto máximo, q_p , y el tiempo como una fracción del lapso en que ocurre el pico de la avenida, t_p . Dado el caudal máximo y su tiempo de ocurrencia para cierta duración de tormenta, el hidrograma para la cuenca se puede generar a partir del adimensional. La **Figura 3.17** muestra el gráfico referido, propuesto por el SCS, así como el conocido hidrograma unitario triangular que expresa la respuesta debida a un pulso de precipitación del hietograma de tormenta (SCS, 1972, 1986).

Con base en la revisión de un gran número de hidrogramas unitarios, el SCS sugiere que el tiempo de recesión se puede aproximar a $1.67 T_p$. Dado que el área del hidrograma unitario triangular ($q_p \times 2.67 T_p / 2$) es igual a la escorrentía directa que genera cierto pulso p_t (en el tiempo t) sobre un área de cuenca A , al despejar el valor del gasto máximo asociado se tiene que:

$$q_p = 2.08 \frac{p_t A}{T_p} \quad (3.21)$$

donde el área está expresada en km^2 , el tiempo pico en horas y el pulso de precipitación en cm. También se ha propuesto que el tiempo de retraso t_p sea $0.6T_c$, donde T_c es el tiempo de concentración de la cuenca.

El programa HEC-HMS permite emplear este método de estimación del hidrograma de escurrimiento y sólo requiere como dato de entrada el tiempo de retraso en minutos además del área en km^2 .

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Representación de motores por pixel.

Para las pruebas en este proyecto, se utiliza el MDE de la carta topográfica f14c65, que es la que el INEGI denomina como Querétaro, el modelo se descargó del continuo de elevaciones proporcionado por el INEGI en escala 1:50000.

Esta carta topográfica está en coordenadas geográficas con Datum WGS1984 y tiene los siguientes límites, al norte 20.75° , al sur 20.5° , al este -100.33° y al oeste -100.66° .

Como ya se determinó que la función de elevaciones solo depende del eje Z, se modela esta elevación con un motor a pasos lineal que represente que la posición del motor, es análoga de la elevación para la celda que modela del MDE.

En la figura 4.1.1 se presenta una superficie en 3d modelada como la unión de 20 puntos con elevación distinta, estas elevaciones son generadas con la función rand de Matlab, esta función genera valores aleatorios entre 0 y 1 con una distribución normal. Es claro en la figura como se parte de una reticula ordenada de 20 puntos y como cada elevación de modela con un punto en el espacio y se crea una superficie uniendo los puntos con líneas rectas y sombreando los triángulos resultantes.

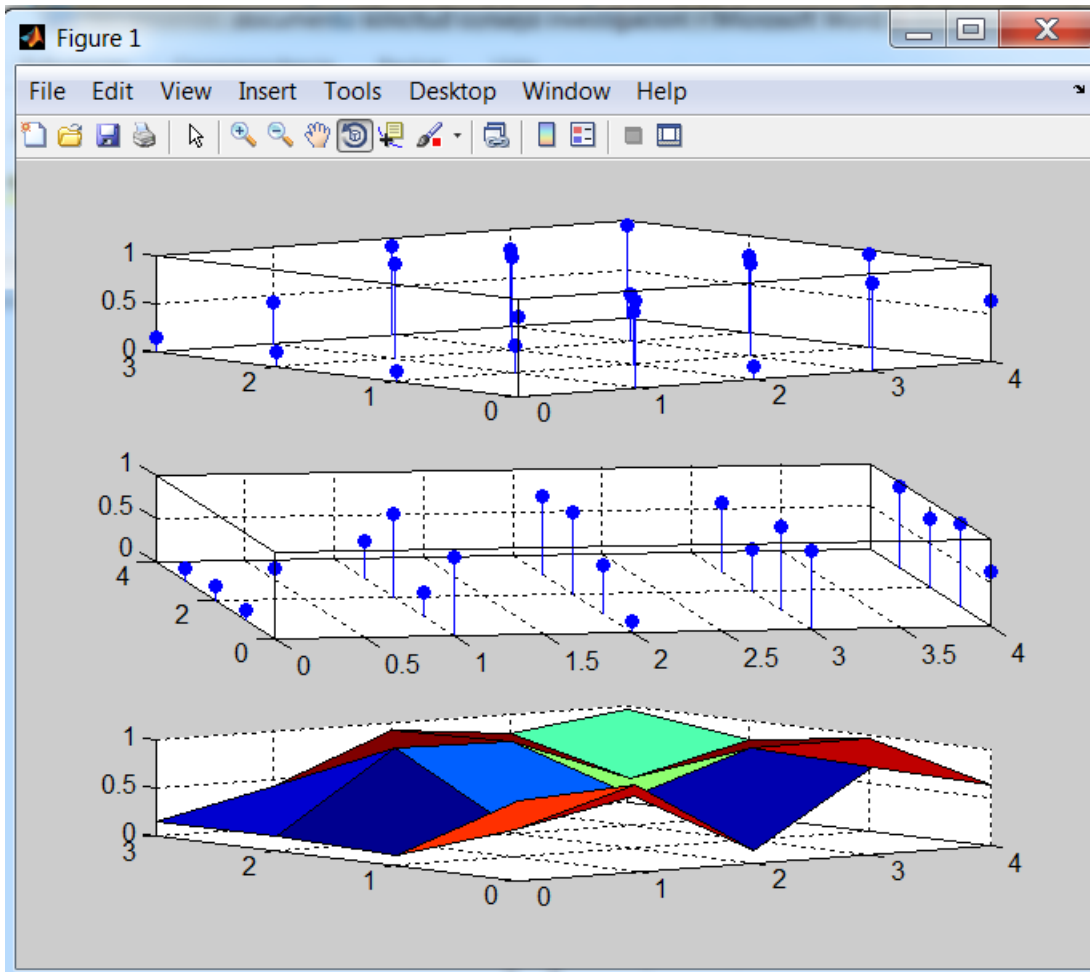


Figura 4.1.1 Construcción de una superficie a partir de una función $f(x, y)=z$

Aplicando la misma metodología de la figura anterior, se construye ahora un cuerpo geométrico conocido (pirámide) y se representa el volumen como la unión de 20 puntos con elevación determinada. Este cuerpo geométrico es el que se observa en la figura 4.1.2

