

Proyección de estructuras planas en un mapa: un problema frecuente Projecting planar structures on a map: a frequent problem

J. C. Escamilla-Casas ^{a,*}, L. E. Ortiz Hernández ^a, O. Mondragón-Mondragón ^b

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Servicio Geológico Mexicano, Gerencia Regional Occidente, 80060, Culiacán, Sinaloa, México.

Resumen

El objetivo principal de un mapa geológico es mostrar gráficamente la representación realista de la distribución espacial de unidades de roca y estructuras del área de estudio, e integrarlas en una secuencia cronológica de eventos. Los mapas son la piedra angular de estudios geológicos de diversa índole y temática. En este trabajo se plantea el trazo del contorno de estructuras planas proyectadas en un mapa, como un problema común que enfrentan los geólogos de campo y que, potencialmente, infringe un considerable grado de incertidumbre en el producto final. Las soluciones que aquí se presentan tienen como base la geometría descriptiva y euclidiana y utilizan ejemplos de estructuras en el oriente de la Sierra de Pachuca. Adicionalmente, se enfatiza que el dibujo manual de los contornos es una etapa crítica en la construcción del mapa, independiente de los medios digitales con los que se generará la versión final y que la comprobación subsecuente y sucesiva en el campo, es fundamental.

Palabras Clave: Mapa Geológico, Proyecciones, Métodos Geométricos, Sierra de Pachuca.

Abstract

The main objective of a geologic map is to show a realistic graphic representation of the spatial distribution of rock-units and structures occurring in the study area, for further integration in a chronologic sequence of events. Maps are the capstone of geologic studies of diverse nature and goals. In this work, the trace of contours of plane structures projected on a map is posed as a problem commonly faced by field geologists and that it may imprint a high degree of uncertainties on the final product. Solutions discussed here are based on Euclidian and descriptive geometry and structures from the eastern sector of the Sierra de Pachuca were used as working examples. Additionally, it is emphasized that hand-drafting of the contours on the sketch map is a critical stage of geological mapping, independently of the digital means used to generate the map in its final version, and that is fundamentally required to submit the map to a successive “ground-truth” process.

Keywords: Geologic Map, Projections, Geometrical Methods, Sierra de Pachuca.

1. Introducción

La cartografía geológica se basa, primordialmente, en la compilación de observaciones hechas en afloramientos de roca y registradas en una base topográfica (Ragan, 1973; Ragan, 2009; Spencer, 2018; Potts, 2022). Por otra parte, la elaboración de un mapa geológico implica un proceso científico altamente interpretativo, el cual resulta en un producto fundamental con una amplia variedad de usos, e.g., exploración por yacimientos minerales, impacto ambiental, preservación del ambiente, urbanismo, entre otras.

En un mapa geológico, el diseño de las trazas de los contactos litológicos y de estructuras planas se genera por la intersección de los contornos estructurales con las curvas de

nivel (Ragan, 1973; Rowland *et al.*, 2007; Borradaile, 2014). Por ende, el diseño de tales trazas depende de la actitud geológica (rumbo y echado) de las estructuras a representar y de la topografía del terreno (pendiente del terreno). Por otro lado, también se asume que las estructuras geológicas planas conservan una actitud constante, al menos a lo largo de distancias cortas (Figura 1).

En la actualidad, los avances tecnológicos en materia de cartografía geológica son notables y están en constante evolución (e.g. Allmendinger, 2020; Whitmeyer *et al.*, 2020; Harknett *et al.*, 2022; Juárez-Montiel *et al.*, 2022). Sin embargo, los principios fundamentales de dicha disciplina son frecuentemente omitidos, resultando en errores significativos que se plasman en el mapa, eso sin considerar la comprobación

*Autor para la correspondencia: jocesca@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: jocesca@uaeh.edu.mx (José Cruz Escamilla Casas), leoh@uaeh.edu.mx (Luis Enrique Ortiz Hernández), omondragon1995@outlook.com (Osvaldo Mondragón-Mondragón).

y actualización de datos de contactos y estructuras a partir de observaciones directas en el campo.

