

La proyección estereográfica como recurso para el desarrollo de la percepción espacial y el aprendizaje significativo en Geología Estructural

Stereographic projection as a resource for the development of spatial perception and significant learning in Structural Geology

GISELE FRANCELINO MIGUEL¹, CELSO DAL RÉ CARNEIRO²,
GIOVANNI AMARAL GUIMARÃES³ Y JOÃO PAULO DA PONTE SOUZA⁴

¹ Geóloga y Maestra en Enseñanza y Historia de las Ciencias da Terra, Instituto de Geociencias, Universidad Estatal de Campinas, Campinas, SP. Bolsista Capes, Brazil. E-mail: giselefmiguel@yahoo.com.br

² Programa de Posgrado en Enseñanza y Historia de las Ciencias da Terra, Instituto de Geociencias, Universidad Estatal de Campinas, Campinas, SP. Bolsista del CNPq, Brazil. E-mail: cedrec@ige.unicamp.br

³ Estudiante de Geología, Instituto de Geociencias, Universidad Estatal de Campinas, Campinas, SP, Brazil. E-mail: giovanniamaral95@gmail.com

⁴ Geólogo y estudiante de Maestría en Geología de Petróleo, Centro de Estudios de Petróleo (Cepetro), Universidad Estatal de Campinas, Campinas, SP, Brazil. E-mail: Joao.ponte.souza@gmail.com

Resumen La rama de la Geología Estructural estudia las estructuras de las rocas a todas las escalas, caracterizando los cálculos geométricos, movimientos y esfuerzos que son los responsables de los desplazamientos y deformaciones de masas rocosas. Debido a la naturaleza tridimensional de los estudios típicos de Geología Estructural, estos requieren una habilidad espacial bien desarrollada. La proyección estereográfica es un método que permite manejar e interpretar estructuras geológicas tridimensionales en una superficie bidimensional. En este trabajo se ha realizado una investigación cualitativa, con un caso de estudio y un grupo específico de alumnos de grado y posgrado en Geología, de la Universidad Estatal de Campinas, en Brasil. Se propusieron varios ejercicios prácticos, en talleres de proyección estereográfica, para facilitar el aprendizaje significativo de una manera sencilla y eficaz, así como mejorar la habilidad de visualización tridimensional. Los resultados muestran que la asociación de actividades manuales y computacionales ayuda a perfeccionar la percepción espacial, aunque muchos estudiantes tienden a realizar las tareas de manera mecánica. Una de las conclusiones es que la habilidad de visualización tridimensional es esencial para el desarrollo del aprendizaje significativo.

Palabras clave: Competencias, enseñanza-aprendizaje, Geología Estructural, habilidades, visualización tridimensional.

Abstract Structural Geology is a branch of geology dedicated to studying rock structures at all scales. The objective is to characterize geometric arrangements, rock movements and stresses responsible for the displacements and deformations of rock masses. The world of Structural Geology is by nature three-dimensional, thus requiring high-level spatial visualization skills. Stereographic projection allows to manipulate and interpret three-dimensional geological structures on a two-dimensional surface. This work is a case study which applies qualitative research to a specific group of Geology undergraduate and graduate students of the State University of Campinas, Brazil. A series of practical exercises was proposed, in stereographic projection workshops, to provide meaningful learning in a simple and effective way, as well as to improve three-dimensional visualization skills. The results showed that the association of manual and computational activities helps to enhance spatial perception, although many students still try to solve problems in a mechanical way. The conclusion is that three-dimensional visualization skills are essential for the development of meaningful learning

Keywords: 3D-visualization, competences, skills, Structural Geology, teaching-learning.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la Geología exige un conjunto de habilidades singulares de pensamiento e investigación que no se requiere en otras ciencias (Frodeman, 1995, 2010). El aprendizaje de la Geología requiere considerables niveles de abstracción, dada la intemporalidad y complejidad espacial de los procesos geológicos (Ruiz, 1993). Pensar geológicamente involucra la capacidad de inferir significados de los patrones encontrados en las rocas. El pensamiento geológico busca, por lo tanto, las implicaciones y el significado de los patrones en términos relevantes para la reconstrucción de la historia natural de la Tierra y sus procesos de formación, desarrollo y cambio (Chadwick, 1978).

Por su parte es competencia de la geología estructural entender y describir las modificaciones o deformaciones que pueden resultar en alteraciones de la forma, volumen y orientación de las rocas, como respuesta a los esfuerzos de la energía interna del planeta. Los regímenes de deformaciones que se encuentran en la corteza terrestre son fuentes de datos para interpretar actividades preterritas.

La proyección estereográfica es un método esencial en geología estructural, cristalografía, sismología y paleomagnetismo. Los estudiantes y profesionales de la Geología necesitan del conocimiento de los principios y prácticas de la proyección estereográfica (Blenkinsop, 1999), ya que las redes estereográficas son esenciales para una amplia variedad de actividades que dependen de la visualización de estructuras geológicas. Blenkinsop (1999) señala que el aprendizaje de la proyección estereográfica presenta tres problemas. El primero es la falta de familiaridad con rumbo de compás y con planos y orientaciones lineales. El segundo problema es relativo a la visualización, que dificulta la correcta comprensión de los principios y prácticas de la proyección. El tercer problema es la falta de interés en el uso de las técnicas.

Muchos estudiantes se enfrentan a tareas espaciales y varios factores contribuyen a estas dificultades, pues las competencias espaciales se distribuyen de manera desigual entre los individuos (Kastens *et al.*, 2009). Para Brusí *et al.* (2011), las competencias tienen un sentido globalizador e implican la capacidad de responder a las demandas y a realizar las actividades propuestas de forma eficiente. Las competencias adquiridas se ponen de manifiesto al realizar un trabajo o ejecutar una tarea, por ello su objetivo trasciende a la etapa de aprendizaje.

Tradicionalmente, la resolución de problemas prácticos de geología estructural requiere operaciones manuales, un modo de análisis de datos que ayuda a desarrollar habilidades de visualización en tres dimensiones (Carneiro y Carvalho, 2012). Sin embargo, la capacidad de enseñar se incrementa mediante actividades interactivas que utilizan elementos atractivos (Alcalá *et al.*, 2010) como los dibujos interactivos, que han tenido éxito en ayudar a los estudiantes universitarios a visualizar la naturaleza tridimensional de la Geología. Estos dibujos permiten interacciones que no son posibles con

materiales tradicionales realizados en papel (Reynolds *et al.*, 2005). En la medida que los ordenadores han pasado a desempeñar un papel decisivo en la enseñanza de Geociencias y cada vez se utilizan más en geología estructural (Burger *et al.*, 2004), la interacción del alumnado con el ordenador puede mejorar su aprendizaje y lo harán de manera más significativa y rápida, siendo en ocasiones la clave para alcanzar las competencias que deberán lograr los alumnos durante su formación universitaria (Vacas *et al.*, 2009).

