

ELEMENTOS DE CARTOGRAFIA GEOLOGICA

El Mapa Geológico

El mapa geológico es uno de los productos finales de la interpretación geológica; prácticamente todas las fases del desarrollo de los recursos mineros o de hidrocarburos. requieren para su diseño y control de esta herramienta de trabajo. En el caso del petróleo, puede decirse que la mayor parte de las propiedades que definen morfológicamente los yacimientos, tales como área, espesor, volumen, forma de la superficie, límites y orientación, son susceptibles de ser representadas mediante uno o más mapas. Parámetros internos de la roca como porosidad y permeabilidad, estado, conducta y tendencia de los fluidos presentes, contactos entre ellos, migración, continuidad, etc., factores fisicoquímicos tales como presiones y temperaturas, y muchas otras características, pueden ser representadas cartográficamente.

De tal manera que los mapas geológicos son un instrumento delicado que debe presentar la información de manera clara, nítida y confiable y deben ser elaborados siguiendo patrones de aceptación universal. Dado el dinamismo de la información en la industria petrolera, los mapas que se utilizan deben ser un instrumento de fácil modificación.

El Relieve

El relieve comprende el conjunto de formas presentes en el terreno, elevaciones y depresiones y sus diferentes relaciones laterales. Son componentes del relieve, las montañas, los valles, las planicies, los taludes y demás elementos que conforman el paisaje natural.

Es importante resaltar que el relieve involucra tres dimensiones equivalentes en concepto al largo, ancho y alto de cualquier objeto regular, cada una de esas dimensiones puede ser relacionada con un plano que es perpendicular a los otros dos.

Los Planos de Referencia

Por convención, se ha aceptado universalmente utilizar dos planos verticales y uno horizontal para las representaciones gráficas de los cuerpos (Figura 1). Estos planos se interceptan uno a uno; y en un punto denominado “origen”, se interceptarán los tres. Las líneas de intersección plano a plano, conforman ejes de giro (ejes cartesianos) que sirven de referencia lineal, es decir, para medir valores relativos a las diferentes dimensiones. Subdividiendo en intervalos iguales de medida a cada eje y asignando valores iguales a cada subdivisión, se cuenta con un instrumento que ha demostrado ser muy poderoso para la representación de los objetos.

La Proyección Lineal

Si se pretende representar de manera gráfica un punto que está en el espacio, se puede referirlo a los tres planos dimensionales antes definidos, mediante la proyección lineal. Haciendo incidir tres rayos de luz sobre el punto (Figura 2.a), siendo cada rayo perpendicular a cada uno de los planos, al chocar cada rayo con el plano al cual es perpendicular, lo hace en un lugar denominado punto de incidencia y este punto es la proyección lineal sobre el plano, del punto

real. De esta forma, se ha logrado descomponer el punto real en tres puntos por proyección lineal. Usando los ejes cartesianos, se logra dar referencia en un plano acerca de la ubicación del punto respecto a los otros dos planos. Para tal fin, se utilizará ahora, de uno de los planos con la proyección del punto (Figura 2.b), la zona delimitada por las líneas de intersección (ejes de referencia). Llevando las dos únicas líneas que pasan por la proyección y son perpendiculares a los ejes de referencia, se obtendrán dos puntos de corte sobre estos ejes a distancias del origen (x_P , y_P) que pueden ser medidas según la subdivisión convenida.

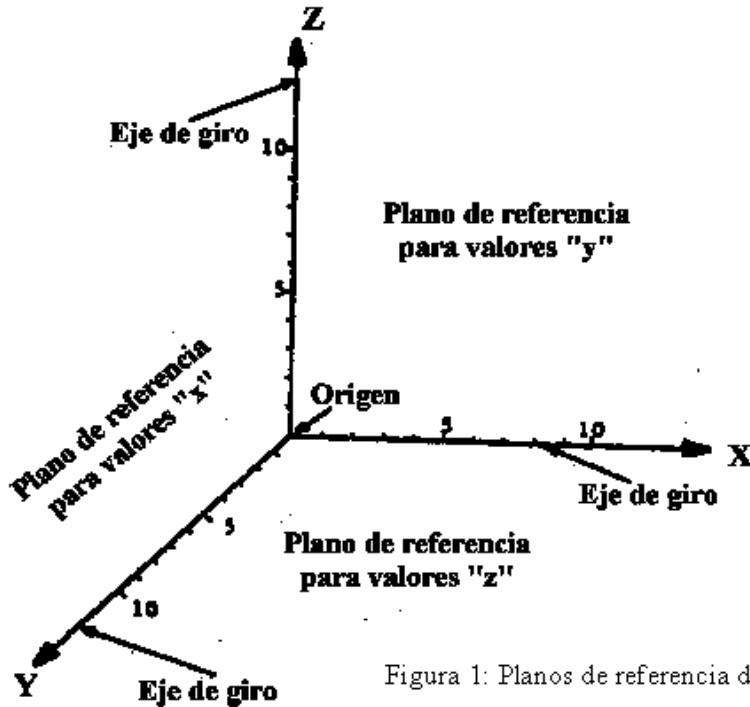


Figura 1: Planos de referencia dimensional.

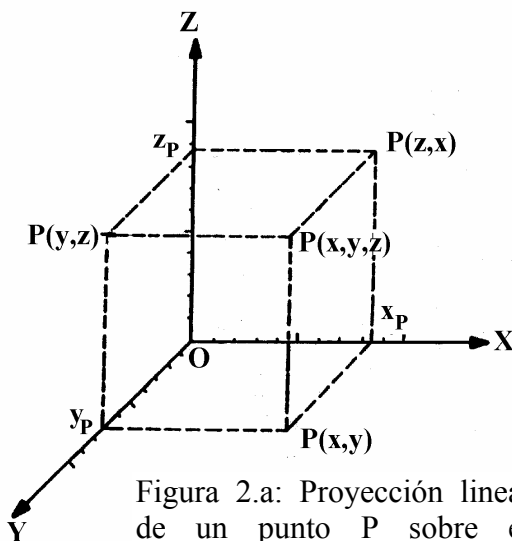


Figura 2.a: Proyección lineal de un punto P sobre el conjunto de planos de referencia dimensional.

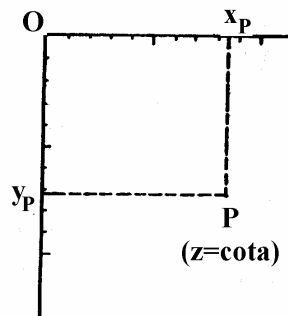


Figura 2.b: Proyección lineal del punto P sobre el plano de valores "z", visto desde arriba. (valor $z = \text{cota}$).

A través de este procedimiento, se obtienen valores de referencia que son las distancias del punto a cada uno de los planos diferentes a aquel sobre el cual se proyecta. Paradójicamente, con este método se logra obtener para el punto bajo consideración, valores relativos a los otros dos planos, sin poder obtener directamente de la representación gráfica, información acerca de la distancia del punto al plano sobre el cual se proyecta. Este es el límite de la proyección lineal, ella es la representación bidimensional de objetos tridimensionales.

Si sobre un objeto se hacen incidir haces de luz perpendicularmente a los planos de referencia, se proyectará una silueta del objeto sobre cada plano (Figura 3). A cada silueta corresponde un contorno cuyo tamaño está referido a los otros dos planos; por ejemplo, haciendo equivalencia entre los planos de referencia con la idea de alto, ancho y largo del objeto, la altura del mismo se refiere a su distancia máxima y mínima respecto al plano horizontal y no es precisamente sobre el plano horizontal que se puede medir la altura, es sobre cualquiera de los planos verticales. El problema a resolver es dar información del objeto respecto al plano de trabajo.

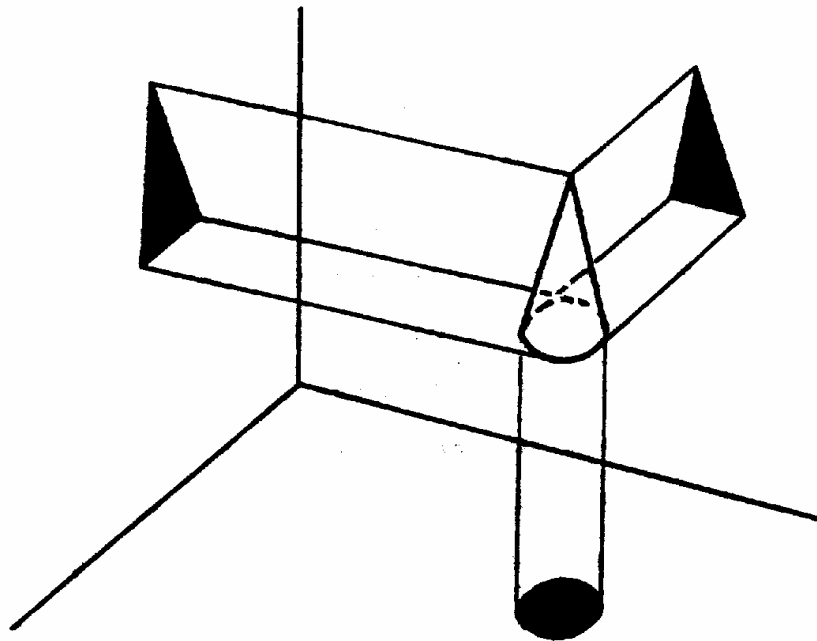


Figura 3: Siluetas producto de la proyección de un objeto (cono).

La Proyección Acotada

Por convención, se utilizará el plano horizontal para representar todas las dimensiones del objeto hipotético bajo análisis. Adicionalmente, se denominarán ejes “X” y “Y”, a los respectivos ejes cartesianos de referencia, serán valores “x” y “y” los valores de medición para estos ejes, Tales datos referidos al propio plano (horizontal) de trabajo, pueden ser medidos en cualquiera de los otros dos planos, a través del uso de un eje referencial “Z” y serían generalizados como valores “z”, estos corresponderían a la altura.

En lo sucesivo se utilizará la palabra “cota” para denominar la altura, este sinónimo es el que da nombre al tipo de representación que se hará del objeto, “Proyección Acotada”, lo cual denota que la altura o cota no se representa gráficamente. Esta última información se debe agregar explícitamente, es decir, se debe escribir el valor de la cota correspondiente a los varios puntos que se escojan como claves para la representación gráfica.

Al conjunto de los valores x , y , z . se les denomina “coordenadas”. Un punto “P” estará definido por la simbología: “P(x, y, z)” donde “x” es la distancia al plano “lateral”, “y” es la distancia al plano “frontal” y “z” es la distancia al plano “horizontal”. Se entenderá que al hacer la proyección sobre el plano horizontal, se está figurativamente “aplastando” la figura, o puede decirse que se le ha restado la dimensión “altura”, mientras que los valores “x” y “y” de cualquier punto, pueden ser medidos directamente de su silueta, según se explicó al hablar de proyección lineal. Al escribir esta información directamente, se está permitiendo al observador tener una buena idea de las relaciones de altura entre diferentes puntos claves del objeto, en otras palabras, el método consiste, en principio, en escoger varios puntos estratégicamente distribuidos del objeto; sean estos por ejemplo los de mayor cota, los de menor cota, y un grupo de cotas intermedias, y proyectarlos linealmente sobre el plano horizontal escribiendo además los valores de cota al lado de la proyección.

La Figura 4 muestra un objeto de geometría regular (un cono), el cual es apropiado para completar la idea de proyección acotada. Se procederá a “dibujar” sobre el plano horizontal la superficie externa del cono. Para cada valor de cota, existe un conjunto de puntos pertenecientes a esta superficie los cuales forman una línea circular que, por la posición del objeto a proyectarse, forma un círculo igual en tamaño al original. La selección de los círculos se realizará a cotas claves, por ejemplo, aumentando de 10 en 10 unidades, o de 50 en 50. El conjunto de círculos en la proyección, una vez identificados por sus valores verdaderos de cota, permiten visualizar en dos dimensiones al objeto.

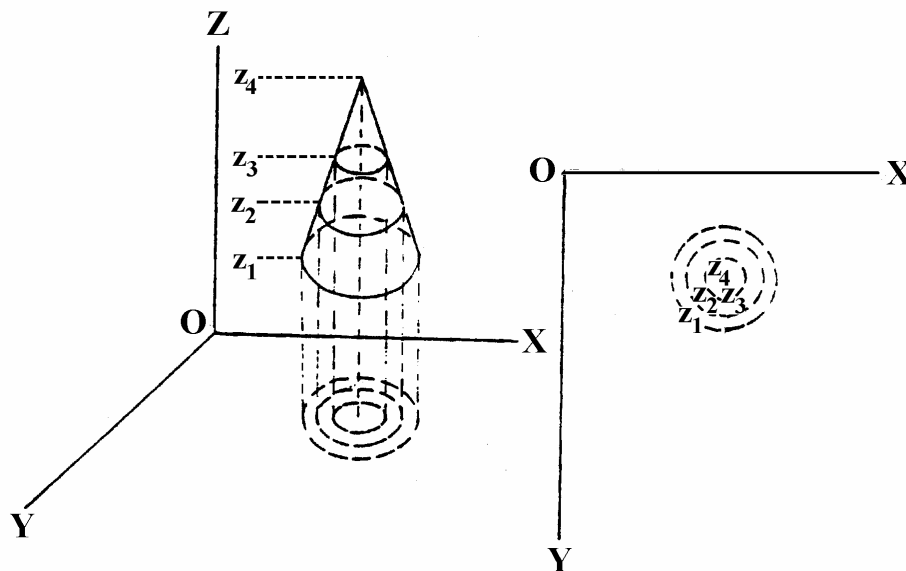


Figura 4: Proyección acotada de un cono; conocidos los valores de cota, es fácil visualizar el objeto a partir de su proyección.

La Topografía

La topografía comprende el conjunto de técnicas de medición y representación de áreas de la superficie terrestre. La forma de representación que utiliza la topografía es el mapa topográfico, el cual es básicamente la proyección acotada de los terrenos con algunas especificaciones concernientes a las necesidades para las cuales se realiza. Un mapa topográfico es el que expresa la forma, dimensiones y distribución de los rasgos morfológicos de la superficie terrestre. Tales rasgos se clasifican en tres grupos; (a) relieve, incluyendo colinas, valles, llanuras; (b) hidrografía, que comprende mares, lagos, ríos, canales, marismas, etc.; y (c) obras y construcciones, incluyendo ciudades, ferrocarriles, vías, etc.

