

# CAPÍTULO 8

## GEOQUÍMICA

C. B. Gomes, P. Comin-Chiaramonti,  
R. G. Azzone e P. A. S. Rosa

### Resumo

Dados geoquímicos para elementos maiores, menores e terras raras são apresentados e discutidos para os dois grupos principais de carbonatitos: magmáticos ou primários e hidrotermais. Diagramas de classificação relacionando CaO-MgO-(FeO<sub>t</sub>+MnO) permitem distinguir calciocarbonatitos e magnesiocarbonatitos como os tipos mais frequentes, enquanto ferrocarbonatitos têm em Cerro Manomó, na Bolívia, a sua ocorrência mais expressiva. Ainda que mostrem grande dispersão de valores, reflexo da variação e concentração de fases acessórias, principalmente fosfatos e fluorocarbonatos ricos em ETR, e de diferentes estágios de intrusão, os carbonatitos se caracterizam por anomalias negativas marcantes em K e Ti, e positivas em La, Ce, Nd, Sm e Eu. P e Zr apresentam grande variação provavelmente relacionada à presença eventual de apatita e flogopita. Adicionalmente, os carbonatitos possuem maior abundância em quase todos os elementos incompatíveis em relação às rochas alcalinas silicáticas associadas. Dados isotópicos para C-O confirmam que eles foram afetados por processos pós-magmáticos em condições mais superficiais de formação envolvendo a presença de fluidos de baixa temperatura. Os carbonatitos exibem razões isotópicas Sr-Nd similares às das alcalinas associadas, com valores variando do quadrante empobrecido ao enriquecido para as ocorrências eo e neocretácicas brasileiras, e situados exclusivamente no enriquecido para as ocorrências eocretácicas paraguaias. O comportamento dos isótopos de Pb, principalmente em ocorrências paraguaias, é indicativo de que dois componentes mantélicos, *enriched mantle I* (EM I) e *high isotopic mantle uranium* (HIMU), tiveram importante participação no processo genético das rochas alcalino-carbonatíticas. Isótopos de Re-Os, Hf e dados para gases nobres são também discutidos.

### 8.1. Introdução

As associações petrográficas características dos carbonatitos investigados possibilitam o seu enquadramento em dois grandes grupos: magmáticos ou primários e hidrotermais (Gomes *et al.*, 2018a). Os primeiros são mais abundantes e correspondem aos principais complexos conhecidos na literatura, enquanto que os segundos incluem apenas três ocorrências (Brasil, Barra do Itapirapuã; Paraguai, Cerro Chiriguelo; Bolívia, Cerro Manomó). Outros tipos de carbonatitos, com relações geométricas pouco usuais e de caracterização mais difícil, estão representados principalmente por pequenos pequenos diques ou, ainda, por *ocelli* de material carbonático no interior de rochas alcalinas silicáticas associadas.

Em função dos tipos petrográficos coexistentes, os carbonatitos magmáticos podem ser reunidos, segundo Speziale *et al.* (2020), em três associações distintas:

A) carbonatitos associados com rochas da série melteigito-ijolito-urtito *sem* a ocorrência de nefelinitos extrusivos;

B) carbonatitos com somente dunitos (olivinitos) e clinopiroxenitos como rochas ultramáficas ( $\pm$ sienitos) ou com glimmeritos;

C) carbonatitos associados com melilitolitos e melilititos.

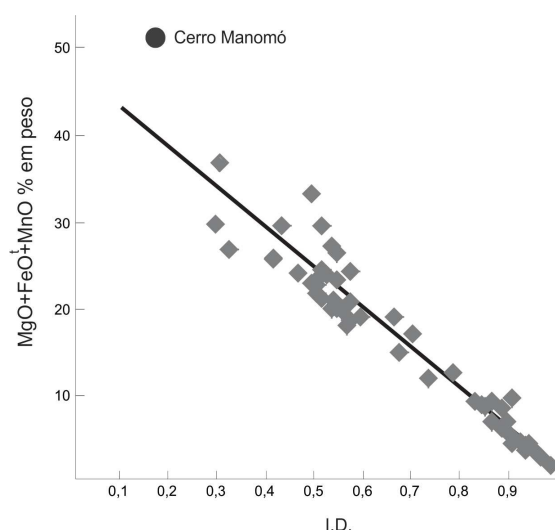
A primeira associação é a mais frequente, incluindo, no Brasil, o complexo de Anitápolis em Santa Catarina, as ocorrências do Vale do Ribeira (Ipanema, Itapirapuã, Jacupiranga, Juquiá, Mato Preto) e as de Goiás (Caiapó, Morro do Engenho); no Paraguai, as ocorrências da área de Amambay (Cerro Sarambí) e da porção central desse país (Sapucai). A segunda associação acha-se restrita aos distritos da Província do Alto Paranaíba (Araxá, Catalão I e II, Salitre I, II e III, Serra Negra), enquanto a terceira está representada exclusivamente pelas intrusões de Lages e Tapira.

## 8.2. Elementos Maiores

Dados químicos para elementos maiores, menores e terras raras de carbonatitos cretácicos da região meridional da Plataforma Brasileira para as três associações citadas estão listados nas tabelas 8.1 a 8.3. Para os carbonatitos hidrotermais e ocorrências carbonatíticas menores, eles constam, respectivamente, das tabelas 8.4 e 8.5. As análises são tidas como representativas, uma vez que cobrem a variação total para a região além de as amostras terem sido objeto de completa caracterização mineralógica e petrográfica. As idades médias fornecidas foram calculadas a partir de diversas fontes.

Como visível na figura 8.1, as razões molares [i.e.,  $\text{CaO}/(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{FeO}_t+\text{MnO})$ , I.D.] dessas rochas se correlacionam negativamente com os parâmetros ( $\text{MgO}+\text{FeO}_t+\text{MnO}$ , % em peso) devido a substituições Ca-Mg-Fe-Mn típicas dos principais minerais carbonáticos nos vários estágios de evolução dos carbonatitos (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2007c). As associações mineralógicas presentes nos quatro estágios evolutivos são mostradas na tabela 7.20.

Excluídas as rochas silicocarbonatíticas (com teor em  $\text{SiO}_2$  superior a 10% em peso), os carbonatitos variam de calciocarbonatitos (39-45% de CaO, 0,4-8,1% de MgO, 0,1-10,1% de FeO) a magnesiocarbonatitos (0,9-29% de CaO, 12,6-46,8% de MgO, 1,1-10,9% de FeO) a



**Figura 8.1.** Gráfico reunindo as razões molares de  $\text{CaO}/(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{FeO}_t+\text{MnO})$  (I.D.) vs.  $\text{MgO}+\text{FeO}+\text{MnO}$  % em peso para amostras de carbonatitos da região meridional da Plataforma Brasileira com o índice de diferenciação (I.D.). No todo, os dados são consistentes com evolução em múltiplas fases associada a mudanças nas assembleias mineralógicas com o I.D. decrescendo do estágio I ao IV na tabela de Sokolov (2002), e correspondente linha de regressão. A posição ocupada pelo complexo carbonatítico boliviano de Cerro Manomó é também mostrada.

**Tabela 8.1.** Análises químicas para elementos maiores, traços e terras raras de amostras selecionadas de carbonatitos magmáticos eo e neocretácicos com rochas da série melteigito-ijolito-urtito sem a presença de nefelinitos extrusivos, correspondendo à associação do *tipo A*.

Amostra	Anitápolis						Ipanema	Itapirapuã	Jacupiranga				
	132 Ma						124,9 (9,5) Ma	102,2 (0,23) Ma	132,1 (0,6) Ma				
	SAN 1,0	14-49	12-78,0	11-101	16A-50,5	49-82	119,2	IT28	HB005	HB010	HB011	JAC04	JAC08
% em peso													
SiO <sub>2</sub>	0,31	0,2	2,45	1,2	0,47	3	3,97	4,49	2,3	4,3	6,08	2,38	0,65
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,01	0,06	0,05	0,07	0,08	0,13	0-01	0,66	1,32	0,14	0,21	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,21	0,02	0,01	0,09	0,1	0,52	0,19	0,98	1,16	0,86	0,12	0,18	0,09
FeO	0,08	2,59	2,03	2,95	4,49	5,96	7,61	13,88	30,28	29,7	2,08	6,06	6,09
MnO	0,07	0,08	0,23	0,22	0,23	1,8	0,25	1,57	0,24	0,31	0,14	0,11	0,12
MgO	1,55	2,3	4,13	1,83	1,7	12,8	1,08	10,55	4,34	7,31	4,24	3,47	3,68
CaO	53,59	51,25	49,36	52,15	51,8	31,43	47,6	29,36	30,78	28,56	45,13	47,7	47,88
Na <sub>2</sub> O	0,05	0,16	0,34	0,01	0,07	1,51	0,37	0,07	0,18	0,2	0,08	0,06	0,04
K <sub>2</sub> O	0,49	0,78	0,07	0,02	0,06	1,01	0,3	0,72	0,26	0,36	0,06	0,09	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,48	1,31	2,37	2,89	1,8	2,12	1,73	1,16	9,04	9,78	3,07	9,13	5,16
P.F.	42,06	40,13	38,72	38,25	38,37	38,64	35,68	37,19	19,96	16,4	38,36	31,1	34,8
Soma	98,9	98,83	99,77	99,66	100,06	99,03	98,91	99,98	99,2	99,17	99,5	99,52	98,52
ppm													
Rb	3,2	6,1	6,5	6,9	5,5	3,22	8	26,2	9	10	6	2,5	0,1
Ba	1052	951	1579	1121	894	1106	500	1192	734	491	525	696	690
Th	5,6	3,5	0,31	0,09	0,27	5,5	0,8	180	4	34	34,4	3,5	1,2
Nb	5,2	8,9	7,8	10,4	8,3	6,32	4	384	78	97	68	15,3	12
Ta	1,4	0,5	1,5	1,8	1,4	1,02	0,3	21,1	25	27	16,8	3,8	3
K	4068	6475	581	166	498	83	2491	5977	2158	2989	498	747	166
Sr	2462	2983	6849	4462	2779	2462	5950	2504	2749	2772	5130	4223	5171
P	20950	5717	10343	12612	7855	524	2550	698	39450	42680	13392	39843	22518
Hf	0,4	0,4	1,8	0,8	0,38	0,67	1,4	0,6	23	29	6,28	11,6	4,2
Zr	15,8	7,7	46,2	15,5	16,4	18,74	54	13,1	1678	1710	287	267	332
Ti	60	60	360	300	420	480	779	60	3957	7913	839	1259	120
Y	43,7	18,8	45,9	42,9	41,5	29,81	20	45	34	33	35	32	38
ETR													
La	67,1	41,2	123,4	48,6	158	979	76,1	682	98	113	105	150	124
Ce	142,3	90,3	287	106,5	372	2657	170	927	213	248	224	302	251
Pr	16,8	12,2	29,2	14,5	37,8	291	23,9	118	33	38	29	37	28,4
Nd	69,6	47,5	115,7	53,5	170,4	1154	196	496	118	134	104	143	111
Sm	13,8	9,4	21,33	9,44	29,22	326	22	66,3	20	22	20	24	20
Eu	4	2,53	6,51	3,91	8,55	129,4	6,24	17,1	5,9	6,5	6,14	6,9	5,85
Gd	12,6	7,91	19,83	8,9	20,61	475	15,9	49,9	11,1	12,3	12,5	18,8	16,7
Tb	1,87	1,35	2,17	1,59	3,48	61,3	1,6	6,29	1,75	1,94	1,97	2,16	2,02
Dy	9,62	7,67	11,63	9,04	12,17	728	5,9	20,7	7,38	8,18	8,31	9,3	9,4
Ho	1,74	1,39	2,44	1,64	2,11	131,2	0,8	2,29	0,9	1	1,21	1,23	1,35
Er	4,81	3,17	5,9	3,74	4,43	155,7	1,9	7,82	1,87	2,12	2,36	2,48	3
Tm	0,63	0,56	0,81	0,67	0,71	23,76	0,25	1,09	0,22	0,23	0,42	0,28	0,37
Yb	3,74	3,09	4,83	3,48	3,07	25	1,5	5,54	1,29	1,25	2,5	1,3	1,96
Lu	0,59	0,44	0,65	0,51	0,36	3,21	0,19	0,93	0,18	0,19	0,28	0,17	0,27
Mol %													
CaO	96	90,6	95,9	91	89,5	56,8	86,2	52,4	50,8	46	85,2	83,2	82,8
FeO+MnO	0,2	3,7	3,5	4,3	6,4	11	11,1	21,5	39,3	37,7	3,3	8,4	8,4
MgO	3,8	5,7	0,6	4,7	4,1	32,2	2,7	26,1	9,9	16,3	11,5	8,4	8,8

Tabela 8.1 (continua).

Amostra	Cont. - Jacupiranga			Juquiá					Mato Preto					
	132,1 (0,6) Ma			133 (2) Ma					71,7 (4,7) Ma					
	JAC09	JAC11	J15052C	S16C	S25	S26A	S26B	SJT	I-119,3	I-84,0	II-77,0	III-70,0	III-62,2	III-622
% em peso														
SiO <sub>2</sub>	0,45	2,3	0,29	0,24	0,3	0,27	0,36	0,29	0,3	0,23	0,52	1,91	2,28	3,22
TiO <sub>2</sub>	0,03	0,66	0,1	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,11	0,02	0,11	0,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,23	1,16	0,01	0,07	0,1	0,09	0,11	0,1	0,23	0,14	0,21	0,21	0,59	0,81
FeO	6,04	30,28	0,39	1,54	1,72	1,58	1,69	1,63	1,81	0,92	2,23	1,73	10,01	4,56
MnO	0,17	0,24	0,12	0,38	0,52	0,43	0,47	0,45	0,19	0,19	0,22	0,21	0,73	0,39
MgO	16,98	4,34	6,05	12,59	17,11	17,52	17,55	16,49	0,99	0,33	1,32	0,51	6,12	1,49
CaO	31,55	30,78	48,53	37,83	30,9	31,05	30,39	32,54	54,35	54,83	53,13	55,01	39,21	49,74
Na <sub>2</sub> O	0,09	0,18	0,04	0,89	0,45	0,45	0,46	0,56	0,03	0,01	0,02	0,01	0,1	0,06
K <sub>2</sub> O	0,01	0,26	0,11	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,1	0,07	0,09	0,31	0,58	1,09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,27	9,04	11,3	13,25	5,47	5,57	5,28	6,14	0,52	0,17	0,51	0,16	0,28	1,67
P.F.	42,3	19,96	33,01	33,14	43,88	42,97	43,61	40,9	41,27	43,15	41,38	40,16	38,89	36,4
Soma	99,12	99,2	99,95	99,97	99,98	99,98	99,96	99,16	99,83	100,05	99,74	100,24	98,9	99,49
ppm														
Rb	2	1,7	1	4	5	6	3	4,5	2,9	4,3	6,8	10,2	1,6	189
Ba	295	626	575	1700	3780	12500	4490	5618	175	3798	1134	449	8378	2226
Th	0,6	10,5	1,5	2,73	5	4,51	4,68	4,23	44,8	19,9	82	147	811	117,8
Nb	7,1	72	0,51	16	8	20	16	16	251	384	23	95	315	25,1
Ta	1,9	18,1	0,6	0,74	2,13	0,74	1,7	1,33	9,4	18,7	0,8	6,3	11,8	1,4
K	83	2158	913	166	166	166	166	332	830	581	747	2574	4815	9049
Sr	2861	4887	5592	8450	5540	5720	5190	5985	8735	2134	8758	1053	3693	4652
P	5542	39450	49313	57783	23871	24291	23042	26795	2269	742	2226	698	1222	7288
Hf	0,1	12	1,7	1,25	2,62	1,55	3,24	2,18	2,9	7,7	0,2	3,7	2,4	4,9
Zr	3,3	886	133	16	7	20	16	15	45,9	123	23	183	123	178
Ti	181	3956	600	120	60	180	120	120	60	60	659	120	659	179
Y	15,4	35	46,3	339	402	119	202	266	74,3	121	192	225	96	673
ETR														
La	38	126	141,8	99,3	99,1	68,6	85,2	88,1	198	165	241	3686	852	1112
Ce	85	271	331	262	257	177	221	232	377	461	717	6510	1577	1808
Pr	10,7	323	40,9	34,5	30,7	24,2	31,4	30,5	44,3	69,5	101	581	155	233
Nd	47	127	175	164	149	97,9	120	148	156	341	461	884	350	948
Sm	8,5	22	29,6	31,5	29,5	18,9	23,2	26,8	25,8	73,4	91	174	52	79
Eu	2,63	6,7	8,5	17,6	21,3	7,54	11,5	12,4	8,2	22,6	22,2	56,8	17	25
Gd	7,8	18,3	23,6	66,7	72,6	21,5	32,1	49,9	24,1	76,2	71	161	48	88
Tb	0,92	2,14	2,76	12,3	12,2	4,1	7,6	9,2	3,74	12	8,3	23,1	6,9	14,4
Dy	4,17	9,4	12,1	59,7	70,3	21,6	36,8	53	17,3	67,3	39,9	86	30,2	90
Ho	0,59	1,3	1,72	11,3	12,9	4,1	6	9,7	2,81	12,3	6,7	9,7	5,1	18,2
Er	1,35	2,6	3,5	27,6	32,2	10,5	17	25,8	7,3	24	16	26,5	10,4	47
Tm	0,14	0,3	0,42	3,8	4,3	1	1,7	3,7	1,07	2,83	2,6	3,8	1,7	6,9
Yb	0,77	1,7	2,27	17,3	21,7	5,93	9,69	16,8	4,78	10,2	8,5	22,6	11,3	34,1
Lu	0,09	0,22	0,29	1,65	2,07	0,52	0,64	1,6	0,42	1,53	2,2	3,34	1,8	5,7
Mol %														
CaO	52,6	50,8	84,6	66,6	54,7	54,5	53,8	57	94,9	97,6	93,4	96,1	69,9	89,3
FeO+MnO	8,1	39,3	0,7	2,6	3,1	2,8	3	2,8	2,7	1,6	3,4	2,6	15	7
MgO	39,3	9,9	11,7	30,8	42,2	42,7	43,2	40,2	2,4	0,8	3,2	1,3	15,1	3,7

**Fonte:** Speziale *et al.* (2020, modificada).

**Brasil:** Anitápolis (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2002; Scheibe *et al.*, 2005); Ipanema (Guarino *et al.*, 2012); Itapirapuã (Ruberti *et al.*, 2005); Jacupiranga (Morbidelli *et al.*, 1986; Huang *et al.*, 1995; Toyoda *et al.*, 1995; Castorina *et al.*, 1996; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2005c; Gomide *et al.*, 2016; Chmyz *et al.*, 2017); Juquiá (Beccaluva *et al.*, 1992); Mato Preto (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2001); Caiapó e Morro do Engenho (Rodrigues e Lima, 1984); Santo Antônio da Barra (Junqueira-Brod *et al.*, 2002).

**Paraguai:** Cerro Sarambí (Gomes *et al.*, 2011b; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2014a); Sapucaí (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1992a).

Tabela 8.1 (continua).