Esta investigación tuvo como propósito desarrollar una técnica que facilitase el aprendizaje de la proyección estereográfica en geología estructural, así como perfeccionar la habilidad de visualización tridimensional de estudiantes y profesionales de la Geología. Se buscó una integración entre actividades manuales y computacionales, con la intención de que la actividad computacional crease condiciones para que el alumnado construyese su propio conocimiento y mejorase su habilidad de visualización espacial.

Deficiencias de visualización en tres dimensiones impiden la comprensión de principios y prácticas rutinarias de la actividad profesional de la geología, aunque muchos alumnos pueden, a veces, ejecutar bien ejercicios que abarcan proyección, sin disponer de esa habilidad. Así pues, los principales objetivos que se plantearon con esta investigación son los siguientes: (1) elaborar una técnica que proporcionara el aprendizaje significativo, de proyección estereográfica, al mismo tiempo que desarrollara la habilidad de visualización tridimensional, y (2) utilizar el ordenador junto a actividades manuales, en la enseñanza de la geología estructural, para facilitar el aprendizaje constructivista.

PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA

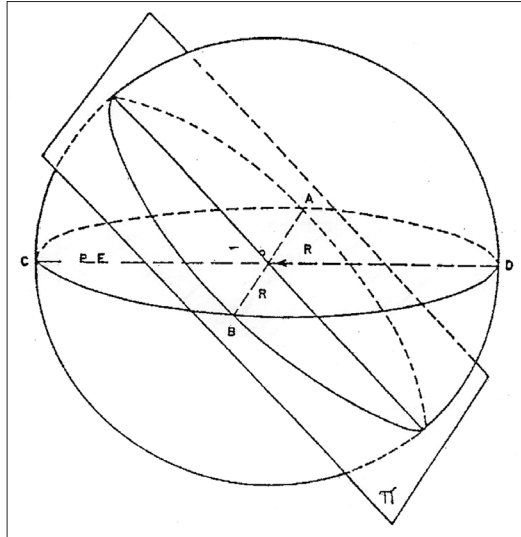
En la naturaleza es frecuente encontrar estructuras geológicas que han sufrido modificaciones en su forma, volumen o disposición. Los métodos de trabajo de geología estructural no permiten acceder de modo directo a la evaluación de un cambio en una estructura geológica, ya que es difícil conocer con exactitud su tamaño o situación original (Gil *et al.*, 1997). La proyección estereográfica es una herramienta esencial para representar y manipular datos tridimensionales porque permite que las estructuras geológicas sean representadas en el plano bidimensional. Los datos pueden ser procesados, rotados y analizados.

A diferencia del contorno de estructuras y otras técnicas basadas en mapas, la proyección estereográfica preserva solo la orientación de líneas y planos. Las construcciones pueden visualizarse y mostrarse gráficamente mediante construcciones geométricas estandarizadas (Waldron, 2009). La proyección estereográfica difiere de la proyección ortográfica de una manera fundamental: la proyección ortográfica preserva las relaciones espaciales entre las estructuras, pero la proyección estereográfica muestra geometrías y orientaciones de líneas y planos sin tener en cuenta las relaciones espaciales (Davis *et al.*, 2011).

Construcción de una red estereográfica

Se considera una esfera de radio R , por cuyo centro O pase un plano que no es horizontal π (P_i). La intersección de ese plano con la esfera describe un círculo de radio R y diámetro AB . La recta AB representa, también, la dirección del plano π . El plano ecuatorial (PE) divide por la mitad el círculo de intersección entre el plano π y la esfera de referencia (Fig. 1).

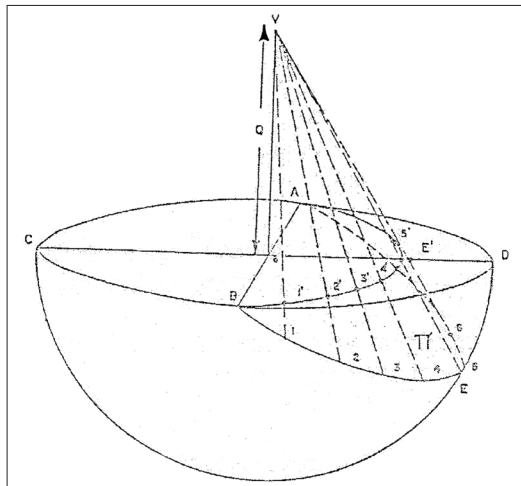
Fig. 1. Principios de proyección estereográfica. El plano " π " pasa por el centro de la esfera, intercepta según una sección circular (Loczy y Ladeira, 1976).



Si se elimina el hemisferio superior de la esfera de referencia e imaginando un observador colocado en el punto V , a una distancia R verticalmente por encima del centro O , el semicírculo formado por la intersección del plano con la esfera será visualizado por el observador según el arco AB , proyectado en el plano ecuatorial.

Cada punto del semicírculo 1, 2, 3, etc. será proyectado en el plano ecuatorial según los puntos $1'$, $2'$, $3'$, etc. Se dice, entonces, que el arco AB representa la proyección estereográfica del plano considerado y la línea AB corresponde a la dirección del plano (Fig. 2).

Fig. 2. Principios de proyección estereográfica. Varios puntos de un plano pasando por el centro de la esfera, se proyectan en el círculo ecuatorial, teniendo el punto " V " como polo de proyección (Loczy y Ladeira, 1976).



Si el plano π tiene un ángulo de buzamiento que se acerca a cero, la proyección estereográfica se aproxima al borde del plano ecuatorial, hasta que se confunde con el mismo. Si el plano π tiene un ángulo de buzamiento aproximado de 90 grados, el arco estaría restringido a la propia recta AB (Fig. 3).

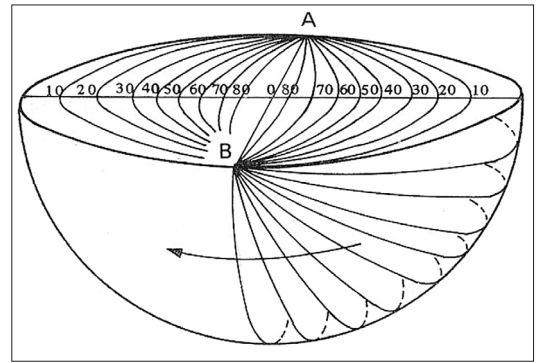


Fig. 3. Proyección estereográfica de buzamientos de planos de este a oeste, para varios ángulos (Loczy y Ladeira, 1976).

