

Determinación de la dirección de los esfuerzos principales a través de análisis numérico y proyecciones estereográficas de la falla de Boconó en el sector Yacambú Estado Lara

Determination of the main stresses direction by numerical analysis and stereographic projection of the Boconó fault in the Yacambú, Lara State

Bongiorno, Francisco* ; Ucar, Roberto y Belandria, Norly
Dpto. de Geomecánica. Escuela de Geológica Facultad de Ingeniería ULA
Grupo de Investigaciones en Geología Aplicada (GIGA)
Mérida 5101. Venezuela
*frabon@ula.ve

Resumen

Este trabajo pretende determinar la dirección de los esfuerzos principales ejercidos en la Falla de Boconó a través de un método numérico, aplicando análisis vectorial y proyecciones estereográficas con el programa Stereo32. Para ello se necesitan los rumbos y buzamientos de las superficies de dos fallas, la Falla de Boconó y una falla sintética a ésta, que para este estudio, es la Falla Quebrada Higuierón. La condición necesaria para utilizar esta metodología es que las dos fallas deben tener la misma connotación indicada por los diagramas de Anderson. Los datos de las fallas analizadas, son transcurrentes con un ángulo de buzamiento alto de sus superficies con un rumbo general N-NE

Palabras clave: Falla de Boconó, proyección estereográfica, diagramas de Anderson, dirección de esfuerzos principales.

Abstract

This paper aims to determine the main stresses direction in the Boconó Fault through a numerical method, using vector analysis and stereographic projections with the program Stereo32. This requires the strikes and dips of the surfaces of two faults, the Boconó Fault and a synthetic fault to this, which for this study, is the Quebrada Higuierón Fault. The necessary condition for using this methodology is that the two faults must have the same connotation indicated by the Anderson diagrams. The analyzed faults data are transcurrent with a high dip angle of its surfaces with a general N-NE course.

Key words: Boconó fault, stereographic projection, Anderson diagrams, main stresses direction.

1 Introducción

El campo de esfuerzo que actúa en la parte norte de Suramérica es del tipo compresional en dirección oeste-noroeste de la Placa de América del Sur, este-sureste de la Placa del Caribe y este-noreste de la Placa de Nazca (Kelloog y Bonini, 1982). Por otro lado, la dirección oeste-noroeste de compresión de América del Sur fue confirmada por un análisis estructural de diaclasas y fracturas asociadas a este campo de esfuerzo (Scheidegger y Schubert, 1989). El estudio de los ammonites deformados en la región de Lara, aplicando el Método de

Blake arrojaron que la zona de compresión tiene como orientación principal nor-oeste (Bongiorno, 2008).

En el extremo Nororiental de Los Andes merideños, se presentan caracteres estructurales y estratigráficos debido al encuentro de ese sistema con la Cadena del Caribe, representadas por unidades cretácicas poco metamorfizadas, que afloran tanto al sur de la Falla de Boconó, en la serranía de Portuguesa, como al norte, en el Tocuyo, Carora y Barquisimeto (Stephan, 1977).

Este trabajo tiene como marco de estudio, la determinación de la dirección e inclinación de los esfuerzos aplicados en las fallas de Boconó y Quebrada Higuierón,

Sector Yacambú en el Estado Lara fig. 1, aplicando un análisis numérico vectorial a los rumbos y buzamientos de las 2 superficies de fallas a estudiar, cuyos resultados serán comparados con los obtenidos a través del programa computacional de proyecciones estereográficas STEREO 32, destacando que estas herramientas son confiables y muy precisas al momento de ser requeridas para el estudio del campo de esfuerzo en las fallas.

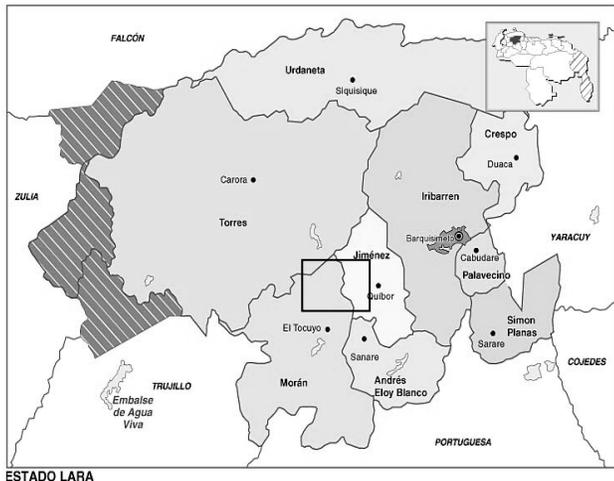


Fig. 1. Ubicación de la zona de estudio

2 Marco referencial

El método numérico para determinar la dirección de los esfuerzos principales es suponiendo que las 2 fallas se puedan representar vectorialmente y en forma plana a partir de la dirección del rumbo (ψ) y buzamiento (α) de los planos de falla. Para el caso estudiado en este trabajo, se tienen los datos de la falla de Boconó (ψ_1/α_1) y la Falla Quebrada Higuierón (ψ_2/α_2). Seguidamente, se deben obtener 2 vectores normales a estos 2 planos.