Amostra	Caiapó	Morro do Engenho	Santo Antônio da Barra	Paraguai			
	86 (6) Ma	86 (6) Ma	86 (6) Ma	Cerro Sarambí			Sapucaí
	CR-09	ME-C	SAB-12 RT Glimmerito- -carbonatito	GL-AS Fração carboná- tica (dolomita)	GL-AS Fração carboná- tica (dolomita)	SA-958 Traquifonolito Fração carbonática (calcita 7%)	PS72 Fonotefrito Fração carbonática (24,3%)
% em peso							
SiO <sub>2</sub>	2,26	0,62	0,88	28,82			
TiO <sub>2</sub>	0,27	0,15	0,07	3,22	0,06	0,05	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,05	0,05	7,37			
FeO	4,71	3,14	3,53	8,71	1,49	4,25	2,51
MnO	0,26	0,23	0,28	0,11			0,26
MgO	3,78	4,71	14,85	19,27	20,83	3,95	20,17
CaO	45,94	46,3	32,85	9,23	30,21	48,12	30,04
Na <sub>2</sub> O	0,28	0,19	0,05	0,29			0,25
K <sub>2</sub> O	0,1	0,12	0,04	3,35	0,08	0,07	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7,7	1,01	2,29	0,31	0,39	0,33	
P.F.	33,02	41,04	42,39	16,21	47,19	43,37	46,77
Soma	98,42	97,56	97,28	97,99	100	100	100
ppm							
Rb	2	4	2,3	138,1	6,7	16,9	0,21
Ba	4454	4872	16469	2082	101	36	262
Th	301	103	104	12,5	26-	37	0,32
Nb	53,1	113	50,1	94	93	112	0,9
Ta	12,9	4,4	4,5	7,7	6,8	9,2	0,76
K	830	996	332	27812	664	581	
Sr	11669	10542	10851	1387	2860	4066	268
P	33603	4408	5014	1353	1702	1444	
Hf	8,9	2,23	2,23	7,1	6,6	5,4	
Zr	324	125	171	289	370	292	
Ti	1619	899	420	19304	360	300	
Y	377	107	129	23	8,6	23	23,75
ETR							
La	455	1011	909	167	513	343	239
Ce	1093	1647	1725	319	980	654	420
Pr	147	162	103	35,6	45,3	41	46,8
Nd	637	513	682	123	139	138	159,9
Sm	119	92,8	133	14,7	20,1	18,3	19,1
Eu	59,5	25	33,7	3,9	6,1	5,25	3,9
Gd	140	64,7	82,9	10,1	19,3	10,4	14,9
Tb	19,8	6,54	7,96	1,03	2,14	1,65	2,12
Dy	89,4	26,5	32,4	7,6	12,9	8,7	10,57
Ho	14,9	4,89	4,99	1,1	2,51	1,9	2,05
Er	22,7	6,04	7,22	2,9	6,27	4,8	5,4
Tm	2,88	0,45	0,54	0,4	0,68	0,53	3,16
Yb	10	2,07	2,55	1,7	3,28	2,53	24,7
Lu	1,11	0,92	0,35	0,23	0,43	0,34	0,32
Mol %							
CaO	83,4	83,5	59	21,5	50,1	84,5	49,9
FeO+MnO	7,1	4,7	5,4	16	1,9	5,8	3,6
MgO	9,5	11,8	35,6	62,5	48	9,7	46,5

**Tabela 8.2.** Análises químicas para elementos maiores, traços e terras raras de amostras selecionadas de carbonatitos magmáticos neocretácicos com dunitos e clinopiroxenitos, por vezes glimmeritos, além de sienitos em maior ou menor concentração, correspondendo à associação do *tipo B*.

Amostra	Araxá			Catalão I				
	82,4 (10,1) Ma			80 (5) Ma				
	AE 891 Rica em flogopita	AR 892 Rica em flogopita	AR 893	C1-L1250	C1CB02	C1C4	C1C12B	C1C14
% em peso								
SiO <sub>2</sub>	9,74	9,93	2,15	1,75	0,25	0,64	4,67	0,22
TiO <sub>2</sub>	2,86	2,9	1,92	0,08	0,01	0,02	0,25	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,76	2,81	2,79	0,08	0,11	0,05	0,13	0,02
FeO	11,13	9,75	10,34	8,89	5,4	1,8	10,89	1,23
MnO	0,19	0,16	0,18	0,28	0,22	0,37	0,85	0,61
MgO	18,1	16,54	18,31	14,6	17,36	19,26	31,3	46,81
CaO	13,7	14,61	16,16	23,23	33,59	25,41	10,35	0,92
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,11	0,14	0,05	0,06	0,07	0,01	0,01
K <sub>2</sub> O	5,21	4,45	2,29	0,31	0,14	0,01	0,01	0,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22	0,19	0,18	4,34	0,1	1,04	2,59	0,09
P.F.	35,07	38,85	44,64	31,2	41,2	41,95	34,35	50,89
Soma	99,19	100,3	99,18	99,24	99,06	90,6	95,39	100,07
ppm								
Rb	149	138	1,1	19,5	1,7	3	6	2
Ba	1299	1203	1648	7622	1573	52300	3936	233
Th	18,21	16-97	23,1	18,3	12,1	26	44,8	3,2
Nb	2750	2514	32,1	306	203	231	434	9
Ta	16,5	14,9	1,22	73,5	48,7,	0,1	6,9	0,1
K	43253	36944	19812	2784	1162	83	83	249
Sr	1150	1230	5937	18975	10723	>10000	6176	2120
P	960	829	786	18940	436	4539	11303	393
Hf	4,14	2,44	0,19	4,5	1	0,2	10,3	0,2
Zr	170	100	7,8	171	30,4	21	393	6
Ti	17146	17386	11510	480	60	120	1499	60
Y	54	44	90	24,1	10,7	31	271	19
ETR								
La	506	351	413	398	154	729	2000	326
Ce	1083	657	751	860	375	1660	3000	727
Pr	131	79	91	95,7	46	189	1000	85,4
Nd	320	225	324	362,7	181,6	569	2000	273
Sm	50,6	35,1	50,1	64,9	25,75	86,3	537	46,8
Eu	12,5	7,74	15,5	11,48	6,31	23,1	121	11,5
Gd	35,16	24,39	34,81	34,05	11,36	53,8	277	26,2
Tb	4,6	2,81	4,53	2,6	1,08	4,6	24,3	2,3
Dy	22	13,44	21,67	8,26	3,34	14,4	76,7	7
Ho	3,39	2,07	3,34	0,92	0,31	1,6	9,8	0,8
Er	6,68	4,4	8,55	1,26	0,58	2,6	22,7	1,5
Tm	0,79	0,52	1,01	0,15	0,08	<0,05	<0,05	<0,06
Yb	3,72	2,46	4,78	0,89	0,45	0,7	5,2	0,5
Lu	0,47	0,26	0,74	0,1	0,06	0,04	0,05	0,04
Mol %								
CaO	28,7	32,2	32,4	45,7	54,1	47,1	16,4	1,4
FeO+MnO	18,5	17,1	16,5	14,3	7,1	3,2	14,7	2,1
MgO	52,8	50,7	51,1	40	38,8	49,7	68,9	96,5

Tabela 8.2 (continua).

Amostra	Catalão II					Salitre I						
	82 (3) Ma					84 Ma						
	C2-AA 165907	C2A2	C2B19	C2B18	C2B17	C1	C4	ASL013	ASL031	ASL034	ASL036	09A-60A
% em peso												
SiO <sub>2</sub>	8,95	4,02	3,46	14,89	0,21	0,06	1,34	0,22	0,33	0,42	0,24	0,26
TiO <sub>2</sub>	0,44	0,05	0,88	0,12	0,01	0,01	0,38	0,17	0,06	0,01	0,01	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,06	0,03	0,28	0,01	0,01	0,09	0,17	0,32	0,19	0,23	0,01
FeO	9,45	2,29	4,65	7,58	0,21	1,46	2,35	2,88	3,09	0,66	1,67	0,18
MnO	0,25	0,1	0,11	0,09	0,07	0,12	0,56	0,39	0,19	0,15	0,22	0,08
MgO	2,56	2,82	2,51	8,12	0,56	0,79	14,65	18,48	14,88	5,17	19,35	1,57
CaO	39,9	46,49	46,02	32,99	53,56	53,84	28,75	25,13	35,4	46,11	29,72	53,94
Na <sub>2</sub> O	0,82	0,1	0,06	0,14	0,11	0,17	0,17	0,1	0,19	0,46	0,5	0,13
K <sub>2</sub> O	0,63	1,1	0,84	3,42	0,14	0,11	0,22	0,03	0,05	0,01	0,16	0,11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,49	1,08	2,71	14,79	0,25	0,01	6,69	0,43	10,16	0,01	0,66	0,99
P.F.	31,7	38,52	35,11	13,91	42,78	40,7	32,2	46,14	34,77	44,7	46,04	41,2
Soma	96,41	96,65	96,39	96,36	97,89	97,25	99,04	94,14	99,47	97,89	98,77	98,49
ppm												
Rb	24,6	51	56	233	4	1,6	4,4	15,3	3,3	6,5	10,7	5,7
Ba	4174	5305	3036	1430	4531	3178	5007	28394	32	32,6	266	326,5
Th	158	7,5	4,6	29,5	1,4	10,5	57,8	164	1,5	80,2	20,5	155
Nb	310	109	127	238	14	14,2	88,9	77,3	629	695	161	524
Ta	31,6	0,7	3,4	7,5	0,2	0,1	0,5	1,13	n.a.	n.a.	2,9	23,9
K	5230	9132	6974	28393	1162	913	1826	249	415	83	1328	913
Sr	13981	>10000	>10000	8377	>10000	17560	26480	10147	6683	6661	7100	3180
P	6502	4713	11826	108913	1091	44	29195	1877	44338	83	2880	4320
Hf	4	0,5	1,01	0,6	0,2	0,11	3	0,24	n.a.	n.a.	0,37	25,1
Zr	313	17	28	15	6	3,5	97,3	4,2	44,1	14,9	6,7	1071
Ti	2638	300	5276	719	60	60	2278	1019	360	60	60	60
Y	93,5	34	27	56	28	53,9	95	66,5	54	20,5	15,6	79,1
ETR												
La	643	388	398	485	398	373	6354	1846	264	107	85,1	431
Ce	1200	750	784	1060	742	701	8541	3486	684	283	181	1203
Pr	121	81,1	85,7	123	76,2	68,8	700	400	n.a.	n.a.	7,8	149
Nd	422,5	269	224	329	189	242	2204	1452	319	128	79	566
Sm	50,76	32,9	32,5	48	27,3	38,8	201	202	44	17,7	11	72,3
Eu	12,1	8,74	8,22	11,7	7,13	7,28	44,8	55,4	n.a.	n.a.	2,7	19,2
Gd	35,88	21,8	21,3	32,8	18,7	21,16	82	125	n.a.	n.a.	6,4	41,6
Tb	4,66	2,3	2	3,2	1,8	2,27	8,74	10,34	n.a.	n.a.	0,7	5,66
Dy	21,87	8,9	7,3	13,5	7,2	10,04	30,4	26,04	n.a.	n.a.	2,7	18,14
Ho	3,35	1,4	1	2,2	1	1,66	2,98	2,73	n.a.	n.a.	0,32	2,51
Er	7,49	3,4	2,4	5,5	2,5	4,02	6,66	4,91	n.a.	n.a.	0,61	4,82
Tm	0,93	0,41	0,26	0,68	0,29	0,6	0,76	0,7	n.a.	n.a.	0,09	0,61
Yb	5,29	2	1,2	3,5	1,4	3,48	4,27	4,84	n.a.	n.a.	0,42	3,27
Lu	0,72	0,25	0,12	0,43	0,16	0,53	0,45	0,68	n.a.	n.a.	0,09	0,41
Mol %												
CaO	78,2	88,9	86,8	65,6	98,2	95,8	55,9	47,1	60,3	85,5	51,2	95,8
FeO+MnO	14,8	2,6,	7	11,9	0,4	2,2	4,4	4,8	4,4	1,2	2,5	0,4
MgO	7	7,5	6,5	22,5	1,4	2	39,7	48,1	35,3	13,3	46,3	3,8

Tabela 8.2 (continua).

Amostra	Serra Negra						
	83,4 Ma						
	LG-03-70	LG-14-28	LG-06-32	LG-13-125	LG20-91,5	LG32-63,80	LG38-46-142
% em peso							
SiO <sub>2</sub>	0,54	0,88	0,65	0,74	0,2	0,92	0,14
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,2	0,04	0,05	0,01	0,11	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,09	0,04	0,03	0,02	0,34	0,01
FeO	1,98	5,29	1,8	4,19	1,11	2,96	1,69
MnO	0,13	0,14	0,11	0,14	0,25	0,6	0,4
MgO	3,6	3,15	2,97	4,51	19,44	18,98	19,5
CaO	48,82	45,94	48,61	45,87	29,36	27,71	29,23
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,06	0,1	0,07	0,06	0,09	0,13
K <sub>2</sub> O	0,09	0,12	0,16	0,15	0,03	0,05	0,05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,48	3,32	3,62	2,59	0,35	0,26	0,09
P.F.	43,11	39,52	40,21	39,69	46,7	45,9	47,82
Soma	98,81	98,7	98,31	98,03	97,53	97,93	99,07
ppm							
Rb	2,1	5	5,3	7,5	1,3	2,7	0,8
Ba	2768	2314	2391	3515	930	1502	2187
Th	2,3	38,8	44,4	7,3	31	41,2	11,6
Nb	97,3	373	292	129	280	299,4	5,3
Ta	22	28	23,3	8,6	16,7	3,3	0,05
K	747	996	1329	1245	249	415	415
Sr	13268	18833	16122	11354	12051	5517	10003
P	2095	14488	15798	11303	1527	1134	393
Hf	6,4	1,6	1,2	2,1	0,4	0,1	0,05
Zr	326,2	73,2	46,2	89,2	13	9,2	1,8
Ti	120	1199	240	300	60	659	60
Y	35,3	54,8	73,9	40,9	4,9	72,4	9,1
ETR							
La	290	414	498	374	82,4	818	135
Ce	517	783	959	699	152,9	1511	201
Pr	60,04	93,82	122,66	85,61	17,41	215	21,14
Nd	202,6	321,6	427,9	291,2	59,3	805	66,9
Sm	24,39	41,25	54,93	36,54	6,23	103,32	7,8
Eu	6,52	10,89	15,25	9,58	1,56	27,3	2,36
Gd	16,31	28,04	38,42	24,09	3,67	68,44	6,93
Tb	1,8	3,03	4,24	2,53	0,37	7,02	0,93
Dy	8,28	12,79	17,99	10,54	1,44	25,3	3,56
Ho	1,26	1,93	2,6	1,45	0,18	2,77	0,38
Er	2,74	4,21	5,76	3	0,35	4,1	0,53
Tm	0,35	9,56	0,76	0,41	0,04	0,45	0,07
Yb	2,03	3,27	4,12	2,23	0,27	2,19	0,32
Lu	0,27	0,41	0,5	0,27	0,03	0,2	0,04
Mol %							
CaO	88	84,2	89,6	82,6	51,1	48,7	50,4
FeO+MnO	3	7,8	2,8	6,1	1,8	4,9	2,8
MgO	9	8	7,6	11,3	47,1	46,4	46,8

**Fonte:** Speziale et al. (2020, modificada)

**Observação:** n.a., não analisado.

**Tabela 8.3.** Análises químicas para elementos maiores, traços e terras raras de amostras selecionadas de carbonatitos magmáticos neocretácicos com rochas intrusivas portadoras de melilita, correspondendo à associação do *tipo C*.

Amostra	Tapira			Lages	
	86,4 Ma			76 Ma	
	T 1	T 2	TPTAPS	SB05A	SB02
% em peso					
SiO <sub>2</sub>	0,7	0,02	1,16	2,53	1,46
TiO <sub>2</sub>	0,33	0,05	0,1	0,05	0,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,07	0,06	0,87	0,83
FeO	10,13	0,12	3,96	10,28	17,74
MnO	0,17	0,06	0,11	1,06	2,39
MgO	6,35	3,85	2,44	14,16	12,72
CaO	38,48	51	50,78	34,27	29,41
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,02	0,09	0,02	0,02
K <sub>2</sub> O	0,12	0,13	0,11	0,26	0,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	0,1	4,25	0,03	0,04
P.F.	45,14	44,56	37	35,33	33,16
Soma	101,71	99,99	100,06	98,86	98,01
ppm					
Rb	7,4	0,1	2,3	6,1	3,5
Ba	2360	11600	1971	951	13528
Th	5,73	0,68	437	3,5	5
Nb	6,14	2,02	997	8,9	8,4
Ta	1,4	0,53	105	1,5	2
K	996	1079	913	2159	1660
Sr	12200	9570	13364	2983	8057
P	248	486	21097	131	175
Hf	2,7	0,5	3,6	0,3	0,1
Zr	110	18,4	112	7,7	14,3
Ti	1978	399	600	300	240
Y	17	11	74	18,8	45,5
ETR					
La	90,2	62,2	472	41,2	2569
Ce	112	90	1104	90,3	5236
Pr	12,33	8,32	122	12,24	551
Nd	47	31,7	477	47,54	2184
Sm	7,11	4,68	62,5	9,43	376
Eu	1,56	1,25	15,9	2,53	80,1
Gd	2,74	1,71	45,5	7,91	225
Tb	0,55	0,33	4,28	1,35	16,92
Dy	2,72	1,63	18	7,67	56,91
Ho	0,54	0,33	2,62	1,39	18,92
Er	1,85	1,08	5,41	3,17	22,45
Tm	0,17	0,06	0,67	0,56	8,29
Yb	1,37	0,53	3,73	3,09	8,72
Lu	0,13	0,06	0,49	0,44	0,86
Mol %					
CaO	69,5	90,2	88,5	54,5	50,4
FeO+MnO	14,5	0,3	5,5	14,1	19,3
MgO	16	9,5	6	31,4	30,3

**Fonte:** Speziale *et al.* (2020, modificada). Tapira (Brod, 1999; Gomide *et al.*, 2016), Lages (Traversa *et al.*, 1994, 1996; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2002).

**Tabela 8.4.** Análises químicas para elementos maiores, traços e terras raras de amostras selecionadas de carbonatitos eocretácicos hidrotermais.

