



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

Análisis geométrico, cinemático y temporal de estructuras en un sistema de vetas del sector costero de cañete-lima, mediante el uso de aprendizaje no supervisado (lda-pca)

Abraham Arana¹, Kevin Espinoza¹, Ronald Rutti¹, Aldo Carlos^{1,2}

¹Universidad Nacional de Ingeniería, ²Geolog.IA

RESUMEN

El análisis cinemático, geométrico y temporal de estructuras en el sistema de vetas en Cañete y en la costa limeña en general, mediante el uso de algoritmos de aprendizaje no supervisado, han permitido definir criterios sistemáticos de relaciones entre variables estructurales para reconocer regímenes tectónicos. El estilo estructural costero es claramente extensional, y los eventos de reactivación no solo muestran características transtensionales - transpresionales sino también compresivas. De los datos se puede observar que para las familias que muestran una correlación $R > 0.7$ entre el plunge σ_1 (o plunge σ_3) y el buzamiento son parte de un régimen de tendencia extensional (o compresional). El presente trabajo muestra una forma objetiva de trabajar poblaciones de datos cinemáticos y permite desarrollar interpretaciones tectónicas considerando un mayor número de variables, evitando interpretaciones sesgadas influenciadas por conceptos teóricos basados solo en la geometría y estilo estructural de los fallamientos.

PALABRAS CLAVE: estilo estructural, transtensional-transpresional, extensional, compresional

ABSTRACT

The kinematic, geometric and temporal analysis of structures in the vein system in Cañete and in the Lima coast, by unsupervised learning algorithms, have allowed the definition of systematic criteria of relationships between structural variables to recognize tectonic regimes. The coastal structural style is clearly extensional, and the reactivation

events show not only transtensional-transpressive but also compressive characteristics. From the data can be observed that the families that show a correlation $R > 0.7$ between the dip and plunge σ_1 (or plunge σ_3), are part of an extensional (or compressional) regime. The present work shows an objective way of working populations of kinematic data and allows to develop tectonic interpretations considering a greater number of variables, avoiding biased interpretations influenced by theoretical concepts based only on the geometry and structural style of the faults.

KEYWORDS: structural style, transtensional-transpressive, extensional, compressional

INTRODUCCIÓN

El estudio cronológico de fallas en la margen costera de los andes resulta una tarea difícil debido a que gran parte de las fallas existentes son de múltiple reactivación con estructuras heredadas de alto ángulo, que presentan capacidad de refractar esfuerzos. La relación de corte entre fallas puede ser un criterio importante, pero a la vez engañoso, ya que muchas veces las estrías pertenecen a movimientos posteriores a la formación del mismo plano.

Trabajos en la margen costera, como el de Viveen et al (2018), sostiene que el antearco peruano ha sido dominado por un régimen extensional - transtensional. Ayala (2019) estudia la localidad costera del Morro Solar mediante medición de indicadores cinemáticos, y reconoce una influencia compresiva asociada a una convergencia oblicua

durante el Cenozoico. Sin duda, comprender la temporalidad de esfuerzos es más complejo que reconocer el estilo estructural, y una herramienta complementaria puede ser el análisis estadístico de aprendizaje no supervisado, donde se pueden reconocer familias de estructuras en función a sus variables geométricas (heradadas) y cinemáticas, estas familias responden a tensores específicos ordenables en tiempo mediante un ajuste de observaciones geológicas. El presente trabajo muestra una revisión estadística general de las fallas del sector costero de Lima y se centra en el análisis de estructuras pre, syn y post mineralización de un sistema de vetas en Cañete-Lima.

METODOLOGÍA

Las observaciones regionales se basan en el análisis estadístico de estrias de 71 planos de fallas distribuidos en siete localidades de Lima (Cañete - Huacho) y las locales se basan en el estudio de 121 planos de fallas presentes en un sistema vetífero. Las variables obtenidas en campo son azimut, buzamiento y número cinemático, a partir de estos datos se hace el cálculo del trend y plunge de la estria, σ_1 y σ_3 con el método de diedros rectos. El número cinemático es el valor del pitch incluyendo la dirección del mismo, donde los valores de 0-90° implican un movimiento normal-sinextral, 90°-180° normal-dextral, 180°-270° inversa-dextral y 270°-360° inversa sinextral.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL

La zona costera se caracteriza por la ausencia de grandes sistemas de plegamientos como los que se pueden observar en rocas de la misma edad, hacia el dominio de la Cordillera Occidental. El estilo estructural predominante en el dominio costero es extensional, sin embargo, se observan múltiples reactivaciones en un mismo plano de falla estudiado. De los datos regionales se observa que el 59.1% presentan buzamientos mayores a 70°, el 33.6% de las fallas presentan un buzamiento entre 70° y 50°, y solo el 7% tienen un buzamiento menor a 50°. También se tiene que el 67% presentan un plunge de estria entre el 0 y 25°, el 28% presentan un plunge de ángulo intermedio y el 5% presenta valores mayores a 70°, esto muestra que los principales movimientos observables en el sector costero de Lima son transcurrentes en fallas de alto ángulo. A nivel general se tiene que el 78% de las estructuras tienen componente normal y el 22% un componente inverso.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

La zona local de estudio presenta diques máficos NE limitados en extensión por sistemas NW, las

estructuras mineralizadas se encuentran cortando estos diques o emplazados en dirección subparalela, otra familia de diques NW se encuentra cortando la estructura previas. Tanto diques como vetas son desplazados por un grupo de estructuras en forma sinextral por un conjunto de fallas NW - NNW. Por último, se ha reconocido una importante familia de estructuras de componente compresiva de dirección NE y NW. De los datos locales se observa que el 78.7% presentan buzamientos mayores a 70°, el 17.1% de las fallas presentan un buzamiento entre 70° y 50°, y solo el 4.2% tienen un buzamiento menor a 50°. El plunge de estria presenta un 37.4% de datos con ángulos entre 0 y 25°, un 45.4% con ángulos intermedios y un 17.2% con alto ángulo (70° - 90°), esto muestra que en relación con los datos regionales que la predominancia transcurrente disminuye. De todos los datos se reconoce que el 51.5% de las estructuras tienen componente normal y el 48.5% un componente inverso, que en comparación con los datos regionales se evidencia un aumento de componente compresiva.

ANÁLISIS DE VARIABLES CINEMÁTICAS

El plunge de toda estria en un plano de falla siempre se limita a seguir una tendencia a la función seno absoluto del número cinemático por el valor del ángulo de buzamiento de dicha falla, mientras que el plunge del σ_1 presenta un comportamiento semejante al plunge de estria pero con ángulos mayores a 45° para estructuras de dominio extensional y el plunge del σ_3 de la misma forma para estructuras compresionales (Fig. 2b,d). Cada familia de fallas está vinculada a un tensor de esfuerzos representado por azimuts σ_1 - σ_3 con tendencia perpendicular entre sí, por tal motivo, en un diagrama azimut σ_1 vs azimut σ_3 se mostrará una alta correlación para un mismo grupo de fallas y se reconocerá un mínimo de tensores actuantes (Fig. 2c), sin embargo, es posible que existan tensores semejantes en azimut de sigmas pero con diferencias en plunge, para esto puede ser útil realizar un Análisis de Discriminante Lineal (LDA) y un Clustering de los datos cinemáticos para reconocer fácilmente estas diferencias sutiles (Fig. 2a). En toda data cinemática se reconoce una correlación intrínseca entre el plunge de σ_3 y el plunge de la estria (Fig. 3b), valores bajos de ambos se asocia a fallamientos de dominio transcurrente, valores altos de ambos definen una tendencia compresiva, mientras que valores altos del plunge de estria y valores medios a bajos de plunge de σ_3 se asocian a una tendencia extensional (Fig. 3b). Así mismo se observa que la variable buzamiento muestra

una alta correlación ($R > 0.7$) con el plunge de σ_1 para estructuras extensionales y con el plunge

de σ_3 para estructuras compresionales (Fig 3. c,e).
DISCUSIÓN

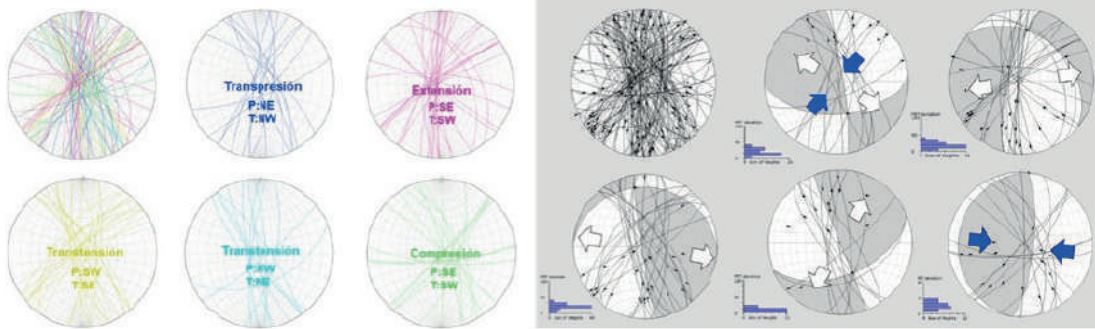


Figura 1. a. Clustering de fallas en función a las variables cinemáticas b. Tensores de esfuerzos asociados a las familias de fallas.

