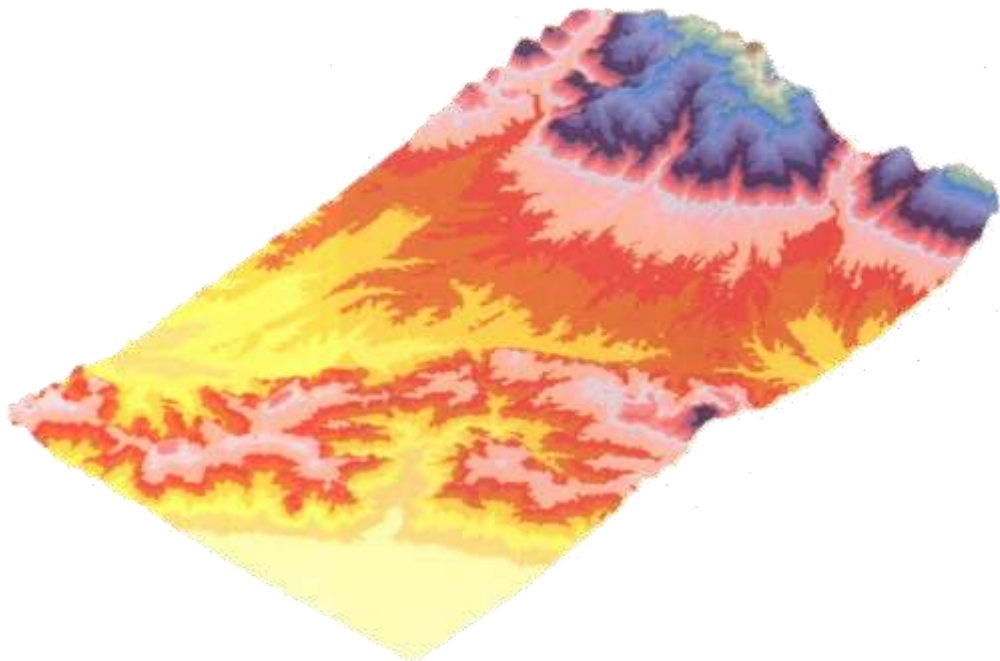
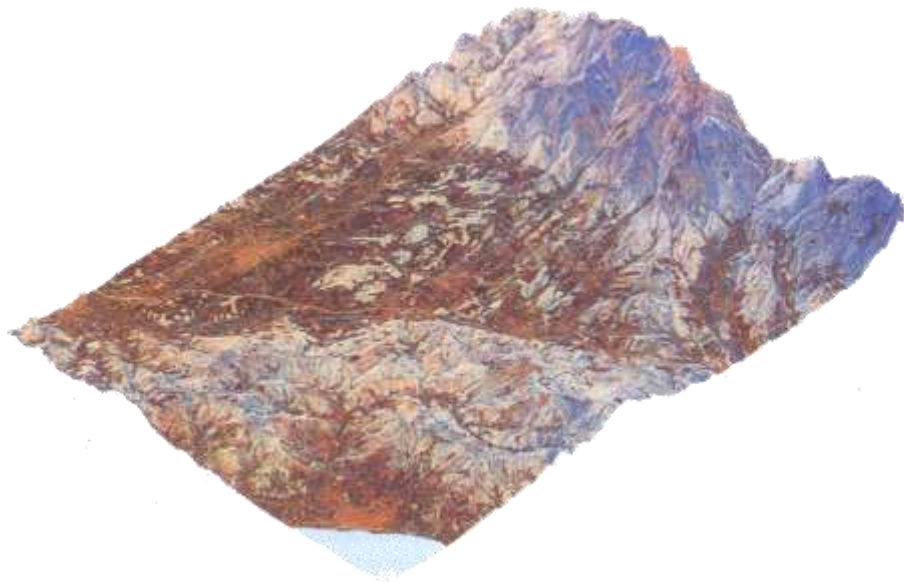


ANÁLISIS REGIONAL DE LA INFORMACIÓN GEOLÓGICA

José Sellés-Martínez
Levantamiento Geológico 2014



Como transformar un conjunto de datos puntuales en un mapa

El tema de la representación de un conjunto de datos sobre una superficie geográfica puede ser abordado desde diferentes perspectivas. El trabajo geológico de campo implica generalmente la toma de datos y muestras. Estos datos y muestras representan valores de diferentes propiedades o características de la roca en el punto de muestreo. La medición y muestreo pueden ser directos, realizados por el geólogo sobre el afloramiento o bien provenir de instrumentos que pueden detectar o penetrar en el subsuelo e, incluso, en el caso de las perforaciones petrolíferas, obtener muestras en profundidad.

Las mediciones de cota, rumbo e inclinación de estructuras, cantidad de lluvia, análisis químicos de las rocas, sedimentos o el agua, propiedades como la porosidad y la permeabilidad, la densidad y propiedades magnéticas de los minerales del subsuelo y muchas otras más son ejemplos de mediciones que corresponden a un único punto de muestreo y no son representativos de todo el sistema geológico bajo estudio. Por ello, dichas mediciones deben ser relacionadas –integradas– con datos similares correspondientes a otros puntos del área de interés, de modo de poder establecer la permanencia o variación de los valores en cuestión en el espacio.

Cómo relacionar dichos valores y representarlos en el mapa depende, naturalmente del tipo de valor que se trate pero, además, de otros varios factores que tienen que ver con la forma en que dicho valor varía en el espacio, es decir si lo hace en forma continua o no y de si posee una variación suave o tiene saltos bruscos, por ejemplo.

Los diferentes tipos de conjuntos de datos que pueden incluirse en los mapas

Desde el punto de vista de la jerarquía geométrica de la representación podemos establecer datos que responden a cuatro categorías diferentes y equivalen a puntos, líneas, áreas y volúmenes con una ubicación geográfica determinada.

En los **mapas de puntos** el valor del dato es exclusivamente local (la posición de un fósil o de un pozo de agua que se ha muestreado, por ejemplo). Esta información puede tener un valor exclusivamente puntual, como en el caso del fósil, o puede ser parte de un conjunto de datos de categoría superior, como el caso del pozo en el que, si bien la posición del mismo es única e intransferible, los datos obtenidos en el mismo sí pueden ser afectados al estudio de un área o volumen próximo.

Los **mapas de líneas** pueden ser tanto representaciones directas, en cuanto implican la traza de rasgos lineales como son la intersección de una determinada estructura con la superficie del terreno (tal como sería el caso de una falla, el plano axial de un pliegue o el techo de un estrato), pero también pueden ser representaciones indirectas de atributos que se describen mediante una superficie o un volumen, como podría ser la posición del nivel piezométrico de un acuífero o el total de lluvias caídas en un año en una determinada región, respectivamente.

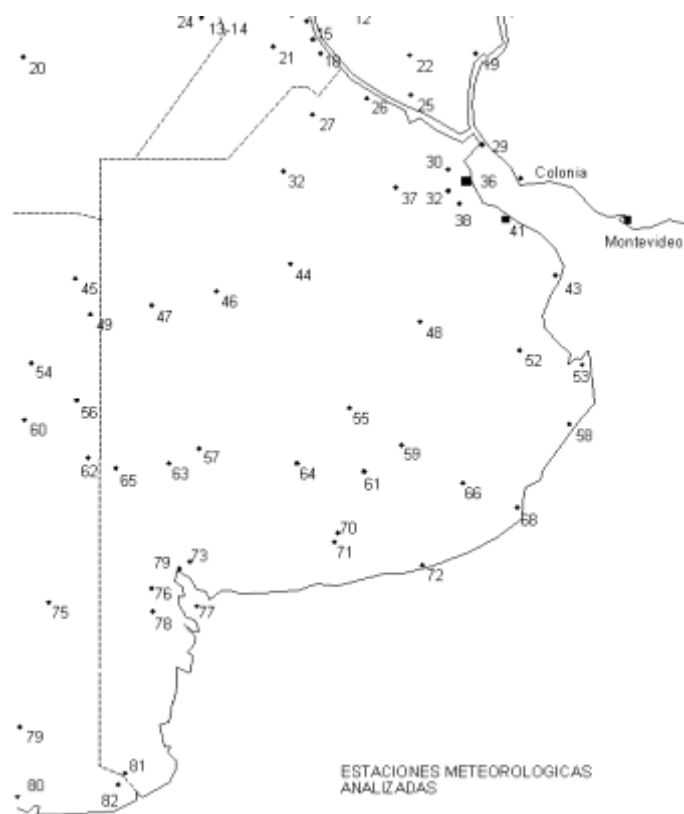


Figura 1: Mapa de localización de estaciones meteorológicas para la Prov. de Buenos Aires (<http://www.arquinstal.com.ar/publicaciones/asades02/regclim.html>)



Figura 2: Mapa de la posición de la superficie freática en la Prov. de Buenos Aires, expresada en metros bajo la superficie topográfica.

En los **mapas de dominios** pueden representar elementos tangibles y sus límites geográficos (las diferentes litologías en un mapa geológico, por ejemplo) pero también, como en el caso de los mapas de isolíneas, las superficies pueden corresponder a proyecciones bidimensionales o “reducciones” de situaciones más complejas.

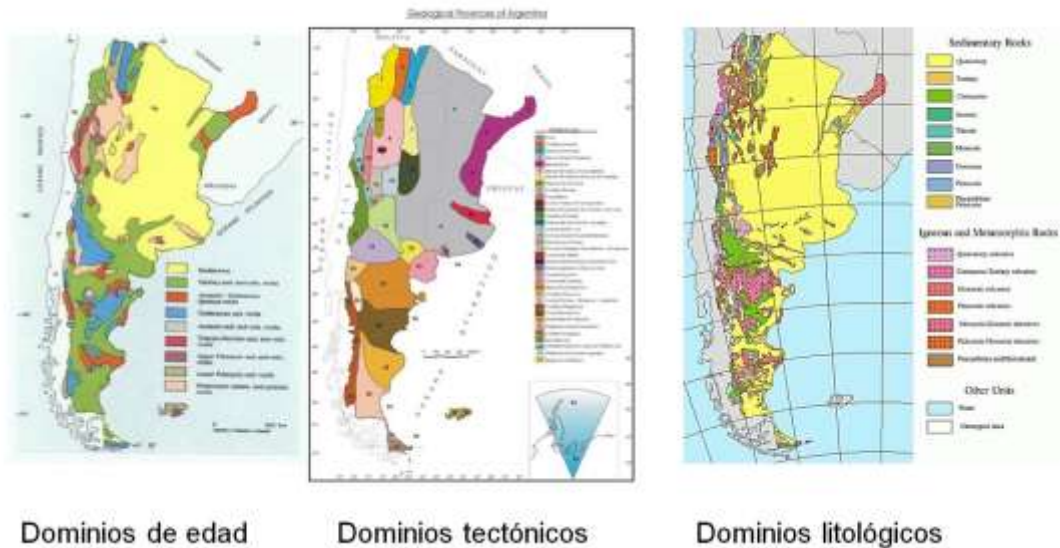


Figura 3: Diferentes tipos de dominios para una misma región.

