



UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

MINERALIZACIÓN DE Pb, Zn (Au, Ag, Cu)
RELACIONADA A BRECHAS
FREATOMAGMÁTICAS EN EL DISTRITO DE
SAN FELIPE, BAJA CALIFORNIA Y SU
RELACIÓN CON LA ETAPA EXTENSIONAL
DEL GOLFO DE CALIFORNIA.

TESIS

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.



PRESENTA:

JORGE OMAR ORTIZ ESPARZA.

Hermosillo, Sonora, Junio de 2007

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Junio 04, 2007.

DR. INOCENTE G. ESPINOZA MALDONADO

Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología
Universidad de Sonora
Presente

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

**"MINERALIZACION DE Pb, Zn (Au, Ag, Cu) RELACIONADA A BRECHAS
FREATOMAGMATICAS EN EL DISTRITO DE SAN FELIPE, BAJA CALIFORNIA Y SU
RELACION CON LA ETAPA EXTENSIONAL DEL GOLFO DE CALIFORNIA"**

Esto es con el fin de que el alumno: **JORGE OMAR ORTIZ ESPARZA**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Grado de la Maestría en Ciencias-Geología.

Sin otro en particular quedamos de Usted.

ATENTAMENTE


DR. LUCAS HILARIO OCHOA LANDIN
Director de Tesis



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
MAESTRIA EN CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPTO. DE GEOLOGIA

C.c.p. Archivo



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TEL. (662) 259 21 10
FAX 259 21 11

Junio 05, 2007.

DR. LUCAS HILARIO OCHOA LANDIN

Director de Tesis
Departamento de Geología
Universidad de Sonora
Presente

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Usted, intitulado:

**"MINERALIZACION DE Pb, Zn (Au, Ag, Cu) RELACIONADA A BRECHAS
FREATOMAGMATICAS EN EL DISTRITO DE SAN FELIPE, BAJA CALIFORNIA Y SU
RELACION CON LA ETAPA EXTENSIONAL DEL GOLFO DE CALIFORNIA"**

Esto es con el fin de que el alumno: **JORGE OMAR ORTIZ ESPARZA** pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Grado. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes Sinodales:

DRA. DIANA MA. MEZA FIGUEROA
DR. EFREN PEREZ SEGURA
DR. FRANCISCO A. PAZ MORENO
DR. LUCAS HILARIO OCHOA LANDIN

PRESIDENTE
SECRETARIO
VOCAL
VOCAL

Sin otro en particular, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

DR. INOCENTE G. ESPINOZA MALDONADO
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias Geología



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA
MAESTRIA EN CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPTO. DE GEOLOGIA

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TEL. (662) 259 21 10
FAX 259 21 11

NOMBRE DE LA TESIS:

**"MINERALIZACION DE Pb, Zn (Au, Ag, Cu) RELACIONADA A BRECHAS FREATOMAGMATICAS
EN EL DISTRITO DE SAN FELIPE, BAJA CALIFORNIA Y SU RELACION CON LA ETAPA
EXTENSIONAL DEL GOLFO DE CALIFORNIA"**

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

JORGE OMAR ORTIZ ESPARZA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


DRA. DIANA MA. MEZA FIGUEROA


El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


DR. LUCAS HILARIO OCHDA LANDIN

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


DR. EFREN PEREZ SEGURA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


DR. FRANCISCO A. PAZ MORENO

ATENTAMENTE

"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"


DR. INCENTE GPE. ESPINOZA MALDONADO

Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA
MAESTRIA EN CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPTO. DE GEOLOGIA

IGEM*ag

DEDICATORIA

Dedico esta tesis de Maestría con todo mi amor y cariño a mis padres, por su valioso apoyo moral y económico que siempre me brindaron a lo largo de mi formación académica, ya que sin su apoyo no hubiera podido lograr este propósito. Gracias por haber estado siempre pendientes de mí, este triunfo personal se los dedico con todo mi corazón. Los quiero mucho papás.

**Esparza Betancourt Rosa María.
Ortíz Castillo José Antonio.**

A mi hermano, por su incondicional apoyo moral.

Ortíz Esparza Antonio.

A mi esposa e hija, por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas, por haberme inyectado fuerzas para poder seguir adelante y por haber compartido todas mis alegrías y preocupaciones conmigo, y porque detrás de un gran hombre, hay dos grandes mujeres.

**Eva Lorena Gómez Cabrera.
Marianna Ortíz Gómez.**

Y en general, a toda mi familia, maestros y amigos que siempre me apoyaron para la realización de esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer infinitamente a mi director de tesis, el Dr. Lucas Hilario Ochoa Landín, por su gran paciencia y apoyo, así como por dedicarme parte de su valioso tiempo y por compartir sus conocimientos en el campo conmigo. Gracias por nunca dejarme solo, por alentarme a terminar este proyecto y por ser aparte de un excelente maestro un excelente amigo.

Agradezco a la Dra. Diana M. Meza Figueroa, por las facilidades para utilizar el laboratorio, al Dr. Francisco A. Paz Moreno por acompañarme al campo y facilitarme el equipo del laboratorio para la pulverización de muestras y al Dr. Efrén Pérez Segura por sus puntos de vista tan valiosos. Gracias por sus comentarios y correcciones acerca de este trabajo de tesis y por aceptar ser parte de mi jurado.

A la Dra. Margarita López Martínez, encargada del Laboratorio de Geocronología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), por haber llevado a cabo los fechamientos utilizados en este trabajo de tesis.

A los coordinadores de la maestría a lo largo de estos años; al Dr. Rogelio Monreal Saavedra, Dra. Diana M. Meza Figueroa y al Dr. Guadalupe I. Espinoza Maldonado, por todas sus atenciones prestadas.

A mis compañeros de mil batallas, que hicieron amena la estancia en ese lugar llamado maestría: M.C. Germán D. Figueroa Salguero, M.C. Sergio A. Salguero Souto, M.C. Héctor Rivera Cabrera, M.C. Ariel G. Navarro Herrera, M.C. Abraham Mendoza Córdova, M.C. Francisco Romero Padilla, p. M.C. Luis A. López Jiménez, p. M.C. F. Ariel Miranda Rodríguez y M.C. Jesús Urrutia. A mis compañeros de Peñoles: Geol. Paulina Robles Andrade, M.C. Julio Cesar de la Cruz Vargas, M.C. Ramsés A. Tarazón, M.C. Omar Noriega.

AGRADECIMIENTOS A INSTITUCIONES.

Quisiera agradecer al CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT) por haberme seleccionado como becario de esta gran institución (Registro: 175904), ya que fue gracias al apoyo económico lo que me ayudo en gran medida para poder concretar este logro académico y personal.

Agradezco infinitamente a la UNIVERSIDAD DE SONORA, Departamento de Geología, especialmente al comité académico de la Maestría en Ciencias Geología por brindarme la oportunidad de formarme académicamente en esta valiosa institución. De igual manera, agradezco al proyecto del cuerpo académico "Evolución magmática-tectónica del Terciario y yacimientos minerales relacionados en el noroeste de México", por el financiamiento otorgado para llevar acabo estudios de geoquímica. PIFI-2006 (12907-6145180000-315301-000000).

Mi más sincero agradecimiento a la CIA. MINERA FRISCO, Unidad Minera San Felipe, especialmente al Ing. Mario Aponte por impulsar el convenio entre Cía. Minera Frisco-Universidad de Sonora, ya que gracias a este convenio se obtuvo el financiamiento para los estudios de petrografía, geocronología y el trabajo de campo. Gracias a los geólogos Atanacio Ibarra, Samuel Coronado y Rafael Salomón por sus comentarios y ayuda en la realización de este trabajo.

Debo agradecer profundamente a la CIA. MINERA PEÑOLES, especialmente al Ing. Benito Noguéz Alcántara, por haberme permitido ser durante 3 meses becario al término de la maestría, y después darme la oportunidad de ser empleado, ya que sin este apoyo no se hubiera podido concretar el proyecto. Agradezco también al Ing. Luis Felipe Novelo por inyectarme una gran dosis de ánimo para terminar con este proyecto, al Ing. Carlos Díaz de León por todas sus facilidades otorgadas, al Ing. Eduardo Salvatierra por haber sido el gran impulsor para finalizar con este logro académico y personal, a Marco Gómez del Valle por sus siempre comentarios acertados y a Héctor Mendivil, próximo colega.

INDICE

DEDICATORIA AGRADECIMIENTOS

	Pag.
I.- RESUMEN.	1
II.-GENERALIDADES.	3
II.1.- INTRODUCCION.....	3
II.2.- LOCALIZACION.....	4
II.3.- ANTECEDENTES.....	6
II.3.1.- Historia.....	6
II.3.2.- Trabajos previos.....	7
II.4.- OBJETIVOS.....	8
II.5.- METODOLOGIA DE TRABAJO.....	9
III.- APERTURA DEL GOLFO DE CALIFORNIA.	12
IV.- GEOLOGÍA DEL DISTRITO MINERO DE SAN FELIPE.	15
IV.1.- GEOLOGIA REGIONAL.....	15
IV.2.- GEOLOGIA LOCAL.....	19
IV.2.1.- Rocas pre-batolíticas.....	19
IV.2.2.- Rocas batolíticas.....	19
IV.2.3.- rocas post-batolíticas.....	20
IV.2.3.1.- Andesitas-latita.....	23
IV.2.3.1.1.- Sección Cucapah.....	24
IV.2.3.1.2.- Sección Santa María.....	34
IV.2.3.2.- Riolitas-dacita.....	45
IV.2.3.2.1.- Sección Santa Cruz.....	46
IV.2.3.3.- Riolitas (ignimbritas).....	56
V.- BRECHAS SANTA CRUZ Y SANTA MARÍA.	62
V.1.- BRECHA SANTA CRUZ.....	62
V.2.- BRECHA SANTA MARIA.....	69
V.2.1.- Unidad Tb1.....	70
V.2.2.- Unidad Tb2.....	73
V.2.3.- Horizonte de granófidós.....	73
V.2.4.- Unidad Tb3.....	76
V.2.5.- Unidades Tb4 y Tb5.....	77
V.2.6.- Unidades Tr y Trb.....	80
VI.- ALTERACIÓN Y MINERALIZACION.	85
VI.1.- ALTERACIÓN Y MINERALIZACION: BRECHA SANTA CRUZ.....	85
VI.2.- ALTERACION Y MINERALIZACION: BRECHA SANTA MARIA.....	99

VII.- ISOTOPOS ESTABLES.	106
VII.1.- ISOTOPOS DE AZUFRE.....	106
VII.2.- ISOTOPOS DE OXIGENO Y CARBONO.....	108
VIII.- GEOQUÍMICA.	112
IX.- EDADES RADIOMÉTRICAS.	124
X.- DISCUSION Y CONCLUSIONES.	128
BIBLIOGRAFÍA.	131

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.- Plano de localización.....	5
Figura 2.- Evolución tectónica del Golfo de California, del Mesozoico a la actualidad.....	14
Figura 3.- Mapa geológico regional de Sierra Pinta.....	18
Figura 4.- Geología del distrito de San Felipe.....	22
Figura 5.- Sección geológica-estratigráfica Cucapah.....	33
Figura 6.- Sección geológica-estratigráfica Santa María.....	36
Figura 7.- Sección geológica-estratigráfica Santa Cruz.....	47
Figura 8.- Correlación de las tres secciones medidas (Cucapah, Santa María y Santa Cruz).....	55
Figura 9.- Plano geológico de la brecha Santa Cruz.....	63
Figura 10.- Plano geológico de la brecha Santa María.....	71
Figura 11.- Plano de alteración y mineralización de la brecha Santa Cruz.....	87
Figura 12.- Plano de alteración y mineralización de la brecha Santa María.....	101
Figura 13.- Valores de isótopos estables de S.....	107
Figura 14.- Reservorios naturales para isótopos de sulfuros.....	108
Figura 15.- Reservorios naturales para isótopos de oxígeno.....	110
Figura 16.- Reservorios naturales para isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$).....	111
Figura 17.- Diagrama TAS (álcalis totales vs SiO_2).....	115
Figura 18.- Diagramas tipo Harker de los óxidos mayores (Ti, Al, Fe y Mn) contra SiO_2	116
Figura 19.- Diagramas tipo Harker de los óxidos mayores (Ca, Na, K, Mg y P) contra SiO_2	117
Figura 20.- Diagrama de K_2O vs SiO_2	118
Figura 21.- Diagrama de $[\text{SiO}_2/(\text{FeO}_I/\text{MgO})]$	120
Figura 22.- Diagrama de discriminación tectonomagmática Hf/3-Th-Ta.....	120
Figura 23.- Diagrama multielementos para las rocas volcánicas.....	121
Figura 24.- Diagrama de tierras raras (REE).....	123
Figura 25.- Edad geocronológica de la secuencia andesitas-latita.....	127
Figura 26.- Edad geocronológica de la secuencia de riolitas.....	127

INDICE DE FOTOS

	Pag.
Foto 1.- Roca basáltica con textura traquítica (SFP-80).....	26
Foto 2.- Basalto con textura traquítica (SFP-81).....	26
Foto 3.- Brecha con textura piroclástica (SFP-82).....	28
Foto 4.- Flujo andesítico con textura porfídica (SFP-87).....	28
Foto 5.- Toba litocristalina (SFP-83).....	30
Foto 6.- Flujo andesítico con textura porfídica (SFP-84).....	30
Foto 7.- Andesita con textura porfídica (SFP-85).....	32
Foto 8.- Andesita con textura porfídica (SFP-86).....	32
Foto 9.- Andesita de piroxeno autobrechada (SFP-88).....	35
Foto 10.- Andesita de piroxeno autobrechada con textura porfídica (SFP-89)....	35
Foto 11.- Flujo de andesita con hornblenda con textura porfídica (SFP-91).....	39
Foto 12.- Flujo andesítico con textura porfídica (SFP-92).....	39
Foto 13.- Toba de lapilli-ceniza de composición riolítica (SFP-93).....	41
Foto 14.- Ignimbrita con textura piroclástica (SFP-94).....	41
Foto 15.- Ignimbrita con textura piroclástica (SFP-95).....	43
Foto 16.- Brecha tobácea o piroclástica con textura piroclástica (SFP-97).....	43
Foto 17.- Vitrófido? con textura vitrofídica (SFP-96).....	44
Foto 18.- Vitrófido con textura porfídica (SM-5).....	44
Foto 19.- Riolita con textura fluidal vítrea (SFP-58).....	49
Foto 20.- Riolita con textura fluidal vítrea perlítica (SFP-59).....	49
Foto 21.- Riolita con textura vítrea fluidal (SFP-60).....	51
Foto 22.- Toba riolítica vitocristalina con textura piroclástica (SFP-61).....	51
Foto 23.- Flujo de composición riolítico con textura esferulítica (SFP-62, 63).....	53
Foto 24.- Flujo riolítico con textura de flujo (SFP-64).....	53
Foto 25.- Flujo riolítico con textura vítrea (SFP-65).....	54
Foto 26.- Ignimbrita de composición riolítica (SFP-66,67 y 98).....	57
Foto 27.- Brecha explosiva volcánica de composición riolítica (SFP-68).....	57
Foto 28.- Ignimbrita de composición riolítica (SFP-100).....	59
Foto 29.- Vitrófido con textura porfídica (SFP-69).....	59
Foto 30.- Ignimbrita fuertemente soldada (SFP-70).....	61
Foto 31.- Riolita vítrea con textura perlítica (SFP-101).....	61

Foto 32.- Acercamiento de la unidad I de la brecha Santa Cruz.....	64
Foto 33.- Acercamiento de la unidad II de la brecha Santa Cruz.....	64
Foto 34.- Acercamiento de la unidad IV de la brecha Santa Cruz.....	66
Foto 35.- Microfotografía de la muestra SFP-50, tomada sobre la unidad I.....	66
Foto 36.- Microfotografía de la muestras SFP-54, tomada sobre la unidad I.....	68
Foto 37.- Microfotografía de la muestras SFP-54.....	68
Foto 38.- Mostrando la Unidad Tb1.....	72
Foto 39.- Microfotografía de la muestra SF-24-06, unidad Tb2.....	75
Foto 40.- Microfotografía de la muestra SM3A.....	75
Foto 41.- Microfotografía de la muestra SFP-75.....	78
Foto 42.- Microfotografía de la muestra SF-17-06.....	82
Foto 43.- Microfotografía de la muestra SF-18-06, unidad Tr.....	82
Foto 44.- Microfotografía de la muestra SF-14.....	84
Foto 45.- Zona de brecha fuertemente silicificada.....	84
Foto 46.- Microfotografía de la muestra SFP-54.....	88
Foto 47.- Microfotografía de la muestra SFP-53.....	88
Foto 48.- Microfotografía de la muestra SFP-55.....	89
Foto 49.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (256.90 m), LN.....	92
Foto 50.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (256.90 m), LP.....	92
Foto 51.- Mostrando parte del núcleo del barreno BDF-20003 (292.75 m).....	93
Foto 52.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (297.75 m).....	93
Foto 53.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (297.75 m).....	95
Foto 54.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (297.75 m).....	95
Foto 55.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (297.75 m).....	96
Foto 56.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (317.65 m).....	96
Foto 57.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (432.95 m).....	98
Foto 58.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (432.95 m).....	98
Foto 59.- Microfotografía de la muestra SF-8.....	102
Foto 60.- Microfotografía de la muestra SF-11.....	102
Foto 61.- Microfotografía de la muestra SF6-06.....	103
Foto 62.- Microfotografía de la muestra SF-11.....	103

INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1.- Secuencia de eventos sucedidos tanto en la brecha Santa María como en la brecha Santa Cruz.....	105
Tabla 2.- Isótopos de azufre.....	107
Tabla 3.- Isótopos de oxígeno y carbono.....	109
Tabla 4.- Composición geoquímica de las rocas volcánicas investigadas, mostrando los valores de elementos mayores.....	112
Tabla 5.- Composición geoquímica de las rocas volcánicas investigadas, mostrando los valores de elementos trazas y REE.....	113

I.- RESUMEN

Este trabajo se llevó a cabo gracias al convenio de colaboración realizado entre la Cia. Minera Frisco y la Universidad de Sonora (Depto. de Geología).

El distrito minero San Felipe se localiza en la parte noroeste de México, a 125 km al sur de la ciudad de Mexicali y a 87 km al sur-sureste, en línea recta, del campo geotérmico Cerro Prieto.

El distrito minero San Felipe se encuentra ubicado en el campo volcánico conocido como Sierra Pinta. Su ambiente geológico está representado por 3 grandes grupos: i) rocas pre-batolíticas, las cuáles han sido definidas como complejo metamórfico (argilitas, conglomerado, areniscas oscuras, etc) asignándoseles una edad del Paleozoico Superior (carbonífero); ii) rocas batolíticas, las cuáles afloran en el área de Cucapah como cuerpos porfídicos de composición granítica intrusionando a las rocas metamórficas; y iii) rocas post-batolíticas, con edades que van desde el Mioceno (andesitas-latita) al Plioceno medio-tardío (riolitas-dacita), están compuestas de brechas, aglomerados y flujos de composición de andesita y andesita basáltica en su base, pasando a una serie de brechas y flujos de composición riolita-dacita, coronadas por unidades ignimbríticas.

En la brecha Santa Cruz, las zonas de alteración (silicificación y argilización) y mineralización, se encuentran más cargadas al lado oeste de la estructura. Las alteraciones más significativas en esta zona, corresponden a una moderada a fuerte silicificación, regularmente acompañadas con moderada argilización. Sobre su lado mas sur occidental y tratando de cortar esta zona de intenso fracturamiento NNE-SSW acompañada de silicificación, argilización y

zonas con óxidos de hierro, se dió un barreno denominado BDF-20003, de 450.05 m de profundidad, donde se cortaron distintos tramos de brecha definidas como de inyección, con valores anómalos de Zn, Cu, Pb (Au).

Dentro de la brecha Santa María, se tienen llamativas zonas blanqueadas principalmente en el lado oeste y suroeste presentando una fuerte silicificación. Las zonas silicificadas generalmente se componen de flujos o piroclastos riolíticos presentando hidrofracturamiento, con microfracturas en el mismo sentido, regularmente con sílice relleno éstas fracturas. Estas zonas silicificadas son acompañadas o están asociadas al emplazamientos de diques irregulares de color oscuro, estructura de brecha fina (brechas de flujo), con valores anómalos de Pb, Zn (Au, Ag); los cuales cortan a la unidad de flujos riolíticos (Tr), indicando estados tardíos de mineralización.

Las 4 secuencias de rocas del distrito minero de San Felipe (basalto, andesitas-latita, riolitas-dacita y riolitas (ignimbritas), se graficaron utilizando el diagrama de TAS de Le Bas et al. (1986), cayendo en el dominio subalcalino; la distribución de las muestras muestran una línea semiparalela a la línea de Irvine y Baragar (1971), la cuál parece seguir un control evolutivo simple por cristalización fraccionada.

Las firmas geoquímicas de los elementos traza indican una clara zona de subducción, no se observan firmas bimodales para hablar de una distensión o rift. Sin embargo, el patrón parecido a intraplaca de los elementos incompatibles y la anomalía de Nb-Ta, son los que definen la apertura.

II.- GENERALIDADES

II.1.- INTRODUCCION

Se conoce que la mayor producción de Au y Ag en el distrito minero de San Felipe, viene de una serie de estructuras con dirección N30-40°E y echados entre 30-40° al noroeste, denominadas vetas tipo Sinaí, de las cuales se extrajeron cerca de 700,000 oz. de oro de 1994 al 2001, año en que paró su producción (Ibarra-Serrano, 1997). Estas estructuras se hospedan principalmente dentro de una secuencia de rocas volcánicas constituidas por flujos, brechas y tobas de composición andesita-dacita y en algunas partes constituyen el contacto entre estas unidades y rocas metamórficas más antiguas de edad Paleozoica. Estas estructuras afloran por más de un kilómetro de longitud y desaparecen al norte, debajo de una secuencia volcánica compuesta de rocas félsicas.

A pesar del gran interés que representa el estudio de este sistema de vetas, recientemente, al noroeste de las instalaciones de Minera San Felipe, se detectaron una serie de estructuras brechoides, las cuales al ser cartografiadas y muestreadas por geólogos de esta compañía, arrojaron valores anómalos de Pb-Zn (Au,Ag,Cu), representando buenos blancos para ser exploradas. Estas áreas anómalas denominadas Santa María y Santa Cruz, tienen una forma semicircular, una de ellas (Santa María) tiene cerca de 1.5 km de diámetro y ambas fueron definidas como diatremas por los geólogos de San Felipe, comparándolas en forma, origen y probablemente tonelaje a las encontradas en diferentes lugares en el mundo, como en Papua Nueva Guinea, Creepie Creeck en Estados Unidos o con Peñasquito en Zacatecas, México.

