

Caracterización geoquímica e implicaciones geodinámicas del Miembro Yaupi de la Formación Chapiza en la Cordillera Cutucú, Ecuador

Geochemical characterization and geodynamic implications of Yaupi Member of the Chapiza Formation, in the Cutucú Cordillera, Ecuador

Christian Romero¹, Adéla Příjmení², Jenny Granja³, Vanessa Escobar⁴, Ana Belen Gramal⁵, Darwin Condoy⁶, Fausto Carranco⁷, Tito Velez⁸, Dario Calderón⁹

¹ Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). wladimir.romero@geoenergia.gob.ec; <https://orcid.org/0000-0001-9271-4323>

² Eötvös Loránd University (ELTE), addaprij@ttk.elte.hu

³ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). jenny.granja@epoch.edu.ec

⁴ Escuela Politécnica Nacional (EPN). vanessa.escobar@epn.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-1420-6523>

⁵ Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). ana.gramal@geoenergia.gob.ec; <https://orcid.org/0000-0002-2216-8846>

⁶ Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL). darwin.condoy@geoenergia.gob.ec; <https://orcid.org/0000-0001-5783-8347>

⁷ Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), Universidad Complutense de Madrid (UCM). fausto.carranco@geoenergia.gob.ec; <https://orcid.org/0000-0001-9412-8942>

⁸ Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). tito.velez@geoenergia.gob.ec

⁹ Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), Instituto de Altos Estudios Nacionales (IAEN). dario.calderon@geoenergia.gob.ec; <https://orcid.org/0000-0002-0663-1079>

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 22-07-2021

Fecha de aceptación: 11-10-2021

RESUMEN

Al sureste de la Cordillera Cutucú, a orillas del río Yaupi, en la sección de Embarcadero a Yaupi se identifica y caracteriza el Miembro Yaupi (Cretácico Inferior) al tope de la Formación Chapiza (Jurásico Medio a Cretácico Inferior). El Miembro Yaupi incluye a limolitas arenosas con clastos volcánicos y materia orgánica, arcosas con estratificación cruzada, litoarenitas masivas con clastos volcánicos, brechas matriz-soportadas con gradación normal, tobas finas soldadas, con cristales rotos de plagioclasa y hornblenda, tobas gruesas soldadas, con clastos andesíticos, con gradación inversa, andesitas porfiríticas y brechas volcánicas clasto-soportadas masivas, monomícticas. El bajo grado de sorteo, baja redondez y baja esfericidad observada en el set de muestras analizado indica el carácter inmaduro del detrito. Estas observaciones sugieren que el Miembro Yaupi fue depositado en abanicos aluviales proximales a una fuente volcánica activa. Datos petrográficos y geoquímicos de rocas sedimentarias indican que el ambiente de depósito del Miembro Yaupi se vincula a una margen continental activa, producto de la erosión de una provincia ígnea intermedia a félsica, en interacción con un arco magmático continental, en un clima semi-árido

con influencia de climas áridos y semi-húmedos. Por otra parte, datos geoquímicos de andesitas y andesitas basálticas, indican afinidad calco-alcalina, típicas de dominio intra-continental, en fases de volcanismo tardío a post-orogénico.

Palabras clave: Formación Chapiza, Miembro. Yaupi, Procedencia, Geoquímica, Cordillera Cutucú, Ecuador.

ABSTRACT

Southeast of the Cordillera Cutucú, in the Yaupi river, the Embarcadero to Yaupi section allows to identify and characterize the Yaupi Member (Lower Cretaceous) of the Chapiza Formation (Middle Jurassic – Lower Cretaceous). The Yaupi Member includes sandy siltstones with volcanic clasts and organic material, cross-stratification arkose, massive lithic-arenites with volcanic clasts, matrix-supported breccia with normal gradation, fine tuff and graded coarse tuff, porphyritic andesites, and massive, monomictic, clast-supported breccia. Low sorting, low roundness, and low sphericity indicate the immature character of the detritus. According to these observations, the Yaupi Member was deposited in alluvial fans proximal to an active volcanic

source. Petrographic and geochemical sedimentary rocks data indicate that the Yaupi Member were deposited in the active continental margin, in response to erosion from intermediate to felsic igneous province proximal, in the active continental magmatic arc, in a semi-arid climate with the influence of arid and semi-humid climates. Andesites

and basaltic andesites geochemical data suggest calco-alkaline affinity, typical of an intra-continental domain, in post-orogenic volcanic phases.

Keywords: Chapiza Formation, Yaupi Member, Provenance, Geochemistry, Cutucú Cordillera, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, el borde oriental de los Andes es la Zona Subandina (“wedge top” andino), un cinturón deformado y exhumado, que registra la tasa de levantamiento de los Andes y a su vez proporciona información de las diversas secuencias sedimentarias de la Cuenca Oriente [1]. La complejidad de la Zona Subandina está relacionada a la propagación del frente orogénico sobre un sustrato heterogéneo heredado de paleo-geografías pre-andinas [2]. La Zona Subandina se compone del levantamiento Napo al norte, separada por la depresión Pastaza de la Cordillera Cutucú al sur (Fig. 1A). La Cordillera Cutucú es considerada un mega pliegue anticlinal, dominado por fallas transpresivas de dirección N-S [3]. La Cordillera Cutucú está limitada al este por la falla del Río Upano, mientras que al oeste la falla Yaupi limita a la cordillera [4]. En el núcleo del anticlinal Cutucú aflora extensamente la Formación Santiago que incluye calizas negras, lutitas fosilíferas, areniscas con cementación calcárea, brechas volcánicas y niveles

volcánicos del Jurásico Inferior [5], mientras que los flancos de la cordillera son dominados por *red beds* del Jurásico Superior vinculadas a la Formación Chapiza [6]. En la Formación Chapiza se han descrito tres miembros [6]: 1) El Miembro Inferior que agrupa alternancias de lutitas y areniscas multicolores con intercalaciones de yeso y anhidrita; 2) El Miembro Medio que incluye conglomerados, arcillolitas y areniscas, de color rojo sin intercalaciones de evaporitas y 3) El Miembro Superior que asocia a lutitas, areniscas y conglomerados con facies piroclásticas y niveles de lavas datadas a 132 MA. (Hauteriviense) [7], mientras que estudios palinológicos reportaron pólenes de gimnospermas: *Callialasporites dampieri* (Cretácico Temprano, Berriasiense) [8], [9] y *Podocarpidites herbstii* (Jurásico – Cretácico Temprano, Valanginiense) [10]. De acuerdo a estas consideraciones, los autores discriminaron facies piroclásticas y niveles volcánicos del Miembro Superior de la Formación Chapiza en el Miembro Yaupi [11].

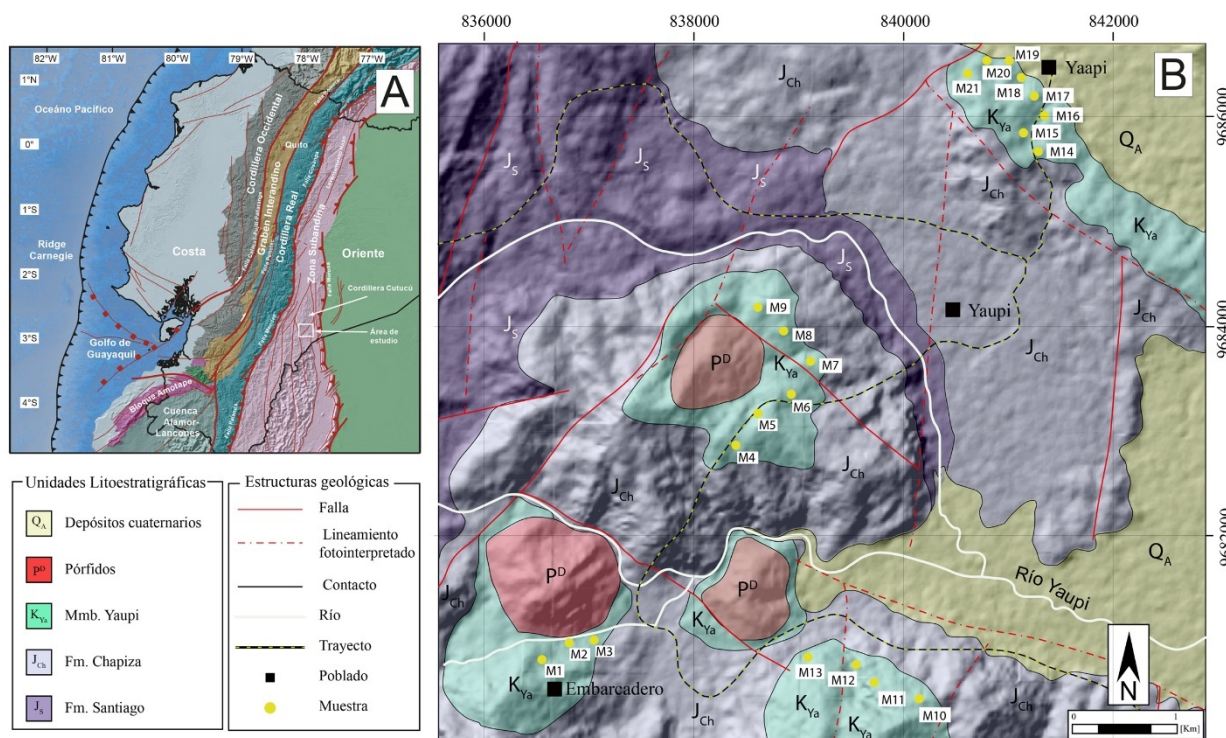


Figura 1. Mapa de ubicación. A. Esquema morfoestructónico del Ecuador, modificado de Vallejo, et al., [13]. B. Mapa geológico del área de estudio, modificado de IIGE, [14].