La **representación de volúmenes** en los mapas exige una reducción o proyección de los datos al sistema de dos dimensiones, ya que no es posible el uso de perspectivas. Ejemplo de esta operación serían los mapas de isohietas, que muestran el volumen de agua caída en una región durante un determinado período de tiempo (ya sea como una altura en milímetros o como litros por metro cuadrado).

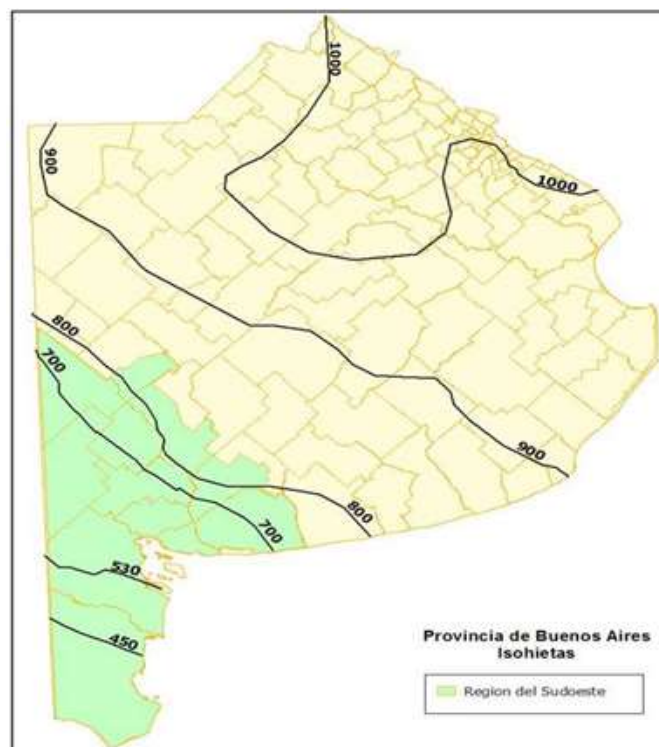


Figura 4: Mapa de isohietas para la Prov. de Buenos Aires

Breve historia de los mapas de isolíneas

De acuerdo con la Wikipedia la idea de utilizar líneas que unen puntos de igual valor fue redescubierta en varias ocasiones a lo largo de la historia. En 1701, Edmond Halley 1656-1742) utilizó ese tipo de líneas (isogonas) para representar la variación de la declinación magnética sobre la superficie terrestre.



Figura 5: Mapa de isógonas de Halley (1701)

El primero en utilizar el recurso de las isolíneas para representar un relieve, en este caso sumergido, fue el ingeniero holandés Nicholas Cruquius, quién en 1727 dibujó el fondo del río Merwede utilizando para ellos líneas de igual profundidad (isóbatas), en intervalos de 1 braza.



Figura 6: El mapa de Cruquius de 1727 y las isolíneas que representan la profundidad del canal.

El uso de estas líneas para describir la superficie de la tierra fue estudiado teóricamente en 1771 por M. du Carla-Boniface (?), quién publica un mapa topográfico con esta técnica en el año 1782. Charles Hutton utilizó el sistema de trazado de curvas de nivel en el cálculo del volumen de una colina en 1777. Este cálculo era necesario para un proyecto de medición de la densidad media de la Tierra en función de la perturbación de la fuerza de la gravedad introducida por la presencia de dicha colina.



Figura 7: Mapa de 1782 por Marcellin du Carla-Boniface

En 1791, J. L. Dupain-Triel realizó un mapa de Francia, en que el relieve está representado por curvas de nivel con 20 metros de intervalo.

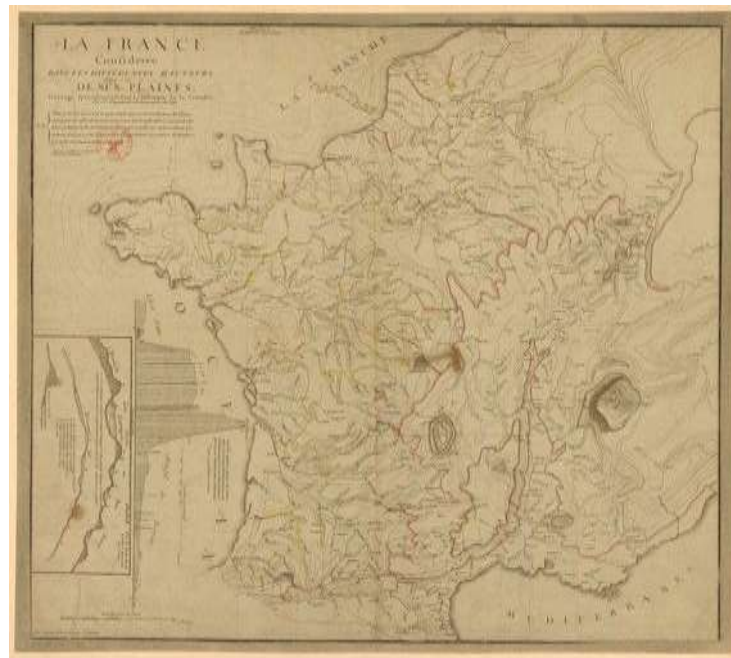


Figura 8: El mapa de J. L. Dupain-Triel de 1791. Obsérvese que en el mismo se incluyen cortes topográficos transversales.

El trazado de mapas de curvas a partir de datos puntuales

En el cálculo de ciertos parámetros -variables más o menos continuamente en el espacio geográfico- y de los que sólo se conocen datos en determinados puntos discretos, es necesario establecer cuál es el área de influencia de cada uno de estos puntos conocidos, de forma de transformar dicha información puntual en una superficie continua de información. Para ello pueden utilizarse criterios de trazado de polígonos y, en este caso, cada polígono constituye el área de dominio de un valor uniforme. Puede decirse, para aclarar este concepto que, así como una línea curva puede transformarse en una línea quebrada formada por un conjunto de segmentos de recta que unen los puntos en los que se ha medido la variable (la pendiente topográfica, por ejemplo) en el caso de los polígonos, una superficie curva irregular se ha transformado en un conjunto de polígonos irregulares tangentes a la superficie original en los puntos de toma de datos. Pueden utilizarse luego algoritmos matemáticos que transforman esa superficie “escabrosa” definida por los polígonos en una superficie continua de desarrollo más suave.



Figura 9: Estos dos cuadros del artista J.M. Larrondo, muestran la transformación de una superficie facetada en un paisaje (o viceversa).

La forma más simple de regionalizar un valor a partir de diferentes mediciones es asumir una distribución uniforme del promedio en toda el área, este método, denominado *Método de los promedios aritméticos*, toma simplemente en cuenta los valores existentes y los promedia aritméticamente, asignando el valor obtenido a toda el área. Es muy sencillo pero presenta grandes problemas ya que, la mayoría de las veces los parámetros en estudio no responden a la lógica del cálculo realizado. La altura media de la superficie terrestre emergida puede calcularse de este modo e, incluso, resultar un dato útil para determinados objetivos, pero de ningún modo servirá como modelo de la realidad. En forma similar tampoco resulta confiable cuando en casos en que la variable no es suficientemente representada por la cantidad y distribución geográfica de los datos o cuando la misma está

fuertemente afectada por elementos también variables en el espacio, como sería el caso de las lluvias cuya distribución e intensidad está afectada por la orografía.

Método de Media Aritmética

- Método más sencillo para determinar el promedio por área.

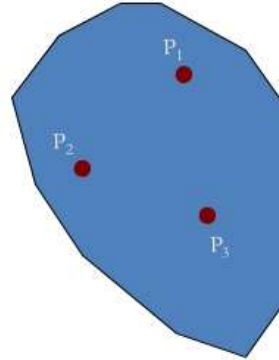
$$P_1 = 10 \text{ mm}$$

$$P_2 = 20 \text{ mm}$$

$$P_3 = 30 \text{ mm}$$

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i$$

$$\bar{P} = \frac{10 + 20 + 30}{3} = 20 \text{ mm}$$



- Las mediciones deben estar uniformemente distribuidas.
- Las mediciones no deben variar mucho respecto a la media.

Figura 10: Cálculo del agua caída en un área por medio de la media aritmética de los valores registrados (<http://es.slideshare.net/nefchapi/modelacion-climatica-geoestadistica>)

LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MAPAS DE ISOLÍNEAS

Para gestionar la información puntual y transformarla en mapas existen métodos muy sencillos y otros muy complejos, que requieren del auxilio de la computadora, todos ellos reelaboran la información contenida en un conjunto de puntos dispersos y la convierten en información “espacialmente continua”, siendo la forma más sencilla de representar la superficie continua que representa la variación del parámetro en las tres direcciones del espacio el uso de isolíneas.

Trazado “manual” de isolíneas

El término inglés “contouring”, para el cual corresponde la traducción “contornear”, de muy poco uso en el castellano, que encuentra más elegante la expresión “trazado de contornos” o “trazado de isolíneas”, describe el trazado de líneas (contornos) que unen puntos de igual valor de una variable determinada. Esta definición fue aplicada inicialmente a la topografía pero se extiende actualmente a todas aquellas curvas que unen puntos en los cuales una determinada variable toma un mismo valor. Por lo tanto, no sólo la altura o cota topográfica pueden ser representadas con curvas de isovalores, sino también la profundidad de una superficie estructural, el nivel piezométrico de un acuífero, la variación espacial de una propiedad (como la permeabilidad), el contenido en una determinada especie química, etc. Fuera del ámbito geológico los mapas de isolíneas tienen también una muy amplia aplicación y, en rigor de verdad, su invención surgió en el campo de la Meteorología, con el desarrollo de las curvas isohietas, que permitieron representar la distribución de las precipitaciones en una determinada región para un cierto intervalo de tiempo.

El primer paso en el trazado de las isolíneas es encontrar aquéllos puntos del espacio geográfico en los que la variable adquiere el valor (o uno de los valores) que se desea representar en el mapa. Tal sería el caso de un mapa topográfico en el que el intervalo regular a ser representado por cada par de isolíneas contiguas (equidistancia) se fija, por ejemplo, en 25m. Los datos de cota medidos difícilmente sean múltiplos de 25 (se dispondrá seguramente de puntos con cotas 43,30m, 75,60m; 67,80m, 91, 20m, etc.) por lo que es necesario encontrar la posición teórica de los puntos cuyas cotas serían 25m, 50m, 75m y así sucesivamente.

Tradicionalmente, lo que se hace para hallar los valores requeridos por la equidistancia es interpolar el valor entre pares de dos puntos en los que el valor es conocido, asumiendo que la pendiente entre ambos es constante. Para ello se subdivide el segmento de recta que une cada par de puntos acotados en unidades adecuadas (en el ejemplo en tramos de 0,10m y se calcula a partir de cualquiera de los extremos, por adición o sustracción según corresponda, la posición de los valores 25, 50, 75 deseados.