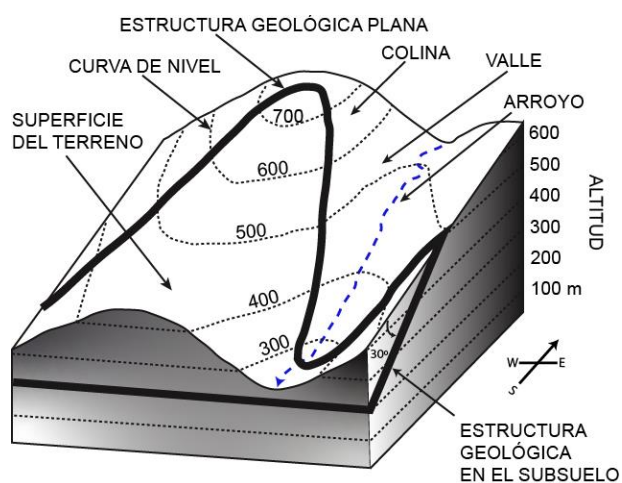


Figura 1: Diagrama esquemático mostrando el contorno que se genera por una estructura geológica plana con actitud constante (090/30), al intersectarse sobre la superficie hipotética del terreno.

En este trabajo se hace una revisión de los fundamentos de la cartografía de estructuras geológicas planares, utilizando ejemplos en un terreno con topografía agreste y escasa vegetación. Estas características permiten comprobar, en superficie, la exactitud de los contornos proyectados en el mapa, mismos que fueron generados mediante la aplicación de los métodos y sus variantes que aquí se describen.

1.1. Elementos Fundamentales del Mapa Geológico

En el mapa base, se registra la forma de la superficie del terreno y se define por una serie de líneas denominadas curvas de nivel, las cuales representan valores de elevación constante en todos sus puntos y referidas al nivel del mar (Bolton, 1993; Bennison et al., 2003). En otro orden de ideas, una curva de nivel es la intersección de un plano horizontal imaginario y de altitud determinada, con la superficie del terreno a representar. Por conveniencia cartográfica, las curvas de nivel están espaciadas a intervalos fijos, siendo esto la equidistancia entre curvas de nivel declarada en los mapas (Gass et al., 1972; Powell 1992).

Por otra parte, el contorno estructural es una línea de elevación constante proyectada sobre una superficie plana inclinada paralela a la estructura geológica (Lisle, 2003). Los contornos estructurales también pueden ser proyectados en superficies plano-curvadas, en las que aparecen como líneas curvas tangentes a la línea de rumbo. Tales contornos representan estructuras geológicas tales como estratos, fallas, diques, contactos, etc. (Powell, 1992, Ragan 2009).

Desde otra perspectiva, la proyección de una estructura en el mapa geológico se genera por la intersección entre el contorno estructural y la topografía. Tal proyección puede tener dos miembros extremos: uno, si la actitud geológica de la estructura carece de inclinación (echado = 0°) la proyección en el mapa será una línea paralela a las curvas de nivel y dos, si la actitud geológica de la estructura implica una inclinación máxima (echado = 90°), la proyección en el mapa será una línea recta (Schöpfer, 2008; Figura 2).

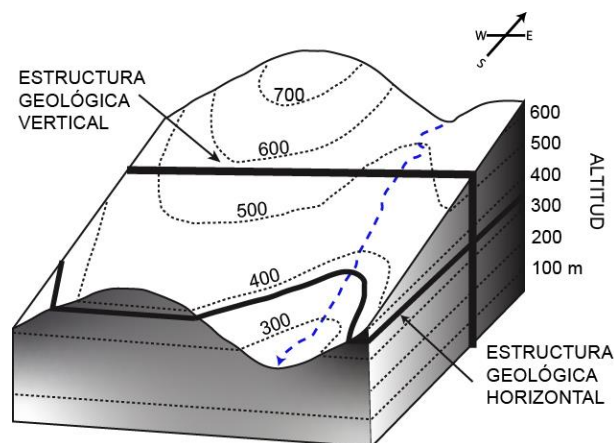


Figura 2: Diagrama esquemático mostrando el contorno de dos estructuras geológicas planas, una vertical y otra horizontal, proyectadas sobre la superficie hipotética del terreno.

No obstante, la construcción de la proyección de estructuras inclinadas en ángulos intermedios entre la vertical o la horizontal ($0^\circ < \text{echado} < 90^\circ$) en el mapa geológico, requiere de cierta habilidad cartográfica y experiencia en el campo (Coe, 2010; Potts, 2022). Por ejemplo, el diseño de los contornos que se infieren a partir de la regla de las “V” (Rowland et al., 2007).

1.2. Generalidades del Área de Estudio

Los ejemplos de estructuras cartografiadas que se plantean en este trabajo se llevaron a cabo en la porción noreste de la colonia Pachuquilla, Mineral de la Reforma, Hidalgo (Figura 3). La cobertura del mapa es de 8.3 km² y presenta elevaciones hasta de 2680 msnm, conformando una topografía con pendientes que alcanzan los 77.5°.