Amostra	Barra do Itapirapuã						Cerro Chiriguelo						Cerro Manomó
	129 (19) Ma						128 (5) Ma						139 (3) Ma
	I,A; I,B; II,A	IV,A 3	IV,B 5	IV,B 3	II,A 2	IV,A 5	3411	3414	3422	3434	3440	3443	PV-69C
% em peso													
SiO <sub>2</sub>	0,54 (0,37)	1,46	12,76	5,21	2,27	6,67	2,26	5,44	5,05	7,18	10,55	6,25	3,02
TiO <sub>2</sub>	0,01 (0,00)	0,51	0,49	0,15	0,01	0,01	0,05	0,05	0,01	0,1	3,41	0,3	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02 (0,01)	0,22	1,2	1,69	0,23	1,83	0,22	0,25	0,3	0,56	1,44	0,53	0,11
FeO	7,76 (1,32)	7,64	5,8	1,36	14,48	12,28	3,25	2,84	3,19	2,99	15,2	0,4	40,49
MnO	1,08 (0,16)	0,94	0,3	0,08	1,91	1,19	0,6	0,45	0,28	0,15	0,64	0,4	7,13
MgO	15,23 (1,15)	15,06	14,82	2,64	10,55	10,51	0,1	0,15	0,41	0,5	2,8	1	1,34
CaO	30,54 (1,18)	28,99	27,64	51,56	31,49	27,23	48,45	47,15	47	46,98	30,89	44,62	7,68
Na <sub>2</sub> O	0,08 (0,01)	0-09	0,03	0,42	0,08	0,06	0,08	0,08	0,03	0,04	0,03	0,1	0,08
K <sub>2</sub> O	0,02 (0,01)	0,01	0,01	1,03	0,03	1,48	0,07	0,15	0,28	0,5	1,61	0,42	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,27 (0,14)	0,59	2,11	0,15	0,22	0,1	0,8	0,95	0,69	0,48	0,54	1,2	0,1
P.F.	42,30 (2,20)	43,33	34,19	35,56	37,11	37,26	40,99	40,07	38,29	38,05	31,94	39,08	35,28
Soma	98,85	98,84	99,35	99,85	98,38	98,62	96,87	97,59	95,53	97,53	99,05	97,15	95,27
ppm													
Rb	1,9 (0,6)	3	2,96	83,5	5,1	47,2	24	32	39	36	151	59	0,1
Ba	1252 (29)	1730	1828	145,7	1927	456	25885	23989	22123	10390	5464	19532	1560
Th	122,5 (25,0)	64,5	185	7,9	246	114	40	29,7	11	28	8	12	481
Nb	165 (48)		38,1	4,3	48	721	109	81	178	100	260	495	25
Ta	1,5 (0,4)		1,9	0,7	0,8	41,5			13,5	7,6	20	37,6	0,29
Sr	1743 (382)	1150	3016	782	2955	2052	581	1245	2325	4151	13366	3487	166
Hf	0,51 (0,02)	0,5	3,1	0,9	1	0,3	2875	2031	5243	7441	1776	7103	2342
Zr	145 (32)	88,4	27,5	10,4	19,2	7	3971	4716	3425	2383	2681	5957	496
Y	20,1 (1,4)	43,5	291,8	45,6	76	4,3			5,1	10	11,6		0,19
ETR													
La	150 (45)	734	633	35,44	1070	294	1336	1257	1169	590	312	889	2570
Ce	347 (65)	923	935	47,71	1397	457	1305	1240	1102	633	227	1022	5328
Pr	46 (14)	78,4	110	6,57	184	51	120	128	101	63,1	22,6	79	787
Nd	123 (12)	208	383	29,74	826	167	151	181	178	120	110	151	2142
Sm	25,4 (14,0)	24,2	58,74	6,36	117	16,67	94	31,5	30	20,1	12	29,2	369
Eu	8,25 (2,92)	6,79	22,46	1,81	30,2	4,02	32	10,8	10,2	6,9	4,1	9,8	79
Gd	27,00 (10,2)	18	77,37	7,88	91,3	8,47	101	34,1	32,4	21,8	13	29,9	221
Tb	4,15 (2,05)	2,1	14,1	1,39	11,7	0,87	16,3	5,5	5,2	3,6	2,1-	4,8	13
Dy	25,2 (11,7)	10,9	84,03	6,8	37,4	4,06	96	32,8	31	21,2		28,9	60
Ho	3,46 (2,68)	1,92	17,23	1,4	3,72	0,86	18,3	6,09	5,87	4,06		5,66	10
Er	4,22 (2,23)	4,71	44,2	4,04	12,5	3,15	44	14,7	14,2	9,9		14,5	24
Tm	0,78 (0,25)	0,64	6,5	0,67	1,75	0,42	5,3	1,77	1,71	1,23	0,84	1,8	3
Yb	6,74 (4,16)	3,04	38,85	4,46	10,1	2,98	17,1	8,68	8,04	6,03	4,42	9,02	9
Lu	0,97 (0,53)	0,53	5,63	0,7	1,38	0,48	3,3	1,13	0,77	0,68	0,45	1,02	1
Mol %													
CaO	52,1	51,2	62,5	91,5	53,4	52	93,5	94,4	93,5	93,7	65,5	90,4	16,4
FeO+MnO	11,8	11,8	10,8	2	21,7	20,1	6,2	5,2	5,4	4,9	26,2	6,8	79,6
MgO	36,1	37	26,7	6,5	24,9	27,9	0,3	0,4	1,1	1,4	8,3	2,8	4

**Fonte:** Speziale *et al.* (2020, modificada). Brasil: Barra do Itapirapuã (Ruberti *et al.*, 2002, 2008; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2005c). Paraguai: Cerro Chiriguelo (Censi *et al.*, 1989; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2014a). Bolívia: Cerro Manomó (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2011).

**Tabela 8.5.** Análises químicas para elementos maiores, traços e terras raras de amostras selecionadas de carbonatitos eocretácicos de ocorrências menores.

Amostra	Itanhaém	Paraguai		
		Valle-mí	Cerro Cañada	Cerro E Santa Elena
	132,8 (4,6) Ma	138,7 (0,2) Ma	124,6 (0,7) Ma	127 (8) Ma
	IA-2	VM1 Fração carbonática (15,56 %)	Fração dolomítica (15,5 %) em ijolito	
% em peso				
SiO <sub>2</sub>	5,58			0,29
TiO <sub>2</sub>	0,92	0,05	0,01	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	0,01		0,89
FeO	11,79	0,29	2,25	1,63
MnO	0,62	0,01	0,2	0,45
MgO	6,23	0,2	18,2	16,23
CaO	36,06	6,67	31,3	32,54
Na <sub>2</sub> O	0,37	0,01	0,25	0,4
K <sub>2</sub> O	0,18	0,01	0,01	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,64	0,08	0,01	0,44
P.F.	30,7	8,13	47,79	46,92
Soma	98,91	15,56	100,02	100
ppm				
Rb	0,8	0,9	2,36	4,5
Ba	1546	435	2950	5618
Th	233	20	2,82-	4,23
Nb	448	64	10,3	15
Ta	24,4	4,8	1,11	1,32
K	1494	83	81	166
Sr	3248	128	3246	6225
P	20249	349	41	1920
Hf	0,8	10	1,05	1,71
Zr	17	39	12	18,8
Ti	5515	300	59	118
Y	57	16	24,2	25,5
ETR				
La	2773	155	164	188
Ce	4902	340	325	409
Pr	337	43,5	36,5	30,2
Nd	1181	168	146,3	184
Sm	132	27,7	22,45	25,8
Eu	29,7	10,66	8,2	14,4
Gd	79	33,12	31,4	48,2
Tb	6,4	5,24	3,3	5,1
Dy	37-	30	30,5	47,1
Ho	7,2-	5,95	5,7	8,9
Er	14,8	12,27	13,6	21,8
Tm	1,61	1,34	2,1	2,7
Yb	11,7	5,95	21,7	31,1
Lu	0,9	0,67	0,77	1,22
Mol %				
CaO	66,2	92,8	53,5	49,9
FeO+MnO	17,8	3,3	3,3	3,6
MgO	16	3,9	43,2	46,5

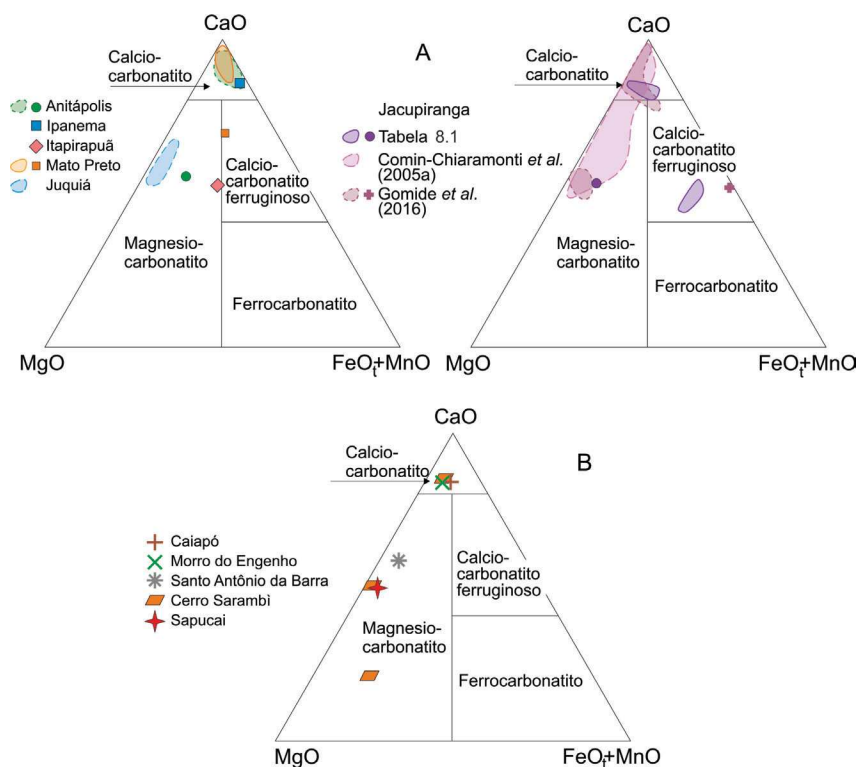
**Fonte:** Speziale *et al.* (2020, modificada). Brasil: Itanhaém (Coutinho e Ens, 1992). Paraguai: Valle-mí (Castorina *et al.*, 1997; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2014a); Cerro Cañada e Cerro E Santa Elena (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2007a, 2007b).

calciocarbonatitos ferruginosos (28-36% de CaO, 4,3-13,4% de MgO, 10,0-30,3% de FeO) (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2007a), embora esses três tipos de rochas raramente ocorram juntos no mesmo complexo. O Cerro Manomó, na Bolívia, se constitui no único representante característico do grupo dos ferrocarbonatitos, com teores de 7,7% de CaO, 0,34% de MgO, 40,5% de FeO e 7,1% de MnO (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2011).

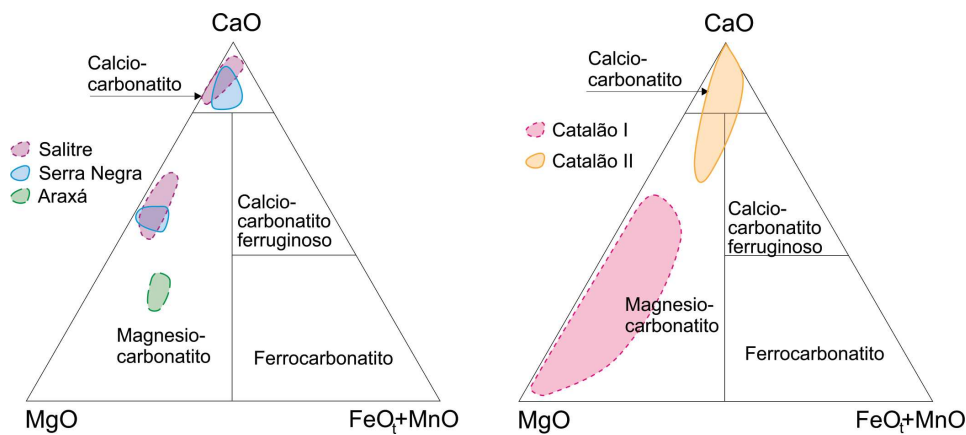
Diagramas de classificação química (Woolley e Kempe, 1989; Gittings e Harmer, 1997) relacionando os teores de CaO-MgO-(FeO+MnO) são mostrados para as três associações petrográficas, com as figuras 8.2 a 8.4 tratando dos carbonatitos magmáticos (respectivamente, associações dos tipos A, B e C), a figura 8.5 em especial dos hidrotermais e a figura 8.6 das ocorrências menores.

A figura 8.2 reúne os dados relativos às ocorrências eocretácicas e neocretácicas da associação do tipo A, que correspondem a calciocarbonatitos seguidos por magnesiocarbonatitos e calciocarbonatitos ferruginosos. Contudo, é importante lembrar que em alguns complexos como Barra do Itapirapuã, Jacupiranga e Juquiá, por exemplo, a evolução do(s) magma(s) carbonatítico(s) resultou em rochas de grande variação composicional e representando diferentes estágios de intrusão. Assim, os carbonatitos de cristalização inicial de Jacupiranga e de complexos do Alto Paranaíba exibem composição mais cálcica, que passa progressivamente a mais magnesiânica nos estágios finais (Gomide *et al.*, 2016). Em alguns complexos como Mato Preto e Santo Antônio da Barra, a associação carbonatítica inclui também silicocarbonatitos, que se apresentam comumente na forma de diques.

A tendência evolutiva calciocarbonatitos→magnesiocarbonatitos, atingindo até ferrocarbonatitos em alguns casos, é reconhecida nos complexos de Barra do Itapirapuã (Ruberti *et al.*, 2002), Juquiá (Walter *et al.*, 1995) e Cerro Chirigué (Censi *et al.*, 1989). Contudo, esses três tipos coexistem apenas em carbonatitos de pouco complexos, como o de Jacupiranga, por exem-



**Figura 8.2.** Diagramas de classificação química (Woolley e Kempe, 1989; Gittings e Harmer, 1997) reunindo proporções molares de CaO-MgO-(FeO+MnO) para associações carbonatíticas brasileiras e paraguaias do tipo A. Eocretáceo: A) Anitápolis, Ipanema, Itapirapuã, Jacupiranga, Juquiá; B) Cerro Sarambí, Sapucaí. Neocretáceo: A) Mato Preto; B) Caiapó, Morro do Engenho, Santo Antônio da Barra (Speziale *et al.*, 2020, modificada); para fontes de dados, ver referências na tabela 8.1 e na figura.



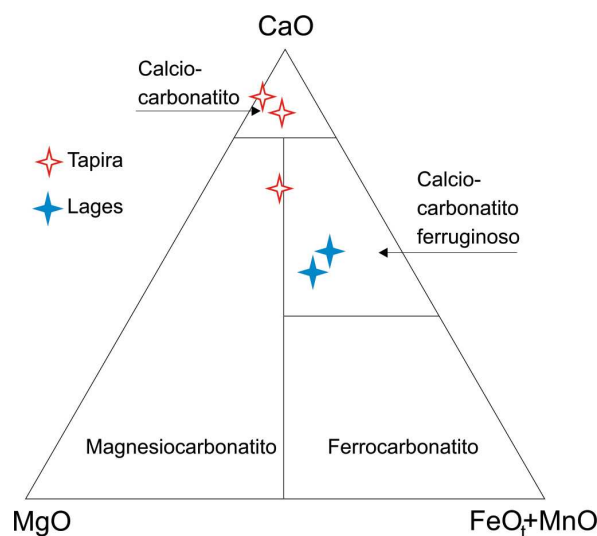
**Figura 8.3.** Diagramas de classificação química (Woolley e Kempe, 1989; Gittins e Harmer, 1997) reunindo proporções molares de CaO-MgO-(FeO+MnO) para associações carbonatíticas brasileiras de complexos neocretácicos do *tipo B*: Araxá, Catalão I e II, Salitre, Serra Negra (Speziale *et al.*, 2020, modificada); para fontes de dados, ver referências na tabela 8.2.

plo, considerado de origem primária por Huang *et al.* (1995).

A figura 8.3 agrupa as ocorrências neocretácicas do Alto Paranaíba correspondentes à associação do *tipo B*, que contam ainda com rochas ultramáficas de natureza glimmerítica em alguns complexos, caso de Araxá, Catalão I e Catalão II, por exemplo. A notar que calcio-carbonatitos e magnesio-carbonatitos estão presentes em Salitre, Serra Negra e Catalão II, enquanto Araxá e Catalão I contêm somente magnesio-carbonatitos.

A figura 8.4 apresenta os dados para a associação do *tipo C*, que contém rochas neocretácicas com melilita na composição. Tapira e Lages são os únicos complexos representativos dessa associação, ocorrendo calcio-carbonatitos e, de modo subordinado, magnesio-carbonatitos associados com ultramelilititos no primeiro, enquanto calcio-carbonatitos associados com olivina melilititos estão presentes no segundo.

Segundo Comin-Chiaramonti e Gomes (1996), os carbonatitos eocretácicos brasileiros e paraguaios parecem ser quimicamente relacionados com um magmatismo potássico de composição "plagiocléucítica" no diagrama de Foley (1992), representado principalmente por rochas de filiação sienítica. Por sua vez, os carbonatitos neocretácicos da região Centro-Oeste do Brasil



**Figura 8.4.** Diagramas de classificação química (Woolley e Kempe, 1989; Gittins e Harmer, 1997) reunindo proporções molares de CaO-MgO-(FeO+MnO) para associações carbonatíticas brasileiras de complexos neocretácicos do *tipo C*: Tapira, Lages (Speziale *et al.*, 2020, modificada); para fontes de dados, ver referências na tabela 8.3.

parecem guardar maior identificação com uma associação ultrapotássica kamafugítica, como sugerido por Junqueira-Brod *et al.* (2002) e Guarino *et al.* (2017).

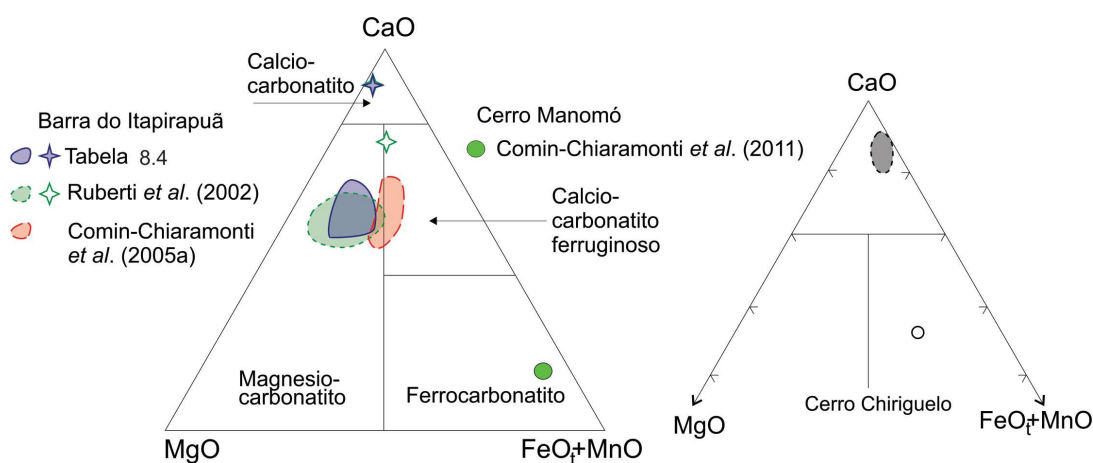
A figura 8.5 mostra o comportamento dos carbonatitos hidrotermais eocretácicos de Barra do Itapirapuã, Cerro Chiriguelo e Cerro Manomó. Magnesiocarbonatitos predominam em Barra do Itapirapuã, com presença secundária de calciocarbonatitos e calciocarbonatitos ferruginosos. Notavelmente, todos esses tipos de rochas foram originados sob condições hidrotermais, com temperaturas variando entre 375°C e 80°C (Ruberti *et al.*, 2002, 2008). O complexo de Cerro Chiriguelo é formado de calciocarbonatitos que se mostram cortados por veios de calciocarbonatitos ferruginosos na parte central da intrusão (Censi *et al.*, 1989; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2014a). No Cerro Manomó, blocos de material carbonático foram descritos por Burton (1982) como ferrocarnatitos e, posteriormente, descritos por Comin-Chiaramonti *et al.* (2005b, 2011) como compostos de carbonato siderítico-ankerítico alterados hidrotermalmente em associação com fluorocarbonatos de terras raras.

Outros tipos de carbonatitos incluem as ocorrências menores de Itanhaém, no Brasil, e as paraguaias de Valle-mí, Cerro Cañada e Cerro E Santa Elena (Figura 8.6). Em Itanhaém, registra-se a presença de dique beforfítico, com 0,3 m de espessura e granulação fina, composto de dolomita ferruginosa, enquanto em Valle-mí diques de natureza basanítica possuem inclusões (provavelmente exsoluções) de calciocarbonatito. Cerro Cañada e Cerro E Santa Elena são *stocks* principalmente de gabros alcalinos a nefelina sienitos, com os *ocelli* cumuláticos consistindo em um núcleo de dolomita e flogopita, clinopiroxênio, olivina, magnetita e anfibólio (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2007a, 2007b).