En el mapa topográfico, se representan puntos que están sobre la superficie de La Tierra; por consiguiente, las coordenadas son geográficas y están referidas a los planos norte-sur y este-oeste principales del planeta. La altura o cota es la distancia vertical hasta el nivel del mar y su valor se escribe acompañando la localización, en un cuadrado al pie del mapa o en un ángulo del mismo, denominado la Leyenda.

Construcción del Mapa Topográfico

El mapa topográfico se construye sobre un mapa de ubicación geográfica. Las localizaciones son estaciones en el terreno donde se ha medido la altura sobre el nivel del mar. Mediante interpolación, se obtienen las cotas claves. Esto consiste en determinar los valores de cota entre dos puntos de cotas conocidas, suponiendo que entre tales puntos la variación es gradual. Por ejemplo, si un punto tiene cota 5 metros y otro cercano tiene 48 metros, entre ambos puntos existen los valores 6m., 7m., 8m., ... 47m., así que si se divide el segmento de recta entre ambos puntos en tantas partes iguales como necesario, se puede ubicar rápidamente la localización del punto a la cota que interesa entre los dos valores de los puntos en cuestión. De esta manera, se está en capacidad de escoger los intervalos de curvas con los cuales se trabajará; si por ejemplo interesan variaciones de valores de diez en diez metros, entre los puntos del ejemplo bajo consideración se escogerá los valores 10m., 20m., 30m. y 40m. La experiencia y el tipo de necesidad, permitirán hacer la mejor escogencia de los puntos de interpolación así como los intervalos entre curvas con los cuales trabajar.

Elaborar un mapa topográfico consiste en construir líneas de puntos de un mismo valor de cota, en otras palabras, ubicar los puntos de igual valor de altitud y construir la curva que pasa por ellos, esto para cada valor seleccionado. Las líneas así obtenidas, son las llamadas “curvas de nivel”; al ser escogidas estas convenientemente, el conjunto constituye un mapa topográfico. El efecto es como si el relieve fuera cortado por un conjunto de planos horizontales a distancias regulares uno del otro. Al mirar desde arriba, se verían las líneas de corte de los planos con la superficie externa de cada cuerpo o elemento del relieve.

En la Figura 5 puede observarse el caso de un cerro. La parte más baja, puede ser identificada como la curva más amplia; hacia el centro hay una convergencia de curvas que corresponden al aumento progresivo de altura hacia el tope del cerro. En el caso de una depresión (un valle), la curva más externa corresponde a la parte más alta y la convergencia de curvas hacia el centro, se corresponde a su vez con la disminución progresiva de la altura (Figura 6).

Se han revisado dos casos de formas topográficas opuestas cuya representación cartográfica podría ser idéntica. El lector habitual de mapas topográficos, al comenzar la lectura de un mapa, una de las primeras cosas que hace es revisar los valores de cotas en las curvas estableciendo la distribución de los altos y bajos topográficos, rápidamente su mente crea una imagen muy completa de los cambios de relieve en el mapa topográfico.

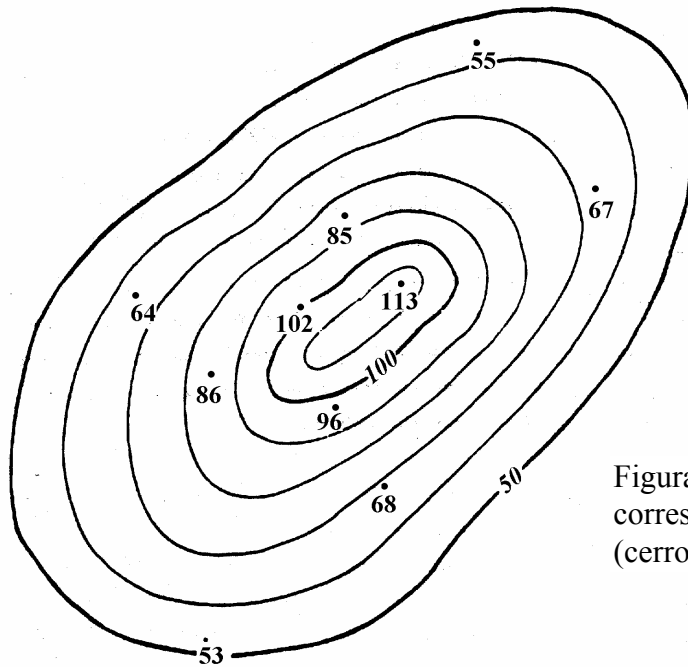


Figura 5: Mapa topográfico correspondiente a una elevación (cerro).

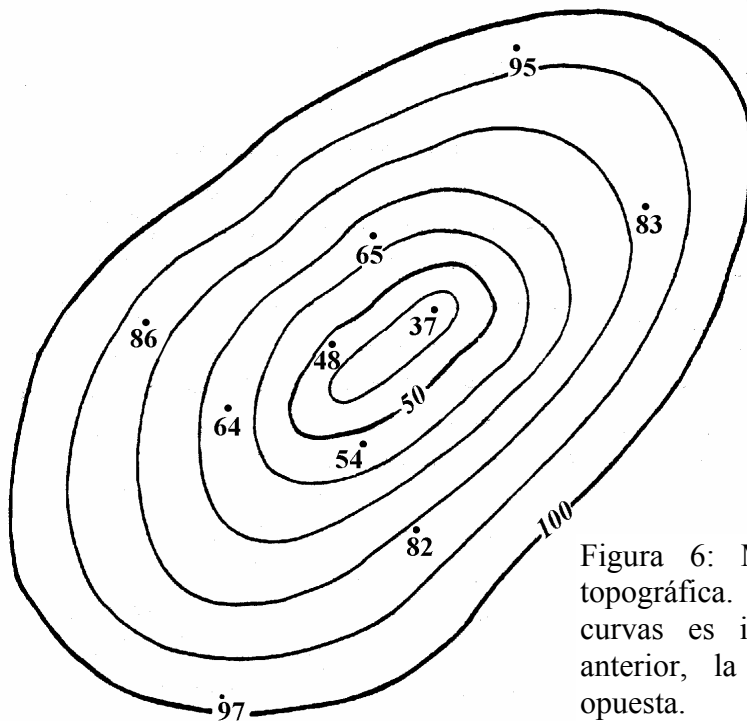


Figura 6: Mapa de una depresión topográfica. Aunque el conjunto de curvas es idéntico al de la figura anterior, la relación de valores es opuesta.

Una vez que se dispone de un conjunto de valores distribuidos sobre una hoja y se pretende construir un mapa, siempre es posible obtener más de una interpretación, a veces muy disímiles una de otra. Las Figuras 7.a y 7.b. muestran un ejemplo de esto. De allí que es norma para quien quiera hacer el mapa, visitar el sitio de trabajo; inclusive, en la libreta de campo se elabora el dibujo a mano alzada del paisaje. En otros casos, se dispone de fotografías aéreas del área como una guía, de manera que al elaborar el mapa se tiene una idea sobre el tipo de relieve a representar.

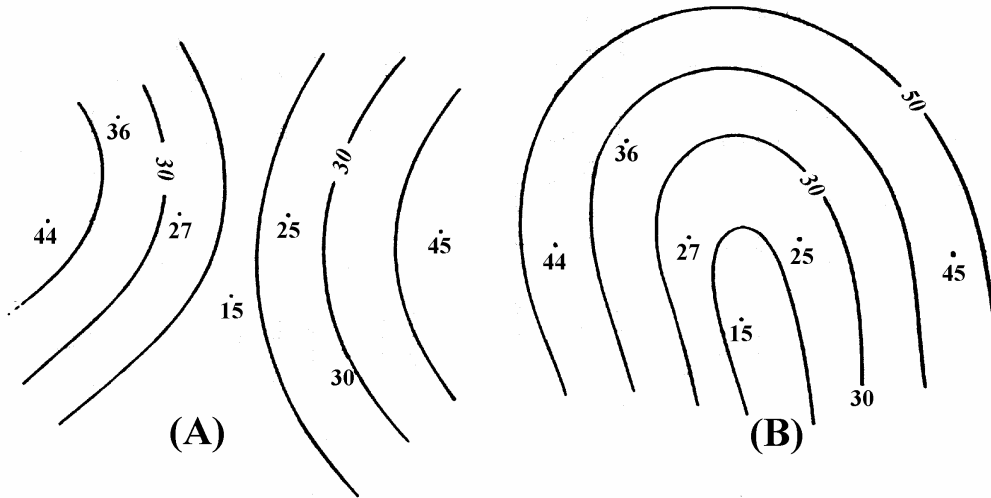


Figura 7.a: El conjunto representa dos elevaciones topográficas a partir de un grupo de valores de altura.

Figura 7.b: El mismo grupo de datos puede ser interpretado como una depresión topográfica.

La figura 8 representa un mapa con curvas de nivel de un territorio que bordea el mar. La línea formada por la costa en el momento en el cual el mar alcanza su nivel medio, se llama curva de nivel de elevación cero, pues el nivel medio del mar se toma como plano de referencia para medir la altitud o cota de las otras curvas de nivel. Ciertas curvas de nivel se imprimen algo más gruesas que las demás, con la intención de usarlas como curvas indicadoras, pues en ellas se hace constar, de tanto en tanto por un número pequeño, su cota. En la figura 8, con curvas de nivel de 20 m., las curvas indicadoras se seleccionan cada 100 m.

Para completar la información necesaria para una interpretación apropiada del mapa topográfico, este debe incluir el nombre de la localidad que sirve para designarlo, la leyenda, la escala, la equidistancia de las curvas de nivel, el nivel cero o plano de referencia y la orientación del plano. La escala se representa gráficamente, por la medida de una línea recta con divisiones, o de modo numérico, a través de una fracción representativa. Así, si la escala es 1:125000 o $1/125000$, esto indica que la distancia entre dos puntos cualesquiera del mapa es $1/125000$ avo de la distancia real entre los dos puntos originales en la superficie terrestre. La orientación está referida a una flecha en el mapa que indica el norte verdadero, a veces acompañada de una media flecha que corta a la anterior, la cual señala al norte magnético. El ángulo entre las dos flechas (declinación magnética) deberá también figurar en el mapa (Figura 8).

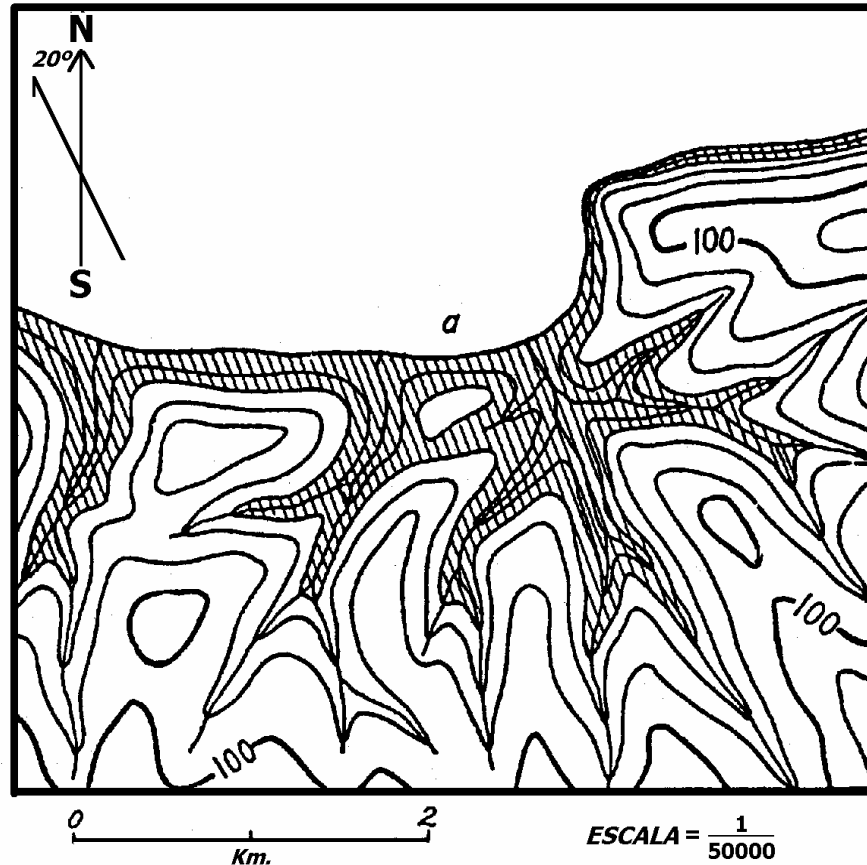


Figura 8: Mapa con curvas de nivel, de un territorio que bordea el mar. Si el nivel de este se elevara 40 m., la porción rayada del territorio actual quedaría sumergida, y la nueva línea de costa sería la actual curva de 40 m. La colina al sur de *a* se convertiría en una isla.

Cortes y Perfiles

Debido al relieve, el desplazamiento por un terreno cualquiera incluye ascensos o descensos relativos a medida que transcurre el movimiento. La distancia horizontal total recorrida, dependerá de la “pendiente” del terreno, entendiéndose como tal, el ángulo m formado por la línea que une dos puntos A y B en el terreno con la horizontal (Figura 9). He aquí un concepto que vincula distancia horizontal entre dos puntos y diferencia de altura entre ellos. La determinación de la pendiente en el mapa, arroja una información útil en cuanto a lo abrupto del terreno, lo cual es de suma importancia en obras civiles, solo para citar un ejemplo. En Geología Petrolera, este concepto es de gran utilidad en muchos aspectos relativos a la exploración del subsuelo, como por ejemplo en el establecimiento de estructuras favorables para la acumulación de petróleo y en el cálculo de reservas.

En la Figura 10 se proyecta sobre el plano horizontal el segmento de recta de tamaño “L”; en un caso con pendiente m_1 y en otro caso con pendiente m_2 mayor que m_1 . Se puede observar que mientras mayor es el ángulo de la pendiente, menor es el tamaño de la proyección que se obtiene. En cada caso se han llevado sobre el segmento a proyectar, los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 de

cada segmento, a igual distancia entre si. La proyección de estos puntos los presenta más cercanos entre si a medida que mayor es la pendiente. Este es un hecho muy importante de observar en un mapa topográfico, pues permite clasificar áreas de acuerdo a la pendiente; donde hay mayor concentración de curvas, la pendiente es mayor (el terreno es más abrupto), en las zonas más llanas, las curvas están más separadas.