Posteriormente, se propuso que el volcanismo expresado por el Miembro Yaupi marca la edad de una inversión, probablemente desarrollada entre el Hauteriviense y Barremiense, anterior al depósito de la Formación Hollín [12]. Recientemente, se asoció el ambiente de depósito del Miembro Superior de la Formación Chapiza con abanicos aluviales proximales a una fuente volcánica en el Jurásico Superior a Cretácico Inferior [13]. Sin embargo, las características litoestratigráficas, geoquímicas y el significado geodinámico del Miembro Yaupi son aún inciertos.

Con el objetivo de definir el ambiente geodinámico del Miembro Yaupi esta investigación presenta la caracterización litoestratigráfica, petrográfica y geoquímica de secuencias volcanoclásticas y rocas volcánicas del Miembro Yaupi de la Formación Chapiza, en el flanco sureste de la Cordillera Cutucú (Ecuador), a orillas del río Yaupi, en las inmediaciones de las poblaciones Yaupi, Yaapi y Embarcadero (Fig. 1B).

2. METODOLOGÍA

La fotointerpretación de imágenes satelitales de alta resolución [15] permitió filtrar lineamientos de la cartografía regional, de esta manera se redefinieron trazos de las fallas geológicas y límites de unidades cartografiadas presentes en el área de estudio, además se identificó y planificó las secciones de trabajo en campo.

En campo, la cartografía geológica contempló: 1) la discriminación litológica, considerando el concepto de identificación y asociación de facies [16]; 2) la descripción de la arquitectura estratigráfica documentó la jerarquía de superficies de erosión y descripción de la geometría de los estratos, estilo de apilamiento vertical y lateral [17]; 3) la recolección de datos estructurales identificó marcadores cinemáticos observados en afloramientos [18].

En los afloramientos tipo se recolectaron 17 muestras de roca que fueron utilizadas para elaborar secciones delgadas con el objetivo de identificar y cuantificar la paragénesis mineralógica y describir su textura. Esta descripción fue complementada con el análisis semi-cuantitativo de difracción de rayos - X (DRX), a partir del cual se determinaron las proporciones de los minerales presentes en cada muestra.

El análisis geoquímico de nueve muestras de rocas detríticas y cuatro muestras de rocas volcánicas incluyó: elementos mayores, elementos traza y tierras raras (REE). Estos análisis fueron realizados en los laboratorios químicos del Instituto de Investigación Geológico y Energético del Ecuador (IIGE) y del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional (DEMEX-EPN). En el procesamiento de las muestras se utilizaron trituradoras y pulverizadoras con discos de carburo de tungsteno, para el análisis de elementos mayores se utilizó Fluorescencia

de Rayos X (XRF) con perla fundida, para elementos traza; Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), con digestión total cuatro ácidos; y para tierras raras, Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), con digestión por fusión alcalina. Los datos reportados fueron procesados en diagramas de discriminación litológica y tectónica, en la generación de diagramas se utilizó el software GCDKit 6.0 [19].

3. RESULTADOS

3.1. Litoestratigrafía

A orillas del río Yaupi (UTM WGS84 17 S 9684412N; 838010E), al oeste de la población Yaupi, secuencias estrato-crecientes de areniscas con cementación calcárea, lutitas y calizas fosilíferas con amonites, bivalvos y braquiópodos de la Formación Santiago son cubiertos en discordancia por la Formación Chapiza (Fig. 1). En las cercanías de la población Embarcadero (UTM WGS84 17 S 837051N; 9681196E), el Miembro Inferior de la Formación Chapiza incluye arcillolitas multicolores con niveles de yeso, intercaladas entre areniscas rojas con *ripples* de corriente y laminación cruzada. En estos niveles se distribuyen de manera aislada y discontinua, estratos de geometría cóncava a convexa, de conglomerados clasto y matriz-soportados, imbricados y con gradación normal y areniscas multicolores con estratificación cruzada (Fig. 2A).

En las proximidades a Yaupi (UTM WGS84 17 S 841274N; 9685600E), el Miembro Yaupi descansa en discordancia sobre el Miembro Inferior (Figs. 2, 3A). La base del Miembro Yaupi, se compone de secuencias de 1m a 2m de espesor, de estratos de geometría lobular, compuestas por brechas matriz-soportadas, oligomíticas, polimodales, con fragmentos, subangulares a subredondeados de baja esfericidad, de andesitas, andesitas basálticas y areniscas, con gradación normal (BMG en Tabla 1, Figs. 2 y 3B) y esporádicos niveles con estratificación cruzada e imbricación. Estos estratos son cubiertos en concordancia por niveles de 3m a 4m de espesor, de geometría mantiforme, de limolitas arenosas grises y cafés, con clastos de andesitas y dacitas (LAM en Tabla 1, Figs. 2 y 3C). En estos niveles se observan estratos aislados, de morfología cóncava a convexa, de 1m a 2m de arcosas rojas y verdes con estratificación cruzada, gradación normal e inversa (ArX en Tabla 1, Figs. 2 y 3D); hacia el tope estos estratos se observan niveles de 50 cm, de litoarenitas masivas con clastos andesíticos y dacíticos (LtMCV en Tabla 1, Figs. 2 y 3E). También es común observar gruesas intercalaciones, de limolitas arenosas masivas, y brechas clasto-soportadas, estrato y grano-crecientes; además, finas intercalaciones de litoarenitas masivas y limolitas arenosas con materia orgánica, estos estratos presentan tendencia estrato y grano-decrecientes (Figs. 2, 3F).

La parte media del Miembro Yaupi se compone de intercalaciones de brechas clasto-soportadas, monomícticas, masivas con fragmentos subangulares, de baja esfericidad, de 50mm a 12cm, de composición andesítica, (BCM en [Tabla 1](#), Figs. 2 y 3G); y andesitas porfíricas con estructuras vesiculares, con remplazamiento de plagioclasa y hornblenda por epidota y calcita (Ap en [Tabla 1](#), Figs. 2 y 3H). Niveles de limolitas negras masivas con clastos dacíticos oxidados, se intercalan entre niveles de 30cm a 70cm de espesor, de tobas finas soldadas, con cristales fragmentados de plagioclasa y hornblenda (Tf-cr en [Tabla 1](#), Figs. 2 y 3I) y tobas gruesas soldadas con clastos andesíticos y

dacíticos, con gradación inversa (Tel en [Tabla 1](#), Figs. 2 y 3J). El tope del Miembro Yaupi es caracterizado por la presencia de intercalaciones de arcosas, verdes a rojas, con gradación normal, laminación cruzada, clastos volcánicos y sedimentarios, intercaladas con litoareniscas café masivas con abundantes clastos sedimentarios (Figs. 2 y 3K). Las direcciones de paleocorrientes indican transporte de sedimento hacia el noreste (Fig 2B). Al norte de la zona de estudio el Miembro Yaupi es cubierto en discordancia por la Formación Hollín.

Tabla 1. Lista de litofacies definidas en el Miembro Yaupi.

Litofacies	Litología	Estructuras sedimentarias	Interpretación
LAM	Limolita arenosa	Clastos volcánicos distribuidos de manera caótica, materia orgánica, laminación paralela.	Depósitos de planicies de inundación
ArX	Arcosa	Estratificación cruzada, gradación normal e inversa.	Depósitos de barras fluviales
LtMCV	Litoarenita	Clastos volcánicos distribuidos de manera caótica.	
BMG	Brecha volcánica	Gradación normal, estratificación cruzada, Imbricación.	Flujos de escombros
BCM	Brecha clasto-soportada monomíctica	Brechas clasto-soportadas masivas	Abanicos aluviales proximales a la fuente volcánica activa.
Ap	Andesita	-	Volcánicos primarios
Tf-cr	Toba fina	-	Flujos ignimbríticos
Tg-cl	Toba gruesa	Gradación inversa.	