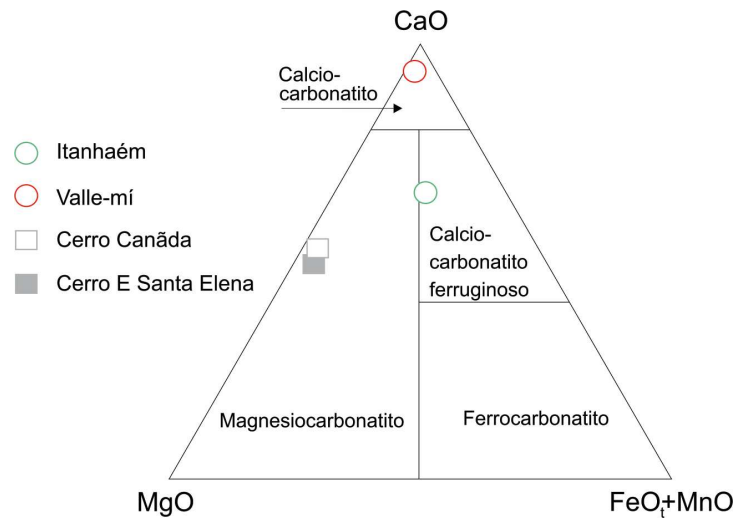
### 8.3. Elementos Incompatíveis e Terras Raras

Análises constantes das tabelas 8.1 a 8.5, com os valores para elementos incompatíveis (EI) normalizados em função de concentrações do manto primitivo (Sun e McDonough, 1989), são mostradas nas figuras 8.7 a 8.10 para as três associações de carbonatitos magmáticos, na figura 8.11 para os carbonatitos hidrotermais e na figura 8.12 para as ocorrências menores. Por sua vez, o comportamento dos elementos terras raras (ETR), normalizados para condrito (Boynton, 1984), para algumas ocorrências selecionadas dos três tipos de carbonatitos é exibido na figura 8.13.

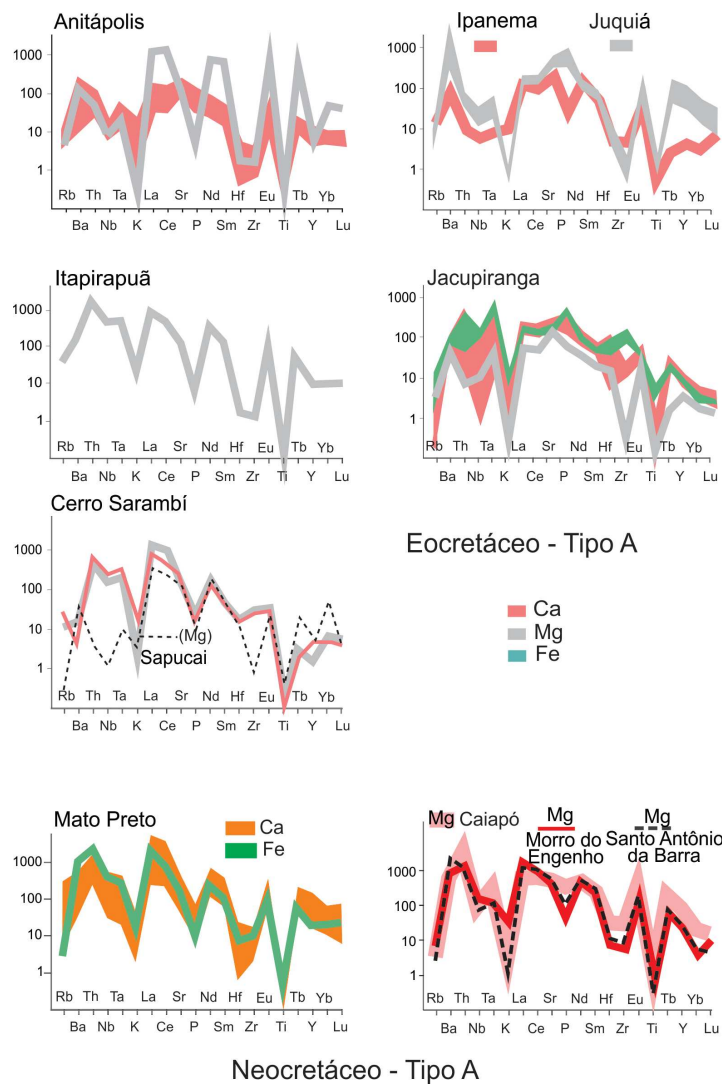
Os dados indicam que os carbonatitos magmáticos têm como características marcantes



**Figura 8.5.** Diagramas de classificação química (Woolley e Kempe, 1989; Gittins e Harmer, 1997) reunindo proporções molares de CaO-MgO-(FeO+MnO) para associações carbonatíticas de complexos eocretácicos hidrotermais: Barra do Itapirapuã, Cerro Manomó, Cerro Chiriguelo (Speziale *et al.*, 2020, modificada); para fontes de dados, ver referências na tabela 8.4 e na figura.



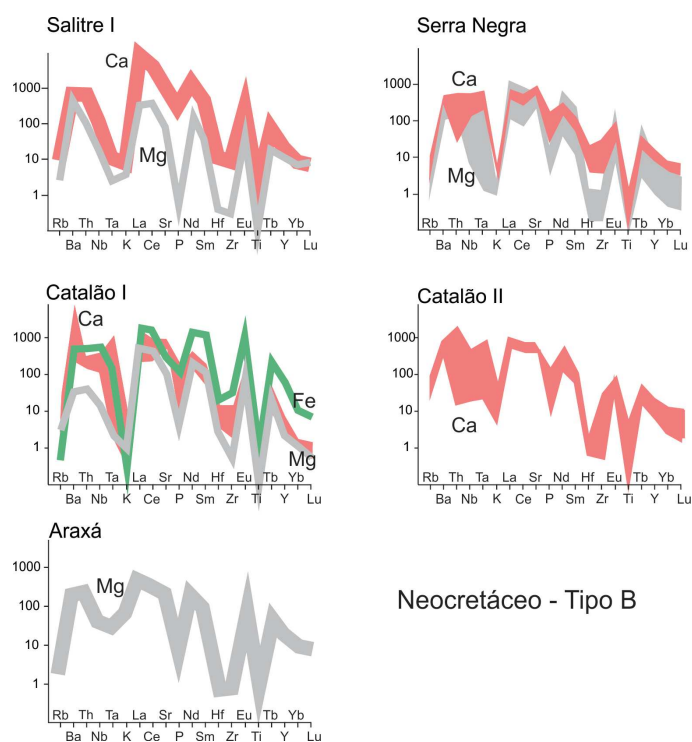
**Figura 8.6.** Diagramas de classificação química (Woolley e Kempe, 1989; Gittins e Harmer, 1997) reunindo proporções molares de CaO-MtgO-(FeOt+MnO) para associações carbonatíticas eocretácicas de ocorrências menores: Itanhaém, Valle-mí, Cerro Cañada, Cerro E Santa Elena (Speziale *et al.*, 2020, modificada); para fontes de dados, ver referências na tabela 8.5.



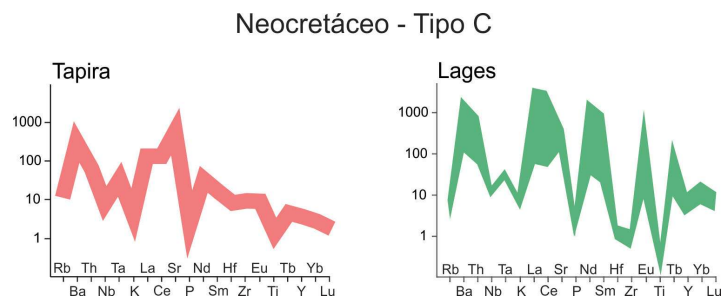
**Figura 8.7.** Diagramas reunindo concentrações de elementos incompatíveis normalizados segundo o manto primitivo (Sun e McDonough, 1989) em carbonatitos magmáticos eo e neocretácicos do tipo A: Anitápolis, Ipanema, Juquiá, Itapirapuã, Jacupiranga, Cerro Sarambí, Sapucaí, Mato Preto, Caiapó, Morro do Engenho, Santo Antônio da Barra (extraída de Speziale *et al.*, 2020); para fontes de dados, ver referências na tabela 8.1.

os baixos valores em K e Ti, ao lado do expressivo enriquecimento nos elementos terras raras La, Ce, Nd, Sm e Eu. Pb e Zr mostram grande variação, que guarda provavelmente relação com a presença ocasional de apatita e flogopita. Em realidade, é possível observar que os valores normalizados de elementos como Th, Nb, Ta, Hf, Zr e Ti, além de ETR variam enormemente de um complexo carbonatítico para outro, refletindo possivelmente em alguma extensão a distribuição variada e a concentração de fases minerais, tais como fosfatos (p. ex., apatita, monazita), óxidos (p. ex., calzirtita, loparita, pirocloro, zirconolita), carbonatos e fluorocarbonatos (p. ex., ancylita, bastnäsita, burbankita, parisita). Quando comparados às rochas alcalinas silicáticas associadas, os carbonatitos exibem maior abundância em quase todos os elementos incompatíveis. Nos complexos onde são reconhecidos os três tipos de carbonatitos, casos particularmente de Jacupiranga (Figura 8.7), Catalão I (Figura 8.8) e Barra do Itapirapuã (Figura 8.10), verifica-se que os ferrocarnatitos possuem maior concentração nesses elementos em relação aos magnesiocarbonatitos e calciocarbonatitos. Embora os dados disponíveis ainda não sejam numerosos (p. ex., Anitápolis, Lages, Mato Preto, cf. Gibson *et al.*, 1999; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2005c, 2007a), não foram registradas diferenças significativas no comportamento químico desses elementos em carbonatitos de cristalização inicial e tardia do mesmo complexo, à exceção talvez da tendência de as últimas rochas se apresentarem mais enriquecidas em quase todos eles.

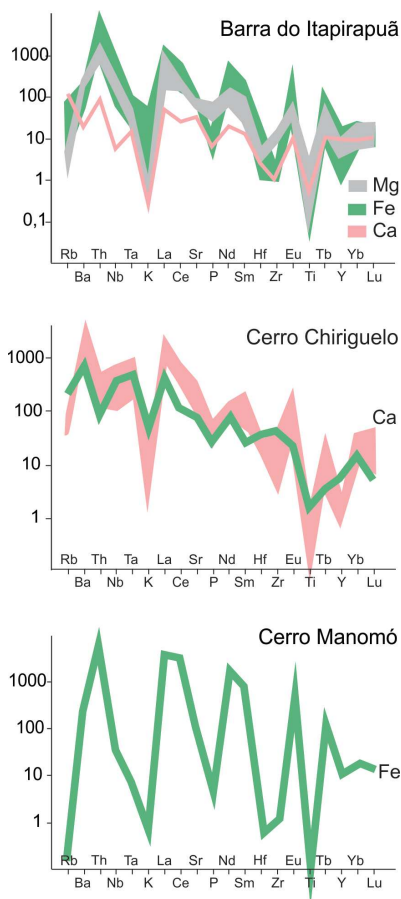
O diagrama da figura 8.10 mostra o comportamento dos elementos incompatíveis nos carbonatitos de Barra do Itapirapuã, Cerro Chiriguelo e Cerro Manomó, que reúnem mineralogias contendo carbonatos, fluorocarbonatos e óxidos com ETR. Essas associações são produtos de ambientes de baixa temperatura (principalmente hidrotermal) e representam, em alguma extensão, fluidos fenitizantes enriquecidos em EI relativamente aos carbonatitos primários (Castorina *et al.*, 1997). Assim, por exemplo, em Barra do Itapirapuã, três fases carbonatíticas principais são reconhecidas, com duas delas exibindo claramente assinatura geoquímica superposta ligada a processos de alteração hidrotermal (Andrade *et al.*, 1999a, 1999b; Ruberti *et al.*, 2002, 2008), responsáveis pela deposição



**Figura 8.8.** Diagramas reunindo concentrações de elementos incompatíveis normalizados segundo o manto primitivo (Sun e McDonough, 1989) em carbonatitos magmáticos neocretácicos do *tipo B*: Salitre I, Serra Negra, Catalão I e II, Araxá (extraída de Speziale *et al.*, 2020); para fontes de dados, ver referências na tabela 8.2.



**Figura 8.9.** Diagramas reunindo concentrações de elementos incompatíveis normalizados segundo o manto primitivo (Sun e McDonough, 1989) em carbonatitos magmáticos neocretácicos do *tipo C*: Tapira, Lages (extraída de Speziale *et al.*, 2020); para fontes de dados, ver referências na tabela 8.3.



**Figura 8.10.** Diagramas reunindo concentrações de elementos incompatíveis normalizados segundo o manto primitivo (Sun e McDonough, 1989) em carbonatitos eocretáceos hidrotermais: Barra do Itapirapuã, Cerro Chiriguelo, Cerro Manomó (extraída de Speziale *et al.*, 2020); para fontes de dados, ver referências na tabela 8.4.

de quantidades apreciáveis de minerais fluorocarbonáticos de ETR ricos em Th, La-Ce, Nd-Sm e Eu. Magnesiocarbonatitos e ferrocarbonatitos são dominantes, com calciocarbonatitos ocorrendo subordinadamente. Em Cerro Chiriguelo, prevalecem calciocarbonatitos com altos teores de Ba, Ta, La-Ce, Nd e Eu. Os ferrocarbonatitos subordinados possuem também altas concentrações de Ba, Nb-Ta e ETR. Segundo Censi *et al.* (1989), os conteúdos de Th e Nb dessas rochas parecem estar relacionados a concentrações locais de uranipirocloro. Os raros blocos de ferrocarbonatito de Cerro Manomó sugerem uma associação carbonatítica do tipo siderítica-ankerítica alterada com goethita-limonita, apatita e fluorocarbonatos de ETR (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2011).

As demais ocorrências carbonatíticas (Itanhaém, Valle-mí, Cerro Cañada, Cerro E Santa Elena) são mostradas na figura 8.11, confirmando em linhas gerais as características geoquí-

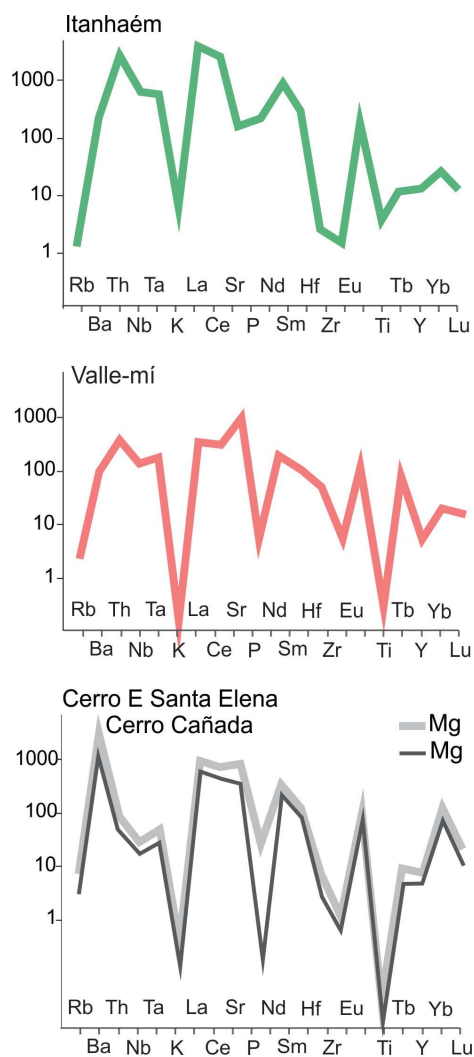
micas comuns aos demais carbonatitos, ou seja, as anomalias negativas acentuadas em K e Ti, juntamente com o forte enriquecimento em ETR.

A distribuição dos ETR normalizados para diferentes tipos de carbonatitos eocretácicos do Brasil (Barra do Itapirapuã, Jacupiranga, Juquiá, Anitápolis), Paraguai (Província ASV, Valle-mí, Cerro Chirigué, Cerro Sarambí) e Bolívia (Cerro Manomó), bem como de neocretácicos, estes restritos ao Brasil (Província Alcalina do Alto Paranaíba, além de Mato Preto e Lages), é visualizada na figura 8.12. No geral, o comportamento é marcado pela alta concentração em ETR e a grande variação no grau de fracionamento ETRL/ETRP. Diferentes padrões são distinguidos:

1) Forte aumento de Lu para La, caracterizando complexos como Jacupiranga, Lages (carbonatitos de cristalização inicial e tardia), Mato Preto (carbonatitos de cristalização inicial e tardia), Alto Paranaíba (C1 a C5, Gomide *et al.*, 2016), além de Cerro Chirigué e Cerro Sarambí, por exemplo. Mencione-se, igualmente, que o comportamento das rochas de Lages e Mato Preto parece ter sido controlado por veios carbonatíticos de cristalização tardia.

2) Comportamento praticamente horizontal ou suave decréscimo de La para Lu, como observado nas rochas de Anitápolis, Barra do Itapirapuã e Juquiá (magnésio e calciocarbonatitos).

3) Comportamento côncavo com platô para ETRP e pronunciado aumento de Dy para ETRL,



**Figura 8.11.** Diagramas reunindo concentrações de elementos incompatíveis normalizados segundo o manto primitivo (Sun e McDonough, 1989) em ocorrências carbonatíticas eocretácicas menores: Itanhaém, Valle-mí, Cerro E Santa Elena (Mg, cinza claro), Cerro Cañada (Mg, cinza escuro) (extraída de Speziale *et al.*, 2020); para fontes de dados, ver referências na tabela 8.5.

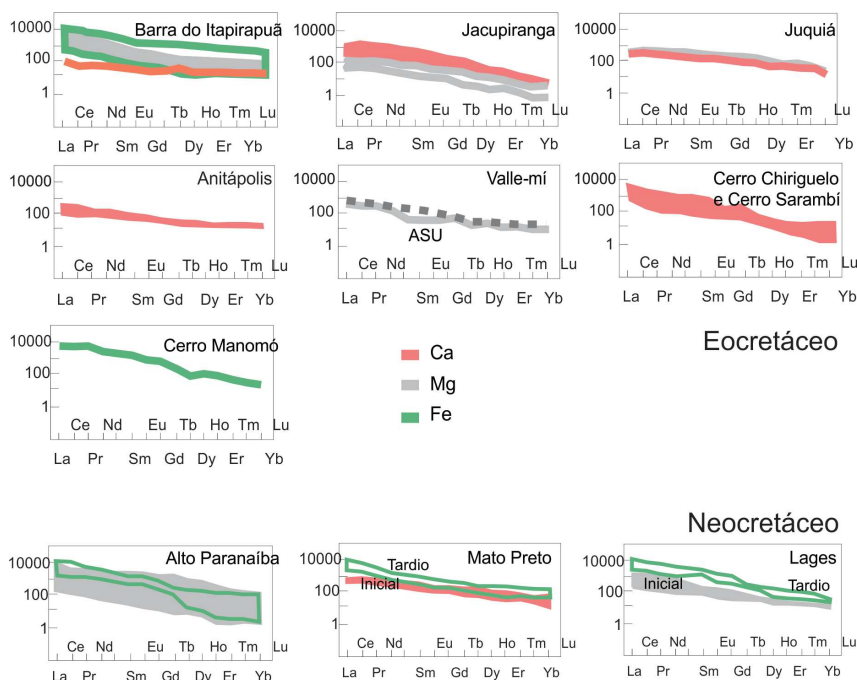
como reconhecido nos carbonatitos de Valle-mí e Barra do Itapirapuã. Neste último complexo, onde se distinguem quatro gerações distintas de diques carbonatíticos, os mais alterados hidrotermalmente se caracterizam pela maior concentração em terras raras leves devido à presença de fluorocarbonatos de ETR (Andrade, 1998).

