

PETROLOGÍA Y GEOQUÍMICA DEL MAGMATISMO ALCALINO DE LA ZONA NOROESTE DEL ALTIPLANO PERUANO (DEPARTAMENTO DE PUNO)

Miriam MAMANI ¹, Ivanoff IBARRA ¹, Gabriel CARLIER ² & Michel FORNARI ³

¹ Convenio UNSAAC-IRD y Facultad de Ingeniería Geológica y Geografía, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), Cusco. Presentemente: Abt. Geochemie, GZG, Universität Göttingen, Goldschmidtstr. 1, 37077 Göttingen, Alemania. E-mail: mmrian@gwdg.de

² IRD y Laboratorio de Mineralogía del Museo Nacional de Historia Natural (MNHN), 61 rue Buffon, 75005 París, Francia. E-mail: gabi@mnhn.fr

³ IRD y Laboratoire de Géochronologie, UMR 6526 Géosciences Azur, Université de Nice - Sophia Antipolis, 06108 Nice cedex 02, Francia. E-mail: Michel.Fornari@unice.fr

RESUMEN

Las rocas magmáticas del noroeste de Altiplano peruano (áreas de Huancané, Azángaro, Ayaviri, Ocuvi y Llalli; departamento de Puno) presentan distintas características mineralógicas y geoquímicas. En particular, el intervalo Oligoceno superior - Mioceno inferior (28-15 Ma) estuvo marcado por un magmatismo alcalino caracterizado por asociaciones sódicas, potásicas y ultrapotásicas. Este magmatismo se manifestó a lo largo de zonas de fracturas de importancia litosférica ubicadas entre el borde este de la Cordillera Occidental y el Altiplano. Las firmas geoquímicas sugieren que estos magmas alcalinos se formaron a partir de un manto (litósfera antigua) modificado por procesos de subducción durante un período de extensión en el tras-arco.

ABSTRACT

The magmatic rocks of the northwestern region of the Peruvian Altiplano (Huancané, Azángaro, Ayaviri, Ocuvi and Llalli areas; department of Puno) present distinct mineralogical and geochemical characteristics. In particular, the Late Oligocene - Early Miocene interval (28-15 Ma) was marked by an alkaline magmatism characterized by sodic, potassic and ultrapotassic assemblages. This magmatism developed along lithospheric-scale fault zones located between the northeast side of the Cordillera Occidental and the Altiplano. The geochemical signatures suggest that these alkaline magmas formed by partial fusion of a subduction-modified mantle (old lithosphere) during a period of backarc extension.

INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se ubica en el tras-arco de la Cordillera de los Andes, es decir al noreste del arco magmático principal (Fig. 1). En la zona de estudio se tiene un conjunto de rocas magmáticas terciarias que presentan diferentes variedades petrográficas y geoquímicas (Fig. 2). Estas rocas están alineadas en una dirección NO-SE y a nivel del alineamiento de estos cuerpos magmáticos se formaron cuencas sedimentarias. Este magmatismo corresponde al tras-arco y probablemente al borde oeste del Cratón Brasileño y está ligado a fallas profundas, las mismas que han controlado la evolución de las cuencas sedimentarias. Este magmatismo es posterior al magmatismo eoceno (constituido por los gabros y dioritas del batolito Andahuaylas-Yauri) y al magmatismo triásico (conformado por granodioritas y andesitas basálticas del Grupo Mitu).

Este magmatismo se presenta bajo tres modalidades (las unidades con mejor expresión se encuentran entre paréntesis):

- **Intrusivos** (macizos de Colque; Pucara, Cupi; stocks de Livichaco y Pichacane).
- **Cuerpos subvolcánicos** (domos de Cascada, Veluyo, Ocuvi, necks de Millaccase, Chignaya, Huayta Huacho; diques)
- **Rocas volcánicas** (coladas Ocuvi y brechas volcánicas relacionadas; depósitos piroclásticos del evento Ocuvi).

La edad de emplazamiento, Oligoceno - Mioceno (28-15 Ma), se basa sobre criterios estratigráficos y dataciones isotópicas por el método K-Ar. La evolución y las características composicionales son demostradas por normas petrológicas y geoquímicas.

Este magmatismo está relacionado a accidentes estructurales. En este trabajo se aportan nuevos datos

sobre los aspectos básicos de este magmatismo, sus características geoquímicas y las condiciones de su emplazamiento, ya que estas rocas son de tipo alcalino y se formaron en zonas litosféricas sujetas a esfuerzos extensionales. Las fuentes potenciales que pudieron haber contribuido a generar sus características geoquímicas son la astenósfera, el manto litosférico, o, por asimilación, la corteza. Hacia el este y sur de este conjunto de rocas se encuentra el frente del arco subalcalino normal y el ante-arco donde también afloran rocas y sedimentos de similar edad (por ejemplo las formaciones Tacaza, Moquegua y Huaylillas en el sur del Perú; y las formaciones Azapa, Oxaya, Zapahuira y Diabolo en el norte de Chile).

MARCOGEOLÓGICO

En la zona de estudio afloran unidades geológicas del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico (Ibarra et al., este volumen, que proporciona un mapa geológico del área de trabajo). Estas unidades sedimentarias han sido intruidas por macizos y stocks datados entre 28 y 15 Ma. También existen domos, necks, diques, coladas, ignimbritas, brechas volcánicas y depósitos volcano sedimentarios cuyas edades se encuentran entre 28 y 15 Ma (Tabla 1).

Las fallas existentes en la zona de estudio han tenido varios juegos, principalmente de rumbo, durante el Oligoceno y el Mioceno, no solamente controlando la evolución de las cuencas sedimentarias de Tinajani, Macari y Descanso, sino también controlando el emplazamiento de cuerpos ígneos. Evidencias de movimientos normales sinestrales más recientes indican que la actividad de estas fallas perduró.

Los trabajos más recientes corresponden a Audebaud & Vatin-Pérignon (1974) y Laubacher (1978), quienes indican que rocas ultrapotásicas como basanitas (29.3 ± 0.6 Ma) y gabros (28.02 ± 1.5 Ma) ocupan grandes superficies alrededor de Ayaviri y Llalli. Palacios et al. (1993) y De La Cruz (1995) estudiaron la estratigrafía de la región del Altiplano. Bonhomme et al. (1985), Carlier et al. (1996), Carlier & Lorand (1997), y Carlotto (1998), mencionan que en el sur del Perú el límite entre Oligoceno inferior y Oligoceno superior (28 Ma) está marcado por un importante evento magmático alcalino. Flores & Rodríguez (1999) indican que se produjo una importante sedimentación en la cuenca Tinajani entre el Oligoceno superior y Mioceno medio, controlada por fallas activas. Boudesseul et al. (2000) indican que las ignimbritas Ocuvi son correlacionables con otras que afloran en las zonas de Ayaviri, Descanso,

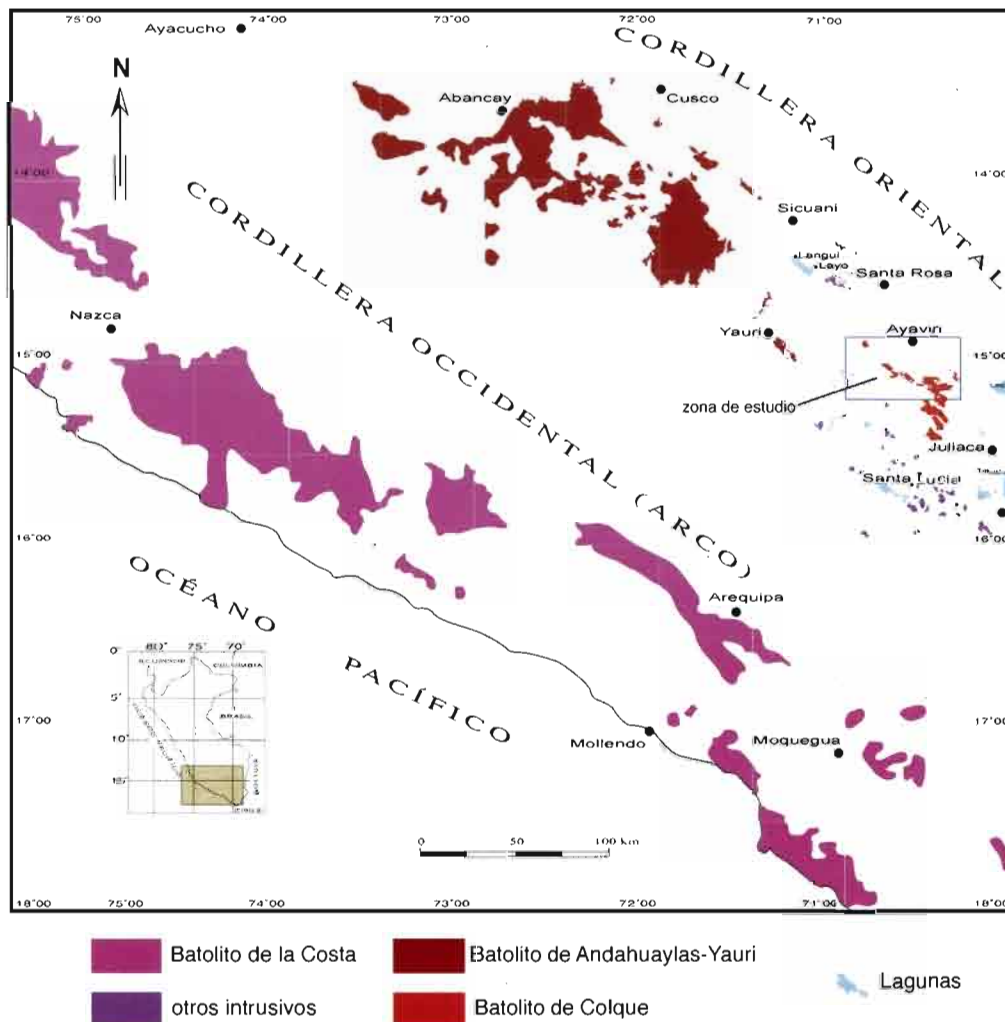


Fig. 1: Ubicación de la zona de estudio en el sur del Perú y en el contexto magmático regional

