



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Caracterización del vulcanismo carbonatítico de Catanda (Angola)

Marc Campeny Crego

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

Caracterización del vulcanismo carbonatítico de Catanda (Angola)

Tesis doctoral presentada por

Marc Campeny Crego

Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals
Universitat de Barcelona

Barcelona

2016



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

B:KC Barcelona
Knowledge
Campus
Campus d'Excel·lència Internacional

La present tesi doctoral ha estat finançada a partir del grup de recerca consolidat SGR-444 i 2014 SGR 1661(Recursos Minerals:Jaciments, Aplicacions i Sostenibilitat), amb fons provinents del projecte CGL2009-13758 atorgat pel Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España. També s'ha obtingut finançament del programa de beques BE-DGR-2012 de l'AGAUR (Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i Recerca) i dels ajuts Hugh E. McKinstry atorgats per la Society of Economic Geologists(SEG).

Caracterización del vulcanismo carbonatítico de Catanda (Angola)

Tesis doctoral presentada por

Marc Campeny Crego

Director: **Dr. Joan Carles Melgarejo i Draper**

Universitat de Barcelona

Codirector: **Prof. José Mangas Viñuela**

Universidad de las Palmas de Gran Canaria

Tribunal: **Prof. José Ignacio Gil Ibarguchi**

Universidad del País Vasco

Dra. Àngels Canals Sabaté

Universitat de Barcelona

Dr. Joan Andújar Fernández

Universitat de Barcelona

Suplentes: **Prof. Fernando Gervilla Linares**

Universidad de Granada

Prof. Esteve Cardellach López

Universitat Autònoma de Barcelona

Agraïments

Quan fa cinc anys em vaig endinsar en aquest projecte de tesi doctoral no era conscient, ni de bon tros, el que significaria portar-lo a terme ni a nivell acadèmic ni, encara menys, a nivell personal. Realitzar aquesta tesi m'ha permès conèixer indrets i gent que d'altra manera hauria estat impossible conèixer i m'ha fet créixer com a geòleg però també, i especialment, com a persona.

Posar punt i final a aquest llarg camí no hauria estat possible sense un bon grapat de gent que m'ha ajudat en els moments difícils i als quals els hi voldria agrair el seu recolzament.

En primer lloc, a la primera persona que voldria agrair tot el seu esforç i entrega, és a el "Caixa", en Joan Carles Melgarejo. Ell ha estat el meu tutor del projecte, però, més que això, ha estat una de les persones de qui més coses he rebut i après durant aquest temps. Crec, sincerament, que mai li podré tornar totes les oportunitats i totes les experiències que m'ha fet viure des del primer dia que vaig entrar per la porta de l'aula i a les seves classes de mineralogia ens explicava allò de que la "macla de Karlsbad és la millor macla del món".

En segundo lugar, me gustaría agradecer a Pepe Mangas el haber aceptado ser cotutor de este proyecto. Sinceramente, el haberle conocido es una de las mejores cosas que me ha reportado el realizar esta tesis doctoral. Quiero agradecerle a Pepe el esfuerzo que hizo para enseñarme lo que sabía sobre volcanes en Gran Canaria y en Catanda, y darle las gracias por su forma de ser, siempre tan positiva y serena. Por supuesto, también darle las gracias a Emma y a Clara por acogerme tan amablemente los días que pasé en su isla.

Fer aquesta tesi tampoc hauria estat possible sense els meus entranyables companys de viatge, amb alguns dels quals ja portem uns quants anys compartint experiències i, en general, part de la nostra vida. Gràcies a en Lisard, a la Montgarri i a la Cris per ser els meus amics i per estar allà sempre que un o altre ho ha necessitat. Gràcies a les meves companyes de despatx, Sandra i Lídia, a en Saleh, en Thomas, l'Amaia, en Brando, la Sandra Robles, la Jing Yao, l'Anna Serra, l'Aleu, la Miriam, en Salvador Rodà i tota la gent que ha passat pel grup, en un moment o altre, i que han fet que la convivència hagi estat immillorable.

Gràcies al tots professors del departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, especialment a l'Esperança, en Joa, l'Àngels Canals i en Salva Galí. També a

d'altres professors de la facultat que m'han ajudat desinteressadament en la realització d'algunes parts del projecte com en Juanjo Pueyo, la Laura Rossell i en Jaume Pous. Gràcies també a la Pura Alfonso, l'Alessandra Constanzo, en Robert Martin. Molt agraït a en Thomas Gernon de Southampton, que em va ajudar amb els seus coneixements quan ni tan sols ens coneixíem i a en Danilo di Genova, que em va acollir de forma immillorable a Munich.

Agrair també la dedicació i paciència de la gent dels Centres Científics i Tecnològics sense els quals res es podria dur a terme, en especial, gràcies a en Joaquín Perona, l'Eva Prat, en Xavier Llovet, en Tariq Jawhari, la Laia Arqués i en David Artiaga.

El present projecte ha estat possible realitzar-lo a Angola gràcies a l'esforç, la dedicació i el temps de la gent de la Universidade Agostinho Neto de Luanda com l'Antonio Olympio, en José Manuel i l'Aurora Bambi. També, gràcies a la bondat, la gratitud i la humanitat dels habitants del poble de Catanda, que ens van acollir com mai m'hauria pogut imaginar. En especial, gràcies a en José Fortuna, en Felipe Correia i la Margaride per fer-nos sentir com a casa a l'altra punta del món. A todos, muito obrigado.

Un gràcies en majúscules a en Vadim Kamenetsky, per tot el que vaig aprendre durant els mesos que vaig passar a Tasmània sense els quals mai hauria pogut arribar a bon port. Gràcies a tota la gent que vaig conèixer allà, a la Maya Kamenetsky, a l'Olga, a l'Irma i als meus amics Lina, Daniele, Camilla, Claudio, Silvia, Clementine, Makrina, Pete i Chon per fer-me fàcils els dies que vaig passar a les antípodes. Gràcies també a la gent de Melbourne, l'Andrea Giuliani per els seus comentaris durs però enriquidors, en Roland Maas per tot el seu esforç i confiança i també a en Barry Kohn i l'Erin Matchan.

Gràcies als professors Roman Botxarnikov i François Höltz de la Leibniz Universität de Hannover per acollir-me durant els dies que vaig passar allà aprenent petrologia experimental.

Tampoc hauria pogut fer front al projecte sense l'ajuda de la gent del Museu Martorell de Geologia. Gràcies, en especial, a la Yael Díaz, en Carles Curto, en Jaume Gallemí i en Vicent Vicedo, la Íria, la Susanna, en Pere, en David, la Tere, en Ferran, la Raquel, la Yeli i tota la gent amb qui he compartit moments a la Ciutadella.

Gràcies per la confiança de la Neus Ribas del Museu Mollfuleda de Mineralogia d'Arenys de Mar i també a en Jordi Pubill i a en Joan Antoni Curto, sense el qual mai hauria arribat fins aquí.

Agrair a tots els meus amics el haver-me recolzat durant aquest temps i posar el seu gra de sorra perquè tot sortís bé. Gràcies a la Jorgina, l'Agustí, en Màrius, en Jose Luis, en Raül i al mestre Soldevilla. Gràcies a la Melina, l'Anna, en David, la Laia, la Marta, la Marina i l'Humbert, qui està desitjant que ja s'acabés això de la tesi per celebrar-ho amb un bon vi.

Per últim, gràcies a tota la meva família, en especial, als meus pares Toni i Nati i a la Marta que sempre m'han fet costat per poder seguir endavant.



Campanya de camp a Catanda (Setembre del 2011)

Índice

Abstract	9
Resumen	11
1. Introducción a las carbonatitas	14
1.1. Antecedentes	14
1.2. Definición y clasificación	16
1.3. Génesis y mineralizaciones asociadas	18
2. Las carbonatitas extrusivas de Catanda	20
2.1. Introducción a las carbonatitas extrusivas	20
2.2. Introducción y antecedentes de las carbonatitas de Catanda	22
2.3. Contexto geológico regional: la estructura de Lucapa	23
3. Descripción del proyecto de tesis	25
3.1. Planteamiento general	26
3.2. Metodología	26
3.2.1. <i>Trabajo de campo</i>	27
3.2.2. <i>Estudio petrográfico y textural</i>	27
3.2.3. <i>Estudio geoquímico de elementos mayores, menores y trazas</i>	28
3.2.4. <i>Química mineral</i>	28
3.2.5. <i>Inclusiones fundidas en magnetita</i>	29
3.2.6. <i>Análisis isotópicos</i>	29
3.2.7. <i>Geocronología</i>	30
4. Listado de publicaciones: estructura del proyecto	31
4.1. Publicaciones en revistas indexadas.....	31
4.2. Resúmenes de comunicaciones en congresos internacionales	33
5. Resultados globales	34
5.1. Afloramientos carbonatíticos	34
5.2. Lavas carbonatíticas	35
5.3. Inclusiones fundidas	37
5.4. Geocronología	37

6. Discusión	38
6.1. Procesos volcánicos	38
6.1.1. <i>Facies litológicas</i>	39
6.1.2. <i>Edificios volcánicos</i>	40
6.2. Lavas carbonatíticas	41
6.3. Composición del magma parental	44
6.4. Geocronología y contexto general de emplazamiento	45
7. Conclusiones	48
8. Referencias	51
9. Anexo	63

Abstract

The volcanic carbonatitic region of Catanda is the only extrusive carbonatite locality reported in Angola. The Catanda area is also significant due to the occurrence of carbonatitic lavas; those have been only reported in 14 localities worldwide. However, the available information about these carbonatites was restricted to a few works developed in the 60's and the 70's, in which the reported data about the geological setting and main features of the carbonatites were strongly limited.

The information gap about Catanda was especially generated by the politic and social instability caused by the Angolan civil war, which made impossible the access to the Catanda region and entire Angola, for more than forty years.

According to this general approach, the aim of the present Ph.D. project was to obtain new information and knowledge about the carbonatitic volcanism of the Catanda region and, especially, in relation to its lithological features, mineralogy, petrology geochemistry, genetic and emplacement processes related to the formation of the extrusive carbonatites.

Coupled analyses of satellital images and field data demonstrated that Catanda carbonatites are formed by a group of seven small volcanic edifices with maar and tuff ring morphologies, outcropping in a graben of 50 km² in extension. In addition, we also discovered and maar at 5 km east from the main volcanic area, in the region known as Chiva lagoon. The pyroclastic rocks from the Catanda region may achieve up to 100 metres in thickness deposited over Archaean granites and broadly covered by recent alluvial and colluvial sediments.

We have determined that Catanda carbonatites were especially formed by explosive events, while carbonatitic lavas were very minor and restricted to the external parts of the graben, associated to the most important fractures.

The petrographic study of the Catanda rocks allowed us to distinguish 5 different facies of pyroclastic rocks and 3 typologies of carbonatitic lavas. These lavas can be classified as calciocarbonatites (containing more than 70% of modal calcite), silicocarbonatites-aillikites (with less than 35% of modal calcite and more than 14 wt.% of SiO₂) and altered natrocarbonatites (formed by tabular calcite crystals pseudomorphs of primary alkaline carbonates).

Geochemical data also permits to confirm that, even their compositional and textural differences, all Catanda lavas were formed from the same parental melt. The study of melt inclusions hosted in magnetite grains also indicates that the parental melt composition was broadly alkaline.

The studies carried in Catanda by Silva & Pereira (1973) argued for the late Cretaceous age of the carbonatites (92 Ma). This age was obtained from the dating of a tinguaitite dyke that the authors considered contemporaneous to the carbonatitic rocks. However, in the present Ph.D. project we carried out the first direct dating of the Catanda lavas, using Rb/Sr and U-Th-He methods in fluorapatite and phlogopite, respectively. The age obtained from these dating has been approximately 0.65-0.66 Ma. This new dating changes the general view of the volcanic and geodynamic setting of the Catanda graben and, in general, the entire Angolan Atlantic margin.

Resumen

Las carbonatitas volcánicas de Catanda son las únicas descritas hasta el momento de carácter extrusivo en Angola. Esta localidad es, además, significativamente interesante por la presencia de lavas carbonatíticas, las cuales se han descrito en tan solo 14 lugares a nivel mundial. Sin embargo, la información publicada referente a Catanda se reducía, hasta ahora, a unos pocos trabajos elaborados por investigadores portugueses en la década de los años 1960 y 1970, en los cuales se aportaban datos sobre geología regional y se describían características de las carbonatitas, aunque estos resultados eran muy limitados.

La falta de información geológica que hasta ahora había sobre la zona de estudio se debe, principalmente, a la inestabilidad política y social reinante en Angola por los conflictos bélicos que asolaron su territorio durante más de cuarenta años y que imposibilitaron el acceso y el estudio de la región de Catanda, así como de otras muchas áreas en el conjunto del país.

