

Caracterización estructural de afloramientos rocosos mediante herramientas de percepción remota

Structural characterization of rocky outcrops through remote sensing tools

Albeiro López Pulido¹ & Lorena Rayo Rocha²

Para citar este artículo: Lopez-Pulido, A. & Royo-Rocha, L. (2019). Caracterización estructural de afloramientos rocosos mediante herramientas de percepción remota. *UD y Geomática*, (14), 5-11

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448407.15249>

Fecha de recepción: 14 de septiembre de 2019

Fecha de aceptación: 04 de diciembre de 2019

RESUMEN

Se elaboró un modelo digital tridimensional (3D) de un afloramiento de rocas sedimentarias del Grupo Guadalupe en la Cordillera Oriental de Colombia, mediante la captura de imágenes aéreas utilizando un vehículo aéreo no tripulado (VANT), con el fin de realizar su caracterización estructural. Para esto, se usó un software especializado para el modelado e interpretación de información tridimensional. Se obtuvieron 62 datos estructurales, 30 de estos corresponden a estratificación, y 32 a familias de fracturas. Se encontró que la secuencia sedimentaria buza uniformemente hacia el occidente (253/59, dirección de buzamiento/buzamiento), y presenta tres familias de fracturas principales: familia 1 (335/84), familia 2 (153/63) y familia 3 (92/51). Este estudio demuestra la utilidad de aplicación de técnicas de percepción remota al campo de las geociencias.

Palabras claves: fotogrametría, geología estructural, afloramiento virtual VOM, DOM, VANT.

ABSTRACT

A three-dimensional (3D) digital model of an outcrop of sedimentary rocks of the Guadalupe Group in the Eastern Cordillera of Colombia was elaborated, by capturing images of an unmanned aerial vehicle (UAV), in order to carry out its structural characterization. For this, specialized software was used for modelling and interpretation of three-dimensional information. 62 structural data were obtained, 30 of these corresponding to stratification, and 32 to sets of fractures. It was found that the sedimentary sequence dip uniformly towards the west (253/59, direction of dip / dip), and presents three sets of major fractures: set 1 (335/84), set 2 (153/63) and set 3 (92/51). This study demonstrates the usefulness of remote sensing techniques in the field of geosciences.

Keywords: Photogrammetry, structural geology, virtual outcrop, VOM, DOM, UAV.

1 Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería, Especialización en Geomática. DAVANT SAS. u3101446@unimilitar.edu.co
2 Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería, Especialización en Geomática. DAVANT SAS. u3101451@unimilitar.edu.co

Introducción

La caracterización de un afloramiento rocoso posee gran importancia en los estudios geológicos, ya que de allí se extrae información acerca de las formaciones geológicas presentes, como litología, geometría de las capas, grado de alteración, etc., así como datos estructurales que son importantes a la hora de definir los eventos de deformación que han sufrido estas unidades geológicas (superficies de fractura, geometría de fallas y plegamientos, etc.). Tradicionalmente se requiere un trabajo de campo en donde los profesionales geólogos realizan, de manera directa en los afloramientos, descripciones litológicas y estratigráficas, medición de planos estructurales con brújula, etc. Sin embargo, en ocasiones, dicha caracterización no es posible debido a problemas técnicos ocasionados por difíciles accesos, áreas remotas e, inclusive, distorsión de la perspectiva, lo que lleva a que la labor sea ineficiente en términos de tiempo, esfuerzo y adquisición de datos.

Por otra parte, las técnicas actuales en percepción remota, con el uso de estaciones terrestres remotas y de plataformas aéreas no tripuladas, permiten adquirir gran cantidad de información útil que puede ser empleada en el campo de las geociencias. Dado que los cuerpos geológicos son de carácter tridimensional, su aproximación y estudio debe realizarse en tres dimensiones, y los nuevos métodos con sensores remotos abren diversas posibilidades en este campo de aplicación.

Allí, surge como una herramienta de apoyo la elaboración de modelos tridimensionales de afloramientos basados en sensores remotos, los cuales, además de ser complementarios a las técnicas tradicionales, brindan la posibilidad de tomar mediciones extensas a diferentes escalas y en lugares inaccesibles.