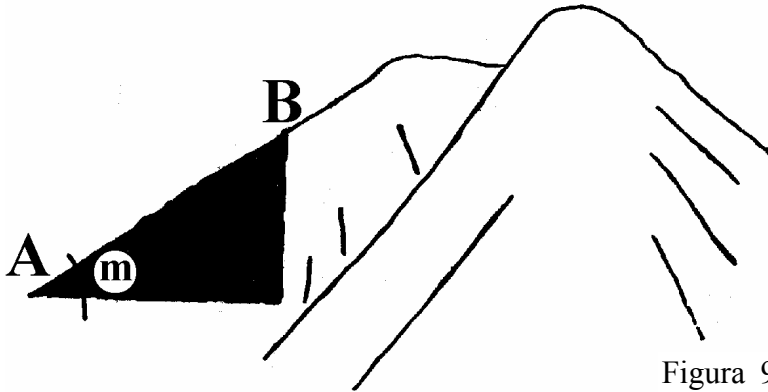


Figura 9: Angulo de pendiente entre dos puntos del relieve

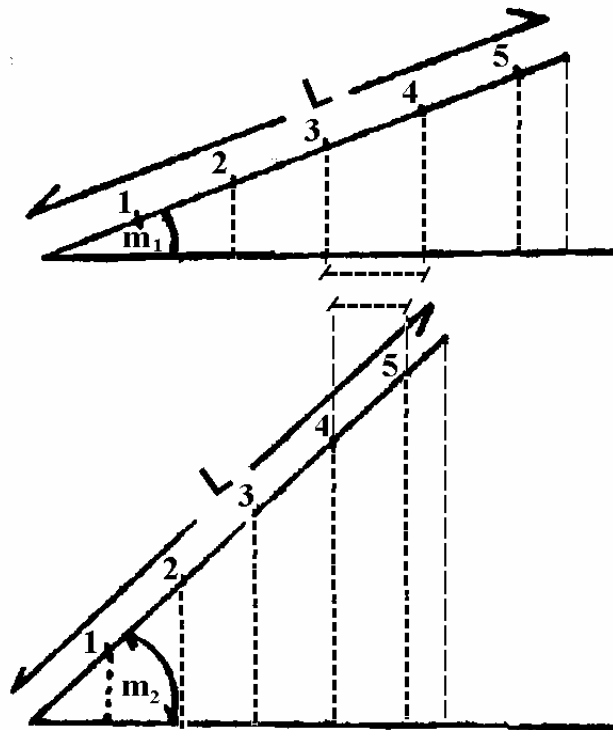


Figura 10: Proyección de un segmento de recta de tamaño “L” horizontal, al aumentar el valor “m” del ángulo de pendiente, disminuye el tamaño de la proyección.

La manera práctica de reconocer el relieve de un terreno representado por un mapa topográfico, en un área AB determinada por una recta o traza (Figura 11), es a través de la construcción de un “perfil”. Un perfil es un diagrama que muestra la forma de la superficie del terreno tal como aparece al cortarla transversalmente por un plano vertical. El perfil se compone de cuatro líneas que cierran completamente el espacio (Figura 12). Estas son la línea que constituye el perfil propiamente dicho, la línea de base y las dos líneas que limitan sus extremos. La línea del perfil constituye el límite superior del diagrama y representa la intersección del plano vertical con la superficie del terreno. La línea de base se traza horizontalmente y se elige de modo que se encuentre a una distancia conveniente por debajo del punto de menor cota del perfil. Las líneas que limitan los extremos son perpendiculares a la línea de base.

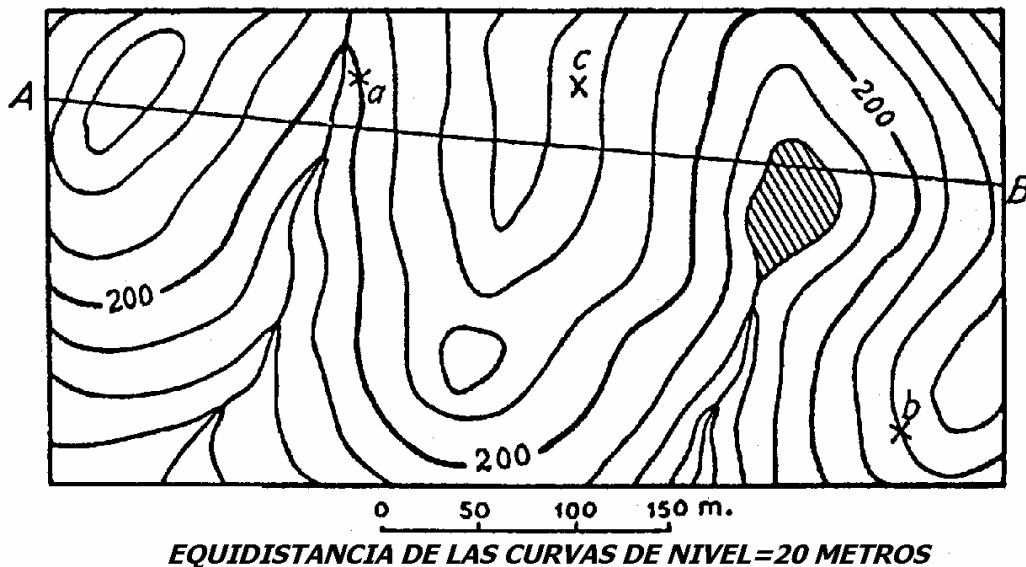


Figura 11: Mapa con curvas de nivel de un territorio de relieve moderado. El rayado diagonal representa un lago, AB es la línea de corte de la figura 12.

Cada perfil tiene una escala horizontal, medida en las unidades correspondientes sobre la línea de base, y una escala vertical, que se mide en unidades de altitud perpendicularmente a la anterior. Si la escala es la misma, se dice entonces que el perfil está trazado a “escala natural”. En algunos casos, la escala vertical se toma de modo que sea de dos a tres veces mayor que la escala horizontal (Fig. 12 y 13); se dice entonces que la escala vertical está “exagerada”. La exageración es útil para representar perfiles de terrenos de muy poco relieve, y así se puede acentuar la posición de colinas y valles. Habitualmente, deberá emplearse la escala natural.

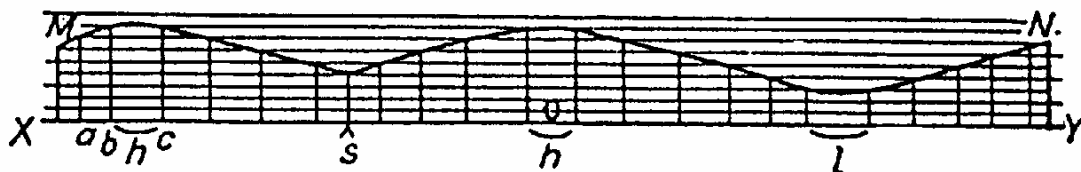


Figura 12: Corte a través de la recta AB de la figura 11 (dibujado a escala natural).

Para ilustrar la construcción de un perfil, se utilizará la traza a lo largo de la línea AB (Figura 11). Se toma una tira rectilínea de papel y se aplica sobre AB; sobre el borde de ella se marca un punto cada vez que AB corta una curva de nivel, y un signo convencional (~) si atraviesa algún curso de agua. Se unen después los puntos correspondientes a la curva superior de cada colina por una línea curva (h, Fig. 12), para indicar dónde están situadas las colinas. Asimismo se pondrán las cifras que indican las cotas de las curvas de nivel. Sobre una hoja de papel apropiado para perfiles, como es el papel milimetrado, se traza $XY = AB$ como línea de base del perfil. Se trasladan los puntos, los signos ~, etc., a XY, marcándolos con lápiz muy fino. Los tres primeros puntos son los señalados por a, b y c, la curva de la cumbre por h, y el curso de aguas por (~), según se puede ver en la figura 12. Puesto que $XY = AB$, resulta evidente que la escala horizontal del perfil es igual a la del mapa.

El punto más bajo del cortado por AB se halla en el lago cuya elevación sobre la base elegida es algo menor de 180 m. Por tanto, 100 metros por encima del nivel del mar será una cota conveniente para la base del corte. También se podría elegir el nivel del mar si así se desea. La primera curva de nivel cortada por AB es la de 240 m. de cota, representada por “a” sobre XY. Se toma un punto verticalmente sobre “a” siguiendo la ordenada de 240 m. Verticalmente también, por encima de “b”, la posición de la curva de nivel de 260 m se representa por un punto sobre la ordenada de 260 m. Similarmente, sobre la ordenada apropiada, se señala por un punto la cota de cada uno de aquellos marcados sobre XY. Se unirán todos estos puntos, así obtenidos, por la curva MN; este es el perfil buscado. Es de notar que las cimas de las colinas tienen una elevación superior a 260 m., aunque inferior a 280 m.; que el fondo del cauce del río se halla a menos de 200 m., aunque por encima de 180 m., y que la superficie del lago está por debajo de los 180 m., aunque por encima de los 160 m.

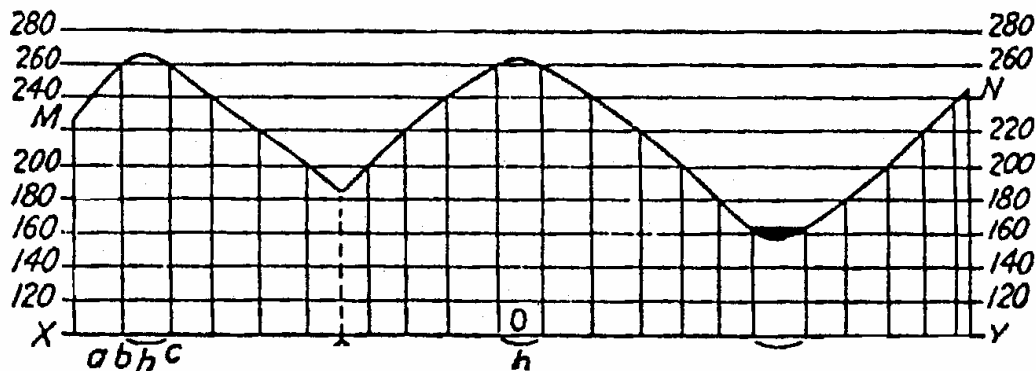


Figura 13: Corte a través de la recta AB de la figura 11. Es análogo a la figura 12, excepto que la escala vertical es tres veces mayor que la escala horizontal.

Cartografía Geológica

Con este nombre genérico, se denominan una serie de aplicaciones de las técnicas cartográficas en la descripción de las características geológicas de un lugar. Una de estas aplicaciones consiste en delimitar en un mapa topográfico, áreas de dominio litológico, de acuerdo a los tipos de roca presentes en la superficie. Un mapa geológico es una representación bidimensional de un área de la superficie terrestre sobre la cual se han graficado un conjunto de datos de interés geológico, tales como la distribución de los diferentes tipos de rocas, la localización y naturaleza de los contactos entre los tipos de rocas y la localización y orientación de los rasgos estructurales principales. La disposición de rocas sobre un mapa geológico se indica por distintas tramas o colores y los rasgos lineales, tales como líneas de fallas u otras estructuras, contactos litológicos, etc., se muestran por líneas de diferentes clases y grosor. En el margen de un mapa geológico figura una leyenda, incluyendo una clave relativa a los colores, tramas y líneas empleadas en este mapa particular.

Los tipos de mapas más utilizados en geología petrolera son el mapa estructural y el mapa llamado isópaco; además, se utilizan el mapa de facies, los diferentes mapas de isopropiedades petrofísicas, el mapa de continuidad de areniscas, de presiones, de temperaturas, de velocidades de onda y otros. Muchos de los nombres son informales y/o específicos para la industria petrolera, pero la mayor parte de ellos se construye siguiendo el método de interpolación y adaptando los conceptos válidos en superficie a su utilización para datos del subsuelo.

Los principales elementos del mapa geológico, se incluyen en la Figura 14. La simbología general, incluyendo la leyenda de los tipos de rocas, se presentan en las Figuras 15 y 16:

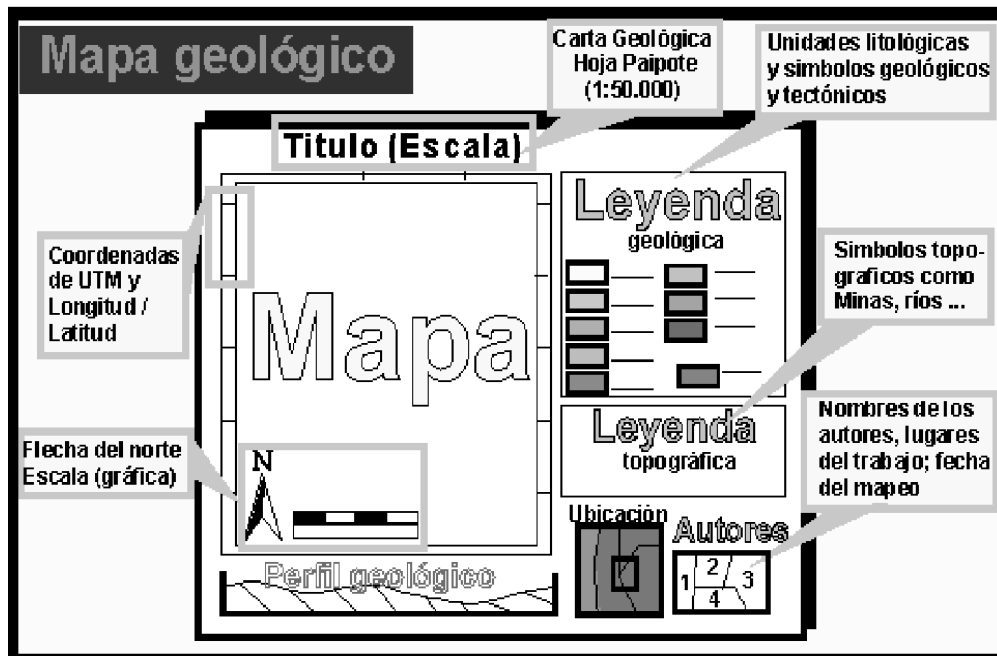


Figura 14. Principales elementos a representar en un mapa geológico.