Bajo este contexto general se planteó el presente proyecto de tesis doctoral, con el objetivo de aportar nueva información y conocimientos referentes al vulcanismo carbonatítico de la región de Catanda y, en particular, a las características litológicas, mineralógicas, petrológicas, geoquímicas, petrogenéticas y de emplazamiento de las carbonatitas volcánicas.

A partir de las observaciones realizadas se ha podido constatar que las carbonatitas de Catanda están formadas por un conjunto de hasta siete edificios volcánicos con morfologías de anillos de tobas y maares que afloran en un graben de unos 50 km² de extensión. Además, asociado a este conjunto principal, se ha descrito un octavo centro

eruptivo, con morfología de maar, localizado a unos cinco kilómetros al este del graben de Catanda, en la zona conocida como laguna de Chiva. Los afloramientos de rocas piroclásticas y lávicas de la región forman series de materiales vulcano-sedimentarios que alcanzan 100 metros de potencia, hallándose dispuestos sobre un basamento de granitos de edad Arcaica que, a su vez, se encuentran recubiertos por sedimentos aluviales y coluviales de edad reciente.

Se ha podido determinar que las carbonatitas de Catanda se formaron a partir de procesos volcánicos eminentemente explosivos y que la actividad efusiva que dio lugar a las lavas carbonatíticas fue escasa y está concentrada en las zonas externas del graben, asociadas a importantes fracturas regionales.

El estudio petrográfico de las rocas de Catanda ha permitido diferenciar hasta cinco facies distintas de rocas piroclásticas y tres tipologías distintas de lavas carbonatíticas. Estas lavas pueden clasificarse como calciocarbonatitas (con un contenido de calcita superior al 70% modal), aillikitas (con contenidos de calcita inferiores al 35% y SiO₂ por encima del 14 % en peso) y natrocarbonatitas alteradas (formadas por cristales tabulares de calcita pseudomórficos de carbonatos alcalinos).

La caracterización geoquímica de las lavas ha permitido constatar que a pesar de sus diferencias texturales y composicionales, todas ellas se formaron a partir de un mismo magma parental carbonatítico que, tras el estudio de las inclusiones fundidas incluidas en magnetita, se ha podido determinar que tenía una composición eminentemente alcalina.

Los estudios realizados en Catanda por Silva y Pereira (1973) afirmaban que las carbonatitas de la región se formaron en el Cretácico superior (92 Ma), dato que

obtuvieron a partir de la datación de un dique de rocas alcalinas (tinguaíta) que consideraron contemporáneo con las carbonatitas. Sin embargo, durante la realización del presente proyecto de tesis, se han llevado a cabo dataciones de minerales presentes en las carbonatitas de Catanda, utilizando los métodos de Rb/Sr en flogopita y U-Th-He en apatito. La edad obtenida ha sido de 0,65-0,66 Ma (Pleistoceno medio), variando sustancialmente la edad establecida en primera instancia por esos autores y obligando a replantear el contexto geodinámico y volcanológico del graben de Catanda y, en general, del margen Atlántico de Angola.

1. Introducción a las carbonatitas

Las carbonatitas son rocas ígneas relativamente raras, comúnmente asociadas a complejos de rocas alcalinas y que se distribuyen en regiones continentales, y de forma anecdótica en zonas oceánicas, con unas características de afloramiento, mineralógicas, petrogenéticas y metalogenéticas particulares, las cuales se describen brevemente a continuación:

1.1. Antecedentes

El estudio sistemático de las carbonatitas se inició de forma incipiente a finales del siglo XIX, cuando Bose (1894) describió las rocas formadas por carbonatos que afloran en el subcontinente indio, concretamente en la región del Valle de Narbada. Posteriormente, se realizaron estudios sobre litologías similares en la península de Escandinavia, como los publicados por Högböhm (1895) y Brøgger (1921), los cuales describieron las carbonatitas y rocas alcalinas asociadas de la zona de Alnöen Suecia y la región de Fen en Noruega, respectivamente. Además, estos dos autores fueron los primeros en proponer un origen magmático para esta nueva tipología de rocas carbonatadas, basándose, especialmente, en la textura cristalina que presentaban. Sin embargo, durante la primera mitad del siglo XX, algunos trabajos, como los publicados por Daly (1933) o Shand (1943), defendían, en contraposición, el origen sedimentario de las carbonatitas.

El debate sobre el origen de las carbonatitas restó abierto hasta la segunda mitad del siglo XX, cuando el descubrimiento de las lavas natrocarbonatíticas del volcán activo

Oldoinyo Lengai en Tanzania y se erigió como la gran prueba empírica de la existencia de fundidos magmáticos ricos en carbonatos (Guest, 1956; Dawson, 1962). Este descubrimiento coincidió temporalmente con la publicación de los resultados de petrología experimental de Wyllie & Tuttle (1960), en los cuales se demostraba que la calcita podía cristalizar en ambientes magmáticos a temperaturas aproximadas de 650° y 0,1 GPa de presión, corroborando experimentalmente la existencia de magmas enriquecidos en CO₂, tal y como ya habían sugerido anteriormente otros autores como Tomkeieff (1938).

La combinación del descubrimiento de las lavas natrocarbonatíticas de Oldoinyo Lengai y los resultados obtenidos mediante petrología experimental hicieron revivir el interés por las carbonatitas durante la segunda mitad del siglo XX. Prueba de ello son los trabajos de Heinrich (1966), Tuttle & Gittins (1966) o el recopilatorio sobre carbonatitas volcánicas editado por Bell (1989). No obstante, el principal motivo que dio un nuevo empuje al interés por este tipo de rocas y que, actualmente, también es el principal motor de la investigación en carbonatitas, fue el descubrimiento de mineralizaciones asociadas de elementos de las tierras raras (REE) y de niobio, pero también, excepcionalmente, de metales base como el cobre (Groves & Vielreicher, 2001). En la actualidad, se han descrito en la bibliografía hasta 527 localidades con carbonatitas a nivel mundial (Fig.1) (Woolley & Kjarsgaard, 2008) y la actividad científica ligada a su estudio se mantiene, aún hoy en día, como una línea notable de investigación.

1.2. Definición y clasificación

La definición del término carbonatita ha ido desarrollándose a lo largo del tiempo, siendo Streckeisen (1980) el primero en definir formalmente las carbonatitas como rocas de origen magmático con un contenido modal de carbonatos superior al 50%. Este criterio también es utilizado por la IUGS, que especifica que para que una roca sea considerada una carbonatita debe contener menos de un 20% de SiO_2 (Le Maitre, 2002).

Otros autores como, por ejemplo Mitchell (1995), precisan la definición de carbonatitas de la IUGS, y afirman que para definir una roca como una carbonatita hace falta que ésta sea de origen magmático y es suficiente que su contenido modal de carbonatos sea superior a un 30% modal, sin importar su contenido en sílice.

Una vez definida una roca como “carbonatita”, su clasificación puede realizarse según diferentes aspectos. El más general es la clasificación basada en el ambiente magmático en el cual se han emplazado. Así pues, las carbonatitas pueden clasificarse en intrusivas, extrusivas e hipabisales, según si encuentran en ambientes plutónicos, volcánicos o como diques, respectivamente.

Un segundo criterio de clasificación de las carbonatitas es a partir de la composición del carbonato predominante en la roca. Según este criterio, las carbonatitas pueden clasificarse en los siguientes tipos: calciocarbonatitas, magnesiocarbonatitas y ferrocronatitas según qué tipo de carbonato sea el predominante: calcita, dolomita o ankerita-siderita, respectivamente. De forma adicional, existe el término natrocarbonatita, que se utiliza para definir carbonatitas formadas por carbonatos ricos en álcalis (Le Bas, 1977; Woolley, 1982; Woolley & Kempe, 1989). Los mismos

términos pueden usarse basándose en los contenidos de roca total de óxidos de Ca, Mg, Fe y K-Na y utilizarse, en cada caso, según si predomina uno u otro catión (Fig.2).

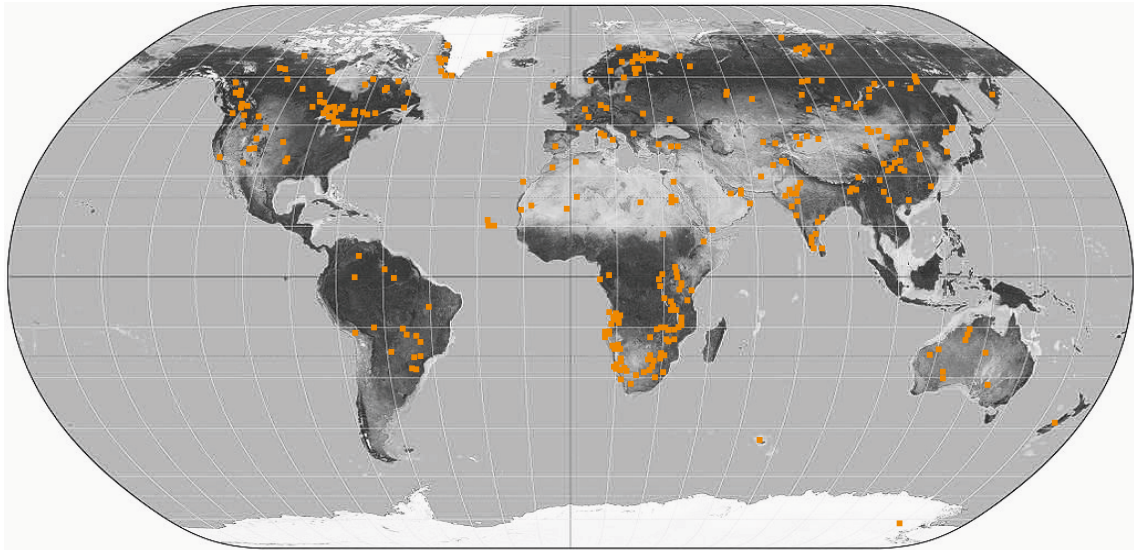


Fig.1: Mapa de distribución de las carbonatitas a nivel mundial.

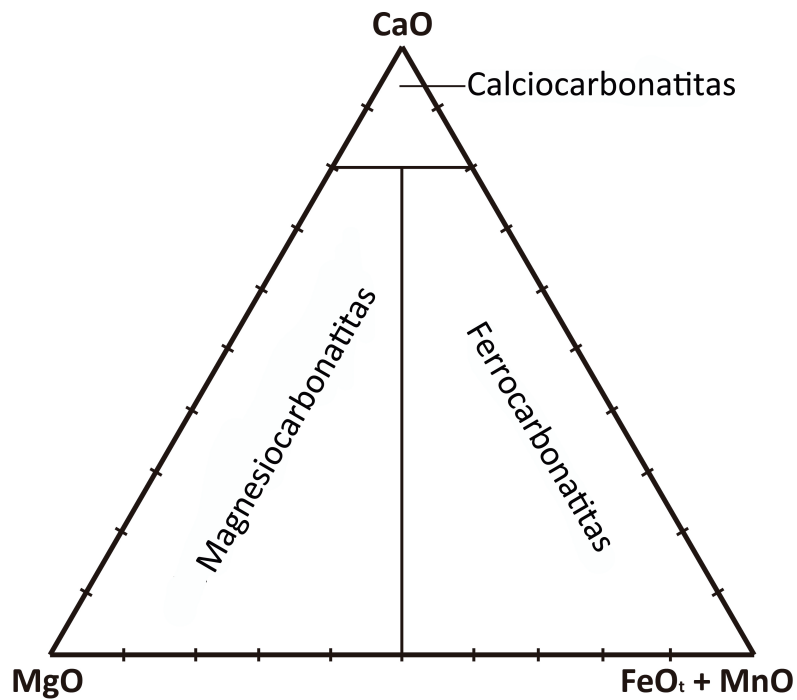


Fig.2: Diagrama triangular de clasificación de las carbonatitas según sus respectivos contenidos en calcio (Ca), magnesio (Mg) y la suma de hierro y manganeso (Fe+Mn).

De forma adicional, existen otros criterios composicionales que hacen referencia a la presencia importante de algún elemento químico característico para clasificar una carbonatita. Un ejemplo de este tipo de nomenclatura es el término silicocarbonatita, que se usa para clasificar carbonatitas con más de un 20 % en peso de SiO₂.

Por último, Mitchell (2005) propone una clasificación de las carbonatitas basada en el tipo de roca magmática a la cual se encuentran asociadas. Así pues, este autor propone la creación de cinco grupos, también llamados clanes: carbonatita-nefelinita, carbonatita-melilita (Mitchell, 1996), carbonatita-kimberlita, carbonatita-aillikita (Tappe et al., 2005) y carbonatita-nefelinita peralkalina-natrocronatita, respectivamente.