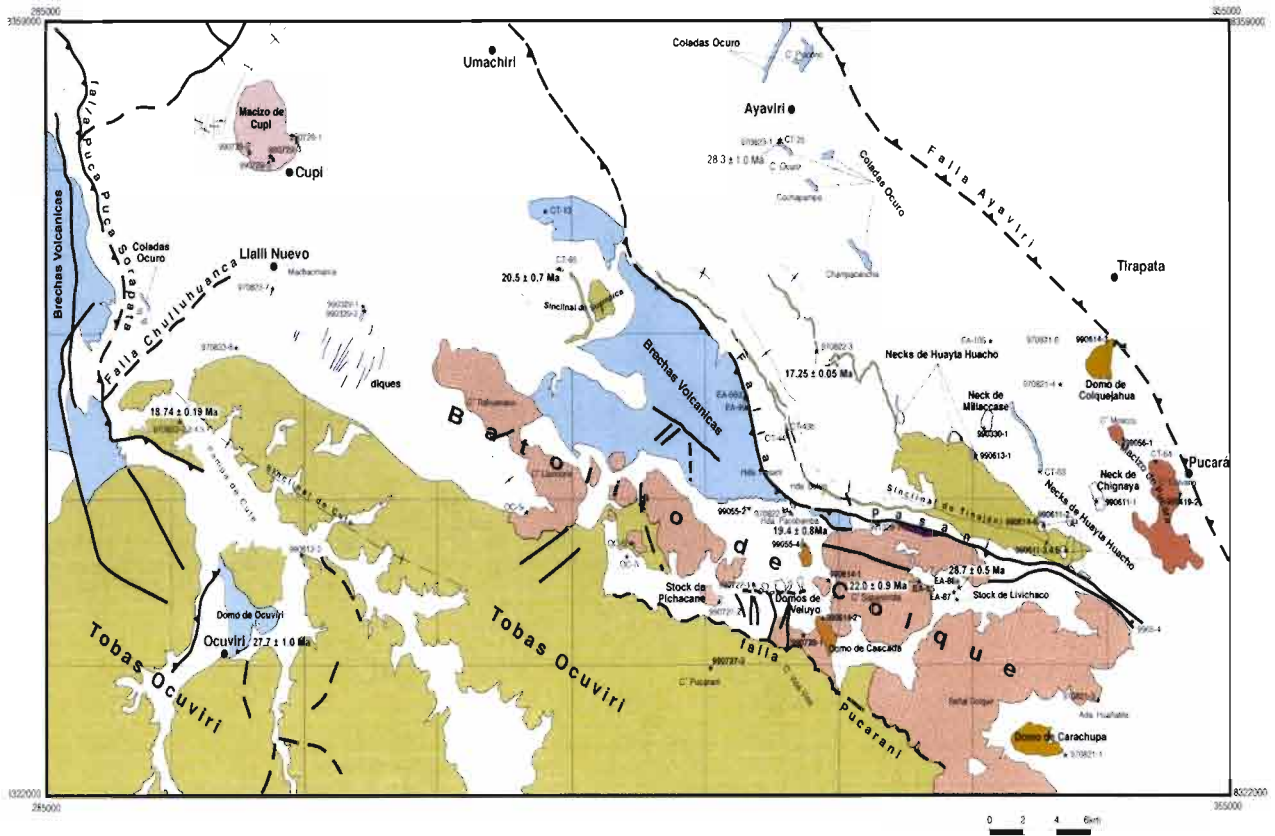


Fig. 2: Mapa de afloramientos de rocas magmáticas en la zona de estudio (extraído de la Fig. 1 de Ibarra et al., 2004 [este volumen]).

TABLA 1
DATACIONES ISOTÓPICAS DE ROCAS PLUTÓNICAS Y VOLCÁNICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

N° de Muestra	Localización	Latitud	Longitud	Afloramiento	Tipo de roca	Método	Material	Edad (Ma)
990729-1**	C° Coroshupa	70° 51' 36"	14° 53' 19"	Macizo de Cupi	diorita	K-Ar	Hn	29 ± 1
EA 87*	C° Livichaco	70° 29' 20"	15° 05' 11"	Stock de Livichaco	gabro	K-Ar	Fk	28.70 ± 1.50
EA 84*	Hda. Collpane	70° 31' 13"	15° 04' 00"	Stock de Livichaco	gabro	K-Ar	Hb	28.20 ± 1.50
EA 99*	C° Pahuani	70° 36' 27"	15° 00' 30"	Coladas Monterino	traquita	K-Ar	Rt	28.30 ± 1.0
EA 96d*	C° Pahuani	70° 36' 27"	15° 00' 30"	Coladas Monterino	traquiandesita	K-Ar	Rt	26.9 ± 1.0
990612-4**	Ocurivi	70° 54' 04"	15° 06' 38"	Domo de Ocurivi	traquibasalto	K-Ar	Rt	27.7 ± 1.0
EA 85*	C° Sapanccota	70° 31' 00"	15° 05' 07"	Macizo de Colque	granodiorita	K-Ar	Rt	22.0 ± 1.1
EA 85*	C° Sapanccota	70° 31' 00"	15° 05' 07"	Macizo de Colque	granodiorita	K-Ar	Fk	23.1 ± 1.1
EA 85*	C° Sapanccota	70° 31' 00"	15° 05' 07"	Macizo de Colque	granodiorita	K-Ar	Bi	19.0 ± 1.1
OC-51**	C° Vellune	70° 44' 09"	15° 03' 05"	Macizo de Colque	granodiorita	Ar-Ar	Bi	17.5 ± 0.1
99055-4**	Pacobamba	70° 34' 49"	15° 04' 02"	Domo de Cascada	riolita	K-Ar	Bi	19.4 ± 0.8
EA 89*	Tinajani			Ignimbritas Ocurivi	riolita	K-Ar	Fk	18.0 ± 0.6
EA 89*	Tinajani			Ignimbritas Ocurivi	riolita	K-Ar	PI	16.3 ± 0.9
EA 89*	Tinajani			Ignimbritas Ocurivi	riolita	K-Ar	Bi	16.9 ± 1.1
EA 89*	Tinajani			Ignimbritas Ocurivi	riolita	K-Ar	Rt	14.7 ± 0.7
970823-2**	C° Ccaccate	70° 34' 49"	15° 04' 02"	Ignimbritas Ocurivi	toba riolítica	Ar-Ar	Bi	18.74 ± 0.19
CT 65**	Sunimarca	70° 55' 48"	15° 00' 38"	Ignimbritas Ocurivi	toba riolítica	K-Ar	Bi	20.5 ± 0.7
990611-1**	C° Chignaya	70° 25' 14"	15° 03' 05"	Neck de Chignaya	traquiandesita	Ar-Ar	Hn	15.82 ± 0.77

Rt = roca total, Hn = hornblenda, Fk = feldespato potásico, Bi = biotita, PI = plagioclasa

Fuente de datos

* = Bonhomme (1985)

** = Convenio UNSAAC-IRD (inédito)

Condorama y con algunas zonas del sur de Perú. Mamani & Ibarra (2000) mencionan la existencia de un corredor estructural magmático de tipo alcalino ligado a fallas profundas.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS DE LAS ROCAS PLUTÓNICAS, SUBVOLCÁNICAS Y VOLCÁNICAS

Intrusivos

Macizo de Cupi

Basado en sus características petrológicas y

geoquímicas, tres tipos de rocas intermedias son distinguidas (Fig. 3; Tablas 2 y 3):

Monzodioritas

Los minerales mayores que forman la roca (Foto 1) son plagioclasa (oligoclasa a andesina), augita, ortosa, biotita, cuarzo, magnetita. Apatito, circón y esfena son minerales accesorios y la epidota es alteración de la augita.

Dioritas

Son rocas que tienen como componentes esenciales: plagioclasa (oligoclasa), cuarzo, hornblenda, ortosa y minerales opacos (magnetita). Esfena, apatito son

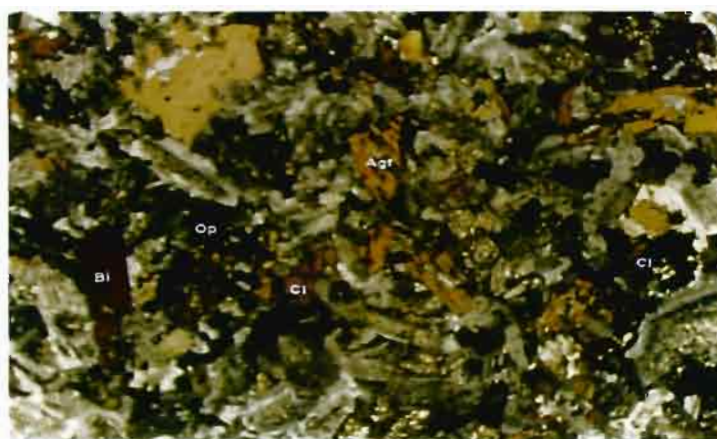


Foto 1: Facies petrográfica de una monzodiorita del Macizo de Cupi

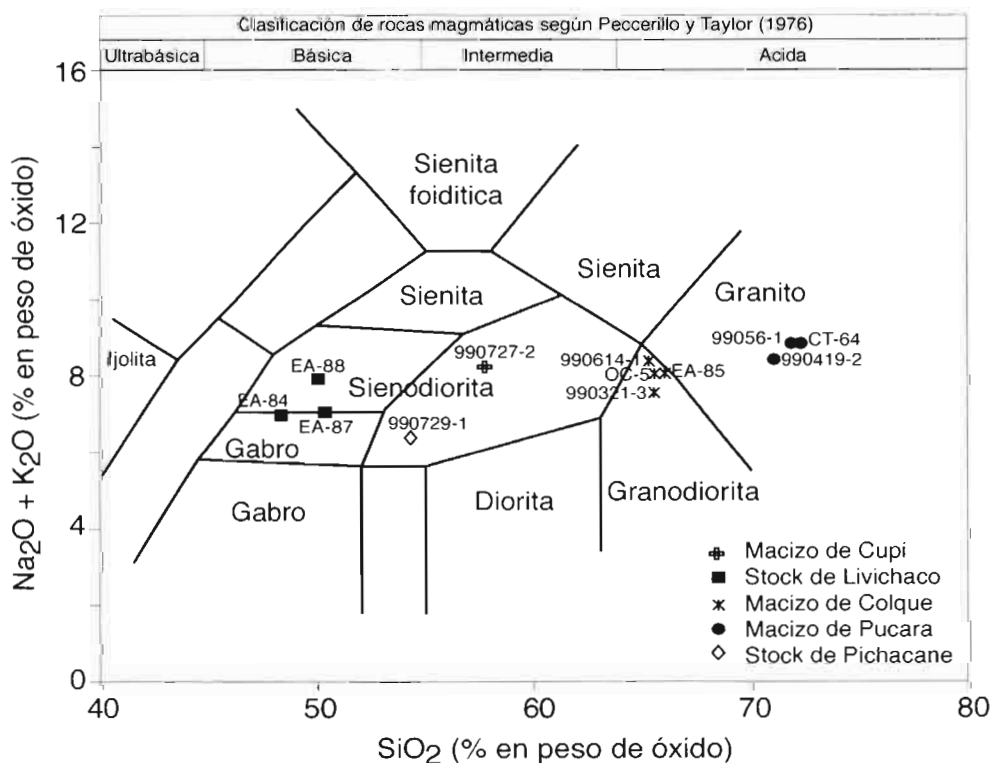


Fig. 3: Ploteo de las rocas plutónicas estudiadas en el diagrama TAS (Wilson, 1989)

minerales accesorios. La calcita y sericita son minerales secundarios. Una característica importante de estas rocas es que los fenocristales de hornblenda muestran zonación y sus bordes están corroídos (Foto 2).

Monzonitas

Son compuestas por plagioclasa (andesina), augita, biotita, ortosa y minerales opacos como minerales principales. El circón y apatito son sus minerales accesorios.

La secuencia de cristalización para estas rocas sería: apatito y circón como los primeros; seguidos por la augita, hornblenda, biotita, plagioclasa, ortosa y por último los minerales opacos (magnetitas).