Para determinar los vectores normales a cada uno de los planos el procedimiento se puede observar a partir de la Fig. 2, en el cual se muestra un ejemplo donde se tiene un plano A, cuyo ángulo de inclinación o de buzamiento esta representado por (α_1). Se toma el eje “z” vertical y se proyecta el vector normal al plano, aplicando relaciones trigonométricas, se determina que (α_1) es el ángulo que forma el vector normal con el eje vertical “z”. Asimismo, en la fig. 2 se denota que la línea perpendicular al eje vertical “z”, indica la dirección de buzamiento o inclinación del plano, además esa línea esta en verdadero tamaño por lo que indica el azimut de la dirección de buzamiento.

Igualmente, en la fig. 2, se observa la posición del eje “x” donde se hace coincidir con el Norte del Sistema y, el eje “y” con el Este del Sistema.

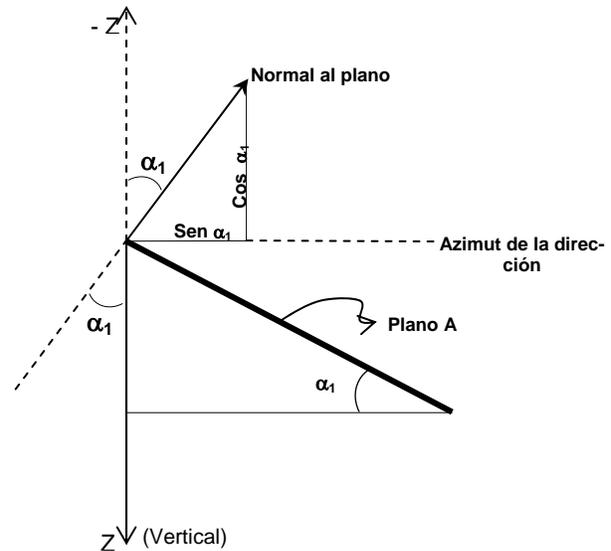


Fig. 2. Relaciones trigonométricas del plano con el eje “z” y el vector normal a ese plano

El vector normal se proyecta con el eje “z” de acuerdo al ángulo (α_1). Por otro lado, se proyecta el azimut de la dirección de buzamiento del plano A, el cual esta representado por el $\text{Sen } \psi_1$, a su vez este azimut forma un ángulo de $90-\psi_1$ con el eje “y” o la dirección Este.

Por consiguiente, el vector normal se expresa vectorialmente proyectándolo en las direcciones \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} mostradas en la fig. 3. (Ucar, 2004).

2.1 Determinación de la componente \vec{i} del vector normal a un plano.

La componente trigonométrica $\cos \alpha_1$ es perpendicular al plano formado por los ejes “x” e “y” (Norte y Este). Por ello, que la proyección del vector normal en la dirección “x” o \vec{i} , es la proyección de la componente $\text{Sen } \alpha_1$ así como se observa en la fig. 3. El valor de la componente \vec{i} del vector normal es, $\text{sen } \alpha_1 \cdot \cos \psi_1$

2.2 Determinación de la componente \vec{j} del vector normal a un plano.

La misma consideración que se realizó con la componente \vec{i} , la componente trigonométrica $\cos \alpha_1$ del vector normal es perpendicular al plano que contiene a los ejes “x” e “y”, por lo tanto solo se proyecta la componente $\text{sen } \alpha_1$. El valor de la componente \vec{j} del vector normal es, $\text{sen } \alpha_1 \cos 90-\psi_1 = \text{sen } \alpha_1 \sin \alpha_1$.

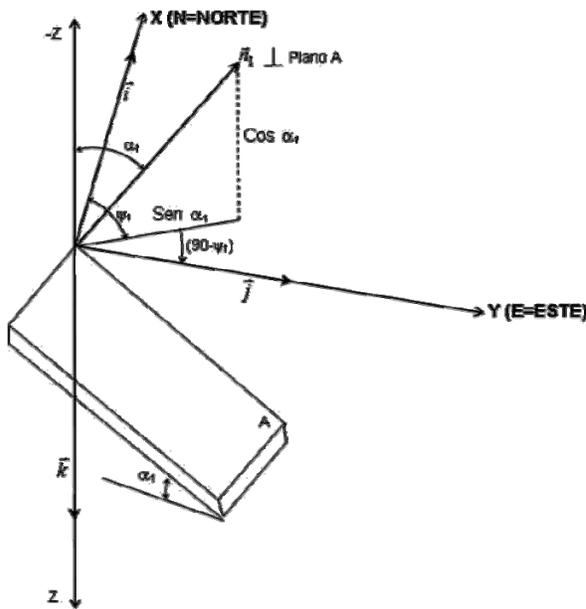


Fig. 3. Relaciones trigonométricas del plano con el eje “x”, “y”, “z”. (Ucar, 2004)

2.3 Determinación de la componente \bar{k} del vector normal a un plano.

De acuerdo a la fig. 3, la componente trigonométrica α_1 es perpendicular al plano que contiene a los ejes “x” y “z”, por lo tanto, la proyección de la componente $\cos \alpha_1$ representa la proyección del vector normal en la dirección “z” ó \bar{k} . El valor de la componente \bar{k} del vector normal es directamente, $\cos \alpha_1$. (Ucar, 2004).