1.3. Génesis y mineralizaciones asociadas

Las carbonatitas se encuentran generalmente asociadas a contextos geodinámicos extensionales de rotura (rift) intracontinental (Le Bas, 1986). No obstante, cabe destacar que se han descrito carbonatitas en otros contextos, como cinturones orogénicos (Tilton et al., 1998; Chakhmouradian et al., 2008) o islas oceánicas (Allegre et al., 1971; Mangas et al., 1996; Widom et al., 1999).

Según los datos geoquímicos existentes en la bibliografía sobre isótopos estables (C-O), radiogénicos (Nd, Sr y Pb) y gases nobles (Ne, Xe, Kr, He y Ar), la formación de los magmas carbonatíticos se asocia de forma directa a procesos de fusión parcial del manto litosférico (Sasada et al., 1997; Fischer et al., 2009; Bell & Simonetti, 2010). Sin embargo, la génesis de los fundidos carbonatíticos aún presenta muchos interrogantes

y existe un gran debate sobre los procesos asociados a su formación. Los modelos más ampliamente aceptados proponen que la generación de magmas carbonatíticos estaría asociada a procesos de fusión parcial de un manto enriquecido en CO₂ (Wallace y Green, 1988). Otros modelos sostienen la relevancia de procesos de inmiscibilidad parcial entre un fundido rico en sílice y otro enriquecido en CO₂ (Baker & Wyllie, 1990; Brooker & Hamilton, 1990).

Las carbonatitas se encuentran generalmente enriquecidas en elementos como Ca, F o P (Nelson et al., 1998) y, en algunos casos, pueden llegar a albergar concentraciones relevantes de minerales industriales desde un punto de vista económico, como los mismos carbonatos, apatito o fluorita (Kogut et al., 1998). Sin embargo, una de las principales características geoquímicas de las carbonatitas es su enriquecimiento en elementos incompatibles como, por ejemplo, elementos de alta carga o High Field Strength Elements (HFSE) donde se incluyen el Ti, Nb, Ta, Zr y Hf (Chackmouradian, 2006), y el conjunto de elementos de las tierras raras o Rare Earth Elements (REE) (Chackmouradian & Wall, 2012). El enriquecimiento de las carbonatitas en estos grupos de elementos traza estaría relacionado con sus altas concentraciones en volátiles, especialmente en F y Cl, elementos muy eficaces para el transporte de HFSE y de REE.

Algunos de los elementos mencionados anteriormente, como el Nb, el Ta o, especialmente, el conjunto de elementos de los REE, tienen un amplio abanico de aplicaciones y son, en la actualidad, elementos básicos para el desarrollo de la industria tecnológica, energética y de telecomunicaciones. Por este motivo, se ha adoptado recientemente el término anglosajón *Hi-Tech Metals* en las publicaciones y

se incluyen dentro de la lista los elementos críticos que son básicos para el desarrollo económico y tecnológico mundial (Chackmouradian & Wall, 2012).

Una de las principales problemáticas asociadas a la escasez de las mineralizaciones de REE a nivel mundial, es la localización restringida de sus reservas y producción (Chackmouradian & Zaitsev, 2012), puesto que actualmente se concentra en un 95% en el depósito de Bayan Obo (China). El origen de este yacimiento, aunque ampliamente discutido, estaría relacionado con la presencia de diques de composición carbonatítica (Drew et al., 1990; Yuan et al., 1992; Campbell & Henderson, 1997; Le Bas et al., 1997; Yang et al., 2003; Yang & Le Bas, 2004; Fan et al., 2009; Wang et al., 2010). El déficit de reservas mundiales de REE ha generado una seria problemática en relación a la comercialización y acceso de este tipo de recursos y, bajo este escenario, los proyectos de investigación focalizados en el estudio de las carbonatitas han adquirido una gran trascendencia e interés en los últimos años.

2. Las carbonatitas extrusivas de Catanda

A continuación se describen las características geológicas principales de las carbonatitas de carácter volcánico presentes en el área Catanda y su relación con las rocas magmáticas que afloran al sur del cinturón geotectónico de Lucapa, en Angola.

2.1. Introducción a las carbonatitas extrusivas

Se denominan carbonatitas extrusivas aquellos materiales carbonatados asociados a procesos magmáticos superficiales y que se manifiestan a partir de erupciones

volcánicas efusivas (coladas lávicas) y explosivas (tobas y tobas piroclásticas). En general, las manifestaciones de vulcanismo carbonatítico son extremadamente raras y tan solo se conocen 42 localidades a nivel mundial donde se han descrito facies carbonatíticas asociadas a erupciones volcánicas (Woolley & Church, 2005; Woolley & Kjarsgaard, 2008). Sin embargo, las carbonatitas volcánicas generan un gran interés científico, ya que el estudio de los productos extrusivos puede aportar información directa sobre los magmas carbonatíticos. Estos datos son esenciales para la comprensión e interpretación de los resultados obtenidos mediante petrología experimental y en el estudio de los procesos de acumulación y transporte de elementos raros como los HFSE y las REE (Bailey, 1993). A causa del enriquecimiento en volátiles de los magmas carbonatíticos, los procesos eruptivos relacionados son, generalmente, de un elevado carácter explosivo. En relación a este último dato, tiene sentido que la amplia mayoría de carbonatitas volcánicas estén formadas por rocas de origen piroclástico y que, en cambio, las lavas carbonatíticas, se hayan descrito tan solo en 14 localidades a nivel mundial (Woolley & Church, 2005).

La mayoría de carbonatitas extrusivas y, especialmente, en las que se han citado lavas carbonatíticas, se concentran en el continente Africano y, más concretamente, en la región del Rift Oriental o Eastern African Rift (Woolley & Church, 2005). En esta región, además, se localiza el único volcán carbonatítico activo: el Oldoinyo Lengai. Este volcán también es significativo por la composición de sus lavas natrocarbonatíticas, formadas por carbonatos alcalinos ricos en sodio y potasio (Dawson, 1962; Keller & Zaitsev, 2012).

También en África, pero situadas en el margen occidental del continente, se localizan

las carbonatitas volcánicas de Catanda, que son el único ejemplo de vulcanismo carbonatítico descrito en Angola hasta la actualidad. El presente proyecto de tesis doctoral se ha centrado en el estudio de las carbonatitas extrusivas de esta región que, además, forma parte del reducido número de localidades donde se han descrito lavas de composición carbonatítica.

2.2. Introducción y antecedentes de las carbonatitas de Catanda

Las carbonatitas de la región de Catanda se encuentran situadas unos 250 Km al sur de Luanda, la capital de Angola, y a unos 50 Km al sureste de Sumbe, capital de la provincia de Kwanza Sul (Fig.3).

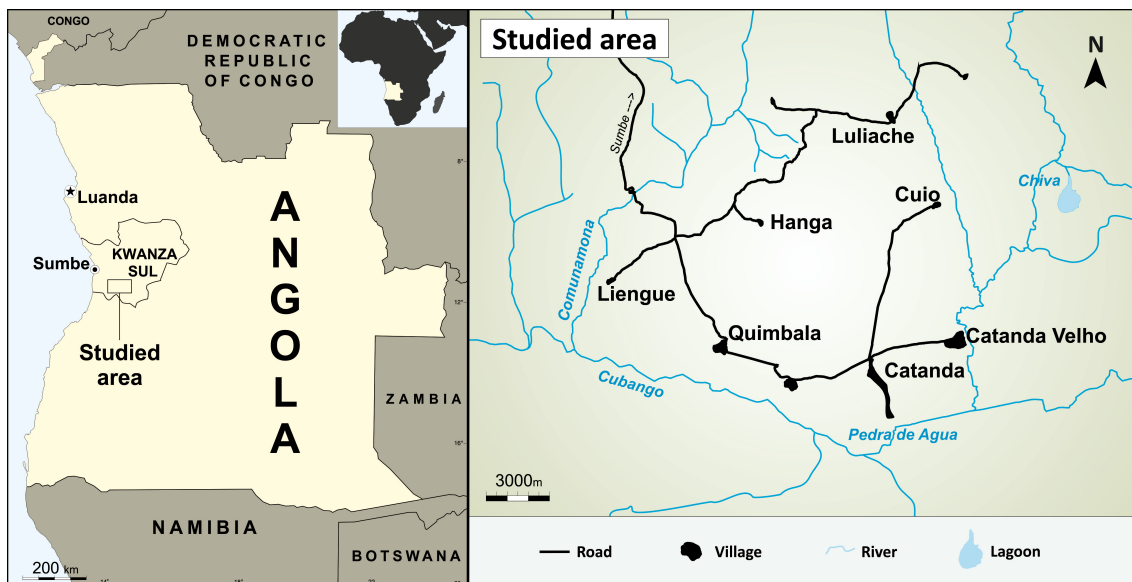


Fig.3: Localización geográfica de la zona de estudio.

Los afloramientos carbonatíticos de la región aparecen citados en la bibliografía desde tiempos coloniales, cuando se desarrollaron algunos estudios sobre los minerales encontrados en la zona (Peres & Gomes, 1969; Peres et al., 1968). Durante esa época,

se efectuó, finalmente, un reconocimiento geofísico para delimitar la estructura y la posición de los centros eruptivos (Silva y Pereira, 1973). De forma adicional, estos autores también propusieron una edad indirecta de las carbonatitas (92 ± 7 Ma) que fue obtenida mediante un dique de tinguáíta, que ellos consideraron contemporáneo con el vulcanismo carbonatítico. Torquato & Amaral, (1974) publicaron posteriormente los datos analíticos y la metodología utilizada para esta datación. Pese al interés inicial suscitado por las carbonatitas de Catanda, los estudios geológicos en la zona y, en general, en toda Angola, se vieron interrumpidos por el conjunto de conflictos bélicos que asolaron el país desde 1961 hasta 2002. De hecho, actualmente siguen existiendo áreas dentro de la zona de Catanda con interés estratégico militar donde hay enterradas minas antipersona en sus ladera y cimas, circunstancia que ha impedido, hasta el momento, el trabajo de campo en estos sectores. Esta tendencia general de abandono de la actividad investigadora ha cambiado a principios del siglo XXI, cuando el final de la guerra civil y la estabilización política del país ha permitido un renacimiento de la investigación y exploración de los recursos minerales del subsuelo de Angola.

2.3. Contexto geológico regional: la estructura de Lucapa

Las carbonatitas de Catanda, al igual que la mayoría de los afloramientos de carbonatitas y kimberlitas en Angola, afloran en el margen septentrional de la estructura de Lucapa, que es un corredor extensional de orientación NE-SO y de unos 1000 Km de longitud (Fig.4), el cual está integrado en las estructuras del dominio tectónico de Quilengues-Andulo (Jelsma et al., 2009). El corredor de Lucapa se localiza

en las antiguas zonas de sutura del orógeno Panafricano, originado durante el Neoproterozoico y en relación a la formación del supercontinente Gondwana (McKenzie, 2015).

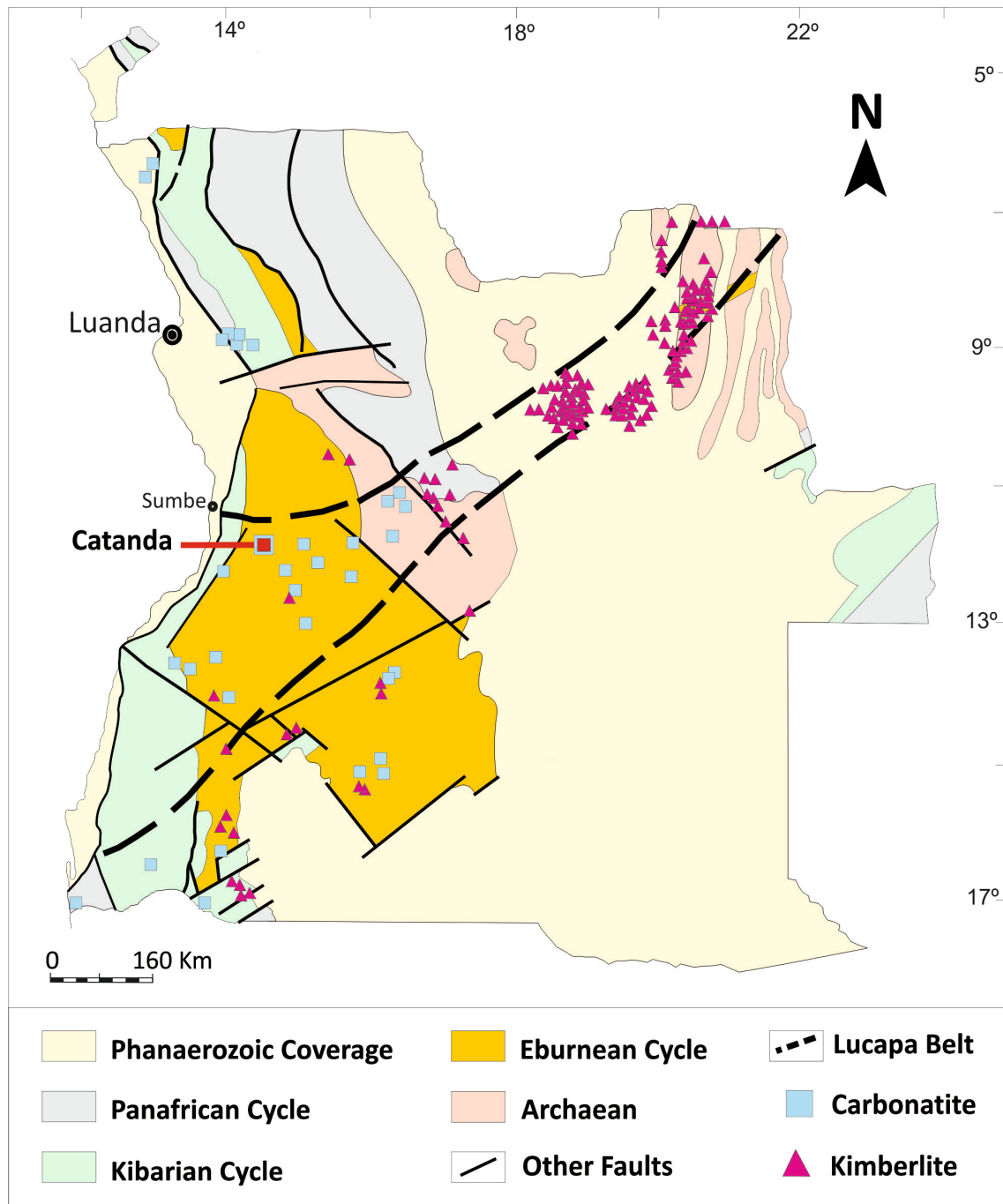


Fig.4: Mapa geotectónico de Angola con la situación de las estructuras del corredor de Lucapa y la localización de las principales kimberlitas y carbonatitas, incluyendo Catanda.

