



Departamento de Ciencias Geológicas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Carrera: Licenciatura en Ciencias Geológicas

Carácter: Obligatoria

Año: 3°

Cuatrimestre/Bimestre: 1^{er} cuatrimestre

Frecuencia de dictado: anual

Profesor

Matías Ghiglione (matias@gl.fcen.uba.ar)

Geología Estructural 2024 FCEN – UBA

Programa teórico

Dr. Matías Ghiglione – Profesor Regular Asociado

Parte I.

Introducción. Esfuerzo. Deformación. Cinemática

1. Introducción. -

Definición de Geología Estructural. Análisis geométrico y cinemático. Geología Estructural y tectónica, escalas (macroscópica, mesoscópica, microscópica). Procesos, esfuerzos y deformación. Análisis dinámico. Ambientes tectónicos: tipos principales de sistemas de esfuerzos y estilos de deformación. Fuerzas endógenas. Mecanismos que gobiernan los movimientos de placa. Regímenes tectónicos presentes y pasados: condicionan el sistema de esfuerzos. Ciclo de Wilson. Tipos de márgenes de placas. Principios de Geotectónica. Zonas de rift. Zonas de subducción. Zonas transformantes. Márgenes pasivos.

2. Elementos estructurales básicos. -

Marcadores de la deformación. Estructuras primarias, estructuras secundarias. Importancia de conocer la base y techo de los bancos. Estructuras tectónicas básicas. Fracturamiento modos, diaclasas y fallas. Movimiento a lo largo de fallas y clasificaciones. Plegamiento. Tipos de pliegues: anticlinales, sinclinales, monoclinales. Descripción morfológica y geometría de pliegues: limbo dorsal, limbo frontal, cresta y línea de cresta, línea/s de charnela/s, plano axial, traza de plano axial, eje de pliegues. Medidas: amplitud y longitud de onda. Clasificación de pliegues según su orientación (charnela y plano axial). Clasificación según ángulo interlimbo. Ejes buzantes. Anticlinal buzante, sinclinal buzante. Braquianticlinales y braquisinclinales.

3. Fuerza y Esfuerzo. -

Concepto de fuerza. Fuerzas de cuerpo y de contacto. Equilibrio de fuerzas en la litósfera. Noción de esfuerzo. Unidades. Presión Litostática. Elipse y elipsoide de esfuerzo. Ejes principales de los esfuerzos. Régimen de esfuerzos. Componentes del Esfuerzo. Esfuerzo normal (compresivo o distensivo) y de cizalla. Ecuaciones de esfuerzo. Círculo de Mohr para esfuerzos. Esfuerzo desviatorio, medio y diferencial. Convención de símbolos. Estados de esfuerzo. Trayectorias de esfuerzo.

4. Intrusiones ígneas - mecanismos. -

Clasificación estructural: grandes intrusivos, intrusivos menores, superficiales. Emplazamiento pasivo, por dilatación de la roca de caja y su relación con la orientación de los esfuerzos. Fracturamiento tensional (Modo 1). Modificaciones según la profundidad. Encuentro con discontinuidades. Interacción con sistemas de fallas normales. Estudios estadísticos: Enjambres de diques. Relaciones de corte, edad relativa. Presión magmática vs profundidad, trampas corticales. Mecanismos de emplazamiento de plutones, activos y pasivos. Lacolitos y lopolitos, su relación con mecanismos de emplazamiento. Colapso extensional del techo de la cámara magmática. Modificación del régimen de esfuerzos. Régimen tectónico y tipos de emplazamiento. Destino de los volátiles.

5. Mecanismos de fracturación. -

Fracturas: características, tipos, modos de fracturamiento. Cesión frágil y cesión dúctil. Esfuerzos normales y de cizalla, su relación con el coeficiente de fricción (μ) y la fracturación. Desarrollo del experimento de Coulomb. Recta experimental de Coulomb y puntos de fracturación (sesión frágil). Criterios de ruptura para fracturas nuevas. Envolvente de Mohr para

altos esfuerzos medios. Resistencia tensional. Criterio de Griffith. Campos de estabilidad.