Stock de Livichaco

Por sus características petrológicas y químicas se trata de un tipo de sienita feldespatoídica, que se conoce como «shonkinita» (Foto 3; Fig. 3; Tablas 2 y

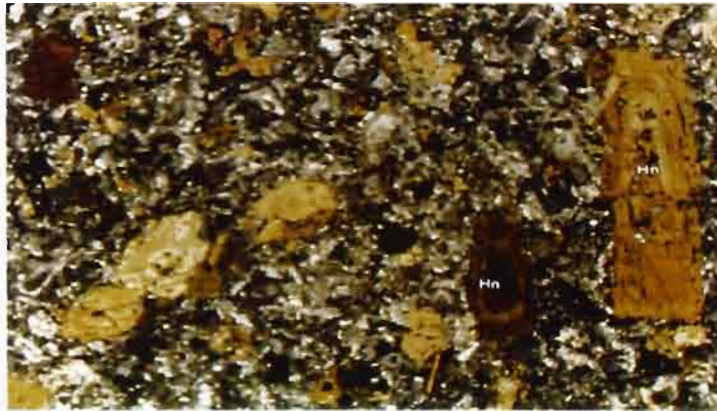


Foto 2: Facies petrográfica de una diorita del Macizo de Cupi

TABLA 2
ANÁLISIS QUÍMICOS DE ELEMENTOS MAYORES DE LAS ROCAS PLUTÓNICAS.

Afloramiento	Macizo Cupi	Stock de Livichaco			Macizo de Colque				Macizo de Pucará			S. Pichacani
Roca	diorita	shonkinitas			granodioritas				granitos			diorita
Muestra	990729-1	EA 84	EA 87	EA 88	OC-51	EA_85	990614-1	970821-3	PUM-2	CT-64	99056-1	990727-2
SiO2 (% peso)	53.96	47.31	48.67	49	65.21	65.18	65.11	64.95	70.2	71.41	71.41	57.18
TiO2	1.04	1.14	1.43	1.37	0.62	0.61	0.65	0.72	0.43	0.42	0.41	0.94
Al2O3	18.47	13.38	15.02	14.86	15.99	15.49	15.79	15.24	15.29	15.53	15.27	17.4
Fe2O3	8.41	9.9	10.25	10.17	4.43	3.58	3.52	5.17	2.03	1.18	1.7	7.83
MnO	0.25	0.18	0.19	0.17	0.02	0.03	0.04	0.12	0.01	0	0	0.15
MgO	2.65	5.8	4.45	4.88	1.76	1.76	1.79	1.95	0.53	0.39	0.48	2.52
CaO	7.96	10.76	6.95	6.77	3.1	3.46	3.49	3.29	1.54	1.06	1.41	4.65
Na2O	3.66	1.64	1.87	3.29	4.04	4.25	4.48	3.23	3.6	3.73	3.68	4.73
K2O	2.68	5.18	4.95	4.41	3.99	3.70	3.92	4.18	4.70	4.97	5.07	3.48
P2O5	0.5	0.68	1.04	0.97	0.22	0.28	0.21	0.34	0.19	0.12	0.08	0.39
Total	100.0	99.5	98.5	98.7	100.0	99.7	100.4	99.9	100.0	100.0	99.9	100.5
Norma CIWP												
Cuarzo (% vol)	1				16	16	14	19	27	28	26	1
ortosa	16		29	26	24	22	23	25	28	29	30	21
albita	31		16	19	34	36	38	27	30	32	31	40
anortita	26	14	18	13	14	12	11	14	7	5	7	16
nefelina		8		5								
leucita		15										
kaliofilita		7										
diópsido	9		9	13	0	3	4					4
hiperstena	11		6		9	7	7	10	4	2	3	12
olivino		20	10	14								
corindón								0	2	2	1	
monticellita		11										
magnetita	2	2	3	3	1	1	1	1	1	0	0	2
ilmenita	2	2	3	3	1	1	1	1	1	1	1	2
apatito	1	1	2	2	0	1	0	1	0	0	0	1
suma	98	80	95	96	99	98	99	98	99	99	99	98

3). Sus minerales principales son augita, diopsido, ortosa, hornblenda, biotita, nefelina y minerales opacos (magnetita). Apatito y esfena son los minerales accesorios. Epidota y clorita son alteración de los minerales ferromagnesianos mientras que la sericita es producto secundario de los feldespatos.

El orden de cristalización de sus minerales sería: apatito, esfena, augita, hornblenda, biotita, magnetita, ortosa y nefelina.

Macizo de Colque

Este cuerpo plutónico homogéneo consiste de granodiorita (Foto 4; Fig. 3, Tablas 2 y 3). Sus minerales principales son: plagioclasa (andesina), cuarzo, ortosa, hornblenda, biotita y minerales opacos (magnetita) y muscovita. Están acompañados por minerales accesorios como apatito, esfena, circón. La calcita, sericita y arcillas aparecen como productos secundarios de alteración de la plagioclasa y ortosa.

TABLA 3
ANÁLISIS QUÍMICOS DE ELEMENTOS TRAZA DE LAS ROCAS PLUTÓNICAS.

Afloramiento	Macizo Cupi	Stock de Livichaco			Macizo de Colque				Macizo de Pucará			S. Pichacane
Roca	diorita	shonkinitas			granodioritas				granitos			diorita
Muestra	990729-1	EA 84	EA 87	EA 88	OC-51	EA 85	9906 14-1	9708 21-3	PUM 2	CT 64	9905 6-1	990727-2
Elementos compatibles												
Co (ppm)	15	36	29	29	18	9	9	14	3	2	3	15
Ni	0	30	16	26	14	18	15	16	2	2	1	3
Cr	2	69	13	29	28	30	31	29	5	7	6	6
Sc		22	23	23				7				
V	152	260	315	311	77	86	81	87	28	28	27	132
Elementos incompatibles												
Th (ppm)	4.3				14.8	15.0	16.2	17.2	14.7	16.3	16.7	9.5
Zr	220	135	147	157	193	183	179	223.2	240	258	236	242
Nb	14	8.9	9.3	9.8	15	13.9	13	17.1	8	8	8	14
Ta	0.8				1.2	1.2	1.2	1.5	0.8	0.8	0.8	1.0
Hf	4.6				4.8	4.5	4.8	5.4	6.4	7.2	6.4	5.6
U	1.1				3.2	2.9	3.6	3.8	2.3	5.6	2.3	1.8
Cs	0.7				2	0.7	1.2	1.9	2.2	2.2	2.2	1.8
Ba	877	1405	1676	1157	1157	986	851	1155	1280	1182	1203	777
Sr	1132	1317	957	1240	718	691	657	659.9	321	315	301	700
Rb	79	149	135	113	107	107.4	84	162.0	147	169	170	100
Pb	7				14	9.9	7	9.8	29	33	29	9
Y	30	22.6	27.4	26.9	14	12.6	12	14.9	6	7	6	34
Elementos de tierras raras												
La (ppm)	34	23.4	27.6	28.8	45	49.3	42	47.0	47	59	54	40
Ce	72	47.6	60.7	60.7	85	96.0	80	85.2	87	109	93	83
Pr	8.7	6.0	7.9	7.8	9.5	9.5	9	9.2	9.7	13	10.5	9.7
Nd	34	26.2	33.6	34.1	34	34.8	31	33.4	35.0	46.0	36.0	39.0
Sm	6.8	6.1	7.7	7.9	5.5	5.2	4.9	5.4	4.9	7.7	5.3	7.6
Eu	2.2	1.9	2.3	2.2	1.5	1.4	1.4	1.6	1.3	1.5	1.2	1.9
Gd	6	5.2	6.4	6.2	3.7	3.6	3.4	4.1	3.0	4.7	2.9	6.2
Tb	0.9	0.7	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.6	0.3	1.0
Dy	5.1	4.4	5.2	5.2	2.6	2.6	2.4	2.8	1.4	2.1	1.5	5.5
Ho	1.0				0.5	0.5	0.4	0.5	0.2	0.3	0.2	1.2
Er	2.7	2.1	2.6	2.6	1.2	1.2	1.2	1.4	0.5	0.7	0.5	3.0
Tm	0.4	0.3	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.5
Yb	2.9	1.9	2.4	2.4	1.1	1.0	1.1	1.4	0.3	0.5	0.4	3.1
Lu	0.5	0.3	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.5
Relaciones												
Sr/Nd	33.3	50.3	28.5	36.3	21.1	19.9	21.2	19.8	9.2	6.8	8.4	17.9
Th/Nb	0.3					1.1	1.2	1.0	1.8	2.0	2.1	0.7
Ba/La	25.8	60.0	60.8	40.2	25.7	20.0	20.3	24.6	27.2	20.0	22.3	19.4
La/Sm	5	3.8	3.6	3.6	8.2	9.5	8.6	8.7	9.6	7.7	10.2	5.3