La técnica de modelado 3D de afloramientos ha sido introducida en los estudios geológicos desde principios de este siglo (Bellian, Kerans y Jennette, 2005; Buckley, Enge, Carlsson y Howell, 2010; Buckley, Howel, Enge y Kurz 2008; García-Sellés *et al.*, 2011; Haneberg, Norrish y Findley, 2006; Hodgetts, 2011; Hodgetts, Gawthorpe, Wilson y Rarity, 2007; Jones *et al.*, 2008; Menichetti, Piacentini, De Donatis y Tirincanti, 2016; Minisini, Wang, Bergman y Aiken, 2014; Pringle *et al.*, 2001; Xu, Aiken y Nielsen, 1999; Xu *et al.*, 2000), y son conocidos como modelos virtuales de afloramiento (VOM, por su sigla en inglés), modelos digitales de afloramientos (DOM, por su sigla en inglés) o modelos de afloramientos fotorrealísticos.

El levantamiento 3D de afloramientos rocosos con sensores remotos se puede realizar desde plataformas terrestres o aéreas, mediante dos técnicas principales: fotogrametría y Lidar. La primera emplea el paralaje obtenido de un par de fotos tomadas desde distintos puntos de observación para obtener una imagen estereoscópica y así realizar la reconstrucción tridimensional del área. En cambio, la tecnología Lidar emplea los pulsos de retorno de un haz

láser que es incidido en la superficie de estudio. Una de las tecnologías más comunes es el *escaneo Lidar terrestre* (TLS, por su sigla en inglés), la cual permite crear nubes con millones de puntos, a partir de los cuales se crean modelos tridimensionales de alta resolución. A esta técnica se recurre ampliamente para el modelado en áreas urbanas en el mundo y, en algunos casos, para trabajos puntuales de poca extensión; sin embargo, aún es una técnica costosa y de difícil acceso.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este estudio se buscó emplear una técnica costo efectiva para la creación de modelos tridimensionales de afloramientos rocosos, reducir el tiempo en campo, y llegar a zonas inaccesibles, a través de fotogrametría con plataformas aéreas no tripuladas. Los beneficios de la fotogrametría son, entre otros, mayor versatilidad, dado que permite el estudio de zonas inaccesibles y en diferentes escalas; económica, y además los resultados obtenidos presentan precisión centimétrica en X, Y y Z (Favalli *et al.*, 2012; Haneberg, 2008; Tavani *et al.*, 2014). Corradetti (2016) empleó métodos fotogramétricos para demostrar y evaluar el potencial de los afloramientos virtuales en la geología estructural; en su estudio, probó que los métodos fotogramétricos pueden ser empleados en geología en diferentes situaciones y a diferentes escalas, dado que se puede producir modelos precisos, con errores promedio de 2-3 %, y esto puede ser aceptable dependiendo del objetivo del trabajo.

Con esta técnica se han realizado estudios en zonas de falla evaluando su rugosidad (Corradetti, 2016), o caracterización de la superficie de ruptura de zonas de fallas sismogénicas (Menichetti *et al.*, 2016). Otros estudios emplean las mediciones estructurales extraídas de modelos digitales en 3D integrados al mapeo convencional, para proyectos de estabilización de laderas (Haneberg *et al.*, 2006) *panned, and zoomed. The photogrammetry and much of the structural mapping were performed using software created for surface mining applications. Each 3-D model consists of a rectified digital photograph integrated with a cloud of several hundred thousand x-y-z points, with estimated positional errors typically on the order of millimeters to centimeters. Discontinuity orientations are determined by fitting planes to user-selected surfaces or their traces, and the fitted planes can be added to the 3-D model to facilitate visualization of the outcrop-scale structural geology. Discontinuity orientations can be exported and plotted on stereo or equal area nets, and the software calculates surface areas of planes and lengths of traces to characterize discontinuity persistence and spacing. Profiles can be extracted for outcrop-scale joint roughness coefficient (JRC.*

No obstante, el modelado 3D de afloramientos no solo permite extraer información estructural, sino también de otra naturaleza, como cambios faciales litológicos, variaciones de las secuencias sedimentarias, entre otros. Actualmente la integración de otros tipos de sensores, como multi- e hiperespectrales (*e.g.* Kurz *et al.*, 2012), permitirá

pasar de una geología más descriptiva a la cuantificación de la información geológica.