Estos nuevos descubrimientos y la importancia que estas estructuras puedan traer al interés económico del distrito, definieron el rumbo del presente estudio, enfocado exclusivamente al análisis y caracterización de estas zonas para determinar la formación, distribución y desarrollo de estas brechas.

El presente trabajo muestra una descripción geológica-estructural de estas dos zonas brechoides, define la estratigrafía de las rocas volcánicas en esta región, delimita la edad de formación de estas estructuras y relaciona su formación a eventos tectónicos-magmáticos relacionados a la apertura del Golfo de California.

II.2.- LOCALIZACION

El distrito minero de San Felipe, se localiza en la porción noreste del estado de Baja California, a 125 km al sur-sureste de Mexicali, a 65 km al noroeste del puerto de San Felipe y a 87 km al sur-sureste en línea recta del campo geotérmico Cerro Prieto (Figura 1). Su acceso se realiza por la carretera federal No. 5 Mexicali-Crucero del Valle (El Chinero)-San Felipe, hasta el kilómetro 123, donde se toma una desviación hacia el oeste de 5 kilómetros por un camino de terracería, que lleva directamente a las instalaciones de la Compañía Minera San Felipe.

El área de la mina San Felipe se encuentra dentro de la provincia de Llanura Sonorense, subprovincia del Desierto de Altar (INEGI, 2000), caracterizada por amplias planicies aluviales y escabrosas cadenas montañosas como Sierra Cucapah, Sierra Las Tinajas y Sierra Pinta, las cuales se elevan desde el nivel del mar entre 160 y 500 metros de altura.

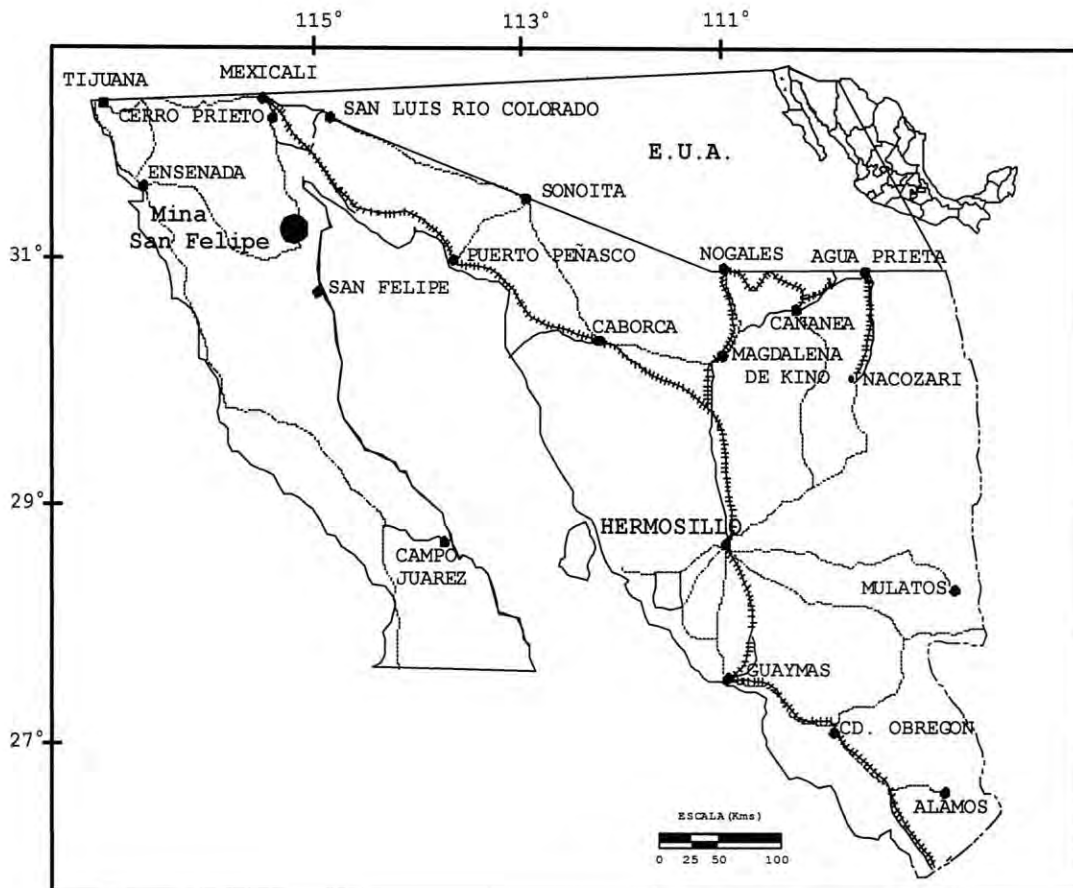


Figura 1.- Plano de localización del distrito Minero de San Felipe en Baja California.

El drenaje en esta zona es dendrítico y se encuentra conformado regularmente por pequeños arroyos controlados por lo abrupto de la topografía del área, los cuales llegan a tener flujo solo en el periodo de lluvias, la mayoría de ellos drenan hacia el Golfo de California.

II.3.- ANTECEDENTES

II.3.1.- Historia

De acuerdo a informes antiguos, la primera actividad minera en el distrito se remonta a 1904 cuando el Sr. Fernando Macías descubrió la veta Moctezuma donde realizó pequeños trabajos hasta 1930; año en que se vendió a San Francisco Mines of México Limited a través de CIMSA quien desarrolló obras a pequeña escala hasta 1937, año en que cesaron los trabajos por no tener reservas suficientes. FRISCO efectuó los primeros reconocimientos geológicos a finales de 1984 y para 1986 llevó a cabo trabajos de geología regional; y no fue hasta 1988 cuando se efectuaron trabajos de detalle y muestreo. En 1989 cede los derechos a Minera Real de Ángeles, S.A de C.V, iniciando los trabajos de exploración directa y barrenación hasta 1991; los estudios concluyen para 1992 con la interpretación del modelo geológico y cubicación de reservas minerales de Au y Ag. En 1993, FRISCO a través de la Compañía San Felipe S.A de C.V. inicia la construcción de la planta de beneficio y preparación del minado subterráneo, siendo hasta 1994 cuando se inicia la explotación de la veta Sinaí en la mina del mismo nombre.

II.3.2.- Trabajos previos

A nivel regional, el área del distrito minero San Felipe, el Golfo de California y la Península de Baja California; han sido documentados en una gran variedad de estudios contenidos en la literatura geológica de Baja California.

Algunos trabajos relevantes son los siguientes: Lomnitz et al. (1970), Elders et al. (1972) y Halfman et al. (1984); coinciden en sus trabajos, sugiriendo que algunas depresiones morfológicas, tales como el Salton Sea, la cuenca de Cerro Prieto en el Valle de Mexicali y la costa plana de San Felipe están relacionadas a la actividad de fallas laterales ("lateral shear faults"), tales como el sistema San Andrés-Imperial y las fallas Cerro Prieto y San Miguel. Spencer y Normark (1979); proponen que el Golfo de California se formó primero como un rift continental orientado NW-SE (con edades de alrededor de 12 a 4.5 Ma) cuando el sistema transforme Tosco-Abreojos fué activo a lo largo de la costa oeste de Baja California. Gastil et al. (1981); observó rocas tonalíticas cretácicas y batolíticas dioríticas intrusionando secuencias carbonatadas, clásticas y menormente volcánicas del Paleozoico al Mesozoico medio, de afinidad eugeoclinal. Atwater (1970), Mammerickx y Klitgord (1982) y Atwater (1989); afirman que el Golfo de California es el clásico ejemplo de una transición de un margen continental activo a un régimen de extensión litosférico resultando en la formación de un rift y el establecimiento de un nuevo límite entre las placas Pacífico y Norteamérica, y que la subducción terminó progresivamente como el resultado de la migración al sur del punto triple Pacífico-Farallón-Norteamérica.

Stock et al. (1991); propone la formación de un sistema de rift extensional y cuencas pull-apart de la Provincia Extensional del Golfo, asociado a eventos tectónicos en el límite entre las placas Pacífico y Norteamérica. Sawlan (1991) y Martín-Barajas et al. (1995); reportan en sus trabajos que rocas volcánicas neógenas del NE de Baja California, concentradas en algunas provincias volcánicas principales como son la Sierra La Tinaja y la provincia Volcánica de Puertecitos, registran la transición de la subducción oeste de la Península de Baja California al rifting en el Golfo de California. Stock y Hodges (1990), Stock et al. (1996), Nagy (1997) y Lewis y Stock (1998); mencionan que la mayoría de las ignimbritas ampliamente distribuidas entre el Mioceno tardío y el Plioceno, documentadas en la Provincia Volcánica de Puertecitos, sirven como base para la reconstrucción de la historia del fallamiento extensional durante la apertura temprana del Golfo de California. Martín-Barajas (2000); considera que la evolución del volcanismo en la provincia extensional del Golfo refleja el cambio de un régimen de subducción al desarrollo de un rift continental y a un rift oceánico con transferencia de la península a la placa Pacífico durante el Mioceno tardío-Plioceno.

II.4.- OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es caracterizar las estructuras brechoides de Santa María y Santa Cruz, a partir de una cartografía a semidetalle en estas dos regiones que resalte sus características geológico-estructurales, su alteración y mineralización relacionada así como la caracterización del vulcanismo asociado. Estas zonas brechoides presentan evidencias de alteración y mineralización del tipo Pb,Zn (Au,Ag), las cuáles por

sus características estructurales parecen definir buenos blancos de exploración y dada su distribución geográfica y disposición estratigráfica dentro de la secuencia volcánica de estas dos estructuras, revelan estar muy relacionadas al magmatismo félsico asociado en tiempo a la apertura del Golfo de California, sucedido hace 12 Ma.

II.5.- METODOLOGÍA DE TRABAJO

El presente estudio se realizó en diferentes etapas, las cuales pueden ser descritas en orden cronológico iniciando con: 1) recopilación y análisis bibliográfico; 2) trabajo de campo; 3) Trabajo de laboratorio; 4) procesamiento de la información y redacción.

1.- La recopilación bibliográfica referente al distrito minero San Felipe y zonas aledañas, incluye tanto artículos científicos, tesis profesionales como reportes técnicos realizados por compañías mineras. La mayoría de esta bibliografía se recopiló en la Biblioteca de Ciencias de la Universidad de Arizona y en la biblioteca del Instituto de Geología de la Estación Regional del Noroeste de la UNAM. Esta etapa permitió obtener la base teórica del plan de trabajo.

2.- Con respecto al trabajo de campo, este se llevó a cabo en 3 visitas:

La primera consistió básicamente en reconocer y ambientarse en el distrito minero, se visitaron los proyectos de interés económico dentro del mismo distrito, como Jueves Santo, La Escondida, Manolo Norte, Crestón, Egriselda Este, Cucapah y Cantil NE entre otros. Esta visita permitió definir las áreas de Santa Cruz y Santa María como las principales zonas de interés para los estudios de esta tesis.

En la segunda visita se cartografió a semidetalle la brecha Santa Cruz y una parte de la brecha Santa María. Se tomaron una serie de muestras para petrografía y se realizó una visita al interior de las minas Sinaí y Moctezuma.

En la tercera y última visita, se terminó de cartografiar a semidetalle la brecha Santa María y se hizo la descripción y muestreo de 6 barrenos (BDF-20001 al BDF-20006). Al Este de la brecha de Santa Cruz se levantó una sección estratigráfica de más de 500 m de espesor y otra más al norte de la brecha Santa María, donde se muestreó para fechamiento radiométrico por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, acompañado de una serie de muestras para análisis químico. Una columna estratigráfica más, se levantó en el área de Cucapah, donde se define claramente el contacto de la secuencia volcánica con las rocas más antiguas (paleozoicas) del distrito. Durante esta jornada, se llevó a cabo una visita al Valle de la Trinidad, Puerto de San Felipe, Puertecitos y zonas aledañas al distrito minero con el fin de recolectar muestras y complementar el estudio geoquímico y petrográfico de este estudio.

3.- Las muestras para el estudio geoquímico recolectadas, se quebraron y prepararon en los laboratorios del Instituto de Geología de la Estación Regional del Noroeste de la Universidad Nacional Autónoma de México (ERNO) y se pulverizaron en el laboratorio de preparación de muestras del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, utilizando un mortero de canicas de ágata RESTCH. Las muestras después de su preparación, fueron enviadas al laboratorio CHEMEX Labs. para su análisis de elementos mayores, traza y tierras raras (REE).

Las muestras para el estudio petrográfico, fueron preparadas en el laboratorio de laminación del Departamento de Geología de la Universidad de

Sonora. Fueron estudiadas bajo un microscopio petrográfico binocular marca Olympus.

4.- Los datos de campo fueron digitalizados utilizando paquetes de dibujo como Freehand, AutoCad y los resultados de análisis químicos fueron procesados utilizando programas especiales o procesados directamente en Excel.

III.- APERTURA DEL GOLFO DE CALIFORNIA

El Golfo de California es el clásico ejemplo de una transición entre margen continental activo que pasa a un régimen de extensión litosférico, resultando en la formación de un rift y el establecimiento de un nuevo límite entre las placas Pacífico y Norteamérica. Alrededor de los 12.5 Ma, la subducción terminó progresivamente como resultado de la migración del punto triple Pacífico-Farallón-Norteamérica hacia el sur y un punto triple hacia el norte como ha sido sugerido por varios trabajos oceanográficos y tectono-estructurales que han delineado el piso submarino del Golfo de California y han aportado importantes datos estructurales (Atwater, 1970; Moore, 1973; Mammerickx y Klitgord, 1982).

Como resultado de esta migración, el sistema transforme Tosco-Abrejos fue activo a lo largo de la costa oeste de Baja California (Spencer y Normark, 1979), evolucionando a un rift oceánico a los 3.5 Ma, con el desarrollo del sistema de fallas dextral Golfo de California-San Andrés (Dickinson y Snyder, 1979), que inicia el desplazamiento de la península de Baja California y la consecuente formación del Golfo de California (Hamilton, 1971; Karig y Jensky, 1972; Gastil et al., 1975; Angelier et al., 1981; Stock y Hodges, 1989; Lonsdale, 1989 y Umhoefer et al., 1994 y 1997, entre otros).

Por otro lado, importantes avances sobre la evolución magmática de la península han sido aportados por los trabajos de Gastil et al. (1975); Hausback (1984); Sawlan y Smith (1984) y Demant (1981). Un vulcanismo asociado con la apertura del Golfo de California esta presente en Baja California, oeste de Sonora y Sinaloa (Gastil et al., 1979; Batiza, 1978) y ha sido ampliamente documentada en el norte de Baja California por Stock (1989); Martín-Barajas et

al. (1995), con un volcanismo neogénico en la Provincia Extensional del Golfo, con un estilo eruptivo y composición química, que refleja el cambio del régimen de subducción al desarrollo de un rift continental, en una región previamente extendida durante el proceso de extensión de la Provincia de Cuencas y Sierras (Basin and Range) (c.f., Henry y Aranda-Gómez, 1992). A escala regional, el volcanismo asociado a la evolución del rift del Golfo de California presenta un patrón geográfico en el cual predominan lavas alcalinas en los extremos de esta provincia, en la porción estable de esta provincia, con presencia de vulcanismo calcoalcalino, principalmente riolítico-dacítico, que ocurre en campos volcánicos discretos en las márgenes y en algunas islas.

Un fallamiento normal con dirección N-S y movimientos dextrales NNW-SSE a NW-SE en conjunto con fallas oblicuas, han sido reconocidas en sedimentos jóvenes que rellenan a la serie de cuencas desarrolladas durante la época de apertura del Golfo de California y algunos de ellos han sido rotados en la dirección de las manecillas de reloj en el sentido de la extensión NE-SW a E-W asociado al movimiento del sistema de falla de San Andrés (Angelier et al., 1981). En la actualidad se conoce que durante las primeras etapas de la apertura del Golfo de California, la parte central de la Península fué afectada por esfuerzos extensionales con dirección NE-SW a ENE-WSW seguida por una extensión E-W a ESE-WNW durante el Mioceno Tardío al Plio-Cuaternario (Angelier et al., 1981).

La evolución del Golfo de California puede verse simplificada en la Figura 2.

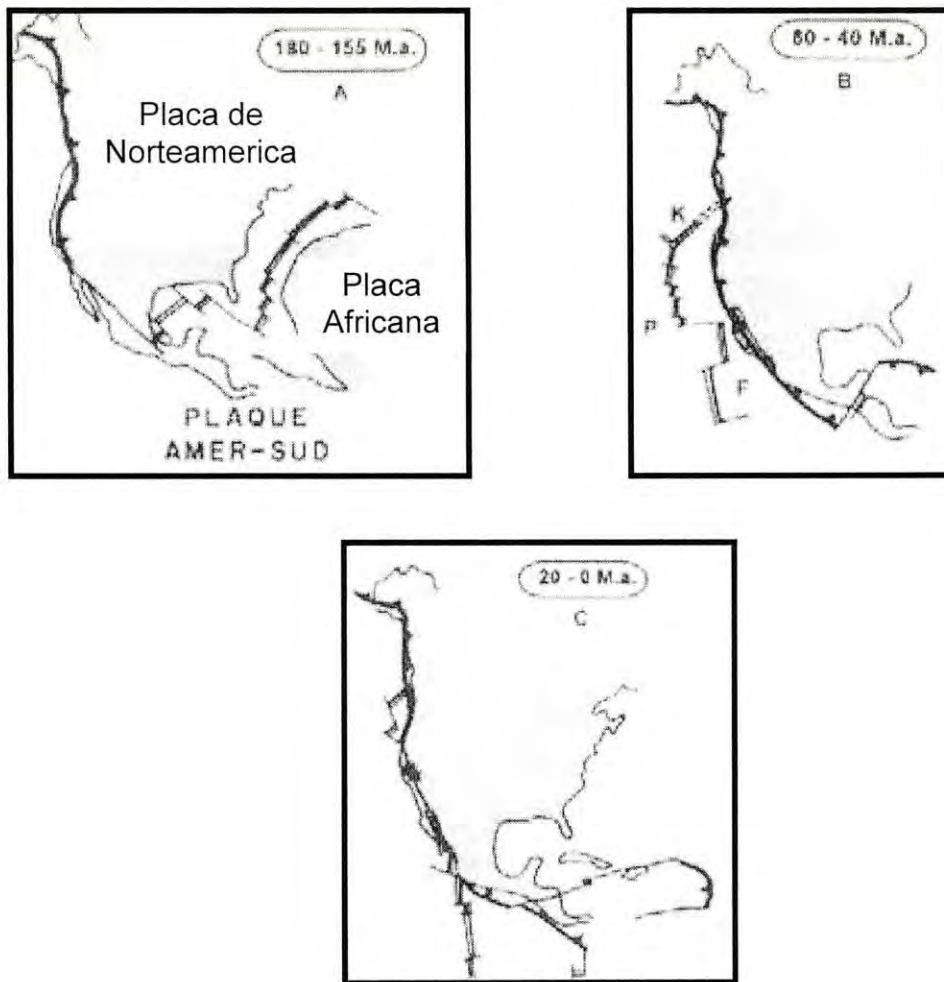


Figura 2.- Reconstrucción tectónica del Golfo de California, del Mesozoico a la actualidad. Tomado de Paz-Moreno, F., 1992.

IV.- GEOLOGIA DEL DISTRITO MINERO DE SAN FELIPE

IV.1.- GEOLOGIA REGIONAL

El distrito minero San Felipe se encuentra ubicado en el campo volcánico conocido como Sierra Pinta. La geología está representado por 3 grandes grupos de rocas: pre-batolíticas, batolíticas y post-batolíticas.

Las rocas **pre-batolíticas** ocupan un área aproximada de 4 km x 10 km y se extienden como una franja de rocas oscuras en una burda dirección NNW-SSE; están divididas en 3 cinturones: El Cinturón Nororiental (Paleozoico) dentro del cuál se encuentra ubicado en distrito minero de San Felipe; está formado de diversas rocas metamórficas agrupadas en un complejo metamórfico que aflora discontinuamente desde la línea divisoria, al W de Mexicali, hasta Bahía de Calamajué y en pequeños afloramientos discontinuos a lo largo de la parte oriental de la península (Ibarra-Serrano, 1997). En el área de Sierra Pinta el complejo metamórfico está constituido de esquistos, cuarcitas, metareniscas, pizarras, filitas, calizas recristalizadas, pedernal y metavolcánicas cuya edad es reportada como Paleozoico Superior (Carbonífero) y constituyen el basamento (Figura 3, color azul). Estas rocas fueron derivadas del metamorfismo regional de una antigua secuencia sedimentaria y son correlacionadas litológicamente con rocas existentes en varias localidades de California E.U.A. como son Coyote, Sta. Rosa y San Jacinto Mountains. Recientemente, las rocas más antiguas localizadas en el noreste de Baja California han sido incluidas dentro del terreno Caborca por Sedlock (2003), consisten de rocas metamórficas, graduando de esquistos verdes a anfibolita que afloran en aislados afloramientos. Este Terreno se extiende hacia el sur hasta el paralelo 28° donde se pone en contacto con

rocas del pre-basamento Cenozoico (Figura 3 en Sedlock, 2003). Los otros dos cinturones son el Cinturón metamórfico Nor-central (Triásico-Jurásico) y el Cinturón Occidental, arco volcánico Alisitos (Triásico-Cretácico Medio).

Las rocas pre-batolíticas paleozoicas (complejo metamórfico) es intrusionado por las rocas **batolíticas**, las cuáles están formadas por intrusivos de diversas composiciones, principalmente tonalitas, granodioritas y granitos del Cretácico que afloran al noreste y sur-sureste de Sierra Pinta y forman parte del batolito de Baja California que es la continuación hacia el sur del batolito peninsular – Ranges Batholith en California E.U.A. (Figura 3, color rosa fuerte). Estas rocas plutónicas batolíticas cretácicas se encuentran ampliamente distribuidas en la península de Baja California, afloran de manera continua desde el paralelo 34° N hasta el 28° N, por más de 800 km. Hacia el sur del paralelo 28°, se observan aislados afloramientos de este batolito, prolongándose hasta la región sur de la península en la región de Los Cabos, los cuáles parecen corresponder a un cuerpo batolítico continuo emplazado en condiciones subcorticales, como ha sido previamente descrito por Gastil et al. (1975) y Sedlock (2003) entre otros. Muchos son los trabajos efectuados en estas rocas, destacando los de Gastil (1975), donde divide al batolito en zona oeste y este, basado en su composición, edad y estilo de emplazamiento. Estudios más recientes proponen variaciones químicas e isotópicas y radiogénicas en dirección oeste-este (Silver et al., 1979; Gastil, 1990a, 1990b; Ortega-Rivera, 2003), indicando una variación que va de gabro en su parte oeste a tonalitas en su extremo este. Intrusionan a rocas volcánicas metamorfoseadas a esquistos verdes y sedimentos tipo flysch (Silver et al., 1979).