El magmatismo de la zona de Lucapa ha sido intermitente desde el Neoproterozoico (Sykes, 1978), con episodios magmáticos posteriores en el Pérmico y finalmente en el Cretácico. Con este último pulso geotectónico (deformación y magmatismo) se produce el emplazamiento de la mayoría de carbonatitas y kimberlitas en la estructura de Lucapa, tal y como se refleja en las dataciones efectuadas en la kimberlita de Catoca, donde se sitúa la mina de diamantes más importante de Angola, y que ha sido datada en unos 117 ± 0.7 Ma (Robles-Cruz et al., 2012). El magmatismo Cretácico es coincidente con la ruptura del supercontinente Gondwana y la correspondiente formación del océano Atlántico sur. De hecho, el corredor de Lucapa se encuentra actualmente alineado con la zona de fracturas de Rio Grande, considerada el límite entre el océano Atlántico central y el Atlántico meridional (Moulin et al., 2010).

3. Descripción del proyecto de tesis

3.1. Planteamiento general

La presente tesis doctoral se engloba en el marco del proyecto de investigación **CGL-2009-13758: *Metalogenia de las kimberlitas y carbonatitas de Angola: Aplicaciones en exploración minera*** (Ministerio de Educación y Ciencia) y de los proyectos de la AGAUR (Generalitat de Catalunya) SGR-444 y 2014 SGR 1661 (grup consolidat de Recursos Minerals: Jaciments, Aplicacions i Sostenibilitat).

El proyecto se inició con el objetivo de aportar nuevos datos sobre las carbonatitas extrusivas de Catanda, la única localidad con rocas carbonatíticas volcánicas de Angola, considerando que era una zona poco estudiada y que presentaba un elevado interés científico y económico por ser, además, una de las 14 localidades, a nivel mundial,

donde se pueden encontrar flujos lávicos carbonatíticos.

Bajo estas premisas, se consideró necesario plantear un trabajo de campo metódico y detallado, con el objetivo inicial de realizar un muestreo sistematizado y un nuevo mapa geológico de la zona que aportara datos sobre la geología local, las litologías presentes y los procesos volcánicos asociados a la formación de los materiales carbonatíticos volcánicos presentes en el área de estudio. En segundo lugar se realizó un estudio sistemático de las muestras con el objetivo de conocer su mineralogía, su petrología y composición geoquímica para interpretar, a partir de estos datos, los diferentes procesos asociados a su formación y a la composición del magma parental. Por último, se han llevado a cabo estudios geocronológicos con la datación de minerales particulares presentes en las carbonatitas, a partir de diferentes métodos radiométricos, lo cual ha permitido un replanteamiento de la evolución geológica general de esta zona, tanto en el periodo de formación de las erupciones carbonatíticas como en su relación con el contexto geodinámico y de emplazamiento de las rocas de Catanda dentro del corredor extensional de Lucapa.

3.2. Metodología

Con unas hipótesis de partida bien fundamentadas sobre la investigación en carbonatitas volcánicas y con unos objetivos científicos claros y viables, se llevó a cabo una metodología científica clásica en investigaciones de geología de campo de este tipo de afloramientos, y en estudios mineralógicos, petrológicos, geoquímicos y geocronológicos, de las muestras escogidas en la zona de Catanda. A continuación se detalla la metodología usada en la realización de esta tesis doctoral.

3.2.1. Trabajo de campo

El presente proyecto se ha basado en la realización de dos campañas de campo (septiembre del 2011 y diciembre del 2013), durante las cuales se obtuvieron un total de 92 muestras de roca. Además, se ha podido estudiar otro lote de 79 muestras obtenidas por el director de tesis, Joan Carles Melgarejo, durante una primera campaña de campo realizada en agosto del 2008. En total, durante la realización de este trabajo, se han estudiado unas 171 muestras de rocas procedentes de la región de Catanda.

La campaña de campo del 2011 tuvo como objetivo principal, además de la obtención de muestras, una primera toma de contacto con el territorio donde afloraban las carbonatitas, identificando las zonas donde no era posible trabajar por la presencia de minas antipersona, y la realización de una cartografía geológica de distintos afloramientos, apoyada por el estudio de imágenes de satélite. Además, se levantaron seis columnas vulcano-estratigráficas en distintos puntos que sirvieron para desarrollar diferentes interpretaciones en relación a los procesos volcánicos que habían tenido lugar en cada afloramiento. Tanto el mapa geológico como las columnas y sus correspondientes interpretaciones están incluidos en la primera publicación asociada a este proyecto de tesis y que se encuentra disponible en el anexo adjunto a este texto.

3.2.2. Estudio petrográfico y textural

A partir de las 171 muestras obtenidas en la región de Catanda, se realizaron un total de 126 láminas delgadas pulidas a fin de efectuar el estudio petrográfico de las rocas carbonatíticas y de otras rocas del área con las que están espacialmente asociadas.

Este proceso se llevó a cabo mediante el uso de microscopía óptica de luz transmitida y reflejada en la Facultad de Geología de la Universidad de Barcelona. El análisis textural y mineralógico de las muestras se completó con microscopía electrónica de barrido, por medio de un equipo E-SEM Quanta200 FEI XTE 325/D8395BSE acoplado a un espectrómetro Genesis EDS microanalysis en los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universitat de Barcelona (CCiTUB).

Para el estudio textural de los carbonatos magmáticos también se utilizó un equipo de catodoluminiscencia fría del Departamento de Petrología, Geoquímica y Prospección Geofísica de la Facultad de Geología de la Universitat de Barcelona.

3.2.3. Estudio geoquímico de elementos mayores, menores y trazas

La composición y concentración de elementos mayoritarios, minoritarios y trazas de las lavas y rocas piroclásticas de Catanda se obtuvieron a partir de técnicas de Fluorescencia de rayos X y espectrometría de emisión a partir de una fusión con metaborato/tetaraborato de litio y una digestión con ácido nítrico de las muestras. Los análisis se realizaron en los laboratorios ACME Analytical Labs. de Vancouver (Canadá).

3.2.4. Química mineral

La composición química de los principales minerales formadores de las rocas carbonatíticas de Catanda, fue realizada mediante una microsonda electrónica Cameca SX50 (EPMA-WDS) en los CCiTUB. En la calcita, por su abundancia y amplia distribución en las muestras, se analizó también su composición de elementos minoritarios a partir

de una técnica de ablación láser LA-ICP-MS por medio de un equipo Coherent COMPex Pro-ArF Excimer en la School of Earth Sciences de la University of Tasmania (Australia).

3.2.5. Inclusiones fundidas en magnetita

Con el objetivo de conocer las características composicionales del magma parental de las carbonatitas de Catanda, se realizó un estudio mineralógico y composicional de las inclusiones fundidas incluidas en la magnetita titanífera de las lavas carbonatíticas. Este estudio se efectuó a partir de un análisis textural y mineralógico de las inclusiones mediante microscopía petrográfica de luz transmitida y reflejada y, posteriormente, con el uso de un microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 600 MLA ESEM y un microscopio electrónico de emisión de campo Hitachi SU-70. La totalidad de los análisis relacionados con el estudio de las inclusiones fundidas se llevaron a cabo en el Central Science Laboratory de la University of Tasmania (Australia) bajo la supervisión del profesor Vadim Kamenetsky. Puesto que parte de las fases presentes en las inclusiones fundidas se sospechaba que podían corresponder a compuestos solubles en agua, se prepararon las muestras (secciones pulidas) con sumo cuidado, trabajando con queroseno como lubricante durante el proceso de corte y pulido de las probetas.

3.2.6. Análisis isotópicos

Se ha llevado a cabo un conjunto de análisis de isótopos estables de C y O en los carbonatos formadores de las lavas carbonatíticas de Catanda y que se han incluido en el segundo artículo relacionado con el presente proyecto de tesis doctoral. Los análisis

se realizaron en el laboratorio Isotope-ratio mass spectrometry (IRMS) de los CCiTUB bajo la supervisión de Joaquín Perona. La extracción de CO₂ se efectuó mediante un equipo Thermo Finnigan Kiel Carbonate Device III, que reproduce una versión totalmente automatizada del método de McCrea (1950). También se han analizado las relaciones isotópicas de Sr-Nd y Pb-Hf del apatito y del clinopiroxeno de las lavas carbonatíticas, respectivamente con el objetivo de obtener información petrogenética de los magmas carbonatíticos. El análisis isotópico de ambos minerales fue realizado en los servicios analíticos de The University of Melbourne (Australia) bajo la supervisión del Prof. Roland Maas. Los detalles e interpretaciones derivadas de estos análisis se han incluido en el cuarto artículo incluido en el anexo de este mismo documento.

3.2.7. Geocronología

Uno de los apartados más relevantes del presente proyecto de tesis es el referente a la datación radiométrica de las carbonatitas de Catanda. Los estudios geocronológicos se han realizado mediante el análisis de minerales presentes en las lavas carbonatíticas:

- U-Pb en apatito
- (U-Th-Sm)/He en apatito
- Ar-Ar en flogopita
- Rb-Sr en flogopita

Los detalles analíticos y la metodología usada durante la datación se especifican en el cuarto artículo incluido en el apartado del anexo de este mismo documento.

4. Listado de publicaciones: estructura del proyecto

El presente proyecto de tesis doctoral se organiza como compendio de artículos científicos en revistas del SCI y se estructura a partir de las siguientes publicaciones, que se adjuntan íntegramente en el correspondiente anexo.

4.1. Publicaciones en revistas indexadas

Publicadas

Campany M., Mangas J., Melgarejo J.C., Bambi A., Alfonso P., Gernon T., Manuel J.(2014): The Catanda extrusive carbonatites (Kwanza Sul, Angola): an example of explosive carbonatitic volcanism. Bulletin of Volcanology 76, 818-833.

Descripción: El texto corresponde al primer artículo relacionado con el presente proyecto de tesis doctoral, publicado en la revista Bulletin of Volcanology. Se presenta una descripción de los afloramientos de carbonatitas volcánicas estudiados en de la región de Catanda (Angola), así como sus principales características litológicas, estructurales y texturales. Se incluyen las interpretaciones volcanológicas y los análisis de los procesos eruptivos que tuvieron lugar en la zona objeto de estudio.

Campany M., Kamenetsky, V.S., Melgarejo J.C., Mangas J., Manuel J., Alfonso P., Bambi A., Kamenetsky, M.B., Gonçalves, O.A. (2015): Carbonatitic lavas in Catanda (Kwanza Sul, Angola): Mineralogical and geochemical constraints on the parental melt. Lithos 232, 1-11.

Descripción: El artículo corresponde a la segunda publicación relacionada con el presente proyecto de tesis, y ha sido publicado en la revista Lithos. El trabajo versa sobre el estudio mineralógico, detallado de las distintas fases minerales presentes en las lavas carbonatíticas de Catanda, el análisis geoquímico de elementos mayores, menores y trazas de muestras de lavas representativas de esta zona volcánica, el estudio de isótopos estables de C y O en algunos de estos flujos lávicos y, finalmente, llevar a cabo una interpretación integrada de estos resultados. Así, las conclusiones obtenidas se centran en determinar las características petrogenéticas de las carbonatitas extrusivas estudiadas y, con ello, la composición del magma parental asociado a su formación.