Por tanto, si se considera la determinación del vector normal al plano de la Falla de Boconó, la ecuación queda expresada de la siguiente manera:

$$\bar{n}_1 = \text{sen} \alpha_1 \cos \psi_1 \bar{i} + \text{sen} \alpha_1 \text{sen} \psi_1 \bar{j} - \cos \alpha_1 \bar{k} \quad (1)$$

De la misma manera, el vector normal al plano de la Falla Quebrada Higuerón se expresa:

$$\bar{n}_2 = \text{sen} \alpha_2 \cos \psi_2 \bar{i} + \text{sen} \alpha_2 \text{sen} \psi_2 \bar{j} - \cos \alpha_2 \bar{k} \quad (2)$$

2.4 Calculo del esfuerzo principal medio σ_2 .

La intersección de los planos arroja como resultado una recta. De acuerdo a los diagramas de Anderson, el esfuerzo principal medio σ_2 , coincide con la dirección de esa recta de intersección. Para obtener vectorialmente esa recta intersección, se aplica el producto vectorial entre los vectores normales de esos planos, cuyo resultado da un vector

ortogonal a los 2 vectores normales, que coincide con la dirección de la recta intersección.

$$\bar{S} = \bar{n}_1 \times \bar{n}_2 \quad (3)$$

De acuerdo a ese producto vectorial, se obtiene el vector \bar{S} y representa la dirección del esfuerzo principal medio σ_2 .

$$\bar{S} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \text{sen} \alpha_1 \cos \psi_1 & \text{sen} \alpha_1 \text{sen} \psi_1 & -\cos \alpha_1 \\ \text{sen} \alpha_2 \cos \psi_2 & \text{sen} \alpha_2 \text{sen} \psi_2 & -\cos \alpha_2 \end{vmatrix} \quad (4)$$

El vector \bar{V}_s representa el vector unitario.

$$\bar{V}_s = \frac{\bar{S}}{|\bar{S}|} = V_x \bar{i} + V_y \bar{j} + V_z \bar{k} \quad (5)$$

En la fig. 4, se muestra la disposición cualquiera del vector unitario \bar{V}_s en la misma dirección de la línea de intersección de los dos planos, en el sistema coordenado “z”, que representa la profundidad. El ángulo α_s es el ángulo de inmersión de la línea de intersección de los 2 planos, como se puede ver en dicha fig., el vector \bar{V}_s se descompone en el eje “z” y en la dirección de azimut (ψ_s), ya que por la perspectiva de la figura, el plano formado por los ejes “x” e “y”, no se observa. (Ucar, 2004).

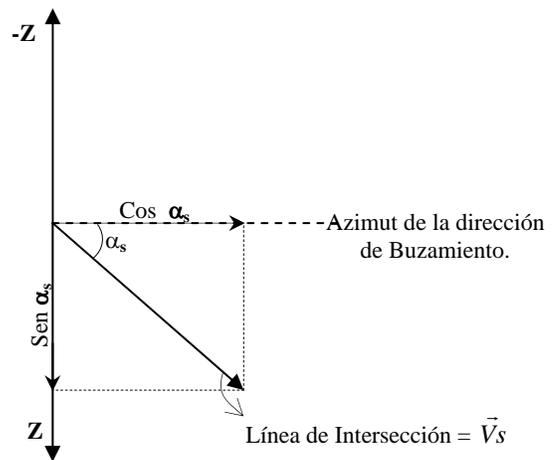


Fig. 4. Relaciones trigonométricas del vector Intersección \bar{V}_s con la dirección “z” (Profundidad)

Igualmente, la fig. 5, muestra las relaciones trigonométricas del vector intersección \bar{V}_s con los ejes coordenados “x”, “y” y “z”. De esa figura, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\vec{V}_s = V_x \vec{i} + V_y \vec{j} + V_z \vec{k} \quad (6)$$

En la ecuación (6) se sustituyen los valores de V_x, V_y y V_z , en función de los ángulos α_s y ψ_s y se obtiene la siguiente expresión:

$$\vec{V}_s = \cos \alpha_s \cos \psi_s \vec{i} + \cos \alpha_s \operatorname{sen} \psi_s \vec{j} + \operatorname{sen} \alpha_s \vec{k} \quad (7)$$