Diagrama de Wulff y Schmidt

En el diagrama de Wulff, conocido también como red equiangular, las relaciones angulares se mantienen, pero las distancias son falsas o están distorsionadas. Se usa esta proyección en cristalografía para definir los ángulos en un cristal. En geología estructural, se emplea para trabajos donde lo importante es el ángulo, pero con cantidades de datos restringidos. La proyección Wulff no permite la interpretación de "nubes de puntos" (Fig. 4). En el diagrama Schmidt o equidistancial, las distancias se mantie-

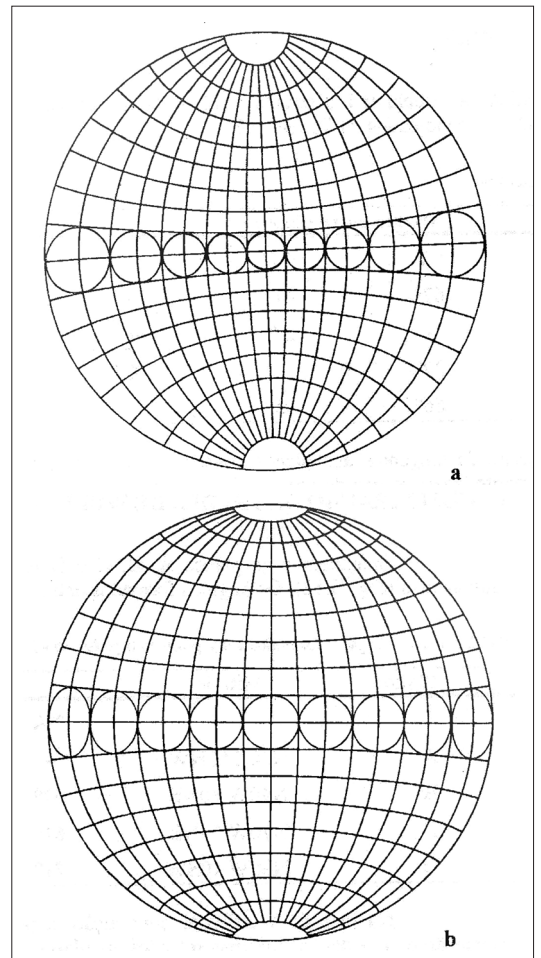


Fig. 4. Comparación de áreas en varias regiones del diagrama. (a) Diagrama Wulff; (b) Diagrama Schmidt (Carneiro, 1996).

nen, pero los ángulos no son reales. Esta proyección sirve porque se puede trabajar estadísticamente, es decir, se puede trabajar con cantidades grandes de datos o “nubes de puntos” manteniendo su geometría (Fig. 4).

En algunos casos puede ocurrir que no sepamos cuál de los dos diagramas utilizar para resolver un problema. Se debe usar el diagrama de Schmidt en todos aquellos casos donde la concentración de puntos proyectados es significativo, es decir, para todos aquellos análisis con un gran número de medidas. El diagrama de Wulff se usa para medir ángulos entre estructuras y en todos aquellos problemas donde líneas, planos y polos se vayan a utilizar para cálculos geométricos (Vich y Ortiz, 2010).

Diagrama Tangente

El diagrama Tangente es un gráfico de coordenadas polares que proporcionan soluciones a muchos problemas en geología estructural, como: (1) el buzamiento aparente de un buzamiento real, (2) buzamiento real a partir de dos buzamientos aparentes, y (3) la línea de intersección de dos planos. Además, son útiles para orientar pliegues cilíndricos y cónicos por análisis gráfico de datos de buzamiento y distinción de pliegues cilíndricos de los dos posibles tipos de pliegues cónicos (Bengtson, 1980).

En este diagrama la orientación de planos y líneas se representa por el punto final de vectores, que es proporcional en longitud a la tangente del ángulo de buzamiento. El diagrama incluye buzamientos de 0 a 65 grados, pero hay una escala auxiliar que incluye buzamientos de hasta 80 grados. La representación de ángulos más grandes es inviable. Cada vector es representado por la conexión entre el polo y el centro del diagrama (Bengtson, 1980) (Fig. 5).

El método de proyección utiliza notación Clar. La dirección del buzamiento del plano problema se lee en el borde del diagrama y la pendiente del buzamiento crece desde el centro hacia el borde. El radio de cada círculo es proporcional a la tangente del ángulo de buzamiento (Bengtson, 1980).

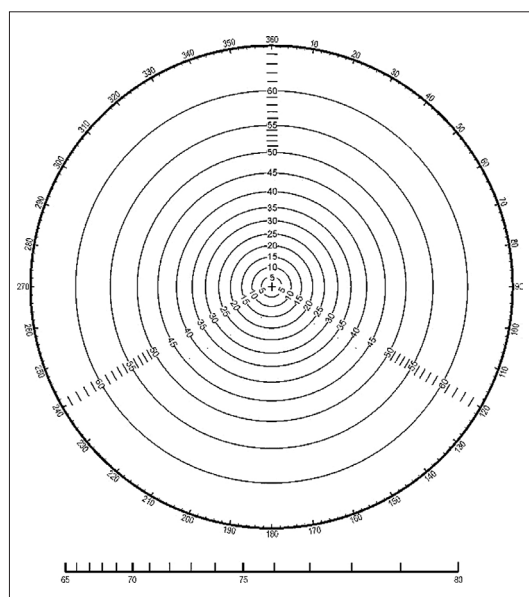


Fig. 5. Diagrama Tangente (Bengtson, 1980).

APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO

Ausubel (2003) define el aprendizaje significativo como: “el producto significativo de un proceso psicológico cognitivo (“saber”) que involucra la interacción entre ideas “lógicamente” (culturalmente) significativas, ideas anteriores (“ancladas”) relevantes de la estructura cognitiva particular del aprendiz (o estructura de los conocimientos de éste) y el “mecanismo” mental del mismo para aprender de manera significativa o para adquirir y retener conocimiento”.

Para Ausubel *et al.* (1980) la esencia del aprendizaje significativo es un proceso en el cual las ideas, que son expresadas simbólicamente, pueden ser relacionadas con aspectos relevantes ya existentes en la estructura cognitiva de los alumnos como imagen, símbolo, concepto o proposición, por medio de una relación no arbitraria y substantiva.

Ausubel (2003) relata que la facilidad o dificultad de retención de un nuevo aprendizaje depende de la estructura cognitiva del aprendiz: si es clara y ordenada surge el significado coherente y, si la estructura cognitiva es confusa y ambigua, esto tiende a inhibir el aprendizaje significativo. El aprendizaje significativo ocurre cuando un nuevo conocimiento adquiere un significado relevante para la estructura cognitiva al relacionarse con un conocimiento previo de forma no arbitraria y no literal. La idea-ancla puede ganar más significado a medida que nuevos conocimientos se van asociando a ella, lo que la hace más rica, más diferenciada y más capaz de servir como anclaje. Este nombre se da a un conocimiento específico, existente en la estructura de conocimiento del individuo, que permite dar significado a un nuevo conocimiento que le es presentado o es descubierto por sí mismo (Moreira, 2010).