Figura 15:
 Simbología
 general del
 mapa
 geológico.

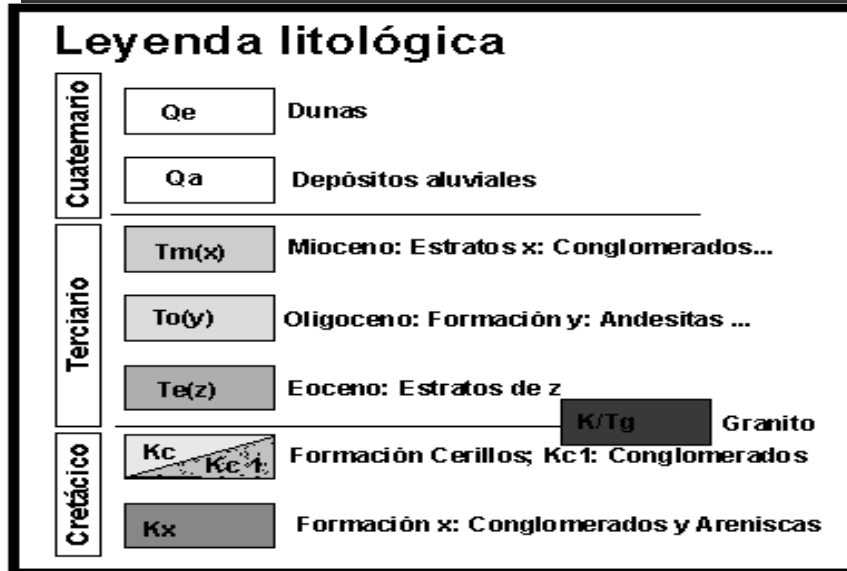


Figura 16:
 Leyenda
 litológica
 del mapa
 geológico.

Con el fin de presentar las relaciones existentes entre la topografía y la cartografía geológica, la Figura 17 incluye un bloque diagramático “A” y un mapa “B” de la superficie de dicho bloque, donde las porciones punteadas y en blanco representan dos estratos de la roca. De este modo, se aprecian las relaciones entre la estratificación horizontal y las curvas de nivel. Las Figuras 18 (estratos verticales) y 19-21 (estratos laterales), han sido trazadas del mismo modo.

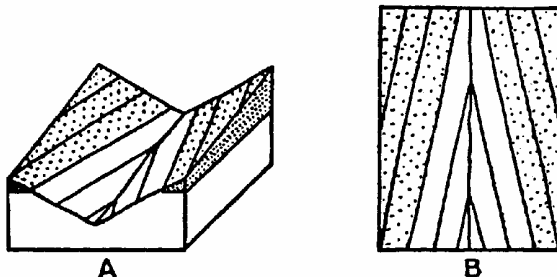


Figura 17: Relaciones entre la estratificación horizontal y las curvas de nivel en un bloque diagramático (A) y en un mapa de la superficie del bloque (B). Las porciones punteadas y en blanco representan dos estratos de la roca.

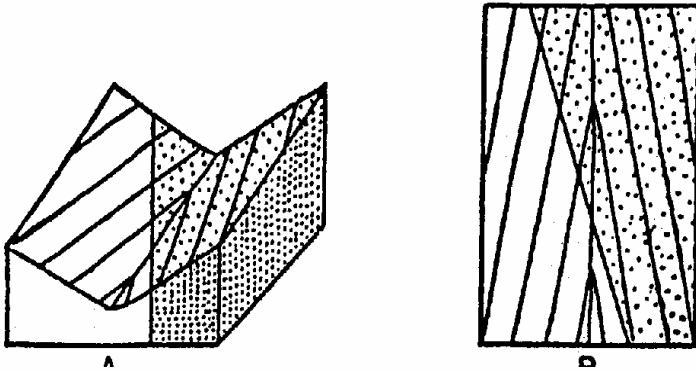


Figura 18: Relaciones entre estratos verticales y curvas de nivel (ver Figura 17).

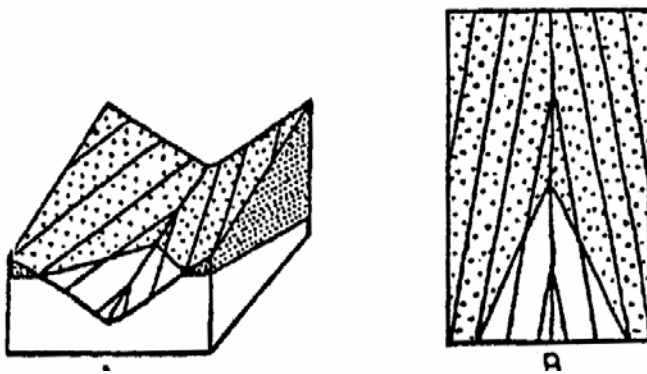


Figura 19 Relaciones entre estratos inclinados y curvas de nivel (ver Figura 17).

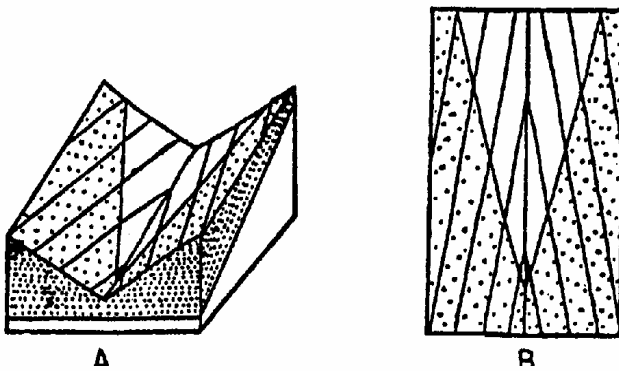


Figura 20: Relaciones entre estratos inclinados y curvas de nivel (ver Figura 17).

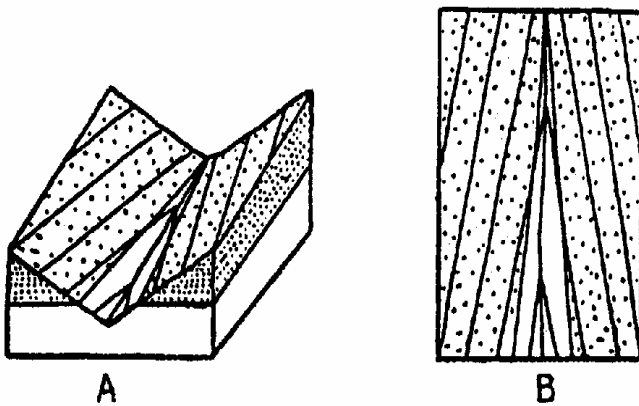
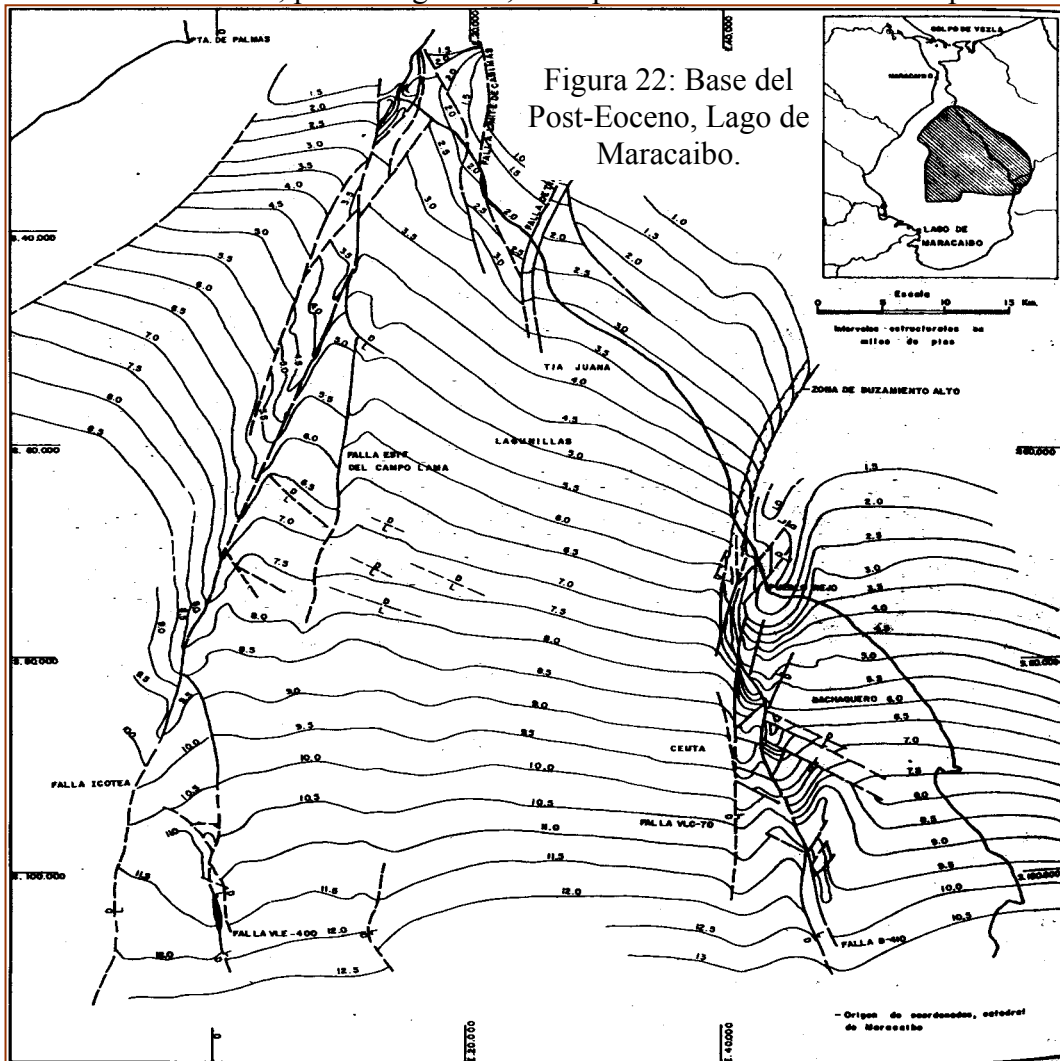


Figura 21: Relaciones entre estratos inclinados y curvas de nivel (ver Figura 17).

El Mapa Estructural

El mapa estructural es un mapa que muestra la configuración geométrica de la superficie de una capa, formación o discordancia mediante curvas de nivel (Figura 22). A diferencia del mapa topográfico, en el mapa estructural se proyectan datos que están en el subsuelo hasta un hipotético plano de referencia a nivel del mar. En este caso, entre otras desventajas, lo que se cartografía no se está viendo; por consiguiente, el mapa es en buena medida interpretativo.



Las fuentes de la información son, en primera instancia, los datos sísmicos y los registros de pozos, el conocimiento que se tenga de áreas cercanas y en muchos casos, los datos de producción y de presiones en el subsuelo.

El patrón estructural es uno de los factores de control en una acumulación petrolífera. Con el incremento de la profundidad en el subsuelo, aumentan también paulatinamente otros dos factores de dominio como lo son la presión y la temperatura. Esto resulta en un empuje hacia arriba (hacia menores presiones) sobre los fluidos presentes. Un cuarto factor de control es la permeabilidad de la roca; las capas impermeables no pueden ser atravesadas por los fluidos y se

constituyen en techos de los yacimientos. En el medio rocoso que si es suficientemente permeable, el petróleo se desplaza “lateralmente” hacia arriba y alcanzada la máxima altura posible se detiene, acomodándose a la estructura.

Esta es de por sí una buena razón para que necesario contar con el mapa estructural. El petróleo se buscará en las zonas altas de la hipotética trampa, con prioridad respecto a las áreas bajas. Un buen control estructural permite establecer los mejores diseños de perforación, vale decir por ejemplo, establecer las profundidades hasta donde perforar garantizando por una parte encontrar el objetivo y por la otra no perforar en exceso.

Al construir el mapa estructural, debe tenerse en cuenta que los datos son profundidades y no alturas respecto al nivel del mar; por consiguiente, a mayor valor corresponde mayor profundidad. El resto de las normas generales que rigen para el mapa topográfico, también rigen para el mapa estructural. A continuación, se discutirán algunos de los métodos de trazado de mapas estructurales.

El Método de Interpolación

Suponiendo que entre cualesquiera dos puntos cercanos y a diferente altura hay un buzamiento uniforme, es posible asignar matemáticamente los valores de profundidades entre tales puntos mediante el método de interpolación.

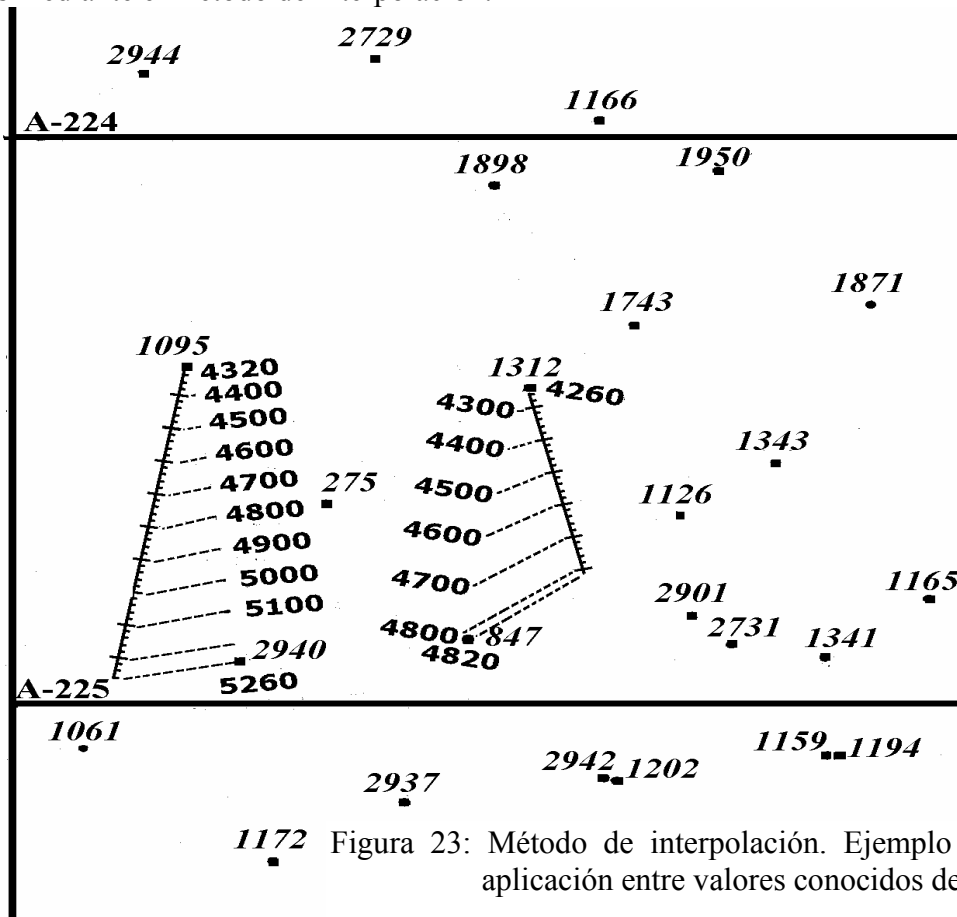


Figura 23: Método de interpolación. Ejemplo de su aplicación entre valores conocidos de cota.