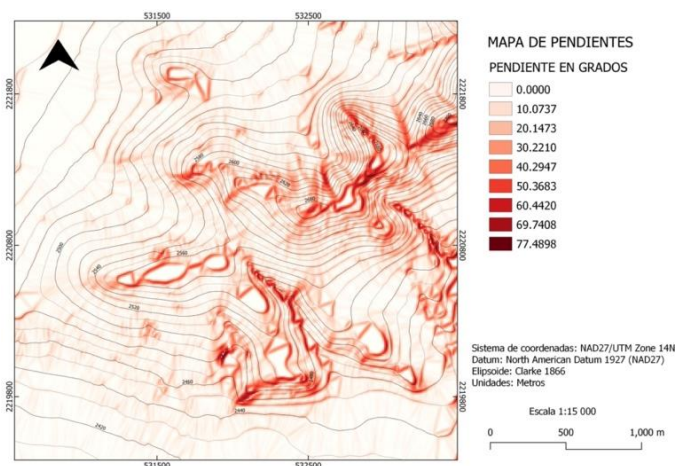


Figura 3: Mapa mostrando la extensión del área de estudio, las curvas de nivel y las pendientes de las laderas en grados.

En el lecho rocoso del área estudiada, predominan coladas lávicas y tobas de composición riolítica, del Terciario. Hacia el noreste aflora un cuerpo intrusivo de pórfido cuarcítico gris claro y ocasionalmente blanco. Este cuerpo se caracteriza por la abundancia de cristales subhedrales y anhedrales de cuarzo embebidos en una matriz hipohialina a hipocristalina de cuarzo y feldespato. En contacto con el margen norte del intrusivo,

aflora una brecha volcánica de fragmentos del pórfido cuarcítico embebidos en una matriz riolítica abundantemente oxidada (Escamilla-Casas et al., 2019). A su vez, estas rocas se encuentran cubiertas, en discordancia angular, por depósitos irregulares de tefra y aluvión (Escamilla-Casas et al., 2022). Estas rocas fueron afectadas por deformación frágil, destacando los planos de falla con estrías, en ocasiones sobrepuestas por reactivación, y brechas cataclásticas. Los planos de las fallas presentan actitudes estructurales variadas, desde subverticales a subhorizontales y que, muy probablemente, conforman diferentes episodios de deformación (Figura 4 y 5).

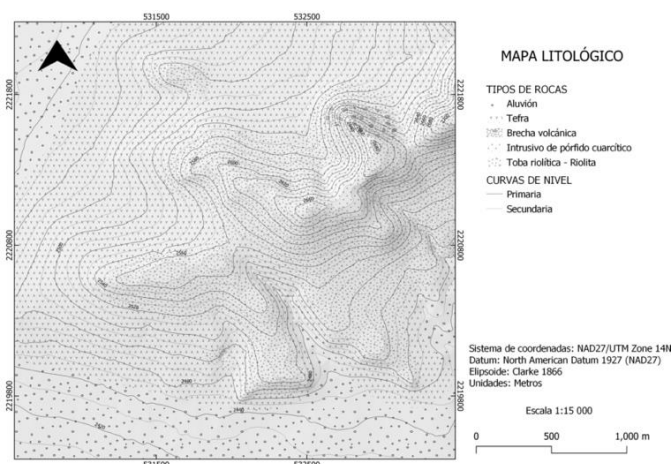


Figura 4: Mapa geológico simplificado, mostrando la distribución de los diferentes tipos de litología en el área de estudio.

Debido al gran número de fallas identificadas en el área estudiada, la cartografía a detalle se dificulta, dado que, en muchos casos, las fallas presentan marcado paralelismo y corta separación. Consecuentemente, independientemente de la poca extensión del área cartografiada, la complejidad estructural es notable y se refleja en que la realización de la cartografía requiere de habilidades y aplicación de técnicas diversas con fines de comprobación.

2. Proyección de Estructuras en el Mapa

Un problema que frecuentemente surge durante la elaboración del mapa geológico es la proyección de estructuras geológicas planas sobre una base topográfica. Para mostrar las soluciones a este problema, se utilizaron ejemplos de planos de fallas para ilustrar los métodos de proyección y sus variantes. En consecuencia, se han seleccionado tres planos de falla (Figura 5 y Tabla 1). La determinación de la cinemática de las estructuras sigue la identificación de estructuras menores descritas y clasificadas por Petit (1998) y su descripción detallada queda fuera del alcance de este artículo.