Por otra parte, es importante resaltar que estas técnicas actualmente se emplean como herramientas de enseñanza en geociencias y en la investigación (Cawood y Bond, 2018; McCaffrey *et al.*, 2005). En la actualidad existen repositorios web de afloramientos virtuales, como eRock (<https://www.e-rock.co.uk/map>), que además de geoeducación tienen el propósito de la geoconservación, por ejemplo, guardar el registro de afloramientos que se encuentran en costas o zonas en riesgo de ser erosionados o eliminados por corrientes, deslizamientos, erupciones o cualquier otra dinámica que se aplique sobre la tierra, o simplemente a ser cubiertos por una obra civil que no permita más su acceso.

Metodología

Área de estudio

El afloramiento analizado se localiza en la zona rural del municipio de Choachí (Cundinamarca). Puntualmente en el kilómetro 12 de la vía Bogotá-Choachí, al borde de vía, en el sitio conocido como parador El Marqués del Ounce (figura 1). Este lugar forma parte de una antigua cantera actualmente inactiva. El afloramiento presenta 45 m de alto y 80 m de longitud.

Las rocas expuestas en esta sección corresponden principalmente a rocas sedimentarias, arenitas cuarzosas y limolitas, pertenecientes a la formación Plaeners, del Grupo Guadalupe, de edad Campaninano Superior (Ingeominas, 2008).

Métodos y materiales

Para la adquisición de fotografías aéreas del afloramiento, se empleó un vehículo aéreo no tripulado tipo multirrotor, marca DJI, modelo *Phantom 3 Advanced*, el cual se encuentra equipado con una cámara RGB de 12.4 Mpx y una lente de FOV de 94° 20 mm (lo cual es equivalente en formato de 35 mm) f/ 2.8 al ∞ (<https://www.dji.com/phantom-3-adv>).

Para la planeación del vuelo se tuvo en cuenta la localización del afloramiento y la posición del sol, con el fin de tener la menor cantidad de áreas oscuras posibles, ya que el principal objetivo era la salida de un modelo 3D. Por lo anterior, se realizaron dos vuelos manuales, en los cuales se tomaron imágenes con un traslape vertical y lateral de por lo menos el 50 % del área adquirida. En campo se tomó una medida de referencia dentro del afloramiento para verificar la integridad y veracidad del modelo obtenido. Para la toma de fotografías la cámara se configuró con ángulos entre 45° y 90° con respecto a la vertical y se programó la

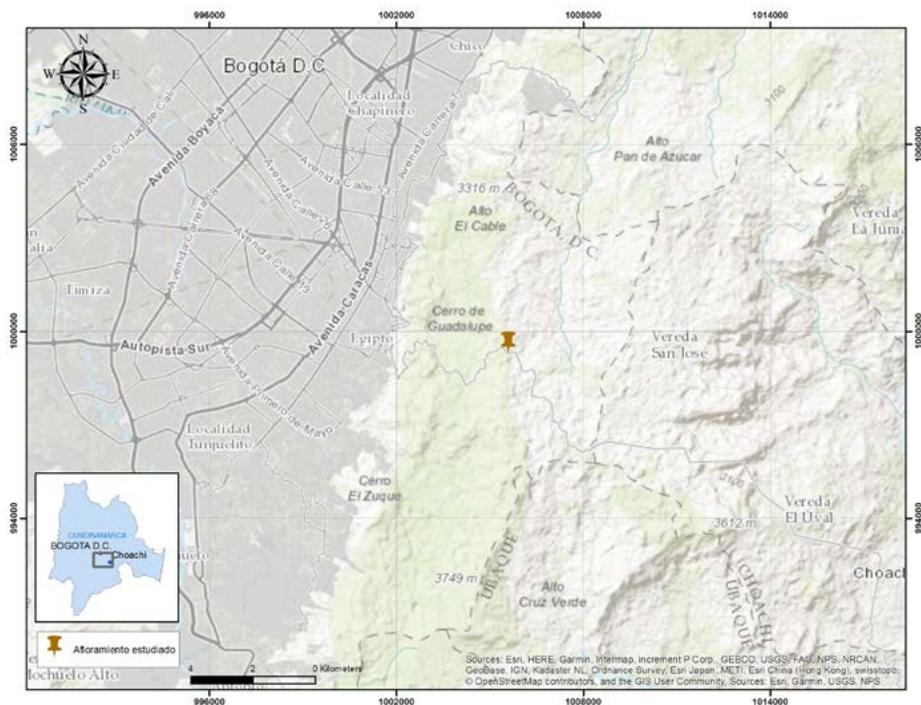


Figura 1. Localización área de estudio

Fuente: Ingeominas (2018).

máxima resolución de las fotografías (adquiridas en HD). En total se adquirieron 240 imágenes, con resolución de 4000×2250 píxeles.