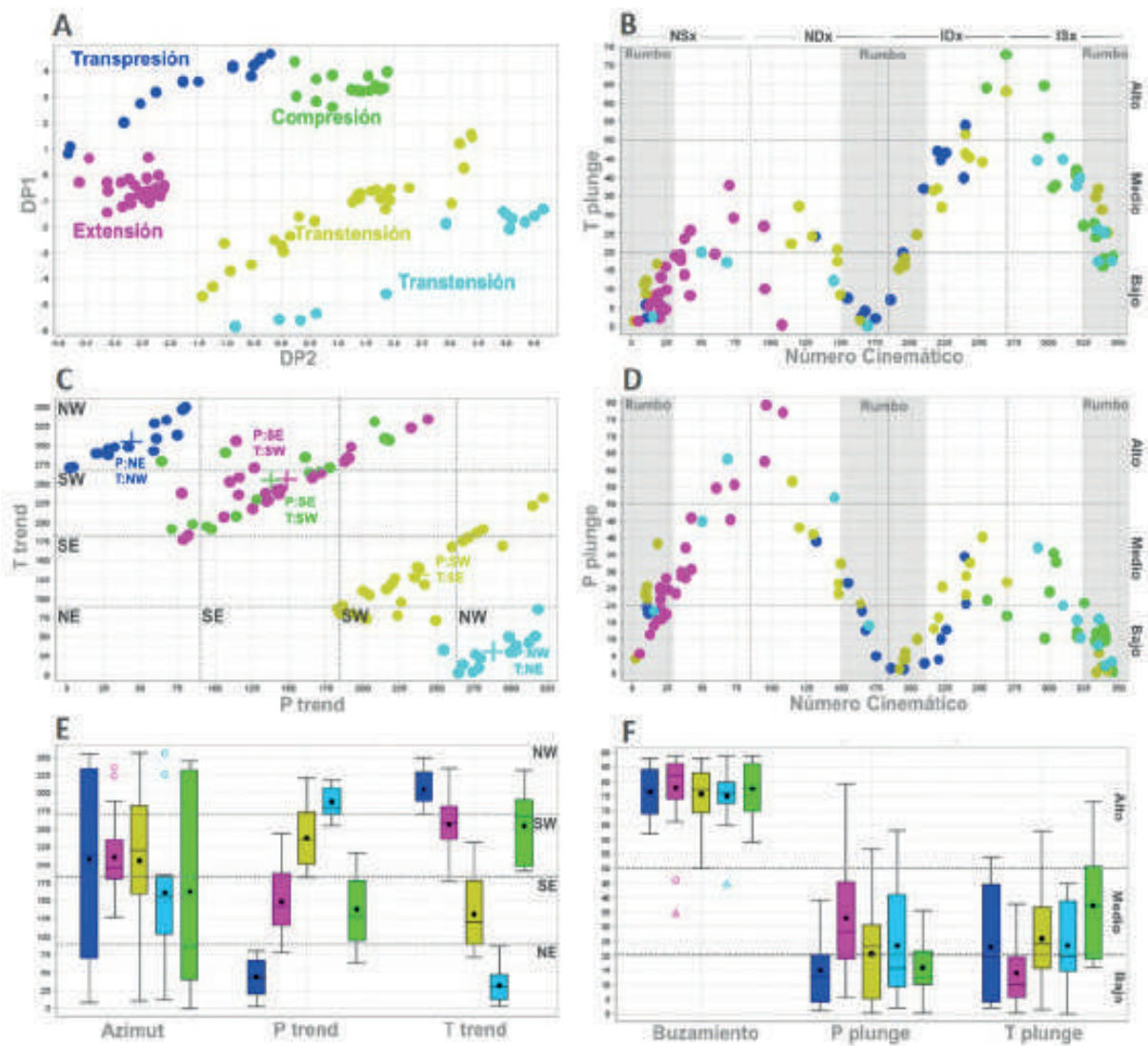


Figura 2. (A). Datos estructurales expresados en un diagrama de DPA (Discriminant Project Analysis) con leyenda basada en un Clustering, se reconocen cinco diferentes familias (B). Diagrama plunge σ_3 vs número cinemático, se observan valores altos para estructuras inversas. (C). Diagrama azimut σ_3 vs azimut σ_1 .