Tabla 1: Datos Estructurales (rumbo y echado), expresados en grados (°)

Falla	Rumbo	Echado	Tipo
1	158	63	Lateral
2	075	10	Inversa
3	331	36	Normal

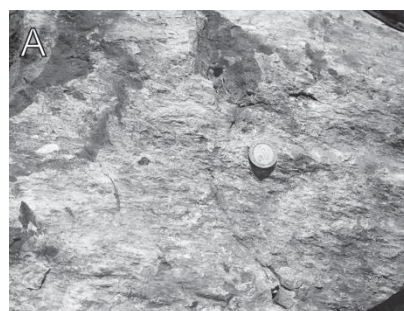


Figura 5: Estructuras observadas en campo que están asociadas con fallas (estructuras planas). A) plano de falla lateral (158/63), B) plano de falla inversa (subhorizontal, 075/10) y C) brecha y plano de falla normal (331/36), correspondientes a las fallas 1, 2 y 3 de la Tabla 1.

2.1. Método Gráfico

Este método también es conocido como de las horizontales y se basa en los principios de la geometría descriptiva y en la construcción de contornos estructurales. Para aplicar este método se requiere una base topográfica, los datos de localización de estaciones geo referidas (altitud, longitud y latitud), y los datos de la estructura geológica plana a representar en el mapa (rumbo y echado). Para ilustrar la aplicación del método, se utilizaron los datos de campo (158/63) de la falla 1, localizada en el punto “A” del mapa (Figura 5, 6 (A y B) y Tabla 1):

- En el punto “A” (Figura 6 A) se traza una línea paralela al rumbo de la estructura (línea a-a’). A lo largo de esta, se construye una gradación representando los valores de altitud por encima y por debajo de la altitud de la estación del afloramiento. Esta construcción respeta la escala del mapa.
- A lo largo de la línea a-a’, se trazan líneas perpendiculares y paralelas entre sí y que representan a cada curva de nivel con su respectiva altitud.
- A lo largo de la escala, en el punto que corresponde a la altura de la estación, se dibuja una línea que forme un ángulo con la perpendicular correspondiente y con valor igual al del echado de la estructura (63°). Es

necesario tomar en cuenta el buzamiento, es decir, la dirección del echado y dibujar el ángulo hacia donde ocurre la máxima inclinación de la estructura, línea $b-b'$, para dibujar esta línea en el sentido correcto.

- La línea trazada en el punto anterior se interseca con cada una de las líneas paralelas que representan las altitudes en la escala. A partir de esos puntos de intersección, se trazan líneas paralelas al rumbo que, a su vez, al intersectarse con las curvas de nivel en el mapa generan puntos los cuales definirán el contorno de la estructura geológica proyectada sobre la base topográfica (Figure 6B).

En caso de duda al momento de determinar en qué sentido se debe dibujar la línea que habrá de formar el ángulo igual al echado, es útil colocar la punta de un lápiz sobre el punto en el mapa donde se localiza el afloramiento e inclinarlo en la dirección del echado. La punta del lápiz indicará la dirección que se desea saber.

2.2. Método Gráfico - Analítico

Este método tiene dos variantes, las cuales se basan en los principios de la geometría descriptiva y la trigonometría euclidiana para la construcción de contornos estructurales. Al igual que el método anterior, se requiere una base topográfica, los datos de localización de estaciones y los datos de la actitud de la estructura geológica plana a representar en el mapa.

Variante 1

Para ilustrar la aplicación de la primera variante, se utilizaron los datos de campo de la falla 2 (075/10), localizada en el punto “B” del mapa (Figura 5, 7 y Tabla 1), como sigue:

- Sobre la base topográfica, se localiza el punto “B” correspondiente a la estructura en cuestión. A través de este se traza una línea paralela al rumbo de la estructura. A partir del mismo punto, se traza una perpendicular a la línea de rumbo.
- A lo largo de la perpendicular trazada, se generará una escala considerando, en el plano vertical, el triángulo que se forma por la diferencia de elevación entre curvas de nivel, el ángulo de echado de la estructura y la escala horizontal del mapa. Esto a partir de la relación geométrica expresada en la Ecuación 1. En donde X es la distancia horizontal del intervalo de la escala sobre la línea perpendicular al rumbo y que es paralela a la dirección de la máxima inclinación (113.43 m, valor calculado), h corresponde a la diferencia de elevaciones entre las curvas de nivel (20 m) y δ es el ángulo de echado de la estructura (10°).

$$X = \frac{h}{\tan \delta} \quad (1)$$

- En cada una de las divisiones de la escala generadas al calcular X (valor constante), se trazan líneas paralelas al rumbo, mismas que corresponden a cada uno de los valores de altitud. La intersección de estas líneas con las curvas de nivel sobre el mapa base, determinarán los puntos que, al unirse con una línea, conformarán el contorno de la proyección de la estructura sobre la base topográfica.