S = stock

ppm = partes por millón

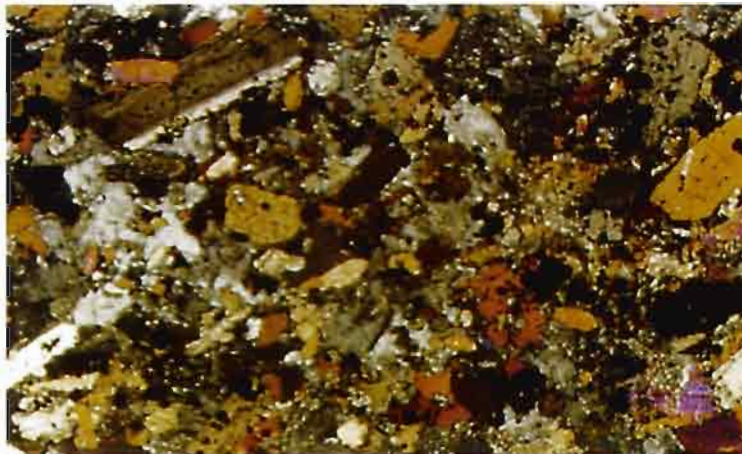


Foto 3: Facies petrográficas de una muestra del Stock de Livichaco

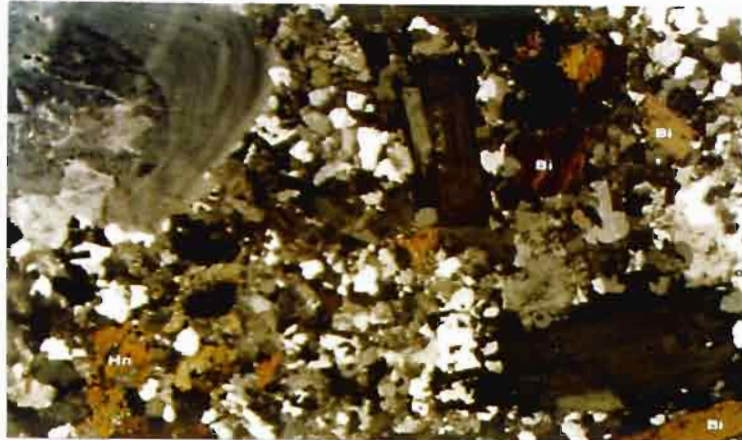


Foto 4: Facies petrográficas de una granodiorita del Macizo de Colque

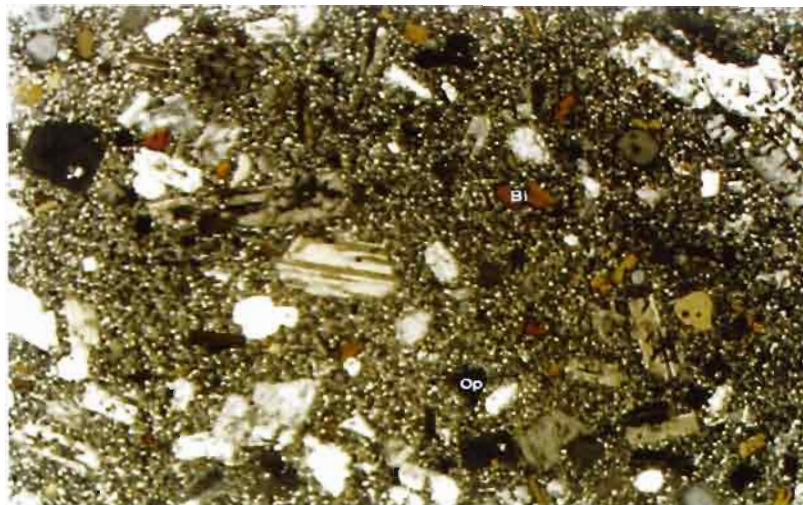


Foto 5: Facies petrográficas de una granito del Macizo de Pucará

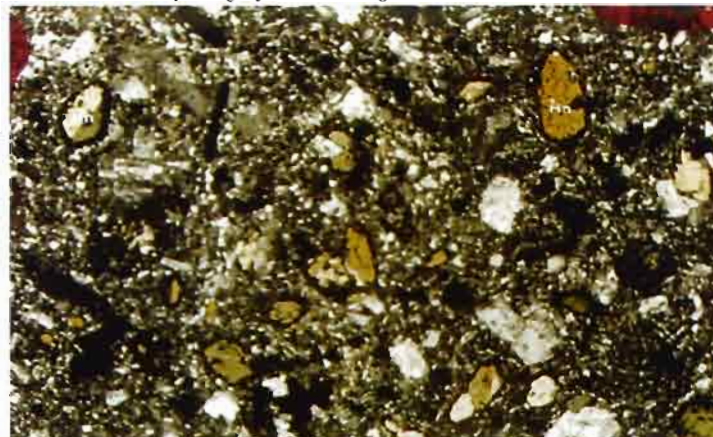


Foto 6: Facies petrográficas de una diorita del Stock de Pichacane

El orden de cristalización de sus minerales son: apatito, circón y esfena primero, seguidos por hornblenda, biotita, plagioclasa, ortosa, muscovita y cuarzo.

Macizo de Pucará

Por sus características petrológicas y geoquímicas este intrusivo está compuesto por granitos (Foto 5; Fig. 3; Tablas 2 y 3). Entre los principales componentes están la ortosa, cuarzo, biotita, plagioclasa (albita, oligoclasa y andesina), y minerales opacos. Apatito y circón figuran como accesorios. La sericita es producto de alteración de las ortosas.

En estos granitos la cristalización empezó con el apatito y circón; luego cristalizaron la biotita, plagioclasa, ortosa, y por último el cuarzo.

Stock de Pichacane

Este stock consiste de dioritas (Foto 6; Fig. 3; Tablas 2 y 3) compuestas por plagioclasa (albita y andesina), hornblenda, cuarzo, ortosa, minerales opacos, apatito, circón. Entre los minerales secundarios se tienen calcita y clorita.

Las relaciones texturales entre los minerales permiten establecer el orden de cristalización siguiente: apatito y circón cristalizaron primero, y luego hornblenda, plagioclasa, ortosa y cuarzo.

Cuerpos subvolcánicos

Domo Ocuvi

Está constituido por lavas traquibasálticas con fenocristales de plagioclasa (oligoclasa y andesina), olivino, clinopiroxeno (augita y diópsido), biotita, minerales opacos (magnetitas). El apatito es accesorio. La matriz está constituida por microlitos y microcristales de plagioclasa, clinopiroxenos y vidrio. El apatito, clinopiroxenos, olivino cristalizaron primero, y luego la biotita y plagioclasa.

Domo de Cascada

Por sus características petrográficas y geoquímicas se trata de riolitas (Fig. 4; Tablas 4 y 5). Presentan fenocristales de cuarzo, sanidina, plagioclasa (oligoclasa) y biotita. Apatito, circón y esfena son minerales accesorios. El vidrio conforma la matriz de la roca.

En estas riolitas el apatito, circón y esfena cristalizaron primero, seguidos de los fenocristales de biotita, plagioclasa, sanidina y cuarzo. Finalmente se solidificó el vidrio.

Necks de Millaccase y Chignaya

Estos pequeños cuerpos volcánicos están

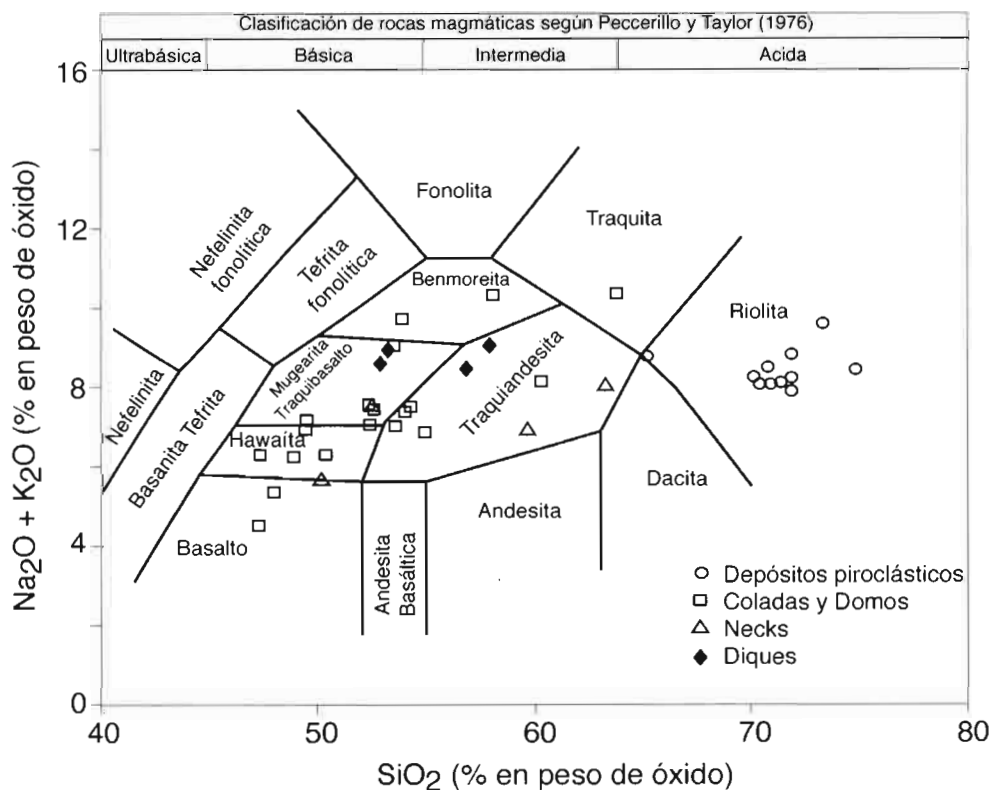


Fig. 4: Ploteo de las rocas volcánicas y subvolcánicas estudiadas en el diagrama TAS (Wilson, 1989)

formados por traquiandesitas (Fig. 4; Tablas 4 y 5). Presentan fenocristales de sanidina, plagioclasa (labradorita), hornblenda, cuarzo y minerales opacos. En la matriz se tienen microlitos de plagioclasa, microcristales de sanidina y vidrio. La sericita se formó como producto de alteración de las plagioclasas.

Los fenocristales de hornblenda, plagioclasa, sanidina y cuarzo cristalizaron primero, y posteriormente los minerales de la pasta; finalmente el vidrio se solidificó.

Neck de Huayta Huacho

De acuerdo a la petrología y geoquímica de su composición (Fotos 7 y 8; Fig. 4; Tablas 4 y 5), se trata de traquiandesitas, con fenocristales de plagioclasa (andesina), olivino, augita, hornblenda y sanidina.

Estos fenocristales se hallan inmersos en una pasta constituida por microlitos de plagioclasa, microcristales de clinopiroxenos y vidrio. La celadonita se tiene como producto de alteración de hornblendas y la calcita es otro mineral secundario.

En esta roca los minerales cristalizaron en el siguiente orden: augita, olivino, plagioclasa y sanidina; posteriormente los minerales de la pasta. Finalmente, el vidrio se solidificó.

Rocas volcánicas

Coladas Ocuero

De acuerdo a sus características petrológicas y geoquímicas, dos tipos principales de rocas básicas son distinguidas (Fig. 4; Tablas 6 y 7).

Traquibasaltos

Son rocas compuestas de fenocristales de plagioclasa (oligoclasa), olivino, clinopiroxenos (augita y diópsido), biotita, sanidina, que se encuentran inmersos en una pasta constituida por microlitos de plagioclasa, clinopiroxenos, sanidina y vidrio. El apatito es su mineral accesorio y la calcita es secundaria.

Traquiandesitas

Estas lavas están formadas por fenocristales de plagioclasa (albita y andesina) y clinopiroxenos (augita, diópsido), que se encuentran en una pasta constituida por microlitos de plagioclasa, microcristales de minerales opacos, clinopiroxeno y vidrio. El apatito figura como accesorio y se tiene calcita como producto de la alteración de los clinopiroxenos.

En estas coladas los primeros minerales en cristalizar fueron el apatito, luego los fenocristales de augita, diópsido, olivino, biotita, plagioclasa y sanidina. Posteriormente cristalizaron los minerales de la pasta; finalmente el vidrio se solidificó.

Depósitos piroclásticos (Ignimbritas Ocuvi)ri

Según sus características petrológicas y químicas son ignimbritas de tipo riódacítico (Foto 9; Fig. 4; Tablas 4 y 5). Están constituidas por fenocristales fragmentados de cuarzo, sanidina, plagioclasa (oligoclasa y andesina), biotita, minerales opacos. Apatito, circón, esfena están como accesorios.

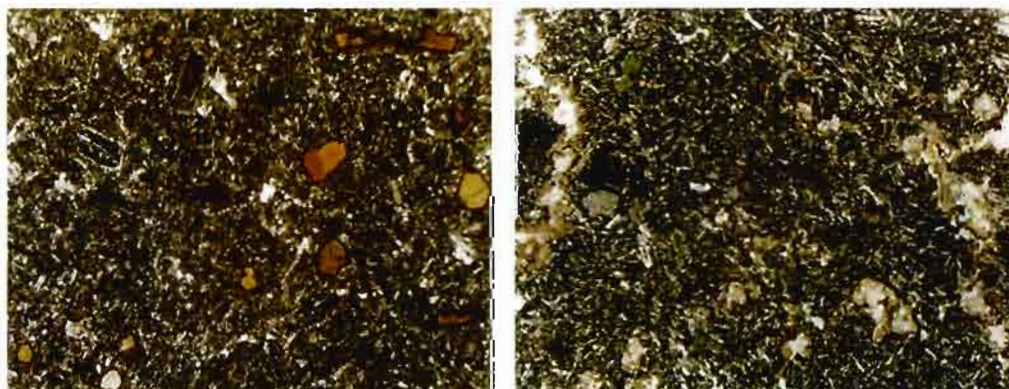
Los pómeceos se encuentran poco soldados (achataados). Se observa en estas ignimbritas muchos fragmentos líticos de traquibasaltos y traquiandesitas. La pasta está constituida por vidrio esferulítico.