Deformación frágil, frágil-dúctil y dúctil. Sesión dúctil. Criterio de von Mises para el campo dúctil. Envolvente de resistencia cortical. Zonas de transición frágil dúctil. Influencia del flujo térmico. Curva envolvente compuesta para los campos frágil a dúctil. Relación geométrica entre la orientación de los esfuerzos y el sistema de fallas resultante. Clasificación de Anderson para fallas. Condiciones, características. Análisis dinámico. Reactivación de fallas e inversión tectónica. Dinámica de inversión, factores principales. Resistencia friccional en el plano de falla (adherencia y coeficiente). Envolvente de fracturación (fallas nuevas) vs Envolvente de deslizamiento (fallas pre-existentes). Esfuerzo diferencial.

6. Fracturación hidráulica. -

Sobrepresión de fluidos, procesos involucrados. Gráfica de presión vs. Profundidad. Esfuerzo efectivo, esfuerzo total, sobrepresión de fluidos. Reducción del esfuerzo medio. Condiciones para la generación de fracturas tensionales vs cizalla. Fuerzas de infiltración (*seepage forces*) y su efecto en los esfuerzos efectivos. Hidrofracturación - Fracking (hydro fracturing). Sistemas petroleros no-convencionales. Geotermal (hydroshearing). Sismos inducidos por inyección de fluidos.

7. Deformación. -

Definición de deformación. Componentes de la deformación: Traslación, rotación, distorsión (strain) y dilatación. Deformación de cuerpo rígido y deformación interna. Deformación continua y discontinua. Deformación homogénea y heterogénea. Vector desplazamiento, Trayectoria de la deformación, Campo de Desplazamiento. Deformación progresiva, finita e infinitesimal. Medida y representación de la Deformación Interna. Deformación interna por cizalla, cizalla angular, ángulo de cizalla y valor de cizalla. Dilatación. Deformación interna longitudinal: elongación (e) y estiramiento (s). Acortamiento y extensión. Magnitud adimensional y dependencia de la orientación. Elipse y elipsoide de deformación. Representación y comparación de la deformación mediante relaciones entre elongación (e) y estiramiento (s); diagrama de Flinn, parámetro “K”. Direcciones principales de la deformación. Líneas de no deformación longitudinal. Campos de acortamiento & extension. Deformación finita e infinitesimal. Deformación por cizalla pura, cizalla simple, cizalla subsimple. Deformación coaxial y no coaxial. Cizalla subsimple, número de vorticidad cinemático. Campos de deformación finita e infinitesimal, campos “c,e”.

8. Indicadores cinemáticos. -

Análisis dinámico a partir de estructuras tectónicas y orientación del elipse de deformación. Indicadores cinemáticos de deformación frágil & frágil-dúctil. Boudinage: variaciones en el contraste frágil-dúctil, relación alto-ancho, fracturas tensionales, simétricas y asimétricas, relación con el diagrama de Flinn.

9. Zonas de Cizalla. -

Zonas de Cizalla, distribución heterogénea de la deformación. Zonas de cizalla discontinuas, heterogéneas, continuas. Zonas de cizalla frágil, Zonas de cizalla frágil-dúctil, Zonas de cizalla dúctil. Condiciones de generación. Indicadores cinemáticos, fundamentos. Venas de tensión. Venas en echelón conjugadas. Estilolitas. Fábricas S-C. Peces de mica. Cristales desplazados y deslizamientos en dominó. Sistemas de fallas de Riedel.

Parte II.

Integración de elementos constitutivos.

10. Sistemas petroleros. -

Sistema Petrolero Convencional. Elementos: Roca madre, Reservorio, Sello, Ruta de migración, Trampa. Procesos: maduración, expulsión, migración. Trampas Estructurales y Estratigráficas. Chart de eventos, elementos y procesos. Concepto de preservación y tiempo

crítico. Sistemas no-convencionales. Fracturamiento hidráulico; pozos horizontales.