Las rocas **post-batolíticas** cubren más del 50% de la superficie del distrito de San Felipe (Figura 3) y pueden alcanzar más de 500 m de espesor. Están compuestas de rocas volcánicas, volcanoclásticas de diversas composiciones; del Terciario y basaltos del Cuaternario, así como rocas sedimentarias del Cretácico Superior, Terciario y Cuaternario. Las rocas volcánicas abarcan la mayor parte de Sierra Pinta, Sierra La Tinaja y la parte sur de la Sierra de Juárez; las rocas volcánicas fueron depositadas discordantemente sobre la paleosuperficie del complejo metamórfico, son de composición andesítica que incluyen andesitas, andesitas porfídicas, tobas andesíticas y andesitas aglomeráticas (lahares), posiblemente de edad terciaria (Mioceno). Sobre las andesitas afloran una secuencia de riolitas, tobas riolíticas con intercalaciones de vitrófidos del Terciario (Plioceno), que corresponden a la erupción de flujos de ceniza (Figura 3, color naranja). Al sur del distrito de San Felipe, en la sierras de La Tinaja, Puertecitos y San Felipe, relaciones litológicas y estratigráficas similares han sido definidas por Gastil et al. (1971, 1979); Stock et al. (1991); Martín-Barajas et al. (1995); Lewis y Stock (1998) y Nagy et al. (1999), entre otros, definiendo secuencias volcánicas terciarias de más de 500 m de espesor, que descansan discordantemente encima de rocas ígneas cretácicas.

Toda la columna geológica está intrusionada por diques y domos riolíticos así como de diques de andesitas y andesitas basálticas del Terciario Superior. Una serie de grandes fallas de rumbo general NW 20° sensiblemente paralelas al sistema de fallas de San Andrés, limitan a la Sierra de Juárez con la Laguna Salada y el Valle de San Felipe. Hacia el suroeste del yacimiento se encuentra la falla Agua Blanca de rumbo NW 70° que cruza la península.

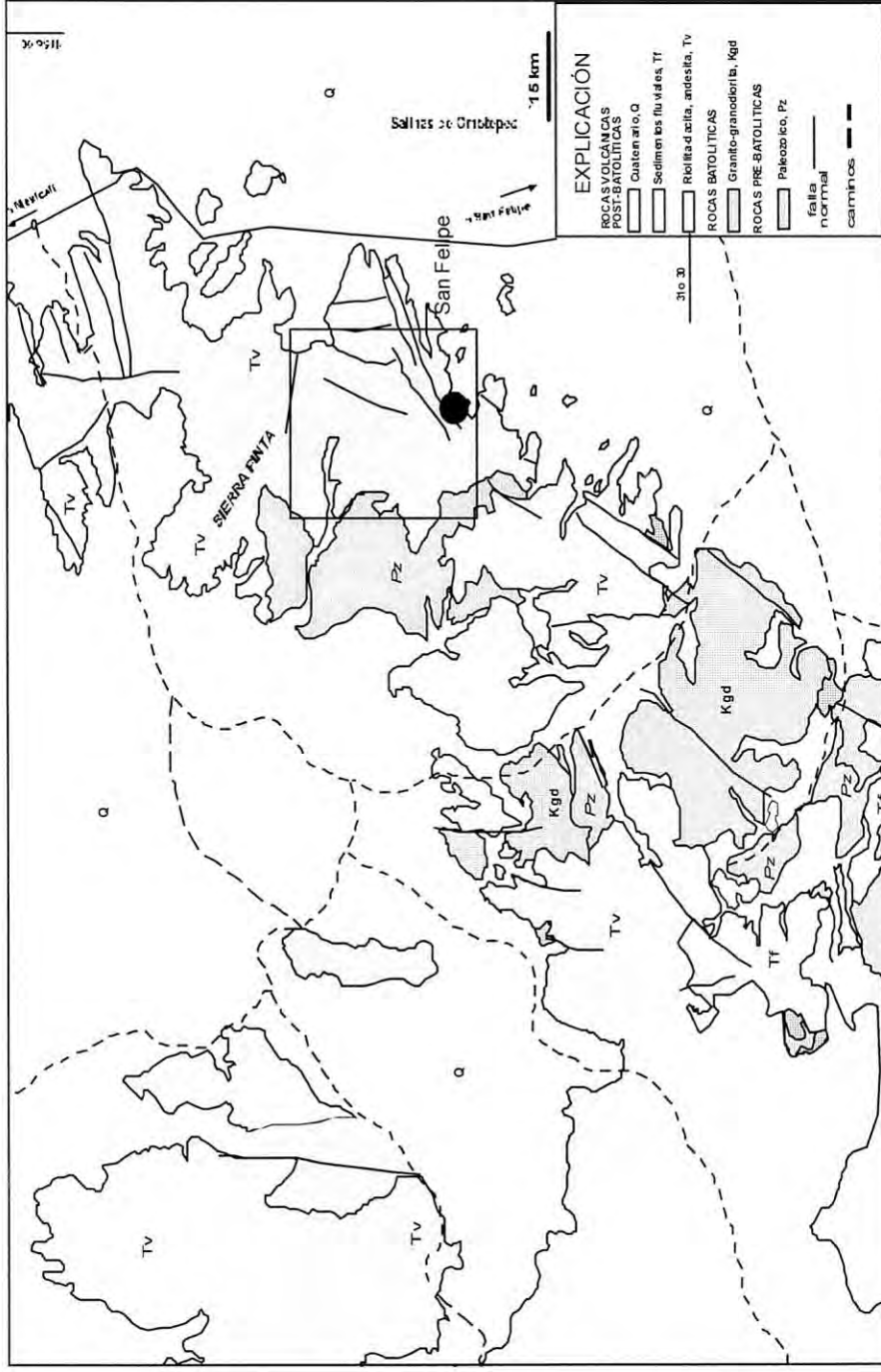


Figura 3.- Mapa geológico regional de Sierra Pinta, mostrando los rasgos geológicos y estructurales mas significativos en el distrito de San Felipe. El cuadro que incluye la mina San Felipe, corresponde a la Figura 4. (Plano modificado de Gastil et al., 1971).

IV.2.- GEOLOGÍA LOCAL

IV.2.1.- Rocas pre-batolíticas

Son las más antiguas de esta región a las cuales se les ha asignado una edad correspondiente al Paleozoico Superior (carbonífero) (McEldowney, 1970; Gastil y Miller, 1984). Han sido definidas como rocas paleozoicas o complejo metamórfico. Están formadas por una secuencia fuertemente deformada y metamorfoseada compuesta de argilitas, grawackas, conglomerados, capas de pedernal, calizas con crinoides, basaltos y pequeños remanentes de una arenisca oscura, que son cubiertas discordantemente por una secuencia de rocas volcánicas terciarias de composición andesita-dacita conocidas como volcánicas post-batolíticas (Figura 4).

IV.2.2.- Rocas batolíticas

En el distrito de San Felipe, solo se tiene la presencia de estos cuerpos intrusivos en el área de Cucapah, al suroeste de la mina San Felipe. Están representadas por cuerpos porfídicos de composición granítica, compuestos de cristales de cuarzo (10-15%), subhedrales de 2-4 mm de diámetro, acompañados de feldespato potásico, parcialmente convertido a sericita + cuarzo y presencia de sericita en un 5%. Intrusionan a las rocas metamórficas paleozoicas, las cuáles presentan una fuerte foliación N30°-60°W, desarrollando un contacto pasivo con una zona de alteración de un ancho de entre 30 a 60 cm formado de sericita y arcillas?. Cerca al contacto se tiene un enjambre de vetillas unidireccionales (N20° W) de cuarzo + biotita, las cuáles cruzan tanto al intrusivo como a las rocas metamórficas. Las rocas volcánicas

cubren parcialmente en discordancia al intrusivo y a las rocas metamórficas (Figura 4).

A la fecha se desconoce la edad de esta roca intrusiva, pero por relaciones de campo se infiere una edad Cretácico Tardío-Terciario Temprano, probablemente correspondiendo a una etapa diferenciada de los granitoides que conforman el batolito cretácico transpeninsular, el cuál es ampliamente distribuido en toda esta región del noroeste de Baja California.

IV.2.3.- Rocas post-batolíticas

Se componen principalmente de una secuencia de brechas volcánicas, aglomerados y flujos de composición de andesita a andesita-basáltica en su base, pasando a una serie de brechas volcánicas y flujos de composición riolita-dacita, coronadas por unidades ignimbríticas en su parte superior con edades que van desde el Mioceno a finales del Plioceno. Esta secuencia de rocas volcánicas descansa y cubre discordantemente a las rocas batolíticas y metamórficas paleozoicas o en algunos lados, pueden estar en contacto por falla con las rocas paleozoicas, como sucede en la mina Sinaí y mina Moctezuma (Figura 4).

En el distrito de San Felipe esta secuencia de rocas volcánicas es de suma importancia, porque además de ser la principal hospedante de la mineralización económica en esta región, su química y relación estratigráfica, arroja importante información sobre la época transicional entre la etapa de subducción, hasta antes de ~12 Ma en la parte oeste de la península de Baja California y distensión con la consecuente formación del Golfo de California

después de ~12 Ma, como ha sido sugerida por Stock et al. (1999), para estas rocas al sur-sureste de Sierra Pinta en el área de San Felipe.

Dada su presencia como roca encajonante de la mineralización económica y su probable asociación genética, a estas unidades volcánicas se les puso mayor atención en este estudio. En este estudio se integran tres secciones medidas, diferenciando todas sus unidades, describiéndolas y enfatizando su distribución, composición y espesor; por último, se hace referencia sobre su origen y su posible relación que guardan con cada régimen tectónico entre subducción y extensión, las cuales parecen tener una estrecha relación genética con las etapas de mineralización en esta región. Su descripción se hace de la más antigua a la más reciente incluyéndose una breve descripción petrográfica acompañada de fotografías en sección delgada de puntos de interés.

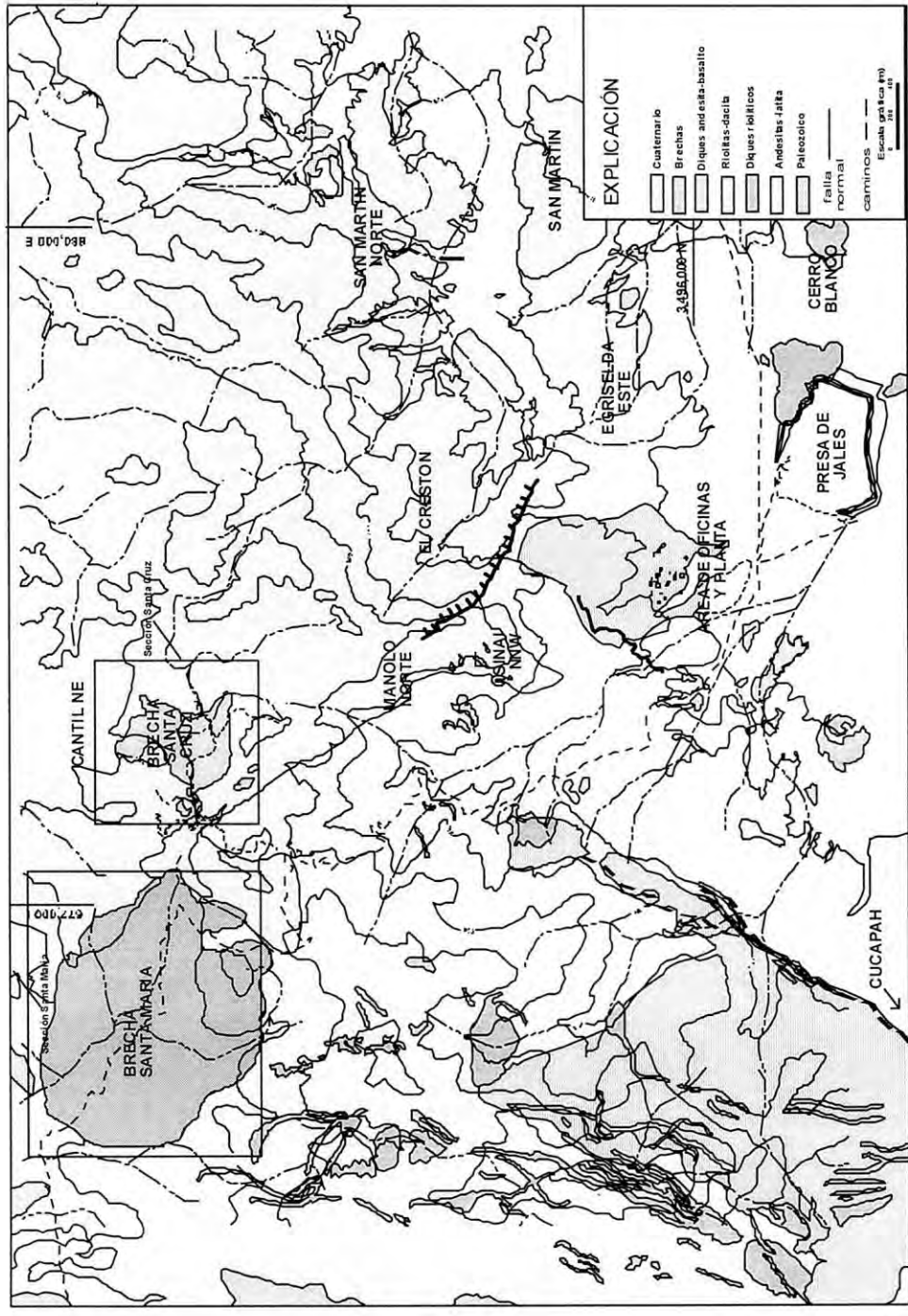


Figura 4.- Geología del distrito de San Felipe, mostrando la geología y los principales rasgos estructurales presentes en esta región. (Modificado de los planos de la Gerencia de exploración y geología de la Compañía Minera San Felipe, 2004). Los cuadros en la parte superior, corresponden a las Figuras 9 y 10, las cuales fueron cartografiadas en detalle en este estudio.

IV.2.3.1.- Andesitas-latita

Estas rocas se encuentran en clara discordancia encima de las rocas paleozoicas y batolíticas en el área de San Felipe. Conforman una serie de montañas, más o menos orientadas en una dirección NE-SW, regularmente presentando una topografía bastante abrupta y elevaciones que pueden alcanzar más de 500 m sobre el nivel del mar.

Su apariencia a distancia es muy singular, presentan regularmente una coloración gris-rojiza, la cual se intensifica en las áreas donde se tiene mayor alteración hidrotermal "implementada" por una serie de veta-fallas con dirección preferente NE-SW y N-S, o donde son cortadas por una serie de diques o domos riolíticos más tardíos. Aunque en algunas partes es difícil reconocer su actitud, regularmente presentan un rumbo general N-NE con echado variable de 25 a 40° hacia al E-SE; sin embargo, cerca de las estructuras o vetas mineralizadas, pueden presentarse variaciones en su rumbo e inclinación.

Generalmente esta unidad presenta una gran proporción de rocas piroclásticas y aglomerados alcanzando más del 60% de su volumen en referencia a verdaderos flujos, los cuales son poco comunes, regularmente delgados e interestratificados dentro de la secuencia piroclástica. Su composición, aunque de aspecto muy homogéneo, parece corresponder mayormente a andesitas, andesitas-basálticas y tal vez dacitas, con aparente mayor presencia de andesitas-basálticas en la parte norte que en la sur. Una característica importante de esta secuencia, es que se encuentran hospedando la mayor parte de la mineralización económica de Au, Ag tipo Sinaí, la cual se acomoda en estructuras con dirección preferencial NNE-SSW.

La definición litológica y geoquímica de esta secuencia de andesitas-latita es a partir de dos secciones estratigráficas medidas localizadas en el área de Cucapah y norte de la brecha Santa María mostradas en la Figura 4 y detalladas en las Figuras 5 y 6.

IV.2.3.1.1.- Sección Cucapah

La primera sección medida de esta secuencia denominada andesitas-latita fué descrita a 4 km al sureste del campamento de San Felipe en el área conocida como Cucapah (Figura 5). Esta sección alcanza más de 160 m de espesor y se compone en su base de un conglomerado mal clasificado, de 16 m de espesor compuesto de fragmentos angulosos, conformados exclusivamente de rocas metamórficas, con tamaños variables que van desde 2 a 5 cm de diámetro, aunque se observan algunos que pueden alcanzar hasta 20 cm, sostenidos dentro de una matriz fina arenosa de la misma composición que los fragmentos. Su distribución en el área es muy restringida y generalmente parece rellenar depresiones o paleocanales encima de las rocas metamórficas, limitando su extensión lateral y semejando depósitos con poco acarreo y rápida acumulación, como se aprecia en la forma, tamaño y disposición de sus fragmentos.

De manera discordante y encima de los conglomerados, se tiene un flujo de aproximadamente 26 m de espesor de composición basáltica. Sus tres metros iniciales lo conforma una roca basáltica, con apariencia brechoide compuesta de fragmentos de la misma composición, con plagioclasa en un 15% del volumen total de la roca. En sección delgada (SFP-80), se compone de fragmentos angulosos con textura de flujo (traquítica), formada por cristales

tabulares de plagioclasa de aproximadamente 0.1 mm de largo, orientados y contenidos en una matriz de vidrio. Otros fragmentos presentan también textura traquítica, pero con cristales más grandes de 2-3mm, alterados a un conjunto de arcillas. De manera tardía se tiene una fuerte penetración de calcita (Foto 1).

Inmediatamente encima y de manera concordante, se tienen aproximadamente 15 m de espesor de una roca de color oscuro y textura fina, la cuál presenta pequeños cristales de feldespatos orientados y dentro de una matriz fina vítrea?. En sección delgada (SFP-81), presenta una textura traquítica, con pequeños cristales de plagioclasa (>70%) de composición de labradorita-andesina (An28) y tamaños del orden de 0.4 a 0.6 mm de largo, acomodadas de manera paralela dándole un aspecto fluidal a la roca. Se observan algunos cristales subhedrales de olivino (3%), con sus orillas idingsitizadas, algunos con su centro convertido parcialmente a serpentina?. Debido a la falta de roca fresca, esta roca se seleccionó para análisis químico, aunque de antemano se sabía que no era buena muestra para análisis debido a la alteración presente en la roca y a la presencia de óxidos de fierro bordeando los fenocristales de la roca. Por sus características texturales, químicas y mineralógicas esta roca se puede clasificar como un basalto (Foto 2, Figura 5). Pasando hacia arriba, esta unidad se presenta como una roca de color gris claro, textura porfídica con un ligero incremento en fenocristales oscuros compuestos de olivinos? (~10%) transformados a óxidos de hierro, con cristales euhedrales-subhedrales de plagioclasa (2-3%), contenidos dentro de matriz fina microcristalina de la misma composición que la roca.

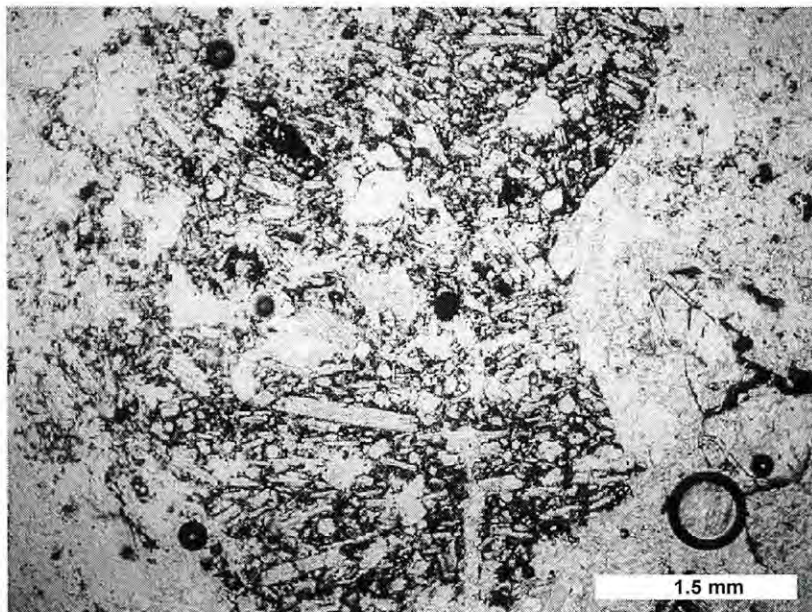


Foto 1.- Roca basáltica con textura traquítica (SFP-80), compuesta de fragmentos angulosos, formada por cristales tabulares de plagioclasa, orientadas y contenidas en una matriz de vidrio. 10X, LN.

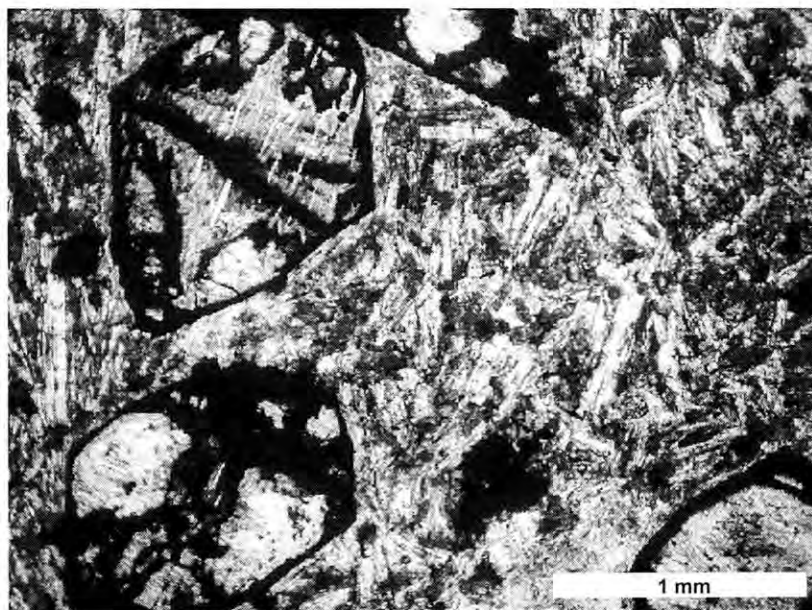


Foto 2.- Basalto con textura traquítica (SFP-81), formada por cristales de plagioclasa (>70%) acomodadas de manera paralela dándole un aspecto fluidal a la roca, se observan algunos cristales subhedrales de olivino? (3%), con sus orillas idingsitizadas con su centro convertido parcialmente a serpentina?. 10X, LN.

