

Este artículo tiene una corrección a la Tabla 2, publicada en:
DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2023.1.1748>
Se añadió también al final de este PDF el 1 de abril de 2023.

TruDisp 2.0: una aplicación para el cálculo del desplazamiento verdadero (neto) de fallas

Ricardo Nieto-Fuentes^{1,*}, Angel Francisco Nieto-Samaniego²,
Shunshan Xu², y Susana Alicia Alaniz-Álvarez²

¹ Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT), Jalisco S/N, Col. Valenciana, Guanajuato, Gto, C.P. 36023, México.

² Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla 3001, Campus UNAM, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México.

* nifr91@gmail.com

RESUMEN

Las fallas son muy comunes en la corteza superior terrestre. Se caracterizan por un plano de fractura a lo largo del cual ocurrió desplazamiento. Eso provoca que estructuras geológicas como capas, vetas, ejes de pliegues, o diques sean seccionados y desplazados por efecto de la falla. Por esta razón, conocer el desplazamiento real o neto es una de las cosas más importantes en el análisis de deformación por fallas. Dicho desplazamiento se calcula restaurando a su posición original puntos que estuvieron adyacentes antes de que ocurriera el desplazamiento, a esos puntos se los denomina “piercing points”. Desafortunadamente es muy raro conocer la posición de esos puntos en la naturaleza, situación que evita que se pueda determinar directamente el desplazamiento verdadero. Lo más común es observar marcadores que han sido desplazados por la falla, dichos marcadores suelen ser objetos tabulares. El desplazamiento observado en los marcadores es denominado “separación”. Aunque es posible calcular el desplazamiento verdadero de la falla a partir de separaciones, no es común que se realice ese cálculo durante el trabajo geológico rutinario. Eso es debido, principalmente, a que las configuraciones posibles de los parámetros involucrados son numerosas y los métodos gráficos o trigonométricos resultan lentos y tediosos. En respuesta a este problema nuestro grupo de trabajo desarrolló una aplicación denominada TruDisp, que calcula el desplazamiento verdadero de una falla a partir de las separaciones. Se calcula la magnitud del desplazamiento sin que se requiera especificar el tipo de falla (normal, inversa, oblicua). En esta contribución presentamos la versión 2.0 de ese programa, esta nueva versión presenta cambios significativos con relación a la versión anterior. TruDisp 2.0 corre en navegadores de internet y presenta una GUI (Graphical User Interface) completamente nueva. El programa utiliza como entrada datos con el formato con que se mide en el campo y ayuda al usuario a evitar errores mediante la presentación gráfica en tiempo real de los datos introducidos. El programa permite calcular el desplazamiento verdadero a partir de un marcador y una estría de falla, o bien, de dos marcadores cuando no se cuenta con estrias. El algoritmo de solución es completamente distinto que el de la versión 1.0, con un abordaje más general y el cálculo de los errores se mejoró al utilizar un método Montecarlo. Consideramos que TruDisp 2.0 es más robusto y fácil de manejar que su versión anterior.

Palabras clave: desplazamiento de falla; desplazamiento verdadero; separación de fallas; datos de falla.

ABSTRACT

Faults are very common in the upper crust of the Earth. They are characterized by a fracture plane along which observable displacement has occurred. The faults cut and displace geological structures such as layers, veins, fold axes, or dikes. For this reason, knowing the true or net displacement is one of the most important things in faulting deformation analysis. Net displacement is calculated by restoring to their original position points that were adjacent before the deformation, these points are called “piercing points”. Unfortunately, it is uncommon to know the position of these points in the field, a situation that prevents the true displacement from being directly determined. It is most common to observe markers that have been displaced by the fault, these markers are linear or tabular objects. The displacement observed in the markers is called “separation”. Although it is possible to determine the true displacement using separations, it is not common calculating it during routine geological work. That is because possible configurations of the parameters involved are numerous, and the graphical or trigonometric methods are slow and tedious. In response to this problem, our group developed an application called TruDisp, which calculates the true displacement of a fault from separations. The program calculates the magnitude of displacement, without considering the fault kind (reverse, normal oblique). In this contribution, we present the 2.0 version of that program, which presents significant changes to the previous one. TruDisp 2.0 runs in web browsers displaying a completely new GUI (Graphical User Interface). The input data is introduced in the format as it was measured in the field and it helps the users to avoid errors by graphing the data in real-time. The program allows calculating the true displacement from a marker and fault striae, or from two markers when there are no striae. The solution algorithm is completely different from version 1.0, with a more general approach and the calculation of errors was improved by using a Monte Carlo method. We find TruDisp 2.0 to be more robust and amenable for users than its previous version.

Key words: fault displacement; true displacement; fault separation; fault-slip data.

INTRODUCCIÓN

Las fallas son estructuras geológicas muy comunes que se presentan principalmente en la corteza superior terrestre. Aunque se trata de objetos geológicos que comúnmente forman grupos con relaciones

que llegan a ser complejas (véase por ejemplo Peacock *et al.*, 2016), en su definición más elemental una falla se puede considerar como: fractura o zona de fractura a lo largo de la cual ha tenido lugar desplazamiento relativo de los lados, paralelamente al plano de fractura (Bates and Jackson, 1984); o bien como, superficie a lo largo de la cual ocurrió desplazamiento apreciable, que puede ser plana o curviplana (Ragan, 2009). De estas definiciones se deriva que una falla delimita dos bloques, ubicados a uno y otro lado del plano de fractura (Figura 1). En el trabajo geológico es muy común ubicar y definir la geometría de las fallas presentes en el área estudiada, para ello se determina la orientación del plano de fractura, así como la dirección y sentido del desplazamiento. En múltiples ocasiones también es necesario determinar la magnitud del desplazamiento, ya que eso permite conocer la posición de un objeto que solo ha sido observado en uno de los bloques.

Conocer la magnitud del desplazamiento de una falla es de la mayor importancia en muchas situaciones, como por ejemplo en desarrollos mineros, en la búsqueda de blancos de perforación, en la elaboración de secciones geológicas, o en estudios de cuantificación de deformaciones. No obstante lo anterior, durante los levantamientos geológicos es muy poco probable poder determinar el desplazamiento verdadero de las fallas, pues casi siempre se observa solo el desplazamiento aparente de un marcador, ese marcador puede ser una capa, un dique, o cualquier objeto planar o lineal desplazado por la falla. En la literatura hay numerosos trabajos que abordan la determinación del desplazamiento verdadero de una falla (Ramsay and Huber, 1987; Yamada y Sakaguchi, 1995; Ragan, 2009; Xu *et al.*, 2007, 2009; Lisle and Walker, 2013; Nieto-Fuentes *et al.*, 2014), pero la mayoría resuelven el problema geométrico para una o un número limitado de configuraciones geométricas.