Los primeros minerales en cristalizar fueron el apatito, circón, esfena, seguidos por fenocristales de biotita, plagioclasa, sanidina y cuarzo; la pasta vítrea se solidificó al final. Los pómeceos se formaron durante la explosión volcánica.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ROCAS MAGMÁTICAS

Características generales de la serie mágnica

El mayor evento mágnico reconocido en este corredor estructural ubicado en el tras-arco (Ibarra et al., 2004 [este volumen]) es de composición alcalina (Fig. 5) con series sódicas, transicionales, potásicas y ultrapotásicas (Fig. 6), basándose en la relación de



Fotos 7 y 8: Facies petrográficas de traquibasaltos del Huayta Huacho

TABLA 4
ANÁLISIS QUÍMICOS DE ELEMENTOS MAYORES DE LOS NECKS, DOMOS Y DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS.

Afloramiento	N. Millaccase	N. Chignaya	N. Huayta H.	D. Veluyo	D. Cascada	Depósitos piroclásticos (Ignimbritas Ocuvi)								
Roca	traquiandesita	traquiandesita	traquibasalto	traquiandesita	riolita	riodacitas								
Muestra	990330-1	990611-1	990613-1	990727-1	990614-2	CT 65	970821-4	970822-3	970823-2	970823-3	970823-5	990729-9	990729-6	990727-3
SiO ₂ (% peso)	57.56	61.97	48.21	58.39	69.96	70.52	59.95	72.28	69.79	69.21	69.11	68.84	70.06	63.77
TiO ₂	1.06	0.92	1.4	1.04	0.42	0.35	0.55	0.24	0.38	0.38	0.4	0.44	0.41	0.62
Al ₂ O ₃	16.27	16.5	16.46	16.85	14.55	14.54	18.47	14	14.79	14.61	15.31	15.42	15.17	17.96
Fe ₂ O ₃	5.1	4.08	7.45	5.72	2.14	2.13	3.73	1.41	2.43	2.23	2.42	2.38	2.24	3.28
MnO	0.05	0.04	0.15	0.2	0.03	0.04	0.08	0.03	0.02	0.02	0.07	0.05	0.03	0.08
MgO	3.22	2.32	2.78	0.93	0.65	0.57	0.52	0.19	0.62	0.45	0.58	0.66	0.58	0.91
CaO	5.21	3.31	11.61	4.49	1.74	1.52	0.67	0.64	1.53	1.48	1.67	1.8	1.69	1.66
Na ₂ O	3.57	4.22	3.36	3.95	3.39	3.28	2.16	2.24	3.23	3.34	3.37	3.6	3.63	3.88
K ₂ O	3.2	3.65	2.64	3.9	4.54	4.81	11	7.24	4.58	4.52	4.54	4.49	4.76	4.68
P ₂ O ₅	0.35	0.22	0.43	0.36	0.11	0.13	0.2	0.15	0.16	0.94	0.2	0.09	0.11	0.17
Total	100.5	100.0	99.9	100.0	97.5	99.3	100.0	99.9	99.9	100.0	99.9	99.9	100.5	100.3
Norma CIWP														
Cuarzo (% vol)	8	11		8	27	28	2	30	28	30	27	25	25	17
ortosa	19	22	16	23	27	28	65	43	27	27	27	27	28	28
albita	30	36	16	33	29	28	18	19	27	28	29	30	31	33
anortita	19	15	22	17	8	7	2	2	7	2	7	8	8	7
nefelina			7											
leucita														
kaliofilita														
diópsido	4	0	28	3										
hiperstena	12	10	0	8	4	4	6	2	4	4	4	4	4	6
olivino			1											
corindón		0			1	1	2	2	2	4	2	2	1	4
monticellita														
magnetita	1	1	2	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
ilmenita	2	2	3	2	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
apatito	1	0	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
suma	96	97	95	96	98	98	97	98	98	97	98	98	99	97

N = neck D = domo

TABLA 5
ANÁLISIS QUÍMICOS DE ELEMENTOS TRAZA DE LOS NECKS, DOMOS Y DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS.

Afloramiento	N. Millaccasa	N. Chignaya	N. Huayta H.	D. Veluyo	D. Cascada	Depósitos piroclásticos (Ignimbritas Ocuvi)									
Roca	traquiandesita	traquiandesita	traquibasalto	traquiandesita	riolita	riodacitas									
Muestra	990330-1	9906 11-1	9906 13-1	990727-1	9906 14-2	CT 65	9708 21-4	9708 22-3	9708 23-2	9708 23-3	9708 23-5	990729-9	990729-6	990727-3	
Elementos compatibles															
Co (ppm)	19	11	24	22	4	4	5	2	5	4	5	6	5	6	
Ni	48	15	116	35	4	4	2	4	5	5	6	13	6	5	
Cr	74	40	374	63	9	10	6	6	9	8	10	33	8	10	
Sc							4	2	4	4	4				
V	103	79	177	133	38	37	77	18	37	42	38	50	41	58	
Elementos incompatibles															
Th (ppm)	7.2	9	5	30.1	21	20.1	10.4	21.1	18.9	19.8	21.2	21.4	19.7	18.3	
Zr	179	248	189	320	191	155	228.3	135.6	176.3	174.0	195.0	205	189	248	
Nb	19	16	19	20	24	22	15.9	16.9	22.2	22.8	23.9	25	25	24	
Ta	1.5	1.2	1.4	1.6	2.3	2.0	1.2	1.5	2.1	2.1	2.3	2.3	2.3	1.9	
Hf	4.5	6.1	4.7	8.1	5.6	4.4	4.9	3.9	4.8	4.8	5.6	5.3	5.1	6.1	
U	1.4	1.6	0.8	8.1	5.7	2.9	2.0	3.8	2.8	2.7	2.9	4.2	3.2	4.4	
Cs	1.6	3	18.3	11.4	6	3.9	3	0.9	5.3	6.5	8	4.4	5.2	9.3	
Ba	1083	1226	843	969	746	701	822	402.9	655.5	701.5	703	677	663	1031	
Sr	731	706	864	717	353	352	857.0	141.3	370.3	392.6	410.4	390	379	465	
Rb	79	99	107	181	174	189	314.2	199.4	164.3	165.9	174.4	168	179	170	
Pb	23	16	32	19	22	19	25.3	24.9	115.3	32.4	19.6	19	20	23	
Y	14	11	20	20	19	14	17.9	11.3	16.6	17.3	19.0	18	16	13	
Elementos de tierras raras															
La (ppm)	36	45	36	55	52	36	25.6	46.7	42.5	42.2	42.3	43	43	50	
Ce	69	85	74	105	91	69	43.7	76.1	82.5	82.5	85.2	85	83	94	
Pr	8.1	9.7	9.2	11.9	10.4	7.4	5.5	7.1	8.7	8.5	8.7	9	9.4	9.5	
Nd	30	35	37	44	35	25	21.7	20.4	28.9	29.1	28.7	31	32	32	
Sm	5.4	6	6.9	7.6	5.8	4.3	4.4	3.0	4.6	5.0	5.0	5.7	5.4	5.1	
Eu	1.8	1.8	2.2	1.8	1.3	0.9	1.3	0.6	1.1	1.1	1.2	1.1	1.1	1.2	
Gd	4.1	3.9	5.2	5.3	4.5	2.9	3.4	2.4	3.9	3.7	3.6	3.9	3.9	3.5	
Tb	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.4	0.5	0.3	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	
Dy	2.9	2.6	4	3.9	3.6	2.5	3.0	1.6	3.0	3.1	3.3	3.2	2.9	2.4	
Ho	0.5	0.4	0.7	0.8	0.7	0.4	0.6	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	
Er	1.3	1.0	1.9	1.9	1.8	1.3	1.6	1.0	1.5	1.5	1.5	1.6	1.5	1.2	
Tm	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	
Yb	1.2	0.8	1.8	1.8	2	1.5	1.9	1.1	1.4	1.6	1.8	1.7	1.6	1.4	
Lu	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	
Relaciones															
Sr/Nd	24	20	23	16	10	14	40	7	13	14	14	13	12	15	
Th/Nb	0	1	0	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Ba/La	30	27	23	18	14	19	32	9	15	17	17	16	15	21	
La/Sm	7	8	5	7	9	8	6	15	9	9	8	8	8	10	

N = neck

ppm = partes por millón

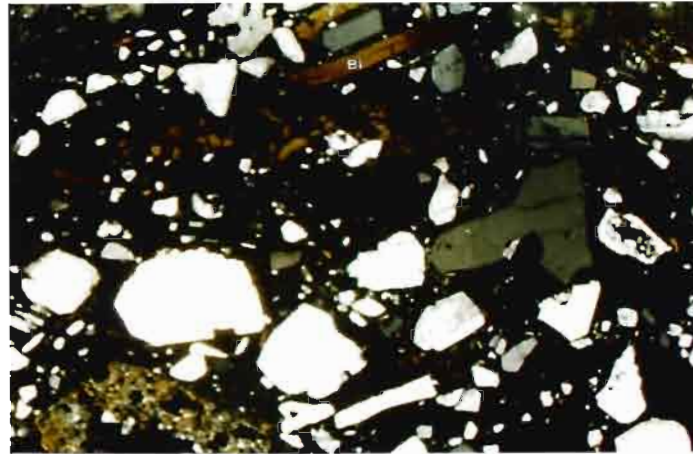


Foto 9: Facies petrográfica de una toba Ocuvi

K_2O+Na_2O versus SiO_2 . El alto contenido de K_2O las diferencia de las series subalcalinas (con bajo contenido de K_2O) del frente de arco volcánico. La distribución de las rocas está dominada por shonkinitas, traquibasaltos, traquiandesitas, dioritas, lo cual revela la abundancia de magmas básicos e intermedios, mientras que los magmas ácidos están representados por granodioritas, granitos, dacitas y riolitas (Figs. 3 y 4).

Elementos Mayores.

En la composición de estas rocas resalta el K_2O , por lo cual se las clasifica como alcalinas (Figs. 5 y 6). Las

variaciones de % en peso de óxido de MgO y CaO versus SiO_2 de las rocas máficas y ácidas del corredor estudiado (Fig. 7) definen una buena tendencia lineal, lo que concuerda con la fraccionación de minerales ferromagnesianos y plagioclasa de su magma inicial. Las lavas depositadas en esta zona son ricas en K_2O , CaO , TiO_2 and P_2O_5 y son pobres en Na_2O comparadas con las rocas del frente de arco volcánico (Mamani, en preparación). La composición extensa de las rocas del tras-arco es 47-77% SiO_2 . En las tablas 2, 4 y 6 se muestra todos los análisis de elementos mayores de las rocas alcalinas de la zona de estudio.