Inmediatamente encima, se tienen aproximadamente 8 m de una brecha volcánica, conformada por fragmentos angulosos a subangulosos de 2-3 cm de diámetro, compuesta de clastos claros félsicos (~80%) y 5% de fragmentos oscuros correspondientes a rocas metamórficas del paleozoico. En sección delgada (SFP-82), presenta una textura piroclástica, compuesta por fragmentos subangulosos a subredondeados de rocas volcánicas (>70%) de composición andesitas-latita a latita, con diámetros de <0.2 a 5 mm, acompañados con menor presencia (~3%) de fragmentos de cuarcitas y gneises, todos ellos sostenidos entre si (Foto 3).

Arriba de esta unidad y de manera concordante, se tienen 48 m de espesor de un flujo andesítico autobrechado con fragmentos mayores a los 20 cm, sostenidos en matriz de la misma composición. En sección delgada (SFP-87), presenta una textura porfídica compuesta de fenocristales subhedrales de feldespato, sostenidos dentro de una matriz fina microcristalina, probablemente de la misma composición que los fenocristales. Esta roca fue seleccionada para análisis químico y por sus características texturales, químicas y mineralógicas esta roca se puede clasificar como un flujo andesítico (Foto 4).

En discordancia y descansando de manera cercana a la horizontal encima de la unidad anterior, se tienen aproximadamente 18 metros de una secuencia compuesta de tobas finas con textura laminar (laminas de 2-3 cm), litocristalinas en su base y delgados flujos de rocas porfídicas de composición andesitas-latita intercalados, conteniendo fenocristales de plagioclasa (~20%) y anfíboles (<3%) contenidos en una matriz fina microcristalina (Figura 5).

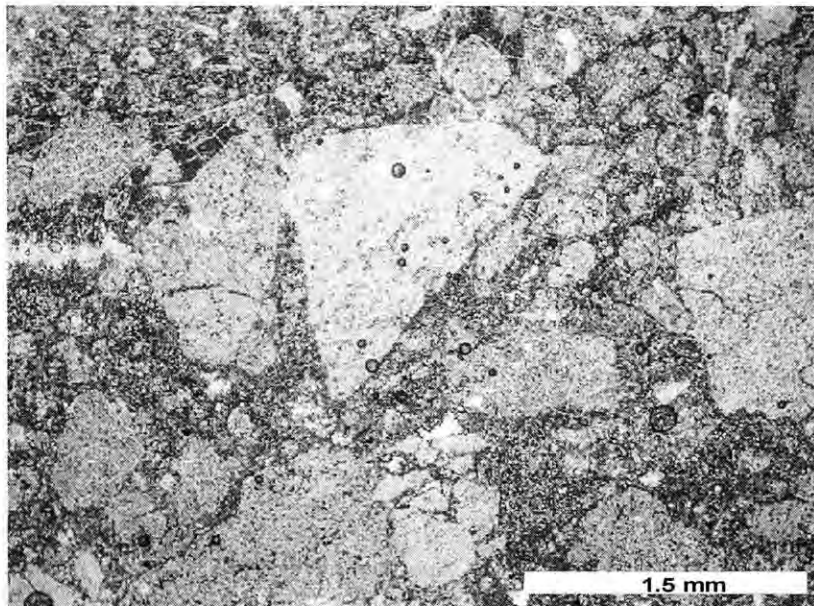


Foto 3.- Brecha con textura piroclástica (SFP-82), compuesta de fragmentos subangulosos a subredondeados de rocas volcánicas (>70%) de composición andesitas-latita a latita, acompañados por algunos fragmentos de cuarcitas y gneises. 4X, LN.

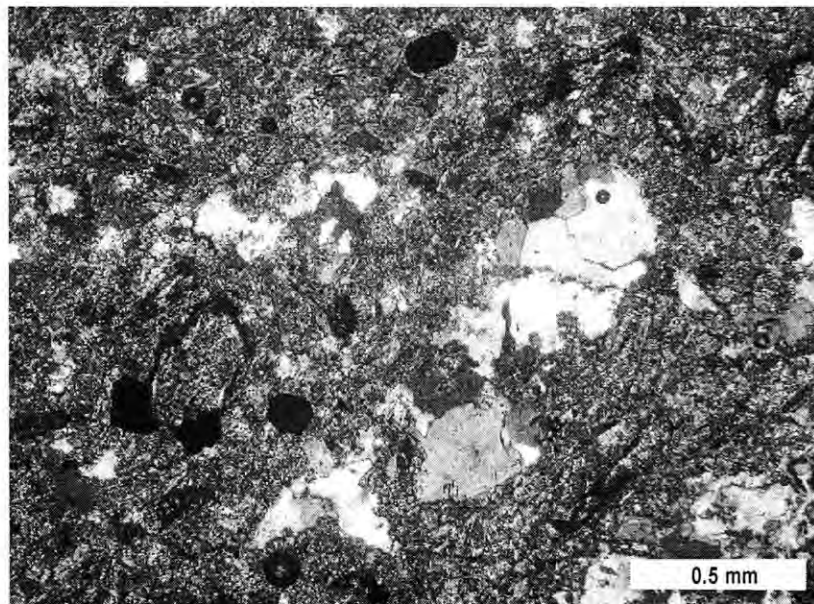


Foto 4.- Flujo andesítico con textura porfídica (SFP-87), compuesta de fenocristales subhedrales de feldespato, contenidos dentro de una matriz fina microcristalina, probablemente de la misma composición que los fenocristales. 10X, LP.

En su base se compone de tobas litocristalinas (SFP-83), las cuáles presentan una textura piroclástica, compuesta de fragmentos de roca volcánica (~80%) con textura fina, subporfídica fluidal, contenidos en una matriz muy fina microcristalina compuesta de cristales euhedrales de plagioclasa de <0.05 mm de largo y presencia de cristales automorfos de anfíbol, regularmente alineados y parcialmente reemplazados por calcita. Por sus características texturales y mineralógicas esta roca se puede clasificar como una toba litocristalina de composición andesita-latita o andesita (Foto 5).

Por otro lado, el flujo (SFP-84) intercalado dentro de estas tobas litocristalinas se compone de una textura porfídica con fenocristales de plagioclasas y feldespatos, regularmente aglomerados, (10-12%), con tamaños de 1-2 mm y débilmente reemplazados por sericita a lo largo de microfracturas y cristales automorfos de anfíbol (8%) de 0.2 a 0.6 mm de diámetro, regularmente oxidados en sus orillas y parcialmente reemplazados por calcita. Se tiene la presencia de cuarzo rellenando oquedades de manera tardía en un 10% del volumen de la roca. Dado su textura y composición esta unidad puede ser clasificada como un flujo de composición andesítica? (Foto 6).

Continuando de manera concordante encima de la unidad descrita líneas arriba, se tiene una secuencia de más de 26 m de espesor compuesto en su base de rocas volcánicas piroclásticas conteniendo fragmentos angulosos de 0.5 a 1 cm de diámetro y textura porfídica de composición andesítica contenidos dentro de una matriz fina. Hacia su parte superior los fragmentos se presentan más grandes, algunos pareciendo haber sido lixiviados, dejando huecos dentro de la roca y siendo una característica de ella.

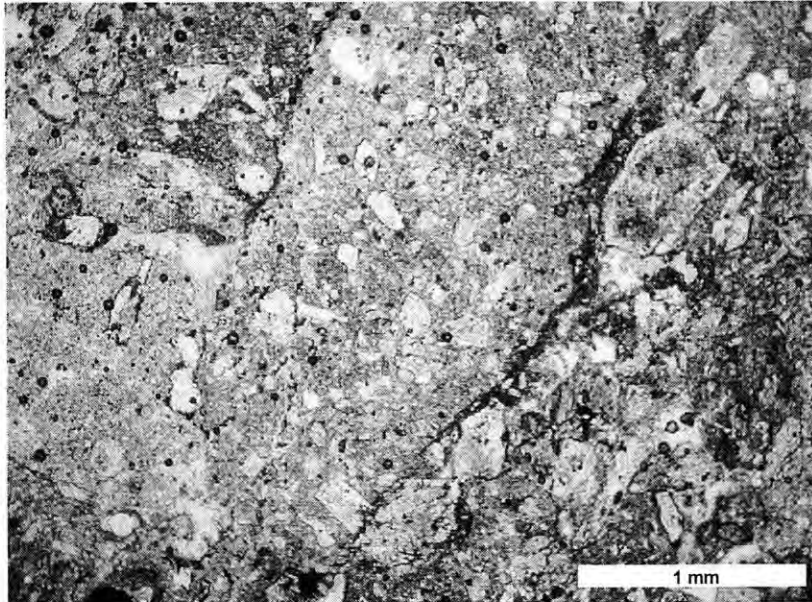


Foto 5.- Toba litocristalina de composición andesita-latita o andesita con textura subporfídica fluidal (SFP-83), compuesta de fragmentos de roca volcánica (~80%) contenidos en una matriz muy fina microcristalina compuesta de cristales euhedrales de plagioclasa de $<0.05\text{ mm}$ de largo. 4X, LN.

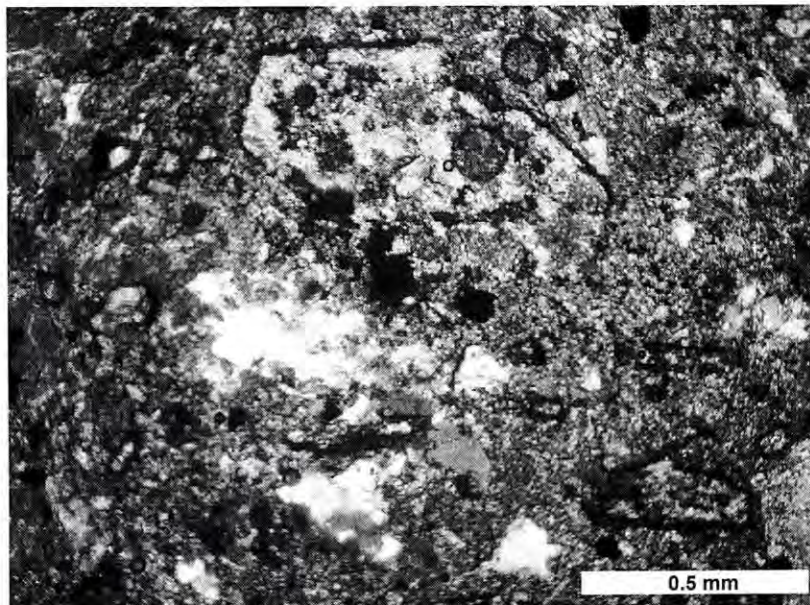


Foto 6.- Flujo andesítico con textura porfídica (SFP-84), compuesta de fenocristales de plagioclasas y feldespatos, regularmente aglomerados, (10-12%), débilmente reemplazados por sericita y cristales automorfos de anfíboles (8%), regularmente oxidados en sus orillas y parcialmente reemplazados por calcita. 10X, LP.

Se tomaron dos muestras de esta secuencia (SFP-85 y SFP-86) en donde se observa una textura de brecha volcánica, con fragmentos angulosos todos de la misma composición, textura porfídica conteniendo cristales euhedrales de feldespato (15-20%), con tamaños variables de 0.1 a 0.4 mm, algunos de ellos zonados y de composición oligoclasa (An_{13}), contenidos dentro de una matriz fina y menor presencia de microcristales de ferromagnesianos en calidad de trazas, acompañada de calcita y sericita. La composición de sus plagioclasas y carencia de cuarzo modal, sitúan a estas rocas en el rango de una andesita (Fotos 7 y 8 respectivamente).

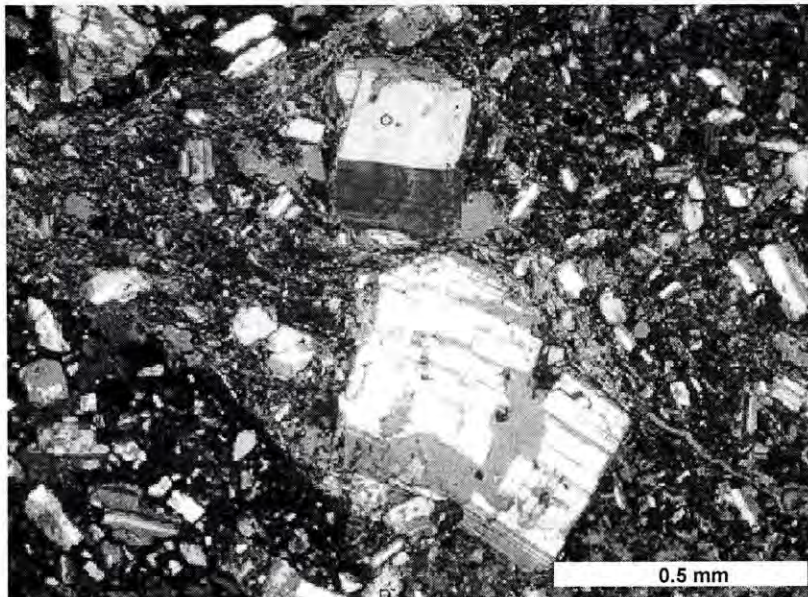


Foto 7.- Andesita con textura porfídica (SFP-85), compuesta de cristales euhedrales de feldespato (15-20%), con tamaños variables de 0.1 a 0.5 mm, algunos de ellos zonados y de composición oligoclasa (An_{13}), contenidos dentro de una matriz fina y menor presencia de microcristales de ferromagnesianos en calidad de trazas, acompañada de calcita y sericita. 4X, LP.

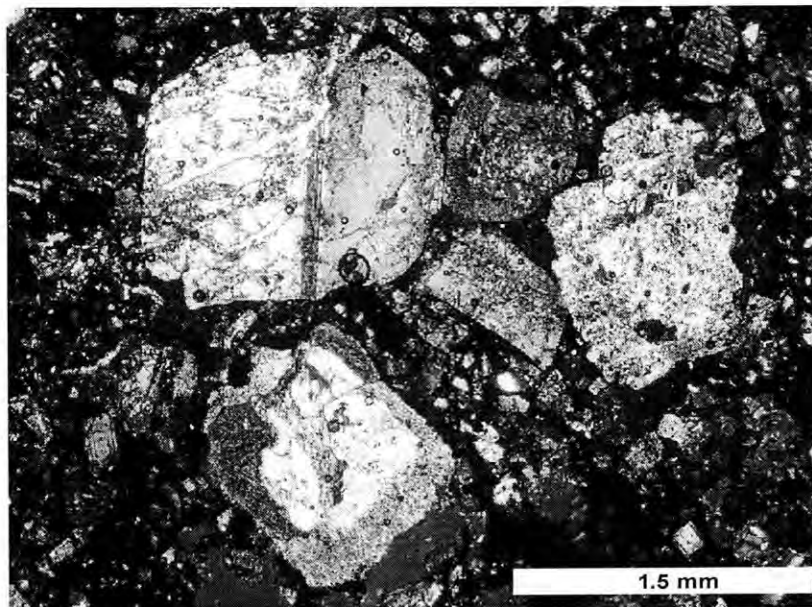
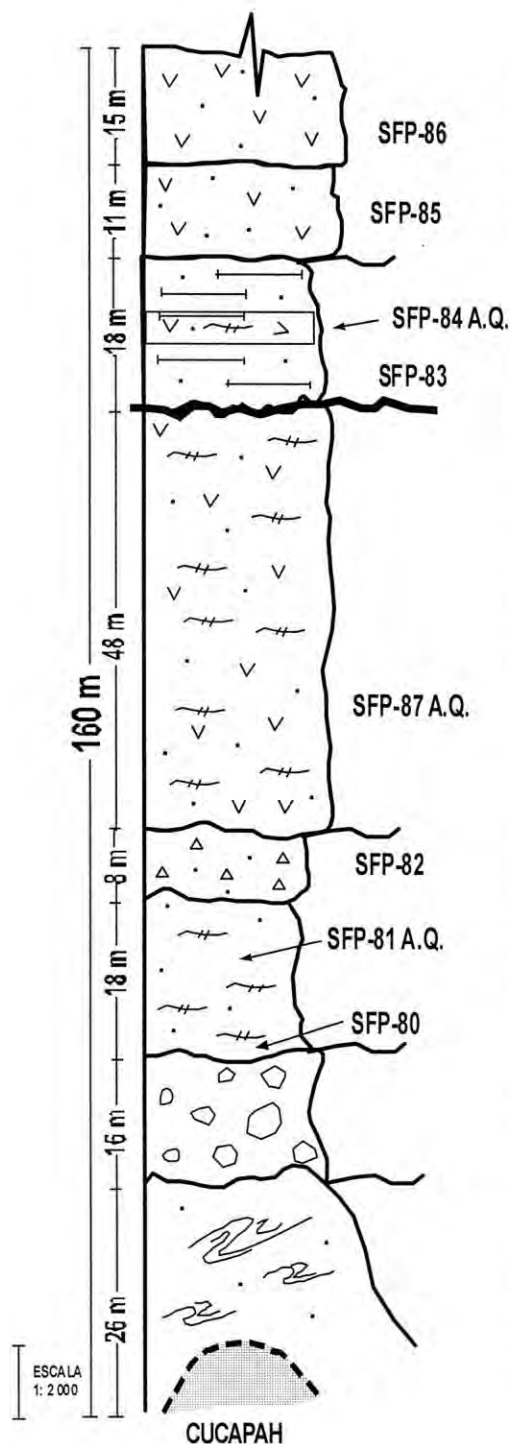


Foto 8.- Andesita con textura porfídica (SFP-86), compuesta de cristales subhedrales de feldespato y plagioclasa (20-25%), algunos de ellos zonados, contenidos dentro de una matriz fina y menor presencia de microcristales de ferromagnesianos en calidad de trazas, acompañada de calcita. Muy parecida a la muestra SFP-85, solo que en esta muestra los fragmentos de brecha y las plagioclasas son mucho más grandes. 4X, LP.



Secuencia andesítica con textura porfídica compuesta de cristales euhedrales de feldespato (15-20%), algunos de ellos zonados (SFP-85) y cristales subhedrales de feldespato y plagioclasa (20-25%), contenidos dentro de una matriz fina (SFP-86).

Secuencia de tobas finas con textura laminar, en su base se compone de tobas litocristalinas con textura piroclástica (SFP-83), teniendo intercalados flujos andesíticos con textura porfídica (SFP-84).

Flujo andesítico con textura porfídica, la muestra SFP-87 está compuesta de fenocristales subhedrales de feldespato, contenidos dentro de una matriz fina microcristalina, probablemente de la misma composición que los fenocristales.

Flujo de composición basáltica compuesto a la base por una roca basáltica con textura traquítica (SFP-80), seguido por un basalto con textura traquítica (SFP-81), terminando con una brecha piroclástica compuesta por más del 70% de rocas volcánicas andesíticas (SFP-82).

Conglomerado mal clasificado compuesto de fragmentos angulosos de rocas metamórficas sostenidos dentro de una matriz fina arenosa de la misma composición que los fragmentos.

Complejo metamórfico constituido por areniscas de color oscuro, cuarcitas, esquistos, pizarras, filitas.

Intrusivo porfídico granítico compuesto de cristales de cuarzo subhedrales y feldespato potásico débilmente sericitizado.

Figura 5.- Sección geológica-estratigráfica Cucapah, mostrando la localización de las muestras para estudios petrográficos y análisis químicos.

IV.2.3.1.2.- Sección Santa María

La segunda sección medida fue descrita aproximadamente a 400 m al norte de la brecha Santa María, donde se tiene el contacto entre esta unidad y la secuencia de riolitas que la sobreyacen y fue denominada como sección Santa María (Figura 6). A diferencia de Cucapah, no afloran los sedimentos metamórficos paleozoicos y no se notan indicios de las rocas graníticas cretácicas; en cambio, su base parecería corresponder a la parte media superior de la secuencia andesitas-latita (Sección Cucapah), con una buena proporción de riolitas e ignimbritas en su parte superior (Figura 8).

La base de esta sección está conformada por 50 m de espesor de un aglomerado andesítico, compuesto de fragmentos de roca con textura porfídica, débilmente fluidal, con cristales euhedrales-subhedrales de plagioclasa (25-30%) de 1mm en tamaño, acompañados de anfíbol transformado parcialmente a clorita (3%), todos ellos flotando dentro de una matriz fina vitrocrystalina. Dentro de esta unidad se tienen delgados flujos volcánicos intercalados, generalmente de forma irregular y reducida extensión lateral. En sección delgada (SFP-88 y SFP-89) corresponden a una andesita de piroxeno autobrechada, presentando una textura subporfídica fluidal, con fenocristales de plagioclasa (~25%), subhedrales-euhedrales de 0.4 a 1 mm de largo, con clinopiroxenos intersticiales ligeramente cloritizados y con óxidos de hierro. Los fenocristales se encuentran contenidos dentro de una matriz fina microcrystalina formada de plagioclasas ligeramente orientadas que le dan un aspecto fluidal a la roca. La muestra SFP-89, a diferencia de la muestra SFP-88, presenta mayor presencia de calcita tardía, reemplazando parcialmente a los fenocristales y en parte a la matriz de la roca (Fotos 9 y 10).

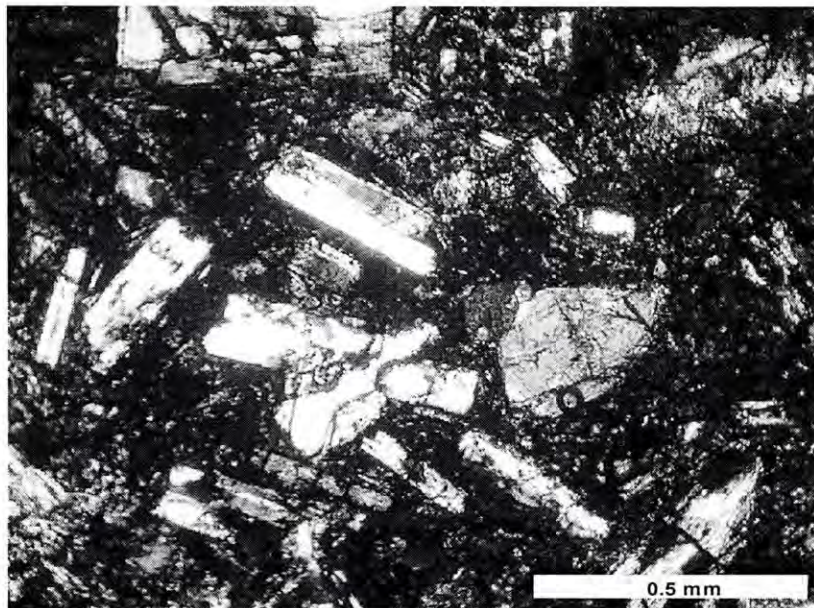


Foto 9.- Andesita de piroxeno autobrechada con textura subporfídica fluidal (SFP-88), compuesta de fenocristales de plagioclasa (~25%) de subhedrales a euhedrales de 0.4 a 1 mm de largo, presencia de clinopiroxenos intersticiales entre los cristales con tamaños <0.3 mm ligeramente cloritizados y con óxidos de hierro en sus orillas. 10X, LP.