Nuestro grupo de trabajo ha estudiado distintos aspectos del análisis estructural en fallas desde hace más de dos décadas, presentando avances paulatinos en el desarrollo de los algoritmos de solución y programas de cómputo que resuelven problemas geométricos

y dinámicos (Alaniz-Álvarez *et al.*, 1998; Xu *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2009; Nieto-Fuentes *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2017; Alvarez-del-Castillo *et al.*, 2017). Presentamos esta nueva aportación en el marco de la sección especial de la Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, que se publica para celebrar los 20 años de creación del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Se trata de la versión más reciente de una aplicación para calcular el desplazamiento verdadero (neto) de una falla, a partir del desplazamiento aparente (separación) de un marcador planar. Este programa de cómputo denominado TruDisp 2.0 es la siguiente iteración (v2.0) de la versión (v1.0) presentada en Nieto-Fuentes *et al.* (2014, disponible en <https://github.com/NIFR91/TruDISP/blob/gh-pages/TruDISP/TruDISP-1.zip> y en <https://nifr91.gitlab.io/trudisp/releases/TruDisp-v1.0.zip>).

Los cambios en TruDisp 2.0 son significativos, pues tiene una GUI completamente nueva y se ejecuta en cualquier navegador. Puede usarse en ambiente Windows, Linux o Android, por lo que corre en computadoras de escritorio, laptops, tabletas, o teléfonos inteligentes. El método de cálculo para determinar el desplazamiento verdadero de la falla es distinto al usado en la versión anterior y se integra una nueva metodología para el cálculo de los errores. TruDisp 2.0 Está disponible en: <https://nifr91.gitlab.io/trudisp/>

Modelo y geometría usados en TruDisp 2.0

El modelo geométrico utilizado en TruDisp 2.0 se ilustra en la Figura 1. Se asume que el desplazamiento ocurre sobre el plano de falla y que la estría de falla es paralela al vector de desplazamiento. Otras asunciones son que la falla es plana y que el desplazamiento es homogéneo en todo el plano. La magnitud del desplazamiento es distinta a lo largo de la superficie de las fallas, por ello se debe considerar que el área en que es válido asumir desplazamiento constante es limitada. Por otra parte, las observaciones de campo y de mapas del subsuelo muestran que las fallas comúnmente presentan curvaturas, lo cual es debido entre otros factores a las heterogeneidades del medio,

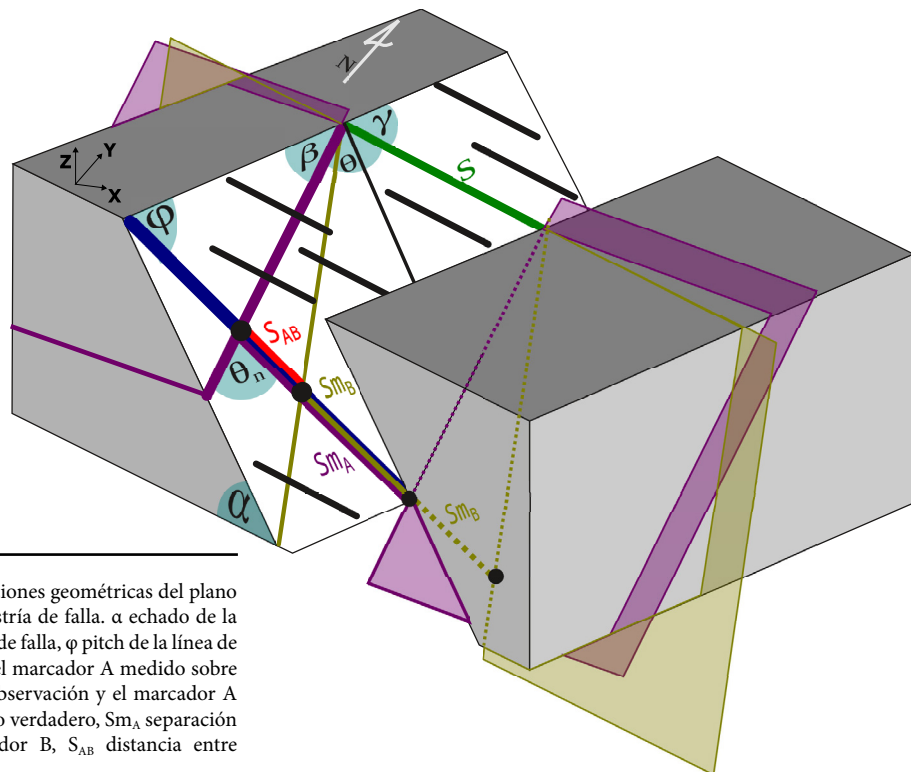


Figura 1. Bloquediagrama que muestra las relaciones geométricas del plano de falla, marcadores, plano de observación y estría de falla. α echado de la falla, β pitch del marcador A, γ pitch de la estría de falla, ϕ pitch de la línea de observación, θ ángulo entre la estría de falla y el marcador A medido sobre el plano de falla, θ_n ángulo entre la línea de observación y el marcador A medido sobre el plano de falla, S desplazamiento verdadero, Sm_A separación del marcador A, Sm_B separación del marcador B, S_{AB} distancia entre marcadores A y B después de la deformación.

el enlace de segmentos de falla y la interacción con otras estructuras. Por esa razón se deben usar valores promedio de rumbo y echado, y debe tenerse en cuenta que la aproximación a una superficie plana será más cercana para fallas o áreas relativamente pequeñas. Para fallas regionales una estrategia puede ser considerar el promedio de rumbo y echado de las zonas centrales de las fallas.