Lista de acrónimos utilizados en el texto

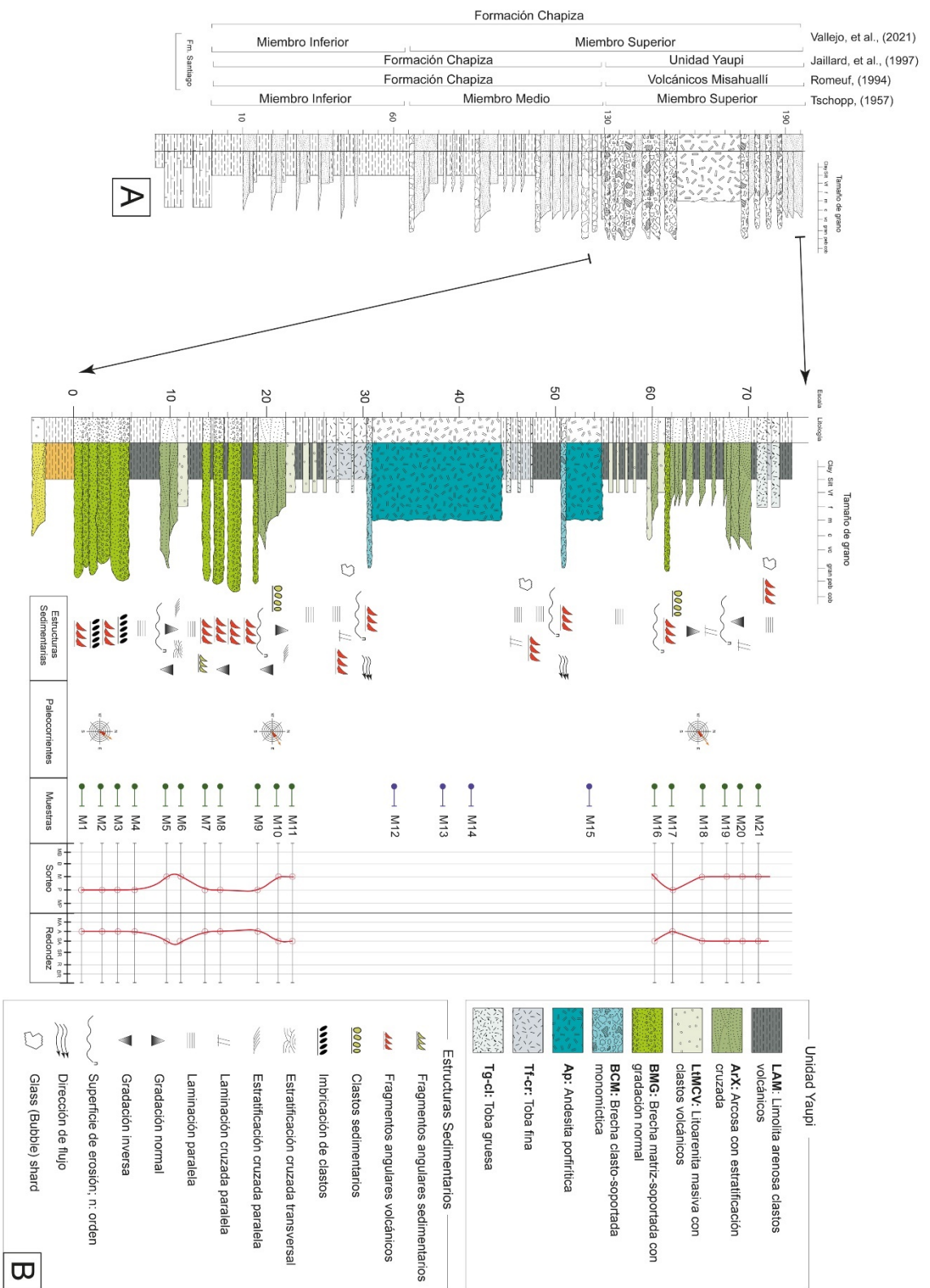


Figura 2. Columna estratigráfica del Miembro Yaupi. **A.** Columna estratigráfica bibliográfica recopilada de: Tschopp [6], Romeuf [20], Jaillard et al. [11], Vallejo et al. [13]. **B.** Columna estratigráfica de la sección de Embarcadero a Yaupi. Abreviaciones: M1: muestra de roca 1; Sorteo, MB: muy bien sorteado B: bien sorteado M: moderadamente sorteado MP: muy pobremente sorteado. Redondez, MA: muy angular, A: angular, SA: subangular, SR: subredondeado, R: redondeado, BR: bien redondeado.

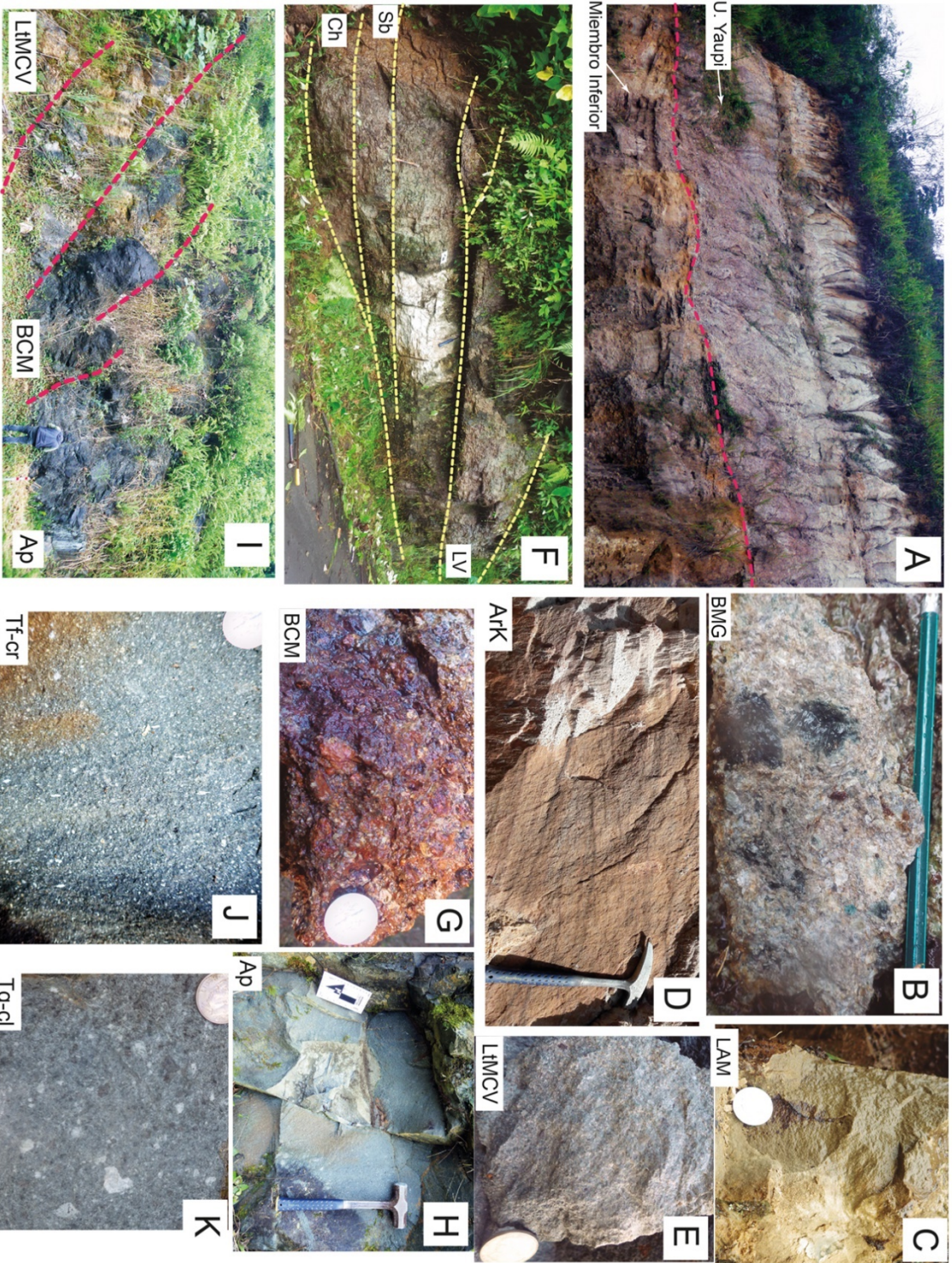


Figura 3. Afloramientos tipo y litofacies tipo de la Unidad Yaupi. **A.** Contacto entre el Miembro Yaupi y el Miembro Inferior de la Fm. Chapiza. **B.** Limonita arenosa masiva, con clastos volcánicos. **C.** Arcosa con estratificación cruzada. **D.** Canales y barras fluviales en el Miembro Yaupi. **E.** Licoarenita masiva con clastos volcánicos. **F.** Brechas matriz-soportada masiva. **G.** Brecha clasto-soportada masiva. **H.** Andesitas porfiríticas. **I.** Múltiples intercalaciones entre rocas volcánicas y volcánicas. **J.** Toba fina soldada con cristales (Ignimbrita?). **K.** Toba gruesa soldada con clastos (Ignimbrita?).