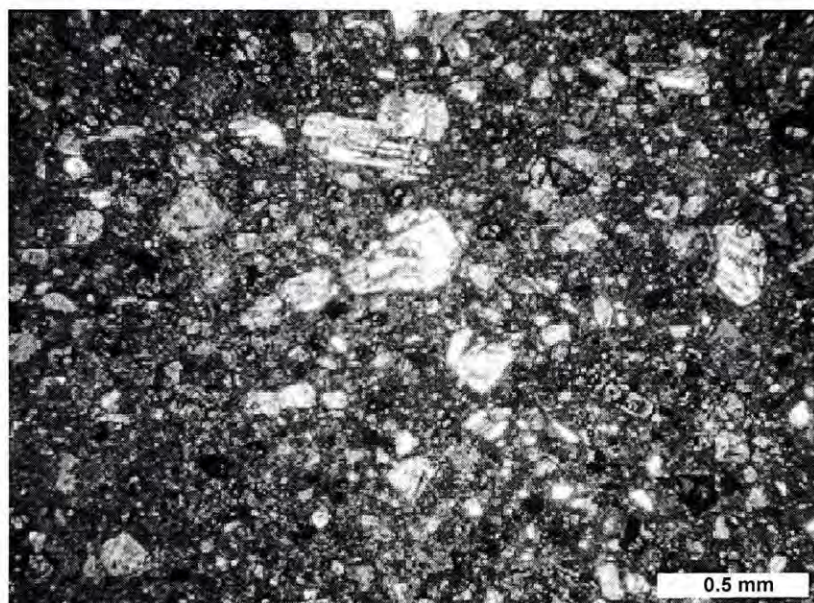
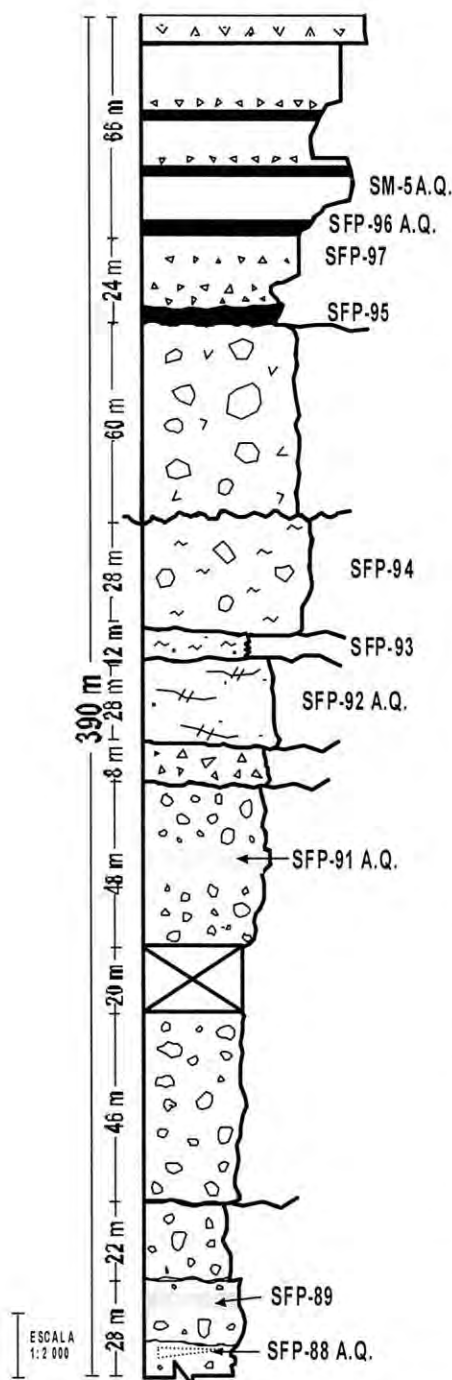


Foto 10.- Andesita de piroxeno autobrechada con textura porfídica (SFP-89), compuesta de cristales subhedrales a euhedrales de plagioclasa (10%) con tamaños menores a 0.5 mm, menor presencia de biotita alterada a sericita y feldespatos alterados a sericita y calcita todo esto sostenido en una matriz fina microcristalina. Puede tratarse de una variación de la muestra SFP-88 A.Q., solo que con mayor cantidad de calcita. 4x, LP.



Paquete de rocas ácidas piroclásticas, a la base, la muestra SFP-95 corresponde a una ignimbrita moderadamente soldada rica en líticos con textura piroclástica, seguido de muestra SFP-97 correspondiente a una brecha tobácea con fragmentos angulosos de hasta 1 cm en tamaño, pasando a ignimbritas con textura vitrofídica (SFP-96) con horizontes intercalados de 1 m de vitrófidos (SM-5).

Conglomerado con fragmentos subangulosos de andesita (~80%) y menor proporción de riolitas, en tamaños de 10-15 cm hasta 50 cm en tamaño, sostenidos en una matriz arenosa.

Horizonte de riolita con cristales de cuarzo, plagioclasa, micas y fragmentos de roca sostenidos dentro de una matriz de vidrio. La muestra SFP-94 corresponde a una ignimbrita.

Toba de lapilli-ceniza de composición riolítica.

Flujo con textura porfídica de grano fino, presencia de fenocristales de plagioclasa, hornblenda y menos piroxenos.

Brecha volcánica con fragmentos angulosos dentro de una matriz fina.

Aglomerado volcánico, fragmentos de la misma composición de hasta 30-40 cm de diámetro, tienen una clara textura porfídica, donde se aprecian fenocristales de plagioclasa y anfíboles dentro de una matriz microcristalina. Dentro de esta secuencia la muestra SFP-91, corresponde a un flujo con textura porfídica con cristales de plagioclasa subhedrales parcialmente remplazados por calcita.

Secuencia de aglomerado andesítico, las muestras SFP-88 y 89, corresponden a una andesita de piroxeno autobrechada con textura porfídica, compuesta de fenocristales de plagioclasa subhedrales a euhedrales entre 25 y 10% del volumen total de la roca respectivamente.

Figura 6- Sección geológica-estratigráfica Santa María, mostrando la localización de las muestras para estudios petrográficos y análisis químicos.

De manera concordante encima de los aglomerados y flujos de andesitas, se tiene la presencia de más de 100 m de una unidad muy similar a la anterior, solo que formada por fragmentos más grandes, todos ellos de la misma composición, algunos alcanzando hasta 30 a 40 cm de diámetro, similar a un aglomerado volcánico, con horizontes de flujo de forma irregular intercalado. En esta unidad los fragmentos tienen una clara textura porfídica, donde se aprecian fenocristales de plagioclasa (25-30%), cristales de anfíbol oxidados (3-5%) y contenidos dentro de una matriz fina microcristalina. Dentro de esta unidad, la muestra SFP-91 (Foto 11), correspondiente a un flujo, presenta en sección delgada una textura porfídica con cristales de plagioclasa subhedrales de 1-1.5 mm de largo y ~15% del volumen, parcialmente remplazados por calcita. Se tienen cristales de hornblenda y menos biotita? (<7%), débilmente cloritizados acompañados con calcita y con una zona de óxidos de hierro en su orilla, contenidos dentro de una matriz fina microcristalina. No se tiene cuarzo modal y muy probablemente se tenga la presencia de feldespatos potásicos en menor cantidad que las plagioclasas. Por su textura y composición mineralógica, esta roca corresponde a un flujo de andesita con hornblenda. Esta muestra fue fechada por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, arrojando una edad 9.6 ± 0.1 Ma.

A la unidad anterior le sobreyacen concordantemente 8 m de una brecha volcánica con fragmentos angulosos de ~0.5 a 1 cm de diámetro alcanzando un 25 a 40% del volumen total, sostenidos dentro de una matriz fina compuesta muy probablemente de la misma composición que los fragmentos. Inmediatamente le sigue un flujo de aproximadamente 28 m de espesor, color oscuro, porfídico de grano fino, conteniendo pequeños cristales

de plagioclasa (~20%) de aproximadamente 1 mm de largo, menor presencia de cristales de hornblenda (~5%) y sostenidos en una matriz microcristalina. En sección delgada (SFP-92), presenta una textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa, subhedrales, algunos de ellos zonados, con tamaños del orden de 0.4 a 1 mm de largo. Son acompañados de cristales de hornblenda y menos piroxenos, parcial a completamente reemplazados por calcita, alcanzando <7% y tamaños del orden de 0.1 a 0.2 mm, generalmente acomodados de manera intersticial entre los cristales de plagioclasa. Se tiene menor presencia de feldespato potásico con respecto a la plagioclasa y todos ellos son sostenidos dentro de una matriz microcristalina con aspecto fluidal (Foto 12).

Encima de esta última unidad y en aparente concordancia separando muy probablemente dos eventos distintos, se tiene al inicio un delgado horizonte de aproximadamente 12 m de espesor, de aspecto laminar en su base, de color claro con pequeños cristales de plagioclasa? y sostenidos en una matriz fina vítrea, pasando hacia arriba a un horizonte de aproximadamente 1 m de espesor compuesto de un aglomerado, con fragmentos exclusivamente de color oscuros de posible andesita. En sección delgada, la fracción fina laminar en su base (SFP-93), presenta una textura piroclástica, con fragmentos granofídicos subangulosos (10-15%), con tamaños que van de 1-3 mm de diámetro y cristales angulosos de cuarzo y feldespato (~3%), de 0.2 a 0.6 mm, sostenidos dentro de una matriz fina vítrea de lapilli, en avanzado estado de desvitrificación, con diminutos cristales de cuarzo y feldespato creciendo en diminutas cavidades, muy probablemente por efecto de fase de vapor. Por su textura y composición, esta roca corresponde a una toba de lapilli-ceniza de composición riolítica (Foto 13).

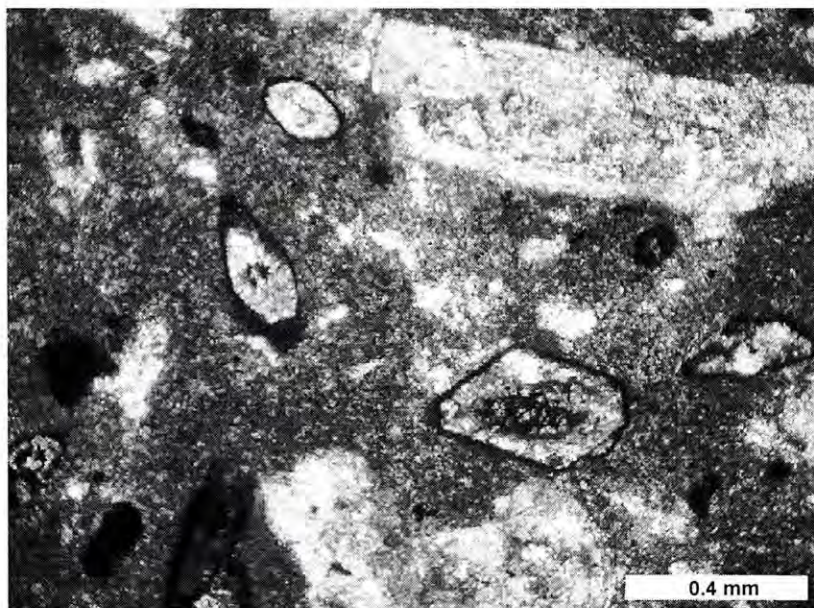


Foto 11.- Flujo de andesita con hornblenda con textura porfídica (SFP-91), compuesto de cristales de plagioclasa subhedrales (~15%), parcialmente remplazados por calcita. Presencia de cristales euhedrales de hornblenda y menos biotita? (~7%), débilmente cloritizados acompañados con calcita y con una zona de óxidos de hierro en su orilla, sostenidos dentro de una matriz fina microcristalina. 10X, LP.

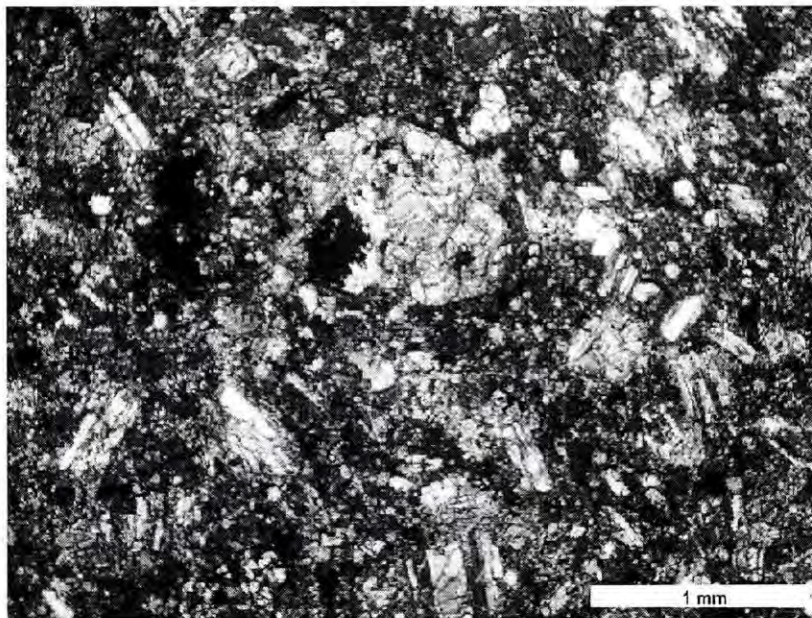


Foto 12.- Flujo andesítico con textura porfídica (SFP-92), compuesto de fenocristales de plagioclasa subhedrales a euhedrales (30-35%). Son acompañados de cristales de hornblenda y menos piroxenos, parcial a completamente remplazados por calcita (~7%), generalmente acomodados de manera intersticial entre los cristales de plagioclasa. Se tiene menor presencia de feldespato potásico con respecto a la plagioclasa. 4X, LP.

De manera concordante a la unidad anterior, continúa un horizonte de aproximadamente 28 m de espesor, perfectamente visible a la distancia, compuesta de una riolita de color claro, ligeramente porfídica con cristales de cuarzo y plagioclasa quebrados, algunas micas y menor contenido de fragmentos de roca de la misma composición (riolita), sostenidos dentro de una matriz de vidrio. En sección delgada la muestra SFP-94 (Figura 6), presenta una textura piroclástica, con cristales de cuarzo (~7%) quebrados y regularmente angulosos acompañado de fragmentos de vidrio, algunos de ellos alargados, dando una impresión de flujo a la roca, sostenidos dentro de una matriz de vidrio en forma de espículas y ciertas zonas perlíticas. Por su textura y composición esta roca corresponde a una ignimbrita (Foto 14).

En plena discordancia y encima del horizonte de riolita, se tiene un conglomerado de aproximadamente 60 m de espesor, compuesto en un 80 % de clastos de rocas volcánicas del tipo andesita y en mucha menor proporción de riolitas. Los fragmentos generalmente son subangulosos de 10 a 15 cm, aunque hay algunos que pueden alcanzar más del 50 cm de diámetro. Se observan ligeramente propilitizados sostenidos dentro de una matriz arenosa sucia del tipo "gawacka", conteniendo cristales y pequeños fragmentos menores a 1 mm de diámetro.

En discordancia y encima de esta unidad conglomerática, inicia el paquete de rocas ácidas piroclásticas del tipo ignimbrítico en la localidad. Esta secuencia podría alcanzar más de 90 m de espesor, sin embargo para esta sección solo se describen los primeros 30 a 40 m.

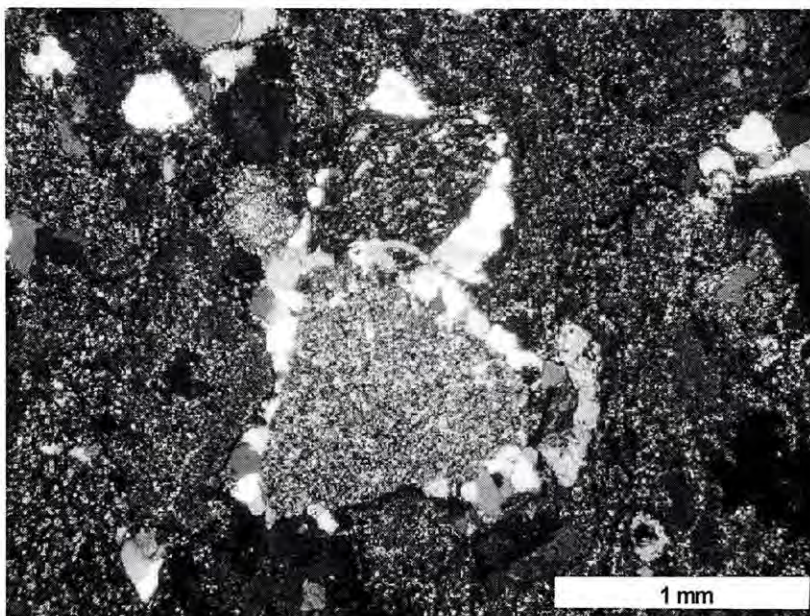


Foto 13.- Toba de lapilli-ceniza de composición riolítica con textura piroclástica (SFP-93), compuesta de fragmentos granofídicos subangulosos (10-15%) y cristales angulosos de cuarzo y feldespato (~3%), contenidos en una matriz fina vítrea de lapilli, en avanzado estado de desvitrificación, con diminutos cristales de cuarzo y feldespato creciendo en cavidades, muy probablemente por efecto de fase de vapor. 4X, LP.

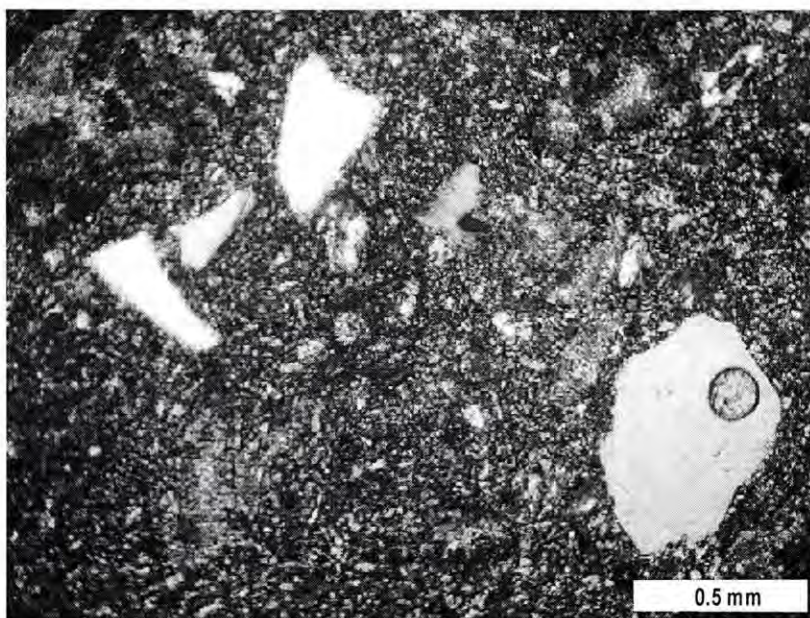


Foto 14.- Ignimbrita (SFP-94), compuesta por cristales de cuarzo (~7%) quebrados y regularmente angulosos acompañados de fragmentos de vidrio, algunos de ellos alargados dando una impresión de flujo en la roca, se encuentran contenidos dentro de una matriz de vidrio en forma de espículas y ciertas zonas perlíticas. 10X, LP.

En la base de esta secuencia, se tiene un horizonte de apenas 3-6 m de espesor formado de una toba soldada laminar de color amarillo. En sección delgada (SFP-95), presenta una textura piroclástica con fragmentos angulosos de 1 a 5 mm de largo, ligeramente alineados y compuestos de rocas ricas en vidrio volcánico con texturas que van desde esferulíticas, ricas en astillas de vidrio y solo algunas con textura traquítica. Por su textura y composición esta roca corresponde a una ignimbrita moderadamente soldada rica en líticos (Foto 15).

Le siguen de manera concordante 30 m de una secuencia de brechas volcánicas con fragmentos y cristales angulosos, sostenidos dentro de una matriz de sílice, intercalados con horizontes de color amarillo compuestos de ceniza-lapilli y capas de ~20 cm de espesor compuestos de brecha volcánica con fragmentos vítreos fuertemente apretados entre sí. En sección delgada (SFP-97, Foto 16), se observan fragmentos angulosos de hasta 1 cm en tamaño, compuestos principalmente de vitrófidos, sostenidos dentro de una matriz vítrea con un alto contenido de astillas de vidrio y menor contenido de cristales de plagioclasa y menos cuarzo. Por su textura esta roca se clasifica como una brecha tobácea o piroclástica. Los fragmentos son muy similares en composición y textura a los de la muestra SFP-96.

Le siguen 20 m de ignimbritas (SFP-96, Foto 17) con horizontes de ~ 1 m de vidrio volcánico (vitrófido) e ignimbritas mal soldadas en su parte superior. Esta secuencia parece repetirse en 2 o tres ocasiones con espesor de 30 a 40 m cada una. Se tomó una muestra de los vitrófidos (SM-5, Foto 18) que se mandó a fechar por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dando una edad de C.A. 6 Ma en su matriz con una edad de C.A. 9 Ma en sus fenocristales.

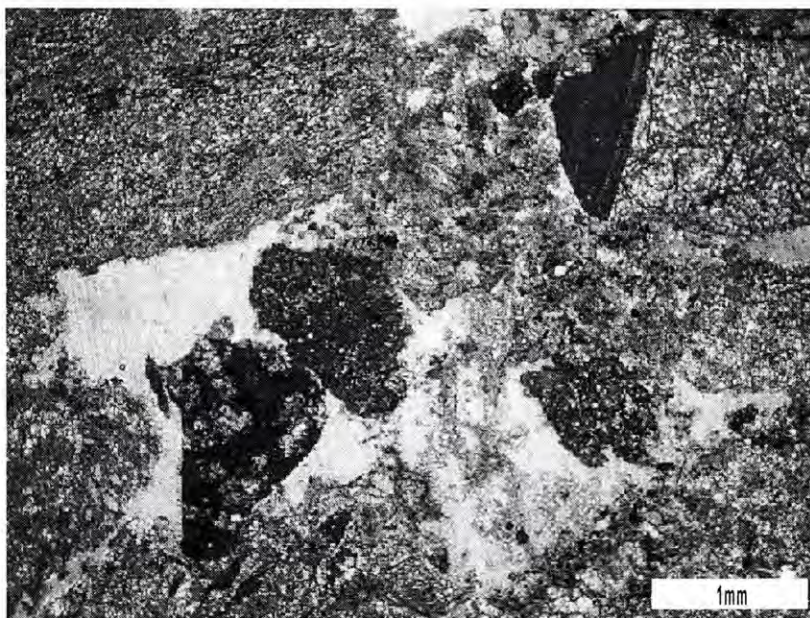


Foto 15.- Ignimbrita moderadamente soldada rica en líticos (SFP-95), compuesta por fragmentos angulosos de 1 a 5 mm de largo, ligeramente alineados y compuestos de rocas ricas en vidrio volcánico con texturas que van desde esferulíticas, ricas en astillas de vidrio y solo algunas con textura traquítica. 4X, LP.