En la Figura 1 se ilustra una falla de tipo normal, en donde el plano de falla (fractura) separa dos bloques denominados “bloque del alto” (bloque de techo) que se encuentra encima del plano de falla y “bloque del bajo” (bloque de piso) que yace bajo el plano de falla. El plano de falla contiene estrías (*striaes*) que indican la dirección del desplazamiento y hay uno (o dos) marcadores planares que son desplazados por la falla. El ángulo α es el “echado” o inclinación (*dip*) de la falla y su rumbo (*strike*, *stk*) es el ángulo de 0° a 360° formado entre el norte geográfico y la línea de rumbo de la falla (línea de intersección de los planos horizontal y de falla), se utiliza la regla de la mano derecha. Los ángulos “pitch” son medidos sobre el plano de la falla con respecto a la línea de rumbo de la falla. En la Figura 1 aparecen los ángulos pitch de las líneas de intersección del plano de falla con el plano de observación (ϕ), con el marcador A (β) y el pitch de la estría de falla (γ). El ángulo pitch de una línea sobre el plano de falla puede tomar valores entre 0° y 90° , por lo que es necesario dividir el plano de falla en dos partes iguales separadas por la línea del echado, si la línea cae en la mitad norte será indicada con N y con S si queda en la mitad sur. Nótese que los ángulos θ (ángulo entre la estría y el marcador) y θ_n (ángulo entre la línea de observación y el marcador) no son ángulos pitch, aunque son medidos sobre el plano de falla (Figura 1).

Es común medir el desplazamiento aparente de los marcadores en el plano horizontal, es decir sobre un mapa. También es común medir sobre un plano vertical y perpendicular al rumbo de la falla, cuando medimos en secciones transversales. Sin embargo, en el campo observamos los afloramientos de roca sobre un plano que puede tener cualquier orientación. Ese plano sobre el cual se observa es denominado “plano de observación” (*observation plane*) (plano O). El modelo permite realizar los cálculos no solo en mapa y sección transversal, sino sobre planos de observación con orientación cualquiera, para ello se requiere introducir su rumbo y echado. La línea que se forma por la intersección del plano de falla y el plano de observación se denomina línea de observación. Sobre esa línea es que se mide el desplazamiento aparente del marcador.

El modelo asume que los datos de entrada tienen errores de medición cuya magnitud es elegida por el usuario. La magnitud del error puede obtenerse de mediciones sucesivas que haya realizado el usuario, o bien pueden considerarse errores típicos según el instrumento de medición que se haya utilizado. Como ejemplo podemos decir que, basados en nuestra experiencia, una brújula “tipo Brunton” tiene un error de $\pm 2^\circ$, aunque puede llegar a ser mayor, dependiendo del equipo y las condiciones en que se realiza la medición.

El programa considera dos casos: cuando se tiene la estría y un marcador, y cuando se tienen dos marcadores no paralelos sin tener estrías. Para calcular el desplazamiento verdadero, el modelo considera que hay puntos de los marcadores que estuvieron adyacentes antes de la deformación. Esos puntos son denominados *piercing points* y la magnitud del desplazamiento está dada por la distancia entre ellos después de la deformación, medida en línea recta.

El programa y su GUI paso a paso

Input: Datos de entrada, sus formatos y errores

El usuario debe introducir el rumbo y echado del plano de falla, de los marcadores y del plano de observación. Los datos se introducen en grados, para los rumbos se usa la regla de la mano derecha y se usa

azimut (0° a 360°). Para casos en que no se tiene estría, pero se cuenta con dos marcadores, deberá pulsarse en “marcador B” (*marker B*) e introducir rumbo y echado del segundo marcador. Igualmente deben introducirse los desplazamientos aparentes Sm_A (desplazamiento del marcador A a lo largo de la línea de observación), Sm_B (desplazamiento del marcador B a lo largo de la línea de observación) y la distancia S_{AB} (distancia entre los marcadores A y B medida a lo largo de la línea de observación) (Figura 1). Las magnitudes de esos desplazamientos aparentes son adimensionales, al igual que los resultados obtenidos, por lo que el usuario debe asegurarse de que las mediciones realizadas sean comparables. Para el caso en que se tiene la estría y un marcador se debe introducir la dirección de la estría (*trend*). La inclinación (*plunge*) y el ángulo pitch serán calculados por el programa de manera automática y aparecerán donde se indican. Pocas veces se mide en el campo el *trend* de la estría, es más común que se mida el ángulo pitch. Dado que el *trend* es el dato de entrada del programa, el usuario debe ir modificando la dirección de la estría (*trend*), hasta obtener el pitch deseado, es decir, el que midió en el campo. En todos los valores el usuario puede introducir errores.

Para facilitar la visualización de los datos y ayudar al usuario a detectar rápidamente errores, el programa grafica, en el panel “Plane Orientation”, el rumbo y el echado en esquemas donde el vector perpendicular al plano aparece como una flecha (Figura 2). En el caso del rumbo (*strike*) el sistema de coordenadas está en el plano horizontal y aparece como dos líneas sólidas ortogonales con el norte en la parte positiva del eje de las ordenadas. Nótese que la longitud de la flecha varía según la inclinación del plano. En el caso del echado (*dip*) el sistema de coordenadas está en el plano vertical, aparece con líneas sólidas hacia arriba del plano horizontal y líneas punteadas hacia abajo del plano horizontal. En el caso de los datos de estrías, la línea móvil indica la proyección de la estría en la horizontal para el caso de la dirección (*trend*) y la proyección en el plano vertical en el caso de la inclinación (*plunge*). Los ángulos pitch se calcularán y desplegarán automáticamente, en tiempo real, en su propio panel.

Cuando se tienen dos marcadores y no se tienen estrías, al pulsar sobre “Marcador B” (*Marker B*) se activa por completo el panel de desplazamientos aparentes (*Apparent Displacement*). Allí se pueden introducir los valores de Sm_A , Sm_B y S_{AB} . Hay dos gráficos que muestran las posiciones de los puntos de intersección de A, A', B y B', sobre la línea de observación (nótese que solo se visualizan las letras B y A'). La proyección sobre el plano horizontal es la de la izquierda, tiene ejes en línea sólida, a la derecha está la proyección en el plano vertical. Cuando una distancia (Sm_A , Sm_B o S_{AB}) se midió en el sentido de la flecha debe considerarse positiva, si se midió en sentido contrario de la flecha debe aparecer como negativa. La gráfica ayudará al usuario a verificar que se haya usado el signo correcto. Para evitar confusiones sugerimos considerar como el marcador A aquel que se intersecte con la línea de observación en la parte más elevada y un valor de $S_{AB}=0$, pues los valores de Sm_A , Sm_B así como el desplazamiento neto S, son independientes de S_{AB} , como se muestra más adelante.