Tabla 2. Resultados de análisis petrográficos en la Unidad Yaupi

CODIGO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M16	M17	M18	M19	M20	M21
UTM-X	836543	836814	837051	838409	838618	838930	839145	838853	838631	840139	839734	841385	841274	841107	841004	840806	840599
UTM-Y	9680827	9680992	9681006	9682831	9683149	9683295	9683638	9683898	9684171	9680405	9680583	9685965	9686179	9686330	9686489	9686481	9686354
Qm	24	20	22	23	26	21	20	32	34	30	29	31	39	31	39	33	30
Qp	4	5	7	2	5	4	3	7	3	1	0	8	5	9	4	8	10
Qz	28	25	29	25	31	25	23	39	37	31	29	39	44	40	43	41	40
F	26	35	44	50	30	41	49	42	50	50	35	34	39	41	43	41	41
L	46	40	27	25	39	34	28	19	13	19	36	27	17	19	14	18	19
F+L	72	75	71	75	69	75	77	61	63	69	71	61	56	60	57	59	60
Qp/F+L	0,0556	0,0667	0,0986	0,0267	0,0725	0,0533	0,0390	0,1148	0,0476	0,0145	0,0000	0,1311	0,0893	0,1500	0,0702	0,1356	0,1667
Q/(F+L)	0,3889	0,3333	0,4085	0,3333	0,4493	0,3333	0,2987	0,6393	0,5873	0,4493	0,4085	0,6393	0,7857	0,6667	0,7544	0,6949	0,6667
Q/F	1,0769	0,7143	0,6591	0,5000	1,0333	0,6098	0,4694	0,9286	0,7400	0,6200	0,8286	1,1471	1,1282	0,9756	1,0000	1,0000	0,9756
Q/L	0,6087	0,6250	1,0741	1,0000	0,7949	0,7353	0,8214	2,0526	2,8462	1,6316	0,8056	1,4444	2,5882	2,1053	3,0714	2,2778	2,1053
ln(Q/F)	0,1069	-0,4854	-0,6015	-1,0000	0,0473	-0,7137	-1,0911	-0,1069	-0,4344	-0,6897	-0,2713	0,1979	0,1740	-0,0356	0,0000	0,0000	-0,0356
ln(Q/L)	-0,7162	-0,6781	0,1031	0,0000	-0,3312	-0,4436	-0,2838	1,0375	1,5090	0,7063	-0,3119	0,5305	1,3720	1,0740	1,6189	1,1876	1,0740

Abreviatura: Qm: Cuarzo monocristalino, Qp: Cuarzo policristalino, Q: cuarzo total, F: feldespato, L: líticos, F+L: suma feldespato y líticos; ln: logaritmo natural

Tabla 3. Resultados de análisis geoquímicos en rocas sedimentarias de la Unidad Yaupi

CODIGO	Mz	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	ClA	SiO2/Al2O3	Fe2O3/K2O	Log (SiO2/Al2O3)	Log (Fe2O3/K2O)	Na2O/K2O
M3	122	74,13	0,20	11,30	5,72	0,08	0,60	0,30	1,30	6,10	0,19	59,48	6,56	0,94	0,82	-0,03	0,21
M5	126	73,02	0,11	11,53	5,83	0,04	0,70	0,20	1,10	6,80	0,35	58,74	6,33	0,86	0,80	-0,07	0,16
M6	130	74,23	0,11	11,32	5,72	0,05	0,50	0,40	1,05	6,10	0,44	60,00	6,56	0,94	0,82	-0,03	0,17
M9	132	72,61	0,20	11,52	5,52	0,05	0,60	0,50	0,96	5,96	0,17	60,83	6,30	0,93	0,80	-0,03	0,16
M10	125	75,01	0,30	11,07	5,70	0,07	0,50	0,30	1,10	5,41	0,16	61,90	6,78	1,05	0,83	0,02	0,20
M17	126	75,60	0,30	12,10	4,90	0,40	0,20	0,20	1,20	4,25	0,02	68,17	6,25	1,15	0,80	0,06	0,28
M19	124	74,20	0,30	12,70	4,80	0,50	0,80	0,60	1,20	4,15	0,04	68,10	5,84	1,16	0,77	0,06	0,29
M20	122	71,80	0,20	12,50	5,60	0,40	0,90	0,20	1,30	4,09	0,03	69,10	5,74	1,37	0,76	0,14	0,32
M21	130	74,33	0,10	12,70	4,90	0,40	0,40	0,40	1,20	4,25	0,20	68,46	5,85	1,15	0,77	0,06	0,28

Unidades de óxidos [%]; unidades de elementos [ppm]

Continuación

Log10(Na2O/K2O)	Al2O3/SiO2	Fe2O3+MgO	IC	2C	F1	F2
-0,67	0,15	6,32	-2,56	-5,95	-5,74	2,65
-0,79	0,16	6,53	-1,30	-5,86	-6,52	3,15

-0,76	0,15	6,22	-0,68	-4,60	-5,47	2,40
-0,79	0,16	6,12	-2,73	-5,38	-5,64	2,11
-0,69	0,15	6,20	-3,03	-5,01	-5,18	1,52
-0,55	0,16	5,10	-4,87	-3,53	-3,30	0,58
-0,54	0,17	5,60	-4,77	-2,43	-3,55	0,00
-0,50	0,17	6,50	-4,53	-1,76	-3,16	-0,49
-0,55	0,17	5,30	-3,19	-2,41	-2,76	0,40

Unidades de óxidos [%]; unidades de elementos [ppm]

Tabla 4. Geoquímica de rocas volcánicas de la Unidad Yaupi.

COD	UTM-X	UTM-Y	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2 O3	FeO	MgO	MnO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	LOI	Sc	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Rb
M12	839544	9680734	62,12	1,67	13,14	6,05	3,1	4,45	0,28	2,27	5,09	2,65	0,15	1,86	19	2	184	91	42,4	38	36	240	17	2	77,83
M13	839099	9680821	58,59	1,01	13,34	8,05	3,56	5,13	0,28	4,78	4,19	2,12	0,15	2,12	21	2	186	87	39,9	41	42	248	19	2	86,54
M14	841274	9685600	60,3	1,44	13,3	7,6	3,31	4,8	0,26	3,32	4,12	2,46	0,22	6,32	20	2	184	90	44,7	36	38	242	18	2	74,26
M15	841163	9685806	61,6	1,32	12,8	7,8	3,4	5,2	0,32	4,2	5,1	2,38	0,17	1,4	21	2	183	89	41,5	39	40	244	17	2	72

Unidades de óxidos [%]; unidades de elementos [ppm]

Continuación

Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	Zr/TiO2
292,1	17,8	151,5	8,9	0,6	1	0,61	147,97	8,62	28,9	3,3	16,4	4,6	0,34	3,56	0,66	4,58	1,07	3,1	0,41	3,7	0,66	6,2	0,5	34,93	4,7	1,06	90,719
308,09	16,9	130,6	9,1	0,9	1	0,63	146,99	8,7	29,45	3,88	17,69	4,47	0,25	5,16	0,75	4,62	0,95	3,2	0,42	3,7	0,6	6,4	0,6	32,5	4,4	1,1	129,307
306,4	15,6	142,6	8,8	0,89	1	0,62	145	8,5	29,3	3,9	16,8	4,7	0,27	4,6	0,68	4,42	0,98	3,1	0,36	3,6	0,5	6,1	0,5	33,1	4,1	1,06	99,028
300,2	16,4	148,8	9,2	0,9	1	0,6	146,2	8,4	29,6	4,1	16,9	4,9	0,29	3,7	0,72	4,68	1,04	3,1	0,39	3,5	0,6	6	0,5	33,7	4,3	1,1	112,727

Unidades de óxidos [%]; unidades de elementos [ppm]

Continuación

Nb/Y	Tb/Yb	Zr/Y	Y/15	La/10	Nb/8
0,500	1,270	8,511	1,187	0,862	1,113
0,538	1,189	7,728	1,127	0,870	1,138
0,564	1,139	9,141	1,040	0,850	1,100
0,561	1,229	9,073	1,093	0,840	1,150

Unidades de óxidos [%]; unidades de elementos [ppm]

3.2. Análisis petrográfico

Se analizaron las proporciones modales de cuarzo (Qz), feldespato (Fl) y líticos (L) de diecisiete muestras de areniscas del Miembro Yaupi (Tabla 2). El *set* de muestras analizadas presenta textura psamítica, de grano medio (Fig. 4A) a muy grueso (Fig. 4B), mal a moderadamente sorteadas, con clastos subangulares a subredondeados (Figs. 2, 4A y 4B) de baja esfericidad, distribuidos en una matriz arcillosa y cemento silíceo (Figs. 4A y 4B). Con respecto a la composición, el *set* de diecisiete muestras analizadas presenta bajas a moderadas proporciones de cuarzo (23% - 44%),

moderadas proporciones de feldespato (26% - 50%) y proporciones variables de líticos (13% - 46%). Los líticos son subangulares, de baja esfericidad compuestos por andesita, andesita basáltica y esporádicos fragmentos de dacitas (Tabla 2). En el *set* analizado los cristales de cuarzo corresponden mayoritariamente a cuarzo monocristalino (Figs. 4A y 4B). Por lo cual, en el Miembro Yaupi se incluyen a: arcosas, arcosas líticas y litoarenitas feldespáticas según la representación de la composición mineral en el diagrama de Folk [21] (Fig. 4C).