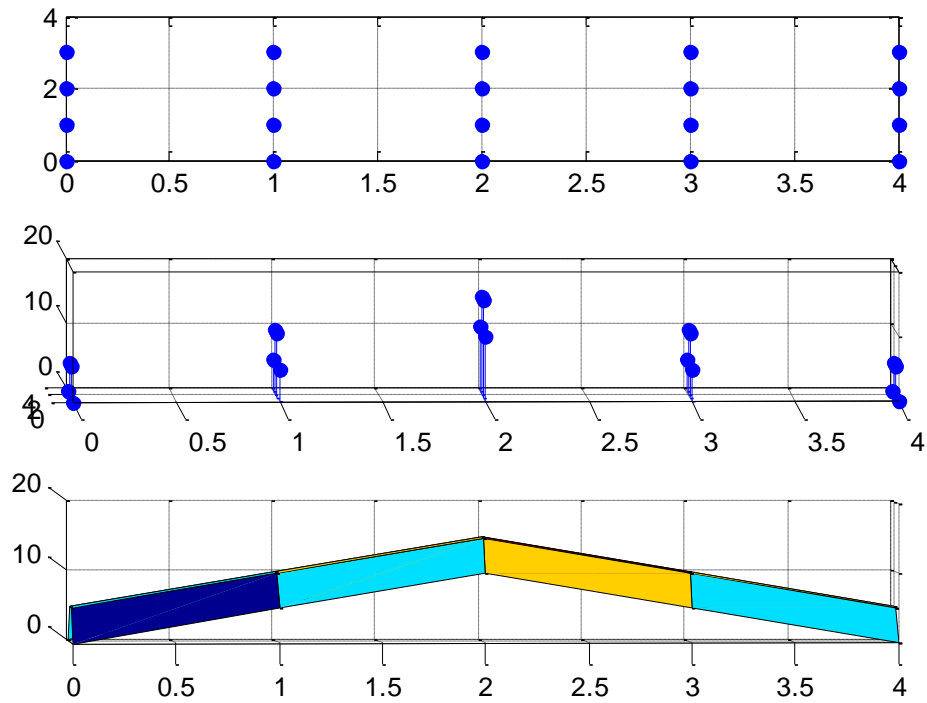


Figura 4.1.2 Construcción de una pirámide a partir de puntos con elevación

Los actuadores seleccionados para este proyecto son:

Anaheim Automation TSFNA25 (Figura 4.1.3), estos son motores a pasos bipolares con un mecanismo tuerca husillo que permite controlar la posición de un eje. Estos motores tienen una resolución de .0417 mm y un recorrido máximo de 70 mm.



Figura 4.1.3 Motor a pasos con desplazamiento lineal

El mapa obtenido tiene 1200 columnas y 900 filas, con esto se tienen en total 1080000 celdas raster con un valor único para cada pixel.

Si se lleva esto a un motor por celda, serían necesarios este número de motores para la construcción del prototipo.

Para disminuir el número de celdas, se realizan interpolaciones por medio del Algoritmo de Hutchinson y se generan nuevos MDE con celdas de mayor tamaño, disminuyendo así la cantidad de motores para el proyecto.

Para validar la confiabilidad de la interpolación, se realiza una operación entre mapas, con la calculadora de raster, y se determina un coeficiente que relaciona el raster de entrada con el de salida (en la interpolación) y se determina la correlación entre estos 2 valores de elevación para una superficie.

Para utilizar la calculadora de raster es necesario convertir los raster a formato decimal, para estos se utiliza la función float de spatial analyst. Después en la calculadora se realiza raster1 / raster2, el resultado de este raster se convierte a ASCII y con Matlab se realizan histogramas para conocer la concentración y distribución de la correlación entre rásters. La figura 4.1.4 presenta el histograma obtenido para un raster con 45 columnas x 34 filas. Además se presenta una tabla de resultados de correlación con rásters de distinto tamaño de celda.

Dimensión ráster	Valor máximo	Valor mínimo	Porcentaje de valores con correlación mayor a 95%
45*34	2412	1777	0.99216
80*60	2409	1777	0.99104
160*120	2532	1777	0.99896
400*300	2562	1773	0.99996
600*450	2568	1770	1
800*600	2577	1770	1
1200*900	1770	2578	1