Salida (Output): Datos de salida: desplazamientos y cosenos directores

En el panel de salida aparecen los desplazamientos que calcula el programa. Los ángulos θ y θ_n servirán al usuario para evaluar la calidad de su cálculo, S es el desplazamiento neto de la falla; Sv es el desplazamiento vertical y Sh el desplazamiento horizontal perpendicular a la falla; Sd es el desplazamiento en dirección del echado de la falla y Ss el desplazamiento en dirección del rumbo de la falla. El programa también calcula los cosenos directores de los planos de falla, de observación y marcadores, sus relaciones geométricas se

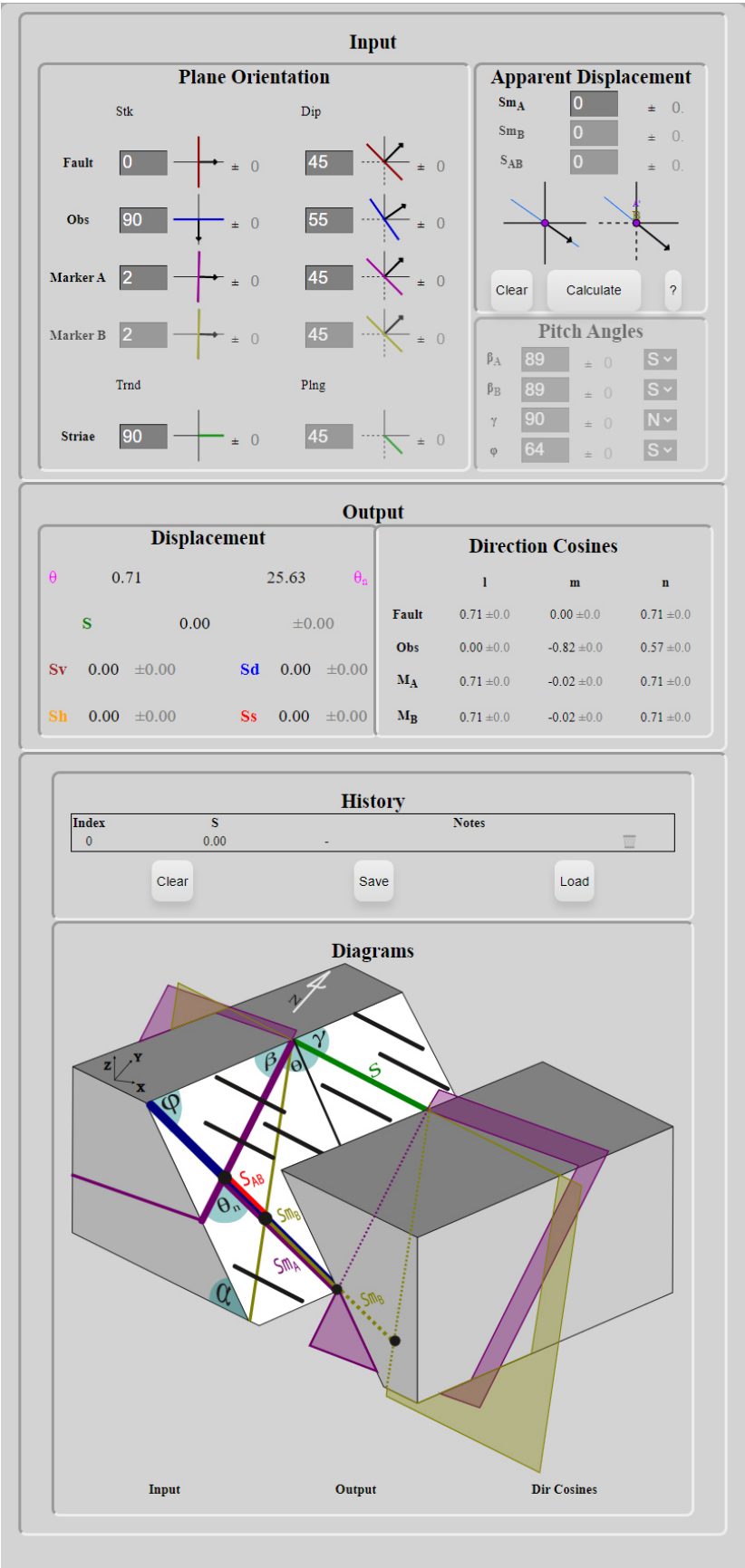


Figura 2. Interfase gráfica de TruDisp 2.0 con el usuario.

ilustran en la Figura 2 y se calculan al pulsar *Calculate* en el panel *Apparent Displacement*. Los errores calculados aparecen frente a cada dato como $\pm \varepsilon$ (siendo ε el error asociado a un intervalo de confianza). El 95 % de los datos de la simulación Montecarlo se encuentran en ese rango de error.

Historial (History)

Los cálculos realizados aparecen enlistados en el panel del historial (*History*) con un número consecutivo que se indica en la primera columna (Figura 2). Al pulsar en el número consecutivo de un renglón (primera columna), los datos de entrada y salida de ese cálculo se cargarán automáticamente. Se pueden escribir notas que sirvan para identificar una falla específica, o guardar allí cualquier información importante que se desee. Los datos de cada cálculo se pueden borrar individualmente pulsando en el ícono de cesto de basura. Pulsando el botón salvar (*save*) el historial se guardará en un archivo de texto con los valores separados por coma y un desplazamiento por línea (formato csv). Por defecto el nombre del archivo que se guarda es "trudisp-data-[fecha en milisegundos desde 00:00:00 UTC].csv". El usuario podrá modificar posteriormente ese nombre a su conveniencia, así como hacer modificaciones en los datos del archivo. Nótese que los ángulos aparecerán en radianes. Para recuperar un archivo guardado se debe pulsar "cargar" (*load*) y los datos aparecerán en el panel del historial.

Diagramas (Diagrams)

El panel de diagramas (*Diagrams*) contiene las figuras en donde se ilustran las relaciones geométricas de los elementos utilizados en los cálculos.

Cómo se realizan los cálculos

En la Tabla 1 se muestra el algoritmo para obtener el desplazamiento de una falla partiendo de mediciones de campo. Los datos de entrada son los siguientes: El rumbo (*strike*, *stk*) y el echado (*dip*) para los planos de falla (*F*), observación (*O*), marcador (*A*) y opcionalmente marcador (*B*). La dirección (*trend*, *trnd*) y la inclinación (*plunge*, *plng*) de la estría ($\hat{s}$). La distancia entre los marcadores (S_{AB}) y los desplazamientos aparentes Sm_A y Sm_B . Se explica también, de manera simplificada, lo que calculan las ecuaciones.