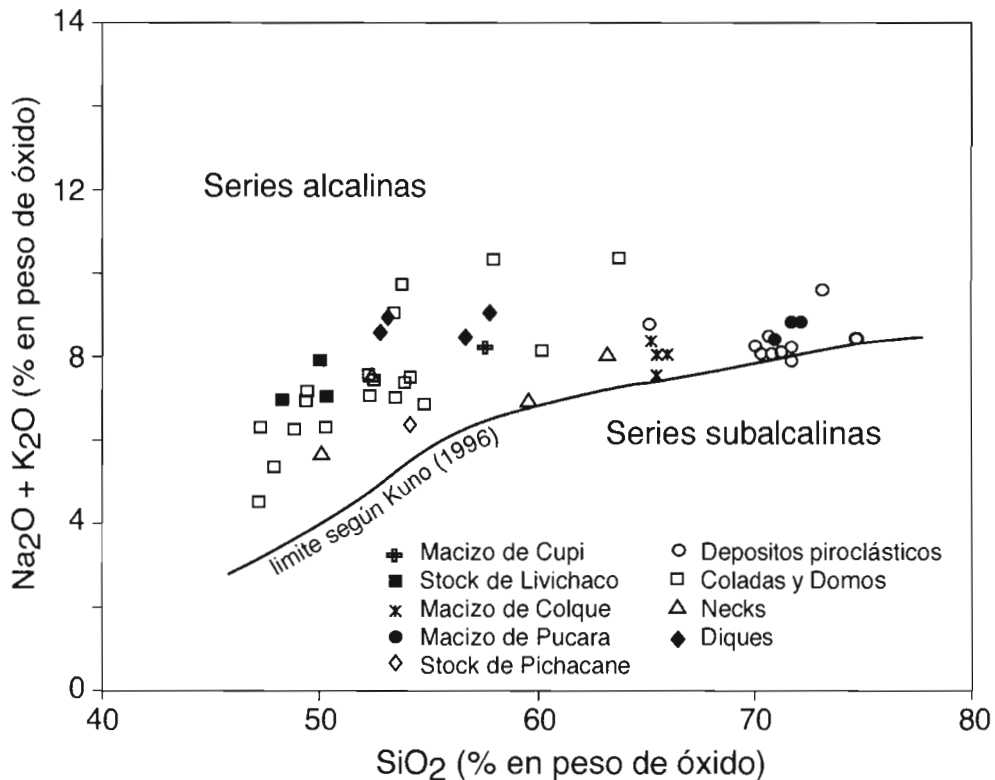


Fig. 5: Ploteo de las rocas estudiadas en el diagrama TAS (Total Alkalies y Silica) con la curva de Kuno (1966)

Fig. 6: Ploteo de rocas estudiadas en el diagrama de clasificación de rocas alcalinas (Comin-Chiaramonti et al., 1997)

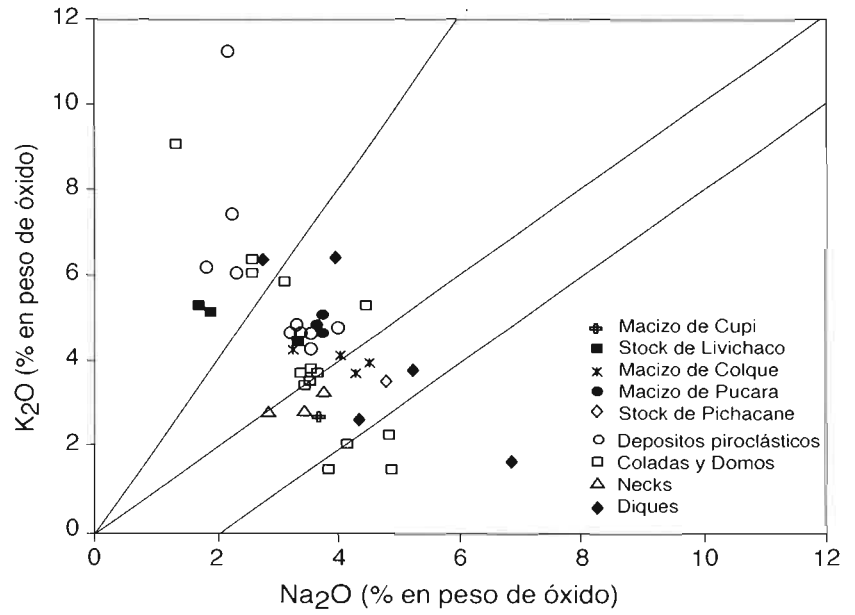


Fig. 7: Variación de CaO, MgO versus SiO₂ para las rocas alcalinas estudiadas.

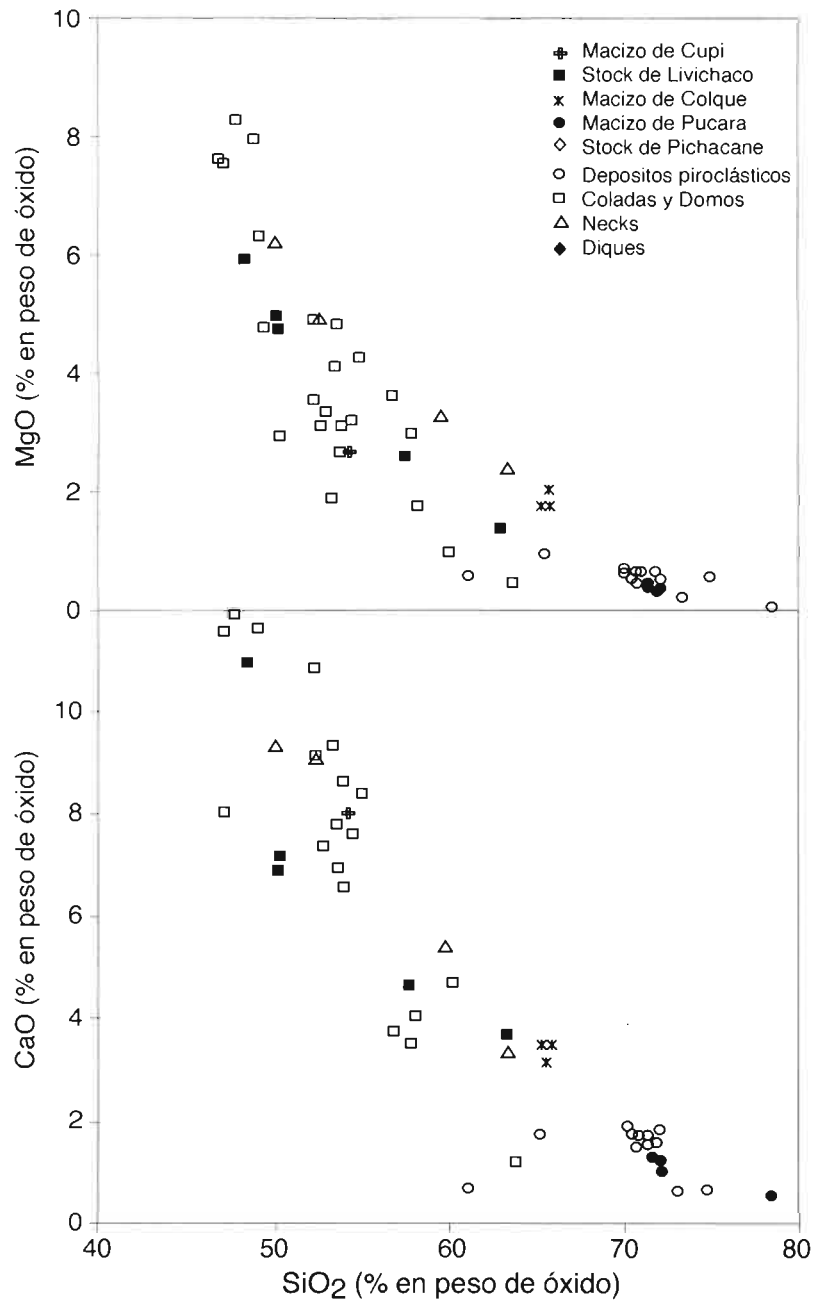


TABLA 6
ANÁLISIS QUÍMICOS DE ELEMENTOS MAYORES DE LAS COLADAS Y DIQUES VOLCÁNICOS.

Afloramiento	Coladas Ocuero													Diques				
Roca	traquibasaltos				traquiandesitas									traquiandesitas				traquibasalto
Muestra	EA96A	EA96b	EA96c	970822-5	970823-1	CT 13	CT 24	CT 25	CT 42	CT 63	990729-7	EA 96d	EA 99	970823-6	970823-7	990329-2	99055-2	990329-1
SiO ₂ (% peso)	45.46	46.72	47.32	45.78	49.51	49.69	52.57	50.35	53.66	53.24	51.12	52.29	61.17	51.89	51.82	57.24	56.15	48.53
TiO ₂	1.06	0.93	0.96	0.97	0.98	0.91	1.05	0.99	1.05	1.05	1.05	0.93	0.54	0.9	0.89	0.89	0.97	1.38
Al ₂ O ₃	11.57	11.8	13.18	11.78	15	14.43	16.16	15.6	16.82	16.76	14.3	16.28	18.3	14.96	16.31	17.24	17.29	15.21
Fe ₂ O ₃	10.68	8.89	9.31	9.87	6.82	7.48	7.3	6.79	7.24	7.04	8.02	7.25	3.42	7.73	7.69	6.57	7.11	9.66
MnO	0.2	0.17	0.17	0.18	0.1	0.09	0.08	0.12	0.1	0.1	0.13	0.19	0.08	0.2	0.35	0.06	0.05	0.17
MgO	7.25	7.58	6.05	7.91	3.35	1.74	4.78	2.96	3.16	3.06	4.79	2.58	0.44	4.01	3.26	2.9	3.51	4.71
CaO	11.08	11.07	9.44	11.29	10.37	8.71	7.62	10.41	7.55	8.48	8.88	6.33	1.15	6.67	7.23	3.49	3.7	9.22
Na ₂ O	4.61	3.97	4.62	3.65	3.2	2.88	3.41	3.38	3.59	3.63	2.39	4.33	1.28	2.55	2.54	5.18	6.75	4.21
K ₂ O	1.43	1.97	2.16	1.46	3.48	5.43	3.41	3.66	3.81	3.69	4.99	5.12	8.66	6.15	5.87	3.74	1.59	2.56
P ₂ O ₅	0.86	0.76	0.81	0.86	0.54	0.54	0.42	0.4	0.46	0.48	0.56	0.51	0.16	0.58	0.61	0.35	0.35	0.69
Total	99.5	99.2	97.4	100.0	99.9	100.1	100.0	100.4	100.0	100.4	100.3	99.4	99.7	99.9	100.0	100.3	99.9	100.0

Norma CIWP

cuarzo (% vol)																		
ortosa	8	12	13	9	21	32	20	22	23	22	29	30	51	36	35	22	9	15
albita	12	13	18	14	18	13	29	17	30	29	15	22	11	16	16	44	56	20
anortita	7	9	9	11	16	10	19	17	19	19	14	10	5	11	16	13	12	15
nefelina	14	11	11	9	5	6		6		1	3	8		3	3		0	8
leucita																		
kaliofilita																		
diópsido	35	34	27	32	26	25	14	27	13	17	22	16		15	14	2	3	22
hiperstena							2		2				5			10		
olivino	11	10	10	12	3	1	8	2	6	6	8	6		9	8	3	12	9
corindón													5					
monticellita																		
magnetita	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
ilmenita	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	3
apatito	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	2
suma	94	94	94	94	93	92	97	95	98	98	96	96	95	96	97	98	98	97

Elementos en trazas

Las rocas alcalinas de la zona de estudio están enriquecidas en elementos incompatibles de tipo litófilos con largo rayo iónico (LILE) como bario, estroncio, rubidio y tierras raras ligeras como lantano. En particular, al normalizar los elementos incompatibles de estas rocas con los valores del manto primitivo, aparecen anomalías positivas en bario y estroncio asociadas a anomalías relativamente negativas en niobio, fosforo y titanio (Fig. 8). Estas firmas son parecidas a las lavas oligocenas y miocenas del arco volcánico, que están relacionadas a la subducción (Mamani, en preparación).