Foto 16.- Brecha tobácea o piroclástica con textura piroclástica (SFP-97), compuesta por fragmentos angulosos de hasta 1 cm en tamaño, compuestos principalmente de vitrófidos, sostenidos dentro de una matriz vítrea con un alto contenido de astillas de vidrio y menor contenido de cristales de plagioclasa y cuarzo. 4X, LP.

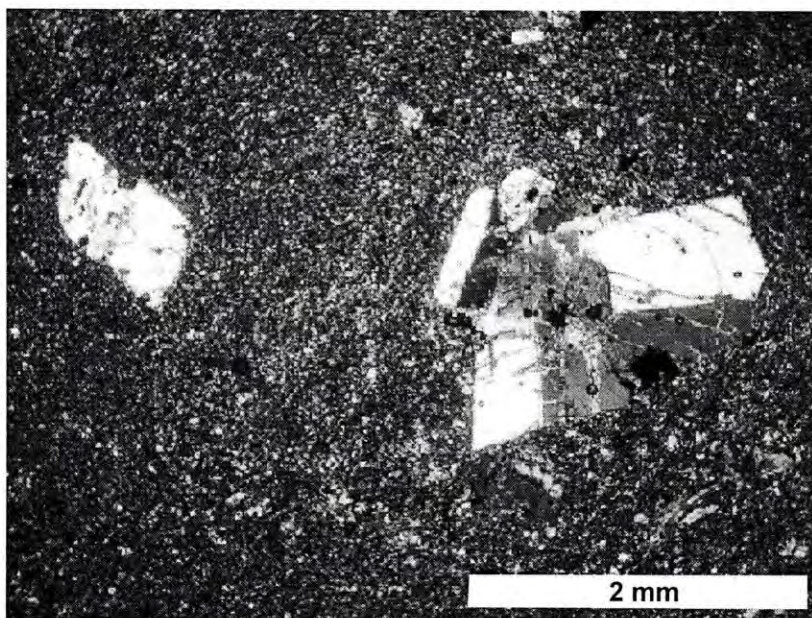


Foto 17.- Vitrofido? con textura vitrofídica (SFP-96), compuesta por cristales de plagioclasa (2-3%), de composición oligoclasa (An_{20}), algunas de ellas zonadas con tamaños que van de 1 a 2.5 mm de largo. Se observa menos feldespatos potásico y cuarzo en menos de 1%, todos ellos contenidos dentro de una matriz de vidrio en avanzado estado de desvitrificación. 4X, LP.

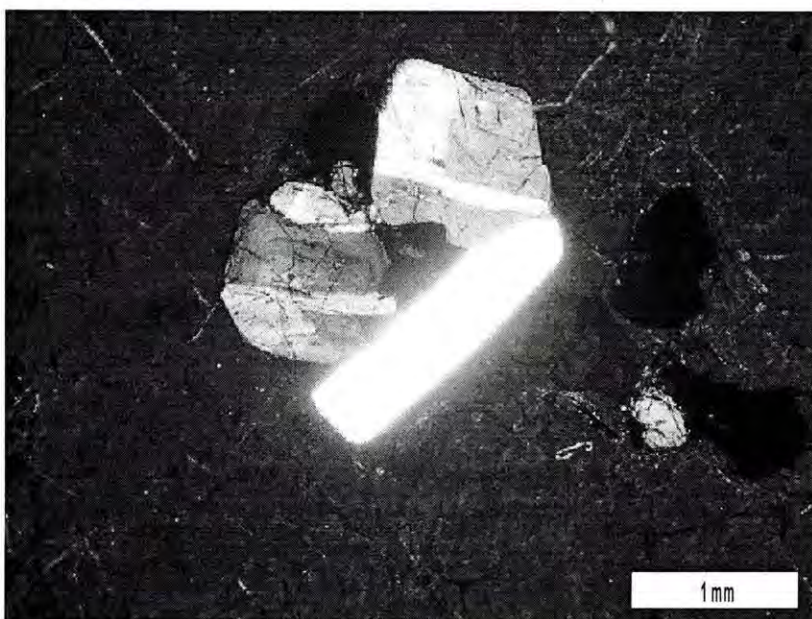


Foto 18.- Vitrofido con textura porfídica (SM-5), compuesta por fenocristales de plagioclasa (3%) algunas de ellas zonadas con tamaños que van de 1 a 1.5 mm de largo. Se observa menos feldespatos y cuarzo, todos ellos sostenidos en una matriz de vidrio. 4X, LP.

En sección delgada la muestra SFP-96 presenta una textura vitrofidica, con presencia de cristales de plagioclasa (2-3%), de composición oligoclasa (An₂₀), algunas de ellas zonadas y tamaños que alcanzan entre 1-2.5 mm de largo. Se observa menos feldespatos potásicos y cuarzo en <1%, todos ellos sostenidos dentro de una matriz de vidrio en avanzado estado de desvitrificación. Una discusión sobre la diferencia de edades entre matriz y cristales en esta muestra es dada al final de este trabajo de tesis.

IV.2.3.2.- Riolitas-dacita

Por su posición estratigráfica, descansando invariablemente encima de la secuencia de andesitas-latita del Mioceno, estas rocas podrían corresponder al Plioceno medio-tardío, probablemente ya relacionadas a la etapa extensional durante la apertura del Golfo de California. Pueden alcanzar a cubrir más del 30% del área en la región de Sierra Pinta (Figura 4) y afloran principalmente en la parte norte-noreste del área. Regularmente su exposición es más extendida y parecen ser coronadas por un paquete de ignimbritas las cuales en parte, fueron descritas en la sección de Santa María.

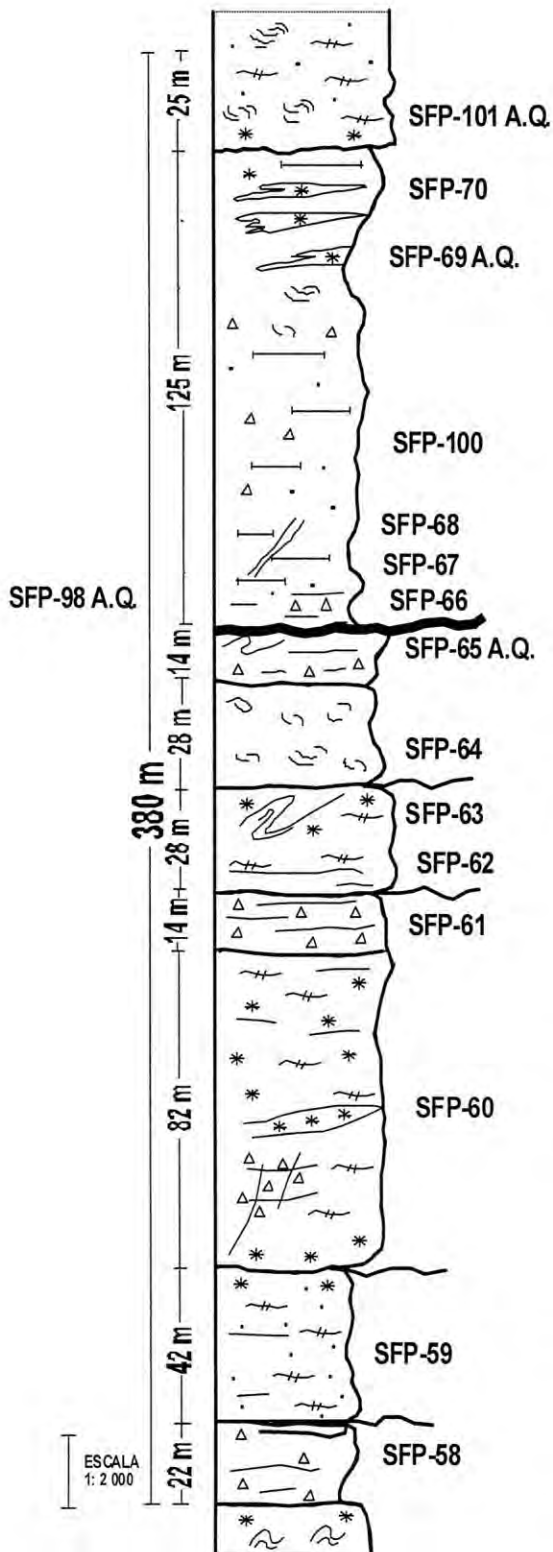
Su apariencia a distancia es muy similar a las andesitas-latitas, dificultando su diferenciación correcta y solo en parte se logra separarlas a nivel de afloramiento. Presentan una coloración rojiza, la cual de la misma manera, se intensifica en las áreas donde se tiene mayor alteración hidrotermal o intersección de estructuras.

Sobre esta unidad se midió una sola sección la cual se conoce como Santa Cruz, localizada en el lado este-noreste de Sierra Pinta y es mostrada en la Figura 7. Importante en ella, es la de integrar parte de la secuencia que

sobreyace concordantemente a la unidad de andesitas-latitas, pero infrayace en discordancia a la secuencia de ignimbritas. A continuación se describen las unidades que comprenden esta sección, la cual se podría tomar como una sección tipo de esta serie de rocas que afloran en esta parte del distrito de San Felipe.

IV.2.3.2.1.- Sección Santa Cruz

La tercera sección (Figura 7) fue medida aproximadamente a 400 m al este de la brecha Santa Cruz (Figura 4), alcanzando más de 380 m de espesor y donde los primeros 250 m, se podrían correlacionar con la parte media de la sección Santa María, como se muestra en la Figura 8, donde se tiene una correlación entre las tres secciones medidas en este trabajo.



Paquete de roca compuesto en la base de una zona de brecha con fragmentos angulosos de riolita. Las muestras SFP-67 y SFP-68 corresponden a ignimbritas pobremente soldadas; la muestra SFP-68 corresponde a una brecha explosiva volcánica de composición riolítica; la muestra SFP-100, se clasificó como una ignimbrita débilmente soldada de composición riolítica; la muestra SFP-69 corresponde a un vitrófido con cristales de plagioclasa sostenidos en una matriz de vidrio; la muestra SFP-70 se clasificó como una ignimbrita fuertemente soldada, con cristales de plagioclasa sostenidos dentro de una matriz compuesta de astillas de vidrio. Por último, se tienen más de 25 m de espesor de riolitas vítreas con textura perlítica a la cuál corresponde la muestra SFP-101.

Flujo con textura vitrofídica perlítica en avanzado estado de desvitrificación. La muestra SFP-64, presenta una textura de flujo y la muestra SFP-65, presenta una textura vítrea.

Flujo riolítico con textura fluidal esferoidal. Las muestra SFP-62 y SFP-63, presentan una textura esferulítica vítrea, con cristales de cuarzo y feldespato; se clasificaron como flujos de composición riolítica.

Flujo con textura vitrocristalina fluidal con fenocristales de plagioclasa euédrales. La muestra SFP-60 corresponde a una riolita fluidal vítrea; la muestra SFP-61 presenta una textura piroclástica con cristales de plagioclasa alineados dándole un aspecto fluidal a la roca. Esta muestra es clasificada como una toba o brecha piroclástica riolítica.

Flujo riolítico compuesto de cristales de plagioclasa (5-7%), rotados dentro del flujo. La muestra SFP-59 corresponde a una riolita fluidal vítrea perlítica.

Brecha volcánica con clastos angulosos de riolita sostenidos en una matriz rojiza. La muestra SFP-58, corresponde a una riolita con textura fluidal vítrea en avanzado estado de desvitrificación.

Figura 7.- Sección geológica-estratigráfica Santa Cruz, mostrando la localización de las muestras para estudios petrográficos y análisis químicos.

La sección de Santa Cruz, inicia en su base con un horizonte de aproximadamente 22 m de espesor, conformado por una brecha volcánica con clastos angulosos de aproximadamente 1-15 cm de diámetro, aunque la mayoría tiene un tamaño del orden de 1-4 cm. En suma pueden alcanzar más del 65% del volumen total, y están sostenidos dentro de una matriz de color rojizo, compuesta del mismo material que los fragmentos, la cual podría ser del tipo tobáceo de composición riolítica. Los fragmentos son por lo general de un solo tipo, color verde grisáceo, textura porfídica con fenocristales euhedrales de plagioclasa (10%) de 1-2 mm de largo, sostenidos dentro de una matriz fina de aspecto vítreo. Se tomó una muestra para ser estudiada en sección delgada denominada como SFP-58, Figura 7, la cuál presenta una textura fluidal, con cristales de feldespato (~2%) de 0.2 a 0.6 mm de diámetro rotados y parcialmente reemplazados por arcilla<sericita. Por su textura y composición esta roca corresponde a una riolita con textura fluidal vítrea en avanzado estado de desvitrificación (Foto 19).

Inmediatamente encima y de manera concordante, se presenta un flujo de aproximadamente 42 m de espesor, compuesto de una riolita con textura esferulítica y aspecto fluidal con cristales blancos euhedrales de plagioclasa de 1-2 mm de largo y alcanzando entre 5-7% del volumen, ligeramente rotados dentro del flujo. Una muestra tomada sobre esta unidad (SFP-59) para ser estudiada en sección delgada, muestra una textura vítrea fluidal perlítica, con cristales de feldespato (~2%) de 0.4 a 0.6 mm de diámetro, contenidos dentro de un flujo vítreo perlítico, con horizontes delgados desvitrificados compuestos de arcillas. Por su textura y composición esta roca es clasificada como un a riolita fluidal vítrea perlítica parcialmente desvitrificada (Foto 20).

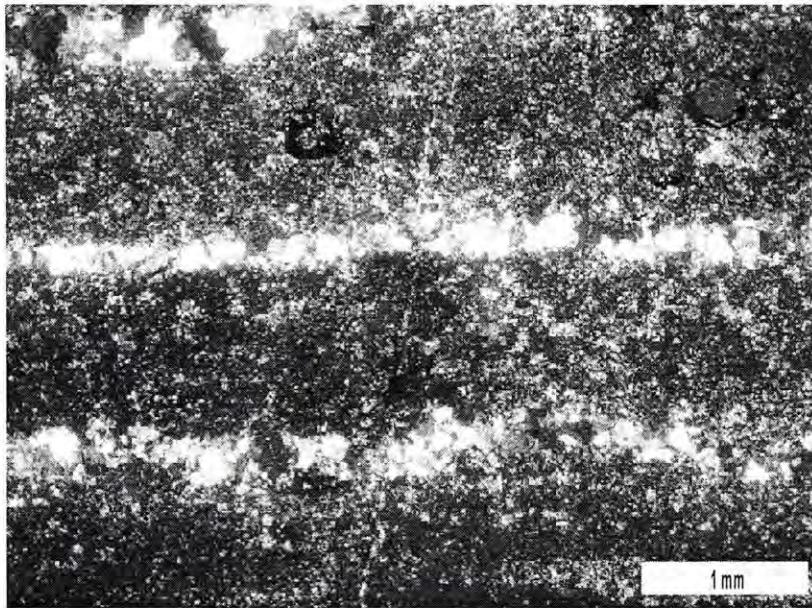


Foto 19.- Riolita con textura fluidal vítrea en avanzado estado de desvitrificación (SFP-58), compuesta por cristales subhedrales de feldespato (~2%) de 0.2 a 0.6 mm de diámetro rotados y parcialmente remplazados por arcilla<sericita. La roca es bandeada con posibles esferulitas en avanzado estado de desvitrificación. 4X, LP.

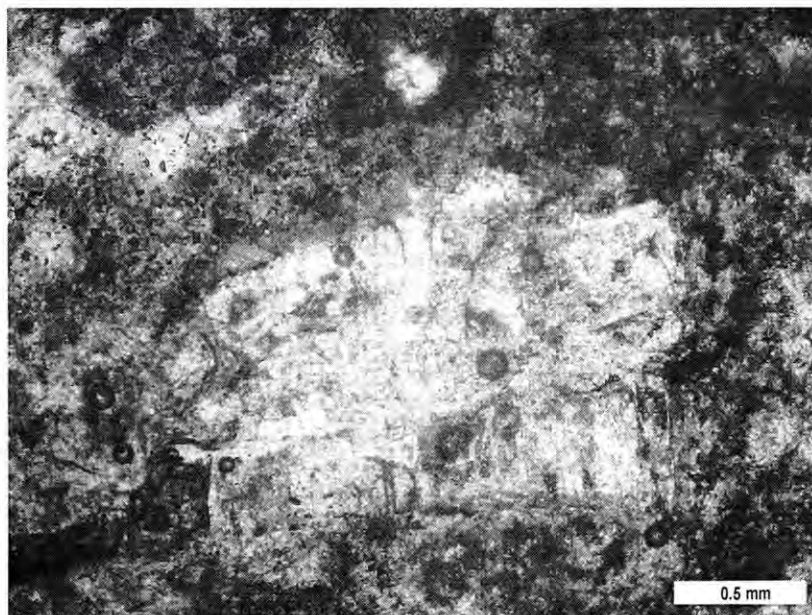


Foto 20.- Riolita con textura fluidal vítrea perlítica parcialmente desvitrificada (SFP-59), compuesta por cristales de feldespato (~2%) de 0.4 a 0.6 mm de diámetro, contenidos dentro de un flujo vítreo perlítico, con horizontes delgados desvitrificados compuestos de arcillas. Es muy similar a la muestra SFP-58. 10X, LN.

De manera concordante y con cerca de 100 m de espesor, se tiene un flujo lárico con una textura vitrocristalina fluidal, de color gris rojiza, con fenocristales de plagioclasa (3-4%) euhedrales de 1-3 mm de largo, contenidos en una matriz vítrea. En su base parece contener mayor presencia de esferulitas, con una serie de vetillas, con dirección preferencial NE 70° SW compuestas de brechas explosivas acompañadas en parte por barita, algunos cristales de barita rellenan huecos dentro de las esferulitas. Dentro de esta unidad se tomaron dos muestras para su estudio petrográfico, ubicadas en su parte media inferior y en su parte superior, definidas como SFP-60 y SFP-61. La muestra SFP-60, presenta una textura fluidal vítrea, con cristales de feldespato (plagioclasa) de ~0.6 mm de largo, euhedrales y contenidos dentro de un flujo de vidrio en un avanzado estado de desvitrificación. Su textura y composición es muy similar a la muestra SFP-58 y de la misma forma es clasificada como una riolita vítrea fluidal (Foto 21). Hacia la parte superior de este flujo se tiene un horizonte de brecha muy similar en aspecto y composición a la descrita como SFP-58, en la parte inferior de esta columna, el cual alcanza cerca de 15 m de espesor y la cuál puede ser clasificada como una toba vitrocristalina. Para esta unidad en su parte superior, se tomó la muestra SFP-61 para estudio en sección delgada, con fragmentos muy similares todos ellos, con tamaños mayores a 1 mm de diámetro, angulosos a subangulosos con textura vítrea, con microlitos y cristales de plagioclasa alineados que le imprimen un aspecto ligeramente fluidal a la roca. Son contenidos dentro de una matriz fina piroclástica vítrea. Por su textura y composición, esta sección puede ser clasificada como una toba o brecha de composición riolítica (Foto 22).

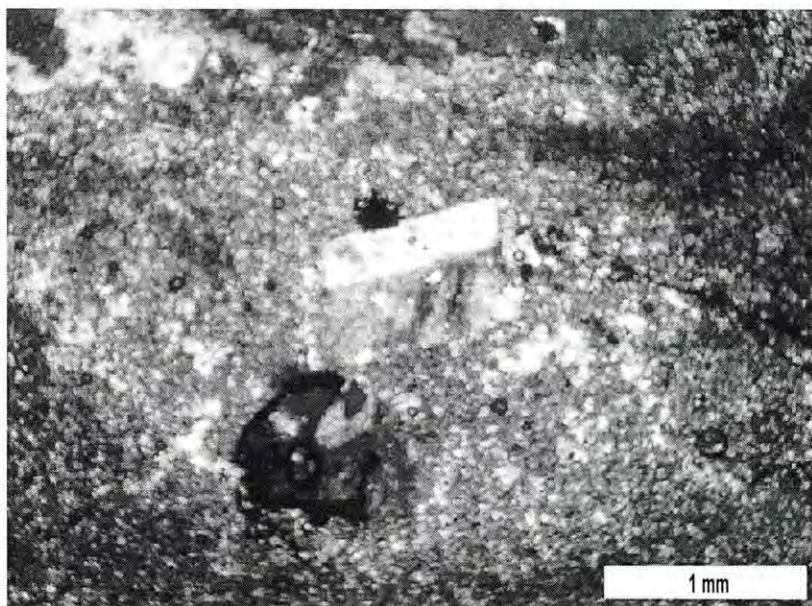


Foto 21.- Riolita con textura vítrea fluidal (SFP-60), compuesta por cristales euhedrales de feldespato (~2%) con tamaños de ~0.6 mm de largo, contenidos dentro de un flujo de vidrio en un avanzado estado de desvitrificación. Su textura y composición es muy similar a la muestra SFP-58. 4X, LP.

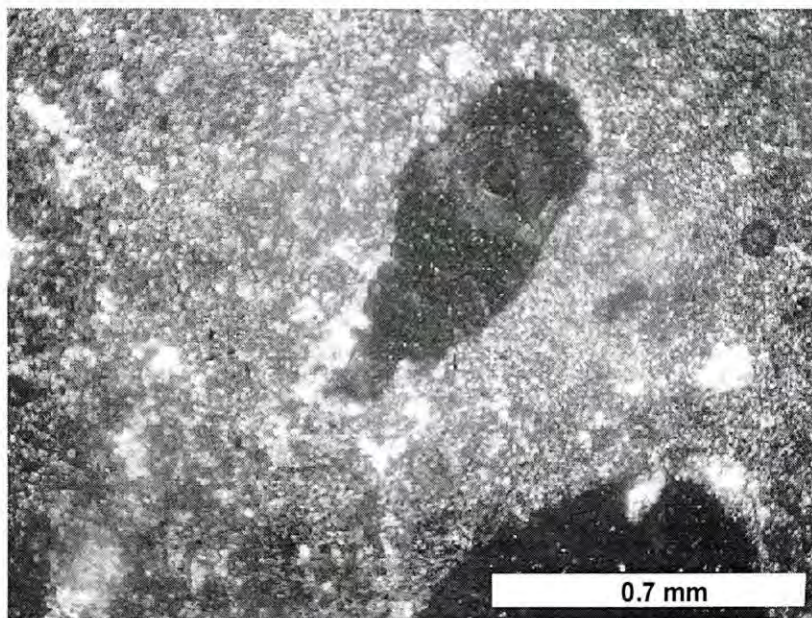


Foto 22.- Toba riolítica vitocrystalina (SFP-61), compuesta por fragmentos angulosos a subangulosos mayores a 1 mm de diámetro con textura vítrea, presencia de microlitos y cristales de plagioclasa alineados que le imprimen un aspecto fluidal a la roca. Son contenidos dentro de una matriz fina piroclástica vítrea. 10X, LP.