Los ángulos suelen ser medidos en grados, por ello el primer paso consiste en transformar a radianes cada valor de orientación mediante:

$$Q(\delta) = \frac{\pi}{180} \delta \quad (1)$$

El siguiente paso consiste en expresar las orientaciones de los planos en función del vector normal unitario $\hat{n}$ transformándolo a la base canónica $[\hat{i} \hat{j} \hat{k}]$; correspondiendo respectivamente con los ejes X (positivo en dirección Este), Y (positivo en dirección Norte) y Z vertical (positivo hacia arriba). Es importante notar que *stk* está medido con respecto a $\hat{j}$ (Y, Norte), pero el vector normal al plano ($\hat{n}$) debe ser referido con respecto a $\hat{i}$ (X) denominándolo *stk'*. De manera similar, el *dip* está medido con respecto a la horizontal, pero $\hat{n}$ debe estar referido a $\hat{k}$ (Z, vertical, hacia arriba) siendo en ese caso *dip'*. La Figura 3 muestra las relaciones espaciales de esos ángulos. Para obtener *stk'* y *dip'* les aplicamos la función

$$\theta(stk', dip') = \begin{bmatrix} \cos(-stk') \sin(dip') \\ \sin(-stk') \sin(dip') \\ \cos(dip') \end{bmatrix} \quad (2)$$

que transforma el rumbo (*stk'*) y el echado (*dip'*) a la base canónica.

Si se conoce la orientación de la estría ($\hat{s}$) se requiere solo un marcador y el desplazamiento es la magnitud del vector ($\vec{S}$) con

orientación dada por $\hat{s}$ que intersecta al marcador desplazado M'_A . Para realizar este cálculo primero se obtiene la intersección del plano de observación (*O*) con el plano de falla (*F*). Para obtener la línea de observación $\vec{T}_0$, se emplea

$$X(\hat{n}_a, \hat{n}_b) = \hat{n}_a \times \hat{n}_b \quad (3)$$

La función (*X*) aplica el producto cruz ($\times$) entre dos planos cualquiera $\hat{n}_a$ y $\hat{n}_b$ y obtiene la línea de intersección $\vec{T}$.

En el caso que nos ocupa la dirección de la línea de observación debe estar orientada hacia abajo ($-\hat{k}$). Por ello se revisa si la componente del vector $\vec{T}$ en $\hat{k}$ es positiva o negativa y se invierte la dirección en caso de ser positiva, es decir $\vec{T} = (1 - 2[(\vec{T} \cdot \hat{k}) > 0]) \vec{T}$, en donde la proposición lógica $[L_p]$, toma el valor 1 si la condición es verdadera y 0 en otro caso.

Con la línea de observación podemos calcular el desplazamiento aparente ($\vec{S}_m = Sm \hat{l}_0$) del marcador *M*, ese vector representa un punto en el marcador desplazado M' . Y se calcula la intersección de la dirección $\hat{s}$ con el plano ($(\vec{p} - \vec{S}_m) \cdot \hat{n}_M = 0$) usando:

$$\zeta(\hat{l}_0, Sm, \hat{n}_M, \hat{s}) = \left| \frac{\hat{n}_M \cdot Sm \hat{l}_0}{\hat{s} \cdot \hat{n}_M} \right| \hat{s} \quad (4)$$

Donde ζ permite calcular el vector desplazamiento $\vec{S}$ usando la dirección de la línea de observación $\hat{l}_0$, el plano del marcador $\hat{n}_M$, la dirección de la estría $\hat{s}$ y el desplazamiento aparente sobre la línea de observación Sm (Figura 4).

En el segundo caso no se cuenta con la orientación de la estría, en su lugar se tiene un segundo marcador. Con estos dos marcadores podemos detectar la intersección de los dos planos antes y después del desplazamiento, los cuales, sobre el plano de la falla, serían *piercing points* (Figuras 1 y 5). El desplazamiento neto $\vec{S}$ es entonces la distancia entre esos dos puntos.

Los desplazamientos aparentes, la línea de observación y las orientaciones de los marcadores determinan la ecuación de los planos, para el marcador M_A tenemos $(\vec{p} \cdot \hat{n}_{MA} = 0)$ y para ese plano desplazado (M'_A) tenemos $((\vec{p} - Sm_A \hat{l}_0) \cdot \hat{n}_{MA} = 0)$; igualmente para el segundo marcador (M_B) tenemos $((\vec{p} - S_{AB} \hat{l}_0) \cdot \hat{n}_{MB} = 0)$ y para su parte desplazada $(\vec{p} - (S_{AB} + Sm_B) \hat{l}_0) \cdot \hat{n}_{MB} = 0)$. Se puede encontrar la intersección del plano de falla y los dos marcadores, antes ($\vec{T}$) y después ($\vec{T}'$) de la deformación, usando la función (*p*):

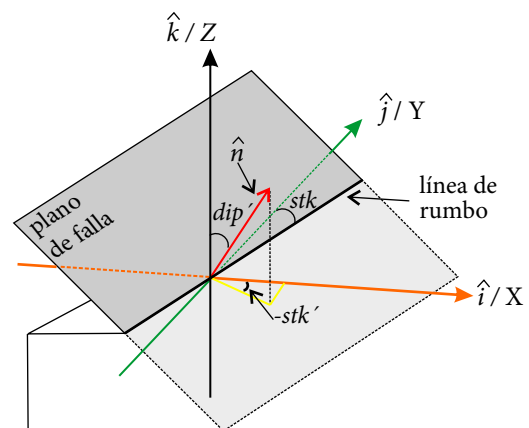


Figura 3. Esquema que muestra las relaciones geométricas de los parámetros del plano de falla y su normal, en el sistema de coordenadas $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$. La línea de rumbo es la intersección del plano horizontal con el plano de falla, *stk* rumbo, *dip* echado. La flecha verde se orienta hacia el Norte geográfico (eje Y positivo).