Variante 2

En el siguiente ejemplo, se ilustra la aplicación de la segunda variante del método gráfico-analítico, utilizando los datos de campo de la falla 3, localizada en el punto “C” del mapa (Figura 8 y Tabla 1). Este método fue anteriormente descrito por Compton (1985) y es muy semejante al descrito anteriormente, en tanto que se basa en la mismas relaciones geométricas y trigonométricas. La diferencia entre ambas variantes reside en que en esta se dibuja una serie de líneas perpendiculares al rumbo y cuya longitud corresponde al valor de X de la Ecuación 1. Aplicando esta variante se pueden calcular los puntos del contorno de la estructura a proyectar en valores de altura que no necesariamente corresponden a los de las curvas de nivel, es decir, en valores intermedios entre las curvas. Por otro lado, se evita la posible confusión que se genera al trazar los puntos de la línea de contorno por arriba o por debajo de la elevación correspondiente a la estación en donde aflora la estructura a cartografiar. La desventaja que presenta el método radica en que se debe calcular un valor de X para cada punto.

3. Discusión

La cartografía geológica implica un proceso enfocado en representar gráficamente la distribución de unidades de roca y estructuras geológicas, que afloran en un área de cobertura específica, y muestra los elementos indispensables para sustentar una historia geológica. Tal representación debe ser realista y debe estar sujeta a comprobación subsecuente en el campo. En este respecto, Wallace (1975) expresó: “*No existe sustituto alguno para un mapa o sección geológicas, absolutamente ninguno. Nunca lo hubo y nunca lo habrá. La geología básica tiene que estar en primer plano y si está mal, muy probablemente, la interpretación subsecuente también estará mal.*” El mapa es una herramienta fundamental para el desarrollo del conocimiento geológico y dependiendo de su escala puede mostrar mayor o menor detalle, lo cual es una característica intrínseca del propósito que se persigue en el desarrollo del estudio geológico (Barnes & Lisle, 2004; Butler et al., 2023).

Independientemente del método que se emplee para la elaboración del mapa geológico final, incluyendo los formatos digitales y geo-referidos, el proceso para elaborar un mapa geológico comprende una serie de etapas, entre las cuales la digitalización de los contactos de unidades y estructuras en un mapa preliminar es indispensable (Allmendinger, 2020). En este respecto, las soluciones simples aquí planteadas pueden ejecutarse tanto en campo como en gabinete, proporcionando la oportunidad de comprobar en el campo la exactitud de los trazos hechos en el mapa y así poder realizar los ajustes necesarios. Además, estas soluciones pueden ser utilizadas para la construcción de proyecciones de las estructuras por encima o por debajo de la altitud del afloramiento, es decir, proyectarlas en el subsuelo.

La aplicación de los métodos que aquí se plantean asegura la creación de mapas más precisos y, dependiendo de las condiciones de campo, se puede elegir o adoptar cualquiera de ellos. Adicionalmente, fortalecen la confianza del geólogo de campo, principalmente para aquellos que se encuentran en la etapa de entrenamiento.