Es fácil advertir que en áreas muy extensas, con topografías complejas, las líneas que unen los puntos acotados pueden no ser necesariamente rectas, sino presentar perfiles cóncavos o convexos o incluso quebrados, lo cual introduce un error en la posición local de la curva de nivel calculada. La relación entre el número de datos necesarios, la fidelidad del mapa a la naturaleza y el costo de obtención de los datos es un delicado equilibrio que varía según los objetivos del trabajo, la complejidad de la distribución real de la variable, las características del terreno a

relevante y la relación de escala entre la dimensión de las perturbaciones y el área total a representar.

Construcción de los polígonos de Thiessen

Estos polígonos (también llamados diagramas de Voronoi o teselación de Dirichlet) definen el área de influencia de un dato puntual. Para trazar los mismos se parte de un conjunto de puntos en cada uno de los cuales se poseen datos del parámetro cuya variación regional se desea establecer. Estos puntos están dispersos en el espacio geográfico (están caracterizados por coordenadas) y poseen, además, una cota. Lo que el método hace es asignar a cada uno de ellos una superficie o área de influencia alrededor de su localización con el propósito de integrar, en forma ponderada, la información disponible. La determinación de la forma de esta área de influencia se realiza de modo tal que se cumpla el postulado que establece que ningún punto en el área de cada polígono es más cercano al punto de toma de datos de ninguno de los polígonos circundantes que al propio.

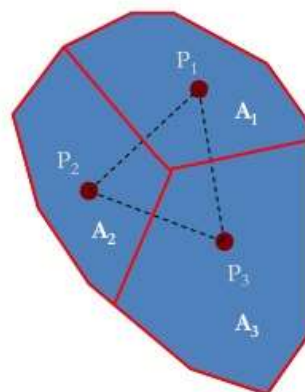
Método de Polígonos de Thiessen

- Cualquier punto de la cuenca recibe la misma cantidad de las precipitaciones que en el medidor más cercano.
- La lluvia registrada en un medidor se puede aplicar a cualquier punto en mitad de la distancia a la siguiente estación en cualquier dirección.

- Pasos en el método del polígono de Thiessen:

1. Dibujar las líneas que unen medidores adyacentes.
2. Dibujar bisectrices perpendiculares a las líneas creadas en el paso 1.
3. Extender las líneas creadas en el paso 2 en ambas direcciones para formar áreas representativas para medidores.
4. Calcular área representativa para cada calibrador.
5. Calcular el promedio de área mediante la fórmula siguiente:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N A_i P_i \quad \bar{P} = \frac{12 \times 10 + 15 \times 20 + 20 \times 30}{47} = 20.7 \text{ mm}$$



$$P_1 = 10 \text{ mm}, A_1 = 12 \text{ Km}^2$$

$$P_2 = 20 \text{ mm}, A_2 = 15 \text{ Km}^2$$

$$P_3 = 30 \text{ mm}, A_3 = 20 \text{ km}^2$$

Figura 11: conversión de datos puntuales en polígonos de Thiessen.

(<http://es.slideshare.net/nefchapi/modelacion-climatica-geoestadistica>)

La forma en que se trazan estos polígonos es simple, consiste en trazar líneas rectas entre los puntos de valor conocido, con lo que se obtiene un conjunto de triángulos de diferente geometría. Luego se dibujan las líneas que cortan perpendicularmente los lados de cada triángulo a la mitad de la distancia entre cada par de puntos. Se obtiene así un conjunto de polígonos cuyos vértices quedan determinados a partir de las intersecciones entre las bisectrices. Este trabajo requiere una cierta práctica, ya que algunas situaciones de intersección dan lugar a diferentes posibilidades que deben ensayarse teniendo en cuenta el cumplimiento del postulado recién mencionado. A cada polígono así obtenido se le asigna un único valor de la variable, que se considera constante sobre el área cubierta por el mismo. De acuerdo al tipo de estudio que se realice el mapa de polígonos de

Thiessen, como el de isolíneas puede ser el resultado final o solo un paso intermedio para un cálculo más complejo.

Cómo transformar una superficie en un volumen

En los casos de variables más complejas o cuando se desea incluir el efecto del tiempo en dicha variable, se hace necesario transformar datos representados como superficies en el mapa en volúmenes. Este sería, por ejemplo, el cálculo del volumen de un reservorio de hidrocarburo a partir de la porosidad de la roca y de la geometría del cuerpo, del volumen de un yacimiento de un metal determinado a partir de la distribución de la mineralización y de su concentración o también el cálculo del agua caída a lo largo de un año sobre una determinada área. Estos cálculos pueden hacerse a partir del mapa de isolíneas, a partir del trazado de los polígonos de Thiessen recién descritos o con métodos más complejos, que exigen el uso de computadoras para poder ser realizados en tiempos razonables, los que serán descritos luego.

A partir del mapa de isolíneas

En este caso, una vez trazadas las isolíneas a partir de los datos, puede asumirse que el valor del dato se mantiene constante entre cada par de isolíneas y se realiza el cálculo del volumen “contenido” para cada par de curvas equidistantes y luego se suman todos los resultados parciales. Podría asimilarse a la idea de una serie de “escalones” que determinan cuerpos de caras curvas y techo y base planos cuyo volumen se calcula individualmente para luego sumarlos.

Método de Isoyetas

• Pasos

- Construir isoyetas (contornos de lluvia)
- Calcular área entre cada par de isoyetas adyacentes (A_i)
- Calcular la precipitación promedio para cada par de isoyetas adyacentes (P_i)
- Calcular la media de área mediante la fórmula siguiente:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N A_i P_i$$

$$\bar{P} = \frac{5 \times 5 + 18 \times 15 + 12 \times 25 + 12 \times 35}{47} = 21.6 \text{ mm}$$

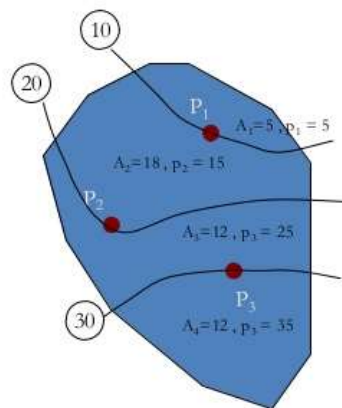


Figura 12: Cálculo del volumen de agua caída por el método de las isohietas
(<http://es.slideshare.net/hefchapi/modelacion-climatica-geoestadistica>)

A partir de los polígonos de Thiessen

En forma similar al caso anterior cada polígono es transformado en un prisma al adicionarle una altura y se suman todos los prismas para obtener el valor total en la región cubierta por el estudio. En el caso del cálculo del agua caída sobre una

cuenca, a cada polígono le corresponde una altura igual a los milímetros de agua caída en el período en cuestión sobre la fracción de la cuenca que el polígono representa. Como puede apreciarse, la densidad de los puntos de registro y la variabilidad geográfica natural de los valores medidos tienen una muy gran influencia en el resultado obtenido, ya que podrían faltar estaciones de medición en los puntos donde ocurren las mayores o las menores precipitaciones, por ejemplo.

DE DATOS DISPERSOS A DATOS EQUIDISTANTES SOBRE UN RETÍCULO

Uno de las instancias más importantes al transformar la información puntual en una “superficie de información” es la creación de una nueva base de datos, construida a partir de los datos originales y que contiene los nuevos puntos de datos distribuidos en forma homogénea sobre una grilla, generalmente vinculada a un sistema de coordenadas geográficas con el objeto de poder integrar este conjunto de datos en un Sistema de Información Geográfica (SIG). A diferencia de las isolíneas, que son creadas para representar todos los puntos que tienen un determinado valor, en este caso no importa el valor sino la posición de cada punto en relación con el conjunto, que conforma la retícula de coordenadas o grilla. A partir de los valores calculados para cada punto o nodo se reconstruye la forma de la superficie envolvente de todos ellos. Para esto se utilizan una serie de métodos matemáticos, o algoritmos, que son resueltos por computadora. Es importante tener en cuenta que la determinación del valor de la variable en cada nodo es de vital importancia, ya que es un valor no medido, sino generado por cálculo y a partir del cual volverá a realizarse otro cálculo aún más complejo (el de la forma de la superficie) y los errores irán acumulándose en el proceso de modo que la superficie generada podría no tener relación razonable con la real.

En síntesis el proceso involucraría los siguientes pasos:

- a. Toma de datos de la variable en estudio con sus coordenadas espaciales (x, y, z)
- b. Uso de estos datos para el trazado directo de isolíneas o, en su defecto,
- c. Uso de estos datos para el cálculo de los valores hipotéticos de la variable para un conjunto de puntos uniformemente espaciados sobre el mapa
- d. Uso de los datos anteriores para la reconstrucción matemática de la forma de la superficie de mejor ajuste a esos datos.
- e. Representación de esa superficie mediante isolíneas

En el caso del trazado manual de isolíneas son sólo dos puntos los que intervienen en la fijación del sitio geográfico en el cual la variable adquiere el valor buscado. Cuando se usan los polígonos de Thiessen es un único punto el que influye sobre el valor de la variable en el interior de su perímetro. Por el contrario, el uso de los métodos computarizados implica, como se verá más adelante, un complejo proceso de selección de la cantidad y distribución geográfica de los numerosos puntos dispersos que serán utilizados para el cálculo del valor en cada nodo de la grilla.

La construcción de superficies envolventes por métodos computarizados

Los párrafos que siguen están basados en el comentario del Libro “Contouring Explained” publicado en Geotimes, Octubre, 2000 y en el poster “Understanding Contouring”, que acompañó la edición de Diciembre de ese año. El original en inglés puede verse en el sitio web del American Geological Institute en: <http://www.earthmagazine.org/article/earthgeotimes-archives>

Por décadas, los geocientíficos realizaron a mano el trazado de contornos a partir de datos irregularmente distribuidos en el espacio. El trazado por computadora se inició en los años '50 pero su uso se popularizó con la introducción de las computadoras personales en los primeros años de la década del '80. Actualmente pueden descargarse programas independientes en forma gratuita de diferentes fuentes en el dominio público, mientras el costo de los programas comerciales oscila entre unos 500 y varios miles de dólares, pero existe una suficiente cantidad de equipamiento y programas de bajo costo que hacen que el trazado de isolíneas por computadora esté al alcance de todos.

Los contornos o isolíneas son una forma gráfica de representar las relaciones entre datos espaciales que permite ver aquello que se encuentra en lugares en los que no podemos estar. Tanto si los contornos representan el techo de una Formación o la magnitud de un valor como la porosidad o el contenido de azufre, las isolíneas son una interpretación de los datos, se haya realizado a mano o mediante un programa adecuado.

Por otro lado, las denominadas curvas de nivel o líneas que representan la topografía, muestran líneas de igual elevación, se aproximan mucho a una superficie y pueden definirse a partir de fotos aéreas o trabajos de campo. El trazado de contornos es también un arte, y el geólogo utiliza las herramientas disponibles (el lápiz o la computadora) para generar un mapa en el que los datos espaciales están representados de la forma más exacta posible de acuerdo con la experiencia, mirada y percepción del experto. Sin embargo, aun utilizando métodos computarizados persiste una cierta incertidumbre con respecto al conocimiento o la demostración de que los contornos realmente representan la superficie o los valores en cuestión.

