

# Emplazamiento y deformación de diques con morfología zig-zag en rocas bandeadas y foliadas

## *Emplacement and deformation of zig-zagging dykes in banded and foliated rocks*

Lina M. Castaño y Elena Druguet

Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra, Barcelona. linamarcela.castano@uab.cat; elena.druguet@uab.cat

### ABSTRACT

*A rather common feature of dykes intruded in banded and/or foliated rocks is their non-planar shape. This study describes the characteristics of zig-zagging magmatic dykes that occur in the Rainy Lake area of the Canadian Archean shield. The dykes are formed by planar or curved segments of different orientations, their dilation being normal to the dyke envelope. The zig-zag pattern can be due to lithological heterogeneity and/or mechanical anisotropy of the host rock. When affected by ductile post-emplacement deformation, the zig-zagging dykes may develop into folds. Caution should be taken when using these structures as strain markers, specially in intensely deformed domains where distinction between intrusive zig-zags and folds is not straightforward.*

**Key words:** *dyke-fracture, fold, rheology, strain analysis, zig-zag geometry*

*Geogaceta, 45 (2008), 11-14  
ISSN: 0213683X*

### Introducción

En un gran número de contextos corticales, las rocas son litológicamente heterogéneas o mecánicamente anisótropas a escala de afloramiento, de modo que su respuesta a la intrusión y emplazamiento de diques difiere según su reología. Ello puede contribuir a que las fracturas y los diques no presenten una geometría planar, frecuente en medios isótropos, sino que presenten marcadas variaciones en dirección y/o buzamiento.

En dominios corticales medios y profundos sometidos a deformación dúctil, el emplazamiento de diques supone una interrupción «instantánea» del flujo dúctil en pro de la fracturación. Posterior a la cristalización de los diques, el medio recupera el comportamiento dúctil, de modo que los diques solidificados, al tratarse de cuerpos generalmente competentes en relación al encajante metamórfico (e.g. granito en esquistos) se deforman plegándose o desarrollando estructuras de *boudinage*. Los sistemas o enjambres de diques deformados constituyen un buen marcador de la deformación y de la cinemática (Hutton, 1982; Hanmer and Passchier, 1991; Passchier and Trouw, 2005). Los métodos utilizados en este tipo de análisis suelen asumir el carácter planar y continuo de las intrusiones, condiciones no siempre satisfechas. Existe así el caso de diques discontinuos en seg-

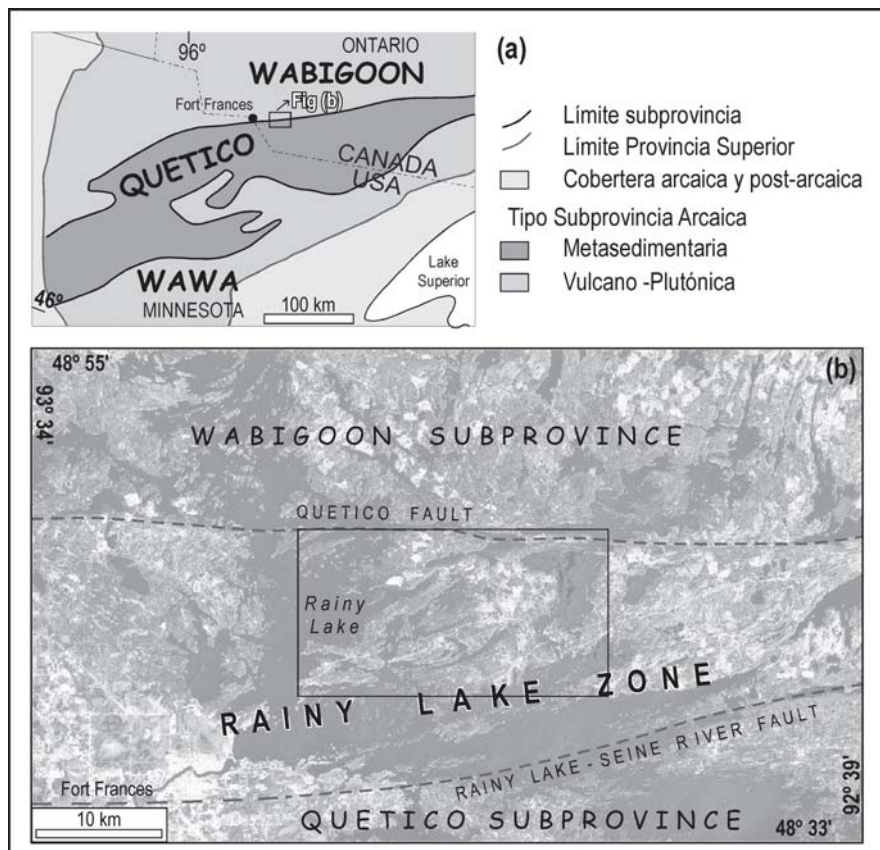
mentos irregulares que se asemejan a *boudins* pero cuya segmentación es debida a la intrusión (Bons et al., 2004).