Enviadas, en proceso de evaluación

Campeny M., Melgarejo J.C., Mangas J., Manuel J., Di Genova, D., Gonçalves A.O.

(2015): A new type of recent natrocarbonatitic magmatism in Angola: the feeding dykes of the Chiva lagoon maar. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.

Descripción: La publicación corresponde al tercer artículo asociado al presente proyecto de tesis. El artículo ha sido enviado a la revista Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana y resta pendiente de revisión. El trabajo corresponde a un estudio petrográfico de los diques carbonatíticos encontrados en las inmediaciones de la laguna de Chiva, una región que se encuentra en una zona

próxima a Catanda, pero fuera del graben donde se han descrito los principales afloramientos carbonatíticos.

No enviadas, en proceso de revisión por los coautores

Campeny M., Kamenetsky, V.S., Melgarejo J.C., Giuliani, A., Maas, R., Kohn, B., Matchan, E., Mangas J., Manuel J., Gonálves A.O. (2015): Incipient rifting in the West African margin manifested by recent carbonatitic volcanism in Catanda (Angola).

Descripción: El cuarto artículo relacionado con el presente proyecto de tesis doctoral está completado, pero aún no ha sido enviado para su publicación en espera de la revisión por parte de alguno de los coautores. En el trabajo se presentan los resultados geocronológicos con las dataciones efectuadas en las lavas representativas de Catanda, además de los datos obtenidos de isótopos radiogénicos de Sr-Nd y Pb-Hf analizados en apatito y clinopiroxeno, respectivamente.

4.2. Resúmenes de comunicaciones en congresos internacionales

Campeny M., Alfonso, P., Melgarejo, J.C., Mangas J., Bambi A., Manuel, J. (2012): Carbon and oxygen isotopes of the carbonatitic lavas of Catanda, Kwanza Sul, Angola: genetic implications. Abstracts of the European Mineralogical Conference 1, 438.

Descripción: El texto se incluye en el compendio de resúmenes de los trabajos presentados en el congreso European Mineralogical Conference, celebrado en Setiembre del 2012 en Frankfurt (Alemania).

Campany M., Kamenetsky, V.S., Melgarejo, J.C., Mangas J., Bambi A., Manuel, J. (2013): Sodium rich magmas parental to Catanda carbonatitic lavas (Angola): Melt inclusion evidence. *Mineralogical Magazine* 77(5), 814.

Descripción: El trabajo es un resumen de los datos obtenidos sobre inclusiones fundidas atrapadas en cristales de magnetita. Esta ponencia se presentó en el congreso Goldschmidt 2013, celebrado en Firenze (Italia) y la publicación se incluyó en un número especial de la revista *Mineralogical Magazine*.

5. Resultados globales

5.1. Afloramientos carbonatíticos

A partir de la realización de un nuevo mapa geológico del área de Catanda (Campany et al., 2014) se ha definido la localización de diferentes afloramientos de carbonatitas volcánicas que se relacionan con la presencia de un grupo de hasta siete centros eruptivos generados por edificios volcánicos de pequeñas dimensiones. El estudio general de los buzamientos de los materiales volcánicos ha. Estas carbonatitas están asociadas a materiales sedimentarios de distintas edades (aluviales, coluviales y travertinos) y rocas magmáticas graníticas del Arcaico. La descripción sistemática y detallada de los afloramientos, complementada con el levantamiento de seis columnas

vulcano-estratigráficas representativas y el estudio pormenorizado de los materiales que componen las columnas y han servido para determinar una predominancia de las rocas piroclásticas frente a las lavas carbonatíticas, la cuales representan un pequeño porcentaje del volumen total del material de origen volcánico en la región. A partir de esta investigación, se han podido definir cinco facies diferenciadas de rocas piroclásticas asociadas a diferentes niveles de explosividad e interacción agua-magma (Campeny et al., 2014). De forma adicional, se han encontrado cuatro afloramientos de lavas carbonatíticas: Huilala-Ungongué, Utihohala, Jango e Ipunda. En estos afloramientos se han distinguido hasta tres tipos diferenciados de lavas carbonatíticas a partir de sus características texturales, estructurales, mineralógicas y petrológicas, la definición de las cuales se presenta en el apartado de la discusión.

De forma adicional se ha realizado el hallazgo de diques carbonatíticos en la zona de Chiva, un área satélite al graben de Catanda. Estos diques tienen una orientación típicamente radial desde el centro de la laguna, lo que ha permitido establecer que la zona, fue, antiguamente, un centro eruptivo de actividad carbonatítica. El estudio geomorfológico de la zona también ha permitido definir que el centro eruptivo descrito en Chiva, tenía un morfología de maar. La mineralogía y características texturales de los diques carbonatíticos de Chiva, son similares lo descrito en las lavas carbonatíticas del graben de Catanda.

5.2. Lavas carbonatíticas

A partir de la descripción textural y mineralógica detallada de los diferentes afloramientos de lavas carbonatíticas de la zona de Catanda, mediante microscopio petrográfico, microscopio electrónico y catodoluminiscencia, éstas se han podido clasificar en tres tipos diferenciados: calciocarbonatitas, silicocarbonatitas (aillikitas) y natrocarbonatitas alteradas. Pese a sus diferencias los análisis de roca total de elementos minoritarios, ejemplificados en los diagramas multielementales, indican que los diferentes tipos de lavas proceden de un mismo magma parental (Fig.5).

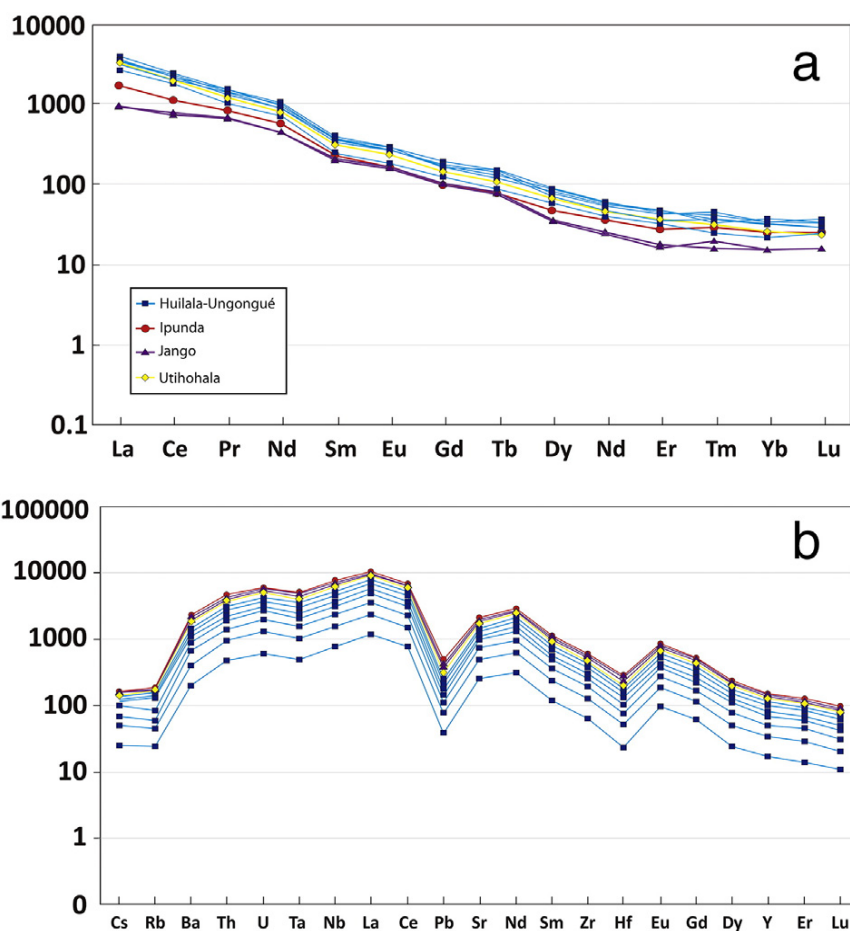


Fig.5: Diagramas multielementales y de REE de las distintas lavas descritas en la zona de Catanda.

Los datos de isótopos estables de C y O a partir del análisis de calcita de las lavas de Catanda, se han comparado con los de otras lavas carbonatíticas a nivel mundial y se ha podido ver que los resultados de isótopos estables de las natrocarbonatitas alteradas de Ipunda son, en efecto, muy parecidos a los de las lavas natrocarbonatíticas alteradas de Oldoinyo Lengai, Kerimasi o Tinderet (Campeny et al., 2015). En cambio, las silicocarbonatitas (aillikitas) de Huilala-Ungongué presentan un comportamiento distinto, con clara influencia de procesos de desgasificación magmática.

5.3. Inclusiones fundidas

El estudio mineralógico y composicional de las inclusiones fundidas contenidas en cristales de magnetita de las lavas, ha permitido extrapolar y definir la composición del magma parental de Catanda. Durante el estudio general de estas inclusiones se han podido describir hasta 24 fases minerales distintas, 12 de las cuales son minerales enriquecidos en elementos alcalinos, lo que indicaría que la composición del magma parental era, muy probablemente, rica en sodio y potasio.

5.4. Geocronología

La edad de las carbonatitas de Catanda se ha calculado mediante las relaciones isotópicas ^{40}Ar - ^{39}Ar y (U-Th-Sm)/He en flogopita y apatito, respectivamente. Ambos métodos radiogénicos indican que las carbonatitas se emplazaron hace, aproximadamente entre 0,66 y 0,65 Ma, durante el Pleistoceno Medio. Estos dos

métodos de datación están también apoyados por los datos de la relación U/Pb en apatito y Rb/Sr en flogopita, confirmando la edad reciente de las carbonatitas extrusivas de Catanda. Estas nuevas dataciones chocan directamente con la idea inicial de que el vulcanismo de Catanda tuvo lugar en el Cretácico Superior y obligan a replantearse la evolución geológica y el contexto geodinámico general de la región. De forma adicional, se presentan los resultados de los análisis de isótopos radiogénicos de Sr-Nd en apatito y Pb-Hf en clinopiroxeno, que aporten información geoquímica sobre el magma parental, las características de su emplazamiento y el contexto geotectónico regional de la zona de Catanda.

6. Discusión

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos del estudio geológico de las carbonatitas extrusivas de Catanda, se resumen las principales aportaciones en relación a los procesos volcánicos que tuvieron lugar en esta zona, la caracterización de las lavas carbonatíticas, algunas consideraciones del magma parental que dio lugar a estas erupciones y los datos geocronológicos que ayudan a encuadrarlas en el contexto geotectónico de esta zona de Angola.

6.1. Procesos volcánicos

6.1.1. Facies litológicas

El estudio de los afloramientos de rocas volcánicas carbonatíticas de la zona de Catanda ha permitido establecer un claro predominio de los materiales de origen piroclástico respecto la presencia de coladas lávicas. Este hecho indica que los

procesos eruptivos relacionados con la formación de las carbonatitas eran predominantemente explosivos, debido a la extrusión de un magma carbonatítico alcalino rico en volátiles y que ocasionalmente existió cierta actividad de carácter efusivo. A partir del tamaño de sus componentes fragmentarios y las características texturales que presentan, los materiales de origen piroclástico pueden clasificarse como tobas y tobas lapílicas. Esta clasificación general se ha podido precisar llegando a distinguir hasta 5 facies diferenciadas de rocas piroclásticas (Tab.1). Una característica generalizada es la presencia en las tobas de fragmentos líticos de composición granítica, los cuales son similares a los granitos encajantes de las rocas volcánicas carbonatíticas de Catanda. Este hecho indicaría que los procesos volcánicos habrían sido relativamente superficiales, fragmentándose el basamento granítico que aparece en los alrededores de esta zona.