El trazado de isolíneas es en general fácil. Cuando se realiza a mano, el proceso es lento y tedioso, pero permite la introducción simultánea de interpretaciones basadas en el conocimiento geológico. El trazado por computadora es mucho más rápido, pero el usuario tiene un control mucho menor sobre el aspecto de las isolíneas que cuando se trabaja a mano. Ya sean simples o sofisticados, los programas de trazado de grillas y contornos son suficientemente flexibles para satisfacer casi todas las necesidades de trazado con velocidad y provecho. El trazado por computadora está basado en algoritmos matemáticos y, por lo tanto, no es una representación perfecta de los datos. Es imprescindible controlar sistemáticamente los resultados para identificar errores y poder asegurarse que los contornos son un reflejo cierto de los datos. En aras de lograr el mejor mapa posible, el geólogo o ingeniero debe conocer las limitaciones de los programas que usa para determinar qué métodos son los más adecuados para obtener un resultado aceptable y deben estar dispuestos a experimentar con diferentes métodos hasta lograrlo.

Quienes realizan el trazado de isolíneas a mano habitualmente tienen confianza en su interpretación y resultados. Son embargo, ha sido probado muchas veces que diferentes personas interpretan el mismo conjunto de datos de diferentes modos, por lo tanto ¿qué es un resultado "correcto" en este campo? Las curvas de nivel son fáciles de controlar en el campo, pero los contornos que representan superficies de estructuras geológicas en el subsuelo (contornos estructurales) o la variación de propiedades del material se construyen a partir de la interpretación y estimación de valores posibles entre pares o conjuntos de datos puntuales. La

verificación de los resultados en estos casos es claramente imposible, muy cara o bien excesivamente destructiva. La mejor defensa contra los errores en el trazado de las isolíneas es una comprensión clara de los métodos que se utilizan y sus limitaciones, así como una buena predisposición para experimentar, cuestionar los resultados obtenidos y añadir interpretación razonable en los casos necesarios.

Con demasiada frecuencia se considera a un mapa de isolíneas trazado por computadora como una “representación cierta” de la superficie real con poco o ningún error. Raramente se cuestiona cuán semejante es el método de trazado a la realidad. El universo matemático de la computadora impone una interpretación fija de los datos derivados de los procesos aleatorios de la Naturaleza. Los mapas de las computadoras deben examinarse y criticarse y ser aceptados solo luego de muchas pruebas con conjuntos de diferentes parámetros de control.

Los errores en el trazado (denominados “artefactos”) resultan de la estimación errónea del método de estimación o algoritmo, o de una especificación incorrecta de los controles matemáticos que imponen cómo dicho algoritmo es aplicado a los datos espaciales. Algunos métodos producen más artefactos que otros, pero la mayoría de estos pueden eliminarse con una selección adecuada de los parámetros de control. El reconocimiento de los errores potenciales, tanto en los métodos manuales como en los computarizados y el ajuste de esos métodos en caso necesario son imprescindibles para lograr un mapa de isolíneas realmente representativo.

La experimentación es imprescindible

La presentación del tema en el póster (al que corresponden también todas las ilustraciones incorporadas a este texto) comienza con una fuerte recomendación para que se ensayen diferentes posibilidades y combinaciones antes de adoptar un resultado. El ensayo con diferentes configuraciones y algoritmos es necesario para definir las características del área o elemento a representar. Cuando el conocimiento del objetivo es escaso y los datos son pocos lo mejor es comenzar seleccionando uno de los métodos más comunes, como la triangulación o el de inversas de la distancia, establecer los parámetros de prueba y generar las grillas e isolíneas. Es importante que se pruebe con diferentes métodos y grillas hasta que empiece a aparecer un diseño consistente de la forma, tamaño y orientación del objetivo. La preparación de cortes verticales puede ayudar a determinar el tamaño y forma del objetivo.

El caso del campo petrolífero de Carson-Hamn (CHF)

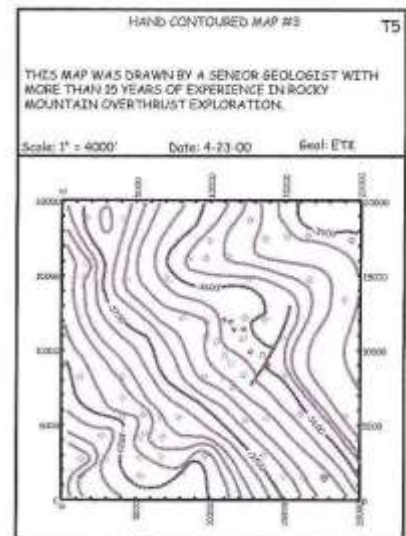
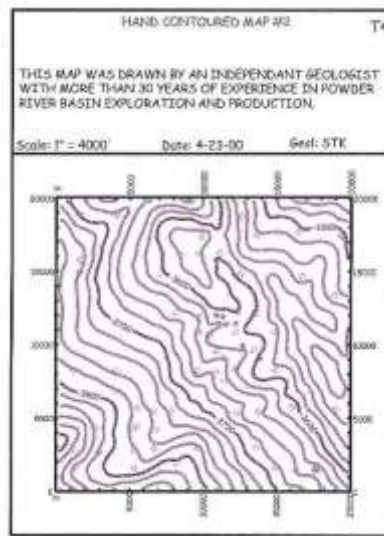
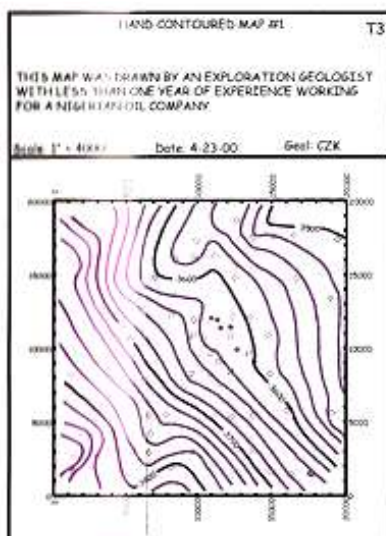
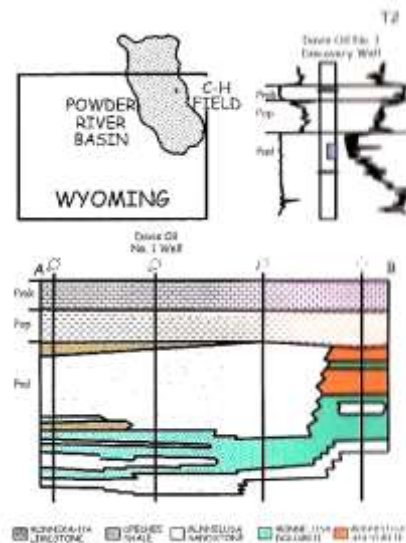
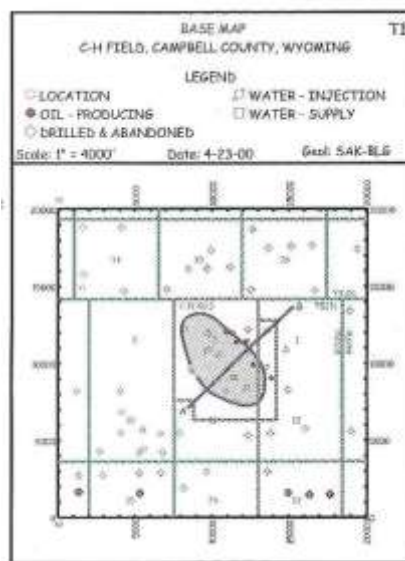
Este campo, tomado como caso ejemplo, se encuentra en la orilla oriental de la cuenca del río Powder, en el noreste de Wyoming (USA) y produjo más de 6 millones de barriles (con anterioridad al año de edición del artículo, 2000). El campo fue descubierto al terminarse el Pozo Davis Oil 1, el 30 de Enero de 1967, a una profundidad de 7,681 pies. La producción inicial del pozo fue de 635 BPOPD/31,3 MCFGPD.

Luego de haber sido perforado este pozo le siguieron otros 58, de los cuales 44 resultaron secos, 6 productivos y 9 sólo dieron agua. Estos últimos son utilizados para proveer de agua y como pozos de inyección para recuperación secundaria.

El CHF es una trampa estratigráfica en la arenisca Minnelusa, de edad Pensilvaniana, depositada como una duna en un ambiente de sabkha. La trampa apoya concordantemente sobre el techo de la dolomita Minnelusa y es cubierta, en forma discordante, por la pelita Opechee, impermeable y de color marrón.

El CHF mide aproximadamente 8.000 pies de largo y 4.000 pies de ancho. El espesor de la unidad productora varía entre 0 y 51 pies con un valor medio en el área de producción de 21 pies. El eje mayor del CHF se orienta NW-SE y la pendiente regional es de 3° a 5° hacia el sudoeste, no encontrándose fallas en el área.

El distanciamiento entre los pozos varía desde 175 a 6.000 pies con una distancia promedio de 2.135 pies. Los datos de cota de boca de pozo y la posición del techo y espesor de la Formación fueron obtenidos de los perfiles sínicos y de densidad disponibles en todos los pozos.



El elemento a representar:

Los principales atributos del objeto a representar son su tipo, tamaño, forma y continuidad espacial. Estos condicionan fuertemente el tipo de algoritmo a utilizar,

pero no son todos conocidos al momento de tomar las decisiones. Estos parámetros influyen en la selección del algoritmo y en elementos como el tamaño de la grilla a elegir, y por lo tanto, también en la representatividad final de los datos interpolados.

El **tipo** se refiere a si el rasgo es de características locales o regionales, es decir a su tamaño relativo con respecto al área en estudio. En algunos casos pueden coexistir rasgos regionales y locales (un estrato continuo y una lente o conjunto de lentes, por ejemplo)

La **dimensión** o *tamaño* se refiere a si es de dimensiones reducidas o grandes

La **forma** diferencia entre cuerpos regulares e irregulares y si su disposición espacial es horizontal o inclinada.

La **continuidad** califica si el cuerpo es continuo o discontinuo. Entre los cuerpos de características discontinuas pueden mencionarse estratos cortados por una falla, conjuntos de cuerpos lentiformes e incluso estructuras cortadas por una discordancia.