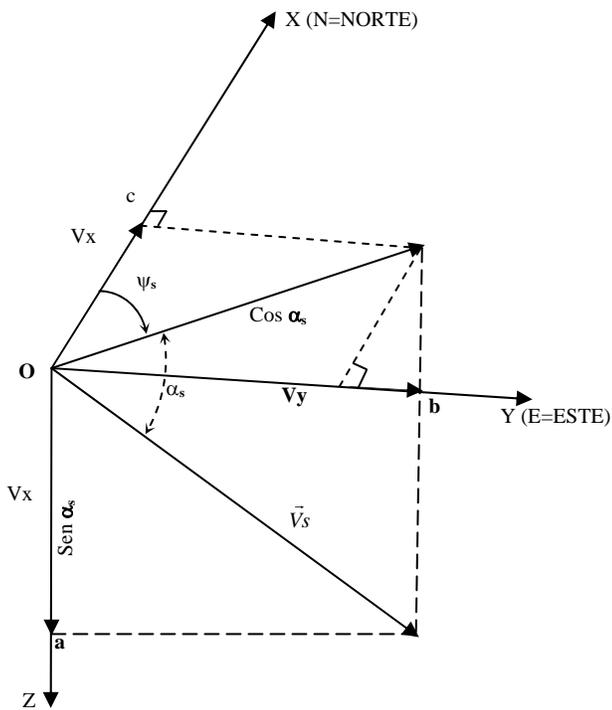


Fig. 5. Relaciones trigonométricas del vector Intersección \vec{V}_s con los ejes coordenados "x", "y" y "z"

Se igualan los términos de \vec{k} de las ecuaciones (5) y (7) y se obtiene,

$$\operatorname{sen} \alpha_s = V_z \quad (8)$$

El valor de α_s es el ángulo de inmersión o plunge de la recta de intersección y por lo tanto es el ángulo de inmersión de σ_2 . Por otro lado, el ángulo ψ_s es la dirección de aplicación del esfuerzo σ_2 y esta ligado a la componente \vec{i} y \vec{j} del vector \vec{V}_s , ya que la componente \vec{k} se encuentra perpendicular al plano formado por los ejes coordenados "x" e "y". Por lo antes expuesto se obtiene la siguiente ecuación.

$$\tan \psi_s = \frac{V_y \vec{j}}{V_x \vec{i}} \quad (9)$$

2.5 Cálculo del esfuerzo principal menor σ_3 .

Para calcular el esfuerzo principal menor σ_3 , se toma un vector \vec{n} , el cual, se supone que es paralelo al esfuerzo principal σ_3 , esta representado por la ecuación (10).

$$\vec{n} = n_x \vec{i} + n_y \vec{j} + n_z \vec{k} \quad (10)$$

De acuerdo a los diagramas de Anderson, los esfuerzos principales σ_1, σ_2 y σ_3 , son perpendiculares entre si. Teniendo en consideración lo antes descrito, el vector \vec{V}_s , que indica la dirección de σ_2 , perpendicular a este, debería estar el esfuerzo principal σ_3 . Para ello se emplea el producto escalar de los vectores \vec{V}_s y \vec{n} y el resultado es igual a cero como se muestra en la ecuación (11).

$$\vec{n} \cdot \vec{V}_s = 0 \quad (11)$$

En la fig. 6, se muestra la relación angular entre los diferentes vectores normales (\vec{n}_1 y \vec{n}_2) y el vector \vec{n} , que se hace coincidir con la bisectriz de los planos 1 y 2, que a su vez perpendicular a la dirección de intersección de de esos planos y a σ_2 . (Ucar, 2004).

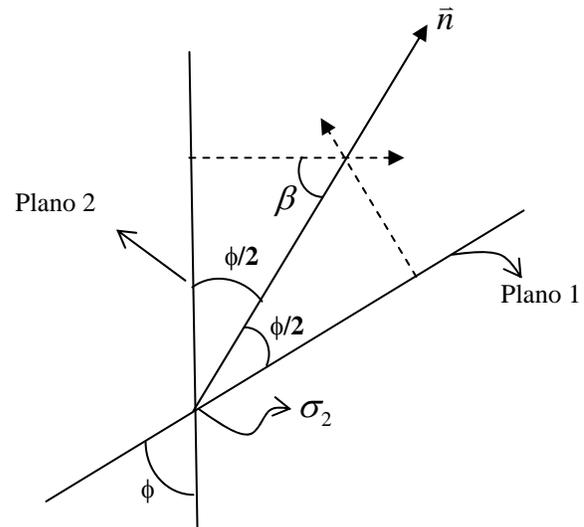


Fig. 6. Relaciones trigonométricas del vector Intersección \vec{V}_s con los ejes coordenados "x", "y" y "z"

Para obtener el ángulo ϕ que se forma entre los planos 1 y 2, se utiliza la ecuación (11).

$$\cos \phi = \frac{\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2}{|\vec{n}_1| \cdot |\vec{n}_2|} \quad (12)$$

Teniendo en cuenta que los módulos de los vectores unitarios son iguales a uno, la ecuación (12) queda expresada así:

$$\cos \phi = \vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2 \tag{13}$$

Posteriormente, se necesitan obtener dos ecuaciones que contengan las componentes del vector \vec{n} . Para ello se emplea de nuevo la ecuación (12), luego se calcula el ángulo que forma los vectores normales a los planos 1 y 2 y el vector opuesto a $\phi/2$ que es igual a β , tal como se observa en la fig. 6.