La limitada aplicación e incluso utilidad de las teorías del aprendizaje en educación vienen, desde hace mucho, siendo objeto de discusión y motivo de preocupación para psicólogos, educadores y personas que se interesan por los problemas educativos (Aragão, 1976). En la práctica, la mayoría de las estrategias, o la escuela en general, sigue promoviendo mucho más el aprendizaje mecánico, puramente memorístico, que el significativo (Moreira, 2010).

Las actividades colaborativas, presenciales o virtuales, en pequeños grupos tiene gran potencial para facilitar el aprendizaje significativo porque favorecen el intercambio, la negociación de significados y colocan al profesor en la posición de mediador. Pero eso no significa que una clase expositiva clásica no pueda facilitar el aprendizaje significativo. Es verdad que la enseñanza expositiva tradicional normalmente promueve el aprendizaje mecánico (Moreira, 2010).

MATERIALES Y MÉTODOS

El material y método empleado se ha desarrollado siguiendo una secuencia de etapas que contó con actividades teóricas y prácticas, a fin de mejorar la habilidad de visualización tridimensional y proporcionar el aprendizaje significativo en proyección estereográfica. Se pretendió dar soporte para que el

alumnado desarrollara la competencia para solucionar situaciones complejas.

Se han realizado tres talleres didácticos de proyección estereográfica. El primero en octubre de 2016 y los otros dos en junio y julio de 2017. El público seleccionado para esta investigación fue alumnado de grado y posgrado en Geología, de la Universidad Estatal de Campinas (Unicamp) en Campinas, São Paulo, Brasil, que ya hubieran realizado clases de diseño geológico y/o geología estructural, o que iban a cursar estas asignaturas, o personas que tuviesen interés en el contenido del taller.

La resolución del contenido de las actividades involucró la realización de diagramas en papel (Wulff, Schmidt y Tangente) junto con programas de proyección estereográfica en ordenador, para proporcionar al estudiante un avance progresivo y estructurado de los conocimientos. Para la resolución de problemas mediante ordenador fueron utilizados dos programas, que son: *Ester 2.1* (Guimarães y Carneiro, 2016) para las resoluciones bidimensionales, y *Visible Geology* (Rowan Cockett <http://app.visiblegeology.com>) para las resoluciones tridimensionales. *Ester 2.1* es una versión desarrollada a partir de Mizuno y Carneiro (2007, 2008) y Souza y Carneiro (2013), que está accesible en el trabajo de Carneiro *et al.* (2018).

Las herramientas de toma de datos incluyeron: investigación participativa, trabajo de campo, entrevistas informales y aplicación de cuestionario. El cuestionario ha sido puesto a disposición de los estudiantes al final del taller, quedando a criterio del alumnado decidir si participaría o no en esta etapa. El contenido del cuestionario comprende catorce preguntas cerradas y una pregunta abierta, acerca de la habilidad de visualización tridimensional y el aprendizaje de proyección estereográfica. Nueve, de un total de quince participantes, completaron el cuestionario. Junto con el cuestionario se entregó el TCLE (Término de Consentimiento Libre y Esclarecido), conforme solicitud del CEP (Consejo de Ética en Investigación).

Este trabajo ha consistido en una investigación cualitativa, con un caso de estudio y un grupo específico, que puede ser reproducido en clases de geología estructural o como actividad extracurricular. Así, los resultados obtenidos tienen carácter descriptivo con enfoque en el proceso de aprendizaje. El único resultado cualitativo son las respuestas del cuestionario.

PLANTEAMIENTO DEL TALLER

Investigación previa al desarrollo del taller

Para desarrollar una herramienta de aprendizaje significativa fue necesario responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué métodos y técnicas son más eficaces para adquirir competencias en geología estructural?
- ¿Cuáles son los métodos y técnicas más eficaces para adquirir habilidades de visualización espacial?
- ¿Cómo desarrollar talleres de proyección estereográfica para promover un aprendizaje significativo y, al mismo tiempo, la capacidad de visualización espacial?

- ¿Cuáles son las típicas respuestas incorrectas que dan los estudiantes al resolver problemas básicos de geología estructural que requieren habilidades espaciales?

Elaboración del contenido

Para solucionar las preguntas previas de la investigación y elegir las actividades para el taller, se realizó el seguimiento de la asignatura de Diseño Geológico, con el objetivo de observar el contenido de proyección estereográfica ofrecido, las dificultades comunes del alumnado y el enfoque del profesor.

La disciplina de Diseño Geológico forma parte del currículo del curso de Geología, de la Unicamp. Las clases se ofertan en el segundo año del curso para estudiantes que han cursado clases de Cartografía Sistemática, cuyo contenido implica: introducción a la cartografía, principios de geodesia, escalas, sistemas de coordenadas, proyecciones cartográficas, mapas, plantas, elementos de topografía, etc. La clase abarca los principios de geometría espacial y descriptiva y su aplicación práctica en Geología, así como el estudio de los fundamentos de la proyección estereográfica y la resolución de una serie de ejercicios prácticos de análisis de estructuras planares y lineales.

El objetivo general es capacitar al alumnado para representar e interpretar estructuras geológicas en tres dimensiones, empleando mapas y cortes. El método de aprendizaje es esencialmente activo y práctico formado por ejercicios y estudio de situaciones-problema tan cerca como sea posible de condiciones geológicas reales (Carneiro, 2016). El programa está compuesto por una parte teórica y otra práctica, siendo la parte teórica presentada al inicio de cada lección y luego se explican los conceptos (parte práctica). En la investigación el foco estuvo en el contenido de los fundamentos y aplicaciones de geología estructural y en las proyecciones estereográficas.

Dinámica de las actividades del taller

La tabla 1 muestra el contenido de los talleres, que se impartían en tres días; cada sesión diaria tenía una duración de cuatro horas, con un total de doce horas de trabajo. Las actividades del taller siguieron la siguiente dinámica:

- Presentación teórica del contenido: conceptos de proyección estereográfica, construcción de redes estereográficas, elementos de la red estereográfica, diagramas de Wulff (proyección estereográfica con rejilla ecuatorial), Schmidt (proyección de Lambe con rejilla ecuatorial), Tangente y técnicas de proyección estereográfica.
- La parte práctica contó con aplicación de ejercicios sobre: conversión de notación (Clar, Brunton-cuadrante y azimutal) y técnicas de proyección estereográfica (proyección de planos, líneas, intersección, relaciones angulares, buzamiento aparente, rotaciones). En este momento los ejercicios fueron realizados manualmente. Esta etapa del taller era muy parecida al desarrollo de una clase de Diseño Geológico tradicional.
- Una vez realizado el diagrama en papel, los ejercicios se realizaron mediante programas de ordenador. Primero en 2D (*software Ester 2.1*),

Tabla 1. Programa del taller de proyección estereográfica en Geología.