Tabla 1. Algoritmo para el cálculo de desplazamiento

Entrada: $stk_F, dip_F, stk_O, dip_O, stk_{M_A}, dip_{M_A}, stk_{M_B}, dip_{M_B}, trnd, plng, Sm_A, Sm_B, S_{AB}$	
Salida: El desplazamiento $\vec{S}$	
1 transformar orientaciones a radianes mediante (1)	
2 obtener los cosenos directores utilizando (2)	
3 $\hat{l}_0$ = intersección del plano O con plano F empleando (3)	La ecuación (3) obtiene la intersección de dos planos aplicando el producto cruz.
4 si la orientación de $\hat{l}_0$ es incorrecta entonces $\hat{l}_0 = -\hat{l}_0$	
5 si se conoce la orientación de la estría entonces	
6 $\vec{S}$ = intersección de la estría ($\hat{s}$) con el marcador $\hat{n}_{MA}$ usando (4)	La ecuación (4) obtiene la intersección de una línea con un plano.
7 en otro caso	
8 ι = intersección plano F , plano M_A y plano M_B aplicando (5)	La ecuación (5) obtiene el punto de intersección de tres planos.
9 ι' = intersección plano F , plano M'_A y plano M'_B aplicando (5)	
10 $\vec{S} = \iota' - \iota$	
11 si la orientación de $\vec{S}$ es incorrecta entonces $\vec{S} = -\vec{S}$	
12 fin	
13 calcular ángulos pitch usando (8) y (9)	(8) y (9) obtienen el ángulo pitch del marcador y la estría, respectivamente.
14 obtener los valores de θ y θ_n mediante (10) y (11) respectivamente	
15 calcular componentes de desplazamiento aplicando (12, 13, 14 y 15)	
16 devolver $\vec{S}$	

$$p(\hat{n}_{M_A}, \vec{p}_a, \hat{n}_{M_B}, \vec{p}_b, \hat{n}_f, \vec{p}_f) = \frac{(\vec{p}_a \cdot \hat{n}_{M_A})(\hat{n}_{M_B} \times \hat{n}_f) + (\vec{p}_b \cdot \hat{n}_{M_B})(\hat{n}_f \times \hat{n}_{M_A}) + (\vec{p}_f \cdot \hat{n}_f)(\hat{n}_{M_A} \times \hat{n}_{M_B})}{\det([\hat{n}_{M_A} \hat{n}_{M_B} \hat{n}_f])} \quad (5)$$

Donde $\hat{n}$ es el vector normal al plano, $\vec{p}$ es un punto en el plano y $\hat{l}_0$ la dirección de la línea de observación. La diferencia entre esos dos puntos ($\vec{\tau} - \vec{\tau}'$) es el desplazamiento neto $\vec{S}$. Es interesante señalar que la magnitud del desplazamiento neto es independiente del valor de S_{AB} . Si introducimos (5) en la ecuación $\vec{S} = (\vec{\tau} - \vec{\tau}')$ obtenemos

$$\vec{S} = (\vec{\tau} - \vec{\tau}') = -\frac{(Sm_A \hat{l}_0 \cdot \hat{n}_{M_A})(\hat{n}_{M_B} \times \hat{n}_f) + (Sm_B \hat{l}_0 \cdot \hat{n}_{M_B})(\hat{n}_f \times \hat{n}_{M_A})}{\det([\hat{n}_{M_A} \hat{n}_{M_B} \hat{n}_f])}, \quad (6)$$

en donde no interviene S_{AB} .

Finalmente, calculamos los ángulos pitch de las líneas de observación, falla y marcador. Para ello se utiliza la función

$$I(\hat{n}_f, \hat{n}, \mathcal{L}_p) = (1 - 2[\mathcal{L}_p]) \frac{\chi(\hat{n}_f, \hat{n})}{|\chi(\hat{n}_f, \hat{n})|}. \quad (7)$$

Que calcula la intersección de un plano $\hat{n}$ con el plano de falla $\hat{n}_f$ asegurando que la orientación sea $-\hat{k}$, es decir $\mathcal{L}_p = \chi(\hat{n}_f, \hat{n}) \cdot \hat{k} > 0$. Análogamente se calcula la línea de rumbo $I(\hat{n}_f, \hat{k}, \mathcal{L}_{pj})$, i.e. intersección del plano de falla con el plano horizontal $\hat{k}$, pero en esta ocasión la condición debe asegurar que la dirección sea $\hat{j}$ (i.e., $\mathcal{L}_{pj} = \chi(\hat{n}_f, \hat{k}) \cdot \hat{j} > 0$).

De esta forma calculamos los ángulos pitch para cada plano $\hat{n}$ usando

$$\xi(\hat{n}_f, \hat{n}, \hat{k}) = \arccos(I(\hat{n}_f, \hat{n}, \mathcal{L}_p) \cdot I(\hat{n}_f, \hat{k}, \mathcal{L}_{pj})), \quad (8)$$

y para la estría $\hat{s}$:

$$\xi_s(\hat{s}, \hat{n}_f, \hat{k}) = \arccos(I(\hat{n}_f, \hat{k}, \mathcal{L}_{pj}) \cdot \hat{s}). \quad (9)$$

Calcular θ (ángulo entre la estría y la línea del marcador) y θ_n (ángulo entre la línea de observación y el marcador) es simple (Figura 1):

$$\theta(\hat{n}_f, \hat{n}_M, \hat{s}) = \arccos(\hat{s} \cdot I(\hat{n}_f, \hat{n}_M, \mathcal{L}_p)), \quad (10)$$

$$\theta_n(\hat{n}_f, \hat{n}_M, \hat{n}_O) = \arccos(I(\hat{n}_f, \hat{n}_M, \mathcal{L}_p) \cdot I(\hat{n}_f, \hat{n}_O, \mathcal{L}_p)). \quad (11)$$

Adicionalmente se pueden calcular la magnitud de las componentes del desplazamiento (Figura 1):

$$Ss(\vec{S}, \hat{n}_f, \hat{k}) = \vec{S} \cdot I(\hat{n}_f, \hat{k}, \mathcal{L}_{pj}), \quad (12)$$

$$Sd(\vec{S}, \vec{S}_s) = |\vec{S}_s - \vec{S}|, \quad (13)$$

$$Sv(\vec{S}) = \vec{S} \cdot \hat{k}, \quad (14)$$

$$Sh(\vec{S}, \vec{S}_s) = |(\vec{S} - (\vec{S} \cdot \hat{k}) \hat{k}) - \vec{S}_s|, \quad (15)$$

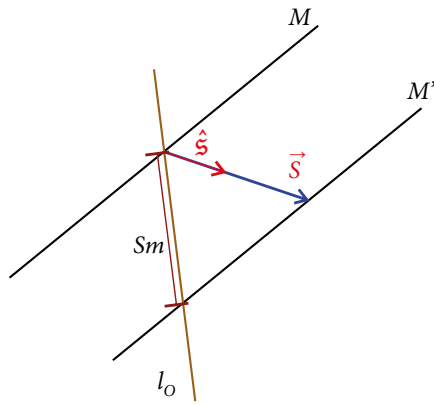


Figura 4. Esquema que muestra las relaciones geométricas de un marcador M con la parte M' desplazada por una falla. $\vec{S}$ vector desplazamiento verdadero, $\vec{s}$ vector unitario paralelo a la estría, l_0 línea de observación, Sm separación.