	TARGET	PLAN	SECTION
SIZE	SMALL	A - ● - B	
	LARGE	A - - B	
TYPE	REGIONAL		
	LOCAL		
	REGIONAL AND LOCAL		

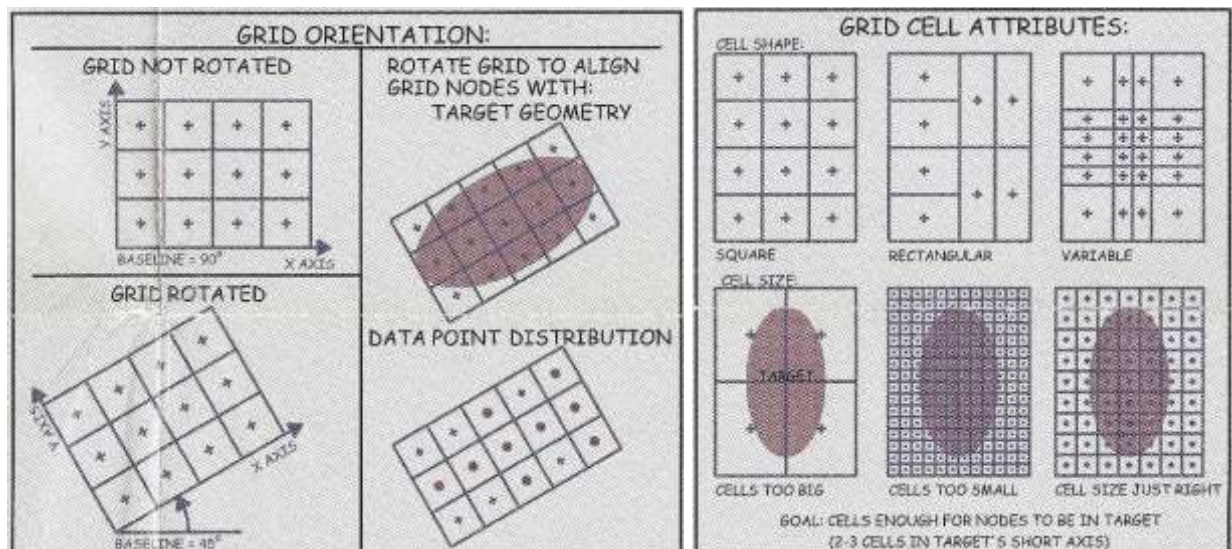
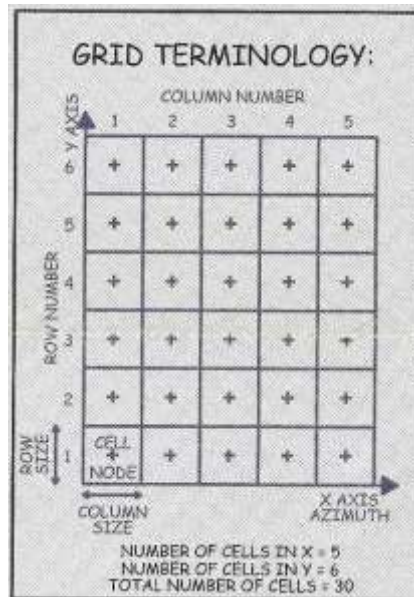
	GEOMETRY	SECTION
CONTINUOUS	UNIFORM	
	TREND	
DISCONTINUOUS	LENSES	
	FAULTS	
	UNCONFORMITY	

La grilla:

Los atributos característicos de la grilla son el tamaño de celda y la forma y orientación del conjunto. La **cuadrícula** de la grilla resulta de la superposición de dos conjuntos de líneas equidistantes, perpendiculares entre sí, pudiendo ser rotado este conjunto a cualquier orientación no necesariamente NS-EO. Cada unidad dentro de la cuadrícula recibe el nombre de **celda**. El término **nodo** describe el punto (centro de la celda o uno de sus extremos) al que se asigna el valor calculado.

En la definición de las características de la grilla deben tomarse en consideración:

- El área a ser cubierta
- El origen de las coordenadas X e Y
- El tamaño de las celdas
- La forma de las celdas
- El número de celdas en las direcciones X e Y
- La localización del nodo en la celda (esto puede ser fijado automáticamente por los programas)
- La orientación de la línea de base de coordenadas X expresado como un azimut



El tamaño de la celda

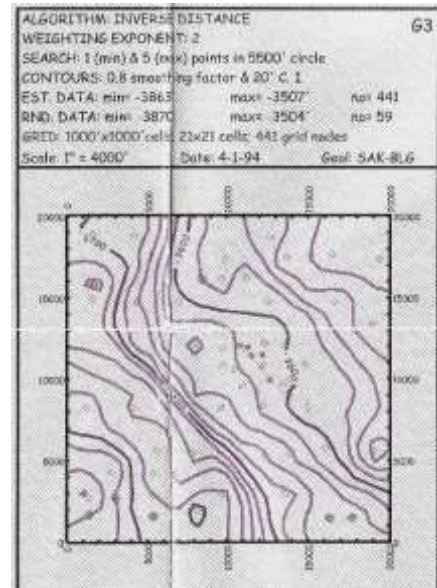
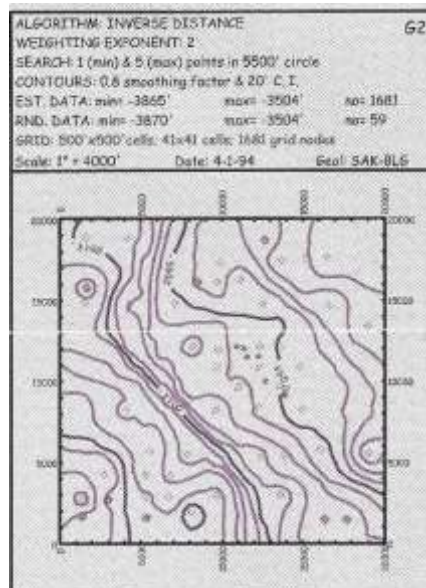
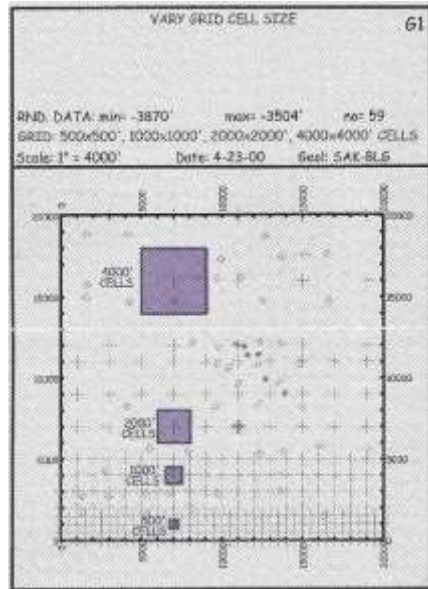
El tamaño de la celda debe determinarse, en general, a partir de los datos de distribución de puntos, dimensiones del objetivo, la continuidad espacial (vertical y lateral) del mismo. El tamaño de la celda deber ser menor que el tamaño del objetivo y la red lo más densa posible (aunque en los casos de redes muy densas los algoritmos pueden generar artefactos) y menor también que la distancia entre los puntos dispersos. Es necesario realizar diversos ensayos iterativos para determinar la dimensión de la celda que produce los "mejores" resultados. La traza de las isolíneas varía claramente con los diferentes tamaños de celda.

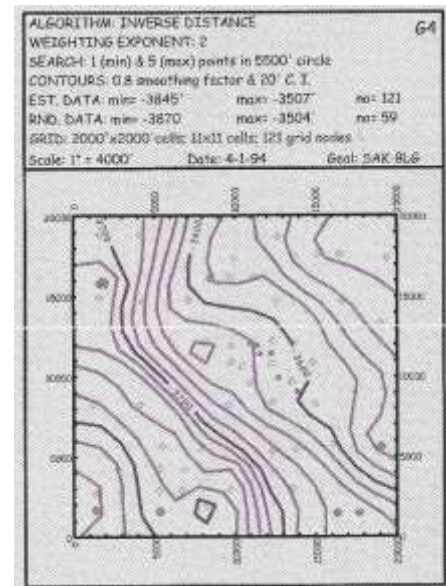
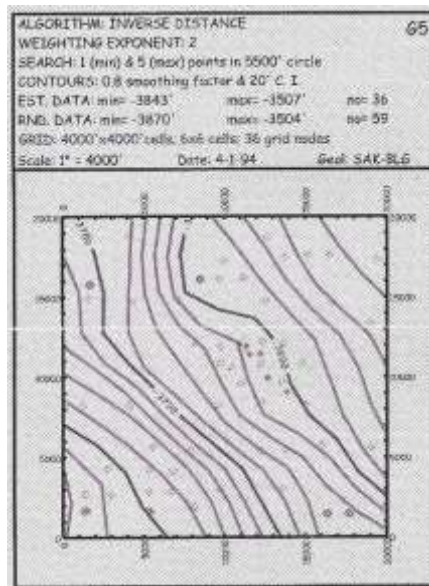
La "Regla de Nyquist"

Para la mayoría de los algoritmos el mejor tamaño de celda es aquél que incluye dos a tres celdas entre puntos con información (data points). En el caso del método de mínima curvatura se requiere un mínimo de un dato por celda.

Ejemplos de tamaños de celdas variables

En el trabajo descripto se generaron mapas de isolíneas para cuatro tamaños diferentes de celda. Obsérvese el detalle cuando se usa el tamaño de celda más pequeño (figura G2) y como el tamaño de celda mayor suaviza el diseño (G5). Los artefactos denominados "balas" desaparecen también con el aumento del tamaño de la celda.





El área de búsqueda:

El *área de búsqueda* es la superficie sobre la que se encuentran distribuidos los datos puntuales que serán tomados por el algoritmo para calcular el valor en cada nodo. Los parámetros representativos del área de búsqueda son: *dimensión* y *forma*. La forma puede ser circular o elíptica y en este caso se hace necesario conocer la orientación y longitud de los ejes de la elipse y el coeficiente de ponderación será direccional.

Las dimensiones del área de búsqueda deben ser suficientemente grandes como para incluir un número de datos significativo, ya que si el área es muy pequeña posiblemente no incluya datos suficientes y si bien el proceso de cálculo será rápido se magnificarán las anomalías locales. Por el contrario si el área es demasiado grande, la cantidad de datos se hará excesiva, el tiempo de cálculo se extenderá, pero se suavizarán las anomalías locales.

Los datos deben estar distribuidos uniformemente alrededor de los nodos.