$$\beta = 90 - (\phi / 2) \tag{14}$$

Aplicando la ecuación (12), entre los vectores \vec{n} y \vec{n}_1 y \vec{n} y \vec{n}_2 se obtienen las otras 2 ecuaciones (15) y (16).

$$\cos \phi_{\vec{n}\vec{n}_1} = [nx + ny + nz] \cdot [sen\alpha_1 \cos\psi_1 + sen\alpha_1 sen\psi_1 - \cos\alpha_1] \tag{15}$$

$$\cos \phi_{\vec{n}\vec{n}_2} = [nx + ny + nz] \cdot [sen\alpha_2 \cos\psi_2 + sen\alpha_2 sen\psi_2 - \cos\alpha_2] \tag{16}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones formadas por las ecuaciones (11), (15) y (16) se obtiene las componentes del vector \vec{n} . Se halla el vector unitario del vector \vec{n} de acuerdo a la ecuación (17) y dicha ecuación representa la dirección del esfuerzo principal σ_3 . (Ucar, 2004).

$$\vec{N} = \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \tag{17}$$

Seguidamente, se igualan las componentes k de los vectores \vec{N} y \vec{V}_s , obteniéndose la ecuación (18), la cual arroja el valor de α_n que es el ángulo de inclinación donde está aplicado el esfuerzo principal σ_1 .

$$sen\alpha_n = nz \tag{18}$$

Por otro lado, el ángulo ψ_n es la dirección de aplicación del esfuerzo σ_3 , y esta ligado a la componente i y j del vector \vec{N} , ya que la componente k se encuentra perpendicular al plano formado por los ejes coordenados "x" e "y". Por lo antes expuesto se obtiene la siguiente ecuación.

$$\tan\psi_n = \frac{Ny\vec{j}}{Nx\vec{i}} \tag{19}$$

2.6 Cálculo del esfuerzo principal mayor σ_1 .

Como se indica anteriormente, de acuerdo a Anderson, los esfuerzos principales son perpendiculares entre sí. Si el vector \vec{V}_s indica la dirección del esfuerzo principal intermedio σ_2 y, \vec{N} indica la dirección del esfuerzo principal menor σ_3 , al emplear el producto vectorial entre estos 2 vectores, se obtiene la dirección Esfuerzo Principal mayor σ_1 . Al emplear las ecuaciones (7 y 17) se obtiene el vector \vec{m} que indica la dirección del esfuerzo principal mayor.

$$\vec{m} = \vec{N} \times \vec{V}_s \tag{20}$$

De la misma manera y apoyándose en la fig. 5, se obtiene la proyección del vector \vec{m} en los sistemas coordenados "x", "y" y "z", dando lugar a la ecuación (21).

$$\vec{M} = \cos\alpha_m \cos\psi_m \vec{i} + \cos\alpha_m sen\psi_m \vec{j} + sen\alpha_m \vec{k} \tag{21}$$

Al igualar las componentes k de los vectores \vec{m} y \vec{M} se obtiene la ecuación (22), la cual arroja el valor de α_m que es el ángulo de inclinación donde está aplicado el esfuerzo principal σ_1 .

$$sen\alpha_m = mz \tag{22}$$

De igual manera, el ángulo ψ_m es la dirección de aplicación del esfuerzo σ_1 y esta ligado a la componente i y j del vector \vec{M} , ya que la componente k se encuentra perpendicular al plano formado por los ejes coordenados "x" e "y". Por lo antes expuesto se obtiene la siguiente ecuación.

$$\tan\psi_m = \frac{My\vec{j}}{Mx\vec{i}} \tag{23}$$

2.7 Diagramas de Anderson

La superficie terrestre debe ser un plano en el cual no hay esfuerzo de cizalla, puede suponerse que una de las direcciones principales de esfuerzo debe ser aproximadamente vertical tanto en superficie como hasta cierta profundidad bajo la superficie, bajo esta premisa,

(Anderson, 1951) propone la clasificación de las fallas en tres tipos como se muestran en la fig. 7.

En la fig. 7 (a) se muestra fallas normales con σ_1 vertical; en la (b) fallas inversas con σ_3 vertical y (c) fallas transcurrentes con σ_2 ; en la misma figura, al lado de cada falla se indica los diferentes tipos de proyección estereográficas para cada falla. Estas proyecciones serán construidas en forma analítica y posteriormente serán corroboradas con el programa computacional Stereo32.