Obsérvese la Figura 23 donde en los puntos (pozos) 1095 y 2940, se conocen los valores de cota (profundidad al tope de la unidad litológica bajo consideración). La diferencia de cota es el resultado de restar $5260' - 4320'$, esto es $940'$. Si interesan valores de curvas de $100'$ en $100'$, entre estos dos pozos se podrán obtener nueve de esos valores claves. Desde el pozo 1095 se ha trazado una escala graduada en la cual se han marcado los valores $4320'$ y $5260'$ correspondientes a las respectivas cotas de los pozos. El valor $4320'$ de cota coincide en ambos segmentos y desde el valor $5260'$ de la escala graduada se lleva una recta hacia el pozo 2940 el cual tiene esa cota. Al trazar paralelas a esa recta desde los valores claves en la escala graduada hasta la recta que une ambos pozos, se obtienen los puntos de ubicación de las cotas claves entre dichos dos pozos. Igualmente se hizo con los pozos 1312 y 847.

Una vez ubicado en el mapa un conjunto adecuado de valores claves mediante interpolación, se procede a la construcción del mapa; en la Figura 24 puede verse el mapa estructural producido en este caso.

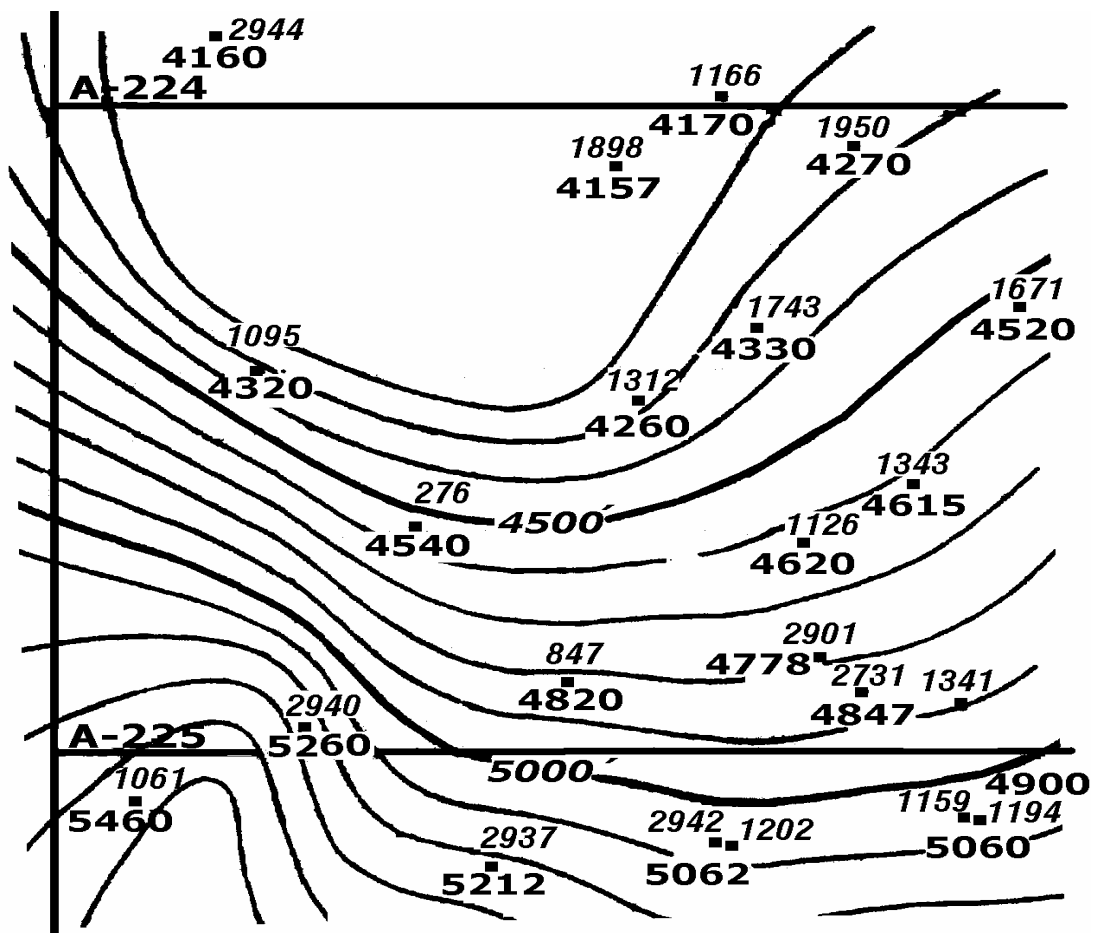


Figura 24: Mapa estructural. Mediante la información obtenida con pozos perforados y la interpolación entre los valores (ver Figura 23), se puede hacer la interpretación y proceder a su construcción.

Contornos Estructurales

Por tratarse del producto de la interpretación, en la elaboración del mapa estructural juegan papel importante, la densidad de datos, el conocimiento del área, la experiencia y el “estilo” del geólogo; sin embargo, es de esperarse que dos buenas interpretaciones de dos geólogos diferentes, tengan un alto grado de semejanza entre sí.

Una vez que se emprende la elaboración de un mapa estructural, la visualización de la estructura puede ser afectada por tres tendencias inconvenientes de construcción, a saber:

12.a. Contorneo Mecánico:

En el método de trazado mecánico, la diferencia en elevación entre cada dos puntos se distribuye aritméticamente, de acuerdo con la distancia horizontal y el intervalo escogido. Luego de interpolar y obtener las ubicaciones de los valores claves de profundidad en el mapa, deben unirse con curvas de nivel los puntos de igual valor de cota. Si esto se hace mecánicamente, la tendencia es a trazar líneas rectas entre puntos tal como una versión exagerada de esta tendencia que se puede observar en la Figura 25. El efecto es parecido al que se obtiene por graficación mecánica con una computadora.

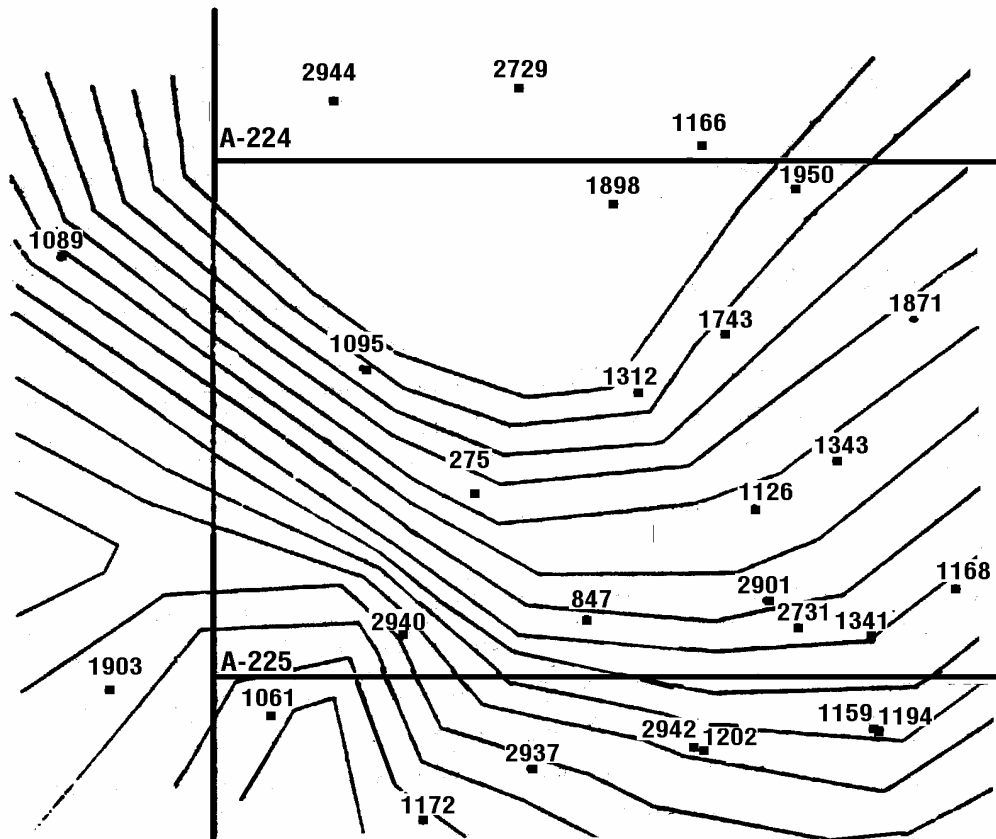


Figura 25: Contorneo Mecánico. Obsérvese el mapa de la Figura 23 con los contornos trazados de manera exageradamente mecánica.

12.b. Contorneo Paralelo:

El método paralelo o proporcional, de espacios iguales entre las curvas, se utiliza cuando se cuenta con poca información. Se trata en este caso de mantener el paralelismo entre curvas contiguas; si se es demasiado estricto, se corre el riesgo de obtener una representación poco natural donde los contornos (Figura 26) cumplen al máximo con la regla de paralelismo pero muestran un poco razonable patrón estructural.

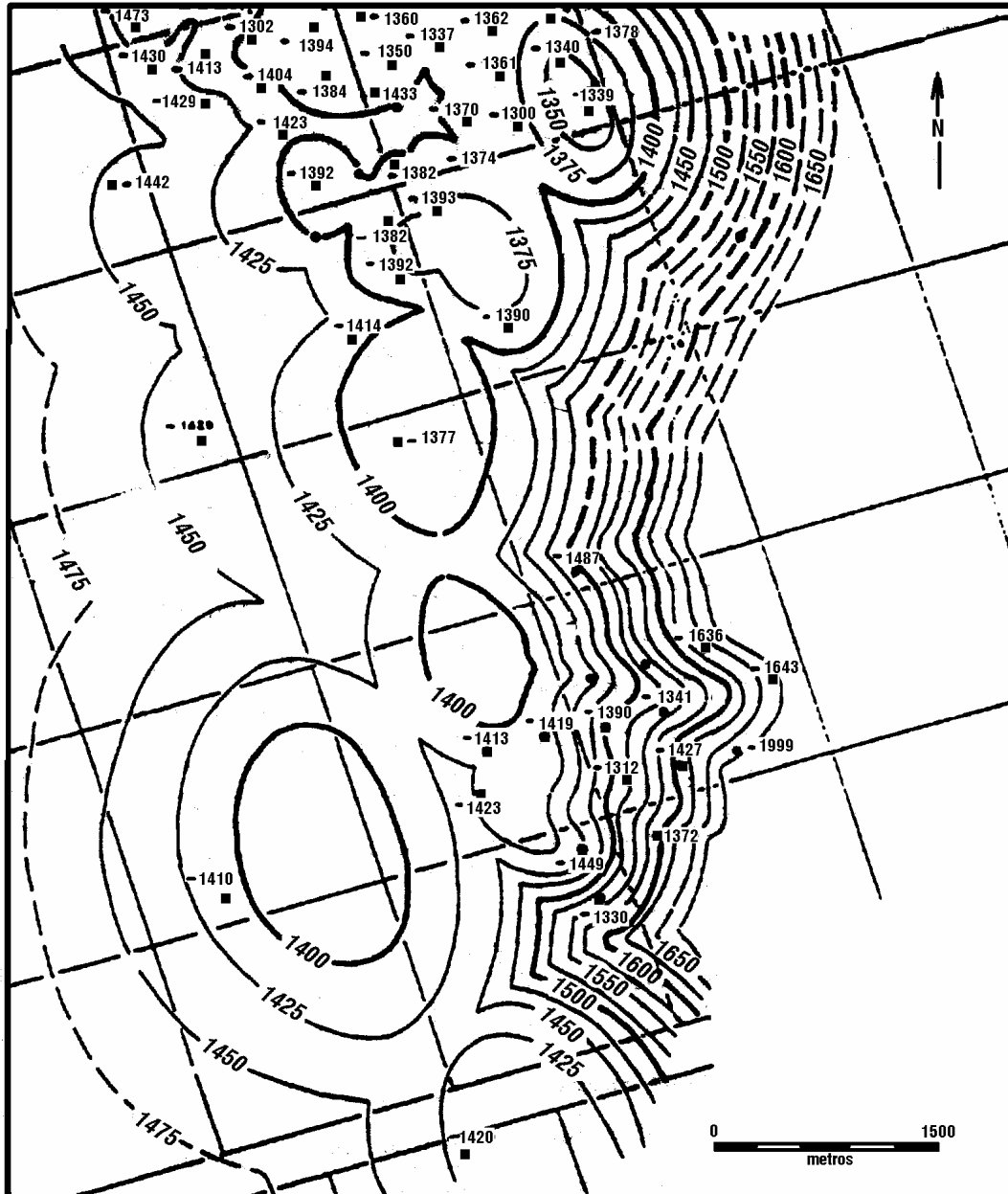


Figura 26: Contorneo paralelo. Interpretación poco natural por exageración del paralelismo entre curvas.

12.c. Contorneo Isomórfico:

En este caso, se presume que la información de que se dispone refleja sin duda la tendencia general y que debe mantenerse al máximo la distancia entre curvas, de tal manera que si los datos no están uniformemente distribuidos, se tratará de imitar en todo el mapa, la interpretación lograda en los sitios donde haya datos de control. (Figura 27).