PFA	Pyroclastic facies	Description	Interpretation
PFA 1	Ash tuff	<i>Composition:</i> Brown aphanitic rock with small proportion of granitic fragments (≈ 5 vol.%) <i>Structure:</i> Massive	Lithofacies related to multiple explosive eruptive episodes
PFA 2	Pelletal lapilli-rich tuff	<i>Composition:</i> Matrix-supported lapilli tuff comprising by pelletal grains (up to 0.4-0.5 mm). Matrix consists of secondary interstitial calcite. Cores to pelletal lapilli are composed of quartz, plagioclase, feldspar, pyroxene, calcite and apatite <i>Structure:</i> Chaotic	Pelletal lapilli possibly formed by fluidised spray granulation processes
PFA 3	Chaotic lapilli tuff	<i>Composition:</i> Matrix-supported tuff formed by angulated and irregular rock fragments of quartz, feldspar, plagioclase, magnetite and phlogopite. Matrix is composed by secondary interstitial calcite. <i>Structure:</i> Chaotic	Pyroclastic facies associated with lower intensity explosive eruptions, probably without significant interaction with water
PFA 4	Bedded lapilli tuff	<i>Composition:</i> Bedded lapilli tuff composed of rounded granitic rocks fragments, magnetite, phlogopite and pyroxene. Interstitial calcite. Mantle xenoliths present (≈ 5 vol.%) <i>Structure:</i> Laminated, inverse grading	Pyroclastic facies probably associated with phreatomagmatism processes
PFA 5	Block-rich lapilli tuff	<i>Composition:</i> Lapilli tuff with significant granitic and mafic blocks ($\approx 20\%$) up to 10 cm in diameter. Secondary sparitic calcite filling interstitial spaces and porosity <i>Structure:</i> Chaotic, poorly sorted	Lithofacies formed by eruptive pulses with overall low explosivity

Tab.1: Clasificación de las diferentes facies de rocas piroclásticas carbonatíticas distinguidas en la zona de Catanda.

En referencia a la actividad efusiva, ésta es escasa pero se ha podido detectar y estudiar en cuatro afloramientos diferenciados y que se han denominado, según la toponimia de la región, como: Huilala-Ungongué, Utihohala, Jango e Ipunda

6.1.2. Edificios volcánicos

El análisis de las columnas vulcano-estratigráficas y el estudio preciso de los datos cartográficos junto con las medidas de buzamiento de los distintos niveles piroclásticos, ha permitido identificar hasta siete centros eruptivos en la zona de Catanda (Campeny et al., 2014). Así pues, se ha podido establecer que los afloramientos carbonatíticos de la región de Catanda están relacionados con la presencia de un conjunto de edificios volcánicos de pequeñas dimensiones, en contraposición a la posibilidad de que existiera un solo edificio volcánico de mayores dimensiones. Los buzamientos bajos de las capas piroclásticas, la topografía suave de los afloramientos y, especialmente, la elevada tasa de explosividad definida, son indicadores de que la morfología original de estos edificios volcánicos corresponde a la de anillos de toba y maares. Estas morfologías se han descrito en otras áreas con vulcanismo carbonatítico como, por ejemplo, Polino (Stoppa & Lupini, 1993) y Mt. Vulture (Stoppa & Principe, 1998) en Italia, o Kaisersthül en Alemania (Keller, 1981; Keller, 1989). Por otro lado, al este del graben principal de Catanda, en la zona de Chiva, se ha localizado un octavo edificio volcánico, con un diámetro de cráter aproximado de 900 metros, donde aflora un conjunto de pequeños diques de potencia métrica que se disponen de forma radial desde el centro del cráter. Estos diques

presentan una mineralogía típicamente carbonatítica y es equivalente a la que se ha descrito en las lavas de algunos afloramientos del graben principal.

6.2. Lavas carbonatíticas

A partir de la composición geoquímica y el análisis estructural y textural de los flujos lávicos carbonatíticos encontrados en la zona de Catanda se han podido definir tres tipologías diferenciadas de lavas carbonatíticas en cuatro afloramientos distintos (Tab.2): calciocarbonatitas, aillikitas y natrocarbonatitas alteradas.

Location	Texture	Carbonate content (modal %)	Mineralogy
Huilala - Ungongué	Finely porphyritic	~ 30	<p>Microphenocrysts: fluorapatite (35%), titaniferous magnetite (35%), augite (15%), phlogopite (15%)</p> <p>Groundmass: calcite, fluorapatite, titaniferous magnetite, pyrochlore, baddeleyite, cuspidine, perovskite, periclase, brucite, zirconolite, spurrite, oldhamite</p> <p>Xenocrysts: olivine, quartz, microcline</p> <p>Secondary: sparry calcite, barite, rhabdophane, crandallite</p>
Ipunda	Trachytoid	~ 70	<p>Microphenocrysts: calcite (60%), fluorapatite (15%), titaniferous magnetite (15%), phlogopite (5%), augite (5%)</p> <p>Groundmass: calcite, fluorapatite, titaniferous magnetite, pyrochlore, baddeleyite</p> <p>Xenocrysts: quartz, microcline</p> <p>Secondary: sparry calcite</p>
Jango	Finely porphyritic	~ 70	<p>Phenocrysts: fluorapatite (60%), titaniferous magnetite (25%), phlogopite (10%), augite (5%)</p> <p>Groundmass: calcite, fluorapatite, titaniferous magnetite, pyrochlore, baddeleyite, monticellite</p> <p>Xenocrysts: amphibole, quartz, microcline</p> <p>Secondary: sparry calcite</p>
Utihohala	Finely porphyritic	~ 60	<p>Microphenocrysts: fluorapatite (60%), titaniferous magnetite (20%), phlogopite (15%), augite (5%)</p> <p>Groundmass: calcite, fluorapatite, titaniferous magnetite, pyrochlore, alabandite</p> <p>Xenocrysts: quartz, microcline</p> <p>Secondary: sparry calcite</p>

Tab.2: Clasificación de los diferentes tipos de lavas carbonatíticas distinguidos en la zona de Catanda.

Las calciocarbonatitas se han descrito en los afloramientos de Jango y Uithohala y se caracterizan por presentar una textura porfídica formada por fenocristales de apatito, magnetita, flogopita y augita implantados en una matriz de calcita de grano muy fino. Los contenidos de carbonatos de estas lavas son superiores al 50%, encajando plenamente en la definición de las carbonatitas propuesta por Le Maitre (2002).

Las lavas de la zona de Ipunda presentan contenidos de carbonato similares pero su textura es claramente traquitoidal, formada por fenocristales tabulares de calcita implantados en una matriz de calcita esparítica y acompañados de forma minoritaria por magnetita, apatito y flogopita. La textura traquitoidal de las lavas de Ipunda es parecida a la que se ha descrito en otras localidades a nivel mundial como, por ejemplo, los Koru Beds de Tinderet en Kenya, el complejo de Rockeskyll en Alemania o las tefras del volcán Kerimasi en Tanzania (Deans and Roberts, 1984; Clark and Roberts, 1986; Keller, 1981; Riley et al., 1996; Hay, 1983). El origen de la textura traquitoidal de las carbonatitas sigue generando hoy en día mucha controversia, aunque parece que los últimos estudios confirmarían que estas texturas estarían relacionadas con procesos de meteorización de carbonatos alcalinos primarios, es decir, por la alteración de una lava natrocarbonatítica (Zaitsev et al., 2013). Bajo esta premisa se considera que las lavas de la zona de Ipunda se habrían generado a partir de un proceso de alteración de natrocarbonatitas primarias, caracterizado por la lixiviación de los elementos alcalinos y la formación de un producto final calciocarbonatítico, formado por cristales de calcita pseudomorfos de nyerereíta de hábito tabular.

Por otro lado, las lavas de la zona de Huilala-Ungongué se clasificaron inicialmente, a partir de su composición, como silicocarbonatitas. Sin embargo, estas presentan características de mineralogía y química mineral que permiten clasificarlas como aillikitas siguiendo la clasificación propuesta por Tappe et al. (2005). Estas rocas se caracterizan por tener contenidos de SiO₂ de hasta el 23,3 % en peso y un porcentaje de carbonatos bajo, alrededor de un 30-35% (Campeny et al., 2014). El enriquecimiento en SiO₂ de estas lavas es similar al que se ha descrito en otras localidades con carbonatitas extrusivas, como Fort Portal en Uganda o en rocas de afinidad carbonatítica como las ya mencionadas aillikitas de Aillik Bay en Canadá (Eby et al., 2009; Tappe et al., 2006). El estudio de isótopos estables de las lavas carbonatíticas de Huilala-Ungongué indica que su formación se habría generado a partir de procesos de desgasificación magmática y posterior alteración por interacción con fluidos meteóricos. Debido a su mineralogía rica en minerales magnesianos, como la periclasa, podrían haberse formado a partir de la cristalización de un magma primario enriquecido en magnesio, de composición dolomítica (Campeny et al., 2015).

En resumen, el análisis mineralógico y textural minucioso de distintos flujos lávicos de Catanda ha permitido caracterizar y clasificar las coladas a partir de criterios estrictamente mineralogenéticos y éstas se han definido como: calciocarbonatitas (Jango y Utihohala), aillikitas (Huilala-Ungongué) y natrocarbonatitas alteradas (Ipunda).

6.3. Composición del magma parental

Pese a las diferencias composicionales existentes entre los diferentes tipos de lavas carbonatíticas de Catanda, los diagramas binarios multielementales (spider diagrams) y de tierras raras presentan perfiles prácticamente idénticos para todas las tipologías (Campeny et al., 2015). Este dato es indicativo de que los distintos tipos de lavas carbonatíticas estarían genéticamente relacionados y provendrían, todos ellos, de un magma parental común.

	<u>Mineral</u>	<u>Ideal Formula</u>
Carbonates	Calcite	CaCO ₃
	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂
	Northupite	Na ₃ Mg(CO ₃) ₂ Cl
	Nyerereite	Na ₂ Ca(CO ₃) ₂
	Shortite	Na ₂ Ca ₂ (CO ₃) ₃
	Trona	Na ₃ H(CO ₃) ₂ · 2 H ₂ O
Halides	Halite	NaCl
	Neighbourite	NaMgF ₃
	Sylvite	KCl
Silicates	Cuspidine	Ca ₄ (Si ₂ O ₇)(F,OH) ₂
	Diopside	CaMgSi ₂ O ₆
	Forsterite	Mg ₂ SiO ₄
	Humite	(Mg,Fe ²⁺) ₇ (SiO ₄) ₃ (F,OH) ₂
	Nepheline	(Na,K)AlSiO ₄
	Phlogopite	KMg ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH,F) ₂
Sodalite	Na ₈ (Al ₆ Si ₆ O ₂₄)(Cl,S) ₂	
Sulphides	Pyrite	FeS ₂
	Pyrrhotite	Fe _{1-x} S
	Rasvumite	KFe ₂ S ₃
Oxides	Magnetite	Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₂ O ₄
	Periclase	MgO
	Perovskite	CaTiO ₃
	Pyrochlore	(Na,Ca,Pb,U) ₂ Nb ₂ (O,OH) ₆ (OH,F,O)
Phosphates	Fluorapatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F

La composición original de este magma parental se ha extrapolado a partir del estudio de las inclusiones fundidas atrapadas de forma primaria en el interior de microfenocristales de magnetita. Estas inclusiones tienen una paragénesis muy compleja y están formadas, mayoritariamente, por fases minerales enriquecidas en elementos alcalinos (Tab.3). La presencia abundante de fases alcalinas sugiere que el magma parental que dio lugar a la formación de las carbonatites de Catanda era, por lo tanto, rico en sodio y potasio.

Tab.3: Fases minerales descritas en las inclusiones fundidas en cristales de magnetita de las lavas carbonatíticas de Catanda.

6.4. Geocronología y contexto general de emplazamiento

La edad de las carbonatitas de Catanda se ha calculado a partir del análisis de las relaciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de la flogopita y $(\text{U-Th-Sm})/\text{He}$ del apatito, los cuales son minerales frecuentes en la paragénesis de las lavas carbonatíticas. A partir de estos métodos se ha podido determinar que la edad de emplazamiento de las carbonatitas de Catanda es de entre 556 ± 21 ka (según la relación $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ de la flogopita) y 660 ± 90 ka (según la relación $(\text{U-Th-Sm})/\text{He}$ del apatito). Estos resultados indican que las carbonatitas de Catanda se formaron durante el Pleistoceno medio y no en el Cretácico superior, tal y como habían propuesto otros autores anteriormente (Silva y Pereira, 1973).

A partir de la edad calculada por Silva & Pereira (1973), la formación y emplazamiento de las carbonatitas de Catanda estaría relacionada, de forma generalizada, con el magmatismo que tuvo lugar en la región de Lucapa durante el Cretácico (Jelsma et al., 2009) y que está ligado al emplazamiento de la gran mayoría de carbonatitas y kimberlitas de Angola (Robles-Cruz et al., 2012). Por el contrario, la nueva datación (660-556 ka) obliga a descartar la relación del vulcanismo de Catanda con el magmatismo Cretácico y a replantear su génesis y su contexto geológico y de emplazamiento.

La primera hipótesis a tener en cuenta sería que el magmatismo de la región de Catanda estuviera relacionado con un proceso regional, a gran escala, como sería el corredor Cretácico de Lucapa. Esta suposición estaría corroborada por la detección de anomalías tomográficas significativas en el límite litosfera-astenosfera bajo la región de Catanda y en parte del corredor de Lucapa (Fishwick, 2010; Hansen, 2012). Igualmente, cabe destacar que las mencionadas anomalías tomográficas del manto van

acompañadas de una anomalía positiva de la topografía en toda la región (Moucha & Forte, 2011). El abombamiento topográfico indicaría que, actualmente, se está produciendo un ascenso de la astenosfera en esta zona, manifestado en superficie también por las erupciones carbonatíticas de Catanda.