El procesamiento de imágenes se realizó en el *software* comercial para fotogrametría *Pix4Dmapper* (<https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>). Este programa profesional está especialmente diseñado para el manejo de información adquirida con drones, permite la generación y edición de las nubes de puntos, *modelos digitales de superficie* (DSM, por su sigla en inglés) y mallas 3D (3D *mesh*).

El flujo de trabajo en este *software* consistió en exportar las fotografías al *Pix4Dmapper*, dado que las imágenes fueron adquiridas con un equipo DJI, el programa automáticamente detecta las características de las fotografías (tipo y especificaciones de la cámara, posición y orientación de las imágenes, etc.). Luego, automáticamente genera una nube de puntos aplicando un modelo de ajuste de bloque simultáneo (*bundle block adjustment*), en este

caso se usaron 1.220.613 puntos 3D para el ajuste. Posteriormente de forma manual se realizó la depuración de la nube de puntos, mediante la clasificación de puntos que no corresponden al afloramiento o aparecen mal localizados, lo que le aporta ruido al modelo. Finalmente, esta nube de puntos se procesa y se ejecuta la creación de la malla 3D en formato .obj; para la creación de esta malla se usó una resolución media.

La abstracción de la información estructural del modelo 3D se realizó con el *software Virtual Reality Geological Studio (VRGS®)* creado por investigadores de la Universidad de Manchester (Reino Unido), especialmente para trabajar con modelos digitales de afloramientos en 3D (Hodgetts, s.f.). Este permite visualizar e interpretar estos modelos mediante el cálculo de atributos basado en la geometría de las superficies, además posibilita extraer datos estructurales (en dirección de buzamiento/buzamiento) de los modelos, como: fallas, capas, contactos y pliegues, entre otros cuerpos geológicos; a partir de los cuales se puede obtener



Figura 2. Izquierda, fotografía del afloramiento. Derecha, Modelo 3D del afloramiento

Fuente:

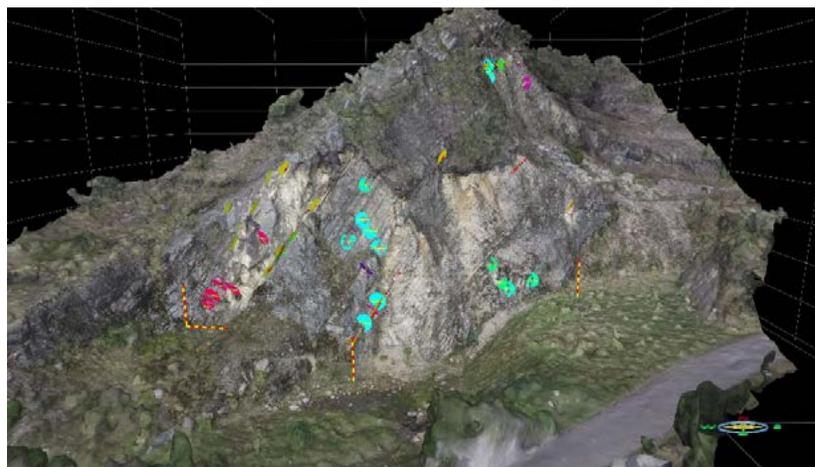


Figura 3. Análisis estructural realizado con VRGS®

Fuente:

como salidas estereogramas o información geoestadística. Además, en este programa se pueden ajustar las escalas de los afloramientos con elementos que estén dentro de este, además de refinar atributos de nube de puntos. Para emplear este programa el modelo 3D debe estar geolocalizado y la interpretación se realiza de manera manual.

Resultados

Mediante la adquisición de fotografías aéreas con un equipo VANT se generó un modelo 3D de un afloramiento de rocas sedimentarias del Grupo Guadalupe con una resolución de (GSD) de 1 cm (figura 2). La nube de puntos 3D generada tiene 9.727.929 puntos, con una densidad promedio (por $m^3 =$ de 1979,7 puntos) (figura 2).