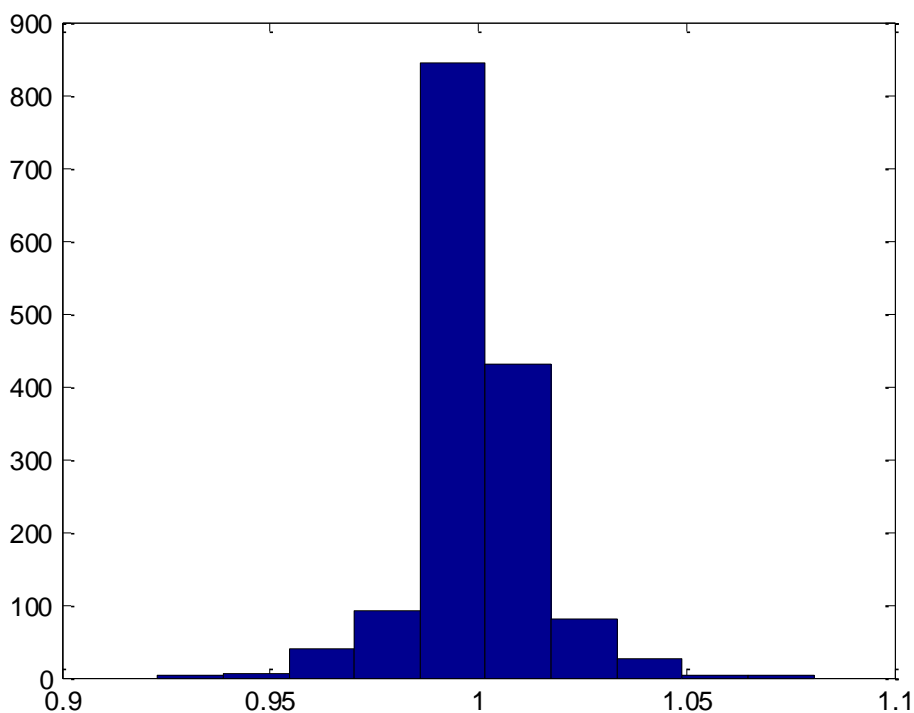


Figura 4.1.4 Histograma de la correlación entre rásters

Los resultados de este ejercicio indican que en modelos con 1530 motores el 99.21% de los puntos tienen una correlación mayor al 95% respecto del MDE del INEGI.

4.2 Conversión del MDE desde ArcGis a txt.

Es necesario tener un MDE en un formato exportable y reconocible para otros programas, se piensa que se puede representar un MDE como una matriz de elevaciones en la que cada combinación x_k, y_k represente un punto georreferenciado y el valor de la matriz sea la elevación para este punto.

Como los mapas en formato raster ya representan una reticula georreferenciada, se construyen matrices que representen el valor de elevación. En estas matrices la distancia entre cada celda es lo que va a determinar las escalas x , y del modelo y dependiendo de las relaciones entre estas distancias, se tienen modelos abultados o distribuidos.

La escala en z tiene relación con el desnivel en el MDE y de acuerdo a este dato, se ajusta la escala máxima que se puede representar según el desplazamiento máximo de los motores.

ArcGis ya tiene una herramienta que convierte el raster a una matriz como la que se necesita y la guarda en formato txt, por esto se utiliza la herramienta Raster to ASCII para conocer los valores de elevación que representa el MDE.

4.3. Lectura y tratamiento de un .txt en Matlab

Si bien es cierto que Matlab ya tiene funciones para leer un archivo con formato txt, estas funciones requieren de un archivo en el cual los datos a interpretar sean en formato de números, y si son tablas las que se van a leer, deben tener las mismas dimensiones en todo el archivo.

La herramienta de ArcGis que convierte ráster a txt, crea un archivo con 6 líneas de encabezado en los que presenta número de filas y columnas, georreferencia, tamaño de celdas y símbolo para valores nulos (Figura 4.3.1).

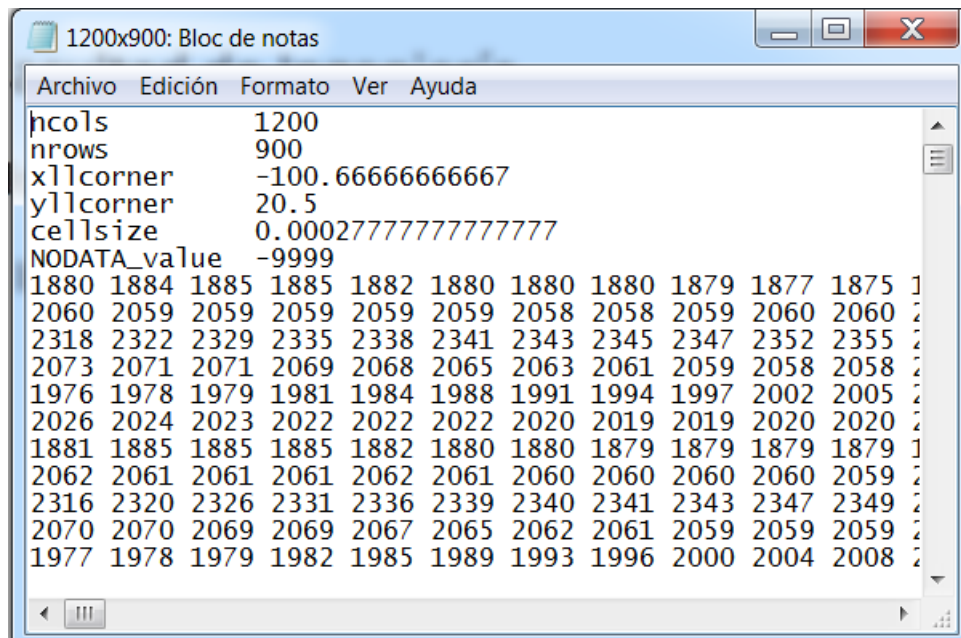


Figura 4.3.1 Estructura del archivo ASCII generado en ArcGis

A causa de estas líneas de encabezado, funciones como load en Matlab, no reconocen la matriz de elevaciones Por esto es necesario leer el archivo de otra forma.