Cálculo de los errores

En TruDisp 2.0 los errores se estiman empleando el método Montecarlo. Los errores reportados son resultado de considerar la propagación del error sugerido por el usuario. Para esto se considera que el valor (V) tiene una distribución normal $V \sim v + \epsilon N(0, \sigma^2)$ donde v corresponde al valor medido en el campo, ϵ el posible error al realizar la medición y σ la desviación estándar. Esta última se calcula para que la probabilidad (P) de que el valor real se encuentre en el rango esperado sea $P(v - \epsilon < V < v + \epsilon) \approx 0.98$; usando la regla de 3 sigma aproximamos $\sigma \approx \epsilon/3$. A partir de tener las distribuciones para cada medición, se toman muestras de los grupos de valores requeridos para el cálculo del desplazamiento. Una vez que se tienen las muestras, la propagación se realiza calculando con cada muestra de forma independiente. Se usan 100 muestras para el cálculo en tiempo real y 1000 para el cálculo completo. Lo anterior produce una distribución de desplazamientos y ángulos. El valor mostrado es la media de esa distribución y el error se aproxima a partir de la desviación estándar, reportándose para incluir $\sim 95\%$ de los datos ($\epsilon = 2\sigma$).

Es importante notar que, generalmente, el cálculo con el valor introducido (sin errores) y la media de la simulación Montecarlo (introduciendo errores) serán similares. Sin embargo, esto no necesariamente se mantendrá para toda operación, debido a la transformación no lineal de los valores de entrada para calcular el desplazamiento. El usuario debe tener en consideración el impacto del error de medición en los resultados obtenidos y sus posibles consecuencias en la interpretación de los resultados.

Casos especiales

Hay dos casos especiales en los que no es posible realizar el cálculo del desplazamiento real de la falla, ya que no se observa desplazamiento aparente, estos son: (1) cuando el ángulo $\theta = 0^\circ$, en estas condiciones el marcador no experimenta desplazamiento observable por ser paralelo a la estría de la falla, y (2) cuando el ángulo $\theta n = 0^\circ$ ya que al ser paralelas las trazas de la línea de observación y del marcador, ambas sobre el plano de falla, no se observará desplazamiento alguno.

Los errores se harán muy grandes conforme θ y θn se aproximan a 0° , por lo cual sugerimos enfáticamente no considerar adecuados aquellos cálculos en los que se obtengan valores de $\theta < 20^\circ$ o de $\theta n < 10^\circ$.

Ejemplo y comparación con TruDisp 1.0

Hay diferencias importantes entre TruDisp 2.0 y su versión previa TruDisp 1.0. Para el usuario la diferencia más evidente es que los parámetros de entrada en TruDisp 2.0 son los datos que usualmente

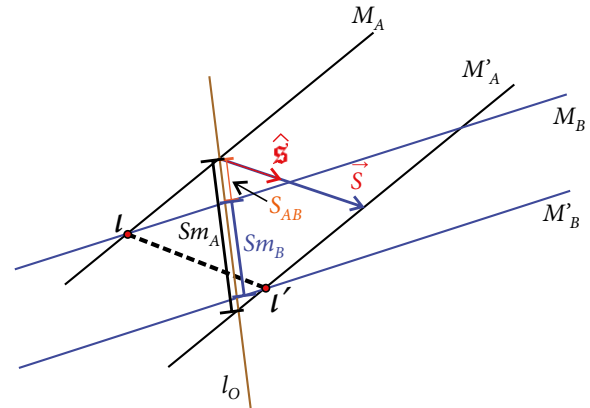


Figura 5. Esquema que muestra las relaciones geométricas entre dos marcadores M_A y M_B con las partes correspondientes M'_A y M'_B desplazadas por una falla. $\vec{S}$ vector desplazamiento verdadero. Sm_A separación del marcador A, Sm_B separación del marcador B, S_{AB} distancia entre marcadores A y B después de la deformación, medida sobre la línea de observación l_0 . i y i' piercing points.

se miden directamente en el campo y que el programa puede correrse en diversos dispositivos Android, Windows y Linux, lo que hace más fácil su uso.

Internamente los algoritmos de solución de las versiones de TruDisp son muy diferentes. El algoritmo usado en TruDisp 2.0 se expuso en el apartado "Cómo se realizan los cálculos", mientras que, por su parte, TruDisp 1.0 calcula el desplazamiento neto resolviendo ecuaciones trigonométricas para 18 configuraciones que se pueden dar con orientaciones de falla, plano de observación, marcadores y estría. El error lo calcula como error absoluto a partir de derivadas parciales, las cuales se aproximaban numéricamente. Entre los inconvenientes de este método se tiene el error introducido por la aproximación numérica y el asumir la derivabilidad de las funciones. Para el cálculo de la propagación del error introducido por el usuario la versión 1.0 resuelve la ecuación:

$$\Delta S = \left| \frac{\partial S}{\partial \beta} \right| \Delta \beta + \left| \frac{\partial S}{\partial \gamma} \right| \Delta \gamma + \left| \frac{\partial S}{\partial \varphi} \right| \Delta \varphi + \left| \frac{\partial S}{\partial Sm} \right| \Delta Sm, \quad (16)$$

donde Δ es el error en S , β , γ , φ y Sm , respectivamente. Las derivadas parciales son calculadas numéricamente, aproximando la primera derivada como: $f'(S) \approx (f(S_0 + h) - f(S_0 - h)) / 2h$, con un valor de $h = 0.0001$ para evaluar la derivada en el punto S_0 (Nieto-Fuentes *et al.*, 2014).