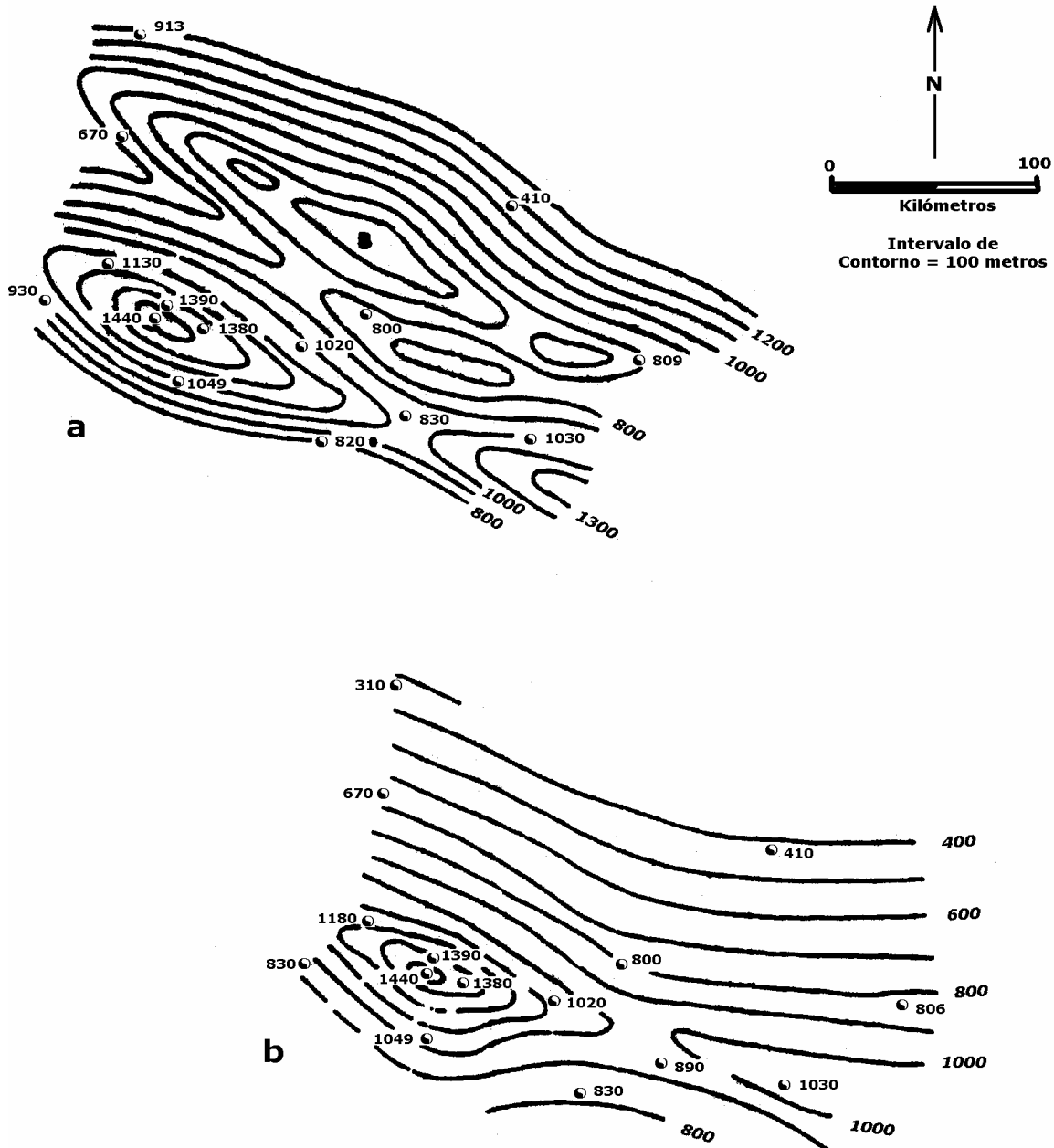


Figura 27. Contorneo isomórfico.

- La estructura "B" ha sido interpretada sin que se tengan indicios reales sobre su existencia.
- Una interpretación más conservadora es probablemente mejor.

He aquí donde juega papel importante la pericia del geólogo e inclusive, donde el usuario puede encontrar una fuente de errores. De ser estos detectados, su corrección es en general sencilla mediante el “cepillado” de las curvas, el “redondeo de las esquinas” o la eliminación de estructuras no generadas por suficientes datos de control. Esto último es un punto importante: “No se deben inventar estructuras sin otro dato que los valores medidos en profundidad, la mayor altura en el mapa y la menor elevación corresponden a los datos por los respectivos valores de control”.

Normas de Construcción de los Mapas Estructurales

- a.- Son mapas de curvas de nivel y siguen las normas generales del trazado de isolíneas.
- b.- Excepcionalmente, las isolíneas pueden cruzarse en el caso de pliegues volcados y fallas inversas. Por lo regular no se muestran las curvas de nivel sobre el horizonte clave en el bloque deprimido de la falla inversa o en el flanco inferior del pliegue volcado, salvo que se indiquen con línea interrumpida. Una curva finaliza solamente en una falla, línea de costa o discordancia.
- c.- Curvas muy juntas representan un buzamiento pronunciado. Curvas separadas indican un buzamiento suave.
- d.- Excepcionalmente, las isolíneas pueden converger en una sola curva donde se representa un buzamiento vertical o donde una falla hace desplazar las isolíneas a lo largo del rumbo.
- e.- Líneas del mismo valor deben ser repetidas para expresar una inversión del buzamiento.
- f.- Pequeñas depresiones cerradas se indican a veces con cortos trazos perpendiculares dirigidos hacia el fondo (“Hachures”).
- g.- La geología regional proporciona indicaciones del tipo de estructuras que puede encontrarse en el área de estudio.
- h.- Cuando los mapas estructurales están destinados al desarrollo exploratorio o al cálculo de reservas, se considera conveniente evitar en la construcción un optimismo excesivo en cuanto a número, área o cierre de domos a anticlinales.
- i.- Es conveniente mantener constante el buzamiento (es decir, el espaciado entre curvas) y mostrar gradualmente las variaciones del rumbo, a menos que las cotas obliguen a cambios marcados de rumbo o buzamiento. Las áreas donde se presentan rumbos o buzamientos anómalos deben ser cuidadosamente estudiadas en busca de posibles fallas
- j.- En los mapas estructurales, una falla normal suele originar una zona donde el horizonte-clave se encuentra ausente. Esta zona es mayor cuanto es menor el buzamiento de la falla. La zona vacía puede ser determinada en los mapas estructurales cuando se tiene suficiente control para fijar la posición del marcador en cada bloque y por lo menos tres pozos han penetrado el plano de falla.
- k.- En los sinclinales cuyo eje no es horizontal las curvas entran subiendo por un flanco, cruzan el eje y regresan bajando por el flanco opuesto, formando una “V” con su extremo abierto hacia la caída del pliegue. En los anticlinales la “V” apunta hacia la caída del pliegue.
- l.- A medida que se consigue información adicional del pozo o de estudios geofísicos, las curvas de nivel estructurales se modifican de acuerdo a los nuevos datos. Por esta razón, los mapas

estructurales del subsuelo se trazan a lápiz para que puedan ser ajustados cada vez que se obtiene información nueva.

m.- La exactitud relativa de las curvas estructurales puede ser indicada mediante línea sólida, línea interrumpida larga, línea corta o interrogaciones.

El Mapa Isópaco

Un mapa isópaco es la representación cartográfica de las variaciones en espesor de cuerpos o entidades en el subsuelo. Su construcción es similar en cuanto al método, a la del mapa estructural. El ejemplo más común es el mapa de unidades estratigráficas, como se ve en el ejemplo de la Figura 28, un conjunto de pozos ha encontrado diversos valores de espesor de la unidad "A" en el área de perforación. El mapa isópaco es la interpretación geológica de la forma como se distribuyen los espesores, obtenida mediante interpolación de los datos de pozos.

El tipo de mapa isópaco más utilizado en la industria petrolera, es el de valores de arena neta petrolífera (ANP).

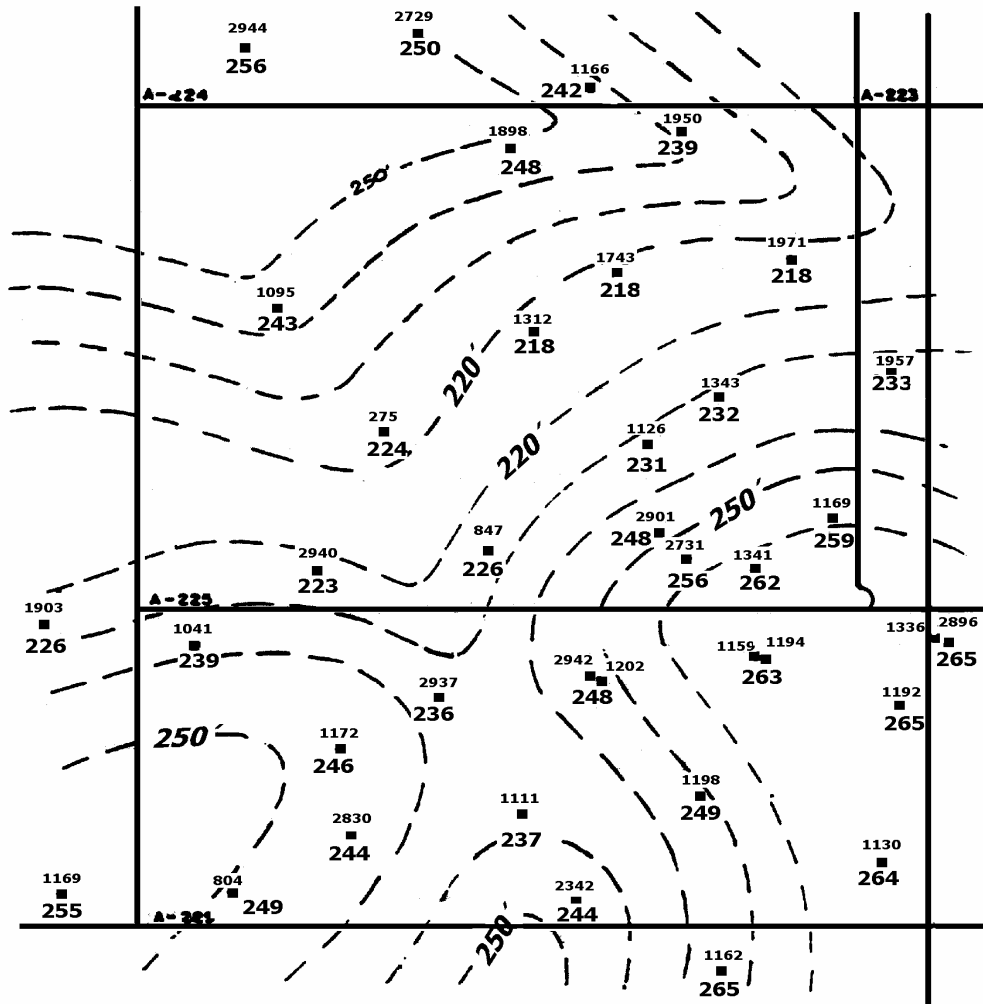


Figura 28: Mapa isópaco de un área (ver Figura 23) a partir de datos de pozos.

SECCIONES GEOLOGICAS

Una forma de presentar información geológica útil, es mediante el uso de secciones transversales. Estas pueden ser estratigráficas o estructurales, de acuerdo al tipo de detalle que se requiera.

Secciones Estratigráficas

El objetivo de hacer secciones estratigráficas, es determinar las relaciones laterales y verticales entre las unidades geológicas atravesadas por diferentes pozos.

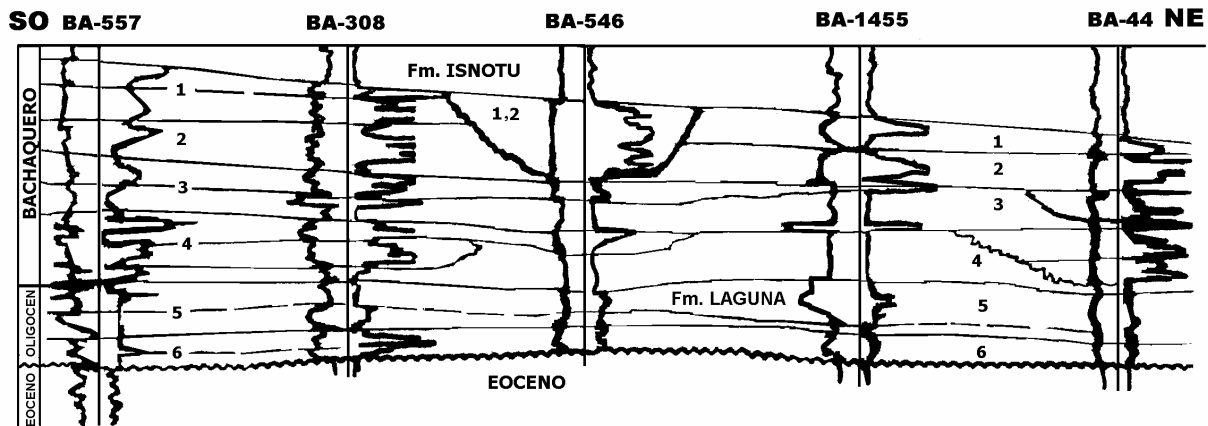


Figura 29: Sección Estratigráfica Generalizada SO-NE

Véase como ejemplo la sección de la Figura 29 donde aparecen identificadas un conjunto de unidades en secuencia vertical desde 1 hasta 6, todas continuas a lo largo del corte transversal. La serie completa tiende a afinarse hacia el NE, pero fundamentalmente por adelgazamiento de las unidades 1, 2 y 3, las otras mantienen su espesor. En el pozo BA-546 no hay una clara diferenciación entre las unidades 1, 2 y 3, consecuencia de haber sido ambas erosionadas y haberse sedimentado posteriormente un cuerpo arenoso identificado como 1,2. Este, es estratigráficamente un equivalente lateral de 1 y de 2, pero cronológicamente corresponde a un evento más reciente.