Mediante una rutina programada, se accede al archivo txt y se van leyendo cada uno de los caracteres ASCII para interpretar finalmente la matriz de elevaciones obtenida desde ArcGis.

Con este programa (leerlineas.m), ya se lee el archivo generado y se puede tratar al MDE como una matriz de números en Matlab. Como ejercicio demostrativo se presenta una comparación del MDE de Querétaro proyectado en el visor 3d de ArcGis (ArcScene) y el visor 3d de Matlab mediante la función mesh. Los modelos correspondientes a este ejercicio son las figuras 4.3.2 y 4.3.3.

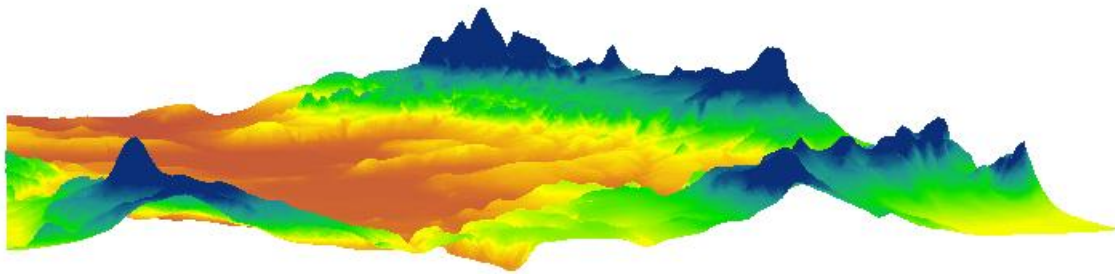


Figura 4.3.2 MDE de Querétaro proyectado en ArcScene

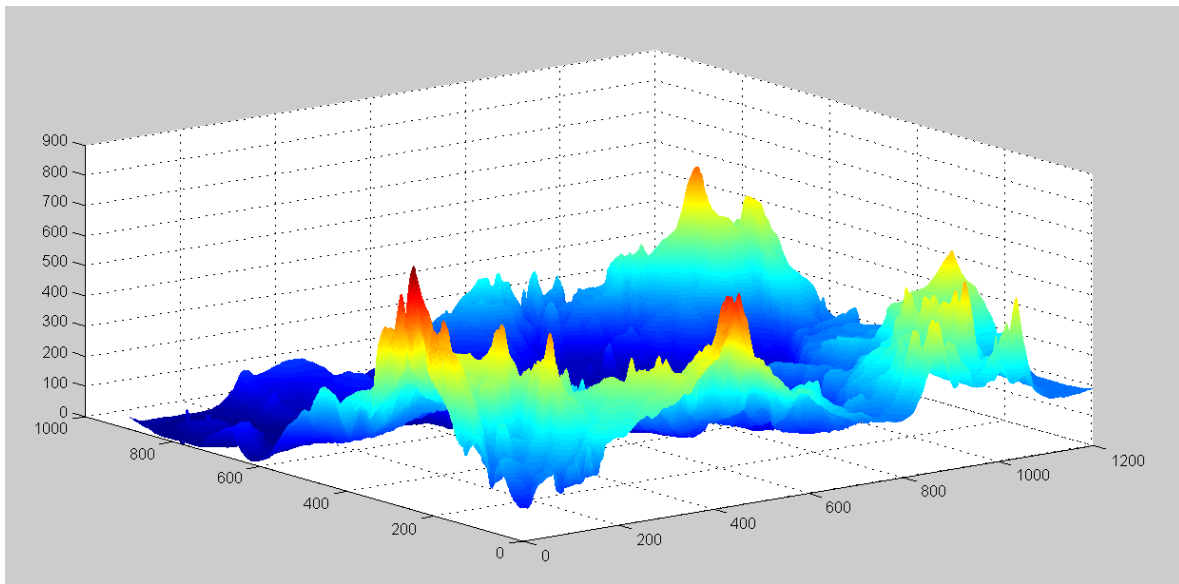


Figura 4.3.3 MDE de Querétaro proyectado en Matlab

4.3.2 Microcuenca de Menchaca

El mismo procedimiento que se realizó para la carta topográfica de Querétaro, se realiza para la microcuenca de Menchaca, esta microcuenca se traza en ArcGis con las herramientas Agwa2 (figura 4.3.4) y tiene coordenadas extremas: (-100.414323, 20.604427) y (-100.332292, 20.602917).