Como conclusão, é possível dizer-se que os diferentes comportamentos dos carbonatitos de cristalização inicial, que se acredita serem líquidos carbonatíticos primários (calcio e magnesiocarbonatitos), devem refletir as assinaturas geoquímicas de seus líquidos progenitores (calciocarbonatitos e magnesiocarbonatitos primários dos complexos, respectivamente, de Jacupiranga e Juquiá), como realçado por Hornig-Kjasgaard (1998). Notavelmente, a presença de ferrocarbonatitos de cristalização tardia, variadamente enriquecidos em fluorocarbonatos, aponta para a ação de processos hidrotermais.

## 8.4. Isótopos de C e O

O comportamento desses isótopos em rochas alcalinas e carbonatitos associados tem sido exaustivamente pesquisado nas últimas décadas por grande número de pesquisadores (p. ex., Nelson *et al.*, 1988; Censi *et al.*, 1989; Santos *et al.*, 1990; Santos e Clayton, 1995; Huang *et al.*, 1995; Toyoda *et al.*, 1995; Walter *et al.*, 1995; Castorina *et al.*, 1996, 1997; Speziale *et al.*, 1997; Andrade *et al.*, 1999a, 1999b; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2001, 2002, 2005b, 2005c, 2007a; Ruberti *et al.*, 2002; Gomide *et al.*, 2013, 2016; Gomes e Comin-Chiaramonti, 2017).

Os dados para  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  e  $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$  compilados da literatura para a grande maioria das ocorrências carbonatíticas do sistema Paraná-Etendeka-Namíbia estão listados nas tabelas 8.6 a 8.10, tendo sido o material de análise concentrados de calcita ou da fração dolomita/ankerita. No seu conjunto, os resultados disponíveis cobrem amplo intervalo de variação, de 5‰ a 25‰ para  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  (V-SMOV por mil, cf. Deines, 1989); contudo, para aproximadamente 50% das



**Figura 8.12.** Diagramas reunindo concentrações de elementos terras raras normalizados segundo condrito (Boynton, 1984) para ocorrências selecionadas de carbonatitos eocretácicos (Barra do Itapirapuã, Jacupiranga, Juquiá, Anitápolis, Valle-mí, Cerro Chiriguelo, Cerro Sarambí, Cerro Manomó) e neocretácicos (Alto Paranaíba, Mato Preto, Lages) (extraída parcialmente de Comin-Chiaramonti, 2007a); para fontes de dados: ver referências nas tabelas 8.1 a 8.4.

análises, esse intervalo é bem menor, situando-se entre 6‰ e 10‰. Contrariamente, os valores para  $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$  exibem variação mais restrita, com 91% das análises caindo no intervalo de -2‰ a -8‰ (PDB-1 por mil, cf. Deines, 1989). É importante frisar que variações de  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  e  $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ , respectivamente, entre 6‰ e 10‰ e entre -4‰ e 8‰ correspondem ao campo definido por Taylor *et al.* (1967) e Keller e Hoefs (1995) para os carbonatitos primários. Diagramas relacionando  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  e  $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$  para as ocorrências carbonatíticas eo e neocretácicas brasileiras e eocretácicas paraguaias são mostrados nas figuras 8.13 a 8.17.

Os três grupos de carbonatitos magmáticos estão representados nas figuras 8.13 a 8.15, cujos dados permitem observar que as rochas de Jacupiranga possuem valores tipicamente mantélicos, caindo no campo dos carbonatitos primários, enquanto as demais ocorrências apresentam tendências de enriquecimento em isótopos pesados. Essas tendências, por sua vez, estão igualmente evidenciadas nos carbonatitos hidrotermais (Figura 8.16), assim como nas ocorrências menores (Figura 8.17). Duas conclusões emergem do exame do conjunto desses gráficos:

1) A evidente assinatura geoquímica primária dos carbonatitos eocretácicos brasileiros, como exemplificado pelas rochas do complexo de Jacupiranga. Os dados obtidos são consistentes com os dos carbonatitos do tipo 1 de Pineau *et al.* (1973), mostrando valores de  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  e  $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$  típicos de rochas mantélicas.

2) A presença de duas tendências distintas de enriquecimento em isótopos pesados. A primeira delas é caracterizada por uma mudança para valores positivos em ambos os parâmetros,  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  e  $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ . Ela é prontamente destacada nos complexos de Mato Preto e também de Jacupiranga (Figura 8.13), de Tapira e Lages (Figura 8.15), de Barra do Itapirapuã e nos furos de sondagem de Cerro Chiriguelo (Figura 8.16), e parece se constituir em uma extensão dos carbonatitos de Jacupiranga. Uma evolução isotópica similar por fracionamento magmático é também admitida por Gomide *et al.* (2016) para os carbonatitos de cristalização inicial (C1) da Província Alcalina do Alto Paranaíba. Para os outros corpos carbonatíticos da mesma região, que representam estágios intermediários (C2, C3) ou mesmo tardios (C4, C5) de cristalização, esses autores sugeriram, ao lado de fracionamento magmático, a interação com fluidos carbotermais e alteração hidrotermal. A segunda tendência mostra aumento dos valores de  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ ; porém, mantêm-se praticamente constantes os de  $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ . Ela é bem visível nos complexos de Juquiá e Sapucaí (Figura 8.13), de Araxá e Catalão I (Figura 8.14) e, notadamente, de Cerro Chiriguelo (Figura 8.16), o qual conta com maior diversidade de análises, quer de superfície quer provenientes de furos de sondagem. Essas duas tendências guardam correlação com os carbonatitos dos tipos 2 e 3 de Pineau *et al.* (1973), cujas variações isotópicas são atribuídas a processos magmáticos tardios e deutéricos.

## 8.5. Isótopos de Sr e Nd

Os carbonatitos do sistema Paraná-Etendeka-Namíbia possuem geralmente valores para as razões isotópicas iniciais  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ( $\text{Sr}_i$ ) e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ( $\text{Nd}_i$ ) similares aos das rochas alcalinas silicáticas associadas, mesmo aquelas afetadas por processos de reequilíbrio fluido-rocha nos últimos estágios de formação, em ambiente hidrotermal (Castorina *et al.*, 1997; Speziale *et al.*, 1997). Contudo, pesquisas desenvolvidas por Cordeiro *et al.* (2010) em carbonatitos do complexo de Catalão I com grande variação de valores para isótopos de  $\text{Nd}_i$ , mantidos os de Sr num estreito intervalo, indicaram que processos magmáticos e/ou carbohidrotermais são capazes de fracionar Nd, deixando os isótopos de Sr inalterados. Assim, é importante examinar com muita atenção o comportamento desses isótopos quando tratando de carbonatitos submetidos a modificações pós-magmáticas.

No Brasil, os carbonatitos eocretácicos apresentam  $\text{Sr}_i$  no intervalo de 0,70425-0,70595

**Tabela 8.6.** Isótopos de C e O para calcita e dolomita/ankerita (algumas vezes coexistentes) de amostras de carbonatitos magmáticos eo e neocretácicos pertencentes à associação do tipo A.

Amostra	Anitápolis														Ipanema	
	SAN-1	SAN-2	SAN2-B	SAN-3	SAN-4	SAN-5	SAN-6A	SAN-8	SAN-11	SAN-12	SAN-13	SAN-14	119-2	IP-1		
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Cc	7,55	7,94	7,89	7,53	7,63	8,08		10,38	7,55	7,47	7,52	7,5	7,67	23,62		
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Cc	-7,24	-7,34	-7,29	-7,26	-7,27	-7,16		-6,82	-7,38	-7,15	-7,37	-7,15	-7,02	5,38		
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Dol/ank	8,24	8,51		8,17	8,11	8,39	10,12		8,04	8,19	7,45	8,22				
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Dol/ank	-7,07	-6,93		-7,02	-7	-6,8	-6,89		-7,21	-6,78	-7,25	-6,78				
<b>Itaipirapua</b>																
Amostra	IT-28	IT-29	6220	6221	6222	6223	6224	6225	6227	6228	6229	6229		-70		
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Cc	8,12	8,75	13,26	14,61	8,26	10,04	12,36	13,19	10,19	13,11	9,77	10,68		18,9		
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Cc	6,63	-7,08	-1,66	0,38	-6,25	-4,52	-1,06	-2,41	-5,84	-0,56	-0,57	-3,45		-0,7		
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Dol/ank	9,13			15,95					12,6			11,88				
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Dol/ank	-6,04			0,99					-4,98			-2,74				
Amostra	-77	-84	-93,1	119,3	-130	S16C	S25	S26A	S26B	1A	2A	3A	4A			
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Cc	11,32	12,64		12,49	13	16,58	15,68	16,42	15,68	14,39	14,5	13,9	13,79			
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Cc	-1,91	-0,41		-0,81	-3,96	-7,57	-7,6	-7,84	-8,02	-6,31	-5,82	-6,39	-5,95			
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Dol/ank	13		13,06	13,31		15,83	16,13	16,64	16,64	14,19	14,19	13,59	13,59			
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Dol/ank	-1,3		-0,63	-0,45		-7,2	-7,27	-7,27	-7,45	-5,78	-5,32	-5,78	-5,32			
<b>Jacupiranga</b>																
Amostra	JM-1	JM-2	JM-6A	JM 12B	JM 15	JC-11	JC-18	JC 26	JC 27	JC 44	JC 46					
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Cc	8	7,48	8,12	9,38	8,62	7,5	8,1	7,3		9,6	7,7					
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Cc	-6,3	-6,07	-5,03	-4,12	-5,15	-6,4	-6,39	-6,2		-5,8	-6,4					
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Dol/ank		8,12	8,41	9,51	9,2			7,1	7,7	7,3	8,1					
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Dol/ank		-5,03	-4,59	-3,8	-4,8			-5,8	-5,9	-6,1	-5,6					
Amostra	JC 99	JC 100	JC 101	JC 102	JC103	JP 881	JP 882	HB-005	HB-010	HB011						
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Cc	10,05	7,48	8,12	9,38	8,62	7,4	7,7			9,38						
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Cc	6,39	-6,07	-5,03	-4,12	-5,15	-5,8	-6,5			-4,12						
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Dol/ank		7,6	8,41	9,51	9,2	7,2	7,5	7,1	7,7							
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Dol/ank		-5,71	-4,59	-3,8	-4,8	-5,7	-6,3	-5,8	-5,9							
<b>Morro do Engenho</b>																
<b>Santo Antônio da Barra</b>																
Amostra	ME-C	SAB-12	SA-90	SA-91	SA-95	GL-SA	SA-958	PS-72	PS-72A	PS-72B	PS-94					
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Cc	11,7	8,83	21,68	17,11	14,96		14,89			14,77	16,7			CR-09		
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Cc	-7,8	-6,1	-5,68	10,37	-5,68		-6,4			-6,54	-7,37			12,3		
$\delta^{18}O_{\text{‰}}$ Dol/ank		8,99				7,04		14,47	14,00	14,05				-7,0		
$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ Dol/ank		-5,77				-8,61		-5,63	-6,54	-6,83						

**Fonte:** dados extraídos de Speziale *et al.* (no prelo-2022?). Para referências, ver tabela 1 desses autores.

**Tabela 8.7.** Isótopos de C e O para calcita e dolomita/ankerita (algumas vezes coexistentes) de amostras de carbonatitos magmáticos neocretácicos pertencentes à associação do *tipo B*.

Amostra	Araxá									Salitre	
	AR-891	AR-892	A-893	ARX-90-1AS	ARX-90-2B	ARX-90-3B	ARX-90-4B	ARX-90-5B	AR	C-1	C-4
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc			11,5	9,7	10	10,4	13,8	10	12,5	8,8	9,3
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc			-6,3	-7,2	-6,9	-7,1	-4,8	-7	-6,8	-6,2	-6,9
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank	14	12,6	9,5		11,1	11,4	10,7				
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank	-6,1	-7,2	-5,8		-6	-6,3	-3,5				

Amostra	Catalão I										
	C1-1	C1CB02	C1C4	CTTTW	13E-1	13E-2A	13E-3A	C3-2B	CAT1	CAT2	CAT3
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc	8,2	9,9	10,75	9,6	13,3	14,6	19,3	12,5	8,45	8,03	8,23
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc	-6	-6,2	-5,79	-7	-6,5	-6,4	-6,2	-5,3	-6,97	-6,47	-6,85
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank	8,2	10,9			11,4	10,2	20,4	9,9	8,03	8,51	8,15
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank	-6,9	-6,9			-5	-5,4	-4,2	-4,8	-6,17	-5,97	-6,01

Amostra	Catalão II										
	C2	C2A2	C2A15	C2A17	C2A19	C2A21	C2B17	C2B18	C2B19	C2B22	C1C4
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc		9,36	9,21	8,49	8,68	8,46	8,69	9,48	8,74	9,13	10,75
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc		-6,03	-5,68	-5,96	-5,97	-5,97	-6	-6,16	-5,9	-6,35	-5,79
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank	9,6										
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank	-7										

Amostra	Serra Negra						
	LG-03-70	LG-14-28	LG-06-32	LG-13126	LG-20-91	LG-32-63	LG-38-46
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc	8,23	7,23	7,28	7,24			
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc	-6,18	-6,91	-7,35	-6,54			
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank					8,5	13,89	8,86
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank					-5,95	-4,84	-5,81

**Fonte:** dados extraídos de Speziale *et al.* (no prelo-202?). Para referências, ver tabela 1 desses autores.

**Tabela 8.8.** Isótopos de C e O para calcita e dolomita/ankerita (algumas vezes coexistentes) de amostras de carbonatitos magmáticos neocretácicos pertencentes à associação do *tipo C*.

Amostra	Tapira								Lages								
	T-1	S22-4B	S22-11-C	S22-5B	S22-8F	TP90-1-C	TP90-1-D	TAP-1	SB02	SB03	SB05	SB05A	SB05B	SB17	SB20	FV24	LG-1-4
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc	9,9	10	9,9	15,4	9,7	10	9,7	12,9		17,4	17,9						
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc	-7	-6,7	-6,8	-5,6	-6,8	-5,3	-6,2	-6,61		-1	-0,5						
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank	11	13,9	11,1	15,6		11,9	10,6	13	15,2	15,8	16,5	15,69	16,59	10,4	8,99	23,9	21,19
$\Delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank	-6	-4,9	-5,9	-5,8		-3,7	-5	-5,92	-1,66	-1,55	-0,5	-1,78	-0,24	-4,3	-5,76	-3,02	-1,66

**Fonte:** dados extraídos de Speziale *et al.* (no prelo-202?). Para referências, ver tabela 1 desses autores.

**Tabela 8.9.** Isótopos de C e O para calcita e dolomita/ankerita (algumas vezes coexistentes) de amostras de carbonatitos eocretácicos hidrotermais.

Amostra	Barra do Itapirapuã											
	I-IIA,B	IVA	IVB5	IVB3	IIA2	IVA5						
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc	9,09			12,64	7,91	8,33						
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc	-6,43			-0,89	-6,65	-6,6						
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank	9,31	11,7	14,13	15,55	9,17	9,09						
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank	-6,07	1,1	1,38	-0,3	-6,04	-6,03						
Amostra	1-34.9	1-66.5	1-87.4-	1-100.7	2-16.2							
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc												
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc												
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank	8,5	8,87	9,37	8,85	8,20							
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank	-6,10	-6,13	-5,69	-6,20	-6							
Amostra	2-31.0	2-110.5	3-35.7	3-44.7	4-10.3							
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc			12,64	16,08								
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc			-0,89	-1,30								
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank	8,70	9,97	15,55	17,53	8,3							
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank	-5,80	-4,43	-0,30	-0,73	-5,90							
Amostra	5-13.0	5-79.0	5-98.0	5-256	6-20,0	6-30,0						
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc		9,06	8,42	9,09								
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc		-5,82	-6,92	-6,43								
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank	8,40	10,0	9,08	9,60	9,13	8,76						
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank	-5,70	-5,19	-6,35	-5,94	-5,76	-6,22						
Amostra	6-66.0	6-78.8	6-95.0	6-99,7	6-110	5-170.7						
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc												
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc												
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank	9,23	10,19	8,63	8,73	9,81	9,72						
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank	-5,71	-3,69	-6,44	-6,52	-6,04	-5,42						
Amostra	1-18.8	1-30.5A	1-32.5	1-33.45	1-37.4	1-39.3						
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc		12,5	7,67		6,00	8,08						
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc		1,0	-6,91		-7,10	-6,48						
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank	9,0	13,5	8,64	9,4	6,7	9,0						
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank	-5,8	1,1	-6,19	-5,4	-6,4	-5,78						
Amostra	1-57,6	2-72,4	3-67,4B	3-183,4	3-160,5	5-230						
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc	7,00		13,1	8,27	8,8	9,88						
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc	-6,80		1,2	-6,77	-6,35	-5,38						
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank	7,9	8,84	13,7	9,26	9,36	10,55						
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank	-6,1	-6,13	1,5	-6,0	5,99	-4,90						
Amostra	Cerro Chiriguelo											
	3407	3408	3409	3410	3411	3412	3413	3414	3416	3417	3418	
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc	17,87	18,14	14,14	23,33	15,93	17,76	16,21	17,56	16,53	16,38	15,56	
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc	-7,01	-5,97	-6,3	-4,71	-5,48	-4,98	-5,8	-5,75	-6,4	-4,98	-6,74	
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank												
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank												
Amostra	0,3419	3420	3422	3423	3433	3434	3435°	3435b	3436	3440	3442	3443
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc	19,44	15,45	13,48	18,04	18,71	11,22	11,53	14,94	12,51		11,76	13,07
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc	-3,97	-6,98	-7,26	-6,89	-5,34	-6,52	-7,77	-6,25-	-7,07		-8,08	-6,49
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank										22,91		
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank										-4,1		

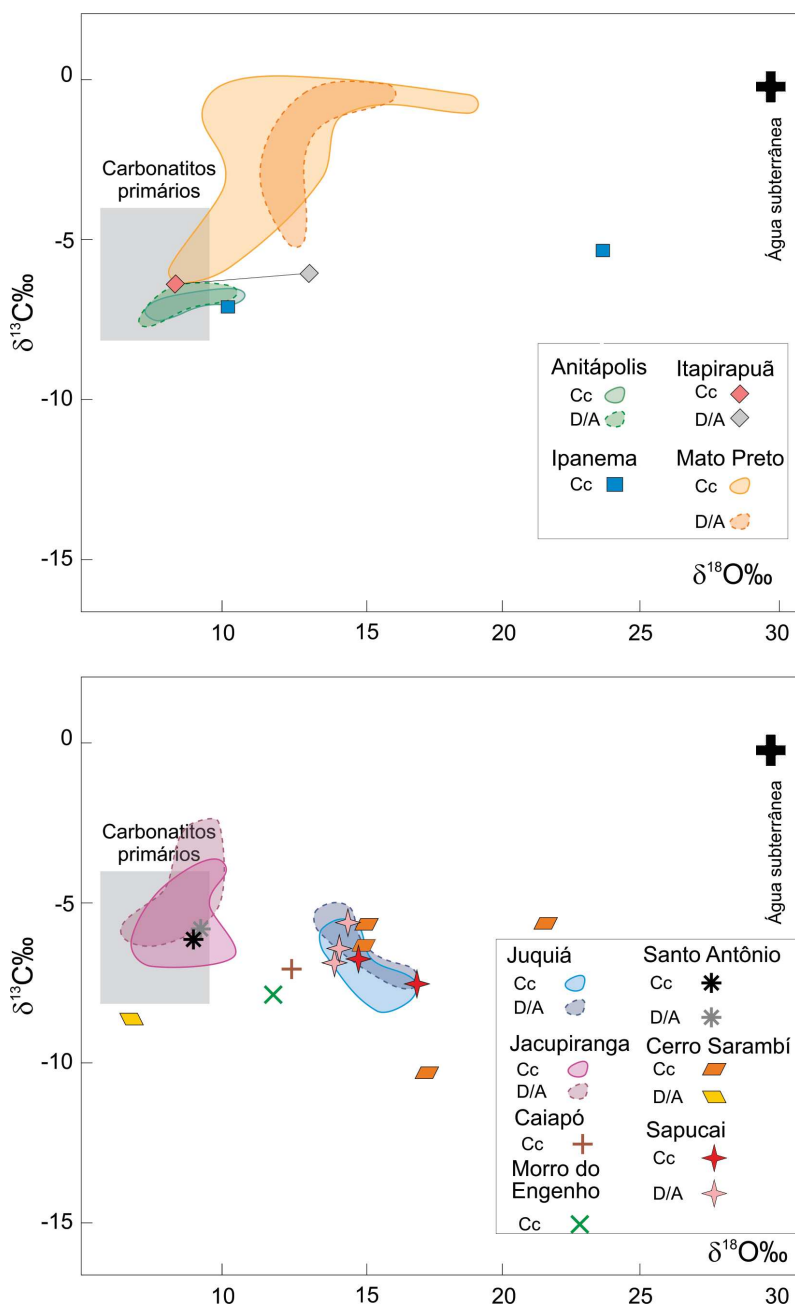
**Fonte:** dados extraídos de Speziale *et al.* (no prelo-202?). Para referências, ver tabela 1 desses autores.