PRIMER DÍA	
PARTE TEÓRICA	PARTE PRÁCTICA (ACTIVIDADES MANUALES Y COMPUTACIONALES)
Disposición de una superficie geológica	Conversión de notación (Clar y Brunton: cuadrante y azimutal)
Proyección Estereográfica - definición y principios	Técnicas de Proyección:
Elementos de un diagrama	1 - Proyección de planos
Tipos de diagramas	2- Proyección de líneas
Técnicas de Proyección:	3 - Intersección de planos y/o líneas
1 - Proyección de planos	4- Ángulo entre planos y/ o líneas
2 - Proyección de líneas	5 - Buzamiento aparente
3 - Intersección de planos y/o líneas	
4 - Ángulo entre planos y/o líneas	
Buzamiento aparente	
SEGUNDO DÍA	
PARTE TEÓRICA	PARTE PRÁCTICA (ACTIVIDADES MANUALES Y COMPUTACIONALES)
Rotación – ¿Qué es? ¿Por qué hacer?	Operación de rotación:
Operación de rotación:	1- Vertical
1 - Vertical	2 - Horizontal
2 - Horizontal	3 - Oblicuo
3 - Oblicuo	
TERCER DÍA	
PARTE TEÓRICA	PARTE PRÁCTICA (ACTIVIDADES MANUALES Y COMPUTACIONALES)
Diagrama Tangente	Diagrama tangente:
Diagrama de Roseta	1 - Análisis de datos (intersección y buzamiento aparente)
Análisis estadístico	2 - Análisis de pliegues (cilíndrica y cónica)
	Diagrama de Roseta (actividad computacional)

después en 3D con la intención de trabajar la visualización tridimensional (*software Visible Geology*).

Para el mejor aprovechamiento del taller, el ritmo del contenido trabajado se quedó a cargo de los estudiantes. Las actividades sólo continuaron una vez que las dudas fueran solventadas. Los participantes también fueron motivados a trabajar en pequeños grupos y a tener una visión crítica sobre el contenido y sobre la resolución de las actividades. Para todas las técnicas de proyección estereográfica se seleccionaron ejercicios que presentaban posibles situaciones reales o que necesitaban algún esfuerzo más allá del uso de las técnicas. Se buscó también explorar varios tipos de ejercicios de un mismo contenido y, cuando fue posible, varias formas de resolución.

Descripción de algunas actividades del taller

Para alcanzar los objetivos de esta investigación se han propuesto una serie de actividades prácticas, cuyo coste económico es mínimo, y sólo necesita diagramas en papel y equipos conectados a la red. Los programas informáticos utilizados son gratuitos y de fácil utilización. Dichas actividades están estructuradas de manera que la complejidad aumenta de una técnica de proyección a otra.

Para la ejecución correcta de todos los ejercicios

es necesario que los estudiantes estén atentos a la explicación de la actividad, o sea, que se comprenda la situación geológica descrita y no sólo se realice el proceso de la resolución de los ejercicios.

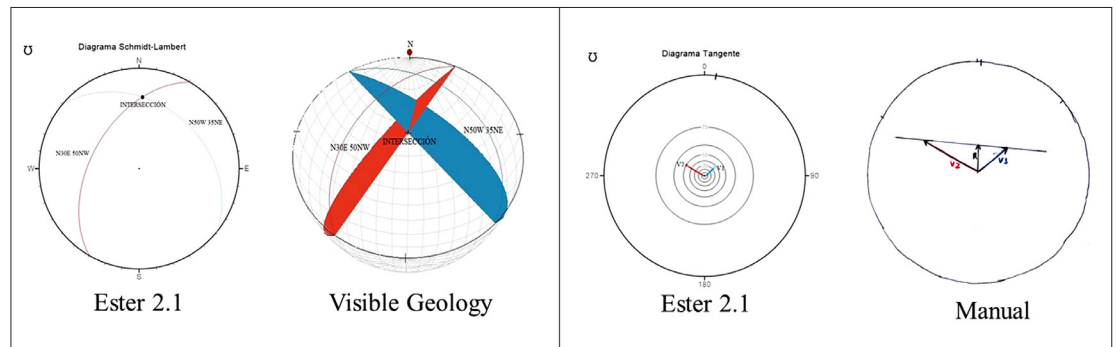
Determinación de la línea de intersección entre estructuras geológicas

La línea de intersección entre dos planos se puede representar en un diagrama por la proyección de los planos. El punto donde los planos se interceptan en los círculos mayores es la línea de intersección. Cuando dos líneas se proyectan en un diagrama, se tratan como si ambas pasaran por un punto común: el centro de la esfera de proyección. Esto significa que un plano siempre se puede montar por el cruce de cualquier par de líneas (Lisle y Leyshon, 2004).

Para esta técnica fue presentado un ejercicio que trataba de la intersección entre dos planos. En esta actividad las respuestas incorrectas motivaron por qué algunos estudiantes han proyectado el buzamiento del centro al borde. Una duda común fue: “¿por qué la intersección se representa como un punto?”. Una conclusión es que tanto la duda como las respuestas incorrectas están asociadas a problemas conceptuales.

Ejercicio) Se han medido la dirección y buzamiento de una capa plegada, una en cada flan-

Fig. 6. Ejercicio de intersección entre estructuras geológicas.



co: $N50W\ 35NE$ y $N30E\ 50NW$. Determinar la inmersión y dirección del eje del pliegue (Carneiro, 1996; pág. 20) (Fig. 6).

Respuesta: $N04E\ 28NE$

Determinación del ángulo entre estructuras geológicas

Para la determinación del ángulo entre dos rectas es necesario ponerlas en un mismo círculo mayor y medir los grados entre ellas. La determinación del ángulo formado por dos planos sigue el caso anterior y puede resolverse con la medida de los ángulos entre los polos de los planos (Carneiro, 1996).

Una duda común en los ejercicios de relaciones angulares era: “¿por qué las dos estructuras deben colocarse en un mismo círculo mayor?”. La solución fue presentar la construcción del diagrama Equidistancial (Schmidt). Esta red mantiene las relaciones angulares a lo largo de los círculos mayores (primitivo, diámetro Norte-Sur, diámetro Este-Oeste y meridianos).

Ejercicio) Considere un pliegue cuyos flancos tienen las siguientes direcciones: $N20E\ 70NW$ (Flanco A) y $N30W\ 65NE$ (Flanco B). Proyecte los dos flancos con sus respectivos polos y determine el ángulo interflancos de este pliegue (Marshak y Mitra, 1988) (Fig. 7).