En este estudio se presenta otro caso en que los diques son continuos pero no planares sino que muestran una geometría en zig-zag. Los diques estudiados se encuentran en el área de Rainy Lake (Ontario, Canada), en una banda de deformación transpresiva dextral correspondiente al límite entre dos subprovincias geológicas (Quetico y Wabigoon) del Escudo Arcaico Canadiense (Fig. 1; Castaño, 2007; Druguet et al., 2008). Se trata de diques leucocráticos emplazados sintectónicamente en rocas metasedimentarias, metavolcánicas y gnéicas. Se discuten las posibles causas que generan geometrías en zig-zag, la modificación de éstas por deformación post-emplazamiento y las implicaciones de su uso como marcadores de la deformación.

### Intrusión de diques en zig-zag

En dominios de baja deformación en la zona de estudio (acortamiento < 25%), las características primarias (orientación y geometría) relacionadas con la intrusión de los diques son de fácil reconocimiento debido a la débil deformación post-emplazamiento. En estas zonas la mayoría de los diques forman un ángulo elevado

con el plano de deformación finita XY o foliación dominante en las rocas encajantes, siendo su formación compatible con una fracturación dilatante (hidrofractura) contemporánea con la deformación dúctil del encajante. Una interesante geometría de dique observada en estos dominios es la morfología en zig-zag. Esta morfología, definida por Hoek (1994) en diques emplazados en rocas frágiles e isótropas, se caracteriza por el tránsito brusco y anguloso entre segmentos y por una dilatación normal a la envolvente del dique y oblicua a los segmentos. Los segmentos de fractura pueden corresponder a sistemas de fracturas previas reactivadas o pueden ser fracturas dilatantes con morfología original en zig-zag (Beach, 1980; Hoek, 1994). En el área de estudio los diques en zig-zag presentan segmentos de longitud centimétrica a decimétrica y forma planar a curvada. La envolvente de estos diques es subvertical y forma un ángulo elevado con la foliación o bandeado litológico en el encajante. Las bisectrices entre segmentos son subparalelas a dicha foliación evidenciando la relación entre los patrones de zig-zag y las heterogeneidades litológicas o la anisotropía en la roca encajante. De acuerdo a las características geométricas de los diques en relación con las propiedades de las rocas encajantes se pueden diferenciar dos tipos de morfologías en zig-zag:



**Fig. 1.- (a)** Mapa esquemático del suroeste de la Superior Province y sus subprovincias basado en las características litotectónicas ( a partir de Marquis, 2004). El recuadro indica el área de estudio a lo largo del límite Wabigoon-Quetico. **(b)** Fotografía satélite del límite entre las subprovincias de Wabigoon y Quetico en la zona de Rainy Lake. El recuadro corresponde al área de estudio.(Fuente: GoogleEarth).

*Fig. 1.- (a) Schematic map of the SW Superior Province and its sub-provinces based on lithotectonic features ( from Marquis, 2004). The square shows the study area along the Wabigoon-Quetico boundary. (b) Satellite photograph of the boundary area between the Wabigoon and Quetico sub-provinces in Rainy Lake zone. The square indicates the study area. (Source: GoogleEarth).*

1. Diques con morfología en zig-zag por refracción de fractura. Esta característica geométrica se observa cuando los diques-fractura atraviesan capas o niveles de rocas con marcado contraste de competencia y se refractan, de forma similar a como ocurre en la refracción de una falla (Peacock and Sanderson, 1992) o la refracción del clivaje (e.g. Treagus, 1983). En la Fig. 2 se pueden observar dos ejemplos de estructuras de refracción de venas leucocráticas generadas cuando estas cruzan de un tipo de litología a otra. Es importante anotar que tanto los procesos de emplazamiento como de subsiguiente deformación pueden generar la refracción de los diques. En el caso estudiado, la geometría de refracción de los diques en zig-zag se inició muy probablemente durante el emplazamiento, puesto que estas

estructuras son comúnmente observadas tanto en los dominios de escasa como de alta deformación. Otros ejemplos de refracción de fractura son documentados por Lafrance (2004) y Mamtani et al. (2007), en tales casos las fracturas son rellenas por cuarzo. El patrón de refracción sugiere así que la reología de la roca encajante ejerce un alto control en la orientación del dique-fractura.