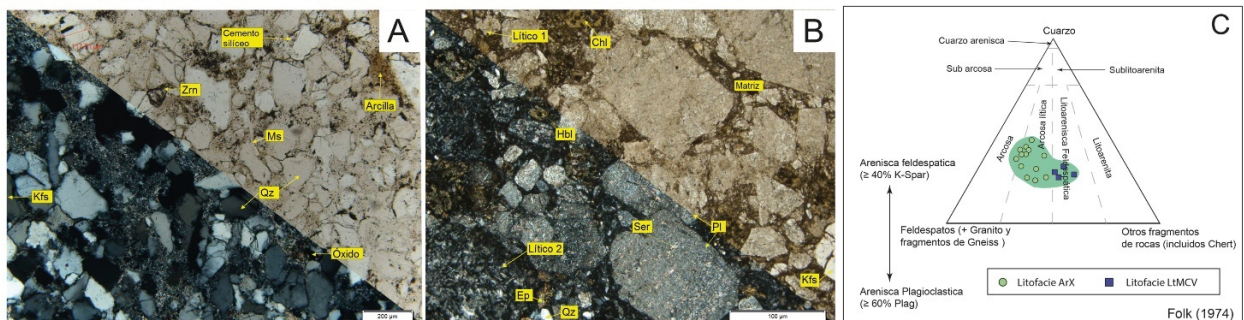


Figura 4. Discriminación petrográfica de rocas detríticas del Miembro Yaupi

A. Textura psamítica, de litofacies ArX, vista en luz natural y luz polarizada. **B.** Líticos volcánicos en matriz limoarenosa en la litofacies LtMCV, vista en luz natural y luz polarizada. **C.** Diagrama triangular de discriminación litológica de Folk [21].

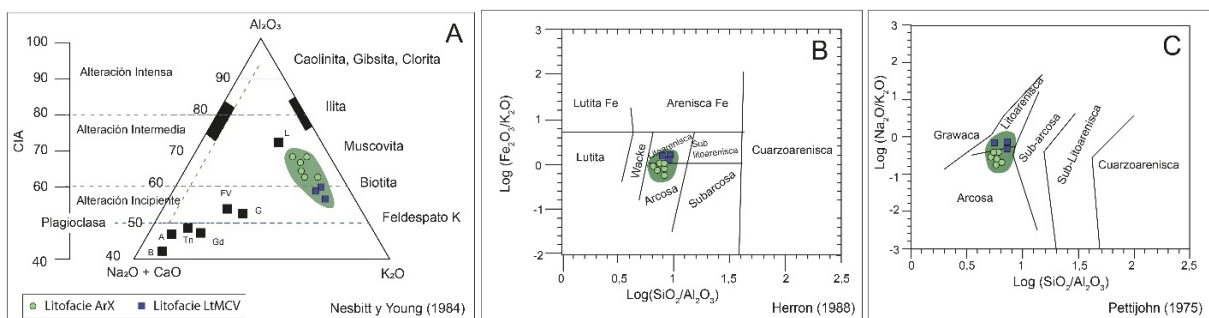


Figura 5. Clasificación geoquímica y discriminación tectónica de rocas sedimentarias.

A. Diagrama triangular de discriminación de alteración A-NC-K, de Nesbitt y Young [22], *L*: lutita; *FV*: Roca volcánica félsica, *G*: Granito, *A*: Andesita, *Tn*: Tonalita, *Gd*: Granodiorita, *B*: Basalto. **B.** Diagrama de discriminación litológica de Herron [23]. **C.** Diagrama de discriminación litológica de Pettijohn [24].

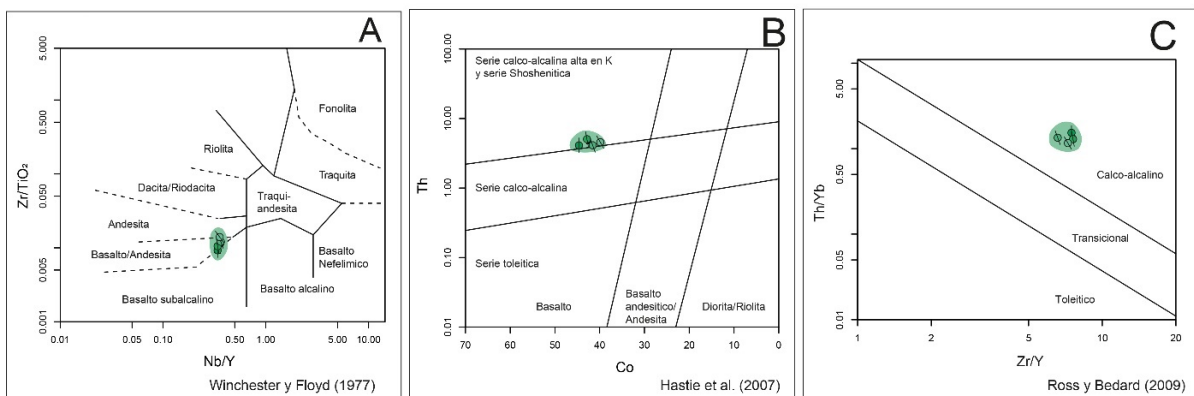


Figura 6. Discriminación geoquímica de rocas volcánicas de la Unidad Yaupi

A. Diagrama de discriminación litológica de Winchester y Floyd [26]. **B.** Diagrama de afinidad química de Hastie et al. [27]. **C.** Diagrama de discriminación de afinidad de arco de Ross y Bédard [28].

3.4. Geoquímica de rocas sedimentarias

El *set* analizado se compone de nueve muestras detríticas correspondientes a las litofacies ArX y LtMCV (Tabla 1 y Tabla 3). Las muestras analizadas se caracterizan por presentar tamaño de grano muy fino a fino (media Mz: 122µm a 130µm), el índice de alteración química (CIA), que evalúa el grado de intensidad de meteorización en rocas sedimentarias, varía entre 58.74 a 69.10, indicando un grado de alteración química incipiente a intermedio (Fig. 5A) [22], por lo tanto, al presentar valores aceptables y por debajo del límite óptimo establecido, los datos reportados pueden ser evaluados en diagramas de discriminación litológica que evalúan las proporciones logarítmicas de Fe_2O_3/K_2O vs Si_2O/Al_2O_3 (diagrama de Herron [23]) y Na_2O/K_2O vs Si_2O/Al_2O_3 (diagrama de Pettijhon [24]).

En el *set* de muestras analizadas las relaciones Na_2O/K_2O (0.16 – 0.32), Fe_2O_3/K_2O (0.86 – 1.37), K_2O/Na_2O (3.15 – 6.21) indica que el Miembro Yaupi contiene: litoarenitas y arcosas [23], [24] (Figs. 5B y 5C)

3.4. Geoquímica de rocas volcánicas

Los resultados obtenidos en los análisis geoquímicos de rocas volcánicas en el Miembro Yaupi se presentan en la Tabla 4. En el *set* de muestras analizadas se observan diversos grados de alteración que se reflejan en valores de pérdida por ignición (LOI) de 1.86% a 6.32%, por lo que no es recomendable utilizar esquemas tradicionales de clasificación de rocas volcánicas, como lo sugiere Dickin [25]. Razón por la cual, los datos reportados en esta investigación han sido evaluados en diagramas de clasificación y discriminación que consideran elementos inmóviles: Zr/TiO_2 vs. Nb/Y [26]; Th vs. Co [27]; Th/Yb vs. Zr/Y [28].

En el *set* de muestras analizadas, las relaciones Zr/TiO_2 (90.71 a 141.18) y Nb/Y (0.500 a 0.564) indican que los niveles volcánicos en el Miembro Yaupi corresponden a andesitas y andesitas basálticas según el diagrama de Winchester y Floyd [26] (Fig. 6A). Esto es coherente con las concentraciones en SiO_2 (58.59 wt% - 62.12 wt%), Al_2O_3 (12.80 wt% - 13.34 wt%), MgO (4.45 wt% - 5.20 wt%), CaO (2.27 wt% - 4.78 wt%), Na_2O (4.12 wt% - 5.09 wt%) y K_2O (2.12 wt% - 2.65 wt%) reportadas (Tabla 4). Por otro lado, las proporciones Th (4.1 ppm – 4.7 ppm) y Co (39.9 ppm – 44.7 ppm) siguieron afinidad geoquímica calco-alcalina, alto en potasio (K) según el diagrama de Hastie et al. [27] (Fig. 6B), esto concuerda con las relaciones de Th/Yb (1.139 – 1.270) y Zr/Y (7.728 – 9.141) que indican series calco-alcalinas como se muestra en el gráfico de Ross y Bédard [28] (Fig. 6C).

4. DISCUSIÓN

4.1 Ambiente de depósito del Miembro Yaupi

En el tope de la Formación Chapiza, Tschopp [6] y Hobbs [29] describen niveles volcánicos y volcanoclásticos en

alternancia con niveles de *red beds* y conglomerados. Los autores indican que estos niveles volcanoclásticos podrían tener un vínculo genético con sistemas aluviales del Jurásico Superior. Por otro lado, Souza Cruz [9], reporta el contacto discordante entre estas secuencias volcanoclásticas y *red beds* asociados a la Formación Chapiza. El autor también reportó datos palinológicos que ubican a esta secuencia en el Cretácico Inferior [8], [9], [10]. En base a estas observaciones Jaillard et al. [11] discrimina al Miembro Yaupi en facies volcánicas y volcanoclásticas al tope de la Formación Chapiza. Por otro lado, anteriores autores también han propuesto que estas facies están vinculadas al arco Misahuallí, en forma de flujos de escombros distales al arco [20], [30]. Sin embargo, en estas investigaciones no se reportaron características litológicas, estratigráficas y geoquímicas que apoyen esta interpretación.