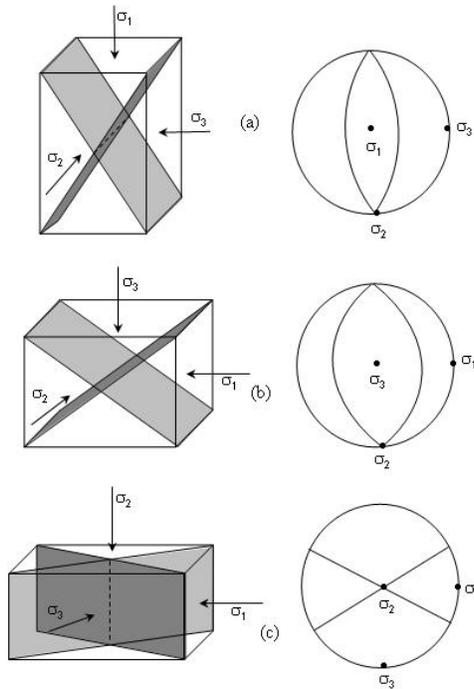


Fig. 7 Planos de fallas (sombreados) y direcciones de esfuerzo principal cuando uno de estos esfuerzos es vertical

3 Resultados del análisis vectorial

Los datos de campo de la superficie de Falla de Boconó en la zona de estudio es: rumbo N45° E y buzamiento 80° NO y la Falla Quebrada Higuierón tiene un rumbo N 5° W y buzamiento 81° SO; en estas dos fallas su comportamiento principal es de transcurrencia dextral. Por medio del método de análisis vectorial y tomando en consideración las fig. 2 y 3, se calcula la dirección de buzamiento (ψ) de las fallas:

- Plano 1. Falla de Boconó.

$$\psi_1 = 315^\circ; \alpha_1 = 80^\circ$$

- Plano 2. Falla Quebrada Higuierón.

$$\psi_2 = 265^\circ; \alpha_2 = 81^\circ$$

Empleando los valores de estos ángulos en las ecuaciones (2) y (3), se obtienen los vectores normales a cada uno de los planos:

$$\vec{n}_1 = 0,696\vec{i} - 0,696\vec{j} - 0,174\vec{k} \quad (24)$$

$$\vec{n}_2 = -0,086\vec{i} - 0,983\vec{j} - 0,156\vec{k} \quad (25)$$

La dirección del esfuerzo σ_2 se obtiene mediante el producto vectorial de los vectores representados en (24) y (25), empleando las ecuaciones (3) y (4).

$$S = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0,696 & -0,696 & -0,174 \\ -0,087 & -0,983 & -0,156 \end{vmatrix}$$

$$S = -0,063\vec{i} + 0,124\vec{j} - 0,745\vec{k} \quad (25)$$

Aplicando la ecuación (5), se obtiene;

$$\vec{v}_s = 0,083\vec{i} - 0,164\vec{j} + 0,983\vec{k} \quad (26)$$

La ecuación (26) representa la dirección de σ_2 , las componentes de este vector se igualan de acuerdo a la ecuación (7) y se obtiene.

$$\text{sen}\alpha_s = 0,983 \quad (27)$$

De esta manera el ángulo de inclinación o de inmersión de σ_2 es,

$$\alpha_s = 79,37^\circ \quad (R1)$$

La ecuación (9) junto con las componentes de la ecuación (26), se obtiene el azimut del esfuerzo σ_2 .

$$\tan \psi_s = \frac{-0,164}{0,083}$$

$$\psi_s = -63,44^\circ \quad (28)$$

El ángulo de azimut es negativo, debido a que esta medido antihorario con respecto al norte, por lo tanto el azimut del esfuerzo es $360 - 63,44 = 296,56^\circ$. De esta manera el azimut o dirección de aplicación del esfuerzo de σ_2 es,

$$\psi_s = 296,56^\circ \quad (R2)$$

Para calcular el esfuerzo σ_3 se emplea la ecuación (10), las componentes que representan ese vector es paralelo a ese esfuerzo y se toma en cuenta la ecuación (11) y de acuerdo a la fig. 6; apoyándose en la ecuación (12) se obtiene el ángulo que forma los 2 planos y se llamará ϕ_{12}

$$\phi_{12} = 49,33^\circ \quad (29)$$

Por otro lado; el ángulo que forma los vectores \vec{n}_1 y \vec{n}_2 con \vec{n} se obtiene de acuerdo a la ecuación (14) y es $65,33^\circ$ ya que la dirección del esfuerzo principal σ_3 coincide con la bisectriz del ángulo que divide ambos planos de falla por ello las tres ecuaciones para obtener las componentes de ese esfuerzo son (11), (15) y (16),

$$0,083nx - 0,164ny + 0,983nz = 0$$

$$0,696nx - 0,696ny - 0,174nz = \cos(n_1, n) = 0,417$$

$$0,087 n_x - 0,983 n_y - 0,156 n_z = \cos(n_2 \cdot n) = 0,417 \quad (30)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones, se obtiene, $n_x = 0,153\bar{i}$; $n_y = -0,424\bar{j}$; $n_z = -0,083\bar{k}$ Por lo tanto, el vector \bar{n} esta definido como,

$$\bar{n} = 0,153\bar{i} - 0,424\bar{j} - 0,083\bar{k} \quad (31)$$

Se calcula el vector unitario a \bar{n} , como sigue,

$$\frac{\bar{n}}{|\bar{n}|} = -0,335\bar{i} + 0,924\bar{j} + 0,182\bar{k} \quad (32)$$

Ese vector unitario indica la dirección de σ_3 . Por otro lado se conoce que,

$$\frac{\bar{n}}{|\bar{n}|} = \cos \alpha_n \cos \psi_n \bar{i} + \cos \alpha_n \text{sen} \psi_n \bar{j} + \text{sen} \alpha_n \bar{k} \quad (33)$$