2. Diques con morfología zig-zag por marcada anisotropía mecánica (foliación). En rocas de bajo contraste de competencia pero marcada anisotropía, también se observan patrones de zig-zag en los diques. Estos casos son de mayor dificultad para su interpretación en dominios de alta deformación. Las asociaciones diques en zig-zag / encajante foliado y diques subplanares / encajante con débil foliación se

ilustran en la Fig. 2a. En la Fig. 3a y 3b se muestra dos ejemplos de diques con morfología zig-zag cruzando a través de rocas esquistosas. Según Hoek (1991, 1994), con base a la orientación de los segmentos que conforman el dique con morfología zig-zag con respecto a la envolvente, es posible en rocas isotropas interpretar las condiciones de fracturación de la roca encajante. Si ésta presenta elementos planares (i.e. diaclasas, fallas) pre-existentes al emplazamiento del dique y que determinaron su geometría en zig-zag, la dispersión de orientaciones de los segmentos será menor que en el caso de zig-zags definidos por la generación de nuevas fracturas acompañadas por la inyección magmática. En el caso de los diques con morfología zig-zag en el área de estudio no es posible emplear dicho criterio, ya que si la dispersión de los polos con respecto a la envolvente del dique en la Fig. 3a es interpretado de acuerdo al modelo propuesto por Hoek (1991, 1994), la geometría del dique es el resultado de la inyección magmática a través de los segmentos de uno o dos sets de diaclasas pre-existentes en la roca encajante. Sin embargo, de acuerdo a las observaciones estructurales en la roca encajante y en los diques, no hay evidencia de elementos planares preexistentes. Esto sugiere que los diques en zig-zag en el área de estudio, se generaron a partir de fracturas nuevas (hidrofracturas) y la dispersión de los datos es posiblemente una respuesta del control que ejerce la fuerte anisotropía de la roca encajante en el momento de la fracturación. Dos posibilidades para la formación de esta morfología a partir de fracturas nuevas son dadas por Hoek (1994). Ésta puede generarse por la extrema interacción de los segmentos de fractura tensionales en un campo de esfuerzos regional con bajo esfuerzos diferenciales o alternativamente en un campo de esfuerzos regional con altos esfuerzos diferenciales a través de la propagación de fracturas de cizalla. Ambos mecanismos de emplazamiento son posibles para explicar la morfología zig-zag en los diques estudiados, pero cabe anotar, que en el caso aquí estudiado hay evidencias del importante rol que juega la anisotropía.