Al sureste de la Cordillera Cutucú, en la sección Yaupi – Embarcadero los depósitos del Miembro Yaupi, incluyen: estratos, métricos, de geometría mantiforme a tabular, de limolitas arenosas (LAM en Tabla 1, Figs. 2, y 3) con abundantes clastos volcánicos y bajas proporciones de materia orgánica, con laminación paralela y niveles masivos, que concuerdan con depósitos de planicies de inundación [31]. Depósitos de brechas matriz-soportadas (BMG en Tabla 1, Figs. 2, y 3), imbricadas y con gradación normal, organizadas en estratos de morfología canalizada (geometría cóncava, superficie de erosión basal) que se distribuyen de manera aislada, discontinua y pueden ser interpretados como depósitos de desfase basal, tipo flujos de escombros [32], mientras que, litoarenitas masivas con clastos volcánicos y arcosas con estratificación cruzada organizadas en tendencia grano y estrato-decrecientes concuerdan con depósitos de barras fluviales [33]. La arquitectura estratigráfica observada indica que barras fluviales se desarrollan de manera aislada, lateralmente discontinuas y con buena continuidad vertical en planicies de inundación. Estas características son comunes en depósitos de planicies aluviales en sistemas meandriiformes [31], [32], [33].

4.2. Análisis de proveniencia del Miembro Yaupi: Petrografía y geoquímica de facies detríticas

La composición petrográfica (proporción de cuarzo, feldespato y líticos [20]), geoquímica (relaciones logarítmicas de Fe_2O_3/K_2O vs. Si_2O/Al_2O_3 [23] y Na_2O/K_2O vs. Si_2O/Al_2O_3 [24]) indica que el *set* de muestras analizadas incluye: arcosas, arcosas líticas y litoarenitas feldespáticas (Figs. 4 y 5). La textura observada en lámina delgada indica bajo grado de sorteo, baja redondez y baja esfericidad (Figs. 4A y 4B), es decir, se observan condiciones inmaduras para el detrito, esto indicaría una corta distancia de transporte con respecto a la fuente de detrito [34]. Las proporciones de cuarzo monocristalino, feldespatos y líticos (Tabla 2) indican

que facies detríticas del Miembro Yaupi provienen de la erosión de un arco volcánico continental disectado con tendencia a arco volcánico transicional y basamento magmático levantado, según se muestra en el diagrama de Dickinson [35] (Fig. 7A), vinculado a una cuenca de tras-arco influenciada por sistemas de desgarre tectónico ‘*strike-slip*’, como se puede observar en el diagrama de Yerino y Minard [36] (Fig. 7B). Estas condiciones son comunes en dominios extensionales, intra-continetales, con periodos compresivos y extensivos [37]. Por otro lado, la relación logarítmica entre cuarzo total y cuarzo policristalino en función a la proporción de feldespato y líticos (Tabla 1) indica que el Miembro Yaupi se depositó en un clima semi-árido con influencia de periodos áridos a semi-húmedos como se muestra en el diagrama de procedencia Suttner y Dutta [38] (Fig. 7C).

Proporciones Al_2O_3/SiO_3 (0.15 – 0.17) evaluadas en función de la relación Fe_2O_3 y MgO (5.30 - 6.53) indican que las facies detríticas del Miembro Yaupi fueron depositadas en una margen activa continental (según el diagrama de Bathia [39]) (Figs. 8A), los patrones de discriminación tectónica 1C (-0.68 a -4.87) y 2C (-1.71 a -5.95) concuerdan con esta interpretación (Fig. 8B) (según el diagrama de Bathia [39]). La función discriminante F1 (-2.76 a -6.52) y F2 (-0.49 a 3.15) [40] indican que el detrito del Miembro Yaupi proviene de la erosión de una fuente ígnea félsica (Fig. 8C) (Según el diagrama de Roser y Korsch [40]).

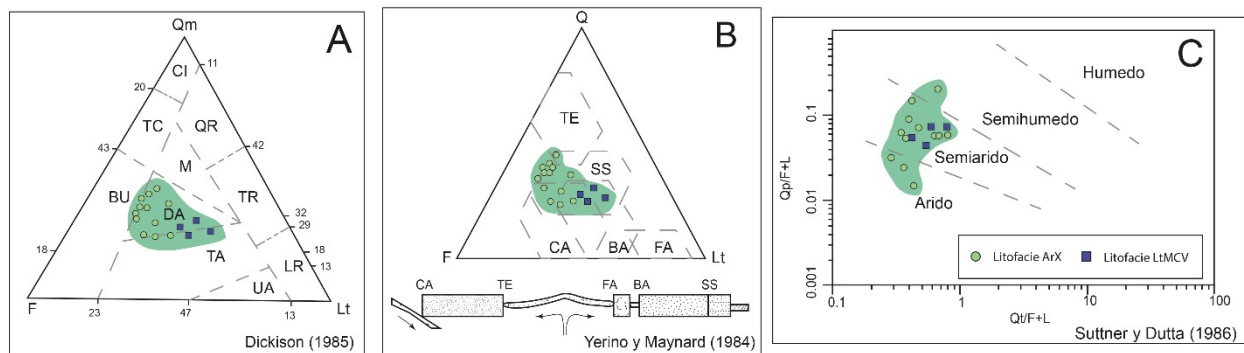


Figura 7. Discriminación tectónica en base a datos petrográficos de litofacies detríticas del Miembro Yaupi.

A. Diagrama triangular de discriminación tectónica de Dickinson [35], *CI*: Cratón interior, *TC*: Cratón transicional, *BU*: basamento exhumado, *M*: Mezcla, *DA*: Arco disectado, *TA*: Arco transicional, *UA*: Arco no disectado, *QR*: Reciclado rico en cuarzo; *TR*: Reciclado transicional, *LR*: Reciclado rico en líticos. **B.** Diagrama triangular de discriminación tectónica de Yerino y Maynard [36], *TE*: Trailing edge, *SS*: *Strike slip setting*, *CA*: *Continental margin arc*, *BA*: *Back arc to island arc*, *FA*: *Continental margin arc*. **C.** Diagrama de diferenciación paleo-climática de Suttner y Dutta [38]. Simbología: Qm: cuarzo monocristalino, F: Feldespatos, Lt: líticos, Qt: Cuarzo total.

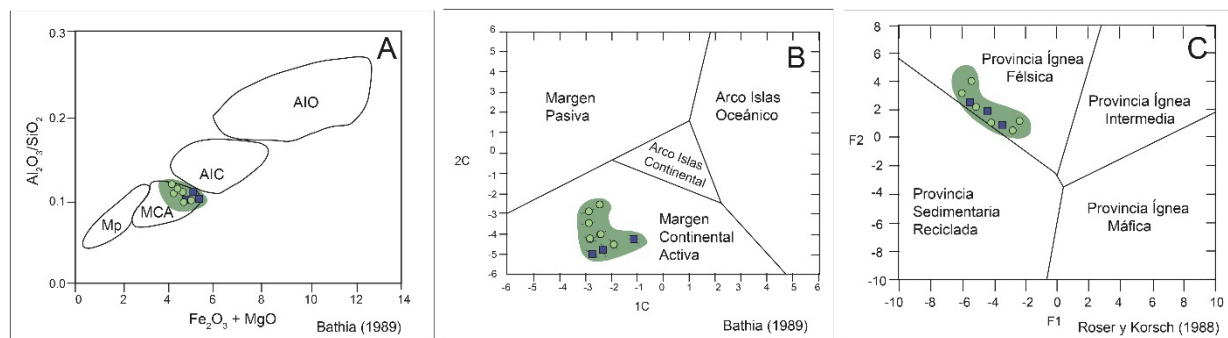


Figura 8. Discriminación tectónica en base a geoquímica de litofacies detríticas del Miembro Yaupi.

A-B. Diagrama de discriminación tectónica de Bathia [39], (Factor de discriminación 1C = $-0.0447 SiO_2 - 0.972 TiO_2 + 0.008 Al_2O_3 - 0.267 Fe_2O_3 - 3.082 MnO + 0.140 MgO + 0.195 CaO + 0.719 Na_2O - 0.032 K_2O + 7.510 P_2O_5 + 0.303$; Factor de discriminación 2C = $-0.421 SiO_2 + 1.988 TiO_2 - 0.526 Al_2O_3 - 0.551 Fe_2O_3 + 2.720 MnO + 0.881 MgO - 0.907 CaO - 0.177 Na_2O - 1.840 K_2O + 7.244 P_2O_5 + 43.57$). *Mp*: Margen pasiva, *MCA*: Margen continental activa, *AIC*: Arco de islas continental, *AIO*: Arco de islas oceánico. **C.** Diagrama de discriminación de fuente de Roser y Korsch [40], (Factor de discriminación F1 = $-1.773 TiO_2 + 0.607 Al_2O_3 + 0.76 Fe_2O_3 - 1.5 MgO + 0.616 CaO + 0.509 Na_2O - 1.224 K_2O - 9.09$; Factor de discriminación F2 = $0.445 TiO_2 + 0.07 Al_2O_3 - 0.25 Fe_2O_3 - 1.142 MgO + 0.438 CaO + 1.475 Na_2O + 1.426 K_2O - 6.861$).