11. Compactación y Bifes de Calcita. -

Mecanismos de deformación homogénea: Deformación no-rotacional: cizalla pura; Deformación rotacional: cizalla simple; Deformación, con pérdida de volumen: compactación. Cizalla subsimple y otros campos intermedios. Boudinage simétrico & asimétrico. Presión-solución, disolución y re-precipitación de minerales. Disminución en la porosidad. Estilolitas. Dilatación positiva: venas por cizalla pura (perpendiculares) vs venas por cizalla simple (oblicuas). venas antiaxiales y sintaxiales. Bifes de calcita = Venas de dilatación paralelas a la estratificación (*Bed-parallel veins*; BPVs o beefs). Bifes horizontales, en el ámbito del sistema petrolero de la cuenca Neuquina.

12. Estudios cinemáticos de fallas. -

Análisis cinemático vs análisis dinámico. Métodos gráficos y métodos numéricos. Modelo de sistemas de fallas conjugadas de Anderson, reconocimiento, condiciones e interpretación dinámica. Estudios cinemáticos de estrías de falla. Relación entre los ejes de deformación, ejes de los esfuerzos; y vectores de movimiento de las partículas. Plano de movimiento y dirección de desplazamiento neto. Criterios de campo para establecer el sentido de movimiento. Marcas diagnósticas sobre el plano de falla: Criterios de escalonamientos y cristalización sincinemática, marcas en espejos de fricción. Análisis cinemático gráfico de ejes P y T. Análisis cinemático gráfico. Proyección de mecanismos focales en planta/mapa. Mecanismos focales a partir de sismos, incertidumbre del plano de falla. El método de los diedros rectos para el análisis dinámico (Angelier & Mechler 1977).

13. Reología. -

Reología como relación stress-strain. Comportamiento reológico de los materiales continuos. Analogías mecánicas y ecuaciones constitutivas. Comportamiento elástico, plástico y viscoso. Concepto y curvas de esfuerzo-deformación & esfuerzo-tiempo. Deformación elástica vs permanente. Comportamiento elástico, condiciones, leyes de Hooke, módulo de Young, coeficiente de Poisson, módulo de cizalla. Comportamiento viscoso linear, condiciones, viscosidad, magmas, diapirismo. Comportamiento plástico perfecto o de Saint Venant, esfuerzo de cesión, von Mises, constante k. Comportamiento elasto-plástico. Parámetros que influyen en la deformación: temperatura, fluidos, presión confinante.

Parte III.

Asociaciones de estructuras.

14. Asociaciones extensionales: RIFT.

Contexto tectónico. Rifts pasivos y activos. Modelo Simétrico por Cizalla Pura (McKenzie, 1978). Modelo Asimétrico por Cizalla Simple (Wernicke, 1981). Concepto de margen conjugado. Estadios evolutivos. Concepto de cuenca extensional-graben. Sistemas de fallas extensionales. Modelos simples de deformación extensional. Modelo de fallas conjugadas no rotacionales, fallas lístricas rotacionales. Fallas en dominó. Modelo geométrico con despegue lístrico. Deformación Interna por cizalla. anticlinal y sinclinal de rollover. Graben de colapso. Rampas de relevo. Evolución del sistema de fallas extensional. Evolución de la subsidencia mecánica. SAG. Estadios de prerift, sinrift, postrift. Estratos de crecimiento extensionales y geometría relacionada con el arreglo de fallas. Superficie compleja en la base del sag "Break-up unconformity" o "discordancia de ruptura". Restitución paso a paso de las estructuras. Unión entre depocentros de rift adyacentes, fallas de transferencia vs zonas de acomodación.

15. Inversión tectónica.

Fundamentos. Rifting e inversión positiva. Punto nulo, magnitud de inversión, Tasa de inversión (Ri). Falla de atajo en el bloque yaciente. Estructuras con forma de "arpón" o "cabeza de flecha" (Anticlinales en el bloque colgante). Buttresing. Inversión tectónica con estratos de

crecimiento compresivos. Desplazamiento de depocentros sedimentarios. Geometrías típicas. Reactivación de zonas de acomodación y fallas de transferencia. Componente de compresión transversal al orógeno