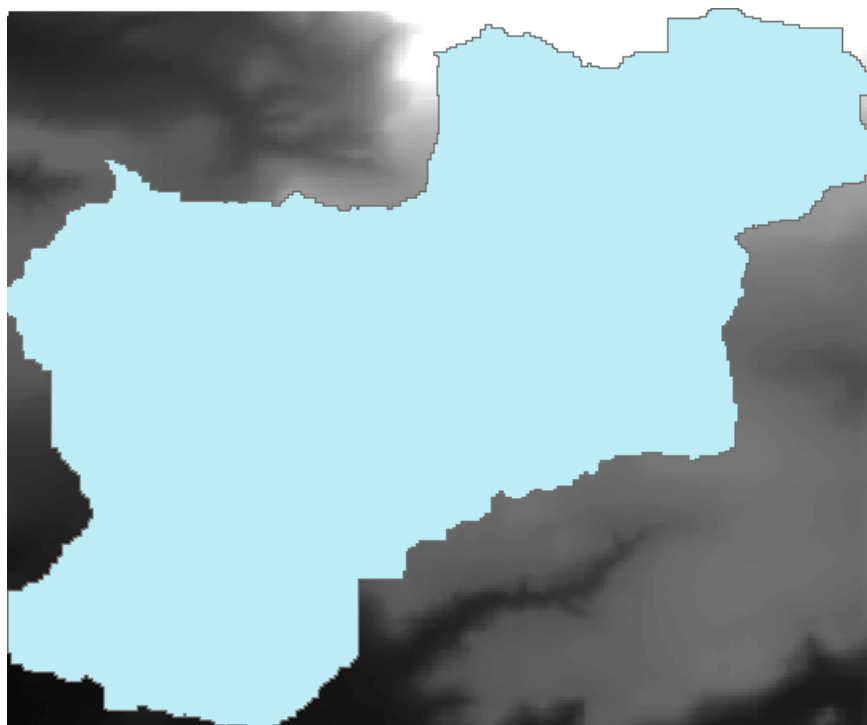


Figura 4.3.4 Microcuenca de Menchaca

Para que Matlab pueda reconocer el MDE, se recorta el MDE de la cuenca usando el polígono de Menchaca como máscara. Se exporta el raster y se procesa en Matlab y en ArcScene, los resultados se presentan en las figuras 4.3.5 y 4.3.6

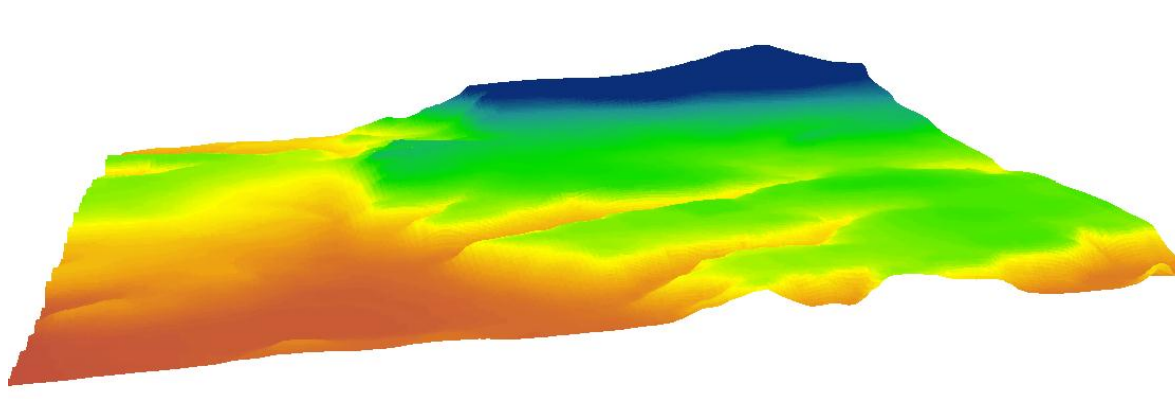


Figura 4.3.5 Microcuenca de Menchaca proyectada en ArcScene

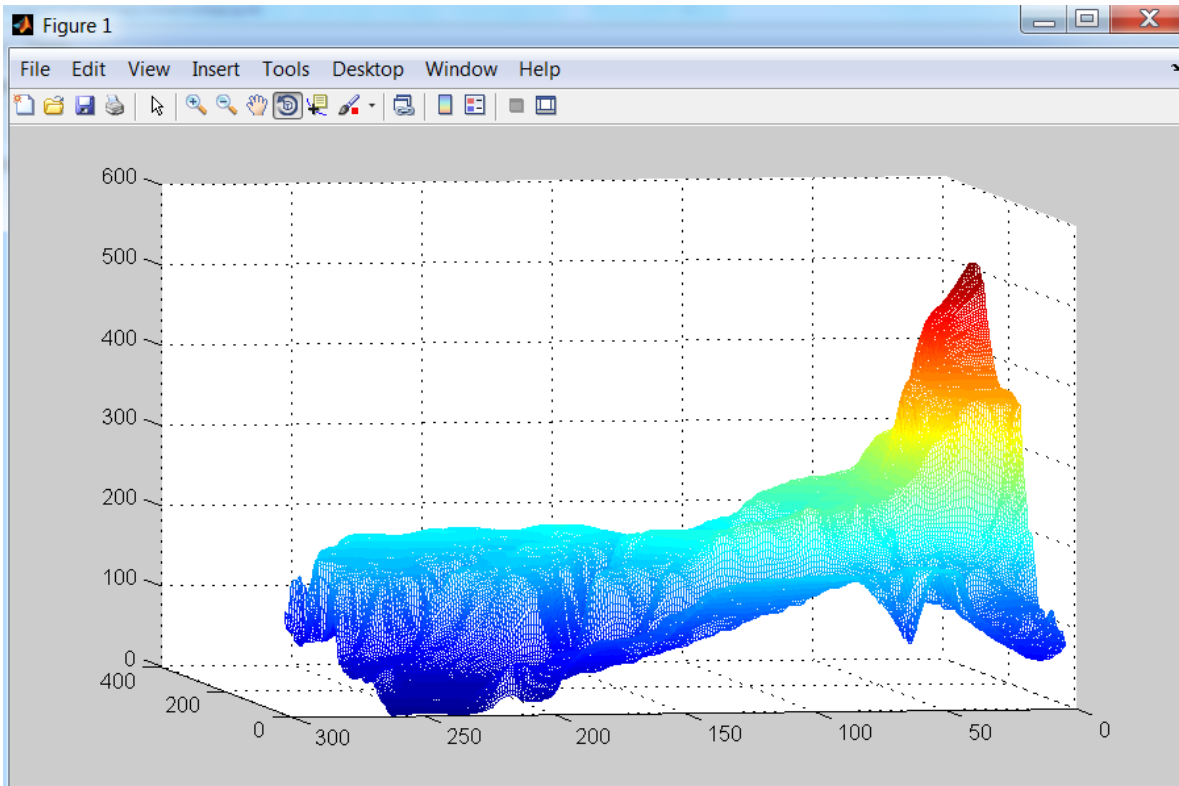


Figura 4.3.6 Microcuenca de Menchaca proyectada en Matlab

4.3.3 Microcuenca de los Tanganos

El mismo procedimiento que se realizó para la carta topográfica de Querétaro, se realiza para la microcuenca de Los Tanganos, esta microcuenca se traza en ArcGis con las herramientas Agwa2 (figura 4.3.7) y tiene coordenadas extremas: (-100.364496, 20.531217) y (-100.338542, 20.570052).