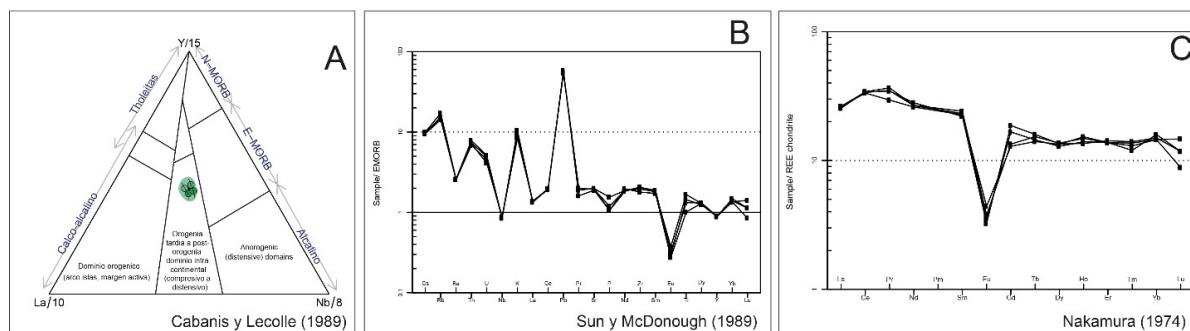


Figura 9. Discriminación tectónica en base a geoquímica de rocas volcánicas del Miembro Yaupi.

A. Diagrama de discriminación tectónica de Cabanis y Lecolle [41]. B. Diagrama de normalización a manto primitivo de Sun y McDonough [42]. C. Diagrama de normalización a condrita de Nakamura [45]. EMORB: *Enriched mid-ocean ridge basalts*, LILE: *Large-Ion Lithophile Elements*, REE: *Rare Earth Element*.

4.3. Discriminación tectónica geoquímica de rocas volcánicas

Las proporciones de La (8.4 ppm - 8.7 ppm), Y (15.6 ppm - 17.8 ppm) y Nb (8.8 ppm - 9.2 ppm) en andesitas del Miembro Yaupi indican un dominio intra-continental compresivo a distensivo, de fase volcánica tardía a post-orogénica, como se muestra en el gráfico de Cabanis y Lecolle [41] (Fig. 9A).

En el diagrama multi-elemental de tierras raras (REE) normalizados a N-MORB de Sun y McDonough [42] (Fig. 9B) se observa enriquecimientos en elementos de iones litófilos (LILE: $Rb_N: 128.57 - 154.54$, $Cs_N: 87.14 - 90$, $Sr_N: 3.25 - 3.42$, $Ba_N: 23.02 - 23.49$) en relación con elementos de tierras raras pesadas (HREE: $Lu_N: 1.10$, $Eu_N: 0.25 - 0.3$), que corresponden al fraccionamiento cristalino en la roca, acompañado de empobrecimiento de Nb y anomalía negativa de Eu, estas características son comunes en rocas volcánicas de ambiente continental [43]. El enriquecimiento en Pb indica contaminación cortical [44].

En el diagrama multi-elemental de REE normalizados a condrito de Nakamura [45] (Fig. 6F) se observa un ligero enriquecimiento en tierras raras livianas (LREE; $La/Yb_N = 1.55 - 1.60$), con respecto a tierras raras pesadas (HREE; $Gd/Yb_N = 0.76 - 1.11$) y patrones ligeramente planos de HREE, similar a lo reportado por Turner et al. [48], en este tipo de arcos.

4.4. La interpretación geodinámica del Miembro Yaupi

Al oeste de la zona de estudio, en las proximidades a la Cordillera Real, la Formación Misahuallí incluye andesitas, dacitas, riolitas, ignimbritas y tobas que representan la expresión volcánica (arco volcánico, calco-alcalino, Tipo-I) del magmatismo en el Jurásico Inferior a Cretácico Superior [13], [20], [47]. Sin embargo, fases de volcanismo en periodos tardíos a post-

orogénicos no han sido reportados con anterioridad para el arco Misahuallí. La fase volcánica tardía a post-orogénica de las muestras analizadas del Miembro Yaupi es caracterizada por la presencia de altos valores de K, anomalías positivas de Pb, y patrones relativamente planos de HREE, similar a lo reportado por Turner et al. [48], en este tipo de arcos.

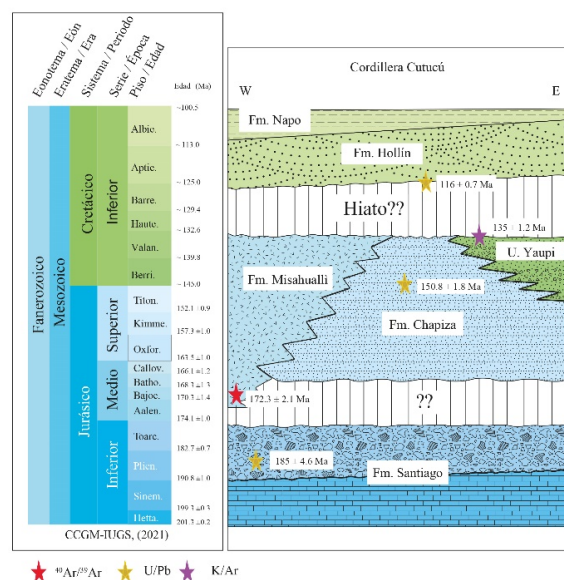


Figura 10. Modelo estratigráfico propuesto para el Miembro Yaupi en el flanco sureste de la Cordillera Cutucú. En el diagrama se consideraron edades $^{40}Ar/^{39}Ar$ presentadas por Romeuf [20], K/Ar reportados por Hall y Calle [7], y Vallejo et al. [13].

En base a observaciones de líneas sísmicas, Angulo [12] reporta el desarrollo de *onlaps* contra la estructura invertida Sacha, y propone que, el volcanismo del Miembro Yaupi marca la edad de inversión anterior al depósito de la Formación Hollín en la cuenca Oriente. Por otro lado, Vallejo et al. [13] proponen que en el Cretácico Inferior eventos compresivos en zonas puntuales afectaron parte de la margen produciendo rápido enfriamiento y exhumación de las rocas precretácicas en la Cordillera Real y Zona Subandina. La rápida exhumación de bloques en zonas puntuales del

Subandino permitiría el ascenso de magma a través de una corteza ligeramente engrosada, permitiendo el desarrollo de volcanismo del Miembro Yaupi en el Cretácico Inferior, como se muestra en el modelo estratigráfico propuesto en la Fig. 10.

Considerando la información litoestratigráfica, datos petrográficos e información geoquímica de rocas detríticas y volcánicas, los resultados del presente trabajo indican que el ambiente de depósito del Miembro Yaupi concuerda con abanicos aluviales proximales a fuentes volcánicas activas.

5. CONCLUSIONES

- Geográficamente el Miembro Yaupi aflora al sureste de la Cordillera Cutucú, en las márgenes del río Yaupi, en los sectores de Embarcadero, Yaupi y Yaapi.
- Estratigráficamente el Miembro Yaupi se ubica al tope de la Formación Chapiza y subyace en discordancia a la Formación Hollín.
- Litológicamente, el Miembro Yaupi agrupa a limolitas arenosas con clastos volcánicos y materia orgánica, arcosas con estratificación cruzada, litoarenitas masivas con clastos volcánicos, brechas clasto-soportadas con gradación normal, tobas finas soldadas con cristales rotos de plagioclasa y hornblenda, tobas gruesas soldadas con clastos andesíticos y dacíticos, con gradación inversa, andesitas porfíricas, y brechas clasto-soportadas monomíticas. Estas facies detríticas y volcanoclasticas estarían vinculadas al desarrollo de abanicos aluviales proximales a la fuente volcánica activa.
- Datos petrográficos indican que facies detríticas del Miembro Yaupi son texturalmente inmaduros y fueron depositadas en un clima semi-árido con influencia de periodos áridos a semi-húmedos y provienen del levantamiento y la erosión de un arco volcánico continental disectado a transicional, vinculado a una cuenca de tras-arco influenciada por sistemas 'strike-slip'.
- Datos de geoquímica de sedimentos indican que estas facies están relacionadas a un arco magmático continental y son el producto de la erosión de una provincia ígnea intermedia a félsica.
- Datos de geoquímica de niveles volcánicos en el Miembro Yaupi indican que el *set* analizado corresponde a andesitas, calco-alcalinas, de alto potasio, de volcanismo tardío a post-orogénico, de dominio intra-continental, con anomalía negativa de Eu y enriquecimiento de Pb.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. T. Pratt, P. Duque and M. Ponce, "An autochthonous geological model for the eastern Andes of Ecuador.," *Tectonophysics*, vol. 399, no. 1-4, pp. 251-278, 2005.
- [2] P. Baby, M. Rivadeneira, R. Barragán and F. Christophoul, "Thick-skinned tectonics in the Oriente foreland basin of Ecuador," *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 377, no. 1, pp. 59-76, 2013.
- [3] C. W. Romero et al., "La evolución de abanicos aluviales documentada en el registro estratigráfico de la Formación Tiyuyacu". *Revista Científica GeoLatitud*, vol. 4, Issue 1, pp. 38-50, 2021
- [4] C. W. Romero, D. Calderón, M. Rivadeneira, M. Naranjo, M. Meneses and A. Gramal, "Reconstruyendo el pasado del planeta: El registro estratigráfico y sedimentológico de la Formación Tena en la carretera Tiwintza–Puerto Morona," *Revista Científica GeoLatitud*, vol. 2, no. 2, pp. 2-13, 2019.
- [5] J. Gaibor, J. P. A. Hochuli, W. Winkler and J. Toro, "Hydrocarbon source potential of the Santiago Formation, Oriente Basin, SE of Ecuador.," *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 25, Issue 2, pp. 145-156, 2008.
- [6] H. J. Tschopp, "Oil explorations in the Oriente of Ecuador, 1938–1950," *AAPG Bulletin*, vol. 37, no. 10, pp. 2303-2347, 1953.
- [7] M. L. Hall and J. Calle, "Geochronological control for the main tectonic-magmatic events of Ecuador.," *Earth-Science Reviews*, vol. 18, no. 3-4, pp. 215-239., 1982.
- [8] S. J. Mills, "Micropaleontological examination of cuttings and cores from well Tiguino-I," *Anglo-Ecuadorian Oilfields Ltd, Ecuadorian Oriente Geological note 23*, pp. 6, Informe interno s/n para CEPE, Petroproducción, Quito, 1971
- [9] C. Souza Cruz, "Cretaceous Sedimentary facies and depositional environments, Oriente Basin, Ecuador," in *III Cong. And. Indust. Petrol. Quito*, 1988.
- [10] M. Rivadeneira and H. Sánchez, "Consideraciones geológicas del Pre-Aptense en la cuenca Oriente," in *VI Cong. Ecuat. Ingen. en Geol., Min., Petrol. y Geotecn.*, inédito, pp.41, Guayaquil, 1991.
- [11] E. Jaillard, M. Caron, A. Dhondt and et al., *Síntesis Estratigráfica y Sedimentológica del Cretáceo y Paleógeno de la Cuenca Oriental del Ecuador*, Orstom-Petroproducción (eds.),164 p., 1997.
- [12] A. Angulo, J. Bustos, J. Navarrete, M. Rivadeneira, P. Baby and D. Palacios, "Arquitectura estructural y estratigráfica de la secuencia pre-aptense de la cuenca Oriente ecuatoriana," *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, vol. 1, no. 1, pp. 9-14, 2018.
- [13] C. Vallejo et al. "Jurassic to Early Paleogene sedimentation in the Amazon region of Ecuador:

Implications for the paleogeographic evolution of northwestern South America," *Global and Planetary Change*, p. 103555, 2021.

[14] Instituto de Investigación Geológica y Energética, "Mapa Geológico Yaupi, escala 1:100 000.," Proyecto de Investigación Geológica y Disponibilidad de Ocurrencias Minerales en el Territorio Ecuatoriano, IIGE, Quito, 2019.

[15] E. W. Spencer, *Geologic Maps: A Practical Guide to Preparation and Interpretation*, Waveland Press, 2017, p. 221.

[16] R. G. Walker, "Facies modeling and sequence stratigraphy: perspective," *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 60, no. 5, pp. 777-786, 1992.

[17] N. P. James and R. W. Dalrymple, "Facies models 4," *Canadian Sedimentology Research Group*, Geological Association of Canada, p. 574, 2010.

[18] J. P. Petit, "Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks," *Journal of structural Geology*, vol. 9, no. 5-6, pp. 597-608, 1987.

[19] Q. Y. Yu, L. Bagas, P. H. Yang and D. Zhang, "GeoPyTool: A cross-platform software solution for common geological calculations and plots," *Geoscience*, vol. 10, no. 4, pp. 1437-1447, 2019.

[20] N. Romeuf, "Volcanisme jurassique et métamorphisme en Equateur et au Pérou: caractéristiques pétrographique, minéralogiques et géochimiques: implications géodynamiques," *Docteur en Sciences These Facu. des Scien. et techn. de St-Jérôme de l'Univ. de Droit d'Economie et des Scien d'Aix-Marseille*, Paris, Francia, 1995.

[21] R. Folk, *Petrology of Sedimentary Rocks*, 2nd ed., Austin: Tx: Hemphill Press, p. 182. 1974.

[22] H. W. Nesbitt and G. M. Young, "Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations". *Geochim. Cosmochim. Acta* 48. 1982.

[23] M. M. Herron, "Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data," *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 58, no. 5, pp. 820-829, 1988.

[24] F. J. Pettijohn, *Sedimentary Rocks*, 3rd edition., New York: Harper and Row, 1975, p. 628.

[25] A. P. Dickin, *Radiogenic Isotope Geology*, 2nd ed, New York: Cambridge University Press, 2005.

[26] J. A. Winchester and P. A. Floyd, "Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements," *Chemical Geology*, vol. 20, pp. 325-343, 1977.

[27] A. R. Hastie, A. C. Kerr, J. A. Pearce and S. F. Mitchell, "Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram," *Journal of Petrology*, vol. 48, no. 12, pp. 2341-2357, 2007.

[28] P. S. Ross and J. H. Bédard, "Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks

determined from trace-element discriminant diagrams," *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 46, no. 11, pp. 823-839, 2009.

[29] G. W. Hobbs, "Stratigraphy of Cretaceous and Jurassic systems exposed in the Cutucú mountains," *Internal Consultant Report for Petroproducción*, ECUA-141, Quito, 11p, 1975.

[30] CODIGEMM, "Mapa Geológico Yaupi, escala 1:100.000," *Ministerio de Energía y Minas*, Quito, 1994.

[31] A. D. Miall, "Reconstructing the architecture and sequence stratigraphy of the preserved fluvial record as a tool for reservoir development: A reality check.," *AAPG Bulletin*, vol. 90, no. 7, pp. 989-1002, 2006.

[32] A. D. Miall, "Architectural elements formed within channels," in *The Geology of Fluvial Deposits*, Berlin, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 131-167, 2006.

[33] T. Chakraborty, "Reconstruction of fluvial bars from the Proterozoic mancherai quartzite, Pranhita-Godavari valley, India," in *Fluvial sedimentology VI*, 28, Blackwell Science, pp. 451-466, 1999.

[34] Y. Liu, Y. Liu, L. U. Sun and J. Liu, "Multiscale fractal characterization of hierarchical heterogeneity in sandstone reservoirs," *Fractals*, vol. 24, no. 03, p. 1650032, 2016.

[35] W. R. Dickinson, "Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In *Provenance of arenites*," Dordrecht: Springer, pp. 333-361, 1985.

[36] L. N. Yerino and J. B. Maynard, "Petrography of modern marine sands from the Peru-Chile Trench and adjacent areas," *Sedimentology*, vol. 31, no. 1, pp. 83-89, 1984.

[37] X. S. Zhang, X. S. Xu, Y. Xia and L. Liu, "Early Paleozoic intracontinental orogeny and post-orogenic extension in the South China Block: Insights from volcanic rocks," *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 141, pp. 24-42, 2017.

[38] L. J. Suttner and P. K. Dutta, "Alluvial sandstone composition and paleoclimate; II, Authigenic mineralogy," *Journal of Sedimentary Research*, vol. 56, no. 3, pp. 346-358, 1986.

[39] M.R. Bathia, "Plate tectonics and geochemical composition of sandstones", *Journal of Geology*, vol. 91, Issue. 2, pp. 611-627, 1983.

[40] B. P. Roser and R. J. Korsch, "Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio," *The Journal of Geology*, vol. 94, no. 5, pp. 635-650, 1986.

[41] B. Cabanis and M. Lecolle, "Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des séries volcaniques et la mise en évidence des processus de mélange et/ou de contamination crustale," *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, vol. 309, no. 20, pp. 2023-2029, 1989.

- [42] S. S. Sun and W. F. McDonough, "Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes," Geological Society, London, Special Publications,, vol. 42, no. 1, pp. 313-345, 1989.
- [43] J. R. Barboza-Gudiño, M. T. Orozco-Esquivel, M. Gómez-Anguiano and A. Zavala-Monsiváis, "The Early Mesozoic volcanic arc of western North America in northeastern Mexico," Journal of South American Earth Sciences,, vol. 25, no. 1, pp. 49-63, 2008.
- [44] M. Willbold and A. Stracke, "Trace element composition of mantle end-members: Implications for recycling of oceanic and upper and lower continental crust.," Geochemistry, Geophysics, Geosystems, vol. 7, no. 4, 2006.
- [45] N. Nakamura, "Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites," Geochimica et cosmochimica acta, vol. 38, no. 5, pp. 757-775, 1974.
- [46] F. Espinoza et al. "Middle Miocene calc-alkaline volcanism in Central Patagonia (47 S): petrogenesis and implications for slab dynamics.," Andean Geology, vol. 37, no. 2, pp. 300-328, 2010.
- [47] M. Litherland, J. A. Aspden and R. A. Jemielita, The metamorphic belts of Ecuador, Vol. 11, London: Overseas Memoir of the British Geological Survey, 1994.
- [48] S. Turner, M. Sandiford, y J. Foden. "Some geodynamic and compositional constraints on post-orogenic magmatism". Geology. vol. 20(10), pp. 931-934. 1992.
- [49] B. P. Roser and R. J. Korsch, "Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data," Chemical geology, vol. 67, no. 1-2, pp. 119-139, 1988.