**Tabela 8.10.** Isótopos de C e O para calcita e dolomita/ankerita (algumas vezes coexistentes) de amostras de carbonatitos eocretácicos de ocorrências menores.

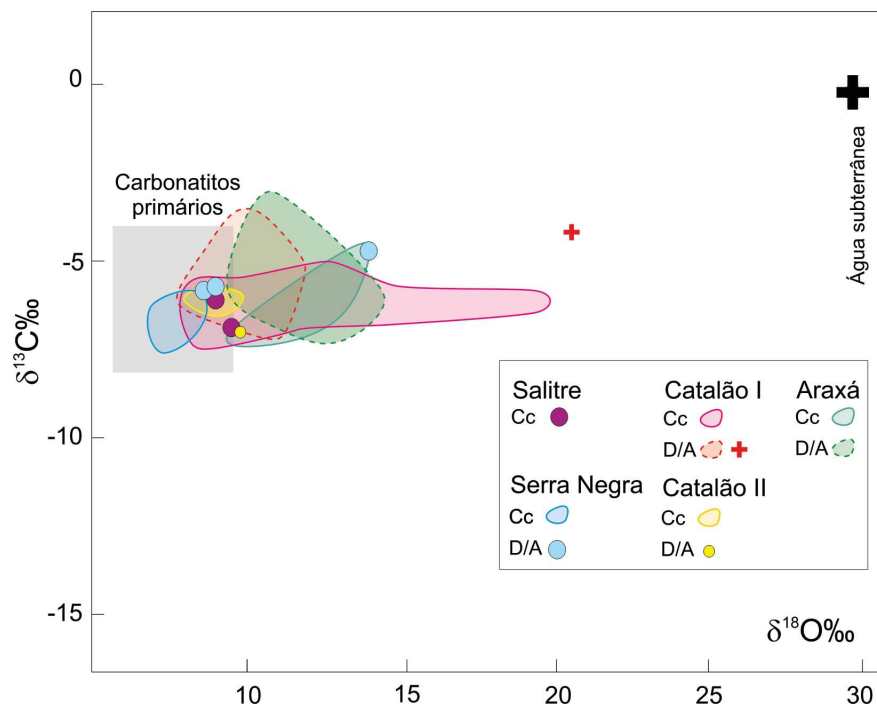
Amostra	Itanhaém		Valle-mí				Cerro Cañada		C.E S.E.	
	IA-1	IA-2	VM-1	STE-A	STE-B	STE-D	STE-E	PS-245	PS245B	PS-524
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Cc	15	11,6	8,53	17,12	17,96	18,3	18,03	6,90	11,4	16,09
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Cc	-4,3	-5,5	-7,3	-7,68	-7,3	-6,96	-7,75	-8,50	-6,3	-7,76
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ Dol/ank		17							11,1	16,31
$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ Dol/ank		-2,6							-5,5	-7,34

**Fonte:** dados extraídos de Speziale *et al.* (no prelo-202?). Para referências, ver tabela 1 desses autores.

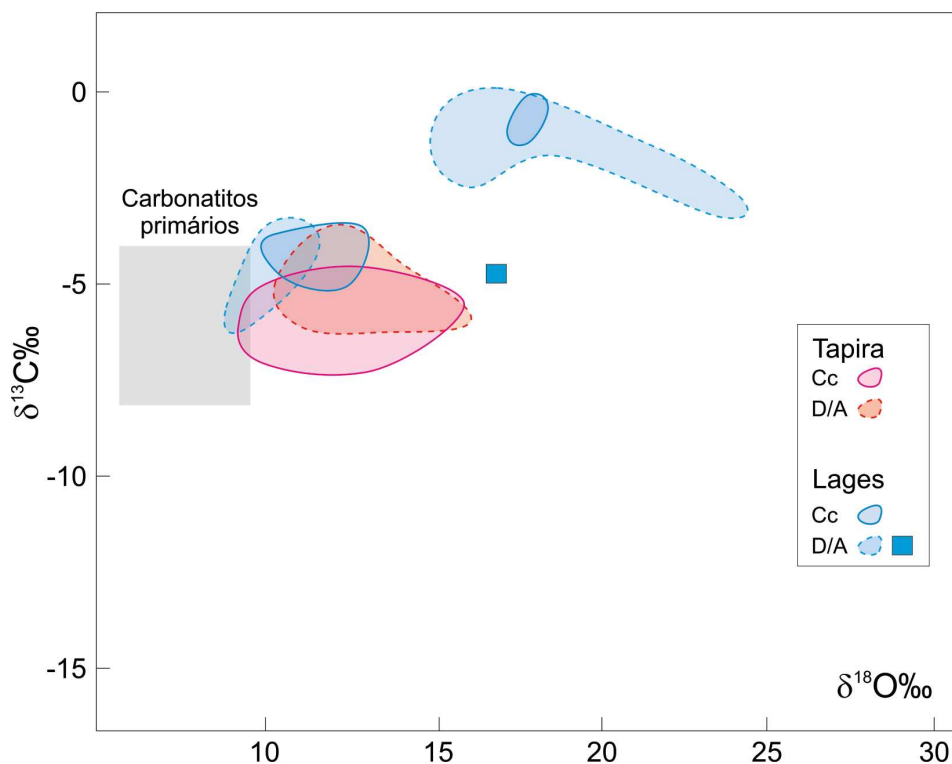
**Abreviação:** C.E S.E., Cerro E Santa Elena.



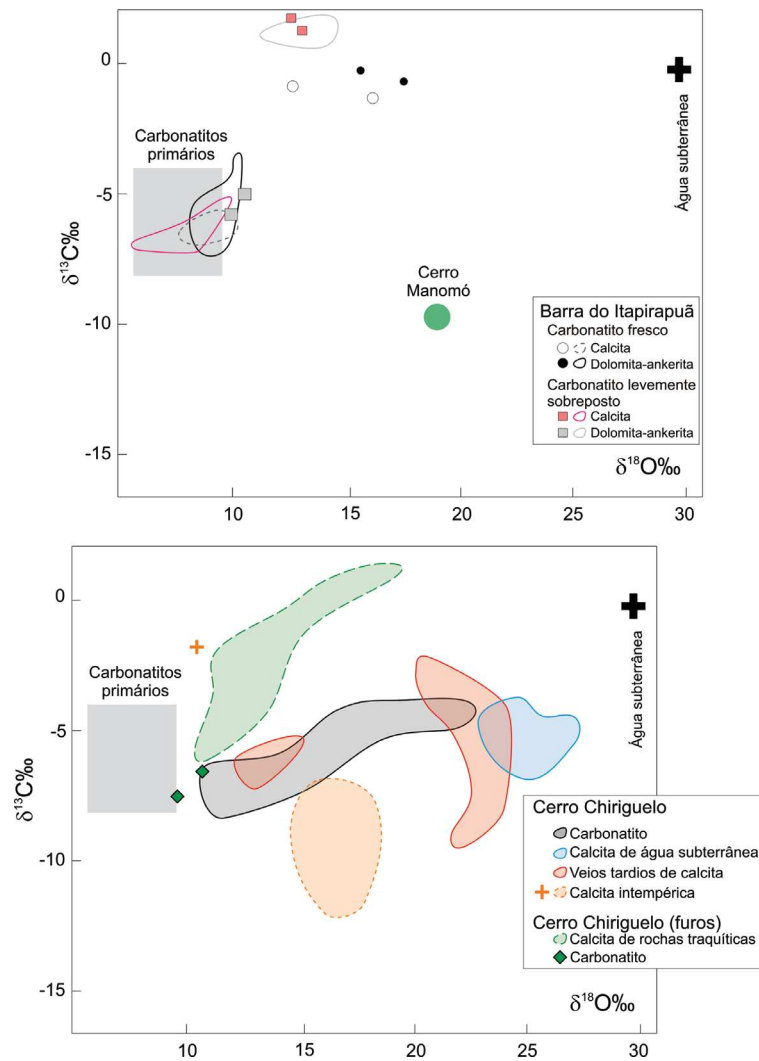
**Figura 8.13.** Figuras mostrando a evolução das composições dos isótopos estáveis de C e O em carbonatitos magmáticos eo e neocretácicos do tipo A: Anitápolis, Ipanema, Itapirapuã, Mato Preto, Juquiá, Jacupiranga, Caiapó, Morro do Engenho, Santo Antônio da Barra, Cerro Sarambí, Sapucaí (modificada de Speziale *et al.*, no prelo-202?). Para fontes de dados, ver referências na tabela 1 desses autores. Composições iniciais arbitrarias da água subterrânea:  $\delta^{18}\text{O} = 0$ ,  $\delta^{13}\text{C} = 30\text{‰}$  (Taylor, 1978; Usdowski, 1982). Campo dos carbonatitos primários segundo Taylor *et al.* (1967) e Keller e Hoefs (1995).



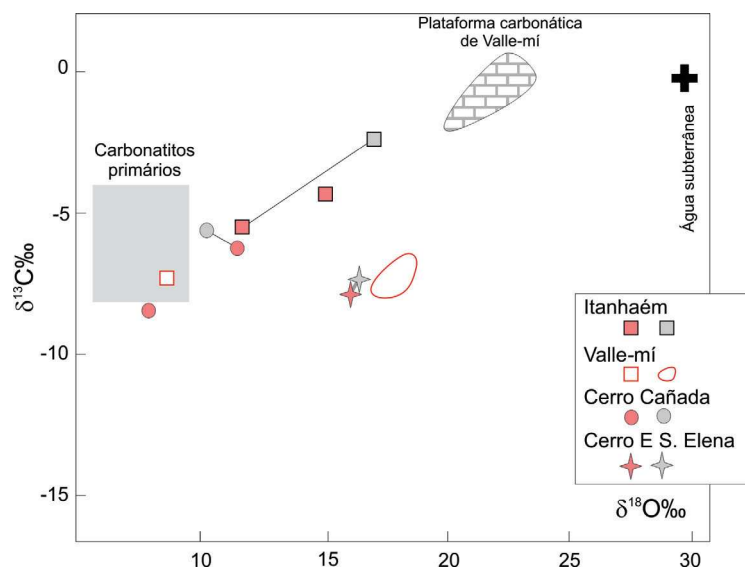
**Figura 8.14.** Figuras mostrando a evolução das composições dos isótopos estáveis de C e O em carbonatitos magmáticos neocretácicos do *tipo B*: Salitre, Serra Negra, Araxá, Catalão I, Catalão II (modificada de Speziale *et al.*, no prelo-202?). Para fontes de dados, ver referências na tabela 1 desses autores. Para outras informações, consultar figura 8.13.



**Figura 8.15.** Figuras mostrando a evolução das composições dos isótopos estáveis de C e O em carbonatitos magmáticos neocretácicos do *tipo C*: Tapira, Lages (modificada de Speziale *et al.*, no prelo-202?). Para fontes de dados, ver referências na tabela 1 desses autores. Para outras informações, consultar figura 8.13.



**Figura 8.16.** Gráficos mostrando a evolução das composições dos isótopos estáveis de C e O em carbonatitos eocretácicos hidrotermais: Barra do Itaipapuã, Cerro Chiriguelo (modificada de Speziale *et al.*, no prelo-202?). Para fontes de dados, ver referências na tabela 1 desses autores. Para outras informações, consultar figura 8.13.



**Figura 8.17.** Gráficos mostrando a evolução das composições dos isótopos estáveis de C e O em ocorrências carbonatíticas eocretácicas menores: Itanhaém, Valle-mí, Cerro Cañada, Cerro E Santa Elena (modificada de Speziale *et al.*, no prelo-202?). Para fontes de dados, ver referências na tabela 1 desses autores. Para outras informações, consultar figura 8.13.

e  $Nd_i$  entre 0,51213 e 0,51280, com valores médios, respectivamente, de  $0,70527 \pm 0,00034$  e  $0,51224 \pm 0,00011$  (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1999). Dados para  $Sr_i$  e  $Nd_i$ , respectivamente, de 0,70538 e 0,51253 foram fornecidos há pouco tempo por Beccaluva *et al.* (2017) para uma intrusão carbonatítica de Jacupiranga. Já os neocretácicos possuem valores médios de  $Sr_i$  e  $Nd_i$ , respectivamente, de  $0,70527 \pm 0,00036$  e  $0,51224 \pm 0,00006$  para os complexos do Alto Paranaíba (Bizzi *et al.*, 1994; Gibson *et al.*, 1995a, 1995b); de  $0,70447 \pm 0,00034$  e  $0,51252 \pm 0,00008$  para os de Taiúva-Cabo Frio e Serra do Mar (Thompson *et al.*, 1998); e de  $0,70485 \pm 0,00053$  e  $0,51218 \pm 0,00022$  para Lages (Traversa *et al.*, 1996; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2002). Valores para algumas ocorrências individuais são fornecidos nas tabelas 8.11 a 8.15 e projetados na figura 8.18A, na qual exibem a mesma tendência comum aos toleítos eocretáceos da Bacia do Paraná (A-TI e B-TI), vulcânicas neocretácicas do Rio Grande Rise e rochas alcalinas paleocênicas da Província da Serra do Mar (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2005c, 2007a). Investigando os carbonatitos do Alto Paranaíba, Guarino *et al.* (2017) postularam que eles são muito diferentes dos demais da região Sudeste do País, o que os levou a sugerir a existência de heterogeneidades em escala regional das fontes mantélicas localizadas sob a Plataforma Brasileira.

No Paraguai, os carbonatitos eocretácicos e as rochas alcalinas potássicas associadas (ambas pré e pós-toleítos eocretácicos) contêm valores de  $Sr_i$  e  $Nd_i$  dentro dos intervalos, respectivamente, de 0,70612-0,70754 e 0,51154-0,51184 (Tabelas 8.11, 8.14 e 8.15; Figura 8.18B). Esses números são muito distintos quando comparados àqueles das rochas alcalinas sódicas do Eocretáceo tardio (Província de Misiones) e do Paleoceno (Província de Assunção), com valores para  $Sr_i$  no intervalo de 0,70362-0,70524 e  $Nd_i$  entre 0,51225-0,51277. A figura demonstra que os carbonatitos e as rochas alcalinas potássicas associadas se caracterizam por possuir altos valores de Sr e baixos de Nd, enquanto os toleíticos, com suas variantes de alto e baixo Ti, ocupam uma posição intermediária entre essas rochas e as alcalinas sódicas. Estas últimas e os xenólitos mantélicos coexistentes projetam-se no diagrama próximo ao campo da Terra Global, variando do quadrante empobrecido ao enriquecido. Vistos no conjunto, os dados são indicativos de uma tendência ligando o reservatório mantélico HIMU e as rochas alcalinas potássicas. Essa tendência (*Paraguay array* de Comin-Chiaramonti *et al.*, 1995) guarda inteira correspondência com o *Low-Nd trend* proposto por Hart *et al.* (1986).

As rochas alcalinas e os carbonatitos de ambos os países mostram comportamento bem definido que envolve componentes mantélicos empobrecidos e enriquecidos (Gomes e Comin-Chiaramonti, 2017). As ocorrências eo e neocretácicas brasileiras variam desde próximas à Terra Global ao quadrante enriquecido, caindo dentro do campo das lavas toleíticas não contaminadas da Província Paraná-Angola-Namíbia (Etendeka) (Figura 8.18A). Deve-se observar que as rochas enriquecidas eocretácicas paraguaias (Figura 8.18B) não são facilmente explicadas por processos de contaminação crustal, uma vez que estes requerem altas porcentagens de componentes crustais, até 90%, como determinado por Comin-Chiaramonti *et al.* (1997). Assim, as variações na sistemática Sr-Nd para essas rochas parecem estar relacionadas com uma fonte enriquecida, na qual as heterogeneidades químicas refletiriam membros finais de fontes magmáticas virtualmente não contaminadas de segmentos do manto subcontinental variadamente afetado por processos metassomáticos (Castorina *et al.*, 1996, 1997; Comin-Chiaramonti *et al.*, 1997).