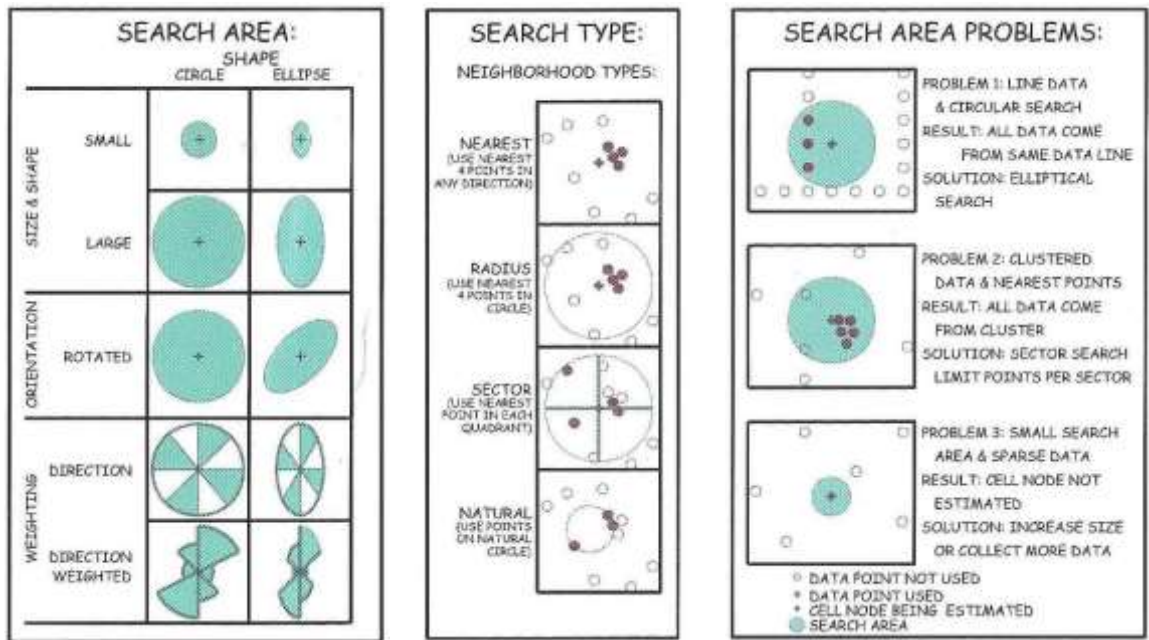
El control direccional

Existen diferentes métodos para seleccionar los puntos dispersos que serán usados para estimar el valor en el nodo:

1. Búsqueda del *vecino más cercano* (nearest neighbor search): El usuario fija el número "n" de puntos a ser usados independientemente de la distancia y la dirección.
2. Búsqueda *radial* (radial search): Se define la forma del área (círculo o elipse) y el radio y el número de puntos más próximos dentro de dicha área.
3. Búsqueda por *áreas* o *sectores* (sector search): Se subdivide el área en cuadrantes u octantes y se utilizan los n puntos más próximos dentro de dicha área. La búsqueda por sectores debe utilizarse para evitar errores cuando el conjunto de datos presente agrupamientos (clustering).
4. Búsqueda por *vecinos naturales* (natural neighbor search): Se denomina "vecinos naturales" a aquellos puntos que se encuentran sobre una circunferencia. Esta técnica conlleva el uso más eficiente de la información.

En algunos casos, cuando se trabaja con la búsqueda por áreas, los programas permiten introducir la condición "Si más de una cantidad n de sectores está vacía no calcule un valor para este nodo o celda". Esta posibilidad restringe el

número de puntos más próximos utilizados en el interior de cada sector.



Ejemplos del efecto del tamaño de área de búsqueda

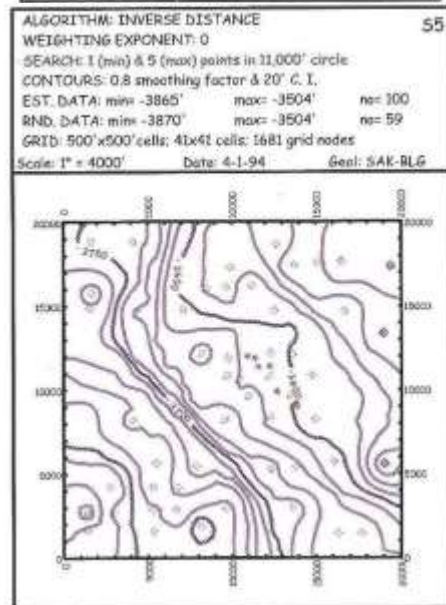
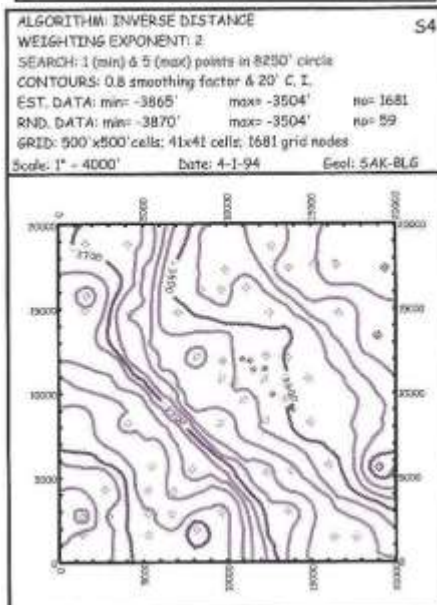
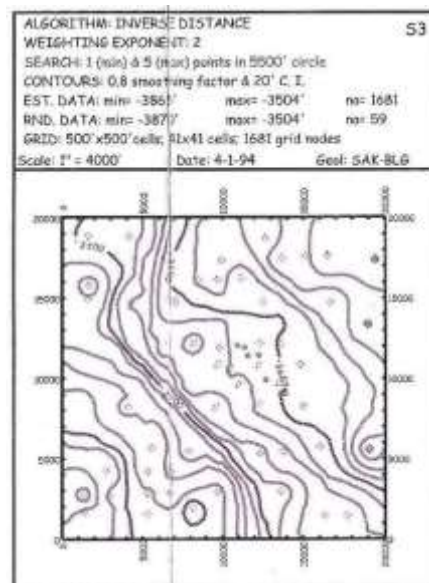
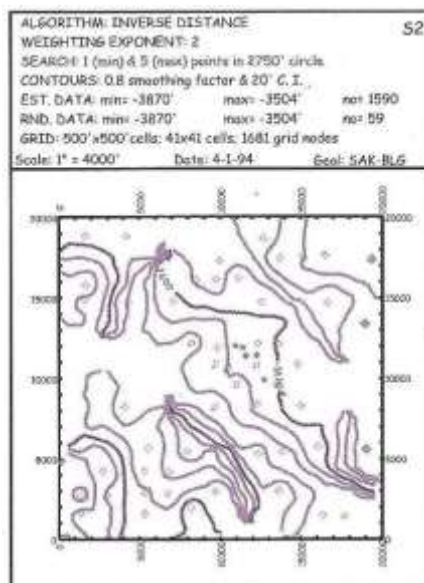
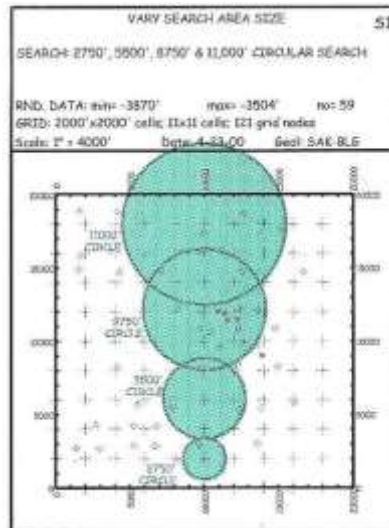
Los mapas S1 a S5 usan una búsqueda circular con 1 a 5 puntos dispersos que pueden ser incluidos en el cálculo del valor para la celda.

Al realizarse la experimentación puede usarse también un área de búsqueda elíptica que se alinee con la orientación del objetivo geológico. Al observar los contornos puede establecerse que en esta área existe una alineación NO-SE. Si se usa un área elíptica con ponderación direccional es posible obtener un resultado más "aceptable".

Los resultados del mapa S2 muestran el resultado de utilizar un área demasiado pequeña. Una parte de la representación (centro-oeste) carece de isolíneas, lo que indica que esas celdas carecen de los datos necesarios para estimar un valor para la celda en el ámbito del área de búsqueda. Esto también puede producir estrangulaciones de las isolíneas y artefactos en el diseño.

Los otros tres ejemplos muestran muy poca diferencia entre radios mayores o menores, por lo que aumentar el radio no resulta significativo.

Los artefactos denominados "balas" y "escalones" son típicos del algoritmo de inversas de las distancias.



La cantidad de datos (number of data points)

Definición del número de datos a tomar en cuenta

El número de datos dispersos asignados al cálculo del valor de un nodo o celda afecta el resultado final. Si se usa el algoritmo de inversa de la distancia con pocos puntos se ponen de relieve las anomalías locales y a la inversa se las suaviza cuando se usan más puntos. El usuario define la cantidad de puntos que empleará para el cálculo del valor de la celda del siguiente modo:

1. Número mínimo de puntos en el cálculo
2. Número máximo de puntos en el cálculo
3. Umbral para definir si un dato será usado o no cuando se localiza justo en el nodo.

La dimensión de la búsqueda está íntimamente relacionada con el número de datos utilizados en la definición del valor para la celda. Establecer un área de búsqueda demasiado pequeña puede producir los mismos resultados que si se define un número demasiado pequeño de datos a ser utilizados, es decir, podría ocurrir que no se encuentre un valor para el nodo o la celda.

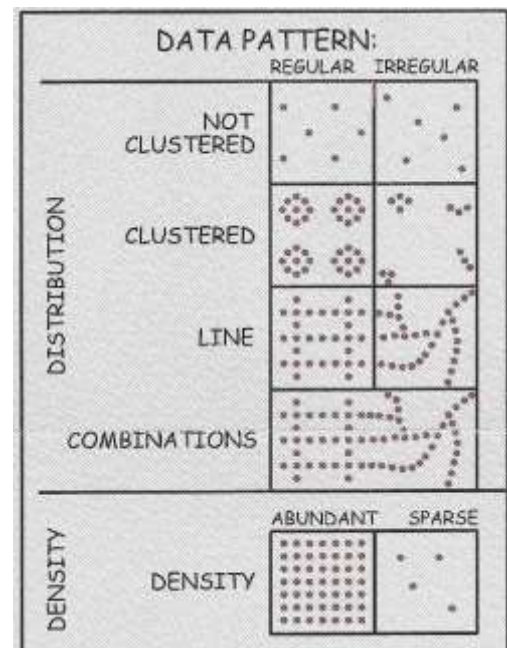
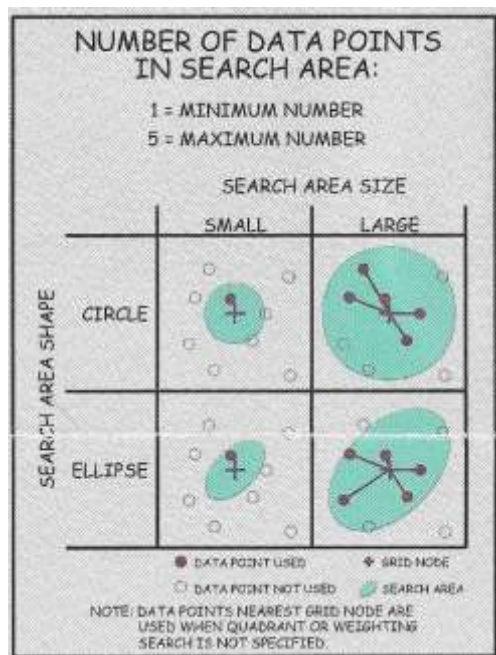
Distribución de los datos

Dado que los parámetros definidos para el algoritmo computacional deben ser optimizados, los puntos dispersos deben distribuirse tan irregularmente como sea posible alrededor del nodo de la celda.

Por la misma naturaleza del método de recolección de los datos, en muchos casos los mismos no están distribuidos irregularmente. Cuando los datos recogidos se encuentran alineados (como ocurre con las líneas sísmicas o con muestras recogidas a lo largo de un arroyo o de un afloramiento), la ponderación se sesga. En estos casos se obtienen mejores resultados si el área de búsqueda se diseña como una elipse achatada.

El agrupamiento de puntos produce también una ponderación no regular tanto al interior de las nubes de puntos como entre ellas. A veces los datos agrupados producen mejores diseños. Algunos programas manejan las nubes de puntos promediando los valores de los puntos muy próximos y transformando la nube en un único dato promedio.