Respuesta: El ángulo entre los polos de los flancos es obtuso e igual a 114° . Para visualizar el pliegue

el ángulo es agudo y así se debe considerar el ángulo suplementario que es igual a 66° .

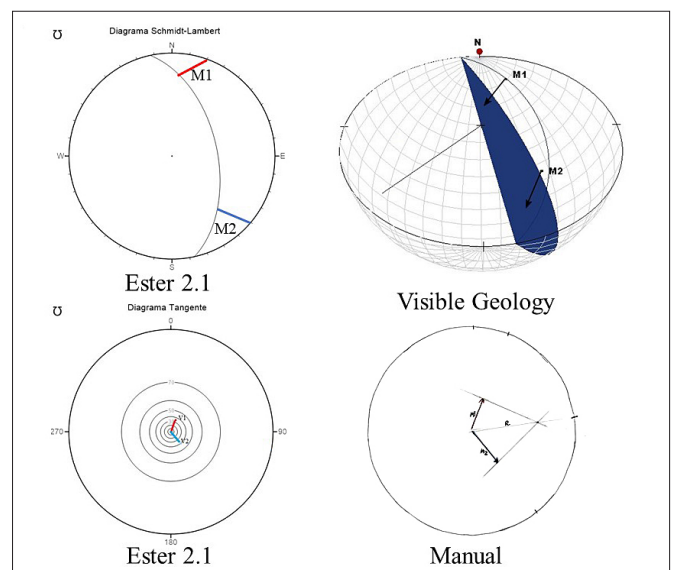
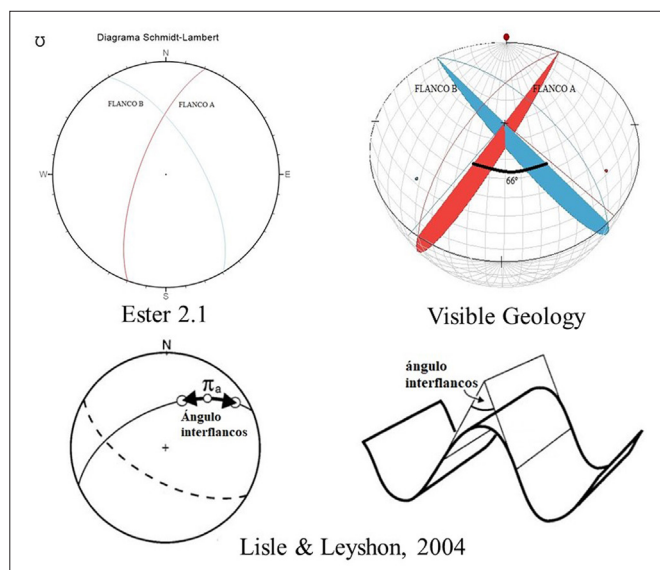
En este ejercicio el alumnado tuvo dificultad para encontrar la respuesta porque el ángulo interflancos es el suplementario del ángulo entre los polos y puede ser agudo u obtuso. El problema es que no siempre es fácil decidir si usamos el ángulo agudo u obtuso entre los polos para calcular el suplementario. Para hacer la elección correcta es necesario visualizar el pliegue y muchas veces es necesario hacer un perfil esquemático. Incluso después de la presentación de la respuesta correcta todavía quedaron dudas relacionadas con las cuestiones matemáticas. Entonces se explicaron las definiciones de ángulos y cómo éstas se aplicaban al ejercicio. La figura tridimensional facilitó la comprensión del ejercicio.

Determinación del buzamiento aparente

El buzamiento real es el ángulo de inclinación de la línea de máxima pendiente de un plano inclinado; se mide en la dirección perpendicular a la de la capa. El buzamiento aparente es el ángulo de inclinación de un plano, medido en una dirección no perpendicular a la dirección de capa. El buzamiento aparente siempre es menor que el real. Los errores en este tipo de ejercicio son debido a cuestiones conceptuales como, por ejemplo, la proyección del buzamiento aparente como si fuera un plano.

Fig. 8. Ejercicio de buzamiento aparente.

Fig. 7. Ejercicio de relación angular entre estructuras geológicas.



Ejercicio) En un corte de carretera donde aparecen cuarcitas y metaconglomerados se midieron dos buzamientos aparentes (M_1 y M_2) del contacto entre las dos unidades litológicas. El primero indicó un buzamiento de 35° en el sentido N20E y el segundo, 40° en el sentido S50E. Encontrar la dirección y buzamiento del contacto admitiendo que éste es constante en toda la región de estudio (Carneiro, 1996; pág.59) (Fig.8)

Respuesta: N12W 54NE

RESULTADOS

Resultado de los talleres

Aprender es diferente a comprender, pues provoca cambios de comportamiento. Cuando el sujeto comprende la manera en que aprende amplía su capacidad de construir el saber, pero en determinados contextos se hace necesaria la intervención de un mediador que genere mecanismos de interacción y superación para transponer las barreras arraigadas del fracaso (Beber *et al.*, 2014). En los talleres didácticos la interacción entre el mediador y el aprendiz permitió la reflexión acerca de las posibilidades y obstáculos en la búsqueda del conocimiento. El foco se centró en medir lo que el aprendiz hizo con lo que aprendió y no con lo que consiguió memorizar.

Los estudiantes fueron motivados para discutir las actividades en grupo, ya que las actividades colaborativas en pequeños grupos tienen gran potencial para facilitar el aprendizaje significativo, como ya fue propuesto por Moreira (2010). En estas situaciones los estudiantes se vuelven más cercanos y comunicativos unos con otros, lo que proporciona un intercambio de ideas y significados; el profesor queda en la posición de mediador y no de transmisor del conocimiento, que ocurre por la propia interacción del alumnado.

Las actividades manuales contribuyeron al aprendizaje del conocimiento teórico y el de la eje-

cución de las técnicas. Las actividades en ordenador contribuyeron al desarrollo de la habilidad de visualización espacial. La integración entre las actividades manuales y virtuales contribuyó con la enseñanza-aprendizaje de proyección estereográfica. En las actividades computacionales el propio programa generó los resultados (las imágenes). En este caso no hubo la preocupación con la ejecución y acierto de la tarea, y los estudiantes tuvieron la oportunidad de observar y reflexionar sobre las respuestas obtenidas (Miguel, 2018).

Resultado del cuestionario

Por las respuestas del cuestionario se sabe que las actividades que involucran operación de rotación y buzamiento aparente son las más difíciles. Posiblemente por el nivel de complejidad, ya que estos ejercicios exigen mayor atención y habilidad de visualización, y no se obtiene la respuesta sólo con actos mecánicos. Los estudiantes creen que las resoluciones elaboradas en *software* facilitaron la comprensión del contenido trabajado, pero también respondieron que no todo el contenido de proyección estereográfica puede ser facilitado por el uso de *softwares* (Fig. 9).