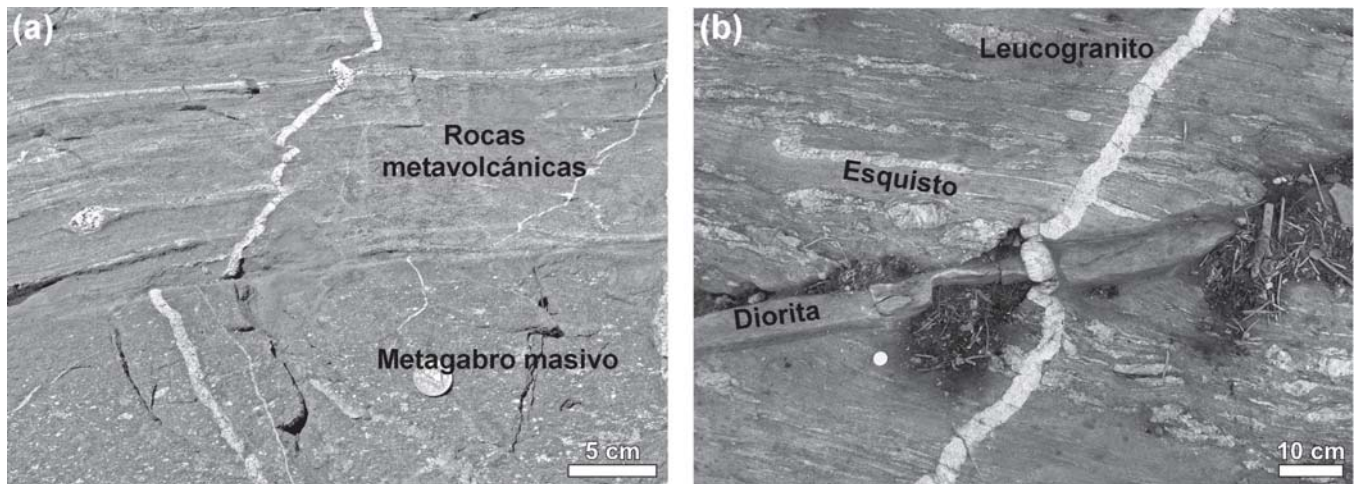


Fig. 2.- (a) Dique leucocrático que atraviesa un cuerpo de metagabro y niveles de rocas metavolcánicas foliadas. Nótese el contraste en orientación (refracción) y forma del dique en las distintas litologías encajantes (en zig-zag en las rocas foliadas y subplanar en el metagabro), así como el deslizamiento dextral a lo largo del contacto litológico. (b) Estructura de refracción de una vena leucocrática generada cuando esta cruza de esquistos a una vena diorítica precoz. La refracción posiblemente se inició en el momento de la fracturación y continuó por deformación dúctil (acortamiento).

Fig. 2.- (a) leucocratic dyke cross-cutting a metagabbroic body and foliated metavolcanic sheets. Notice the contrast in dyke orientation (refraction) and geometry in different host lithologies (zig-zag shape in foliated rocks and subplanar geometry in the metagabbro), as well as the dextral slip along the interphase. (b) Refraction structure of a leucocratic vein cutting across schists and an early diorite vein. Refraction likely initiated at the time of fracturing and continued during ductile deformation (shortening).

### Deformación post-emplazamiento

Posterior a su emplazamiento sintectónico, los diques de la zona de estudio se deformaron conjuntamente con las rocas encajantes. Debido a su orientación inicial a un ángulo cercano a la di-

rección de máximo acortamiento regional, la mayoría de diques-fractura en zig-zag presentan estructuras de plegamiento. El plegamiento varía notablemente con la intensidad de la deformación dúctil post-emplazamiento. Así, en los dominios de baja deformación los diques registran un

plegamiento suave caracterizado por la tendencia al cierre y redondeamiento de los ángulos entre los segmentos del dique (Figs. 2b y 3b). En los dominios de mayor deformación, estas geometrías son enmascaradas y modificadas en diferentes grados, de tal forma que en ocasiones es