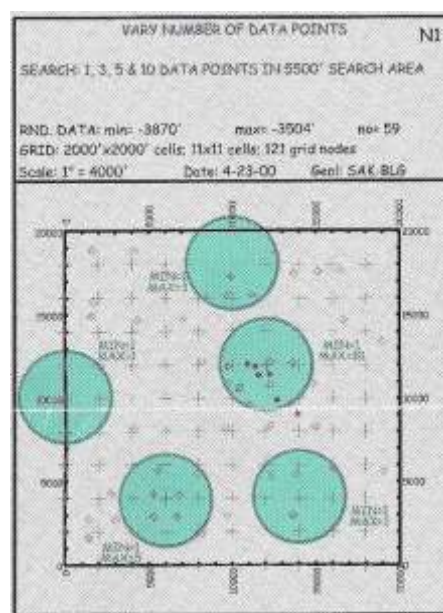
Si en una celda sólo existe un dato, el valor del nodo se aproximará al valor de ese dato.

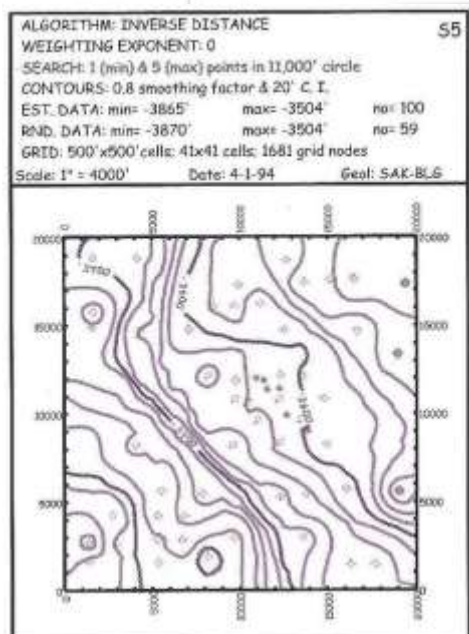
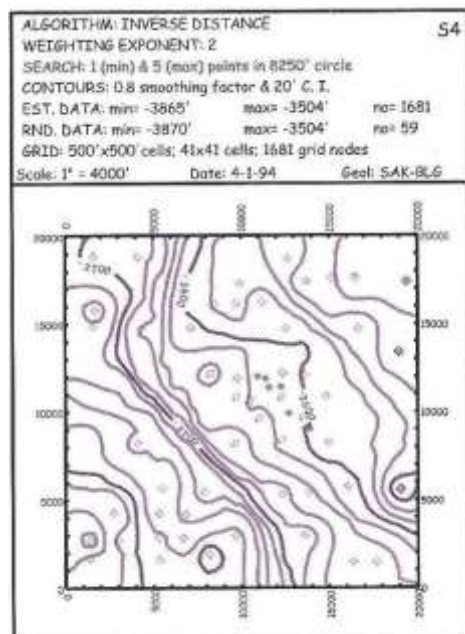
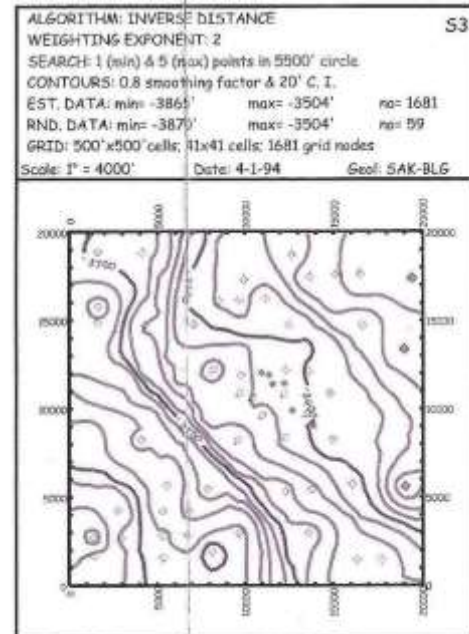
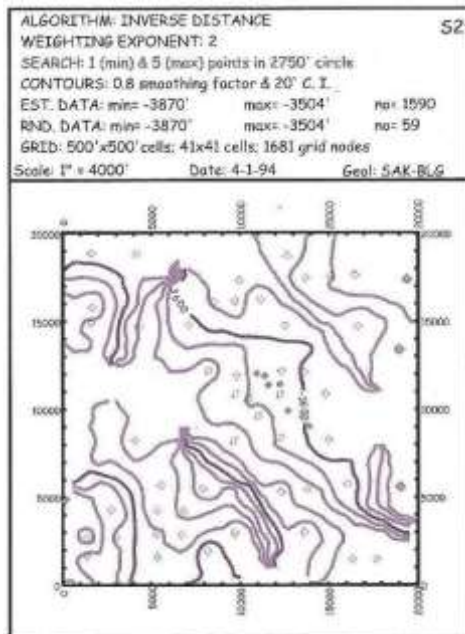


Ejemplos de la incidencia del número de datos

Los mapas N1 a N5 muestran los efectos de variar el número de datos. En la medida de lo posible debe usarse un mínimo de tres datos. Si solo se usa 1 dato para estimar el valor de una celda o nodo dicho dato influenciará fuertemente el valor estimado. Tal es el caso del ejemplo del mapa N2, en el que se usa un solo dato para calcular el valor de la celda, que puede compararse con el N3, en el que se usan hasta tres puntos en el cálculo. En el mapa N2 los valores en cada celda son muy diferentes lo que causa un diseño en forma de placas o bloques y escalones muy apretados o muy extensos entre ellas.

Si el valor del punto es muy alto o muy bajo con respecto de los que lo rodean el valor calculado para la celda o nodo se distorsiona, produciendo también el efecto de escalones presente en el mapa N2.





El algoritmo

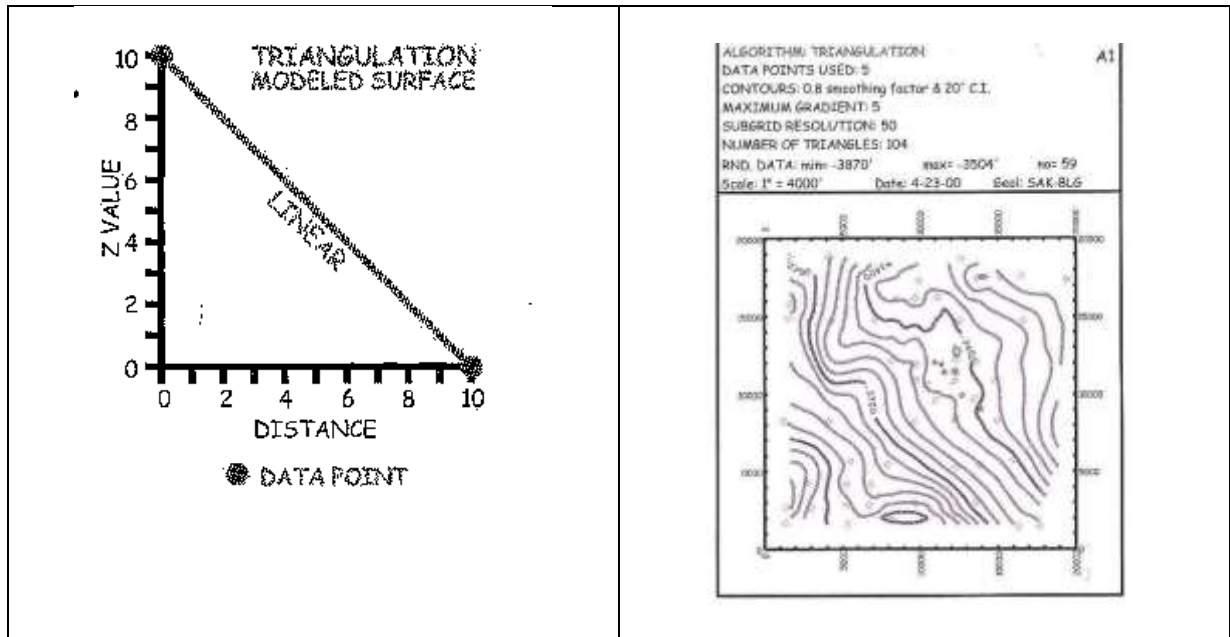
El programa de trazado puede utilizar diferentes algoritmos que se diferencian en cuanto a su tipo, controles sobre los datos e influencia sobre las distribuciones locales o regionales. Los algoritmos utilizados son.

Triangulación (Mapa A1)

La triangulación estima los valores mediante la definición de triángulos en cuyo vértice se localiza un dato. Tres puntos no colineales conectados por líneas rectas definen un triángulo plano y el conjunto de triángulos define una superficie matemática.

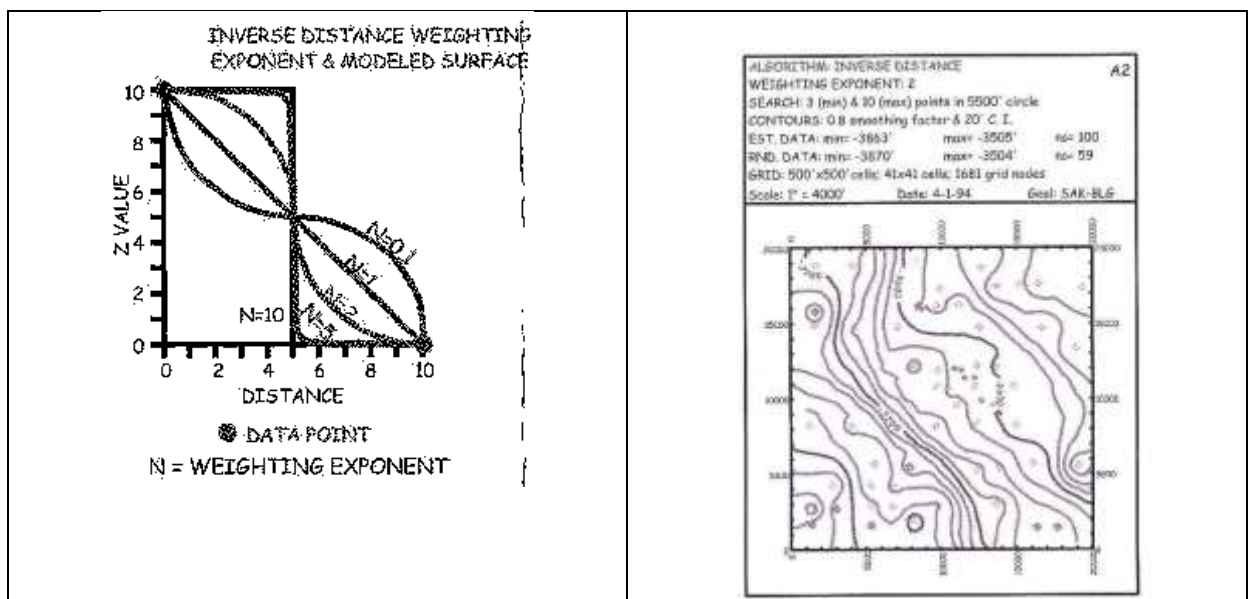
Los dos métodos más frecuentemente usados para la triangulación son el *linear* y el de *Delaunay*. Los métodos de triangulación trabajan mejor con datos homogéneamente distribuidos y, en general son los que brindan los mejores resultados cuando los datos de la variable Z están dispersos.