Por otro lado, los elementos mayores y las relaciones de LILE (como bario, estroncio y torio), HFSE (como niobio, tantalio, circonio) y tierras raras (como neodimio) son relativamente bajas en comparación a las rocas del arco ($Sr/Nd = 6.8-30$, $Ba/La = 9-45$, $Th/Nb = 1$); las firmas de estas rocas son parecidas a las de lavas intraplaca (ver relaciones en las Tablas 3, 5 y 7).

Pero las relaciones Ba/La y La/Sm (Tablas 3, 5 y 7) para estas rocas son demasiado altas en comparación a lavas intraplaca y de arcos volcánicos, por lo que no pueden corresponder por completo a estos tipos. Además, en el diagrama normalizado al manto primitivo (Fig. 8), se nota que el contenido de circonio es constante, mientras el niobio no está completamente empobrecido como en las lavas de arco y tampoco está claramente enriquecido como en lavas intraplaca. Las relaciones y observaciones mencionadas sugieren que estas rocas alcalinas han sido generados en relación con una tectónica extensional con firmas de arco.

Este tipo de características geoquímicas son muy similares a las asociaciones de rocas descritas en las Highwood y Crazy Mountains en Montana, EUA (Dúdas,

1991; O'Brien et al., 1995) y en el graben de Asunción-Sapacai en Paraguay oriental (Comin-Chiaramonti et al., 1997).

GEOCRONOLOGÍA Y CONDICIONES DE EMPLAZAMIENTO

En un conjunto de rocas colectadas y seleccionadas para geocronología, se separaron principalmente minerales como hornblenda, biotita, feldespatos. La descripción detallada de estas muestras y el método de datación usado están dados en la Tabla 1, donde algunas dataciones provienen de la bibliografía.

Las primeras manifestaciones de los magmas alcalinos en esta zona del tras-arco corresponden a las dioritas del macizo de Cupi (29 ± 1 Ma) y a los shonkinitas del stock de Livichaco (28.2 ± 1.5 Ma), que se emplazaron en el Oligoceno medio. Este stock de Livichaco estuvo controlado por la falla Pasani (Ibarra et al., 2004 [este volumen]) y corresponde a la zona de alimentación del vulcanismo que emitió los traquibasaltos y traquiandesitas intercalados dentro de una sucesión sedimentaria oligo-miocena e igualmente datados en 28.3 ± 0.6 Ma, tanto en la cuenca de Ayaviri como en la zona de Ocuvi.

En el Mioceno inferior (~20 Ma) se inició el relleno conglomerádico de la cuenca de Ayaviri, probablemente en relación con el juego sinistral-inverso de la falla Pasani (Ibarra et al., 2004 [este volumen]). Al sur de la zona de estudio, se produjo alrededor de 19 Ma una emisión espectacular de depósitos piroclásticos que se extiende por algunos cientos de kilómetros (evento Ocuvi); estas ignimbritas marcan convencionalmente la base del miembro superior de la Formación Tinajani y fueron en parte alimentadas por domos de riolita emplazados en

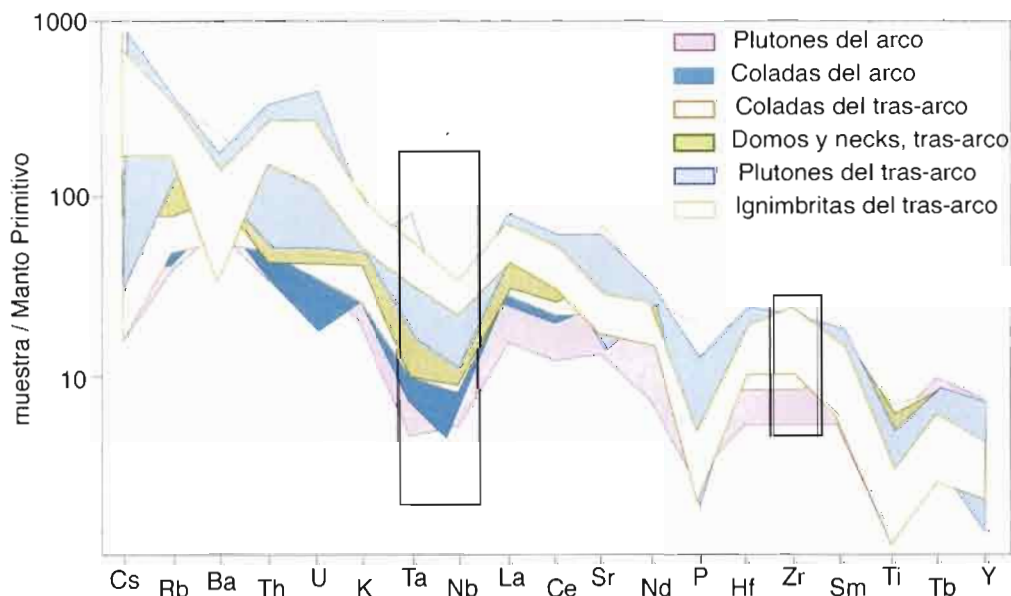


Fig. 8: Patrones de elementos incompatibles de rocas de tras-arco y arco, normalizados con los valores del Manto Primitivo (Sun & McDonough, 1989)

TABLA 7
ANÁLISIS QUÍMICOS DE ELEMENTOS TRAZA DE LAS COLADAS Y DIQUES VOLCÁNICOS.

Afloramiento	Coladas Ocuco													Diques					
Roca	traquibasaltos				traquiandesitas									traquiandesitas				traquibasalto	
Muestra	EA96a	EA96b	EA96c	9708 22-5	9708 23-1	CT 13	CT 24	CT 25	CT 42	CT 63	990727-7	Ea96d	Ea99	9708 23-6	9708 23-7	990329-2	990329-1	9905 5-2	
Elementos compatibles																			
Co (ppm)	44	37	35	44	23.8	23	27	23	21	20	34	21	5	26	26	19	18	33	
Ni	48	75	42	44	54	29	60	47	49	47	45	14	2	12	13	10	13	60	
Cr	139	264	114	140	146	47	157	139	151	156	175	22	0.2	24	15	12	15	83	
Sc	35	32	28	24	17							18	4	16	15				
V	335	270	291	301	226	242	219	202	227	237	239	218	49	252	245	160	186	304	
Elementos incompatibles																			
Th (ppm)	6	8	8	5.8	8.11	6.2	8.2	8.4	8.6	8.5	7.3	10		6.8	7.1	4.5	4.7	5.8	
Zr	95	108	110	99.4	151.5	117	160	154	165	168	178	174	383	186.0	178.4	149	148	146	
Nb	6	7	8	6.7	8.3	8	9	8	9	9	10	15	25.1	10.4	10.7	8	7	9	
Ta	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	1.2	1.9	0.8	0.8	0.6	0.6	0.7	
Hf				2.4	3.9	3.5	4.2	4.1	4.5	4.2	4.1			4.4	4.2	3.8	4.1	3.7	
U				1.1	2.5	1.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.3			1.8	2.0	1	1	1.6	
Cs				2.9	2.2	4.8	1	6.8	3.3	1.3	3.2			48.5	0.8	0.4	0.6	4.2	
Ba	1132	1871	1622	1734.4	786.8	1435	877	827	938	890	993	1573	218	1349.9	1443.1	1007	394	1110	
Sr	1273	2336	1939	1467.9	778.8	1150	821	796	842	871	870	1716	366	643.3	748.2	480	500	1177	
Rb	37	67	37	42.8	120.9	91	103	123	137	122	168	108	341	165.5	145.5	92	68	30	
Pb				13.6	12.3	30	14	13	13	14	15			27.9	276.5	1	3	17	
Y	22	20	22	18.8	21.1	18	22	20	22	23	28	27	29.1	26.1	27.3	23	24	27	
Elementos de tierras raras																			
La (ppm)	21.6	24.1	26.1	24.767	25.5	24	27	27	28	27	29	33.2	44.9	32.3	34.5	21	22	26	
Ce	41.5	47.4	48.8	48.3	51.5	51	57	55	60	56	60	62.1	81.3	65.8	64.1	45	45	59	
Pr				6.3	6.1	6.2	6.7	6.6	7	6.7	7.4			7.8	8.0	6	5.7	7.4	
Nd	25.2	27.2	28.1	25.8	24.8	26	28	26	27	27	29	32.2	33.5	34.4	32.4	25	25	32	
Sm	6.4	6.6	6.7	5.9	5.0	5.6	5.5	5.3	5.6	5.5	6.6	7.3	6.7	6.8	6.6	5.4	5.4	7.3	
Eu	1.8	1.8	1.8	2.1	1.5	1.7	1.5	1.5	1.6	1.5	1.6	2.0	1.3	2.0	2.1	1.7	1.5	2.1	
Gd	5.5	5.4	5.7	5.2	4.6	4.5	4.8	4.6	4.6	4.6	5.4	6	5.5	5.6	5.9	4.9	4.9	6.0	
Tb				0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8			0.8	0.8	0.7	0.7	0.9	
Dy	4.0	3.7	4.0	3.6	3.6	3.5	4.0	3.9	3.8	3.8	4.7	5.3	5.0	4.7	4.5	4.1	4.4	4.9	
Ho				0.6	0.8	0.6	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9			0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	
Er	1.7	1.6	1.8	1.6	1.8	1.6	2.0	1.9	2.1	2.1	2.3	2.4	2.9	2.2	2.2	2.2	2.3	2.4	
Tm				0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4			0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	
Yb	1.5	1.4	1.6	1.5	2.0	1.5	2	1.9	2.1	2	2.4	2.5	3.4	2.2	2.1	2.3	2.4	2.2	
Lu	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	
Relaciones																			
Sr/Nd	50	86	69	57	31	44	29	31	31	32	30	53	11	19	23	19	20	37	
Th/Nb	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	
Ba/La	52	78	62	70	31	60	32	31	34	33	34	47	5	42	42	48	18	43	
La/Sm	3	4	4	4	5	4	5	5	5	5	4	5	7	5	5	4	4	4	

S = stock

ppm = partes por millón

fallas. El funcionamiento transpresional del corredor estructural Cupi-Colque terminó por hacer aflorar las granodioritas del Macizo de Colque (17.5 ± 0.1 Ma), que en parte se encuentran emplazadas en las fallas Pasani y Pucarani (Ibarra et al., 2004 [este volumen]).