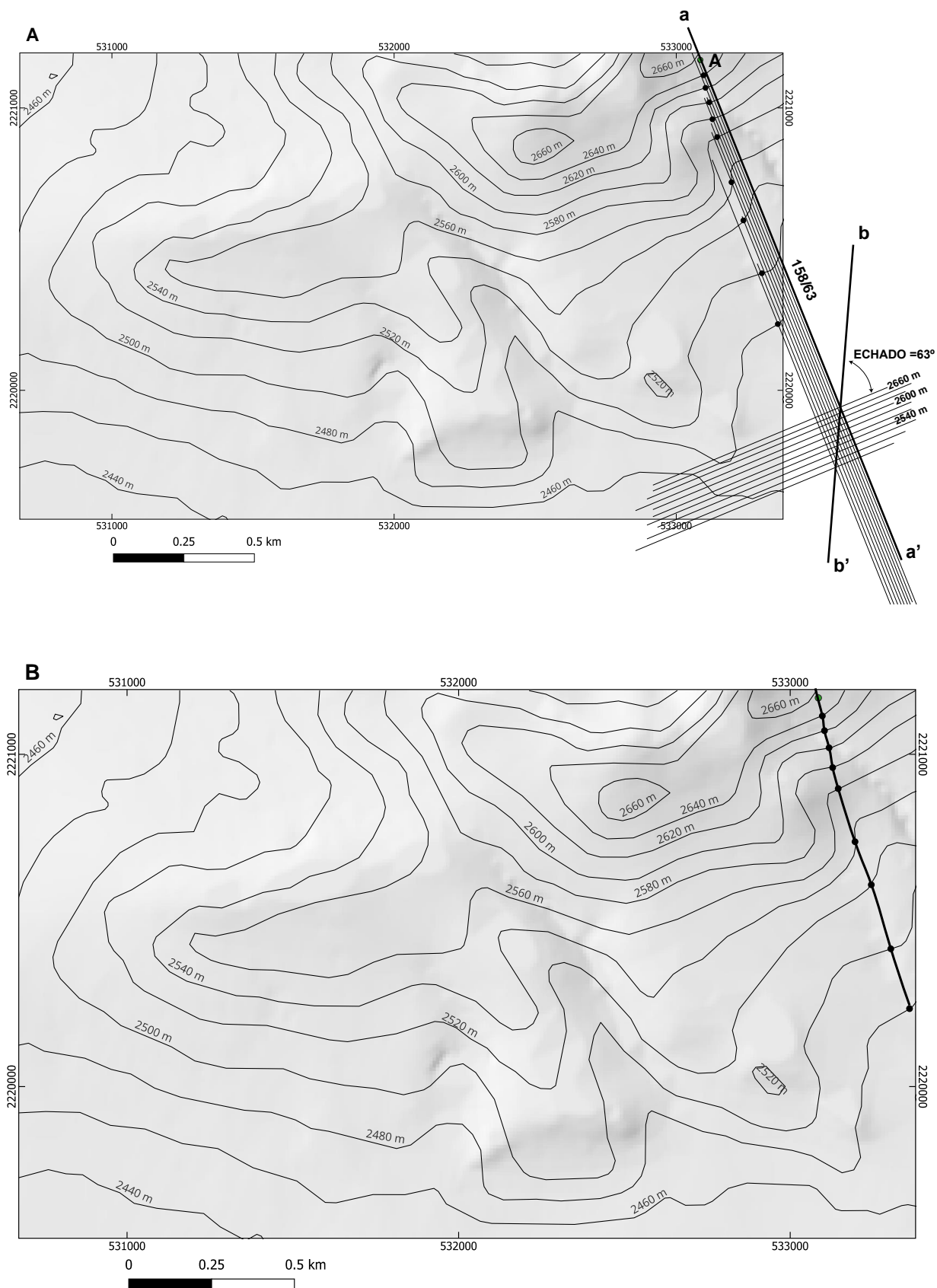


Figura 6: La imagen superior (A) muestra la ubicación de una falla lateral con actitud 158/63, en la cota 2650 m y la construcción de la proyección de la misma. El contorno resultante, al unir los puntos de intersección, se muestra en la imagen inferior (B).