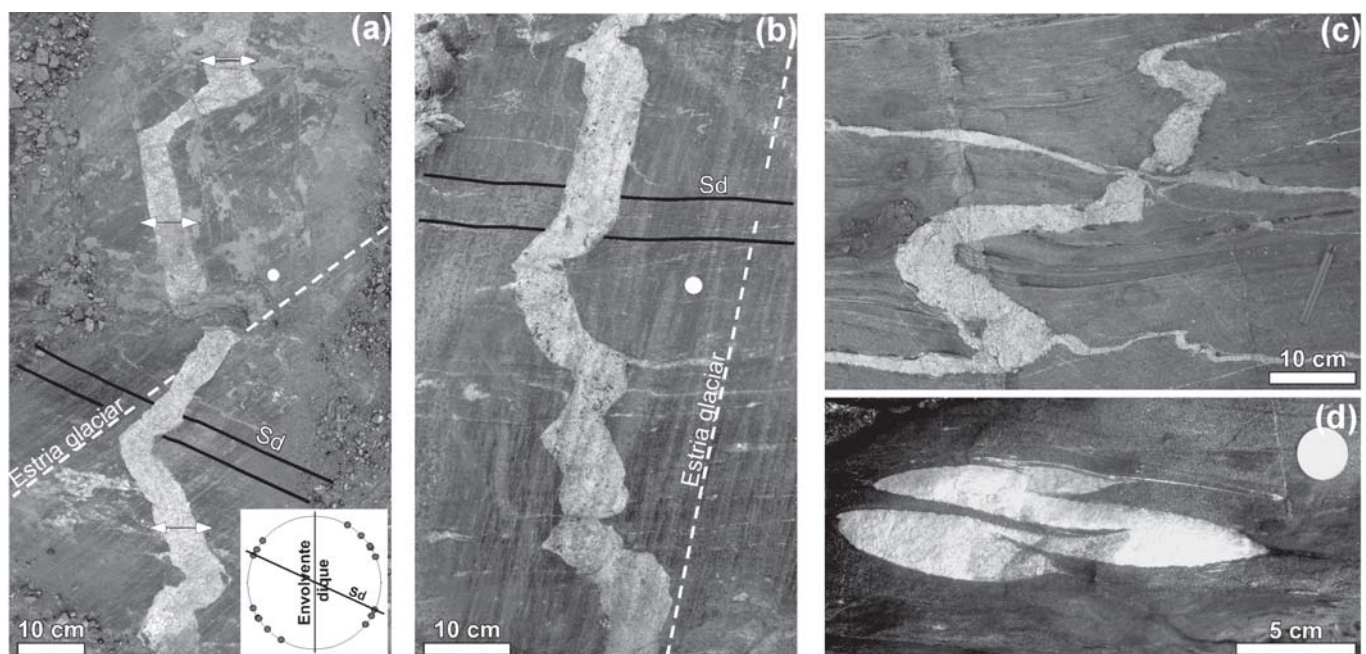
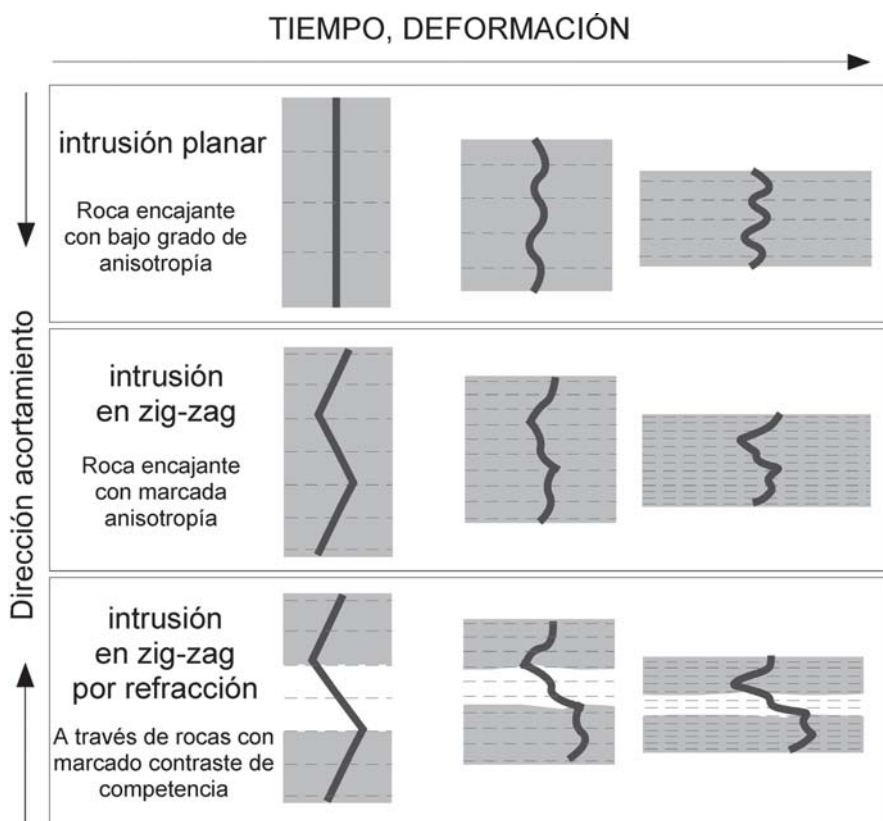


Fig. 3.- Ejemplos de diques leucocráticos con morfología zig-zag intruídos en rocas foliadas. (a) Fotografía de un dique en zig-zag escasamente deformado y proyección estereográfica de los polos de los segmentos, de la superficie envolvente del dique y de la foliación dominante (subparalela a la estratificación) en los esquistos encajantes ( $S_d$ ). Las flechas indican la dirección de dilatación. (b) Dique en zig-zag intruído en esquistos y ligeramente plegado. (c) y (d) Diques en zig-zag afectados por una intensa deformación post-emplazamiento.

Fig. 3.- Examples of zig-zagging leucocratic dykes intruded into foliated rocks. (a) Photograph of a scarcely deformed zig-zagging dyke and stereographic projection of the poles to segments, the dyke enveloping surface and the dominant foliation (sub-parallel to bedding) in the enclosing schists ( $S_d$ ). The arrows show the dilation direction. (b) Slightly folded zig-zagging dyke intruded into schists. (c) and (d) Intensely deformed zig-zagging dykes.