## 8.6. Isótopos de Pb

Resultados para a composição isotópica de Pb em complexos alcalino-carbonatitos da região meridional da Plataforma Brasileira são relativamente raros e encontrados principalmente nos tra-

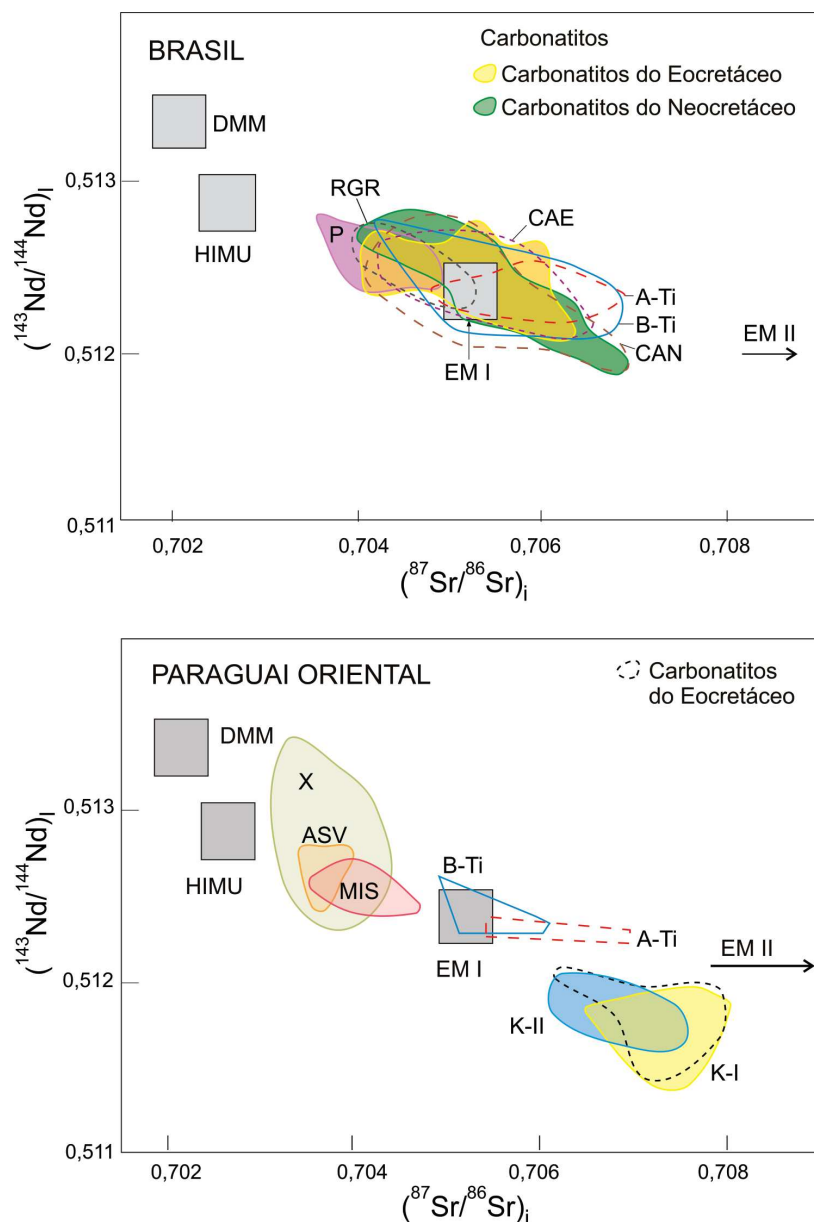
**Tabela 8.11.** Razões iniciais Sr-Nd e idades modelo para amostras de carbonatitos magmáticos eo e neocretácicos pertencentes à associação do tipo A.

Amostra	Anitápolis		Ipanema		Itapirapuã		Jacupiranga	
	SAN1,14;49;-12-78;11-101;16A	SAN13	119,2	HB 005	IT 28	HB 010	HB 011	
Rb-Sr( $R_0$ )								
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0,70595 (1)	0,70594	0,70673	0,70497	0,70446	0,70492	0,70497	
Sm-Nd( $R_0$ )								
$^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0,51219 (5)	0,51222	0,51169	0,51254	0,51249	0,51253	0,51254	
$\epsilon\text{Sr}$	20,6 (1)	19,8	33,7	6	1,09	5,4	6	
$\epsilon\text{Nd}$	-7,0 (0,6)	-4,8	-15,4	1,4	-0,15	1,2	1,4	
$T^{\text{DM}}$ (Ma)	1281 (53)	1397	2164	708	663	719	708	
Mato Preto								
Juquiá								
Amostra	S16C	S25	S26A	S26B	I-119,3	I-84,0	III-62,2	III-622
Rb-Sr( $R_0$ )								
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0,70556	0,70551	0,70531	0,70515	0,70495	0,70472	0,70473	0,70487
Sm-Nd( $R_0$ )								
$^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0,51255	0,51246	0,51252	0,51255	0,51253	0,5127	0,51266	0,51249
$\epsilon\text{Sr}$	17,2	16,5	13,7	11,4	4,7	1,44	1,56	3,51
$\epsilon\text{Nd}$	1,6	-0,2	1,2	1,6	-0,33	2,9	2,19	1,19
$T^{\text{DM}}$ (Ma)	744	924	781	750	1095	680	671	647
Paraguai								
Caiapó								
Amostra	CR-09	Morro do Engenho	S.A. Barra	Cerro Sarambí		Sapucai		
Rb-Sr( $R_0$ )								
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0,70497	0,70497	0,7052	0,70746	0,70745	0,70746	0,707	0,70717
Sm-Nd( $R_0$ )								
$^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0,51254	0,51253	0,51255	0,51157	0,51157	0,51156	0,51171	0,51131
$\epsilon\text{Sr}$	6	7,4	9,4	44,33	44,26	44,3	34,7	34,17
$\epsilon\text{Nd}$	1,4	1,3	1,5	-17,42	-17,39	-17,64	-14,8	-22,7
$T^{\text{DM}}$ (Ma)	742	718	769	1574	1739	1669	1884	1845

**Fonte:** dados extraídos de Speziale et al. (no prelo-202?).

**Fontes de dados para rochas toleíticas com alto e baixo Ti e alcalinas em geral:** Brasil: Gamboa e Rabinowitz (1984), Bellieni et al. (1990), Bizzi et al. (1994, 1995), Meyer et al. (1994), Gibson et al. (1995a, 1995b, 1997, 1999), Garda et al. (1995), Huang et al. (1995), Toyoda et al. (1995), Walter et al. (1995), Carlson et al. (1996), Thompson et al. (1998), Andrade et al. (1999a), Marques et al. (1999), Comin-Chiaromonti et al. (2001, 2002), Ruberti et al. (2002), Paraguai: Comin-Chiaromonti et al. (1991, 1995, 1997), Comin-Chiaromonti e Gomes (1996, 2005), Castorina et al. (1997).

**Outras referências:** consultar figura 8.18.



**Figura 8.18.** Diagramas correlacionando razões isotópicas iniciais de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  (extraída de Gomes *et al.*, 2018a; os dados estão disponíveis em Speziale *et al.*, no prelo-202?). As rochas basálticas e andesibasálticas representadas contêm teores de  $\text{MgO} \geq 4\%$  em peso e  $\text{Sr}_i \leq 0,7065$ . Isto é, são tidas como não contaminadas ou pouco contaminadas pela crosta (Piccirillo e Melfi, 1988). **Brasil:** Eocretáceo – A-TI, B-TI e CAE: respectivamente, lavas toleíticas com alto e baixo  $\text{TiO}_2$  e complexos alcalinos; Neocretáceo – CAN e RGR: respectivamente, complexos alcalinos e rochas basálticas do Rio Grande Rise; Paleoceno – P: rochas alcalinas da Serra do Mar. Fontes de dados: Eocretáceo: Garda *et al.* (1995), Huang *et al.* (1995), Toyoda *et al.* (1995), Walter *et al.* (1995), Andrade *et al.* (1999a), Gibson *et al.* (1999), Marques *et al.* (1999), Comin-Chiaramonti *et al.* (2002), Ruberti *et al.* (2002). Neocretáceo: Gamboa e Rabinowitz (1984), Bellieni *et al.* (1990), Bizzi *et al.* (1994, 1995), Meyer *et al.* (1994), Gibson *et al.* (1995a, 1995b, 1997, 1999), Toyoda *et al.* (1995), Carlson *et al.* (1996), Thompson *et al.* (1998). Paleoceno: Thompson *et al.* (1998), Bennio *et al.* (2002). **Paraguai Oriental:** Eocretáceo – K-I e K-II: complexos alcalinos potássicos pré e pós-toleíticos. Eocretáceo tardio – MIS: rochas alcalinas sódicas da Província de Misiones; Paleoceno: rochas alcalinas do Rifte de Assunção-Sapucaí-Villarrica (ASV) e respectivos xenólitos mantélicos (X). Outras fontes de dados: Comin-Chiaramonti *et al.* (1991, 1995, 1996, 1997, 2001), Comin-Chiaramonti e Gomes (1996, 2005), Castorina *et al.* (1997), Marques *et al.* (1999). DMM, HIMU, EM I e EM II são composições aproximadas de membros finais do manto como definidas por Zindler e Hart (1986), Hart e Zindler (1989) e Hart *et al.* (1992).

**Tabela 8.12.** Razões iniciais Sr-Nd e idades-modelo para amostras de carbonatitos magmáticos neocretácicos pertencentes à associação do tipo B.

Amostra	Araxá	Catalão I			Catalão II				
	AR 893	C1-L 1250	C1CB02	C1C4	C2-AA165907	C2A2	C2B19	C2B18	C2B17
	Mg-carb c/flo	Mg-Ca-carb	Mg-Ca-carb	Ca-Mg-carb	Ca-carb	Ca-carb	Ca-carb	Fe-carb c/flo	Ca-carb
Rb-Sr( $R_0$ )									
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0,70499	0,70563	0,70565	0,70529	0,70468	0,70524	0,7051	0,70512	0,70517
Sm-Nd( $R_0$ )									
$^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0,51222	0,51221	0,51225	0,51214	0,51229	0,51225	0,51219	0,51226	0,51224
$\epsilon\text{Sr}$	5,6	8,96	8,89	8,13	2,54				
$\epsilon\text{Nd}$	-5,66	-6,12	-6,07	-7,7	-6,44	-5,5	-6,7	-5,2	-5,7
$T^{\text{DM}}$ (Ma)	1044	1207	1032	1140	873	896	1082	994	986

**Fonte:** dados extraídos de Speziale *et al.* (no prelo-202?). Para referências, consultar tabela 1 desses autores e figura 8.18.

**Tabela 8.13.** Razões iniciais Sr-Nd e idades-modelo para amostras de carbonatitos magmáticos neocretácicos pertencentes à associação do tipo C.

Amostra	Tapira		Lages			
	T 1	T 2	SB05A; SB05B	SB02	SB10	SB11
	Ca-carb		Fe-carb	Fe-carb	Si-carb c/flo	Carb c/flo
Rb-Sr( $R_0$ )						
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0,70531	0,70539	0,70626 (2)	0,70596	0,70612	0,70609
Sm-Nd( $R_0$ )						
$^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0,51219	0,51221	0,51208 (1)	0,5121	0,51208	0,51204
$\epsilon\text{Sr}$	10,05	11,08	19,2 (2)	19,21	23,24	21,01
$\epsilon\text{Nd}$	-6,33	-6,98	-8,5 (0,4)	8,5	-9,01	-9,42
$T^{\text{DM}}$ (Ma)	911	987	1558 (48)	1319	1558	1454

**Fontes:** dados extraídos de Speziale *et al.* (no prelo-202?). Para referências, consultar tabela 1 desses autores e figura 8.18.

**Tabela 8.14.** Razões iniciais Sr-Nd e idades-modelo para amostras de carbonatitos eocretácicos hidrotermais.

Amostra	Barra do Itaipirapuã					Paraguai		Bolívia
						Cerro Chiriguélo		Cerro Manomó
	I,A; I,B; II,A	IV,A 3	IV,B 5	IV, B 3	II, A 2	3422	3434	PV-69C
	Mg-carb	Mg-carb	Si-Mg-carb	Ca-carb	Fe-carb	Ca-carb	Ca-carb	Bloco carbonático (siderita)
Rb-Sr( $R_0$ )								
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0,70462 (0,00032)	0,7057	0,7043	0,7046	0,70431	0,707198	0,70719	0,71094
Sm-Nd( $R_0$ )								
$^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0,51257 (0,00005)	0,51253	0,51265	0,51259	0,51246	0,511615	0,51161	0,51170
$\epsilon\text{Sr}$	3,61	18,92	-0,96	3,32	-0,8	40,58	40,47	90,9
$\epsilon\text{Nd}$	-1,6	1,17	3,22	-1,27	-0,53	-16,49	-16,5	-14,7
$T^{\text{DM}}$ (Ma)	586 (165)	663	681	636	619	2300	1860	1803

**Fonte:** dados extraídos de Speziale *et al.* (no prelo-202?). Para referências, consultar tabela 1 desses autores e figura 8.18.

**Tabela 8.15.** Razões iniciais Sr-Nd e idades-modelo para amostras de carbonatitos eocretácicos de ocorrências menores.

Amostra	Paraguai				
	Itanhaém		Valle-mí	Cerro Cañada	Cerro E Santa Elena
	IA-1	IA-2	VM1 Fração carbonática	Fração carbonática	PS-524
	Ca-(Si) carb	Ca-Fe-carb	Ca-carb	Mg-carb	Dolomita em basanita
Rb-Sr( $R_0$ )					
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0,70498	0,70651	0,706904	0,70628	0,70538
Sm-Nd( $R_0$ )					
$^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0,51238	0,51259	0,51186	0,51173	0,51215
$\epsilon\text{Sr}$	8,98	17,9	36,4	24,4	14,7
$\epsilon\text{Nd}$	-1,7	2,38	-11,71	-10,8	1,1
$T^{\text{DM}}$ (Ma)	772	556	1534	1323	800

**Fonte:** dados extraídos de Speziale *et al.* (no prelo-2022?). Para referências, consultar tabela 1 desses autores e figura 8.18.

balhos de Antonini *et al.* (2005), Huang *et al.* (1995), Comin-Chiaramonti *et al.* (2005c, 2007a), Bizzi e Araújo (2005), Beccaluva *et al.* (2017) e Gomes e Comin-Chiaramonti (2017). Os dados disponíveis para as razões isotópicas  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (medidas e iniciais) de um total de dezessete ocorrências brasileiras (eocretácicas e neocretácicas) e paraguaias (eocretácicas) constam da tabela 8.16 e estão projetados em diagramas correlacionando  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  e  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  vs.  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  (Figura 8.19A) e  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  e  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  vs.  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  (Figura 8.19B). De modo geral, os dados isotópicos variam com a idade das ocorrências. As eocretácicas possuem valores para  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  e  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ , respectivamente, nos intervalos de 17,033-19,968, 15,380-15,641 e 37,373-39,011, com os mais altos em  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  e  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  correspondendo a um dique basanítico que aflora nas imediações da cidade de Valle-mí, no Paraguai. Já as neocretácicas apresentam valores em intervalos mais estreitos, respectivamente, de 17,51-18,52, 15,44-15,55 e 38,20-38,76. Essas variações estão bem evidenciadas especialmente nos diagramas de correlação da figura 8.19A, que reúnem as ocorrências brasileiras. Nesses diagramas, nota-se também que os carbonatitos eocretácicos superpõem o campo dos toleítos da Bacia do Paraná, sugerindo, assim, uma evolução geodinâmica comum para ambos os tipos de magmatismo, toleítico e alcalino. A figura 8.19B realça igualmente a composição mais enriquecida em Sr das ocorrências paraguaias e a forte dispersão das amostras pré-toleíticas da região do Rio Apa (Valle-mí). Ao contrário das ocorrências brasileiras, as paraguaias projetam-se bem distantes das toleíticas e, comparativamente, apresentam razões isotópicas superiores para  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  e menores para  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  (Figuras 8.18 e 8.19B).

Em trabalho de investigação de isótopos de Sr-Nd-Pb em ocorrências alcalino-carbonatíticas cretácicas a terciárias do Paraguai, Antonini *et al.* (2005) propuseram que dois principais componentes mantélicos, EM I e HIMU, tiveram participação direta na gênese dessas rochas. O primeiro, de composição extrema e heterogênea, exerceu papel importante na formação do magmatismo alcalino potássico (K-I e K-II) do Eocretáceo. O segundo foi responsável pelo magmatismo sódico do Eocretáceo tardio (Província de Misiones) e do Paleoceno (Província de Assunção). Os gráficos da figura 8.19 apresentam padrões compatíveis com um processo de mistura envolvendo os membros finais EM I e HIMU e, subordinadamente, DMM e EM I, além da participação de componente crustal (EM II). Frise-se, ainda, que todos os tipos litológicos situam-se à direita da referência geocronológica de 132 Ma, definida por Ewart *et al.* (1998, 2004) para todo o sistema Paraná-Angola-Namíbia (Etendeka), à exceção das alcalinas potássicas pós-toleíticas do Paraguai que se projetam próximas àquela linha de referência.

As composições iniciais exibidas nos diagramas  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs.  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs.  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (Figuras 8.19A e 8.20A) definem arranjos lineares que são subparalelos às rochas toleíticas eocretácicas da Bacia do Paraná (Marques *et al.*, 1999) e à linha de referência do hemisfério norte (NHRL na sigla em inglês, de Hart, 1984), o que poderia ser interpretado como devido a processos de mistura envolvendo diferentes componentes mantélicos.

Analisando rochas de algumas intrusões do complexo de Jacupiranga (corpo NW, incluindo gabros alcalinos, sienodioritos e sienitos ao redor de dunitos; corpo SE, consistindo em clinopiroxenitos,

**Tabela 8.16.** Razões isotópicas de Pb (medidas e iniciais) de amostras representativas de carbonatitos cretácicos da região meridional da Plataforma Brasileira.

EOCRETÁCEO

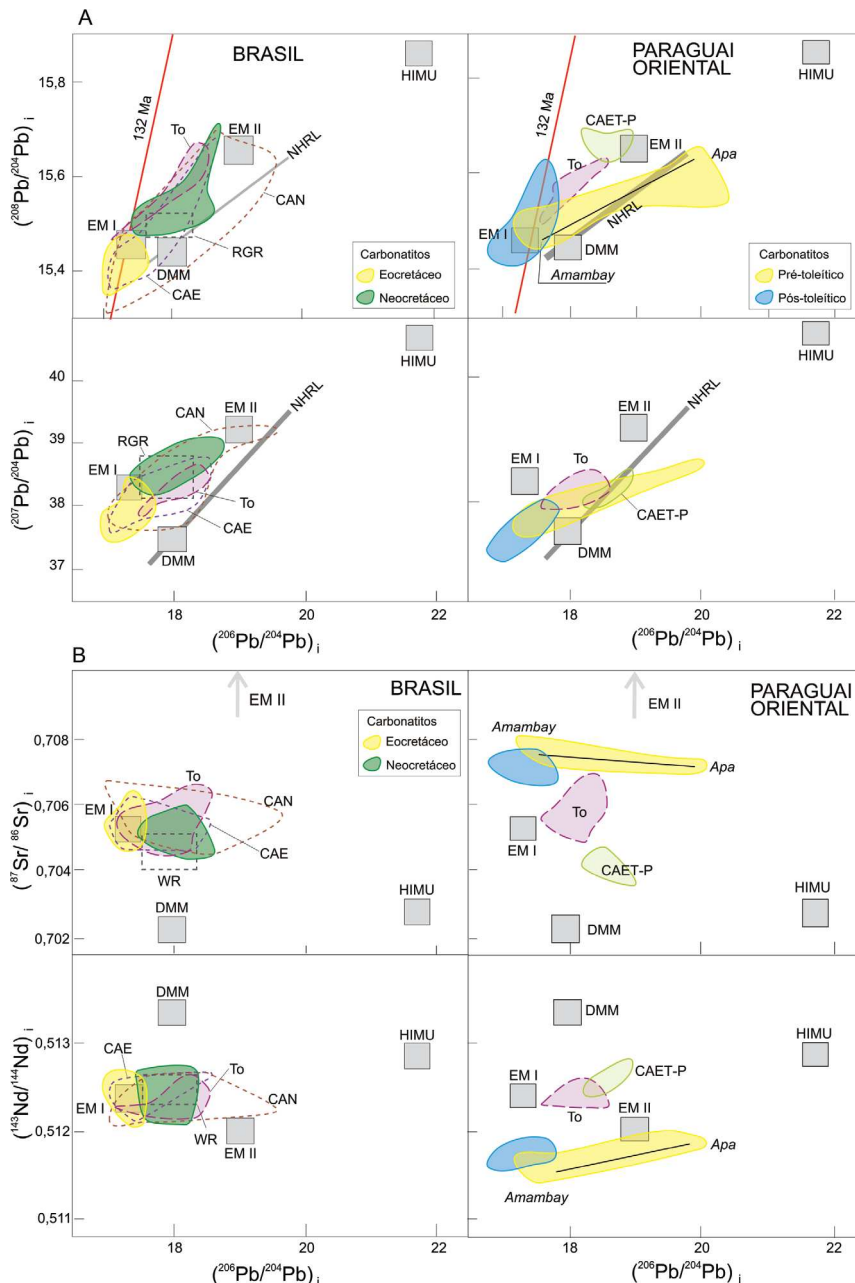
Localidade	Razão Medida			Razão Inicial		
	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Barra do Itapirapuã	18,627	15,605	39,123	18,232	15,598	38,922
	18,763	15,618	39,147	18,495	15,612	39,011
	18,426	15,528	38,808	18,159	15,538	38,593
Ipanema	17,617	15,477	37,938	17,451	15,467	37,612
Itanhaém	17,489	15,418	37,879	17,262	15,406	37,473
Itapirapuã	17,887	15,362	38,141	17,750	15,398	37,845
Jacupiranga	17,254	15,457	37,881	17,25	15,46	37,87
	17,273	15,457	37,970	17,27	15,45	37,9
	17,140	15,445	37,800	17,1	15,44	37,7
	18,256	15,446	38,170	17,464	15,407	37,769
	17,049	15,380	37,610	17,048	15,38	37,606
	17,954	15,430	38,791	17,326	15,399	37,755
Juquiá	18,191	15,448	40,320	17,47	15,413	38,049
	17,585	15,440	39,405	17,42	15,42	38,19
Anitápolis	17,787	15,432	38,379	17,453	15,415	38,18
	17,394	15,432	38,479	17,37	15,43	38,34
	17,491	15,453	39,375	17,41	15,45	38,21
Valle-mí	17,415	15,46	38,468	17,38	15,46	38,27
	20,3098	15,6578	38,9676	19,968	15,641	38,589
Cerro Chiriguelo	17,3333	15,5211	37,6087	17,033	15,506	37,465
	18,821	15,4344	38,2882	18,501	15,574	38,152
Cerro Sarambí	18,821	15,434	38,290	18,49	15,56	38,07
Sapucai	17,859	15,5181	37,9160	17,702	15,511	37,852
Cerro Cañada	17,865	15,632	38,222	17,624	15,620	37,915
Cerro E Santa Elena	17,435	15,435	37,796	17,200	15,424	37,373