La caracterización permitió obtener 62 datos estructurales, 30 de estos corresponden a estratificación, y 32, a familias de fracturas. Adicionalmente, los datos fueron graficados en estereogramas que facilitan la visualización de los planos mediante su proyección (figuras 3 y 4).

Se encontró que la secuencia sedimentaria buza uniformemente hacia el occidente (253/59, dirección de buzamiento/buzamiento), y presenta tres familias de fracturas principales: familia 1 (335/84), familia 2 (153/63) y familia 3 (92/51) (figura 4).

Discusión de resultados

En las técnicas tradicionales de campo se usa la brújula para obtener una medición directa de la orientación espacial del plano de interés (estratificación, fractura, plano de falla, contacto, etc.). Esta técnica de medición puede traer consigo ciertos errores ocasionados por esta misma (Ragan, 2009; Woodcock, 1976), o por la naturaleza del

plano (Groshong, 2006), o por la experticia de quien está tomado el dato. Inclusive, puede haber sesgo en las mediciones, debido a la falta de accesibilidad a algunos sitios de afloramiento; por ejemplo, cuando los afloramientos poseen gran altura, y es difícil para un profesional alcanzar algunos planos sin poner en riesgo su seguridad, es común que quede información por recopilar o subestimada en los datos registrados en campo.

Para solucionar esto, se requiere hacer mediciones sistemáticas de los planos, con el fin de iniciar un manejo estadístico de estos. En geología estructural se usan proyecciones estereográficas para representar estos objetos de dos y tres dimensiones, generalmente se grafican los polos estereográficos de estos planos y se realizan diagramas de densidad de contornos a fin de establecer centroides estadísticos.

Por esta razón, los resultados obtenidos en este estudio demuestran la utilidad de la técnica de modelado 3D de afloramientos, como complementaria a las herramientas convencionales para extraer información estructural de los afloramientos.

Esta herramienta facilita la interpretación de la información geológica, mas en sí misma no reemplaza los trabajos de campo. De hecho, ha sido objeto de discusión por diversos autores (Corradetti, 2016; Hodgetts, 2011; Jones *et al.*, 2011), por cuanto no reemplaza el trabajo de campo, si no que permite mejorar la calidad de los datos, disminuir la incertidumbre de las mediciones y mejorar la eficiencia de la recolección de datos.

Otros estudios emplean las mediciones estructurales extraídas de modelos digitales en 3D integrados al mapeo convencional, para proyectos de estabilización de laderas. Por ejemplo, los estudios realizados por Haneberg *et al.* (2006), resaltan la utilidad de esta técnica en los análisis cinemáticos para mecanismos de falla estructuralmente controlados, perfiles de rugosidad, simulaciones de caída de

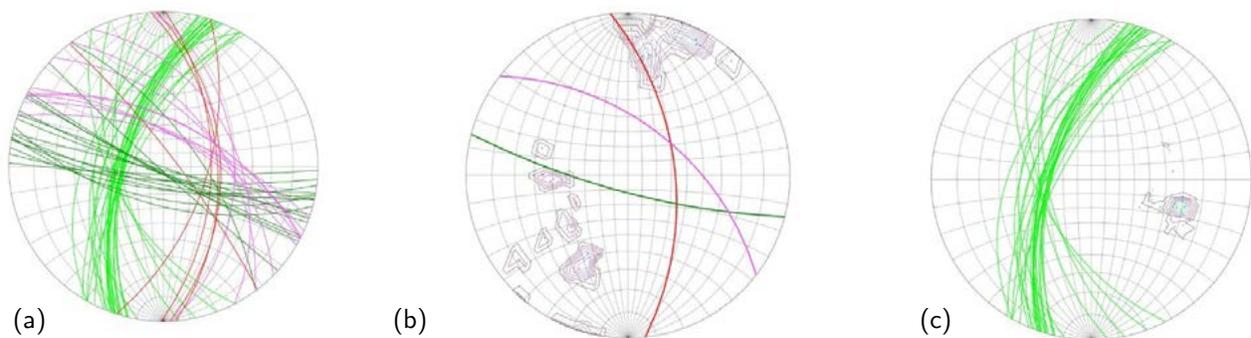


Figura 4. Estereogramas representando los datos extraídos del afloramiento con el *software* VRGS®. (a) todos los planos identificados, $n=62$; (b) planos principales fracturas identificadas, $n=32$; (c) planos de estratificación, $n=30$.