Los valores son interpolados sobre los triángulos planos mediante un algoritmo matemático. La triangulación linear no produce un resultado único.



Ponderación por inversa de la distancia (Mapa A2)

La ponderación por las distancias, y específicamente el método de inversa de la distancia, es un buen estimador para propósitos generales. Los valores en el nodo se estiman aplicando a los datos de Z dispersos dentro de cada área de búsqueda un factor de ponderación (exponente) vinculado a la distancia. El valor estimado para la celda no puede exceder el mínimo ni el máximo valor Z en el conjunto usado para el cálculo. Este método brinda mejores resultados cuando se trabaja con alta densidad de datos o éstos están distribuidos homogéneamente y permite examinar las anomalías locales. En este método, a los puntos que están más cerca del nodo se les asigna un peso proporcionalmente mayor que a aquéllos que se encuentran más alejados.

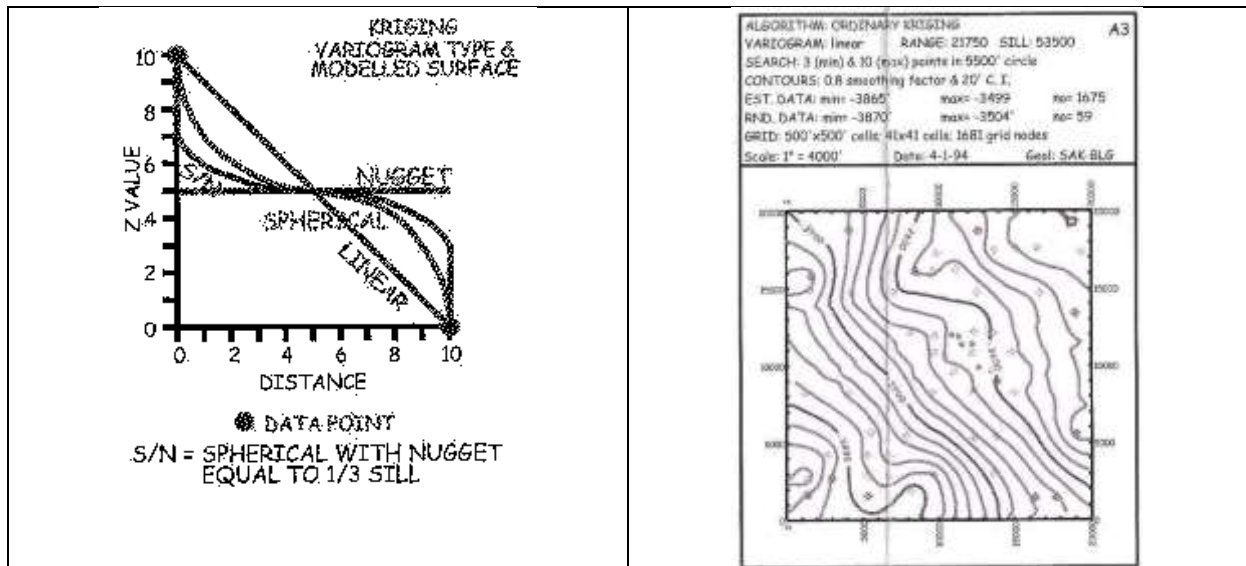


Kriging ordinario (Mapa 3)

Dado que el término proviene de un apellido, Krige, no tiene traducción, más allá de que podría decirse “Krigado”. El kriging es un método que pondera las distancias con promedios móviles. La ponderación óptima se obtiene a partir del variograma correspondiente a los valores de las diferencias de cuadrados mínimos a distancias determinadas, conocidas como *lags* para un conjunto de datos.

Es un método geoestadístico, es decir un método estadístico que se aplica de modo tal de incorporar lo que se conoce como las *características espaciales de los datos*. En este caso de la geología, la mineralogía local o la geometría del objetivo. Cuando el variograma muestra un comportamiento conocido y adecuado, el resultado estimado por el proceso de kriging es muy frecuentemente considerado como la mejor estimación lineal no sesgada que pueda calcularse (BLUE por sus siglas en inglés: best, linear, unbiased estimate).

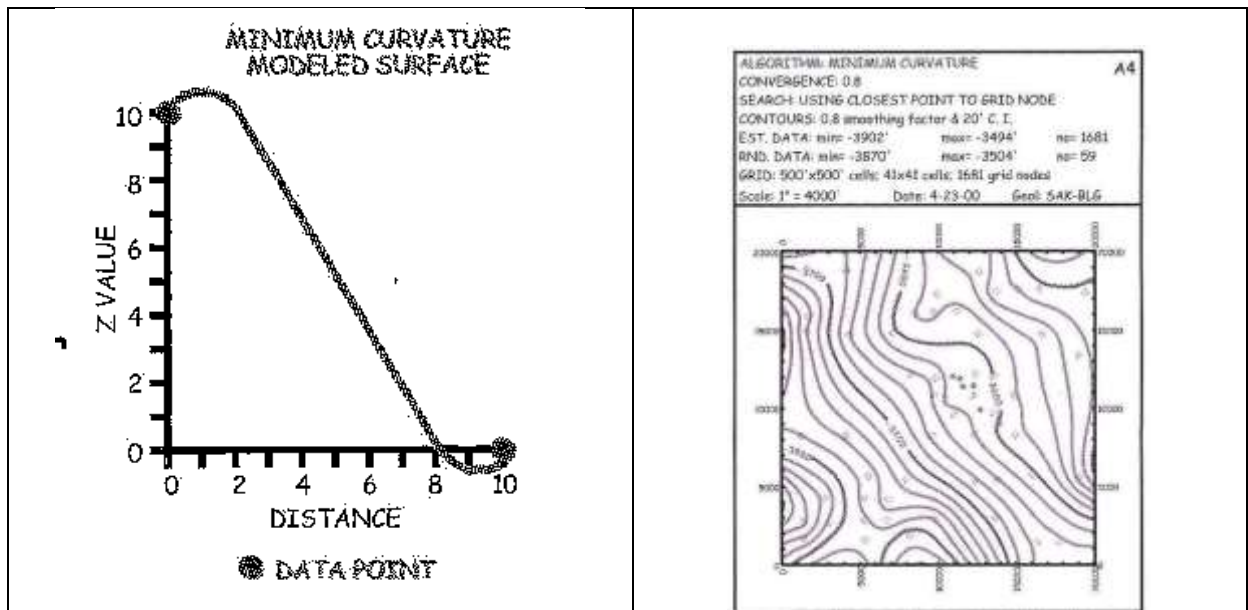
El kriging se aplica mejor en los casos de grandes conjuntos de datos y maneja adecuadamente datos agrupados o irregularmente espaciados. Puede también aplicarse exitosamente en casos con anisotropías.



Mínima curvatura (Mapa A4)

La estimación de “listones” (splines), y más específicamente la de listones biarmónicos, es un método de suavizado en el cuál las ecuaciones diferenciales satisfacen una superficie suave y continua (rubber sheet surface) que incluye los puntos dispersos en los que se conoce el valor Z. Debe calcularse un valor Z inicial en cada nodo utilizando los puntos dispersos que lo rodean. El cálculo iterativo de derivadas se repite hasta tanto los márgenes de tolerancia entre los valores reales y los estimados para Z sea alcanzado o se cumpla con un número máximo de iteraciones. Es valor, denominado *convergencia* o *tolerancia*, es determinado por el usuario.

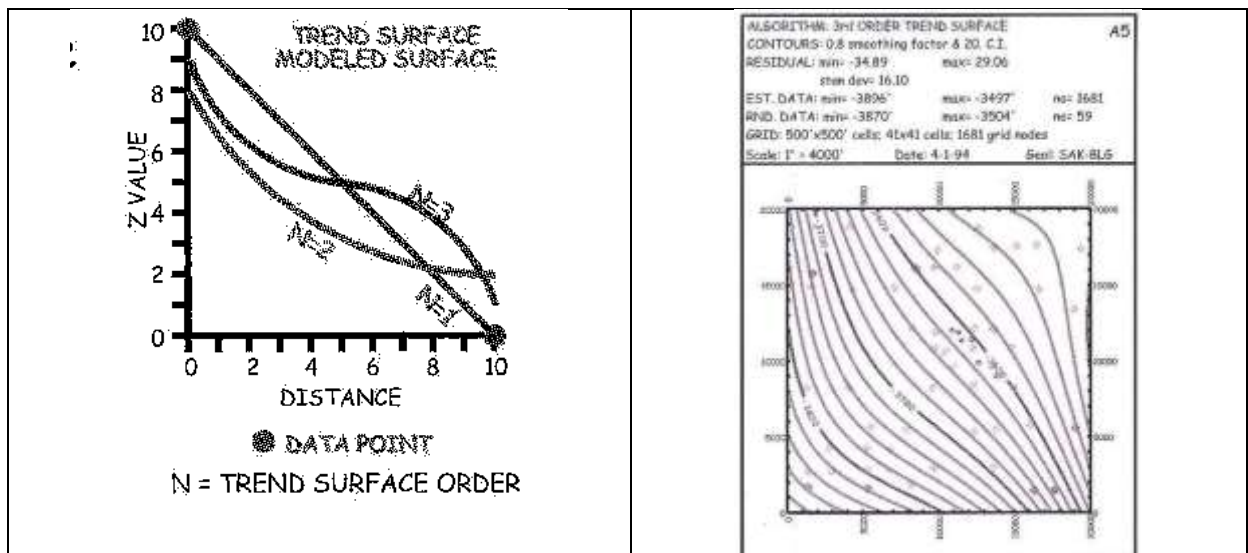
Los contornos obtenidos por este método son semejantes a los que se obtienen mediante el trazado a mano, reflejan adecuadamente los datos y producen menos artefactos que otros métodos, pero no debe usarse si existen cambios muy fuertes de los valores en distancias cortas.



Superficie de tendencia (Mapa A5)

Este es un método de estimación en el que se ajusta una superficie a los valores de Z como una función lineal de las coordenadas X-Y de la localización de los datos y se aplica un criterio de regresión por cuadrados mínimos. Los cuadrados mínimos se obtienen por adición de términos (órdenes) a la ecuación polinómica. Una vez que la superficie se ajusta a los valores Z en los puntos conocidos, se calcula el valor de Z para el punto de esa superficie que coincide con el nodo. En los órdenes altos puede ocurrir que se estimen valores que superen el del dato.

Este método puede usarse como un pre-procesado para eliminar la tendencia regional antes de aplicar el Kriging o la estimación por inversa de la distancia.



Los artefactos

Como se ha señalado anteriormente, los artefactos resultan de la labor automática de cálculo por computadora y constituyen diseños de curvas que no tienen correlato con la realidad. A continuación se muestran los diferentes artefactos

que pueden aparecer en aquellos mapas en los cuales no se ha realizado una selección adecuada del algoritmo y/o los parámetros.