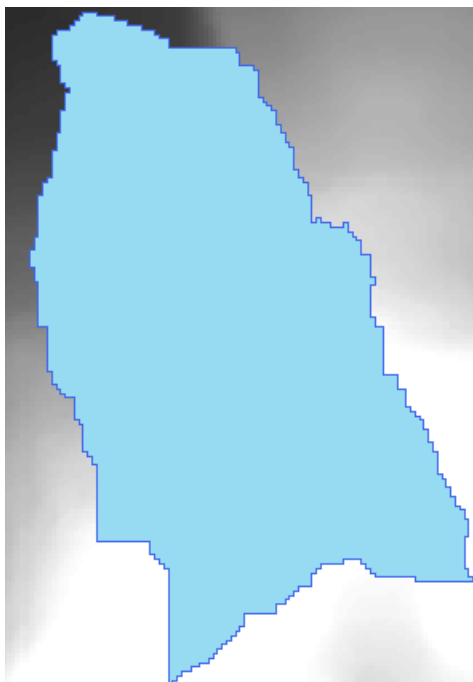


Figura 4.3.7 Microcuenca de Los Tanganos

Para que Matlab pueda reconocer el MDE, se recorta el MDE de la cuenca usando el polígono de Los Tanganos como máscara. Se exporta el raster y se procesa en Matlab y en ArcScene, los resultados se presentan en las figuras 4.3.8 y 4.3.9

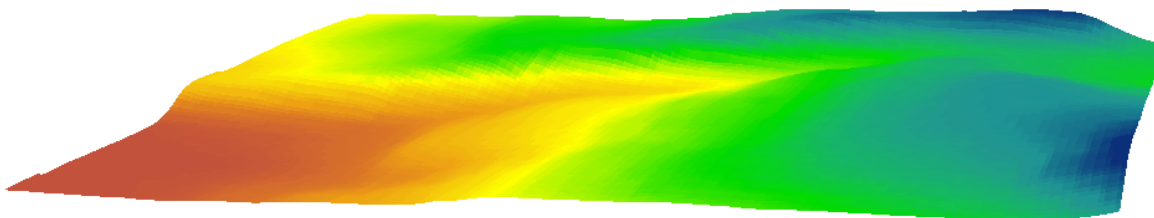


Figura 4.3.8 Microcuenca de Los Tanganos proyectada en ArcScene

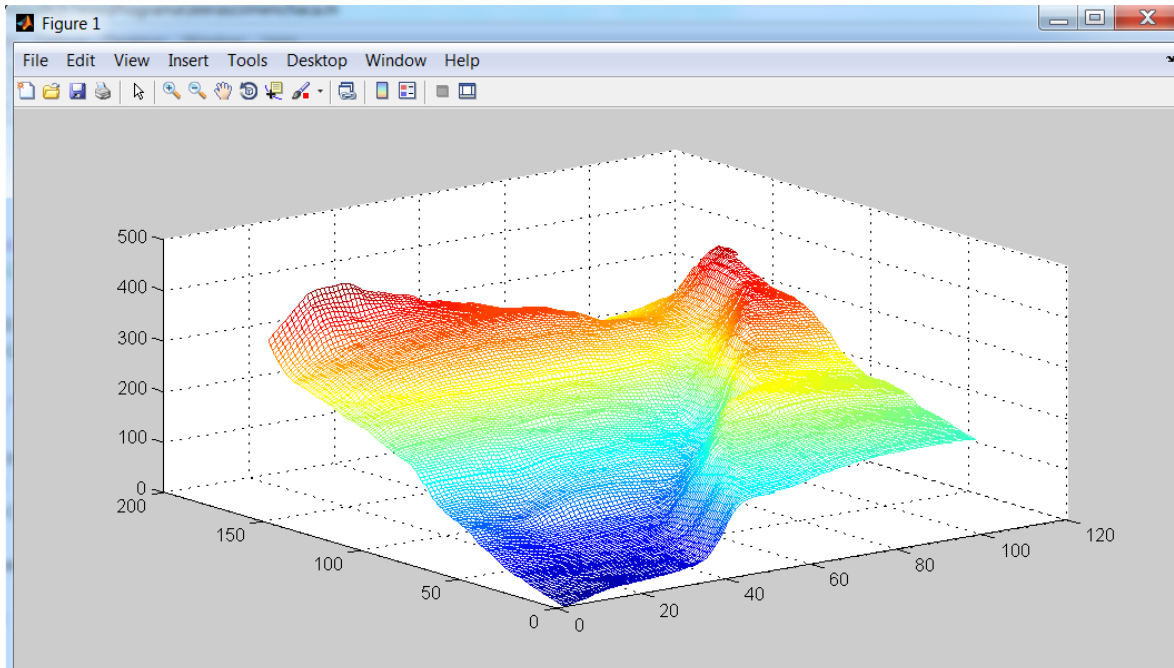


Figura 4.3.9 Microcuenca de Los Tanganos proyectada en Matlab

4.4. Envío de datos de control desde Matlab al Microcontrolador

Para controlar la tarjeta Arduino desde Matlab, se tiene una librería para Matlab creada por Giampero Campa en 2010.