Fuente:

rocas, y para el diseño de la remediación y la cuantificación de cantidades para voladuras y escalado.

En la industria de los hidrocarburos esta información es bastante útil y ha sido empleada para modelar la heterogeneidad geológica en los reservorios de hidrocarburos (Hodgetts, 2011). La información estructural es valiosa ya que ayuda a entender los posibles patrones de circulación de fluidos. Otro tipo de datos extraídos de este conjunto de afloramientos incluye: geoestadística de los datos geológicos subyacentes, control en la morfología de la superficie, como la orientación de los estratos, la geometría de las fallas y la distribución de facies; este compendio tomado en superficie se extrapola a las condiciones de los yacimientos en el subsuelo.

Conclusiones

Las herramientas de sensores remotos tienen gran aplicación para la adquisición de la información geológica. En este trabajo se hizo la captura de imágenes aéreas para construir un modelo virtual 3D de un afloramiento que tiene un registro geológico, con el fin de realizar su caracterización estructural mediante *software* de análisis de objetos 3D. Se obtuvo información de dirección de buzamiento/buzamiento de la estratificación de las capas y direcciones principales de fracturamiento.

Referencias bibliográficas

- Bellian, J.A., Kerans, C. y Jennette, D.C. (2005). Digital Outcrop Models: Applications of Terrestrial Scanning Lidar Technology in Stratigraphic Modeling. *Journal of Sedimentary Research*, 75(2), 166–176. DOI: doi.org/10.2110/jsr.2005.013
- Buckley, S.J., Enge, H.D., Carlsson, C. y Howell, J.A. (2010). Terrestrial laser scanning for use in virtual outcrop geology. *Photogrammetric Record*, 25(131), 225–239. DOI: doi.org/10.1111/j.1477-9730.2010.00585.x
- Buckley, S.J., Howel, J.A., Enge, H.D. y Kurz, T.H. (2008). Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. *Journal of the Geological Society*, 165(3), 625–638. DOI: doi.org/10.1144/0016-76492007-100
- Cawood, A. y Bond, C. (2018). eRock: an online, open-access repository of virtual outcrops and geological samples in 3D. *Geophysical Research Abstracts*, 20. Recuperado de www.e-rock.org
- Corradetti, A. (2016). *3D structural characterization of outcrops by means of close-range multi-view stereo-photogrammetry*. [Tesis doctoral]. University of Naples Federico II. Nápoles, Italia. Recuperado de http://www.fedoa.unina.it/10683/1/Corradetti_Amerigo_28.pdf
- Favalli, M., Fornaciai, A., Isola, I., Tarquini, S. y Nannipieri, L. (2012). Multiview 3D reconstruction in geosciences. *Computers and Geosciences*, 44, 168–176. DOI: doi.org/10.1016/j.cageo.2011.09.012
- García-Sellés, D., Falivene, O., Arbués, P., Gratacos, O., Tavani, S. y Muñoz, J.A. (2011). Supervised identification and reconstruction of near-planar geological surfaces from terrestrial laser scanning. *Computers and Geosciences*, 37(10), 1584–1594. DOI: doi.org/10.1016/j.cageo.2011.03.007
- Groshong, R.H. (2006). *3-D Structural Geology: a Practical Guide to Surface and Subsurface Map Interpretation*. 2a. ed. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: doi.org/10.1007/978-3-540-31055-6
- Haneberg, W.C. (2008). Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(4), 457–469. DOI: doi.org/10.1007/s10064-008-0157-y
- Haneberg, W.C., Norrish, N.I. y Findley, D.P. (2006). Digital Outcrop Characterization for 3-D Structural Mapping and Rock Slope Design Along Interstate 90 Near Snoqualmie Pass, Washington. En *Proceedings 57th Annual Highway Geology Symposium* (pp. 1–14). Recuperado de [http://www.wnrockeng.com/files/Digital Outcrop Characterization.pdf](http://www.wnrockeng.com/files/Digital%20Outcrop%20Characterization.pdf)
- Hodgetts, D. (s.f.). *VRGeoscience* (Computer software). Recuperado de <http://www.vrgeoscience.com/>
- Hodgetts, D. (2011). Quantitative geology from digital outcrop data for the characterisation of hydrocarbon reservoirs. *Geophysical Research Abstracts*, 13, 4065–4065. Recuperado de <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2011/EGU2011-4065.pdf>
- Hodgetts, D., Gawthorpe, R.L., Wilson, P., y Rarity, F. (2007). Integrating Digital and Traditional Field Techniques Using Virtual Reality Geological Studio (VRGS). En *69th EAGE Conference and Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2007* (pp. XX-XX). DOI: doi.org/10.3997/2214-4609.201401718
- Ingeominas. (2008). Geología de la Plancha 228, Bogotá Noreste. Escala 1:100.000.
- Jones, R.R., Pringle, J.K., McCaffrey, K.J.W., Inber, J., Wightman, R.H., Guo, J. y Long, J.J. (2011). Extending Digital Outcrop Geology into the Subsurface. En O.J. Martinsen, A.J. Pulham, P.D.W. Haughton y M.D. Sullivan (eds.), *Outcrops Revitalized: Tools, Techniques and Applications* (Vol. 10, pp. 31–50). DOI: doi.org/10.2110/sepmscp.10.031
- Jones, R.R., Wawrzyniec, T.F., Holliman, N.S., McCaffrey, K.J.W., Imber, J. y Holdsworth, R.E. (2008). Describing the dimensionality of geospatial data in the earth sciences—Recommendations for nomenclature. *Geosphere*, 4(2), 354. DOI: doi.org/10.1130/ges00158.1