De acuerdo a Ibarra et al. (2004 [este volumen]), la sedimentación en la cuenca de Ayaviri se desarrolló en tres etapas principales. En la primera (Oligoceno inferior), el juego transpresional de la falla Ayaviri estructuró y deformó el borde noreste de la cuenca homónima, mientras depósitos clásticos se acumulaban en ella (Formación Ayaviri). En una segunda etapa (Oligoceno medio a superior), el corredor de Cupi-Colque funcionó en forma transtensional, permitiendo el derrame de lavas alcalinas básicas y la acumulación de espesores localmente importantes de brechas volcánicas de composición similar, así como la formación de un área lacustre. En una tercera etapa (Mioceno inferior y medio), el corredor de Cupi-Colque funcionó en forma transpresional, deformando el borde sur de la cuenca de Ayaviri (falla Pasani) durante la acumulación de conglomerados gruesos, y produciendo la exhumación de los estratos antiguos y rocas plutónicas presentes en el corredor (la discordancia progresiva que se observa en el flanco suroeste del sinclinal de Tinajani se originó en este contexto tectónico).

En el Mioceno medio (~15 Ma) se emplazaron los necks que intruyen a las ignimbritas Ocuvi en la cuenca de Ayaviri. Posiblemente también durante el Mioceno medio se emplazaron los granitos del macizo de Pucará y stock de Pichacani, puesto que estas rocas intruyen al relleno de la cuenca. El emplazamiento del macizo de Pucará parece haber sido controlado por la falla Ayaviri.

Durante el intervalo Oligoceno - Mioceno inferior, existió magmatismo en el arco volcánico principal (formaciones Tacaza y Huaylillas) y sedimentación en el ante-arco (Grupo Moquegua). La diferencia entre la zona de estudio y el arco principal está marcada por sus composiciones geoquímicas distintas: en el arco volcánico las rocas son subalcalinas, del tipo clásico de arco, mientras en el tras-arco las rocas son alcalinas, como en zonas en extensión.

CONCLUSIONES

Las fallas existentes en la zona de estudio definen un corredor no solamente estructural (Ibarra et al., 2004 [este volumen]) sino también magmático puesto que han controlado el emplazamiento de las rocas magmáticas.

Las variaciones de los elementos compatibles e incompatibles así como la variación de la composición de los minerales sugieren que la asociación de shonkinitas y traquibasaltos resulta de un proceso de cristalización fraccionada dominado por la precipitación de clinopiroxenos, puesto que estos fueron los primeros

minerales que precipitaron (seguidos por el olivino, biotita, plagioclasas, sanidina y magnetitas). En cambio, la asociación de granodioritas, dacitas, granitos y riolitas resulta de un proceso de asimilación cortical; los minerales que precipitaron para formar estas rocas fueron hornblenda, biotita, plagioclasa, feldspatos potásicos y cuarzo; las ignimbritas incluyen además fragmentos líticos. En el caso de las dioritas y traquiandesitas, parece que están relacionadas a procesos de cristalización fraccionada y de mezcla porque presentan una variedad de plagioclasas y clinopiroxenos, y porque los fenocristales de hornblenda presentan zonación y bordes corroídos.

Las firmas geoquímicas de lavas intraplaca sugieren que el manto litosférico desempeñó un papel importante en la génesis de las rocas correspondientes (ver por ejemplo Edwards et al., 1991, 1994; Kay et al., 1994; O'Brien et al., 1995; Comin-Chiaromonte et al., 1997). Para estos autores, las características geoquímicas de los magmas primitivos máficos potásicos reflejan en parte la composición del manto litosférico de donde se originan estas rocas. En cambio, las firmas de arco documentadas para rocas básicas, intermedias y ácidas de la zona de estudio, relacionadas a una tectónica extensional, pueden resultar de la interacción entre el manto litosférico y procesos ligados a la subducción contemporánea y/o de la fusión parcial de una antigua fuente litosférica modificada por fluidos provenientes de una subducción. La fusión se inició por extensión litosférica y flujo fluido. Una fusión diferenciada puede ser causada por una combinación de diferenciación magmática, asimilación cortical y fusión parcial de corteza. De esta forma las características de tipo subducción observadas en las rocas de la zona de estudio pueden ser producto de la subducción de la placa de Nazca durante el Cenozoico o de eventos metasomáticos mucho más antiguos que afectaron la litósfera andina durante el Mesozoico, Paleozoico y/o Proterozoico. Para determinar cuales de estos procesos influyeron en las características geoquímicas observadas en las rocas alcalinas del tras-arco, sería necesario efectuar análisis de isótopos de estroncio, neodimio y plomo, y desarrollar más detalladamente investigaciones geoquímicas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado y financiado en el marco del convenio IRD-UNSAAC. Agradecemos a los Drs. Victor Carlotto y Thierry Sempere, así como al Prof. Gerhard Wörner por su colaboración. Los análisis de elementos mayores, menores y en trazas fueron realizados en el Centro de Investigación Petrográfico y Geoquímico (CRPG) de Nancy (Francia).

REFERENCIAS

- AUDEBAUD E. & VATIN-PÉRIGNON N. (1974).- The volcanism of the northern part of the Peruvian Altiplano and of the Oriental Cordillera on a traverse Quincemil-Sicuani - Arequipa. Proceedings of the Symposium on Andean and Antarctic Volcanology, Santiago, Chile, p.5-37.
- BONHOMME M.G., AUDEBAUD E. & VIVIER G. (1985).- K-Ar ages of Hercynian and Neogene rocks along an east-west cross section in southern Perú. *Comunicaciones*. Santiago, Chile, v. 35, p. 27-30.
- BOUDESSEUL N., FORNARI M., SEMPERE T., CARLIER G., MAMANI M., IBARRA I., MEZA P. & CERPA L. (2000).- Un importante evento volcánico de edad Mioceno inferior en la zona de Descanso - Ayaviri - Condorama - Santa Lucía (dptos. de Cusco, Puno y Arequipa). X Congreso Peruano de Geología, Lima, p. 8 (res.) y archivo CD-ROM «GR6A» (9 p.).
- CARLIER G. & LORAND J. (1997).- First occurrence of diopside sanidine phlogopite lamproite in the Andean Cordillera: the Huacancha and Morojarja dikes, Southern Peru. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 34, p. 1118-1127.
- CARLIER G., LORAND J. P., BONHOMME M. & CARLOTTO V. (1996).- A reappraisal of the Cenozoic Inner Arc magmatism in Southern Peru: Consequences for the evolution of the Central Andes for the past 50 Ma. International Symposium on Andean Geodynamics, Saint-Malo, France, Extended abstracts, ORSTOM, série «Colloques et Séminaires», p. 551-554.
- CARLOTTO V. (1998).- *Evolution andine et raccourcissement au niveau de Cusco (13°-16°S, Pérou): Enregistrement sédimentaire, chronologie, contrôles paléogéographiques, évolution cinématique*. Tesis doctoral de la Universidad de Grenoble, Francia.
- COMIN-CHIARAMONTI P., CUNDARI A., PICCIRILLO E. M., GOMES C.B., CASTORINA F., CENSI P., DE MIN A., MARZOLI A., SPEZIALE S. & VELÁSQUEZ V. F. (1997).- Potassic and sodic igneous rocks from eastern Paraguay: Their origin from lithospheric mantle and genetic relationships with the associated Paraná flood tholeiites. *Journal of Petrology*, v. 38, p. 495-528.
- DE LA CRUZ N. (1995).- Geología de los Cuadrángulos de Velille, Yauri, Ayaviri y Azángaro (hojas 30-s, 30-t, 30-u, 30-v). *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico*. Boletín N° 58. Serie A: Carta Geológica Nacional, 144 p.
- DÚDAS F. O. (1991).- Geochemistry of igneous rocks from Crazy Mountains, Montana and Tectonic models for the Montana Alkaline Province. *J. Geophys. Res.*, 96: 13261-13277.
- EDWARDS C., MENZIES M. & TRIRLWALL M. (1991).- Evidence from Muriah, Indonesia, for the Interplay of supra-subduction zone and intraplate processes in the genesis of potassic alkaline magmas. *Journal of Petrology*, v. 32, p. 555-592.
- EDWARDS C., MENZIES M., TRIRLWALL M., MORRIS J.D., LEEMAN W.P., HARMON R. (1994).- The transition to potassic alkaline volcanism in island arc: The Ringgit-beser Complex, east Java, Indonesia. *Journal of Petrology*, v. 35, p. 1557-1595.
- FLORES T. & RODRÍGUEZ R. (1999).- *Las cuencas neógenas del sur del Perú. La cuenca Tinajani. Evolución sedimentológica, estratigrafía, paleogeografía y tectónica (Ayaviri-Puno)*. Tesis de Ingeniero Geólogo. UNSAAC.
- IBARRA I., MAMANI M., RODRÍGUEZ R., SEMPERE T., CARLOTTO V. & CARLIER G. (2004).- Estratigrafía y tectónica de la parte sur de la cuenca de Ayaviri. Este volúmen.
- KAY S.M., COIRA B. & VIRAMONTE J. (1994).- Young mafic back arc volcanic rocks as indicators of continental lithospheric delamination beneath the Argentina Puna Plateau, Central Andes. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, p. 24323-24339.
- LAUBACHER G. (1978).- Géologie de la Cordillère Orientale et de l'Altiplano au nord et nord-ouest du lac Titicaca (Pérou). *Travaux et Documents de l'ORSTOM*, 95, 217 p., Paris.
- MAMANI M. & IBARRA I. (2000).- *Magmatismo y tectónica mesozoica del Altiplano y del nordeste de la Cordillera Occidental del Perú*. Tesis de Ingeniero Geólogo. Universidad San Antonio Abad del Cusco.
- O'BRIEN H.E., IRVING A.T., MCCALLUM I.S. & THIRLWALL F. (1995).- Strontium, neodymium, and lead isotopic evidence for the interaction of post-subduction asthenospheric potassic mafic magmas of the highwood Mountains, Montana, USA, with ancient Wyoming craton lithospheric mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 59, p. 4539-4556.
- PALACIOS O., DE LA CRUZ J., DE LA CRUZ N., KLINCK B., ALLISON R. & HAWKINS M. (1993).- Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al Oeste del Lago Titicaca-Sur Perú. *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico*. Boletín N°. 42. Serie A: Carta Geológica Nacional, 257 p.
- PECCERILLO A. & TAYLOR S. R. (1976).- Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v.58, p.63-81.
- SUN S.S. & MCDONOUGH W. F. (1989).- Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A.D. and Norry, M.J. (eds), *Magmatism in oceanic basins*. Geological Society of London, Special Publ. 42, p. 313-345.
- WILSON M. (1989).- *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, London.