Algunos estudiantes respondieron que alcanzaron el aprendizaje del contenido, pero tuvieron alguna dificultad durante el camino para el conocimiento (Miguel, 2018). Aquellos que respondieron que no alcanzaron el aprendizaje del contenido están seguros de que pueden aprender si tienen la oportunidad de ejercitar las técnicas (Fig. 9). Las cuestiones que exploraban la habilidad de visualización tridimensional mostraron que la mayoría de los participantes tienen poca o ninguna habilidad de percepción espacial, cuando empiezan el curso de Geología. Las respuestas también apuntaron a que el uso de imágenes tridimensionales puede contribuir con el aprendizaje de proyección estereográfica y *softwares* de proyección estereográfica con el desarrollo de la visualización tridimensional, principalmente aquellos programas que permiten la generación de imágenes en 3D.

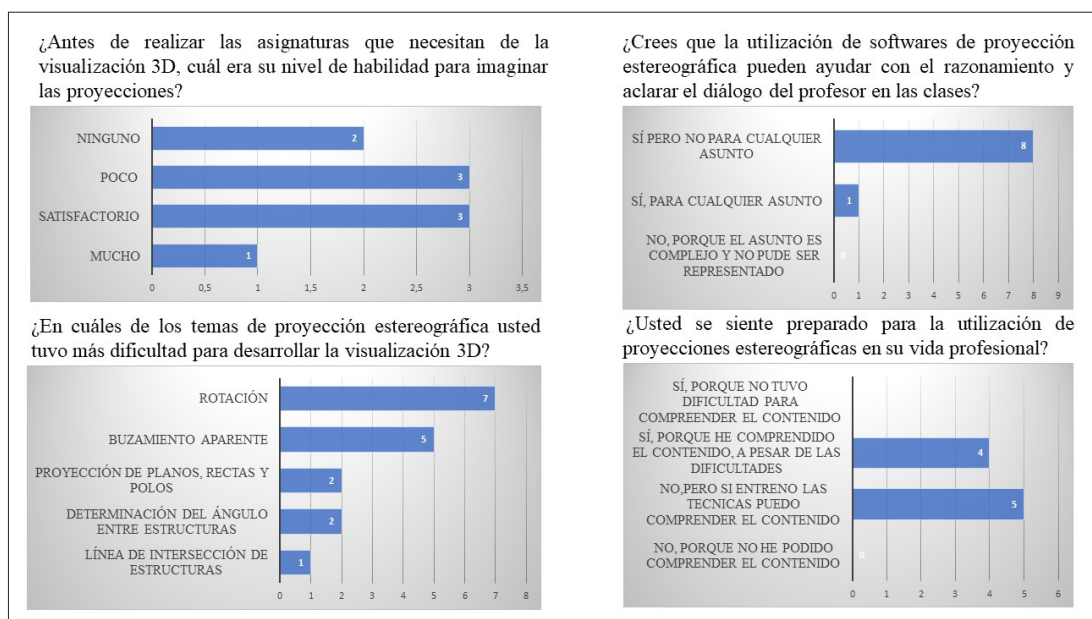


Fig. 9. Exposición de algunas preguntas del cuestionario y sus respuestas.

CONCLUSIONES

Los talleres didácticos descritos en este trabajo revelaron que el desarrollo de la visualización espacial resulta de la percepción del espacio y de la rotación mental, y que las dos son favorecidas por la asociación entre actividades manuales y computacionales mediante ordenador.

La percepción espacial se desarrolló, principalmente, en los ejercicios de técnicas de proyección estereográficas más simples, como intersección y relación angular de estructuras, que demandaron de los estudiantes la manipulación mental para entender las relaciones espaciales entre las estructuras geológicas.

La rotación mental se desarrolló en los ejercicios de rotación (vertical, horizontal y oblicuo) ya que los estudiantes tuvieron que crear imágenes mentales del movimiento de rotación, entender la situación-problema y encontrar en el ejercicio las informaciones necesarias para la ejecución de la técnica: posición del observador, sentido de la rotación, ángulo de rotación, eje de rotación.

Esta investigación reveló que el desarrollo de competencias en geología estructural será adquirido cuando el alumnado sea capaz de entender y describir las modificaciones o deformaciones de los estratos rocosos y también usar el conocimiento para tomar decisiones, resolver problemas y evaluar situaciones complejas de manera adecuada. En general, cuando los estudiantes adquieren la percepción espacial se facilita el desarrollo de la competencia. Un modo eficaz para desarrollar tal habilidad es la realización de cursos de capacitación, con actividades específicamente creadas para tratar la visualización. Los recursos tecnológicos aumentan gradualmente su incorporación en la enseñanza, por lo que conectar actividades manuales y computacionales es la clave para despertar el interés del alumnado, motivarle a aprender por propio descubrimiento y, en menor medida, por memorización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los participantes de los talleres por la contribución a los resultados de este trabajo. Agradecen a CAPES (Coordinación de Aprimoramento de Personas de Nivel Superior) por la beca de maestría a la primera autora; al CNPq (Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico), por la concesión de beca de productividad en Pesquisa, nivel 2, para el segundo autor y por las bolsas de iniciación científica concedidas por PIBIC-CNPq (Programa Institucional de bolsas de Iniciación Científica del Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico), que permitirán el crecimiento académico de varios estudiantes del curso de graduación en Geología (tercer y cuarto autor).

BIBLIOGRAFÍA

Alcalá, L., González, A. y Luque, L. (2010). Los talleres paleontológicos como recurso didáctico interactivo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18.1, 119-124

Aragão, R.M.R. (1976). *Teoria de aprendizagem significativa de David P. Ausubel*. Sistematização dos aspectos teóricos fundamentais. Tese de doutorado, Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, Unicamp.

Ausubel, D., Novak, J. y Hanesian, H. (1980). *Psicologia educacional*. Rio de Janeiro, Interamericana.

Ausubel, D.P. (2003). *Aquisição e retenção de conhecimentos*. Lisboa: Plátano Ed. Técnicas. (Trad. do original *The acquisition and retention of knowledge*).

Beber, B., Silva, E. y Bonfiglio, S. U. (2014). Metacognição como processo da aprendizagem. *Rev. Psicopedagogia*, 31(95), 144-51.

Bengtson, C.A. (1980). Structural uses of tangent diagrams. *Geology*, 8, 599-602. URL: <http://geology.geoscienceworld.org/content/8/12/599>. Acceso 27.09.2017.

Blenkinsop, T. (1999). Pedagogy of stereographic projection. *J. African Earth Sciences*, 28, 4, 897-902.

Brusi, D., Zamorano, M., Casellas, R.M. y Bach, J. (2011). Reflexiones sobre el diseño por competencias en el trabajo de campo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19.1, 4-14.