En el caso de este proyecto se utiliza la tarjeta Arduino Mega, la librería viene programada para una tarjeta Arduino Uno por lo que es necesario cambiar la configuración de los pines de entradas y salidas en los archivos `arduino.m` y `srve.pde`

Para poder hacer uso de esta librería, es necesario a través de la interface de Arduino, programar la placa con el archivo `srve.pde` (editado para la placa Arduino Mega) contenido en la librería.

Una vez que se tiene cargado el servidor en la placa, se conecta a Matlab mediante la creación de una nueva estructura (en este caso `a`) y se llama con el número de puerto COM que genera el sistema operativo para el Arduino.

```
>> a=arduino ('COM5');
```

Después de una conexión exitosa, desde Matlab se pueden establecer los pines a utilizar como entradas o salidas mediante la función `pinMode`.

Además existe la función `digitalWrite` para enviar señales digitales a los pines asignados como salida.

Mediante tratamiento del MDE, en Matlab se calculan los pasos necesarios para la correcta representación del MDE y se envían los bits de control necesarios a los puentes H mediante el Arduino.

4.5 Algoritmo de control en el Arduino

Para la programación del controlador, se utiliza el programa `srv.pde` incluido en el ArduinoIO Package para Matlab desarrollado por Giampiero Campa y que se puede descargar desde <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27843>.

Al programa incluido en el paquete es necesario modificarle los pines de asignación debido a que Giampiero lo desarrollo para una tarjeta Arduino Uno y la usada en la tesis es una Arduino Mega.

4.6 Pruebas de repetitividad en el posicionamiento

Para mostrar estos resultados, se seleccionan las 2 superficies generadas en Matlab en el tema 4.1. Estos esquemas son generados en el prototipo.

La figura 4.6.1 muestra los motores posicionados según la sabana generada en 4.1



Figura 4.6.1 Modelo del subtema 4.1



Figura 4.6.2 Modelo de la piramide del subtema 4.1

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Un MDE provee la información necesaria para la modelación de las condiciones de relieve en un prototipo como el construido en la tesis; sin embargo es necesaria la implementación de este sistema bajo otras condiciones, principalmente el uso de mas motores en la construcción de un prototipo de mayor tamaño.

Los resultados obtenidos con la interpolación con el algoritmo de Hutchinson son bastante confiables. Matlab reconoce los datos de un archivo .txt de una forma amigable y convierte esta información en datos para el controlador de manera muy eficaz.

Los algoritmos creados en esta tesis, son completamente funcionales para sistemas más grandes, lo único que se requiere es el uso de un archivo .txt y un sistema mecatrónico como el aquí presentado.

La determinación de un MDE en áreas de llanura urbanizadas requiere la modificación del MDE original, a efectos de contemplar tanto la red de drenaje superficial y subterránea; así como terraplenes viales y ferroviarios que actúan como divisorias de aguas.

El avance en el tratamiento de la información permite un aumento en la resolución espacial de la modelación agilizando el análisis de distintas escalas espaciales para la desagregación de la cuenca en forma rápida y sencilla. Este análisis permite estudiar la variación espacial de factores que antes se consideraban como constantes.

CAPÍTULO 6: REFERENCIAS

Aranda, P, A. (2002). Diseño sistemático, basado en SIG, para redes de alcantarillado pluvial. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.

Bitrán D., et al, (2003). Características hidrometeorológicas y estructurales del rompimiento de las presas ‘Dolores’, Villa de Reyes, San Luis Potosí, y ‘El Capulín’, Villa García, Zacatecas, ocurrido en agosto del 2002 y su impacto socioeconómico, CENAPRED, México.

Breña, A. (2003). Hidrología urbana. Universidad Autónoma Metropolitana. México, D.F. Capítulo 3. Pp. 1-5.

Chapman, C.A. (1952). A new quantitative method of topographic analysis. American Journal of Science, 250: 428-452.

Chow, V. T., Maidment, D. R. and Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. McGraw Hill Inc., (edición en español, Santa Fe de Bogotá, Colombia, 1994).

Cleveland, T. H., He, X. and Thompson, D. B. (2008). Simple Rainfall Loss Models for Rainfall-Runoff Modeling. World Environmental and Water Resources Congress.

Cotler H. (2004). Manejo integral de cuencas hídricas en México: Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Instituto Nacional de Ecología, México

Creed IF, Sanford SE, Beall FD, Molot LA, Dillon PJ. (2003). Cryptic wetlands: Integrating hidden wetlands into models of dissolved organic carbon export. Hydrological Processes 17: 3629–3648.

Crobeddu, E., Bennis, S. and Rhouzlane, S. (2007). Improved rational hydrograph method. Journal of hydrology. Volume 338, Issue 1-2 , pp. 63 – 72

Cuevas, L. (2012). Efecto de la traza urbana sobre los escurrimientos pluviales. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.

Evans, J. S. and Hudak, A. T. (2007). A multiscale curvature filter for identifying ground returns from discrete return lidar in forested environments. 2007. IEEE T. Geosci. Remote., 45, 1029–1038.

Felicísimo, Ángel M. (1992). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Oviedo, Pentalfa Ediciones

García, A. (2006). Hietogramas de diseño en zonas urbanas. Proyecto Terminal. División de ciencias básicas e ingeniería. Departamento de ingeniería de procesos e hidráulica.