NEOCRETÁCEO

Localidade	Razão Medida			Razão Inicial		
	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Araxá	18,525	15,538	39,029	18,05	15,52	38,76
	19,43	15,61	39,53	18,18	15,55	38,49
	19,47	15,58	39,64	18,52	15,53	38,67
Catalão I	17,788	15,503	38,417	17,52	15,49	38,37
	17,992	15,541	38,534	17,51	15,52	38,48
	17,904	15,496	38,875	17,71	15,49	38,25
Catalão II	18,22	15,50	38,80	17,53	15,44	38,20
Tapira	18,189	15,550	38,483	17,95	15,54	38,53
	20,413	15,642	39,469	17,83	15,54	38,48
	20,228	15,641	38,555	17,89	15,53	38,49
	17,874	15,509	38,470	17,84	15,51	38,43

**Fonte:** dados extraídos de Speziale *et al.* (no prelo-202?). Para referências, consultar tabela 1 desses autores e figura 8.18.

variedades da série metegito-ijolito-urtito e carbonatitos associados), Beccaluva *et al.* (2017) reportaram valores para as razões isotópicas  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , respectivamente, de 17,34-17,94, 15,49-15,59 e 37,94-38,93 para a primeira associação petrográfica e de 17,70-17,87, 15,47-15,50 e 38,03-38,41 para a segunda. Em particular para os carbonatitos, os valores foram, respectivamente, de 17,21, 15,42 e 37,87. Segundo esses autores, as rochas silicáticas e os carbonatitos associados exibem marcantes diferenças na composição isotópica para S-Nd-Pb, levando à suposição de que elas teriam se derivado a partir de fontes mantélicas independentes. Entendimento similar é compartilhado por Chmyz *et al.* (2019) que também registraram diferenças importantes para isótopos de Pb e Nd de carbonatitos e variedades silicáticas mais insaturadas em  $\text{SiO}_2$ .



**Figura 8.19.** A) Razões isotópicas iniciais  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e B)  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , respectivamente, para diferentes tipos de rochas do Brasil e Paraguai Oriental (extraída de Gomes *et al.*, 2018a; os dados estão disponíveis em Speziale *et al.*, no prelo-202?). Campos mostrados se referem a toleítos da Bacia do Paraná (To), províncias alcalinas potássicas pré-toleíticas do Rio Apa e Amambay, e rochas basálticas do Rio Grande Rise (RGR) e Walvis Ridge (WR). Abreviações: como na figura 8.18. Outras abreviações: CAET-P, complexos alcalinos do Eocretáceo tardio e Paleoceno; NHRL, Linha de Referência do Hemisfério Norte (Hart, 1984); 132 Ma, referência geocronológica segundo Ewart *et al.* (2004).

**Tabela 8.17.** Concentrações de Rb, Sr, Sm, Nd, Pb, U e Th (em ppm) e Re e Os (em ppb), juntamente com razões isotópicas iniciais relativas a amostras selecionadas da Província do Alto Paranaíba e de carbonatitos dos complexos de Juquiá e Lages.

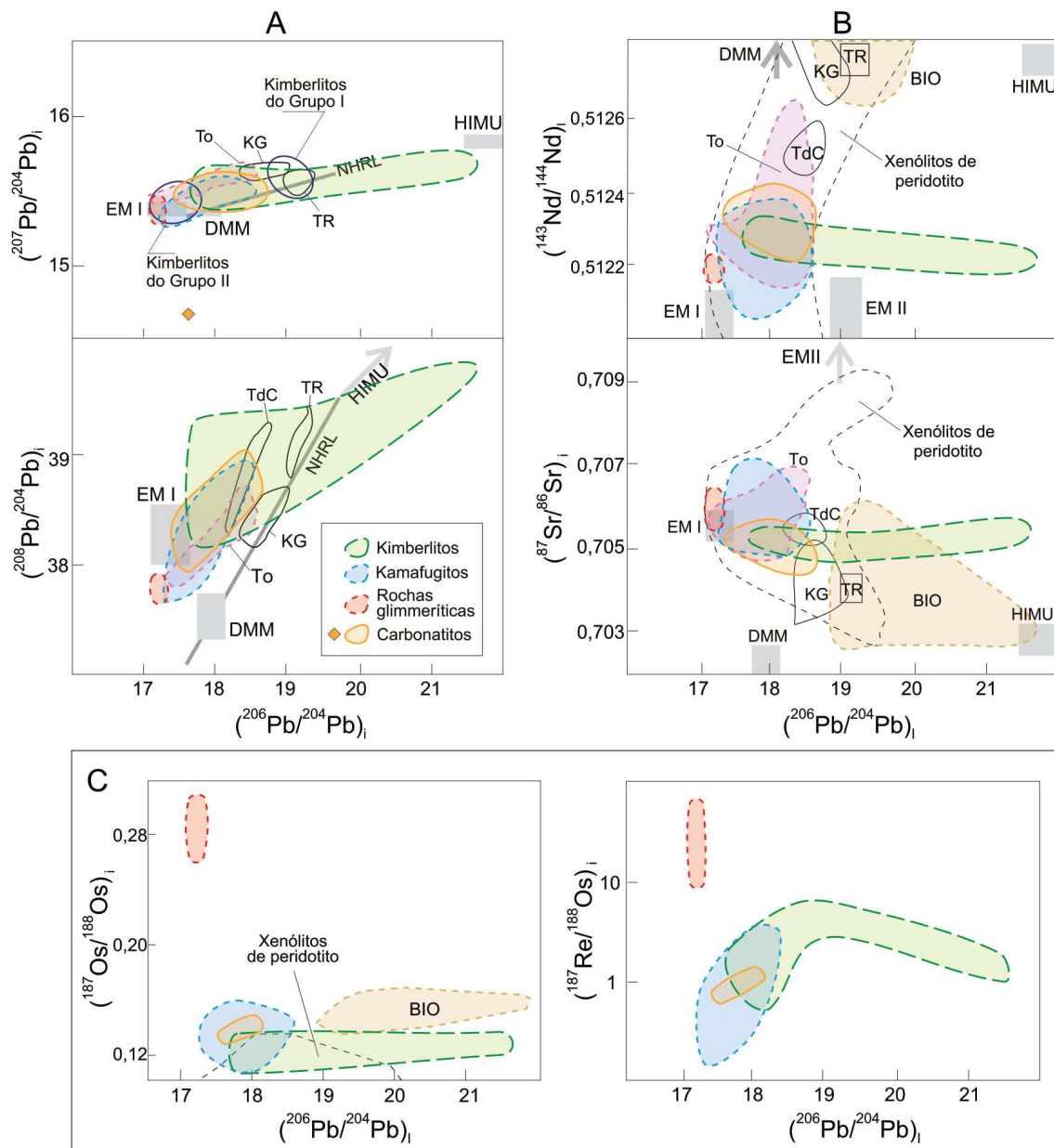
	Limeira		Três Ranchos		Pântano			Salitre	Santa Rosa	Veridiana	Canas
<i>Kimberlito</i>									<i>Glimmerito</i>		
ppm											
Rb	114	94	48	38	183	124	21,1	132	333	1161	144
Sr	2540	2215	1811	2927	2029	2267	1450	1070	1668	1771	1632
Sm	30,3	42	23,5	43	24,9	25,6	20,0	42,9	22	22	22,2
Nd	224,6	312	208,4	348	195,1	186	116,5	324,8	160	162	165
Pb	11	15	19,5	13	9,2	12	13	13,2	23,2	16,4	17,4
U	4	28	7,1	8	6,4	18	8,2	11,4	4,3	4,8	4,3
Th	23	41	29,6	42	25,4	40	25	30,9	18,2	20,9	20,9
ppb											
Re	0,418	0,315	1,992	0,2173	0,2170	0,3347	0,7192	1,3135	1,101	6,33	2,23
Os	1,612	1,221	1,982	1,2624	0,8080	1,1646	1,9271	1,4295	0,518	0,582	0,609
<sup>187</sup> Re/ <sup>188</sup> Os	1,334	1,2313	4,845	0,6227	1,2960	1,3344	1,8619	4,4295	10,46	54,14	18,07
Razões iniciais											
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0,70528	0,70543	0,70493	0,70514	0,70532	0,70540	0,70541	0,70505	0,70564	0,70624	0,70595
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	0,51225	0,51222	0,51228	0,51227	0,51225	0,51220	0,51230	0,51223	0,51219	9,51218	0,51218
<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	17,84	21,48	18,67	18,11	17,84	21,44	17,86	19,35	17,22	17,24	17,24
<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	15,49	15,66	15,53	15,51	15,47	15,74	15,61	15,58	15,39	15,41	15,40
<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	38,25	39,73	38,18	38,61	39,21	39,67	38,92	38,40	37,78	37,76	37,81
<sup>187</sup> Os/ <sup>188</sup> Os	0,113338	0,12679	0,12138	0,11986	0,12618	0,12861	0,11721	0,12456	0,27471	0,30452	0,26677
	Limeira	Três Ranchos		Presidente Olegário				Lages	Juquiá	Lages	
<i>Kamafugito</i>									<i>Carbonatito</i>		
ppm											
Rb	153	219	294	176	124	106	120	77	4	3,5	
Sr	1162	1570	2995	1815	1823	1907	1234	1881	1700	8057	
Sm	20,3	23,0	33,5	29,8	28,1	21,8	16,0	9,7	31,5	376	
Nd	148,3	177,8	259	231	213	147	117	63	164	2184	
Pb	13	15	14	17,6	14,8	9,3	7,6	20,3	10,6	29	
U	5,2	5,0	5,0	6,4	5,6	3,3	3,6	6,39	4,2	23	
Th	25	20	21	34,7	27,7	14,6	15,0	18,3	19,1	67	
ppb											
Re	0,3845	0,0438	0,0645	0,131	0,068	0,421	0,061	0,170	0,183	0,061	
Os	0,7001	0,1229	0,8434	0,353	0,381	1,205	1,760	0,278	0,587	0,230	
<sup>187</sup> Re/ <sup>188</sup> Os	2,6487	1,7217	0,3569	1,794	0,885	1,681	0,167	2,996	0,911	1,2994	
Razões iniciais											
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0,70506	0,70507	0,70686	0,70591	0,70549	0,70582	0,70524	0,70519	0,70556	0,70596	
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	0,51235	0,51225	0,51209	0,51223	0,51227	0,51223	0,51230	0,51236	0,51246	0,51210	
<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	18,28	18,03	17,60	17,9	17,39	18,01	17,39	18,04	17,60	18,05	
<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	15,51	15,51	15,51	15,46	15,37	15,55	15,39	15,52	15,44	15,43	
<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	38,61	38,63	38,33	37,91	37,76	38,42	37,82	38,30	38,00	38,53	
<sup>187</sup> Os/ <sup>188</sup> Os	0,12679	0,13313	0,12743	0,15440	0,12485	0,11451	0,14217	0,1289	0,12718	0,1305	

**Fonte:** dados extraídos de Speziale *et al.*, no prelo-202?). Consultar tabela 5 desses autores, além de Carlson *et al.* (1996) e Bizzi e Araújo (2005).

## 8.7. Isótopos de Re e Os

Dados para esses isótopos são escassos, disponíveis em pequeno número de trabalhos (p. ex., Bizzi *et al.*, 1994, 1995; Carlson *et al.*, 1966; Araújo *et al.*, 2001; Bizzi e Araújo, 2005; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2007a) e praticamente limitados às rochas máficas-ultramáficas altamente potássicas de afinidade kamafugítica-kimberlítica da Província Alcalina do Alto Paranaíba e, ainda, às carbonatíticas dos complexos de Juquiá e Lages (Tabela 8.17).

Vistos no conjunto, os diversos tipos petrográficos silicáticos da Província do Alto Paranaíba e carbonatitos associados caem no campo dos complexos alcalino-carbonatitos brasileiros do Neocretáceo, que contém os campos de todas as rochas da Bacia do Paraná (lavas toleíticas



**Figura 8.20.** Representação gráfica de amostras relativas à Província do Alto Paranaíba. A) Razões isotópicas iniciais  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$ . B)  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  e  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$ . C)  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  e  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  vs.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$  (extraída de Gomes *et al.*, 2018a; os dados estão disponíveis em Speziale *et al.*, no prelo-202?). Fontes de dados: kimberlitos do Grupo I e Grupo II, basaltos de ilhas oceânicas (BIO) e peridotitos mantélicos (Smith, 1983; Smith *et al.*, 1985; Clark *et al.*, 1991); toleítos do Paraná (não contaminados com alto  $\text{TiO}_2$ , Comin-Chiaramonti *et al.*, 1997). Abreviações: como nas figuras 8.18 e 8.19.

e alcalinas-carbonatíticas eocretácicas, cf. Figuras 8.18A e 8.20A). Particularmente, as rochas dessa província se estendem desde os campos dos reservatórios mantélicos EM I e DMM a EM II, além de superpor o das vulcânicas de Tristão da Cunha (Figura 8.20B). Neste último diagrama observa-se também que a grande maioria das rochas da província, exceção feita a alguns kimberlitos que apresentam características menos radiogênicas em Nd quando comparados aos kimberlitos do Neocretáceo de Gideon (Davies *et al.*, 2001), por exemplo – caem no campo dos xenólitos peridotíticos.

À exceção dos glimmeritos, que contêm os valores mais altos para  $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$  e  $(^{187}\text{Re}/^{188}\text{Re})_i$  (Figura 8.20C), não há uma clara distinção para os demais tipos litológicos da província ainda que os dados para  $(^{187}\text{Re}/^{188}\text{Re})_i$  mostrem grande dispersão. Kimberlitos possuem teores de Re entre 0,32-1,99 ppb e Os entre 0,81-1,98 ppb, com valores médios, respectivamente, de  $0,69 \pm 0,64$  ppb e  $1,43 \pm 0,40$  ppb. As razões iniciais variam dentro de limites estreitos, 0,11 a 0,13, com valor médio de  $0,122 \pm 0,005$ . Kamafugitos exibem concentrações de Re no intervalo 0,06-0,38 ppb, com média de  $0,156 \pm 0,140$  ppb, e de Os entre 0,12-1,76 ppb, com média de  $0,672$  a  $0,526$  ppb. As razões iniciais oscilam entre 0,11 e 0,15, com valor médio de  $0,134 \pm 0,013$ .

Idades-modelo Os ( $T^{\text{RD}}$ ) situam-se no intervalo 1,39-1,64 Ga, o qual define a idade mínima Re para o protólito da região fonte (Bizzi e Araújo, 2005), e apontam para um evento mais antigo em relação às idades-modelo Nd ( $0,99 \pm 0,10$  Ga) obtidas para a Província do Alto Paranaíba.

## 8.8. Isótopos de Hf

Composição isotópica de Hf é somente disponível na literatura para concentrados de baddeleyíta procedentes de rochas cumuláticas (magnetitos e apatitos) de Catalão I e para rochas do complexo de Jacupiranga. Dados reportados por Guarino *et al.* (2017) indicaram um pequeno intervalo de variação para a razão inicial  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  de 0,28248-0,28249 e  $\epsilon\text{Hf}_i$  de -10,3 a -10,9 em Catalão I. Esses valores são bem diferentes quando comparados aos dos xenólitos de peridotitos presentes em kamafugitos da Província de Goiás (Carlson *et al.*, 2007), confirmando, dessa forma, a heterogeneidade do manto na região do Alto Paranaíba. Para Jacupiranga, dados de Chmyz *et al.* (2019) indicaram amplo intervalo composicional para a razão inicial  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  e  $\epsilon\text{Hf}_i$ , respectivamente, de 0,282253 a 0,282771 e de -18,36 a  $< -0,05$ . Clinopiroxenitos, ijolitos e dunitos apresentaram valores mais elevados de isótopos de Hf, enquanto rochas com feldspato e lamprófiros teores menores, sugerindo, dessa forma, que na região do Arco de Ponta Grossa significativas heterogeneidades mantélicas estejam igualmente presentes em escala local.

## 8.9. Gases Nobres

Em contraste com a relativa abundância de resultados provenientes de rochas do manto suboceânico, amostras do ambiente subcontinental foram até então pouco analisadas, sendo as informações sobre as ocorrências mundiais carbonatíticas em número muito reduzido. Em especial, dados disponíveis sobre as brasileiras estão restritos a dois complexos, o eocretácico de Jacupiranga e o neocretácico de Tapira (Sasada *et al.*, 1997), além de discutidos no trabalho de síntese sobre os carbonatitos do sistema Paraná-Angola-Namíbia (PAN) publicado por Comin-Chiaramonti *et al.* (2007a). Análises foram feitas em concentrados minerais de calciocarbonatitos, apatita e forsterita de Jacupiranga e apatita de Tapira, e envolveram os elementos Ar, He, Ne, Kr e Xe. Um resumo das conclusões alcançadas é fornecido no trabalho dos últimos

autores, sugerindo que: 1) apatitas de ambos os complexos estão no mesmo campo de variação de possíveis fontes de derivação mantélica (p. ex., HIMU e MORB); 2) essas fontes seriam enriquecidas em F; 3) a fonte de C dos carbonatitos não é resultante de processos de subducção, estando muito provavelmente associada com modelo de fracionamento de C-O a partir de fontes derivadas do manto.