Carneiro, C.D.R. (coord.) (1996). *Projeção Estereográfica para análise de estruturas*. Programas ESTER e TRADE. Fundamentos Teóricos, Exercícios e Aplicações em Microcomputador, Laboratório e Campo. Campinas: Co-edición CPRM / IG-UNICAMP / IPT-DIGEO. 184p. (CPRM / IG-UNICAMP / IPT, Livro ISBN 85-85369-04-3).

Carneiro, C.D.R. (2016). *Programa geral da disciplina de Desenho Geológico (GE407)*. Universidade Estadual de Campinas, Unicamp. Campinas.

Carneiro, C.D.R., Guimarães, G.A., Souza, J.P.P. y Miguel, G.F. (2018). Diagrama tangente: útil recurso do programa Ester 2.1 para projeção estereográfica em Geologia. *Terræ Didática*, 14.1, 15-26. URL: http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v14_1/PDF14-1/TD14-210-2018-2.pdf

Carneiro, C.D.R. y Carvalho, A.M.A.de. (2012). Utilização de recursos de ambiente CAD em Geologia Estrutural. *Terræ Didática*, 8.2, 83-93. URL: [10.20396/td.v8i2.8637417](https://doi.org/10.20396/td.v8i2.8637417). Aceso 13.03.2018.

Chadwick, P. (1978). Some aspects of the development of geological thinking. *Geology Teaching*, 3, 142-148.

Davis, G.H., Reynolds, S.J. y Kluth, C.F. (2011). *Structural Geology of Rocks and Regions*, 3rd Ed., 864p.

Frodeman, R.L. (1995). Geological reasoning: Geology as an interpretive and historical science. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107.8, 960-968.

Frodeman, R. (2010). O raciocínio geológico: a geologia como uma ciência interpretativa e histórica. Trad. L.M. Fantinel y E.V.D. Santos. *Terræ Didática*, 6.2, 85-99. DOI: [10.20396/td.v6i2.8637460](https://doi.org/10.20396/td.v6i2.8637460). Aceso 13.03.2018.

Gil, A., Cortés, A.L., Arlegui, L.E., Román, T. y Liesa, C.L. (1997). El uso de modelos experimentales en la enseñanza de Geología Estructural (I) Aplicación a la deformación continuada. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 5-3, 219-225.

Guimarães, G.A. y Carneiro, C.D.R. (2016). Práticas de Geologia Estrutural e visualização 3D com uso do Programa Ester para projeção estereográfica. In: Congr. Interno Inic. Cient., 24, Campinas, Resumos... Unicamp, Campinas. URL: <https://proceedings.galoa.com.br/unicamp-pibic/pibic-2016/trabalhos/praticas-de-geologia-estrutural-e-visualizacao-3d-com-uso-do-programa-ester-para-projecao>. [Resumo E50802]

Kastens, K.A., Agrawal, S. y Liben, L.S. (2009). How students and field geologists reason in integrating spatial observation from outcrop to visualize a 3-D geological structure. *Intern. J. Science Educ.*, 31.3, 365-393.

Lisle, R.J. y Leyshon, P.R. (2004). *Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers*. 2 Ed., 112p. Cambridge University Press, New York.

Loczy, L. y Ladeira, E.A. (1976). *Geologia Estrutural e Introdução à Geotectônica*. Edgar Blücher, São Paulo. 528 p.

Marshak, S. y Mitra, G. (1988). *Basic Methods of Structural Geology*. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

Miguel, G.F. (2018). *Visualização 3D como condição para a aprendizagem significativa em Geologia Estrutural*. Tesis de maestría, Instituto de Geociencias, Universidad Estatal de Campinas.

Mizuno, T.A. y Carneiro, C.D.R. (2007). Atualização de softwares de projeção Estereográfica para sistema operacional 32 bits, a partir de Ester 1.0 – DOS. In: Congr. Interno Inic. Cient, 15, Campinas. *Resumos...* Unicamp, Campinas. [pdfN/995.pdf]

Mizuno, T.A. y Carneiro, C.D.R. (2008). Implementação e divulgação de software de projeção Estereográfica em sistema operacional 32 bits. In: Congr. Interno Inic. Cient., 16, Campinas. *Resumos...* Unicamp, Campinas. p. 37. [pdfN/844.pdf]

Moreira, M.A. (2010). *O que é afinal aprendizagem significativa?* Material de apoio para o curso Aprendizagem Significativa no Ensino Superior: Teorias e Estratégias Facilitadoras. PUCPR, 2012, 2013. URL: <http://www.faatensino.com.br/wp-content/uploads/2014/04/Aprendizagem-significativa-Organizadores-pr%C3%A9vios-Diagramas-V-Unidades-de-ensino-potencialmente-significativas.pdf#page=5>. Aceso 13.03.2018.

Reynolds, S.J., Johnson, J.K., Piburn, M.D., Leedy, D.E., Coyan, J.A. y Busch, M.M. (2005). Visualization in Undergraduate Geology Courses. In: Gilbert J.K. (eds) *Visualiza-*

tion in Science Education. Models and Modeling in Science Education, vol 1. Springer, Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-3613-2_13. Aceso 13.03.2018.

Ruiz, P.B. (1993). Aplicaciones del medio video en el aprendizaje de la Geología. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 1.1, 44-46. URL: <http://www.raco.cat/index.php/ECT/article/viewFile/88083/140250>. Aceso 13.03.2018.

Souza, J.P.P. y Carneiro, C.D.R. (2013). Atualização de programa de projeção Estereográfica em ambiente Windows e criação de materiais educacionais a partir dos programas ESTER e TRADE. In: Congr. Interno Inic. Cient., 21, Campinas, *Resumos...* Unicamp, Campinas. [ResumoE0563]. URL: www.prp.rei.unicamp.br/pibic/congressos/xxicongresso/cdrom/FSCOMMAND/pdfN/563.pdf. Aceso 13.03.2018.

Vacas, J.M., Chamoso, J.M. y Urones, C. (2009). Los programas de ordenador deformación y malas como recurso para el aprendizaje de la geología. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17.1, 57-66. URL: <http://www.raco.cat/index.php/ect/article/viewFile/184046/237102>. Aceso 13.03.2018.

Vich, R. B. B. y Ortiz, D. G. (2010). Problemas de Geología Estructural. Análisis estructural mediante diagramas de contornos. *Reduca* (Geología). Serie Geología Estructural. 2.1, 148-192.

Waldron, J. (2009). *Stereographic Projection*. University of Alberta: Department of Earth and Atmospheric Science. (EAS 233 Geologic Structures and Maps Winter 2009). ■

Este artículo fue recibido el día 14 de noviembre de 2017 y aceptado definitivamente para su publicación el 20 de abril de 2018.