16. Mecanismos de plegamiento & Cinemática de Pliegues.

Mecanismos de plegamiento: Deslizamiento Flexural vs Flujo Flexural. Clasificación de Pliegues según la relación ente arco interno y externo Ramsay (1967). Cinemática – flujo flexural. Arco interno y externo, Superficie neutra. Zonas de presión y tensión. Saddle reefs y depósitos asociados. Cinemática – deslizamiento flexural. Cizalla interestratal entre capas en un pliegue. Pliegues disarmónicos; desacople entre capas. Pliegues secundarios con cinemática antitética: simétricos (M), Horarios (Z) y Antihorarios (S). Ejemplos y utilidad. Clivaje de plano axial. Principales juegos de fracturas formados en un estrato plegado (Twiss y Moores 2007);

17. Modelos geométrico-cinemáticos de pliegues relacionados a falla.

Deslizamiento flexural ante cambios de ángulo en el plano de falla: Superficies Axiales y bandas KINK. Sistemas de falla plano-rampa-plano. Pliegues asociados a fallas plano-rampa: Concepto básico. Superficies Axiales activas e inactivas. Pliegues compresivos relacionados a fallas. Conceptos de Acortamiento (s) y Propagación (p). Relación P/S (Propagación/ Acortamiento) y su influencia en el modelo de pliegue que se desarrolla en cada caso. Importancia de la geometría de falla en la generación de distintos modelos de pliegue. Concepto de modelo geométrico. Modelo Cinemático. Pliegues de flexión de falla: Características principales. Pliegues de propagación de falla: Características principales. Cizalla angular aplicada al deslizamiento flexural. Pliegues de propagación de falla transportados/modificados. Pliegues por despegue: Características principales. Rotación instantánea (largo de limbo variable) vs Rotación progresiva (largo de limbo constante). Pliegues Disarmónicos, Despegue (Lift-off), Geometría en caja.

18. Sistemas Orogénicos

Ambiente tectónico de los sistemas compresionales. Zonas de subducción tipo andina vs. tipo alpina. Fajas plegadas y corridas sintéticas y antitéticas. Dominios de basamento y Faja Plegada y Corrida. FPyC de Piel Gruesa, Piel fina y por Inversión tectónica. Acortamiento total y por segmentos. Corrimientos, retrocorrimientos, Vergencia. Acortamiento por etapas. Migración del frente orogénico. Corrimientos en secuencia y fuera de secuencia. Cuña orogénica. Teoría de la cuña de Coulomb. Variables mecánicas del macizo rocoso y del nivel de despegue que controlan la geometría de la cuña de Coulomb. Ángulos: ϕ crítico vs ϕ del orógeno, ángulo α de la topografía, ángulo β del nivel de despegue. Orógenos con alta y baja fricción basal. Evolución cinemática. Alternancia de estados críticos y subcríticos. Efecto de la sobrepresión. Estadio supercrítico. Modelo de avance de las FPyC por eventos de sobrepresión (Cobbold, 2005). Controles de la topografía en el desarrollo de las fajas plegadas y corridas. Control de la ductilidad y espesor del nivel de despegue basal. Estratigrafía mecánica. Variaciones laterales controladas por la cuenca. Condicionantes que influyen el ángulo de la cuña o el ángulo crítico y por lo tanto condicionan el ancho y topografía de la FPyC.

19. Lluvia Orogénica – Sombra de Lluvia.

Estadio Subcrítico. Deformación concentrada en el sector interno. Eficiencia erosiva, tasa de erosión. Litología dominante y resistencia a la erosión. El factor clima y precipitaciones. Sistema sedimentario. Orógenos constructivos y destructivos. Efectos atmosféricos por ascenso orográfico (Efecto Foehn): Lluvia Orográfica – Sombra de lluvia.

20. Depocentro de techo de cuña. Estratos de Crecimiento.

Pasaje Piel Gruesa → Piel fina → Cuenca de Antepaís. Subsistencia por carga. Efectos de la rigidez litosférica. Sistemas de cuenca de antepaís, sus depocentros. Límites y

superposiciones, entre el orógeno y la cuenca de antepaís. Distribución de procesos superficiales (sedimentación y erosión). Depocentro de techo de cuña; Estratos de crecimiento compresivos. Estratos crecimiento: Indicadores de edad de la deformación, relación entre tasas de sedimentación y levantamiento. Relación $R=V_s/V_u$, V_s : Tasa efectiva de sedimentación, V_u : Tasa de levantamiento. Onlap de crecimiento, overlap de crecimiento, offlap de crecimiento. Estratos crecimiento como Indicadores Cinemáticos: Rotación progresiva de limbos (Discordancias progresivas). Rotación instantánea de limbos (triángulos de crecimiento).