Aunque los métodos de cálculo son distintos, los resultados obtenidos con las dos versiones de TruDisp son consistentes. A manera de ejemplo, en la Tabla 2 mostramos los resultados de casos que fueron obtenidos con modelos en papel, usando el método descrito en Ragan (2009, p. 169). Los ángulos se midieron con un transportador. Nótese que la configuración de la falla y los marcadores es la misma, solo cambia que las mediciones se hicieron en un plano de observación oblicuo y en mapa.

CONCLUSIONES

La limitante principal para calcular el desplazamiento verdadero de una falla, a partir de datos de campo, es que hay un gran número de configuraciones entre los parámetros que intervienen en el cálculo y que los métodos gráficos y trigonométricos son muy demandantes de tiempo. La solución es tener un programa de cómputo que permita realizar los cálculos rápidamente para cualquier combinación de valores medidos. TruDisp 2.0 permite realizar esos cálculos de manera

Tabla 2. Ejemplos del cálculo de desplazamiento neto.

Caso 01. Plano de observación oblicuo	Rumbo* Dirección	Echado* Inclinación	TruDisp 1.0	TruDisp 2.0
Falla	045±2	65±2		
Plano de observación	300±2	86±2		
Marcador	85±2	40±2		
Estría	119±2			
<i>Desplazamiento real usado en el modelo =60</i>				
<i>Separación medida en el modelo $Sm_A=69$</i>				
Desplazamiento neto S calculado			60±2.4	60.00±1.42
β			40±2S	40±2 S
γ			55±2 N	56±4 N
φ			80±2 N	80±2 N
Sv			44.5±3.6	44.99±2.03
Sh			20.8±2.9	20.97±1.67
Sd			49.1±3.2	49.64±2.34
Ss			34.4±3.1	33.65±3.30

Caso 02. Mapa	Rumbo* Dirección	Echado* Inclinación	TruDisp 1.0	TruDisp 2.0
Falla	045±2	65±2		
Plano de observación	0±2	0±2		
Marcador	85±2	40±2		
Estría	119±2			
<i>Desplazamiento real usado en el modelo =60</i>				
<i>Separación medida en el modelo $Sm_A=78$</i>				
Desplazamiento neto S calculado			60±2.4	60.01±1.38
β			40±2S	40±2 S
γ			55±2 N	56±4 N
φ			-	-
Sv			44.5±3.6	44.99±2.04
Sh			20.8±2.9	20.98±1.63
Sd			49.1±3.2	49.65±2.33
Ss			34.4±3.1	33.65±3.35

*Se utiliza la regla de la mano derecha. En las medidas angulares se introdujo un error de $\pm 2^\circ$. En ***negritas cursivas*** aparecen los datos calculados.

rápida y amigable. El algoritmo de solución utilizado es general y permite evaluar la calidad de los resultados analizando los errores obtenidos. Este nuevo algoritmo calcula también el desplazamiento neto en ausencia de estría de falla y teniendo dos marcadores. El cálculo de los errores utiliza un método estocástico, que consideramos más adecuado dadas las funciones trigonométricas (no lineales) involucradas en los cálculos. En las pruebas que presentamos, los cálculos realizados con TruDisp 2.0 son consistentes con los obtenidos usando TruDisp 1.0.

TruDisp 2.0 es una herramienta útil en diversos trabajos en los que se requiera ubicar un objeto desplazado por una falla. También será de utilidad para la cartografía y el trabajo geológico regional, así como en la enseñanza de la Geología Estructural en niveles de intermedio a avanzado.

GUÍA RÁPIDA DEL USUARIO

Como ayuda para los usuarios, una guía rápida de la aplicación TruDisp 2.0 puede descargarse desde la vista previa de este artículo en: <http://www.rmccg.unam.mx/index.php/rmccg/article/view/1705>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto PAPIIT IN 102020 de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México. Agradecemos a Laura Giambiagi, Arturo Ortiz Ubilla y Javier Arellano Gil, por la revisión y comentarios a este trabajo.

REFERENCIAS

- Alaniz-Alvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A.F., Tolson, G., 1998, A graphical technique to predict slip along a preexisting plane of weakness: Engineering Geology, 49, 53-60.
- Álvarez del Castillo, A., Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Xu, S.-S., Ochoa-González, G. H., Velasquillo, L., 2017, Software for determining the direction of movement, shear and normal stresses of a fault under a determined stress state: Shear Slip in Geographical Orientation (SSLIPO1.0): Computers and Geosciences, 104, 84-92, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2017.03.006>
- Bates, R.L., Jackson, J.A., 1984, Dictionary of Geological Terms: New York, EE.UU., Anchor Books Doubleday, 3rd ed., 571 pp.
- Lisle, R.J., Walker, R.J., 2013, The estimation of fault slip from map data: The separation-pitch diagram: Tectonophysics, 583, 158-163, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.10.034>
- Nieto-Fuentes, R., Nieto-Samaniego, A.F., Xu, S.-S., Alaniz-Alvarez, S.A., 2014, Software for determining the true displacement of faults: Computers and Geosciences, 64, 35-40, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.11.010>.
- Peacock, D.C.P., Nixon, C.W., Rotevatn, A., Sanderson, D.J., Zuluaga, L.F., 2016, Glossary of fault and other fracture networks: Journal of Structural Geology, 92, 12-29, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2016.09.008>
- Ragan, D.M., 2009, Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques: New York, Cambridge University Press, 4th ed., 602 pp.
- Ramsay, J.G., Huber, M.I., 1987, The Techniques of Modern Structural Geology, Folds and Fractures: London, Academic Press, vol. 2, 462 pp.
- Xu, S.-S., Velasquillo-Martinez, L.G., Grajales-Nishimura, J.M., Murillo-Muñeton, G., Nieto-Samaniego, A.F., 2007, Methods for quantitatively determining fault displacement using fault separation: Journal of Structural Geology, 29, 1709-1720.
- Xu, S.-S., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., 2009, Quantification of true displacement using apparent displacement along an arbitrary line on a fault plane: Tectonophysics, 467, 107-118.
- Xu, H., Xu, S.-S., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., 2017, Slicken 1.0: Program for calculating the orientation of shear on reactivated faults: Computers & Geosciences, 104, 158-165, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.015>
- Yamada, E., Sakaguchi, K., 1995, Fault-slip calculation from separations: Journal of Structural Geology, 17, 1065-1070.
- Manuscrito recibido: agosto 30, 2022
 Manuscrito corregido recibido: septiembre 28, 2022
 Manuscrito aceptado: octubre 3, 2022