En este sentido, las anomalías geofísicas detectadas en el área de Lucapa presentan características similares a las publicadas en zonas donde, actualmente, se está produciendo un proceso de rifting continental como, por ejemplo, el Rift Oriental Africano (EAR) o el Sistema de Rift Cenozoico Centroeuropeo (CERS), donde también es conocida la presencia de vulcanismo alcalino y carbonatítico (Chorowicz, 2005; Lustrino & Wilson, 2007). Esta semejanza está también apoyada por los datos de isótopos de Rb-Sr de las carbonatitas de Catanda, los cuales presentan valores equivalentes o muy similares a los publicados en las carbonatitas de estas dos regiones.

Así pues, el magmatismo carbonatítico de la zona de Catanda estaría relacionado con el desarrollo de un proceso regional de dinámica ascendente mantélica asociado a un contexto actual de rifting continental, similar a los que existen hoy en día en zonas como el EAR o el CERS. La formación de este proceso extensional estaría muy probablemente relacionada con la reactivación de las estructuras extensionales de Lucapa, las cuales, como se ha indicado anteriormente, han sufrido diferentes estadios de magmatismo intermitentemente desde el Neoproterozoico (Sykes, 1978). La reactivación de antiguas zonas de rifting a lo largo de periodos muy largos de tiempo es un fenómeno común en muchas regiones del globo (Martin et al., 2012).

Por otro lado, en la parte meridional del continente africano ha sido detectada una superpluma mantélica en la zona del manto inferior (Gurnis, 2000) que, en algunos puntos, presenta conexión con el manto superior, contribuyendo a la generación de eventos magmáticos corticales y superficiales (Al Hajri et al., 2009). Igualmente, la actividad de esta superpluma mantélica ha estado relacionada con el magmatismo del EAR (Ritsema et al., 1999; Behn 2004; Civiero, 2015). Algunos autores también sugieren que su actividad está sufriendo un desplazamiento hacia el oeste (Conrad, 2003), por lo que no sería descartable que pudiera tener conexión con el desarrollo de eventos magmáticos corticales en el margen Atlántico de África. Siguiendo estas premisas, la actividad de esta superpluma y su correspondiente desplazamiento al oeste, podrían ser una de las causas de la reactivación de las estructuras extensionales de Lucapa y la generación del correspondiente magmatismo carbonatítico en la región de Catanda.

En resumen, las carbonatitas extrusivas (tobas piroclásticas y coladas lávicas) de Catanda se habrían emplazado entre 556 y 660 ka a través de un proceso de rotura (rift) continental en el margen Atlántico del continente africano. Este proceso estaría relacionado con la reactivación de las antiguas estructuras extensionales de Lucapa y podría estar generado por la interacción de la superpluma meridional africana con niveles más superficiales en el manto superior y en la corteza continental. Considerando que las estructuras de Lucapa tuvieron un papel importante en la ruptura del supercontinente Gondwana y la correspondiente formación del océano Atlántico, no puede descartarse que, teniendo en cuenta el contexto tectónico y geodinámico actual, esta región pueda evolucionar y actuar en el futuro como una

zona de ruptura del continente africano, con la formación de cámaras magmáticas corticales y la presencia de erupciones volcánicas en superficie.

7. Conclusiones

Las principales conclusiones del presente proyecto de tesis doctoral y que se encuentran detalladas en las publicaciones adjuntas en el anexo de este mismo documento, pueden resumirse en los siguientes puntos:

- La formación de las carbonatitas extrusivas de la región de Catanda está relacionada con la presencia de hasta siete edificios volcánicos de carácter monogenético, asociados a morfologías de anillos de tobas y maares.
- Estos edificios afloran en un graben principal de 50 Km² encajado en granitos del Arcaico.
- Asociado al graben de Catanda, pero fuera de esta zona, se ha localizado un octavo centro eruptivo con morfología de maar, donde se han descrito diques radiales en el cráter de composición carbonatítica.
- La actividad volcánica a la región fue eminentemente explosiva. Este hecho se pone de manifiesto por el gran predominio de rocas fragmentarias (tobas piroclásticas) respecto las lavas carbonatíticas, las cuales representan un porcentaje insignificante a nivel volumétrico en el conjunto de rocas carbonatíticas.
- Las rocas piroclásticas de Catanda pueden clasificarse como tobas y tobas lapílicas. Sin embargo, considerando el tamaño de los fragmentos, la presencia

o ausencia de lapilli peletal y el desarrollo de estructuras internas, se han podido distinguir hasta 5 facies distintas de rocas piroclásticas

- Las lavas carbonatíticas se localizan en las zonas externas del graben de Catanda, asociadas a la presencia de las fallas más importantes. Se han podido localizar hasta cuatro afloramientos diferenciados de lavas que se han denominado según la toponimia, como: Huilala-Ungongué, Utihohala, Jango e Ipunda.
- Siguiendo criterios mineralógicos y texturales, las lavas pueden agruparse en tres tipologías distintas: calciocarbonatitas, aillikitas y natrocarbonatitas alteradas.
- Los diagramas binarios multielementales y de tierras raras indican que, pese a sus diferencias composicionales y texturales, las lavas de Catanda se formaron a partir de un magma parental común.
- La composición de este magma carbonatítico parental ha podido ser determinada a partir del estudio de las inclusiones fundidas atrapadas en magnetita como eminentemente alcalina.
- Las características texturales y los datos de isótopos estables indican que las lavas de la zona de Ipunda, formadas actualmente por cristales de calcita tabular, son el producto de alteración de lavas natrocarbonatíticas, formadas inicialmente por carbonatos alcalinos, posiblemente nyerereíta.
- La relación $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ de las lavas de la zona de Huilala-Ungongué sugiere que estas se formaron a partir de un proceso de decarbonatación magmática seguido por una alteración hidrotermal de baja temperatura, a partir, probablemente, de una roca carbonatítica de composición dolomítica.

- La edad de las carbonatitas de Catanda se ha determinado a partir de diferentes métodos radiométricos como del Pleistoceno medio (556 ± 21 ka / 660 ± 90 ka) lo que indica que la actividad volcánica es muy reciente y no puede descartarse que siga activa.
- La formación de las carbonatitas de Catanda estaría relacionada con el desarrollo de un proceso de rotura (rifting) continental, similar al de zonas como el EAR o el CERS. El desarrollo de este proceso de apertura estaría provocado por la reactivación de las estructuras extensionales del corredor de Lucapa.
- La reactivación tectono-magmática del cinturón de Lucapa podría estar generada de forma indirecta por la actividad de la superpluma mantélica del África meridional, tal y como se ha propuesto para explicar el vulcanismo generado en el EAR.

8. Referencias

- Al Hajri, Y., White, N., Fishwick, S. (2009): Scales of transient convective support beneath Africa. *Geology* 37(10), 883-886.
- Allegre, C.J., Pineau, F., Bernat, M., Javoy, M. (1971): Evidence for the Occurrence of Carbonatites on the Cape Verde and Canary Islands. *Nature physical science* 233, 103-103.
- Bailey, D.K. (1993): Carbonate magmas. *Journal of the Geological Society (London)* 150, 637-651.
- Baker, M.B., Wyllie, P. J. (1990): Liquid immiscibility in a nephelinite-carbonate system at 25 kbar and implications for carbonatite origin. *Nature* 346, 168-170.
- Behn, M., Conrad, C.P., Silver, P.G. (2004): Detection of upper mantle flow associated with the African Superplume. *Earth and Planetary Science Letters* 224, 259-274.
- Bell, K., ed. (1989): *Carbonatites: Genesis and Evolution*. Chapman & Hall, London, U.K.
- Bell, K., Simonetti, A. (2010): Source of parental melts to carbonatites—critical isotopic constraints. *Mineralogy and Petrology* 98, 77-89.
- Bose, P.N. (1884): *Geology of the Lower Narbada Valley between Nimáwar and Káwant*. *Geol. Surv. India, Mem.* 21, 1-72.
- Brøgger, W.C. (1921): *Die Eruptivegesteine des Kristianiagebietes. IV. Das Fengebiet in Telemarken, Norwegen*. *Norske Vidensk. Skrift. Mat-Naturv. Kl.* 1920, 408 p.

- Brooker, R.A., Hamilton, D.L. (1990): Three-liquid immiscibility and the origin of carbonatites. *Nature* 346, 459-462.
- Campbell, L.S., Henderson, P. (1997): Apatite paragenesis in the Bayan Obo REE–Nb–Fe ore deposit, Inner Mongolia, China. *Lithos* 42, 89–103.
- Campeny, M., Mangas, J., Melgarejo, J.C., Bambi, A., Alfonso, P., Gernon, T., Manuel, J. (2014): The Catanda extrusive carbonatites (Kwanza Sul, Angola): an example of explosive carbonatitic volcanism. *Bulletin of Volcanology* 76: 818-833
- Campeny, M., Kamenetsky, V.S., Melgarejo, J.C., Mangas, J., Manuel, J., Alfonso, P., Kamenetsky, M.B., Bambi, A., Gonçalves, A.O. (2015): Carbonatitic lavas in Catanda (Kwanza Sul, Angola): mineralogical and geochemical constraints on the parental melt. *Lithos* 232, 1-11.
- Chakhmouradian, A.R. (2006): High-field-strength elements in carbonatitic rocks: Geochemistry, crystal chemistry and significance for constraining the sources of carbonatites. *Chemical Geology* 235, 138-160.
- Chakhmouradian, A.R., Mumin, A.H., Demény, A., Elliott, B. (2008): Postorogenic carbonatites at Eden Lake, Trans-Hudson Orogen (northern Manitoba, Canada): geological setting, mineralogy and geochemistry. *Lithos* 103, 503-526.
- Chakhmouradian, A.R., Wall, F. (2012): Rare earth elements: minerals, mines, magnets (and more). *Elements* 8 (5), 333-340.
- Chakhmouradian, A.R., Zaitsev, A.N. (2012): Rare Earth Mineralization in Igneous Rocks: Sources and Processes. *Elements* 8 (5), 347-354.

- Chorowicz, J. (2005): The East African Rift system. *Journal of African Earth Sciences* 43, 379-410.
- Civiero, C., Hammond, J.O.S., Goes, S., Fishwick, S., Ahmed, A., et al. (2015): Multiple mantle upwellings in the transition zone beneath the northern East-African Rift system from relative P-wave travel-time tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 16, 2949-2968.
- Clark, M.G.C., Roberts, B. (1986). Carbonated melilitites and calcitized alkali carbonatites from Homa Mountain, western Kenya: a reinterpretation. *Geological Magazine* 123, 683-692.
- Conrad, C.P., Gurnis, M. (2003): Seismic tomography, surface uplift, and the breakup of Gondwanaland: Integrating mantle convection backwards in time. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4(3), 1031.
- Daly, R.A. (1933): *Igneous Rocks and the Depths of the Earth*. McGraw Hill, New York.
- Dawson, J.B. (1962): Sodium carbonate lavas from Oldoinyo Lengai, Tanganyika. *Nature* 195, 1075-1076.
- De Carvalho, H., Tassinari, C., Alves, P.H. (2000): Geochronological review of the Precambrian in western Angola: links with Brazil. *Journal of African Earth Sciences* 31, 383-402.
- Deans, T., Roberts, B. (1984): Carbonatite tuffs and lava clasts of the Tinderet foothills, western Kenya: a study of calcified natrocarbonatites. *Journal of the Geological Society of London* 141, 563-580.

- De Witt, E., Kwak, L.M., Zartman, R.E. (1987): U–Th–Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Mountain Pass carbonatite and alkalic igneous rocks, southeastern California. Geological Society of America, Abstract Programs 19, 642.
- Drew, L.J., Qingrun, M., Weijun, S. (1990): The Bayan Obo iron rare-earth niobium deposits, inner-Mongolia, China. *Lithos* 26, 43-65.
- Eby, G.N., Lloyd, F.E., Woolley, A.R. (2009): Geochemistry and petrogenesis of the Fort Portal, Uganda, extrusive carbonatite. *Lithos* 113, 785-800.
- Fan, H.R., Hu, F.F., Yang, K.F., Wang, K.Y., Liu, Y.S. (2009): Geochronology framework of late Paleozoic dioritic-granitic plutons in the Bayan Obo area, Inner Mongolia, and tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica* 25, 2933-2938.
- Fischer, T.P., Burnard, P., Marty, B., Hilton, D.R., Füre, E., Palhol, F., Sharp, Z.D., Mangasini, F. (2009): Upper-mantle volatile chemistry at Oldoinyo Lengai volcano and the origin of carbonatites. *Nature* 459, 77-80.
- Fishwick, S. (2010): Surface wave tomography: Imaging of the lithosphere asthenosphere boundary beneath central and southern Africa?. *Lithos* 120, 63-73.
- Groves, D.I., Vielreicher, N.M. (2001): The Phalabowra (Palabora) carbonatite-hosted magnetite–copper sulfide deposit, South Africa: an end-member of the iron-oxide copper–gold–rare earth element deposit group?. *Mineralium Deposita* 36, 189-194.
- Guest, N.J. (1956): The volcanic activity of Oldoinyo L'Engai, 1954. *Rec. Geol. Surv. Tanganyika* 4, 56-59.