- Kurz, T.H., Dewit, J., Buckley, S.J., Thurmond, J.B., Hunt, D.W. y Swennen, R. (2012). Hyperspectral image analysis of different carbonate lithologies (limestone, karst and hydrothermal dolomites): The Pozalagua Quarry case study (Cantabria, North-west Spain). *Sedimentology*, 59(2), 623–645. DOI: doi.org/10.1111/j.1365-3091.2011.01269.x
- McCaffrey, K.J.W., Jones, R.R., Holdsworth, R.E., Wilson, R.W., Clegg, P., Imber, J., ... Trinks, I. (2005). Unlocking the spatial dimension: digital technologies and the future of geoscience fieldwork. *Journal of the Geological Society*, 162(6), 927–938. DOI: doi.org/10.1144/0016-764905-017
- Menichetti, M., Piacentini, D., De Donatis, M. y Tirincanti, E. (2016). Virtual Outcrop And 3D Structural Analysis of Monte Vettore Extensional Active Faults. En: *Conference: 35° Convegno Gruppo Nazionale Di Geofisica Della Terra Solida* (pp. 64–67). Recuperado de <http://www3.ogs.trieste.it/gngts/files/2016/SSp/Riassunti/Menichetti.pdf>
- Minisini, D., Wang, M., Bergman, S.C. y Aiken, C. (2014). Geological data extraction from lidar 3-D photorealistic models: A case study in an organic-rich mudstone, Eagle Ford Formation, Texas. *Geosphere*, 10(3), 610–626. DOI: doi.org/10.1130/GES00937.1
- Pringle, J.K., Clark, J.D., Westerman, A.R., Stanbrook, D.A., Gardiner, A.R. y Morgan, B. E.F. (2001). Virtual outcrops: 3-D reservoir analogues. *Journal of the Virtual Explorer*, 4(9). DOI: doi.org/10.3809/jvirtex.2001.00036
- Ragan, D. (2009). *Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques*. 4a. ed. Cambridge University Press.
- Tavani, S., Granado, P., Corradetti, A., Girundo, M., Iannace, A., Arbués, P., ..., Mazzoli, S. (2014). Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). *Computers and Geosciences*, 63, 44–53. DOI: doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.013
- Woodcock, N.H. (1976). The Accuracy of Structural Field Measurements. *The Journal of Geology*, 84(3), 350–355. DOI: doi.org/10.1086/628200
- Xu, X., Aiken, C.L.V. y Nielsen, K.C. (1999). Real time and the virtual outcrop improve geological field mapping. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 80(29), 317, 322-324. DOI: doi.org/10.1029/99EO00232
- Xu, X., Aiken, C.L.V., Bhattacharya, J.P., Corbeanu, R.M., Nielsen, K.C., McMechan, G.A. y Abdelsalam, M.G. (2000). Creating virtual 3-D outcrop. *The Leading Edge*, 19(2), 197–202. DOI: doi.org/10.1190/1.1438576