Al comparar las ecuaciones (32) y (33) en la componente \bar{k} , se obtiene,

$$\text{sen} \alpha_n = 0,182 \quad (34)$$

De esta manera el ángulo de inclinación o de inmersión de σ_3 es,

$$\alpha_n = 10,49^\circ \quad (R3)$$

Al aplicar la ecuación (19) junto con las componentes de la ecuación (32), se obtiene el azimut del esfuerzo σ_3 .

$$\tan \psi_n = \frac{0,924}{-0,335} = -70,07^\circ \quad (35)$$

De esta manera el ángulo de azimut o dirección de aplicación del esfuerzo σ_3 como esta medido antihorario es $180 - 70,07^\circ = 109,92^\circ$, por tanto,

$$\psi_n = 109,92^\circ \quad (R4)$$

Por último, el vector paralelo al esfuerzo principal mayor σ_1 se determina a través del producto vectorial entre las ecuaciones (26) y (32),

$$\bar{m} = \frac{\bar{n}}{|\bar{n}|} \times \bar{V}_s = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ -0,335 & 0,924 & 0,182 \\ 0,083 & -0,164 & 0,983 \end{vmatrix} \quad (36)$$

Resultando,

$$\bar{m} = 0,937\bar{i} + 0,344\bar{j} - 0,021\bar{k} \quad (37)$$

De acuerdo a la ecuación (22), arroja el valor de α_m que es el ángulo de inclinación donde está aplicado el esfuerzo principal σ_1 .

$$\begin{aligned} \text{sen} \alpha_m &= -0,021 \\ \alpha_m &= -1,20^\circ \end{aligned} \quad ((R5)$$

Se debe tomar positivo α_m porque se debe representar es la inclinación con respecto a la horizontal o el ángulo de inmersión y la dirección de inclinación ψ_s se le suma 180° . De acuerdo a la ecuación (23) junto con las componentes de la ecuación (37), se calcula el valor de ψ_m que es el ángulo de azimut o dirección donde está aplicado el esfuerzo principal mayor σ_1 .

$$\begin{aligned} \tan \psi_m &= \frac{0,344}{0,947} = 20,16^\circ \\ \psi_m &= 20,16^\circ + 180^\circ = 200,16^\circ \end{aligned} \quad (R6)$$

4 Verificación de resultados por proyecciones estereográficas

Un método gráfico para calcular la dirección de los esfuerzos principales, apoyados en los diagramas de Anderson, son las proyecciones estereográficas. Para la verificación de los resultados obtenidos vectorialmente, se empleó el programa Stereo32. La fig. 8 muestra los datos suministrados al programa y los resultados arrojados el mismo. La proyecciones estereográficas 1 y 3 corresponden a la Falla Quebrada Higuerón y a la Falla de Boconó respectivamente.

El programa para determinar la dirección de los esfuerzos principales a partir de esas proyecciones, calcula los polos de cada una de ellas y posteriormente une los mismos con una curva que representa el plano de movimiento tal como se observa en la fig. 8, en la proyección 4.

Simultáneamente se calcula la bisectriz del ángulo obtuso con la ayuda de los dos polos y se une con el centro de la estereofalsilla cuya representación esta en la fig. 8 proyección 5. Donde la proyección 5 corta a la proyección 4, se localiza el esfuerzo principal σ_3 , allí se mide directamente la dirección de de ese esfuerzo y el ángulo de aplicación se obtiene desplazando ese punto hasta la línea horizontal.

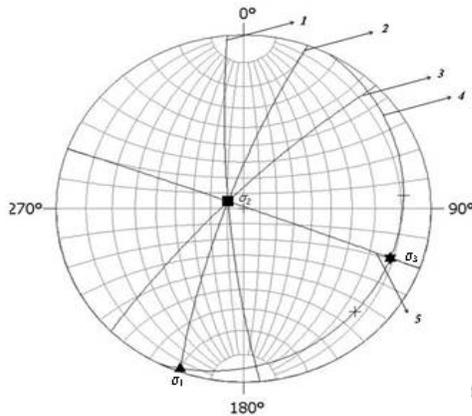


Figura 8. Proyecciones estereográficas y ubicación de los esfuerzos principales de las fallas de Bocono y Quebrada Higuieron (1) proyección 1, Orientación Falla Higuieron, (2) proyección 2, bisectriz del ángulo agudo (3) proyección 3, Falla de Boconó (4) proyección 4, plano de movimiento (5) proyección 5, bisectriz del ángulo obtuso.

Para calcular el esfuerzo principal mayor σ_1 se traza una proyección perpendicular a la proyección 5 que pase por el punto de intersección de las proyecciones 1 y 3, esa proyección es la 2 mostrada en la figura 8, que coincide con la bisectriz del ángulo agudo. Donde la proyección 2 corte a la proyección 4, allí se localiza el esfuerzo principal mayor, ese punto se lleva a la línea horizontal de la proyección y se localiza la inclinación.