De manera concordante, le sigue un horizonte de aproximadamente 28 m de espesor compuesto de un flujo riolítico con textura fluidal esferoidal, con flujos envolutos y algunas vacuolas. Se tomaron dos muestras para su estudio petrográfico, las cuáles corresponden a SFP-62 y SFP-63, tomadas en la base y parte superior respectivamente. En general ambas muestras presentan una textura esferulítica vítrea con algunos cristales de cuarzo y feldespato de menos de 1 mm de diámetro agregados entre ellas. Por su textura y composición estas rocas corresponden a flujos de composición riolítica (Foto 23).

Arriba de este flujo y de manera concordante se tienen 28 m de un flujo, de color verde, textura vitrofídica perlítica con un aspecto avanzado de desvitrificación. Se tomó una muestra para su estudio petrográfico, denominada SFP-64 (Figura 7), la cuál presenta una textura de flujo, con bandas bien definidas con textura perlítica dentro de zonas con vidrio y menos cristales (Foto 24). Hacia la parte superior de este horizonte se observan aproximadamente 14 m de un flujo esferulítico de color claro y formado de bandas de 1-2 mm de ancho. Se tomó una muestra para estudio petrográfico denominada SFP-65, la cuál presenta una textura vítrea con bandas de esferulitas alternando con bandas de vidrio perlítico de aproximadamente 0.6 a 1 mm de ancho (Foto 25).

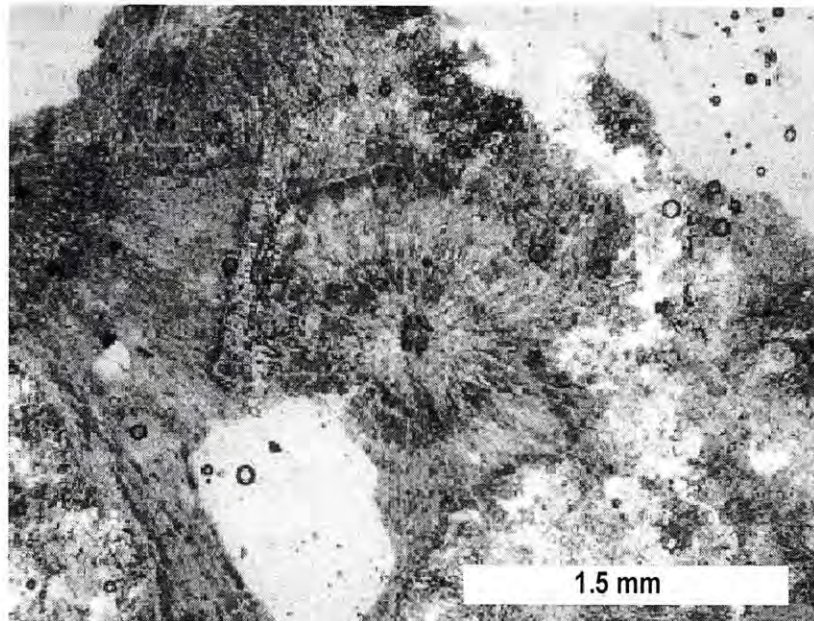


Foto 23.- Flujo de composición riolítico con textura esferulítica (SFP-62, 63), compuesta por cristales de cuarzo y feldespato de menos de 1 mm de diámetro agregados entre las esferulitas. 10X, LP.

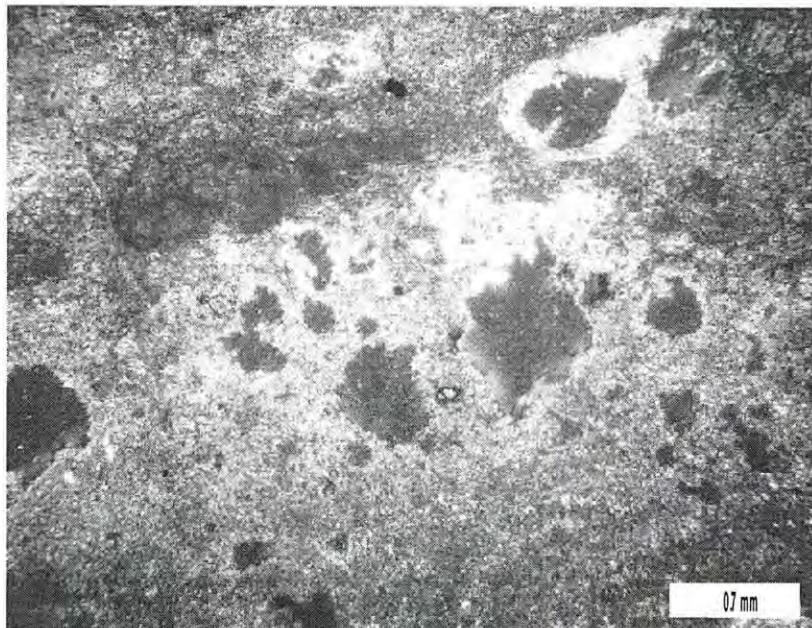


Foto 24.- Flujo riolítico con textura de flujo (SFP-64), compuesto por bandas bien definidas con textura perlítica dentro de zonas con vidrio y menos cristales. 4X, LP.

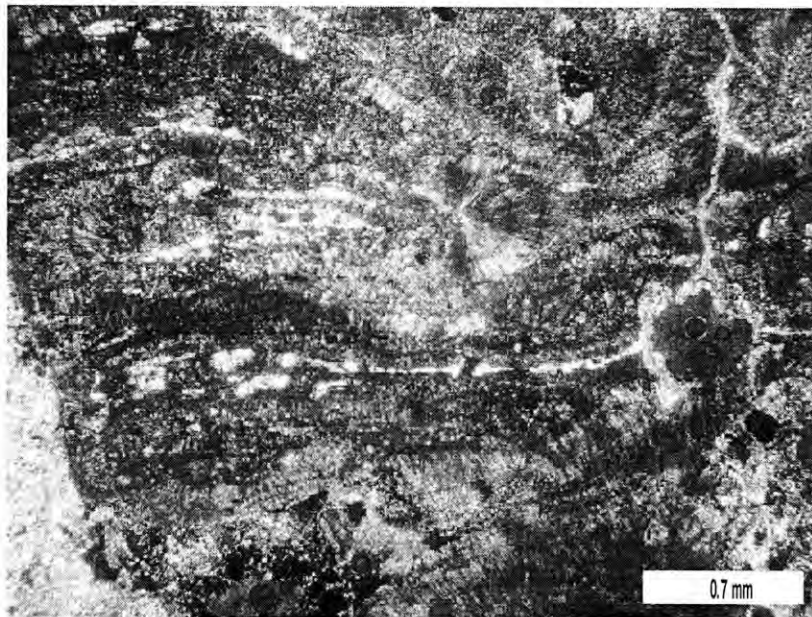


Foto 25.- Flujo riolítico con textura vítrea (SFP-65), compuesto por bandas de esferulitas alternando con bandas de vidrio perlítico de aproximadamente 0.6 a 1 mm de ancho. 4X, LP.

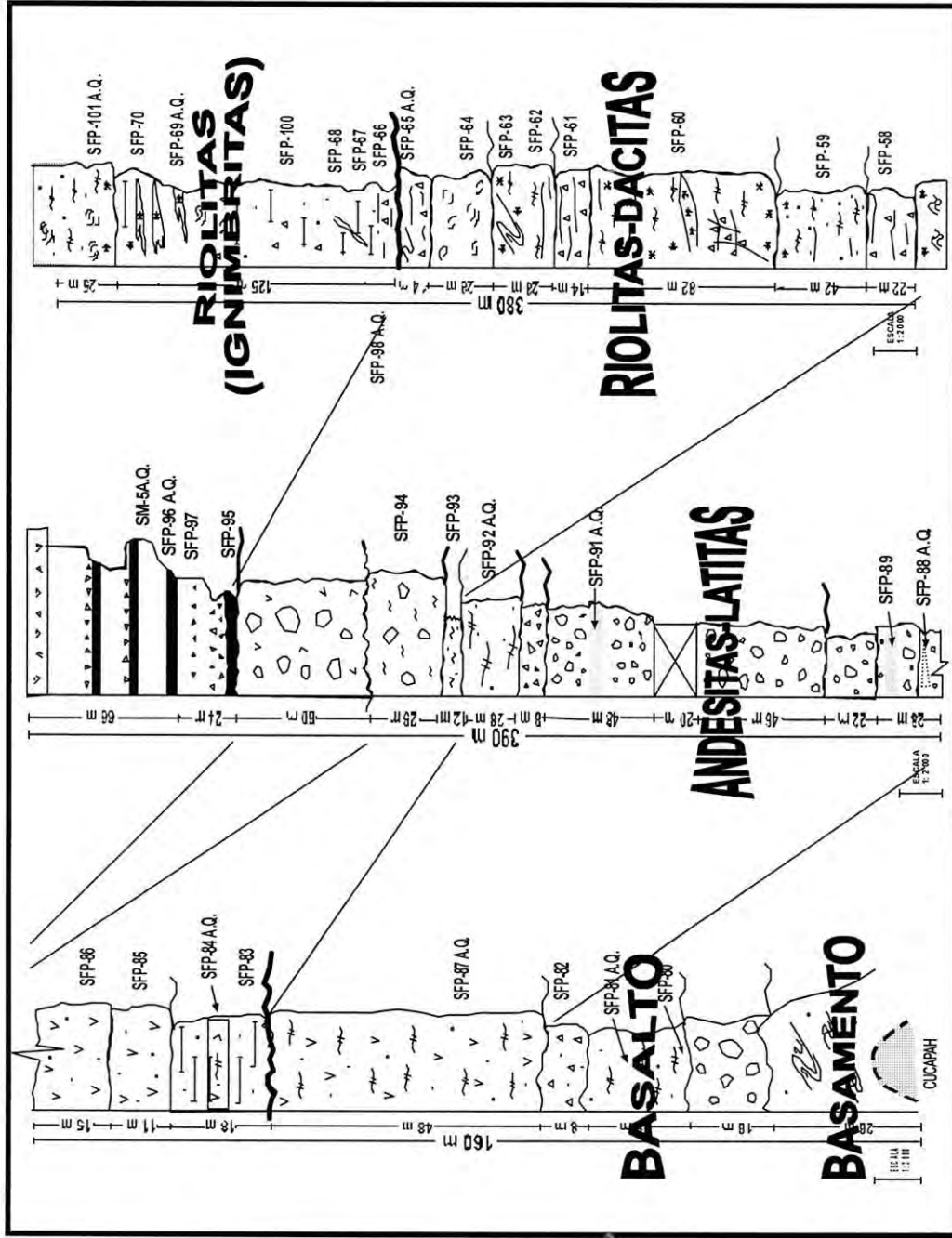


Figura 8.- Mostrando la correlación de las tres secciones medidas (Cucapah, Santa María y Santa Cruz) en el distrito de San Felipe.

IV.2.3.3.- Riolitas (ignimbritas)

Descansan invariablemente encima de las unidades riolitas-dacita, como sucede al norte de la brecha Santa María y encima de la secuencia de riolitas-dacita, al este de la brecha Santa Cruz (Figura 8).

En esta última localidad, se tiene una secuencia que descansa en discordancia (15-20°) encima de la unidad de riolitas-dacita, alcanzando un espesor de aproximadamente 150 m. Está compuesto en su base de una zona de brecha de color que varía de blanco-verdoso a amarillo, compuesto de fragmentos angulosos de riolita en contacto entre ellos, conteniendo ojos de cuarzo de 1-6 mm de diámetro dentro de una textura débilmente fluidal y sostenidos en una matriz vítrea. En partes se observan horizontes tobáceos intercalados de ~1 cm de ancho. En sección delgada las muestras SFP-66 y 67, Figura 7, presentan una textura piroclástica con fragmentos angulosos (>40%), con texturas variables, pasando de esferulíticas, vítreas, perlíticas etc., contenidos dentro de una matriz fina vítrea con algunas astillas de vidrio (Foto 26). La muestra SFP-67, a diferencia de la anterior SFP-66, presenta gran cantidad de fragmentos de pómez recristalizada, contenido dentro de una matriz de vidrio con astillas. Ambas secciones corresponden a una roca piroclástica del tipo ignimbrita, pobremente soldada de composición riolítica.

En la misma base de este flujo se observa una serie de estructuras brechoides de color verdoso en forma de diques orientados en una dirección preferencial NE 65° SW, las cuales se componen de fragmentos de roca angulosos de diferente tipo y muy heterogéneos en sus tamaños y sostenidos dentro de una matriz silíceo cristalina.

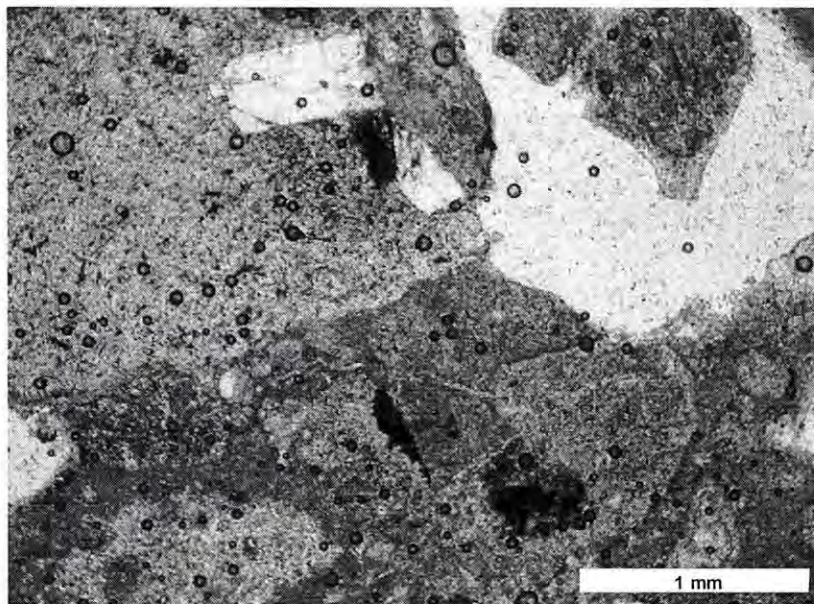


Foto 26.- Ignimbrita, pobremente soldada de composición riolítica con textura piroclástica (SFP-66,67 y 98), compuesta por fragmentos angulosos (>40%), con texturas variables, pasando de esferulíticas, vítreas, perlíticas etc. contenidos dentro de una matriz fina vítrea con algunas astillas de vidrio. La muestra SFP-67, a diferencia de la muestra SFP-66, presenta gran cantidad de fragmentos de pómez recristalizada contenido dentro de una matriz de vidrio con astillas. 4X, LP.

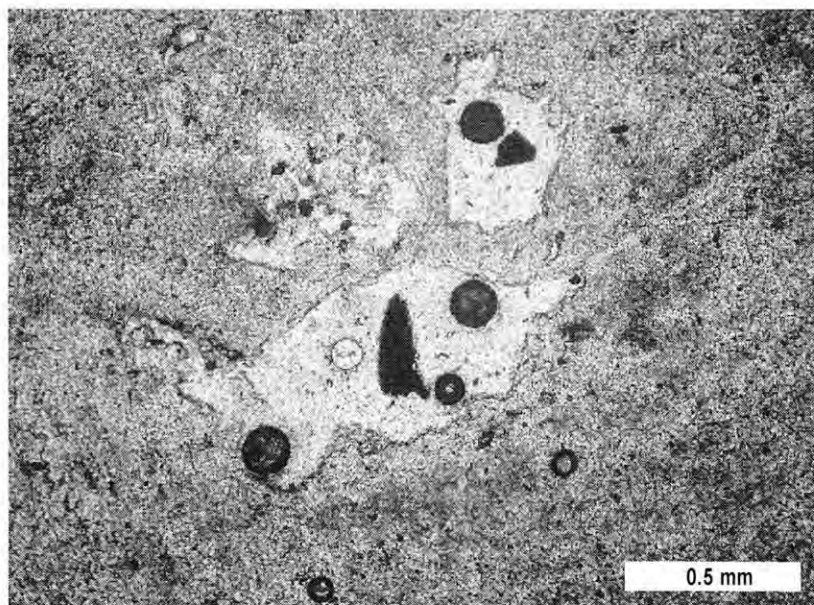


Foto 27.- Brecha explosiva volcánica de composición riolítica, canalizada a través de fracturas más o menos orientadas con textura piroclástica (SFP-68), compuesta por fragmentos angulosos de hasta 1.5 cm en tamaño de fragmentos vítreos (vitrófico), con cristales euhedrales de plagioclasa (~1%) de 0.3 a 0.5 mm de largo, contenidos en una matriz fina recristalizada, con texturas de paredes de burbujas de vapor?. 10X, LN.

En sección delgada la muestra SFP-68, Figura 7, se presenta como una roca piroclástica tipo brecha, con fragmentos angulosos de hasta 1.5 cm en tamaño, de fragmentos vítreos (vitrófico), con cristales de plagioclasa (~1%) euhedrales de 0.3-0.5 mm de largo, sostenidos en una matriz fina recristalizada, con texturas de paredes de burbujas de vapor?. Por sus características de campo, texturales y de composición, esta roca pertenece a una brecha explosiva volcánica de composición riolítica, canalizada a través de fracturas más o menos orientadas (Foto 27).

Hacia su parte intermedia, continúa una zona de brecha de color amarillo, con fragmentos angulosos de riolita vítrea con flujo en bandas de 0.1 a 1.4 cm de ancho, con algunas estructuras en forma de flama y aspecto cavernosos, semejando una ignimbrita. En sección delgada (SFP-100), presenta una textura piroclástica con fragmentos angulosos variando en tamaños desde 0.4 mm hasta 1.5 cm de diámetro, compuestos de roca vítrea en avanzado estado de desvitrificación y parcialmente cubiertos por calcita. Son contenidos en una matriz vítrea con diminutos clastos de roca volcánica y astillas de vidrio dentro de una pasta de polvo de vidrio. Por sus características texturales, esta roca puede clasificarse como una ignimbrita débilmente soldada de composición riolítica (Foto 28).

Hacia su parte superior se observan lentes de vitrófico intercalados, dando la impresión de ser parte de una profunda desvitrificación de esta unidad, como se puede apreciar en sección delgada de las muestras SFP-69 y 70.

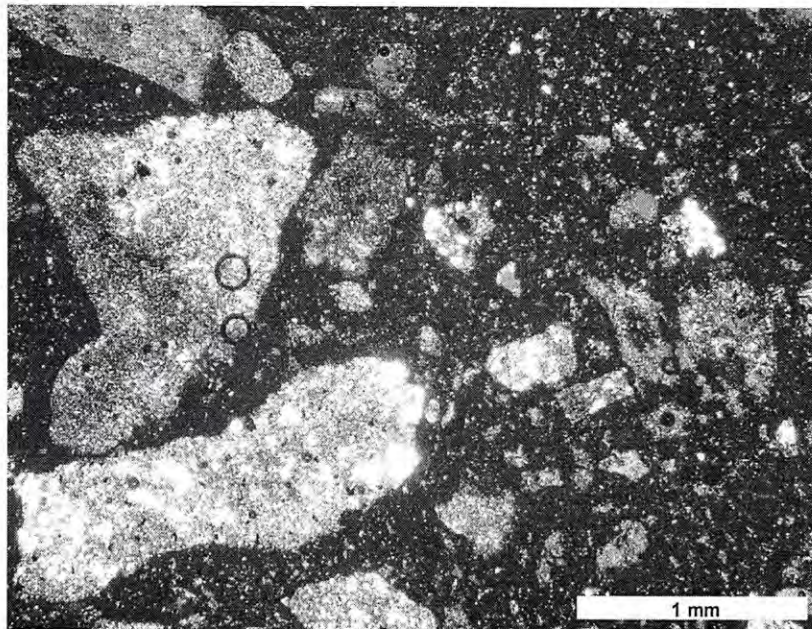


Foto 28.- Ignimbrita débilmente soldada de composición riolítica con textura piroclástica (SFP-100), compuesta por fragmentos de roca angulosos variando en tamaños desde 0.4 mm hasta 1.5 cm de diámetro, compuestos de roca vítrea en avanzado estado de desvitrificación y parcialmente cubiertos por calcita. Son contenidos en una matriz vítrea con diminutos clastos de roca volcánica y astillas de vidrio dentro de una pasta de polvo de vidrio. 4X, LP.

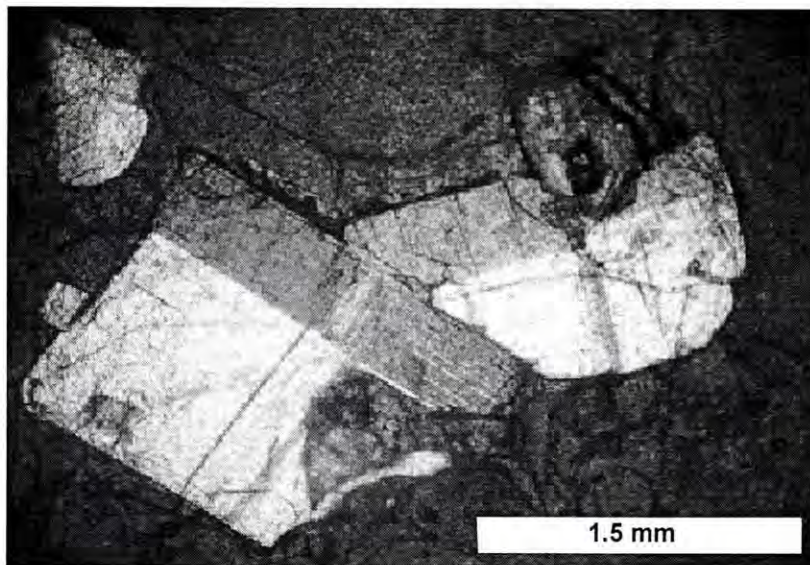


Foto 29.- Vitróvido con textura porfídica (SFP-69), compuesto por fenocristales de plagioclasa (~1%) contenidos en una matriz de vidrio con textura perlítica. 10X, LP.

La muestra SF-69 (Foto 29), corresponde a un vitrófido, con cristales de plagioclasa (~1%), contenidos en una matriz de vidrio con textura perlítica y la muestra SFP-70 (Foto 30), se identifica como una ignimbrita fuertemente soldada, con cristales de plagioclasa, contenidos dentro de una matriz compuesta de astillas de vidrio angulosas y planares fuertemente empaquetadas.