En las unidades 3, 4, 5 y 6 se dan cambios laterales (adelgazamientos, engrosamientos), que influenciarán el comportamiento de los fluidos emplazados en las rocas, estos cambios se identifican en la sección.

Una información importante obtenida de un buen reticulado de secciones estratigráficas (Figura 30), es la determinación de relaciones verticales entre las distintas unidades potencialmente productoras para predecir la movilidad de los fluidos. El análisis de casos específicos mediante el uso de diferentes secciones, como el mostrado antes en la Figura 1 del pozo BA-546 en donde entre las unidades 1 y 2 no hay separación vertical, permite determinar las áreas de circulación de fluidos entre secuencias de rocas y realizar los respectivos mapas de comunicación de una unidad, con la que está por encima y/o con la que está por debajo.

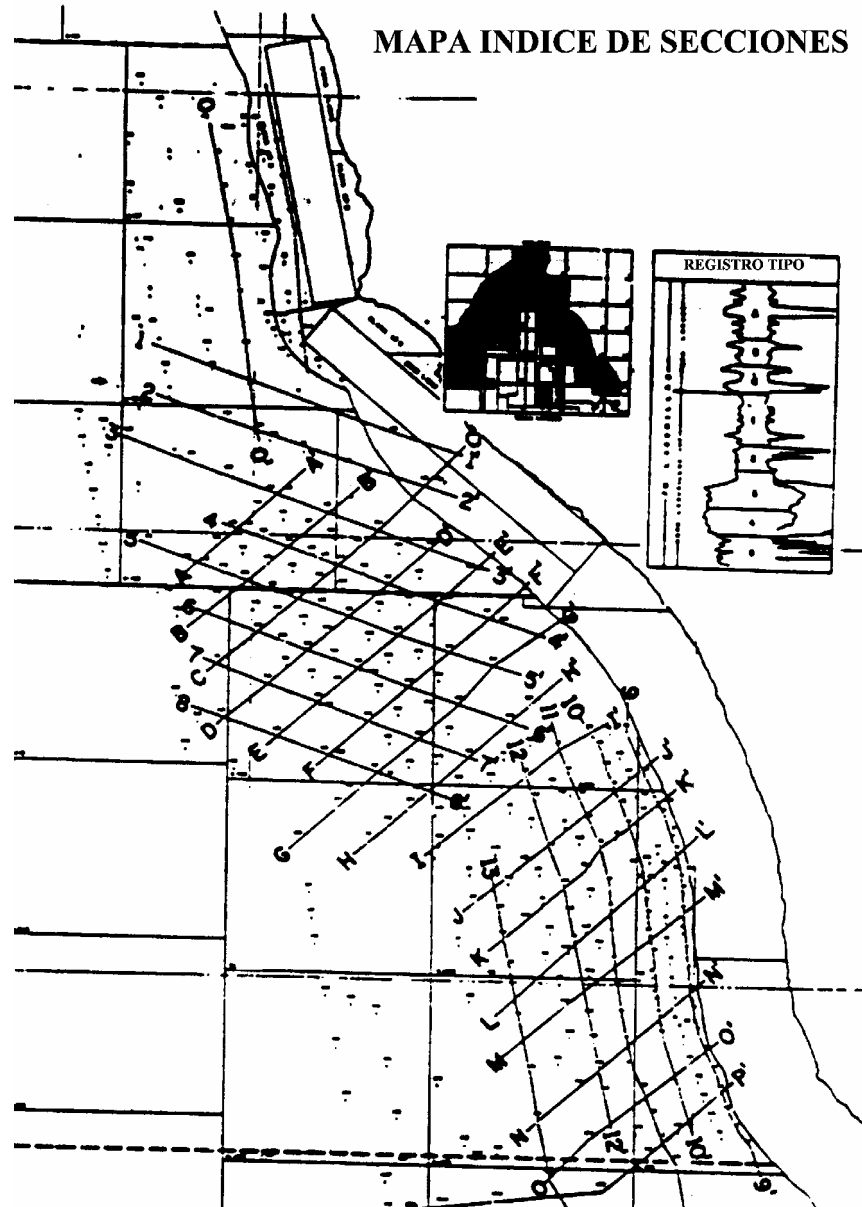


Figura 30: Mapa índice de secciones representando el mallado seleccionado para el estudio.

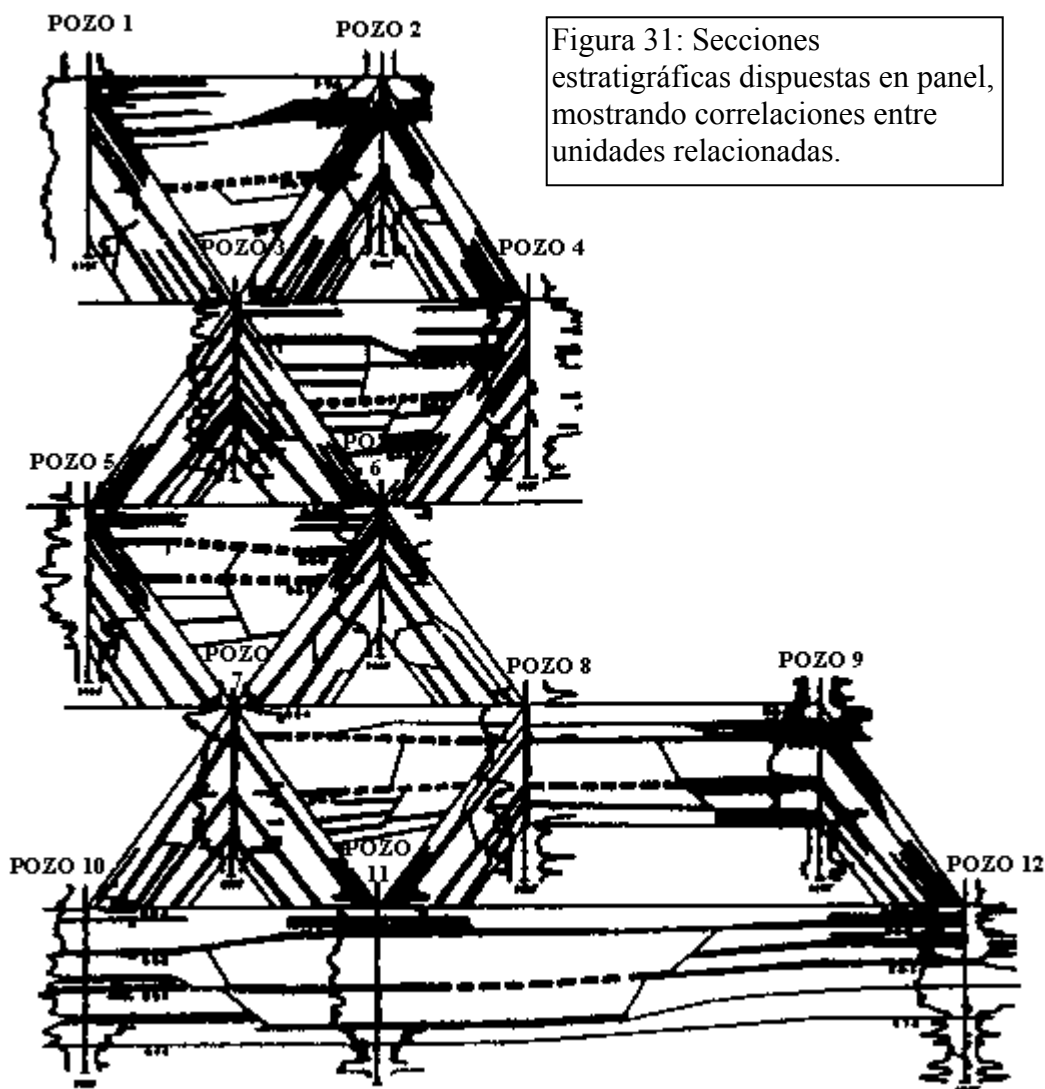
Construcción de Secciones Estratigráficas a partir de Registros de Pozos

Para el diseño de una malla de secciones adecuada durante un estudio geológico y a falta de mayor información, debe partirse de una premisa básica: “La geología local es, en términos generales, un reflejo del marco geológico regional”. De allí que es conveniente estimar que en el área de estudio, los factores regionales de sedimentación ejercerán un alto grado de control sobre los eventos locales.

Uno de esos factores de control, es la dirección de sedimentación. Se puede esperar que las secciones seleccionadas en esa misma dirección, muestren evidencias de una mayor continuidad lateral entre los eventos sedimentarios.

En la dirección perpendicular a la sedimentación, se puede esperar una buena visualización transversal de los cuerpos sedimentarios. No necesariamente debe restringirse a estas direcciones (perpendicular o paralela al vector principal de sedimentación), el diseño de los cortes geológicos que comprendan el retículo de la malla de secciones.

En la Figura 31, una malla de secciones no perpendicular, permite una visualización adecuada de la continuidad lateral de los cuerpos arenosos.



En las áreas de explotación petrolera, innumerables secciones estratigráficas tienen objetivos operacionales específicos, para la toma de decisiones respecto a regiones pequeñas o localizaciones determinadas. Con ellas se puede obtener información acerca de:

1. Factores geológicos incidentes en un problema de producción.
2. Localizaciones con riesgo geológico.
3. Ubicaciones más favorables.
4. Límites de yacimientos.
5. Áreas de baja permeabilidad.

En conclusión, serán los objetivos planteados, los que determinarán la mejor distribución de las secciones estratigráficas. Una vez bien definidos los pozos integrantes de una sección, se procede a:

1. Obtener las copias de los registros de pozos a una única escala.
2. Por correlación pozo a pozo, determinar marcadores claves presentes en todos los pozos, escogiendo el más relevante o consistente como “Datum” o “Marcador”, con la finalidad de usarlo como referencia para “colgar” la sección. Generalmente, el Datum consiste de alguna unidad geológica seleccionada sobre la base de alguna señal o conjunto de señales suficientemente específicas y distintivas con facilidad en todos los perfiles de pozos.
3. Montar la sección alineando el Datum o Marcador en cada pozo a misma altura para todos ellos y en la misma secuencia de su ubicación en el mapa. De ser posible, seleccionar preferiblemente equiespaciados a los distintos pozos.
4. Una vez montada la sección, se dibujan líneas uniendo los marcadores claves entre los diferentes pozos, procediéndose a realizar una correlación más detallada, si el caso lo amerita. En la Figura 32 se muestra un mapa índice de dos secciones estratigráficas realizadas en el campo Alturitas (los puntos con números son pozos); las Figuras 33 y 34 incluyen, respectivamente, las secciones A-A' y B-B', con el Marcador o Datum seleccionado en la Formación Cuiba, con el fin de correlacionar lateralmente las unidades geológicas que conforman el Grupo El Fausto.

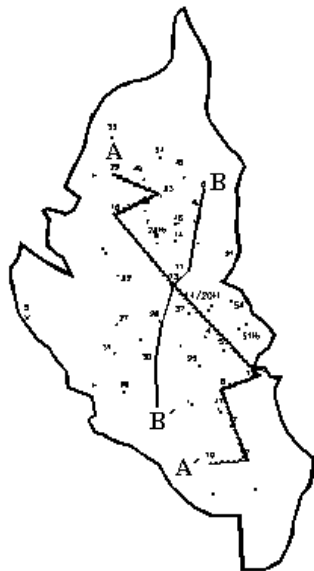
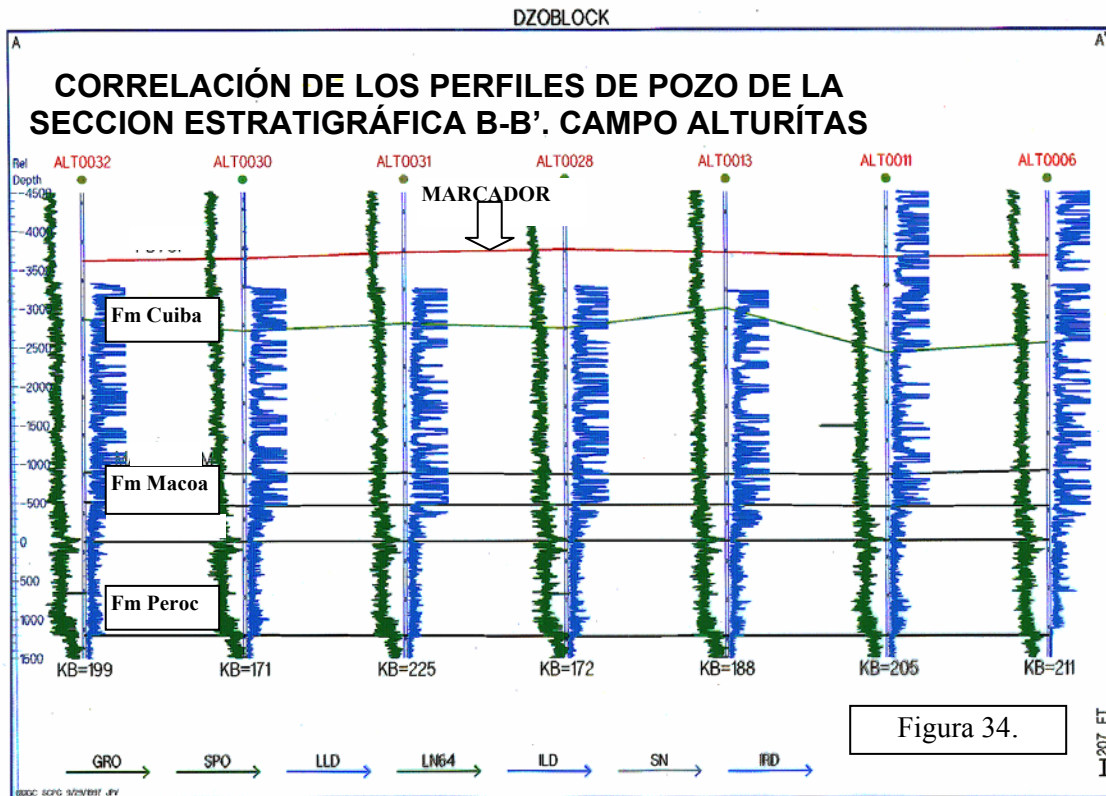
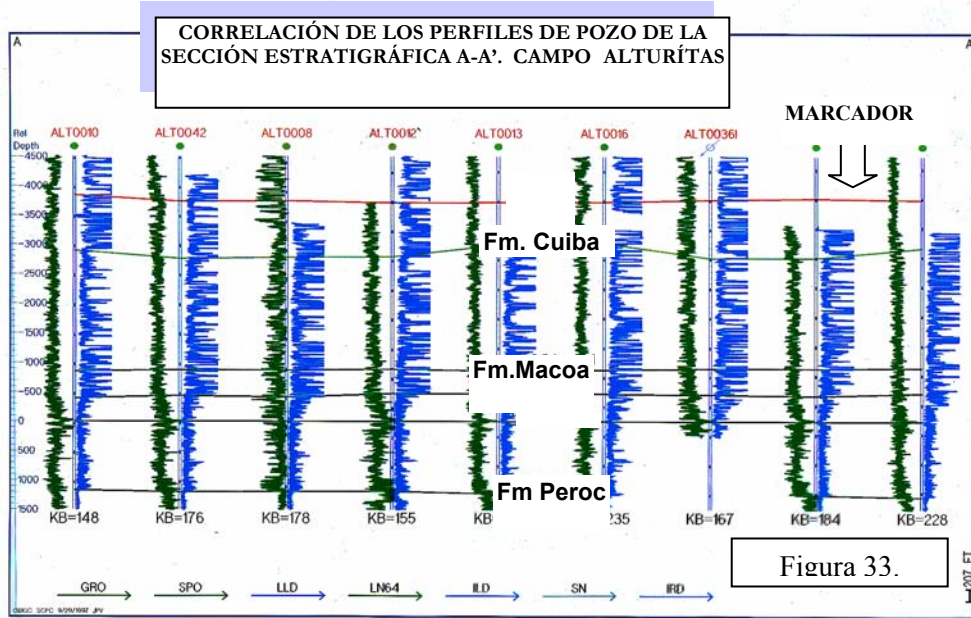


Figura 32. Mapa índice de secciones A-A' y B-B' en el campo Alturitas.