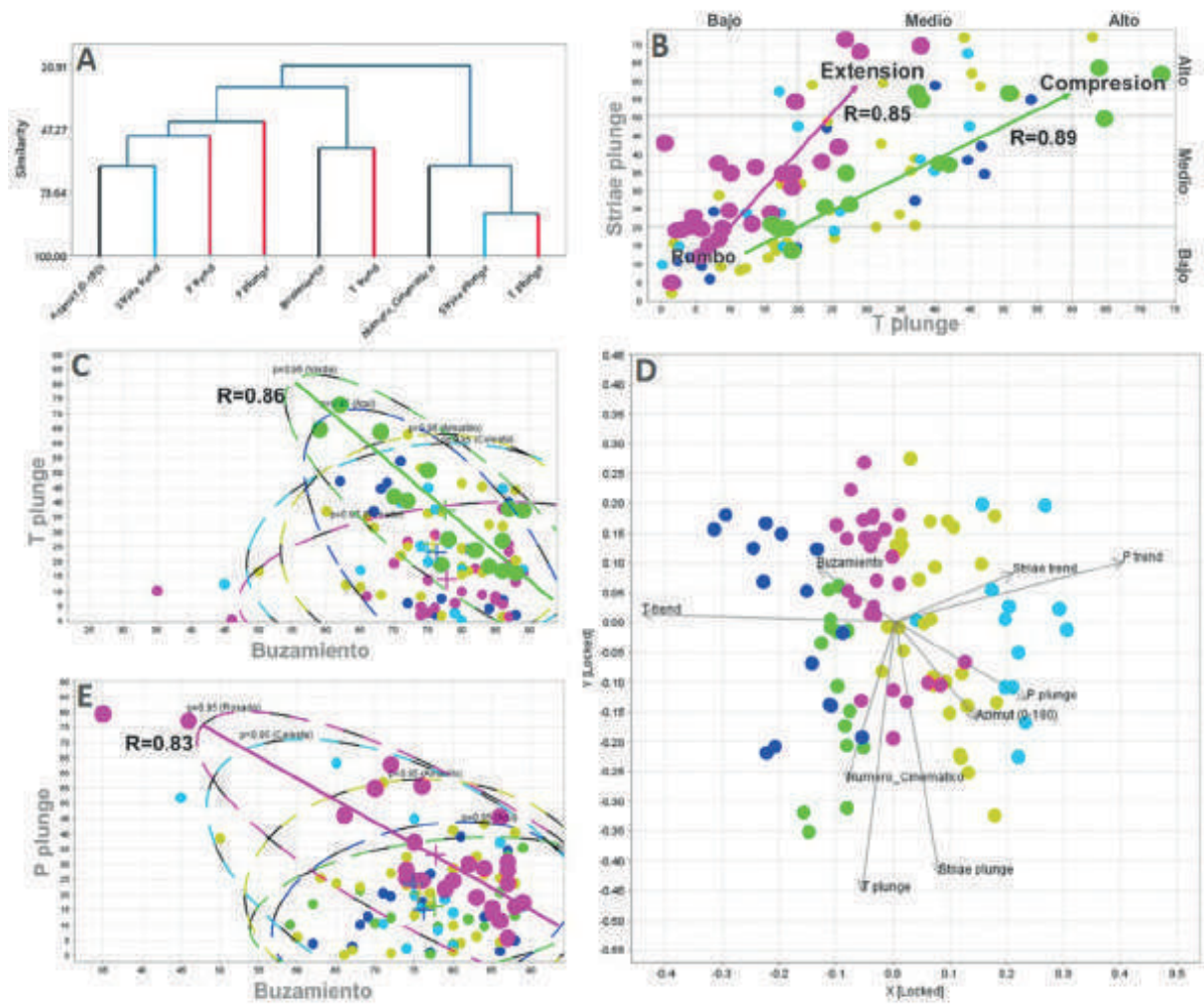


Figura 3. (A). Dendrograma del total de datos estructurales. (B). Diagrama de plunge de estría vs plunge de σ_3 , se puede discriminar tendencias extensionales o compresivas. (C). Diagrama de plunge σ_3 y buzamiento, altas correlaciones para una familia de datos indican un régimen compresivo. (D). Gráfico 3D de un Pricipal Component Analysis de las variables estructurales. (E). Diagrama de plunge de σ_1 y buzamiento, altas correlaciones para una familia de datos indican un régimen extensional.