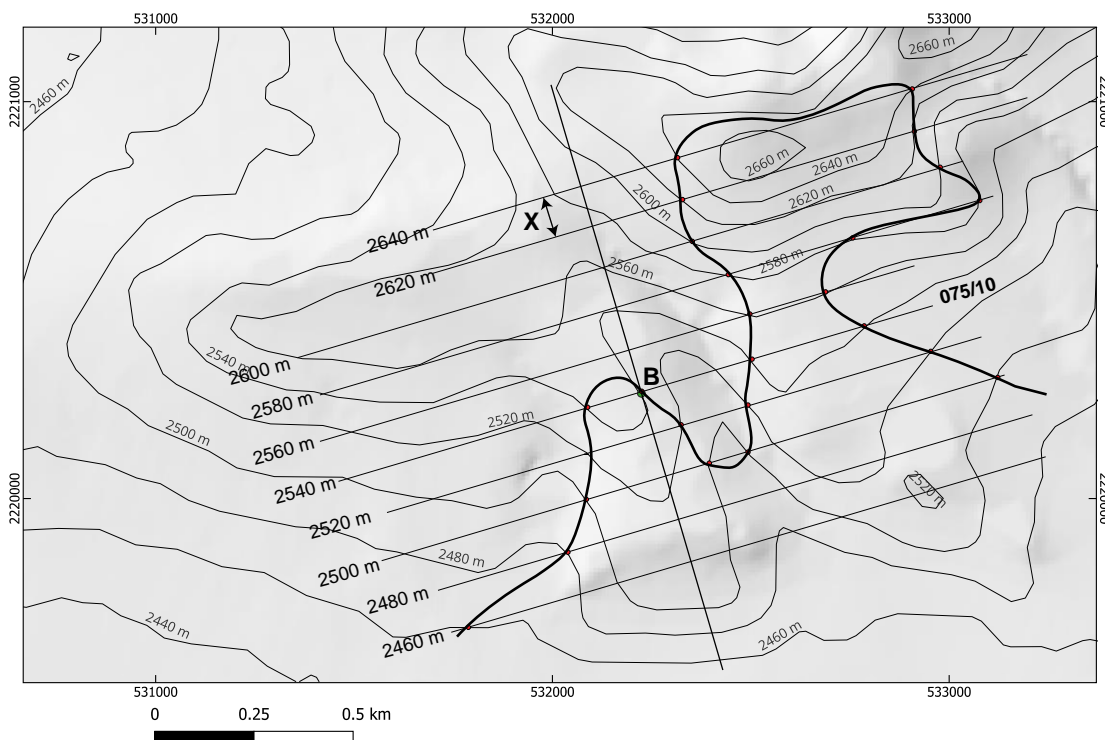


Figura 7: En el punto B se localiza una falla subhorizontal con actitud 075/10, en la cota 2540 m. X es el valor calculado a partir de la Ecuación 1. Los puntos que se generan por la intersección entre las curvas de nivel y las líneas paralelas al rumbo, definen la proyección de la falla sobre el mapa.

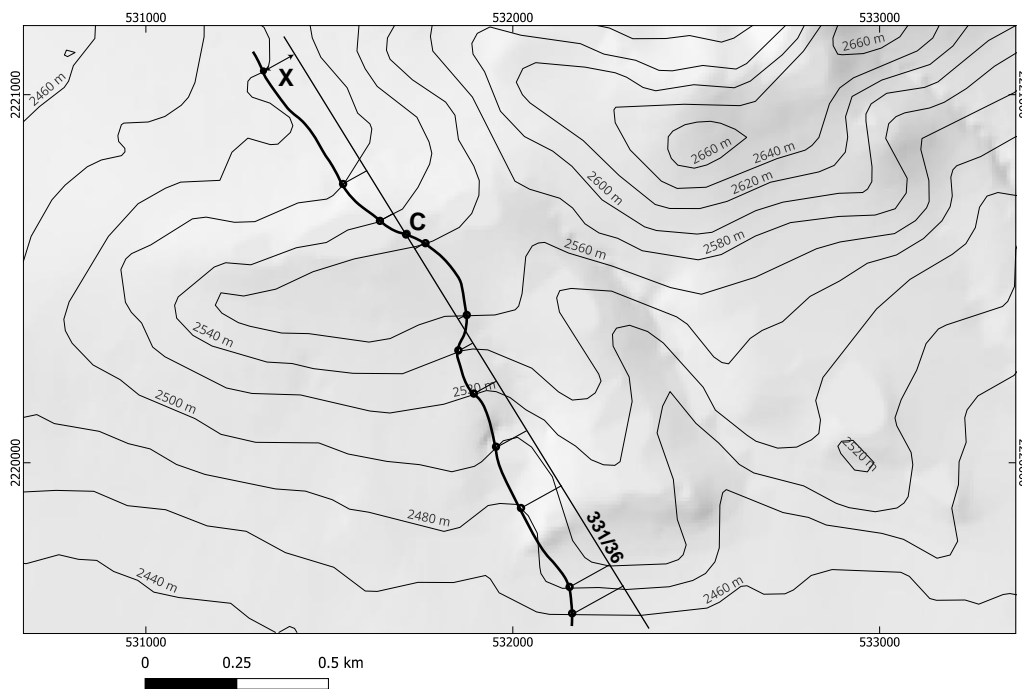


Figura 8: En el punto C se localiza una falla con actitud 331/36, en la cota 2574 m. X es la longitud correspondiente, en cada caso, de la perpendicular al rumbo calculada a partir de la Ecuación 1. Los puntos que se generan por la intersección entre las curvas de nivel y los segmentos perpendiculares al rumbo de longitud (X), definen el contorno de la estructura a proyectar en el mapa.

4. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado como parte del desarrollo de los proyectos de investigación: *Mineralogía y Geoquímica de un Domo Adakítico del Municipio de Epazoyucan, Hidalgo y Caracterización de Intrusiones Magmáticas en el Sureste de la Sierra de Pachuca*. Se agradecen los comentarios y sugerencias emitidas por los revisores, mismas que mejoraron significativamente la calidad de este trabajo.

Referencias

- Allmendinger, R.W., 2020, GMDE: Extracting quantitative information from geologic maps: *Geosphere*, v. 16, no. X, p. 1– 13, <https://doi.org/10.1130/GES02253.1>.
- Bennison, G. M., Olver, P. A., Moseley, K. A., (2022). *An Introduction to Geological Structures and Maps*. Routledge, England.
- Borradale, G. J., (2014) *Understanding Geology Through Maps*. Elsevier, Amsterdam.
- Bolton, T., (1993). *Geological Maps: Their Solution and Interpretation*, Cambridge University Press.
- Butler, R. W. H., Torvela, T., Williams, L. (2024). *Geological Mapping of Our World and Others*. Geological Society of London, Special Publications, 541. DOI: doi.org/10.1144/SP541-000
- Coe, A. L., (2010). *Geological Field Techniques*. Wiley Blackwell, England.
- Compton, R., (1985). *Geology in the Field*. John Wiley & Sons, Inc., United States of America.
- Escamilla Casas, J. C. (2019). Reactivación de Fallas Geológicas en Respuesta al Cambio de los Esfuerzos en la Corteza: Ejemplos del Oriente de la Sierra de Pachuca. *Pádi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 6(12), 81-85. <https://doi.org/10.29057/icbi.v6i12.3436>
- Escamilla-Casas, J. C., Meneses-Meneses, E., Ortiz-Hernández, L. E., & Uribe-Alcántara, E. M. (2022). Geología de diques emplazados en tefra, SE Sierra de Pachuca. *Pádi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 9(18), 122-127. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i18.8212>
- Juárez-Montiel, A., Díaz Jiménez, M., Uribe-Alcántara, E.M., Escamilla-Casas, J. C., Ortiz-Hernández, L. E., (2022). Cartografía Geológica Asistida por Dron: Cerro de San Cristóbal, Hidalgo. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI* 10, No.1, 94-98. DOI: 10.29057/icbi.v10i19.8871
- Gass, I.G., Burcher, N. E., Clark, P., (1972). *Geology - Field Relations*. The Open University Press, England.
- Petit, J. P., (1987). Criteria for the Sense of Movement on Fault Surfaces in Brittle Rocks. *Journal of Structural Geology*, v. 6, 5-6, 597-608.
- Potts, G., (2022). Simple Rule to Assist in the Construction of the Outcrop Trace of an Inclined Surface. *Journal of Structural Geology* 165, 1-4.
- Powell, D., (1992). *Interpretation of Geological Structures Through Maps*, Addison-Wesley Longman Ltd. United States of America.
- Harknett, J., Whitworth, D., Rust, D., Krokos, M., Kearl, M., Tibaldi, A., Bonali, F. L., VanWyk de Vries, B., Antonipu, V., Nomikou, P., Reitano, D., Falsaperla, S., Vitello, F., Becciani, U., (2022) The Use of Immersive Virtual Reality for Teaching Fieldwork Skills in Complex Structural Terrains. *Journal of Structural Geology* 163, 1-16. DOI:10.1016/j.jsg.2022.104681
- Ragan, D. M., (1973). *Structural Geology an Introduction to Geometrical Techniques*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, United States of America.
- Ragan, D. M., (2009) *Structural Geology an Introduction to Geometrical Techniques*. 4th Edition, Cambridge University Press, United States of America
- Rowland, S. M., Duebendorfer, E. M., Schiefelbein, I., M., (2007). *Structural Analysis and Synthesis*, 3rd Edition, Blackwell Publishing Ltd. United States of America
- Spencer, E. W., (2018). *Geologic Maps: A Practical Guide to Preparation and Interpretation*, Waveland Press, Inc. United States of America.
- Schöpfer, M. P. J., (2018). A Matlab Script for Visualizing Structure Contours and Outcrop Patterns in Three Dimensions. *Journal of Geoscience Education*, 56-2, 142-148.
- Whitmeyer, S. J., Dordevic, M., (2021). Creating Virtual Geologic mapping exercises in a changing world: *Geosphere*, v. 17, no. 1, 226– 243 DOI:10.1130/GES02308.1