**Fig. 4.- Modelos idealizados de la evolución geométrica por deformación progresiva de diques en zig-zag.**

*Fig. 4.- Ideal sketch models of the geometrical evolution of zig-zagging dykes due to progressive deformation.*

difícil su reconocimiento e interpretación (Figs. 3c y 3d). La interpretación es particularmente compleja allí donde los flancos y las zonas de charnela se confunden con segmentos y zonas intersegmentales (*jogs*), respectivamente. En la Fig. 3d se muestra un dique deformado con un grado elevado de aplastamiento donde la forma puntiaguda en las zonas de charnela sugiere un origen a partir de un dique en zig-zag. Si esta interpretación es correcta, la medición del acortamiento a partir de esta estructura considerada como un dique inicialmente planar podría llevar a una sobrestimación de la deformación.

La figura 4, representa esquemáticamente la evolución de las estructuras de plegamiento a partir de diques con morfología planar y no planar (i.e. zig-zag), evolución inferida en base a las observaciones de campo.

### Discusión y conclusiones

La preservación de las características primarias de las intrusiones permite un entendimiento cualitativo de las relaciones entre la geometría del dique, el mecanismo de emplazamiento, las propiedades reológicas de la roca encajante (i.e. grado

de anisotropía y heterogeneidades litológicas) y su influencia en las variaciones locales del campo de esfuerzos. Una consideración relevante realizada a partir de las observaciones en el área de estudio es la estrecha relación entre la geometría de las estructuras de emplazamiento y de deformación, al punto que en ocasiones no es posible diferenciar el límite entre una y otra. Este es el caso de las refracciones de fractura *versus* las refracciones por deformación (Fig. 2b). Las observaciones realizadas permiten interpretar que las estructuras de refracción responden a la suma de dos procesos consecutivos: emplazamiento y deformación. Estructuras similares en diques sintectónicos en Yunmengshan core complex (N China) fueron interpretadas por Passchier et al. (2005) como exclusivas de un único proceso, ya sea como resultado de la intrusión o de la deformación post-emplazamiento, más no de ambos.

Como es bien conocido, los diques son una herramienta útil para la cuantificación de la deformación finita en una región determinada, pero su uso debe hacerse con cautela. Este es el caso de los diques no planares con geometría zig-zag, ya que la medición de su acortamiento

suponiendo una geometría inicial planar, conllevaría a una sobrestimación de la deformación.

### Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (Proyectos CGL2004-03657/BTE y CGL2007-66857-C02-01). Agradecemos la ayuda y colaboración prestadas por J. Carreras y D.M. Czeck.

### Referencias

- Beach, A. (1980). *Journal of Structural Geology*, 2, 425-438.
- Bons, P.D., Druguet, E., Hamann, I., Carreras, J. y Passchier, C.W. (2004). *Journal of Structural Geology*, 26, 625-636.
- Castaño, L.M. (2007). *Análisis estructural de venas y diques sintectónicos en Rainy Lake Wrench Zone, Superior Province (Ontario, Canadá)*. Trabajo de Investigación Tercer Ciclo, Univ. Autónoma de Barcelona, 141pp.
- Druguet, E., Czeck, D.M., Carreras, J. y Castaño, L.M. (2008). *Precambrian Research*, 163, 384-400.
- Hanmer, S. y Passchier, C.W. (1991). *Geological Survey of Canada. Paper* 90-17, 72 pp.
- Hoek, J.D. (1991). *Geologische Rundschau*, 80, 233-248.
- Hoek, J.D. (1994). *Mafic Dykes of the Vestfold Hills, East Antarctica*. Ph.D. Thesis (unpublished), University of Utrecht, 134 pp.
- Hutton, D.H.W. (1982). *Journal of the Geological Society of London*, 139, 615-631.
- Lafrance, B. (2004). *Exploration and Mining Geology*, 13, 129-137.
- Mamtani, M.A., Mukherji, A. y Chaudhuri, A.K. (2007). *Geological Magazine*, 144, 271-287.
- Marquis, R. (2004). *Towards a better understanding of the Superior Province*. Québec Mines, Mining Information Bulletin. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/english/mines/quebec-mines/2004-10/superior.asp>.
- Passchier, C.W. y Trouw, R.A.J. (2005). *Microtectonics (Second edition)*, Springer-Verlag, Berlin.
- Passchier, C. W., Zhang, J.S. y Konopásek, J. (2005). *Geological Society Special Publication*, 245, 65-80.
- Peacock, D.C.P. y Sanderson, D.J. (1992). *Journal of the Geological Society London*, 149, 793-802.
- Treagus, S. H. (1983). *Journal of Structural Geology*, 5, 351-368.