De acuerdo a los diagramas de Anderson de la fig. 7, el esfuerzo intermedio principal σ_2 se localiza donde las 2 superficies de falla se intersectan, es decir, donde las proyecciones 1 y 3 de la fig. 8, se intersectan.

En la fig. 9 se indica la pantalla que arroja el módulo del cálculo de los esfuerzos del programa Stereo32, en la ventana EIGENVECTORS se calculan la dirección de buzamiento (Azimut) y la inclinación (Plunge) de los esfuerzos principales que actúan en la zona de estudio.

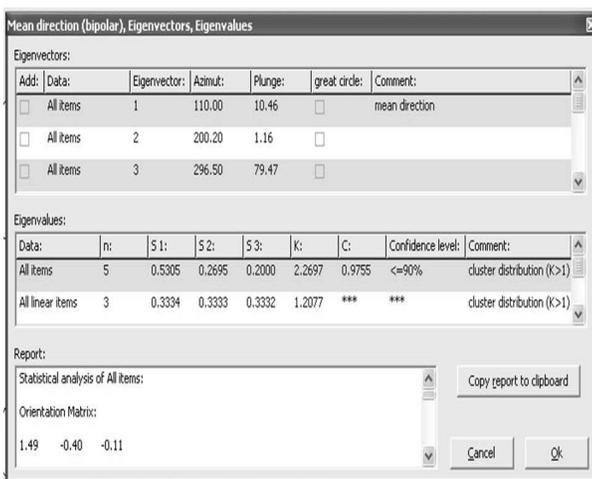


Fig. 9. Pantalla que muestra los resultados con el Programa Stereo32

5 Análisis de los resultados

Al comparar los métodos de análisis vectorial con el programa Stereo32, se obtienen que por cualquiera de los 2 métodos, el resultado es similar, los errores son aceptables debido que en el análisis vectorial se utilizaron 3 decimales.

Los resultados de acuerdo al Programa Stereo32 son:

• Para el Esfuerzo Principal menor σ_3 :

Azimut o dirección de aplicación del esfuerzo: 110°

Inclinación: 10,46°.

Estos resultados coinciden con los resultados (R3) y (R4) del análisis vectorial.

• Para el Esfuerzo Principal intermedio σ_2 :

Azimut o dirección de aplicación del esfuerzo: 296,50°

Inclinación: 79,47°

Estos resultados coinciden con los resultados (R1) y (R2) del análisis vectorial.

• Para el Esfuerzo Principal mayor σ_1 :

Azimut o dirección de aplicación del esfuerzo: 200,20°

Inclinación: 1,16°

Estos resultados coinciden con los resultados (R5) y (R6) del análisis vectorial.

6 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, el esfuerzo principal menor σ_3 se localiza al N 70° O (S 70° E) del área de estudio. Por otro lado, el esfuerzo principal intermedio σ_2 es localizado al N 63° O (S 63° E) y el esfuerzo principal mayor σ_1 es localizado N 20° E (S 20° O). Esta dirección coincide con los sistemas de Anderson donde el esfuerzo σ_1 se encuentra en el ángulo agudo formado por las dos fallas, el esfuerzo σ_3 se ubica en el ángulo obtuso y el esfuerzo intermedio coincide con la intersección de los dos planos.

Por cualquiera de los métodos empleados, los esfuerzos principales mayor y menor son perpendiculares entre sí, esto se puede corroborar por la direcciones geográficas calculadas N 70° O y N 20° E. Este resultado corresponde con lo indicado por los diagramas de Anderson para las fallas transcurrentes.

Los dos métodos son eficaces y efectivos para calcular la dirección de los esfuerzos apoyándose en los diagramas de Anderson. Es práctico emplear el programa Stereo32, sin embargo, estos resultados pueden ser corroborados por el análisis vectorial.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por CDCHTA-ULA a través del proyecto I-1240-10-02-B, institución a la cual se le extiende nuestro agradecimiento e importante apoyo.

Referencias

- Anderson EM, 1951, The Dynamics of Faulting, 2nd ed., Edinburgh, Oliver and Boyd, pp. 206.
- Bongiorno F, 2008, Aplicación de la ecuación espiral logarítmica en el análisis de la deformación de los ammonites de la Formación La Luna en el Estado Lara, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes.
- Kelloogg N y Bonini W, 1982, Subduction of the Caribbean Plate and Basement uplifts in the overriding South American Plate, Tectonics Vol. 1, pp. 251-276.
- Scheidegger A y Schubert C, 1989, Neotectonic provinces and joint orientations of northern South America, Journal of South American Earth Sciences, 2, pp. 331-341
- Stéphan F, 1977, El contacto cadena Caribe-Andes Meridionales entre Carora y el Tocuyo, Edo. Lara, Memoria, V Congreso Geológico Venezolano, Caracas, Tomo 2, pp. 789-816.
- Ucar R, 2004, Manual de Anclajes, U.D. Proyectos, E.T.S.I. Minas – Universidad Politécnica de Madrid, pp. 153- 185.

Recibido: 14 de marzo de 2010

Revisado: 26 de marzo de 2011