21. Discordancias angulares vs progresivas.

Discontinuidades con discordancia: Discordancia angular, Discordancia angular erosiva. Depósito, deformación, erosión y depósito. Estratos de crecimiento, Discordancias progresivas extensionales y compresivas. Diferencia entre Discordancias Progresivas y Discordancias Angulares. Elementos para diferenciar entre discordancias progresivas extensionales o compresivas.

22. Sistemas trascurrentes.

Características generales: Definición. Contexto Tectónico de la Transcurrencia: límites de placa conservativos/transformantes y subducción oblicua. Partición de la deformación: deformación en el retroarco y en el arco. Transpresión y Transtensión. Magnitudes y Tasas de desplazamiento. Desplazamiento cosísmico. Sistemas de Esfuerzos de Campo lejano vs deformación infinitesimal. Estructuras de rumbo en echelon. Irregularidades en el plano de falla, curvaturas y saltos de falla; confinantes y de alivio. Estructura en flor, positiva y negativa. Estructuras pull-apart y push-up. Estructura en cola de caballo sintética, confinantes y de alivio.

23. Regímenes de Deformación en Subducción

Movimiento Absoluto de la PO. Acoplamiento vs Fuerza de succión. Velocidad de convergencia relativa y absoluta. Vel. de expansión del fondo oceánico. Movimiento de rollback de la trinchera. Velocidades de rollback positivas y negativas. Subducción compresiva y extensional. Subducción tipo Chile vs Marianas, efectos de la edad, temperatura y densidad de la CO en el ángulo de subducción. Subducción subhorizontal. Condiciones para el desarrollo de mineralizaciones en las zonas de subducción. Desarrollo de Pórfiros de Cobre Gigantes.

24. Deformación en Márgenes pasivos.

Sistemas Extensional y Compresivo Vinculados. Fajas plegadas y corridas de aguas profundas y cómo se clasifican (nivel de despegue, pendiente del detachment). Contexto Ciclo de Wilson. Márgenes conjugados de América del Sur & África: evolución tectono-estratigráfica. Mar restringido aptiano-albiano y depósitos evaporíticos de post-rift. Mecanismo de deformación: deslizamiento por gravedad. Geometría de sistemas de falla vinculados: extensión-traslación-acortamiento.

1- BIBLIOGRAFÍA

Se sugiere toda la información disponible en el Campus.

Allmendinger, R.W. (2017) Modern Structural Practice: A structural geology laboratory manual for the 21st Century. © 2015-2017.

Allmendinger, R.W. (1999) Lectures 1-37. Structural Geology 326-99. 279 pp.

Davis, G.H., 1984. Structural geology of rocks and regions. John Wiley & Sons, New York. 492 pgs.

Fossen, H. (2016). Structural geology. Cambridge university press.

Hobbs, B.E., Means, W.D. y Williams, P.F., (1981). Geología Estructural. Editorial Omega, Barcelona. 518 pgs.

Llambías, E.J., (2003). Geología de cuerpos ígneos. Asociación Geológica Argentina. Serie B, Nº 27. Buenos Aires. 182 pgs.

Martínez, J. (2002). Geología estructural y dinámica global. Departamento de geología, Universidad de Salamanca. 431 pgs.

McClay, K. R. (2013). The mapping of geological structures. John Wiley & Sons.

Mercier, J. y Vergely, P., (1999). Tectónica. Ed. Limusa. Noriega Editores. México. 259 pgs.

Lillo, J., & Oyarzun, R. (2013). Geología Estructural Aplicada a la Minería y Exploración minera. Principios básicos. Ediciones GEMM - Aula2pontonet. 210 pgs.

Ramsay, J.G., (1977). Plegamiento y Fracturación de Rocas. H. Blume Ediciones. 590 pgs. Madrid.

Rowland, S. M., Duebendorfer, E. M., & Gates, A. (2021). Structural analysis and synthesis: a laboratory course in structural geology. John Wiley & Sons.