Muchas veces las estructuras estudiadas son heredadas y los indicadores cinemáticos no son compatibles en tiempo con la estructura en la que se encuentran. Un requisito básico para reconocer los tensores de esfuerzos actuantes en una localidad es contar con un número suficiente de datos estructurales y un adecuado análisis estadístico, acompañado de un input geológico contextual. Al analizar mediante un Clustering y LDA a las variables estructurales independientes (azimut, buzamiento y numero cinemático) y dependientes (vector: estría - σ_1 - σ_3), se puede maximizar diferencias y discriminar las familias de estructuras existentes. Al procesar las variables de cada familia con un PCA se reconocerán múltiples correlaciones de diferente comportamiento predominante. La estría es un claro indicador de la dirección de movimien-

to y su plunge se correlaciona fuertemente con el del σ_3 , ya que es el vector esfuerzo que permite el movimiento. Siempre que el régimen sea transcurrente los plunjes del σ_1 y σ_3 serán de bajo ángulo, sin embargo, para cualquier reactivación en planos de alto ángulo siempre habrá componentes de plunge de σ_3 de bajo ángulo, por lo que es necesario evaluar la tendencia y grado de correlación con el plunge de estría para determinar un régimen apropiado. Para cualquier movimiento, el sigma vertical se relaciona de forma inversa al buzamiento, valores altos de estos plunge (σ_1 o σ_3) permiten identificar alguna tendencia y según el grado de correlación con el buzamiento se reconocerá tendencias extensionales ($R > 0.7$, buz.- σ_1) o compresionales ($R > 0.7$, buz.- σ_3). En el área del depósito se han reconocido al menos cinco tensores

de esfuerzos, el primer tensor transpresional, con azimut σ_1 NE y σ_3 NW, está vinculado a estructuras compresivas NW y a sus antirriedels tensionales asociados a diques - vetas NE mineralizadas, el segundo tensor tensional NE se relaciona con un grupo de estructuras tensionales-transtensionales y diques NW post mineralización.

El tercer tensor tensional NW se interpreta como parte de eventos del Cretácico Superior tardío y se asocia a estructuras transcurrentes que ponen en contacto intrusivos y niveles volcánicos, el cuarto tensor transtensional con azimut σ_1 NW y σ_3 NE se interpreta como parte de eventos de Paleógeno y se asocia a fallamientos oblicuos al sistema de diques-vetas NE que los desplaza de forma sinetral, por último un tensor compresivo de dirección WNW interpretado como producto de eventos del Neógeno los cuales se asocian a estructuras inversas y rumbo-inverso de alto pitch. Generalizar una extensión masiva en la costa sin evaluar las evidencias cinemáticas, es considerar parcialmente la evidencia geológica.

Los fallamientos ligados al sistema de sedimentación Cretácica presentan en su mayoría un reseteo cinemático producto de cambios geodinámicos que reordenaron la morfología de la superficie. Las observaciones de campo muestran que el estilo estructural es marcadamente extensional, y que las reactivaciones post sedimentación Cretácica estuvieron influenciadas por el estilo heredado (en un contexto de corteza delgada próximo a la fosa), ejerciendo resistencia a generar movimientos típicamente inversos. Existen suficientes diferencias sutiles entre las familias de fallas como para clasificarlas a todas como de régimen extensional-transtensional. En algunas zonas locales la evidencia compresiva aumenta en contraste con las observaciones regionales, sobre todo en terrenos donde la recurrencia magmática es mayor, esto permite sugerir que existen anomalías compresivas vinculadas a los cuerpos intrusivos y a su movimiento de ascenso y deformación. Sin embargo, existen también familias de estructuras compresivas posteriores a las expresiones magmáticas, que estarían vinculadas con eventos deformativos del Cenozoico.

Es importante estudiar la relación geométrica, cinemática y temporal de las estructuras costeras para comprender de forma integral la evolución tectónica de los Andes Costeros.

REFERENCIAS

- Angelier J. (1994). Fault slip analysis & paleostress reconstruction. In: Hancock P.L. (ed.) Continental deformation. Oxford, Pergamon Press. p.53-100.
- Ayala L. (2019). Influencia de la tectónica Cenozoica del antearco peruano en el mecanismo de deformación del Morro Solar mediante el análisis estructural. Rev. Del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM Vol. 22 N° 43. p.133-142.
- Clift, P.D., Pecher, I., Kukowski, N., Hampel, A., (2003). Tectonic erosion of the Peruvian forearc, Lima basin, by subduction and Nazca ridge collision. *Tectonics* 22 (3), p.1023.
- Doblas M. (1998). Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics*, 295(1-2). p.187-197.
- Petit J.P. (1987). Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, 9. p.597-608.
- Viveen W. & Schlunegger F. (2018). Prolonged extension and subsidence of the Peruvian forearc during the Cenozoic. *Tectonophysics* 730. p.48-62.