Otra utilidad muy importante que se logra de una malla apropiada de secciones estratigráficas, como la indicada en la Figura 30, es la construcción de un mapa de facies para un intervalo o unidad seleccionada, la cual generalmente consiste de una arenisca productora de petróleo. Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, se establecen correlaciones laterales para el intervalo de interés. A continuación, se hace uso de los patrones característicos de los perfiles de rayos gamma que han sido publicados para distintas secciones dentro de un ambiente sedimentario, en términos de combinaciones específicas de estructuras sedimentarias o asociaciones litológicas (la Figura 35 muestra un ejemplo en secuencias deltáicas).

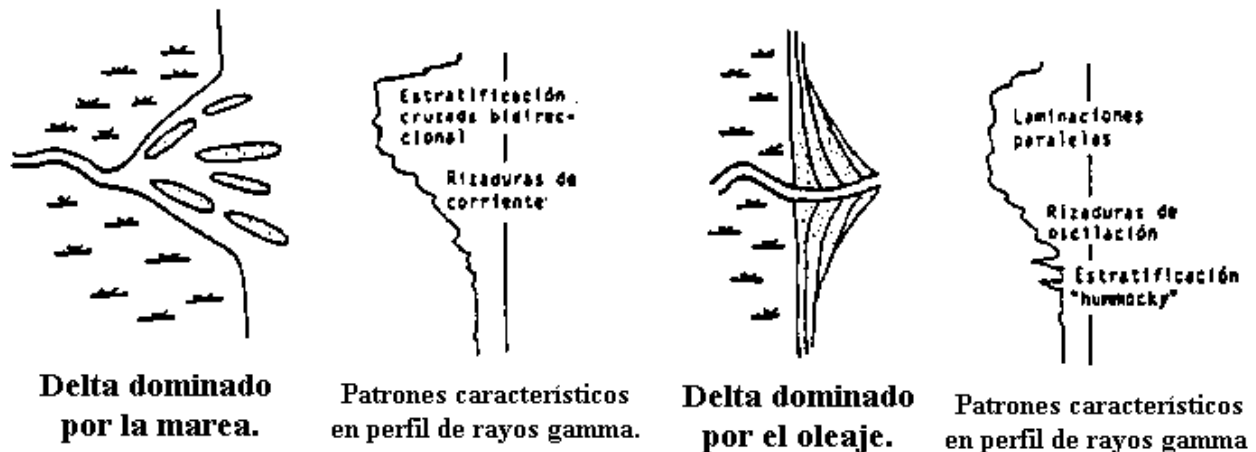


Figura 35: Patrones característicos en perfiles de rayos gamma para secuencias deltáicas seleccionadas.

Correlacionando toda esta información, se pueden construir mapas de arenisca neta petrolífera indicando las diferentes facies. La Figura 36 muestra un ejemplo. Esta información puede ser útil en el establecimiento de áreas donde se predice una mayor continuidad lateral del yacimiento petrolífero en términos de sus características petrofísicas

Alcanzado este punto, es bueno destacar que por tratarse de un curso básico, no se está considerando en lo atinente a la morfología de los yacimientos, el apoyo que en las tareas mecánicas representa el uso de programas de computación especializados en graficación. En todo caso, el dominio de tales aplicaciones sólo es posible con un buen conocimiento de los fundamentos teóricos asociados al fin que se persigue.

Secciones Estructurales

La sección estructural muestra la variación en alturas o profundidades que presentan los horizontes geológicos a lo largo de un plano vertical.

A diferencia de la sedimentación, la estructura es un aspecto geológico de gran consistencia a lo largo de la secuencia estratigráfica. Esto quiere decir que, de modo general, se conserva un alto grado de paralelismo entre los planos estratigráficos asociados con la estructura. Una excepción estaría dada por la presencia de una discordancia mayor, si esta es de carácter angular. Los estratos por encima de la discordancia, sólo mostrarán los efectos estructurales post-erosión, mientras la estructura en los estratos inferiores será el resultado de la suma de tales eventos con los que les hayan afectado antes del proceso erosivo.

Una sección estructural muestra las variaciones en posición relativa de elementos en un plano vertical (Figura 38). En Geología Petrolera, estos elementos están en el subsuelo, de allí que se habla de posiciones relativas en cuanto a la profundidad. Es de interés, por ejemplo, la variación de profundidades de una capa o estrato geológico determinado.

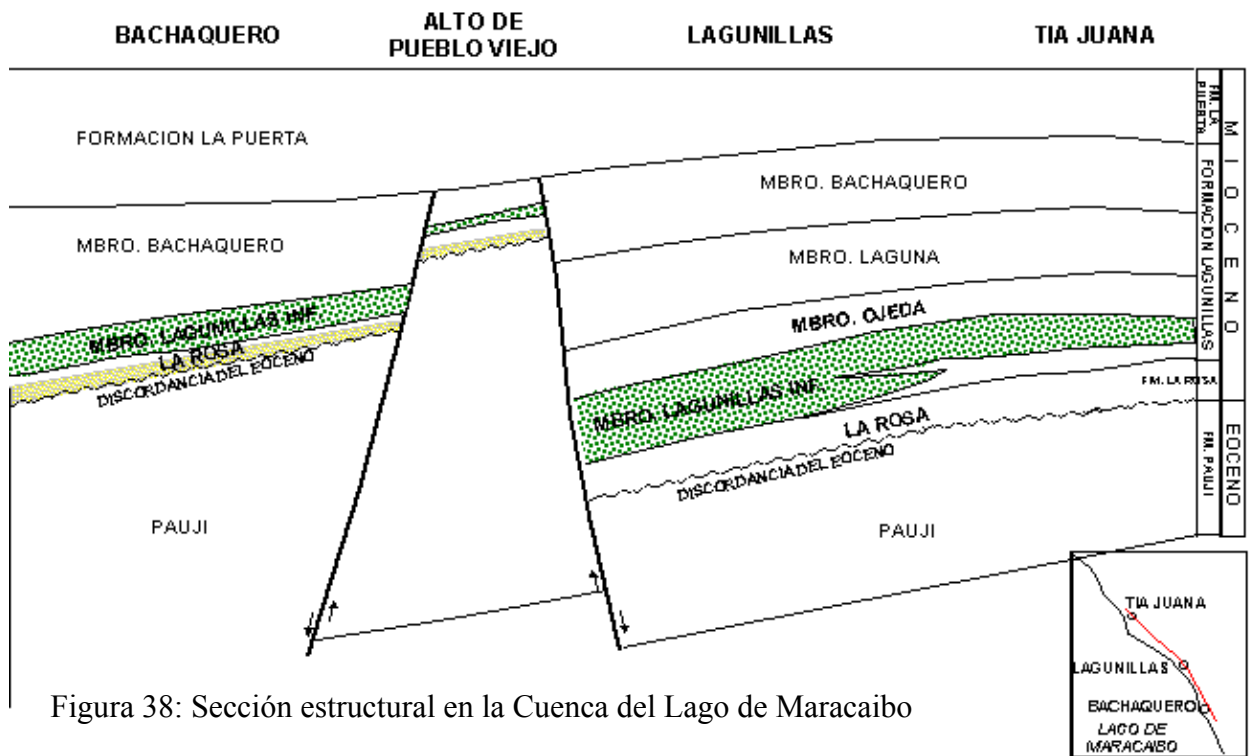


Figura 38: Sección estructural en la Cuenca del Lago de Maracaibo

Como “Datum” de referencia clásico, se toma el del mar, al cual se le asigna profundidad “0” y a ese nivel se deberá referir todas las mediciones. Debe considerarse que los valores de profundidad medidos en los registros son la suma de la profundidad de perforación más el valor de la mesa rotatoria. De allí que para construir una sección estructural con registros de pozos, deben normalizarse las profundidades medidas respecto al nivel del mar, restando la altura topográfica y la mesa rotatoria.

Una vez normalizado, cualquier nivel de profundidad cercano a la ocurrencia de las capas de interés puede ser usado como “Datum” o “Marcador” referencial, cuya utilización permitirá “colgar” los pozos a la misma altura. Hecho esto, sólo queda unir los topes continuos en la sección e interpretar la ocurrencia de factores estructurales como fallas y pliegues. Una vez que este trabajo ha sido completado, se obtiene de la sección estructural, una visión de la estructura geológica del horizonte estudiado en la dirección deseada, pudiéndose añadir a ésta, la información de carácter sedimentario-estratigráfica obtenida previamente de la sección stratigráfica.

Correlacionando toda esta información, se pueden construir mapas estructurales indicando los diferentes rasgos geomorfológicos que afectan el intervalo seleccionado como referencia para

construir el mapa. Generalmente, tal nivel estratigráfico corresponde al tope de la unidad productora de petróleo en un campo determinado. La Figura 39 muestra un ejemplo.

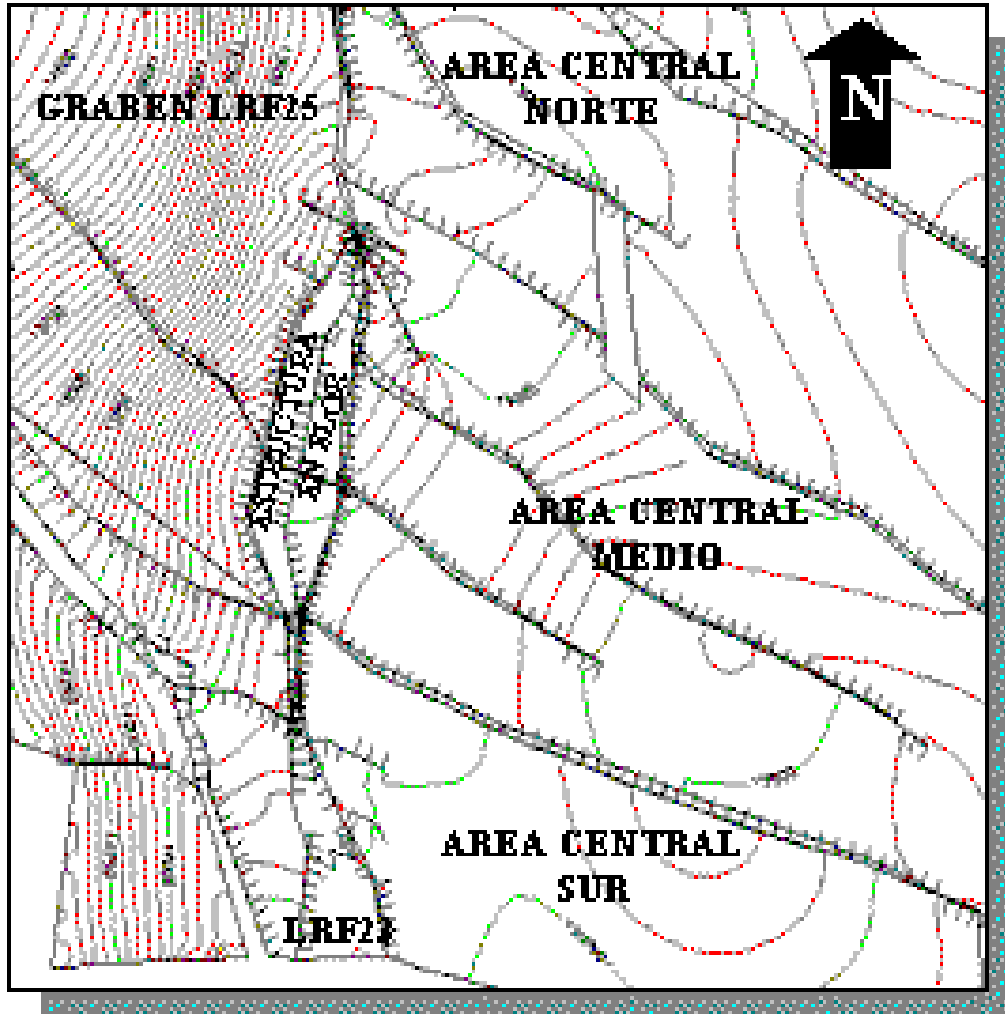


Figura 39: Mapa estructural. Se incluyen una serie de trazados segmentados, que corresponden a fallas, así como trazos continuos que son curvas de isoprofundidad. Se resaltan dos rasgos geomorfológicos principales; un graben y una estructura en flor (estructura tipo anticlinoide flanqueada por dos fallas inversas de alto ángulo, producto de un evento compresivo).