Goodchild, M. F. y D. M. Mark. (1987). The fractal nature of geographic phenomena. Annals of Association of American Geographers. 77 (2): 265–278.

Haan, C. T., B. J. Barfield and J. C. Hayes. (1994). Design hydrology and sedimentology for small catchments. Chapter 3: Rainfall–runoff estimation in storm water computations. Academic Press. San Diego, California, U.S.A

Hopkins C. Hayashi M. Peddle D. (2008). Comparing alpine watershed attributes from LiDAR, Photogrammetric, and Contour-based Digital Elevation Models. 2009. Hydrol. Process. 23:451-463

Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative geomorfology. Geol. Soc. Am. Bull. 56. pp. 275-370.

Hutchinson, M. F. (1988). Calculation of hydrologically sound digital elevation models. Documento presentado en el Tercer simposio internacional sobre manejo de datos espaciales en Sydney, Australia.

Hutchinson, M.F., Stein, J.A. and Stein, J.L.(2001). Upgrade of the 9 second Australian digital elevation model. Center for Resource and Environmental studies, Australian National University. Issue 3, pages 419–429.

Jacome, M. (2009). Modelo hidrológico distribuido basado en información de radar meteorológico en zonas urbanas. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.

Jarrett, R.D. (1984) Hydraulics of high gradient streams: Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, v.110, no.11, p. 1519-1539

Jarrett, R.D (1987). Hydraulics of High-Gradient Streams” Journal of Hydraulic Engineering 113, 927

Jarret (2007) Hydrologic and hydraulic research in mountain rivers. Journal of the American Water Resources Association. Volume 26.

Kim. J. Kang B. (2009). Micro-macro linear piezoelectric motor base on self-moving cell. Mechatronics, 10, 1134-1142.

Klimes Vit (1983) Conceptualization and scale in hydrology. Journal of Hydrology Volume 65, Issues 1-3, August 1983, Pages 1-23

Klimes V. (1990) Hydrology of Mountainous Areas (Proceedings of the Strbské Pleso Workshop, Czechoslovakia, June 1988).

Knight, D. W. y Shamseldin, A. Y. (2006). River basin modelling for flood risk mitigation. Taylor & Francis, pp.171-180.

Kumar S. Sekhar M. Bandyopadhyay S. (2009). Assimilation of remote sensing and Hydrological data using adaptive filtering techniques for watershed Modelling. 2009. Current science. 97: 1196-1202.

Maidment, D. and Djokic, D. (2000). Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems. ESRI Redlands (EEUU) pp. 216.

Millán S. (2006). Procedimientos de Mecanizado, Madrid: Editorial Paraninfo.

Mobayed, K.N. (2001). Modelo distribuido de lluvia escorrentía basado en el manejo de variables geo-referenciadas y el escalamiento fisiográfico de cuencas. Tesis doctoral, UNAM, México.

Nishiyama Y. Nakamura M. Henmi C. Yamaguchi K. Mochizuki S. Nakagawa H. Takiura K. (2009). Development of a three-dimensional bioprinter: Construction of cell supporting structures using hydrogel and state of the art inkjet technology. 2009. Journal of biomechanical engineering,131, 35001-1, 35001-6.

Oliver, M.A.; Webster, R. (1990) Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. International Journal of Geographic Information Systems, 4(3): 313-332.

Peucker, T.K.; Fowler, R.J.; Little, J.J.; Mark, D.M. (1978). The triangulated irregular network". Proceedings of the ASPDigital Terrain Models (DTM) Symposium: 516-540. American Society of Photogrammetry. Falls Church, Virginia.

Poggio, L. and Soille, P. (2008). Quality assessment of hydrogeomorphological features derived from Digital Terrain Models, EUR 23489 EN, 2008. European Commission, DG Joint Research Centre.

Pietroniro A. Leconte R. (2005). A review of Canadian remote sensing and hydrology. 1999-2003. Hydrological Processes 19:285-301.

Rivas, I. and Roesner, L. A. (2009). Design and Implementation of Optimized Hydrologic Unit Watersheds for Rainfall-Runoff Modeling. World Environmental and Water Resources Congress.

Rombaldi G. Callosa-Tarr. J. (2002). Participatory 3-Dimensional Modelling: Guiding Principles and Applications. ASEAN Regional Centre for Biodiversity Conservation (ARCBC), Los Baños, Philippines

Royle, A.G.; Clausen, F.L.; Frederiksen, P. (1981). Practical universal kriging and automatic contouring". Geo-Processing, 1:377-394

Salas, M.A., (1999). Obras de protección contra inundaciones, serie cuadernos de investigación, no. 49, CENAPRED, México.

Samet, Hanan; Rosenfeld, Azriel; Shaffer, Clifford A.; Webber, Robert E. (1984). A geographic information system using quadtrees. *Pattern Recognition*, 17(6): 647-656.

Sherman M. Woodward y Chesley J.Posey.(1941) *Hydraulics of Steady Flow in Open Channels*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 154-155.

United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (1993b). *Handbook - Urban Runoff Pollution Prevention and Control Planning*. EPA-625-R-93-004. Washington, DC.

Wahba, G. (1990). Spline models for Observational data. Documento presentado en la Serie de conferencias regionales de CBMS-NSF sobre matemáticas aplicadas. Philadelphia: Soc. Ind. Appl. Maths.

Wechsler, S. P. (2007). Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. 2007. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1481–1500.

Weiner, D and Harris, T. (1999). *Community-Integrated GIS for Land Reform in South Africa*. Research Paper 9907, West Virginia University