- Gurnis, M., Mitrovica, J.X., Ritsema, J., van Heijst, H. (2000): Constraining mantle density structure using geological evidence of surface uplift rates: The case of the African Superplume. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 1, 1020.
- Hansen, S., Nyblade, A.A., Benoit, M.H. (2012): Mantle structure beneath Africa and Arabia from adaptively parameterized P-wave tomography: Implications for the origin of Cenozoic Afro-Arabian tectonism. *Earth and Planetary Science Letters* 319-320, 23-34.
- Haxel, G. (2005): Ultrapotassic rocks, carbonatite and rare earth element deposit, Mountain Pass, southern California. In *Geology and Mineral Resources of the Mojave National Preserve, southern California*. U.S. Geol. Surv., Bull. 2160.
- Hay, R.L. (1983): Natrocarbonatite tephra of Kerimasi volcano, Tanzania. *Geology* 11, 599-602.
- Heinrich, E.W. (1966): *The Geology of Carbonatites*. Rand McNally & Co., Chicago, Illinois.
- Högbohm, A.G. (1895): Über das Nephelinsyenitgebiet auf der Insel Alnö. *Geol. Fören. Stockholm Förh.* 17, 100-160.
- Jelsma, H., Barnett, W., Richards, S., Lister, G. (2009): Tectonic setting of kimberlites. *Lithos* 112S, 155-165.
- Keller, J. (1981): Carbonatitic volcanism in the Kaiserstuhl alkaline complex: evidence for highly fluid carbonatitic melts at the Earth's surface. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 9, 423-431.

- Keller, J. (1989): Extrusive carbonatites and their significance. In: Carbonatites: Genesis and Evolution, ed Bell K (Unwin Hyman, London), pp. 70-88.
- Keller, J. & Zaitsev, A. (2012): Geochemistry and petrogenetic significance of natrocarbonatites at Oldoinyo Lengai, Tanzania: Composition of lavas from 1988 to 2007. *Lithos* 148, 45-53.
- Kogut, A.I., Hagni, R.D., Schneider, G.I.C. (1998): Geology, mineralogy, and paragenetic sequence of the Okorusu carbonatite-related fluorite ores, Namibia. In: Ed. Hagni, R. D., Proc. 9th Quadrenn. IAGOD Symp., 1994, 555-573.
- Le Bas, M.J. (1977): Carbonatite–Nephelinite Volcanism. J. Wiley & Sons. London, U.K.
- Le Bas, M.J., Rex, D.C., Stillman, C.J. (1986): The early magmatic chronology of Fuerteventura. *Geological Magazine* 123, 287-298.
- Le Bas, M.J., Spiro, B., Yang, X.M. (1997): Oxygen, carbon and strontium isotope study of the carbonatitic dolomite host of the Bayan Obo Fe–Nb–REE deposit, Inner Mongolia, N China. *Mineralogical Magazine* 61, 531-541.
- Le Maitre, R.W. (2002): *Igneous Rocks: a Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Lustrino, M., Wilson, M. (2007): The Circum-Mediterranean anorogenic Cenozoic Igneous Province. *Earth-Science Reviews* 81, 1-65
- Mangas, J., Pérez Torrado, F.J., Martín Izard, A., Reguilón Bragado, R.M. (1996): Minerales de tierras raras en las carbonatitas del Complejo Basal de Fuerteventura (Islas Canarias). *Geogaceta* 20 (7), 1511-1513.

- Martin, R., Sokolov, M., Magji, S.S. (2012): Punctuated anorogenic magmatism. *Lithos* 152, 132-140.
- McCrea, J.M. (1950): On the Isotopic Chemistry of Carbonates and a Paleotemperature Scale. *Journal of Chemical Physics* 18(6), 849-857.
- McKenzie, D., Daly, M.C., Priestley, K. (2015): The lithospheric structure of Pangea. *Geology* 43(9): 783-786.
- Mitchell, R.H. (1995): *Kimberlites, Orangeites and Related Rocks*. Plenum Press, New York, N.Y.
- Mitchell, R.H. (1996): The melilitite clan. In *Undersaturated Alkaline Rocks: Mineralogy, Petrogenesis, and Economic Potential* (R.H. Mitchell, ed.). Mineral. Assoc. Can., Short Course Ser. 24, 123-152.
- Mitchell, R.H. (2005): Carbonatites and carbonatites and carbonatites. *The Canadian Mineralogist* 43, 2049-2068.
- Moucha, R., Forte, A.M. (2011): Changes in African topography driven by mantle convection. *Nature Geoscience* 4, 707-712.
- Moulin, M., Aslanian, D., Unternehr, P. (2010): A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. *Earth-Science Reviews* 98, 1-37.
- Nelson, D.R., Chivas, A.R., Chappell, B.W., McCulloch, M.T. (1988): Geochemical and isotopic systematics in carbonatites and implications for the evolution of ocean-island sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52, 1-17.

- Olsen, J.C., Shaw, D.R., Pray, L.C., Sharp, W.N., Hewlett, D.F. (1954): Rare-earth mineral deposits of the Mountain Pass district, San Bernardino County, California. U.S. Geological Survey, Professional Papers 261.
- Pearce, N.J.G., Perkins, W.T., Westgate, J.A., Gorton, M.P., Jackson, S.E., Neal, C.R., Chenerly, S.P. (1997): A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM and NIST SRM glass reference materials. *Geostandards Newsletter* 21, 115-144.
- Peres, A.M., Gomes, C.F. (1969): Baddeleite da Catanda, Angola. *Boletim dos Serviços de Geologia e Minas de Angola* 18: 27-34.
- Peres, A.M., Gomes, C.F., Cardoso-Simões, M.V. (1968): As variedades semi-preciosas de olivina da Catanda-Angola. *Boletim dos Serviços de Geologia e Minas de Angola* 18: 5-15.
- Riley, T., Bailey, K., Lloyd, F.E. (1996): Extrusive carbonatite from the quaternary Rockeskyll Complex, West Eifel, Germany. *The Canadian Mineralogist* 34, 389-401.
- Ritsema, J., van Heijst, H.J., Woodhouse, J.H. (1999): Complex shear wave velocity structure imaged beneath Africa and Iceland. *Science* 286, 1925-1928.
- Robles-Cruz, S.E., Escayola, M., Jackson, S., Galí, S., Pervov, V., Watangua, M., Gonçalves, A., Melgarejo, J.C. (2012): U-Pb SHRIMP geochronology of zircon from the Catoca kimberlite, Angola: Implications for diamond exploration. *Chemical Geology* 310-311, 137-147.
- Sasada, T., Hiyagon, H., Bell, K., Ebihara, M. (1997): Mantle-derived noble gases in carbonatites. *Geochimica and cosmochimica Acta* 61, 4219-4228.

- Shand, S.J. (1943): *Eruptive Rocks*. J. Wiley & Sons, New York, N.Y.
- Silva, M.V.S., Pereira, E. (1973): Estrutura Vulcânico-Carbonatítica da Catanda (Angola). *Boletim dos Serviços de Geologia e Minas de Angola* 24, 5-14.
- Stoppa, F., Lupini, L. (1993): Mineralogy and petrology of the Polino monticellite calciocarbonatite (Central Italy). *Mineralogy and Petrology* 49, 213-231.
- Stoppa, F., Principe, C. (1998): Eruption styles and petrology of a new carbonatitic suite from the Mt. Vulture (Southern Italy): the Monticchio Lakes Formation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 80, 137-153.
- Streckeisen, A. (1980): Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks. IUGS Subcomission on the Systematics of Igneous Rocks. *Geologische Rundschau* 69, 194-207.
- Sykes, L. (1978): Intraplate seismicity, reactivation of pre-existing zones of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation. *Reviews Geophysics Space Physics* 16, 621-688.
- Tappe, S., Foley, S.F., Jenner, G.A., Kjarsgaard, B.A. (2005): Integrating Ultramafic Lamprophyres into the IUGS Classification of Igneous Rocks: Rationale and Implications. *Journal of Petrology* 46 (9), 1893-1900.
- Tappe, S., Foley, S.F., Jenner, G.A., Heaman, L.M., Kjarsgaard, B.A., Romer, R.L., Stracke, A., Joyce, N., Hoefs, J. (2006): Genesis of Ultramafic Lamprophyres and Carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a Consequence of Incipient Lithospheric Thinning beneath the North Atlantic Craton. *Journal of Petrology* 46(7), 1261-1315.

- Tilton, G.R., Bryce, J.G., Mateen, A. (1998): Pb–Sr–Nd isotope data from 30 and 300 Ma collision zone carbonatites in northwest Pakistan. *Journal of Petrology* 39, 1855-1874.
- Tomkeieff, S.I. (1938): The role of carbon dioxide in igneous magmas. *Trans. Brit. Ass. Adv. Sci., sec C.* 417-418.
- Torquato, J.R., Amaral, G. (1973): Algumas idades K/Ar do magmatismo mesozoico de Angola e sua correlação com o correspondente do sul do Brasil. *Boletim do Instituto de Investigação Científica de Angola* 10, 31-38.
- Tuttle, O.F., Gittins, J. (1966): *Carbonatites*. John Wiley & Sons, New York, N.Y.
- Wallace, M.E., Green, D.H. (1988): An experimental determination of primary carbonatite magma composition. *Nature* 335, 343-346.
- Wang, K.Y., Fan, H.R., Yang, K.F., Hu, F.F., Ma, Y.G. (2010): Bayan Obo carbonatites: texture evidence from polyphase intrusive and extrusive carbonatites. *Acta Geologica Sinica* 84, 1365-1376.
- Widom, E., Hoernle, K.A., Shirey, S.B., Schminke, H.U. (1999): Os isotope systematics in the Canary Islands and Madeira: Lithospheric contamination and mantle plume signatures. *Journal of Petrology* 40 (2), 279-296.
- Woolley, A.R. (1982): A discussion of carbonatite evolution and nomenclature, and the generation of sodic and potassic fenites. *Mineralogical Magazine* 46, 7-13.

- Woolley, A.R, Kempe, D.R.C. (1989): Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions, and element distribution. In Carbonatites: Genesis and Evolution (K. Bell, ed.). Chapman & Hall, London, U.K. (1-14).
- Woolley, A.R., Bergman, S.C., Edgar, A.D., Le Bas, M.J., Mitchell, R.H., Rock, N.M.S., Scott Smith, B.H. (1996): Classification of lamprophyres, lamproites, kimberlites, and the kalsilitic, melilitic, and leucitic rocks. *The Canadian Mineralogist* 34, 175-186.
- Woolley, A.R., Church, A.A. (2005): Extrusive carbonatites: A brief review. *Lithos* 85, 1-14.
- Woolley, A.R., Kjarsgaard, B.A. (2008): Carbonatites of the world: map and database. *Mineralogical Magazine* 71, 718.
- Wyllie, P.J., Tuttle, O.F. (1960): The System CaO-CO₂-H₂O and the origin of carbonatites. *Journal of Petrology* 1, 1-46.
- Yang, X.M., Yang, X.Y., Zheng, Y.F., Le Bas, M.J. (2003): A rare earth element-rich carbonatite dyke at Bayan Obo, Inner Mongolia, North China. *Mineralogy and Petrology* 78, 93-110.
- Yang, X.M., Le Bas, M.J. (2004): Chemical compositions of carbonate minerals from Bayan Obo, Inner Mongolia, China: implications for petrogenesis. *Lithos* 72, 97-116.
- Yang, X.Y., Sun, W.D., Zhang, Y.X., Zheng, Y.F. (2009): Geochemical constraints on the genesis of the Bayan Obo Fe–Nb–REE deposit in Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 1417-1435.

Yang, K.F., Fan, H.R., Santosh, M., Hu, F.F., Wang, K.Y. (2011): Mesoproterozoic carbonatitic magmatism in the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, North China: constraints for the mechanism of super accumulation of rare earth elements. *Ore Geology Reviews* 40, 122-131.

Yuan, Z.X., Bai, G., Wu, C.Y., Zhang, Z.Q., Ye, X.J. (1992): Geological features and genesis of the Bayan Obo REE ore deposit, Inner-Mongolia, China. *Applied Geochemistry* 7, 429-442.

Zaitsev, A.N., Wenzel, T., Venneman, T., Markl, G. (2013): Tinderet volcano, Kenya: an altered natrocarbonatite locality?. *Mineralogical Magazine* 77(3), 213-226.