Sobreyaciendo de manera concordante a la unidad de ignimbritas y vitrófidos anteriores, se tienen más de 50 m de espesor de una riolita vítrea, con textura perlítica, la cual parece coronar las partes más altas en esta zona del distrito de San Felipe. De esta zona se tomó una muestra para estudio petrográfico denominada SFP-101 (Foto 31).

Al norte de la brecha Santa María, estas rocas descansan arriba de parte de la secuencia de riolitas-dacita y podría en algunas partes, encontrarse directamente encima de la secuencia de andesitas-latita. En esta zona se tienen alrededor de 80 a 100 m de una secuencia de al menos 5 horizontes brechoides de aproximadamente 0.8 m de espesor, compuestos de fragmentos angulosos de vidrio (vitrófido), alternando con horizontes tobáceos de color amarillo.

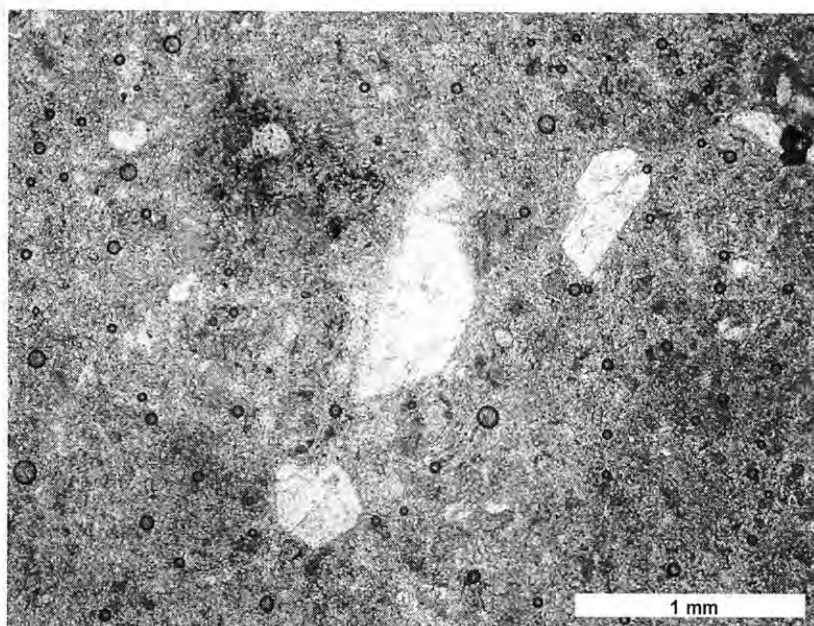


Foto 30.- Ignimbrita fuertemente soldada (SFP-70), compuesta por cristales de plagioclasa contenidos dentro de una matriz compuesta de astillas de vidrio angulosas y planares fuertemente empaquetadas. 4X, LN.

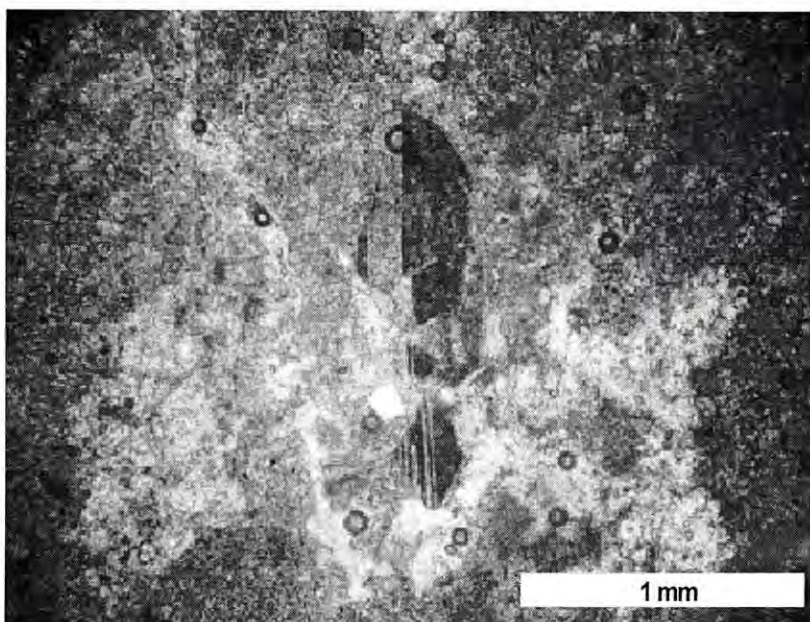


Foto 31.- Riolita vítrea con textura perlítica (SFP-101), compuesta por cristales de plagioclasa, en partes se observan flujos riolíticos esferulíticos. 4X, LP.

V.- BRECHAS SANTA CRUZ Y SANTA MARÍA.

V.1.- BRECHA SANTA CRUZ

La brecha Santa Cruz, aflora al norte-noroeste de las instalaciones de la Mina San Felipe (Figura 4) y abarca una área de aproximadamente 0.24 km², presentando al menos 5 unidades que pueden ser fácilmente cartografiables y que han sido designadas como I, II, III, IV y V. Figura 9.

Las 5 unidades son brechas y están formadas por fragmentos exclusivamente de riolitas fluidales, en parte esferoidales con estructuras de flujo envoluta, fragmentos angulosos y tamaños que varían desde pocos cm hasta 1-2 m; aunque en la orilla de esta zona de brecha, se tiene un fragmento que puede alcanzar los 10 m de largo; se estima que su presencia es más por colapso a partir de inestabilidad de paredes que por efecto explosivo.

La diferencia entre las distintas unidades es principalmente su matriz. En la unidad I (Figura 9), la matriz de la brecha parece ser de la misma composición que los fragmentos, mostrándose en partes prácticamente asimilados y corroídos, dando la apariencia de ser una brecha de flujo o un flujo autobrechado. Su distribución es principalmente en sus partes bajas y en algunos lados presenta un decrecimiento considerable en el contenido de fragmentos grandes, como sucede por el camino, en la parte sur de la brecha (Foto 32). En la unidad II, a diferencia de la unidad I, sus fragmentos se encuentran más despegados unos de otros y parecen sostenerse por una matriz tobácea del tipo lapilli-ceniza; sus fragmentos son heterogéneos en tamaños, aunque su composición continúa siendo similar a los de la unidad I (Foto 33). Su distribución es principalmente en la orilla de la estructura (Figura 9), con mayor presencia en su lado este.

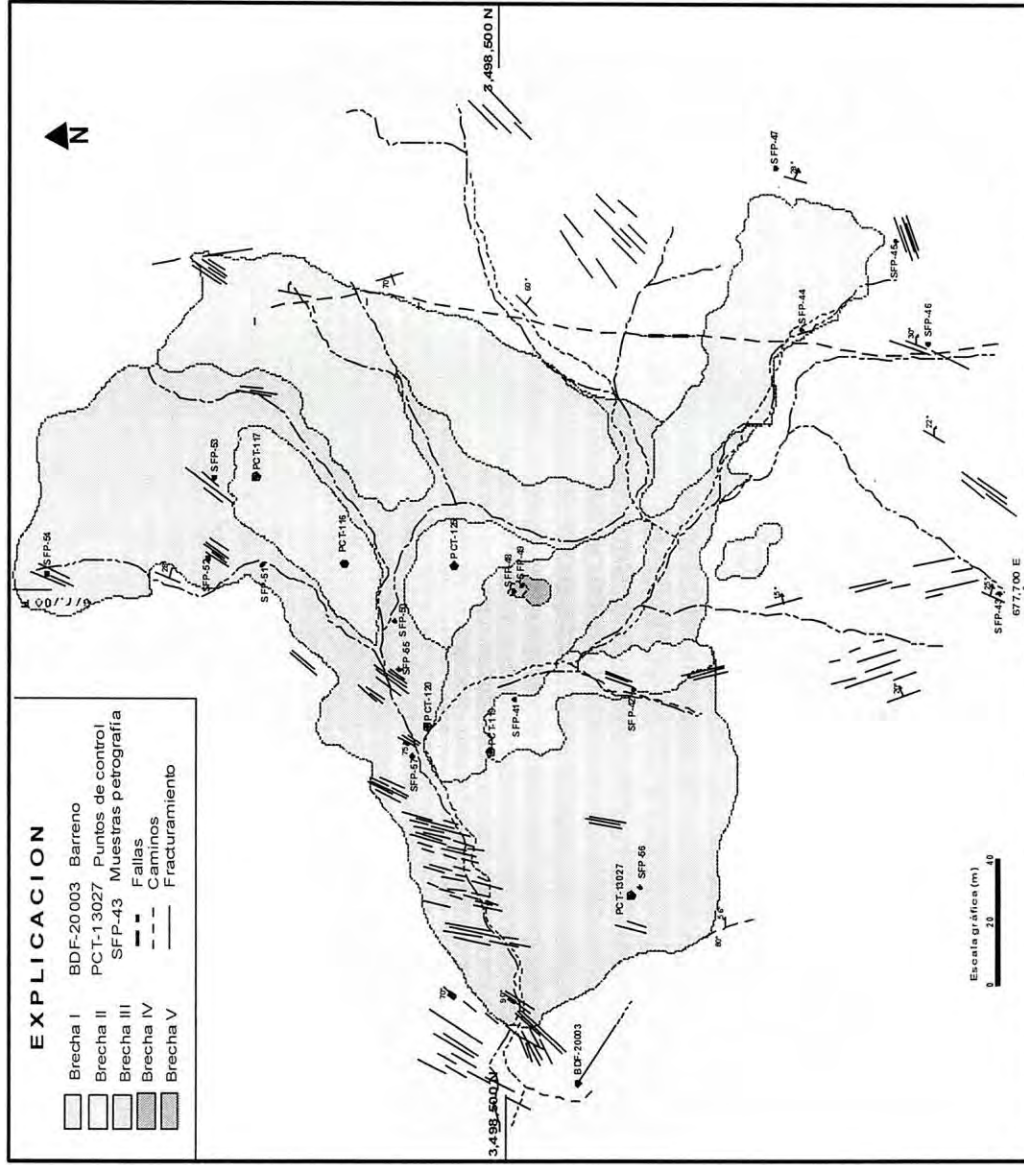


Figura 9.- Plano geológico de la brecha Santa Cruz, mostrando la distribución de las zonas de brecha y rasgos estructurales más importantes.



Foto 32.- Acercamiento de la unidad I de la brecha Santa Cruz; note como los fragmentos son prácticamente absorbidos dentro de una matriz fuertemente oxidada, conteniendo fragmentos angulosos más pequeños de la misma composición que los grandes (autobrecha?).



Foto 33.- Acercamiento de la unidad II de la brecha Santa Cruz; note como los fragmentos son angulosos y están sostenidos dentro de una matriz de brecha y lapilli, fuertemente oxidada conteniendo fragmentos angulosos más pequeños de la misma composición de los más grandes.

La unidad III alcanza un espesor aproximado de 8 a 10 m, se asemeja bastante a la unidad I y de la misma forma, su matriz parece asimilar a los fragmentos de la misma composición que ellos, pareciendo unas brechas de flujo o flujos autobrechados; en su parte inferior, fragmentos de esta unidad parecen aplastar a la unidad II.

La unidad IV es de poca extensión y se localiza preferencialmente en la parte centro de la brecha (Figura 9). Alcanza solo unos 4 m de espesor y se compone principalmente de una secuencia piroclástica compuesta de tobas y ceniza, con estratificación cruzada planar eólica y estructuras de aplastamiento fácilmente reconocible de las unidades anteriores (Foto 34).

Por último, la unidad V es similar a las unidades I y III, con una distribución bastante insignificante con afloramientos solo en el punto PCT-125.

La forma de esta brecha es más o menos alargada en una dirección burda NE-SW, con su perímetro bien delineado. Su lado este, es definido por una falla, la cual la pone en contacto directo con la unidad de riolitas-dacita; en cambio sus lados norte, sur y oeste, no está tan bien definido pero pueden ser diferenciados (Figura 9). Un punto importante sobre esta brecha Santa Cruz es que en su lado oeste presenta una zona de alteración que se extiende como una franja de aproximadamente 200 m x 60 m, la cual contiene zonas fuertemente silicificadas, con presencia de arcillas y sericita acompañadas por fuerte oxidación en partes. Se observan vetillas de calcita, seguida de vetillas de barita y al final vetillas de cuarzo. Importante sobre este lado oeste de la brecha Santa Cruz, es la presencia de un fracturamiento intenso NNE el cual parecería controlar la alteración y mineralización en esta área.



Foto 34.- Acercamiento de la unidad IV de la brecha Santa Cruz; note el material piroclástico, tobáceo, pseudoestratificado, con estructuras de aplastamiento.

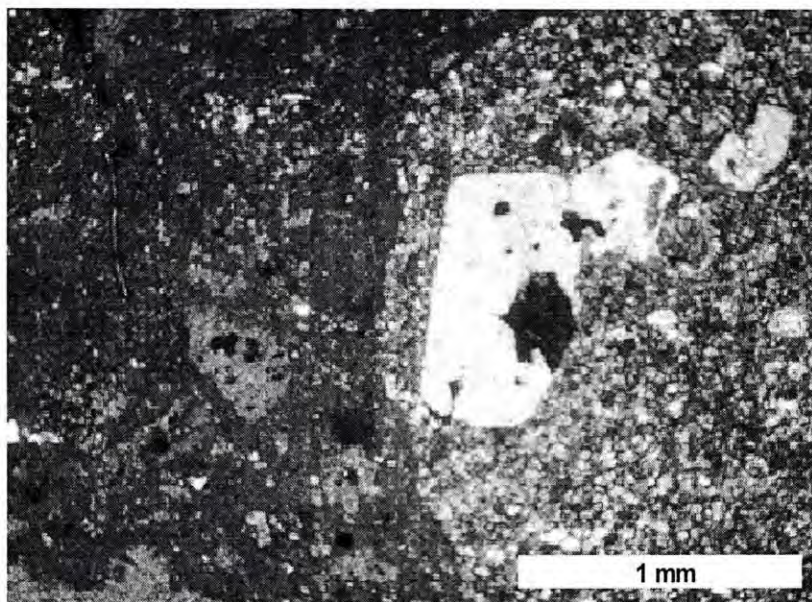


Foto 35.- Microfotografía de la muestra SFP-50, tomada sobre la unidad I, mostrando uno de los fragmentos de riolita porfídica, con cristales de feldespato reemplazados parcialmente por arcillas<<sericita, contenidos en una matriz fina recrystalizada. Note la matriz de la brecha, constituida por polvo de vidrio asimilando fragmentos de roca, vidrio y menor proporción de cristales. 4X, LP.

Es conveniente señalar que sobre esta misma zona de alteración fue dirigido un barreno de diamante (BDF-2003), del cual se obtuvieron resultados anómalos de Pb-Zn en un intervalo de más de 40 m. Se tomaron dos muestras (SFP-50 y SFP-54) en esta zona de alteración, con la finalidad de conocer el tipo y grado de alteración, notándose lo siguiente:

La muestra SFP-50, tomada sobre la unidad definida como I en la Figura 9, y que se incluye parcialmente dentro de esta zona de alteración, contiene aparentemente una alteración débil a moderada de cuarzo + sericita con sericita > cuarzo, dentro de los fragmentos de riolita. En sección delgada se observa una textura de brecha, con fragmentos angulosos de riolitas porfídicas, con cristales de feldespato de ~1 mm de largo, parcialmente convertido a arcillas con menor sericita, contenidos dentro de una matriz fina vítrea recristalizada, por efecto de desvitrificación avanzada. La matriz de esta brecha se compone de vidrio con fragmentos de roca (riolitas), vidrio, esferulitas y pómez, asimilados dentro de ella (Foto 35), con un claro evento de calcita tardía, mostrada en vetillas irregulares.

La muestra SFP-54, tomada en la parte norte de la brecha (Figura 9), en sección delgada muestra, una textura de brecha, con fragmentos angulosos compuestos de vidrio con textura esferulítica y clastos de vidrio con textura porfídica, contenidos dentro de una matriz fina formada de vidrio, fragmentos de roca volcánica y menor contenido de cristales. Se observa, la presencia de cuarzo microcristalino en forma de mosaicos, los cuales aparecen cerca a la parte vítrea de la brecha y en delgadas vetillas cortando a los fragmentos. Presenta una fuerte oxidación de hematita, principalmente en los fragmentos de roca, aquellos sostenidos dentro de la matriz de la brecha (Fotos 36 y 37).

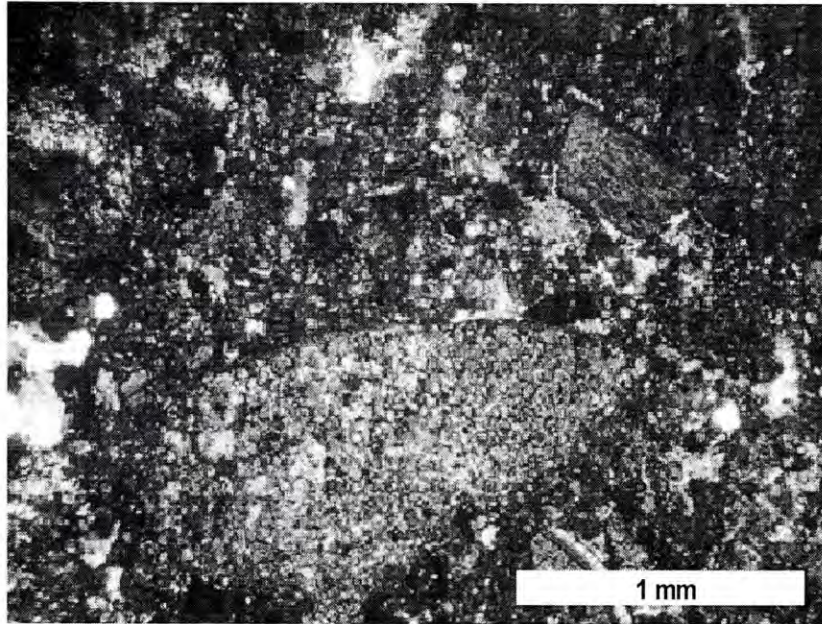


Foto 36.- Microfotografía de la muestras SFP-54, tomada sobre la unidad I, mostrando fragmentos de vidrio y clástos porfídicos recrystalizados, contenidos en una matriz fina compuesta de vidrio asimilando fragmentos de vidrio, roca y cristales. 4X, LP.

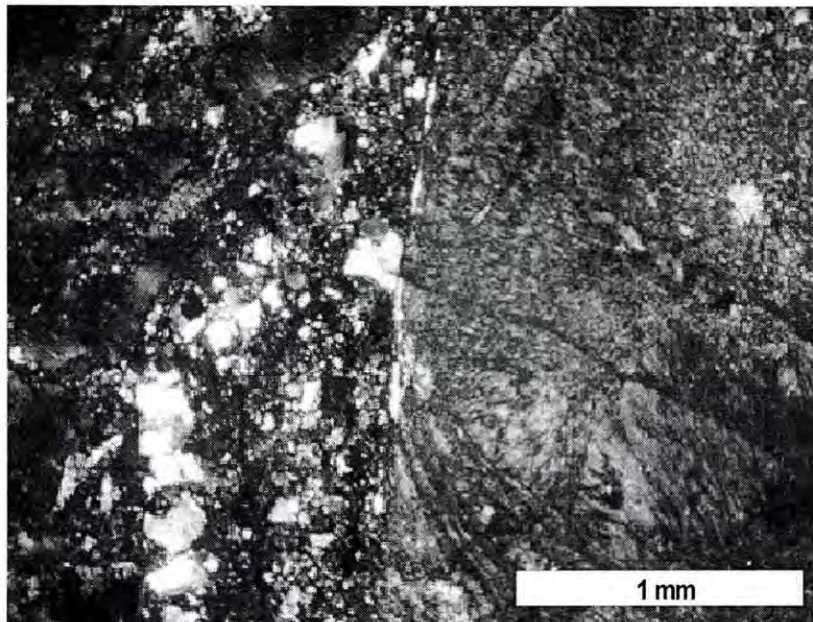


Foto 37.- Microfotografía de la muestras SFP-54, mostrando uno de los fragmentos de vidrio, con mosaico de cristales de cuarzo y feldespato en gránulos dentro de la matriz. 4X, LP.

Observaciones de campo respaldadas por estudio al microscopio, señalan una débil a moderada alteración principalmente de arcillas, menor sericita y débil silicificación a lo largo de una franja en el lado oeste de la brecha. La cual puede ser atribuida a procesos hidrotermales mezclado en gran medida con recristalización causado por efectos de desvitrificación.

V.2.- BRECHA SANTA MARIA

La brecha Santa María se localiza aproximadamente a 4 km al noroeste de las instalaciones de la mina San Felipe (Figuras 4 y 10) y aflora en un área de aproximadamente 1.1 km en dirección E-W y aproximadamente 500 m en dirección N-S. Se localiza claramente en el contacto de las unidades de andesitas-latita y riolitas-dacita, observando una morfología y litología diferente a las rocas volcánicas que la rodean y mostrando regularmente en su periferia, un contacto cortante con las unidades contiguas (Figura 10). Hacia su parte oeste, su contacto es definido por una serie de estructuras con dirección preferencial NNE-NNW y echados variables entre 75 y 82° a ambos lados (este y oeste) acomodadas de manera escalonada, delineando zonas de intensa silicificación, argilización y mineralización de Pb, Zn (Au, Ag) claramente relacionadas a ellas. En cambio hacia el norte-este y sur-este se mantiene un contacto cortante con flujos riolíticos brechados (autobrechas) con una secuencia piroclástica del tipo explosivo (ignimbrítico), con una clara disminución en alteración y mineralización, con respecto a su contraparte oeste.

Su forma lejos de ser ligeramente elíptica, como se consideró anteriormente, es alargada en un sentido hacia el este y parece ser controlada

(su forma) por efectos estructurales, morfológicos y topográficos. La distribución y estratigrafía de las distintas unidades volcánicas que componen esta estructura brechoide, se comportan de una manera muy cercana a la horizontal entre 10 y 15° de echado hacia el oeste y parecen organizarse iniciando de su base hacia arriba de la siguiente manera:

V.2.1.- Unidad Tb1

La unida Tb1, se distribuye mayormente en el lado este de la brecha, en las partes bajas del arroyo principal (nombrado localmente estacionamiento) que cruza la estructura en dirección casi E-W (Figura 10). Se estima que esta unidad puede alcanzar un mínimo de 30 m de espesor y se compone de una brecha con fragmentos de roca angulosos, con tamaños del orden de 30 a 40 cm, aunque algunos de ellos pueden alcanzar hasta de 1 m de diámetro. Entre todos ellos pueden lograr un 35 % del volumen total, destacando los fragmentos de roca de color blanco con textura de flujo del tipo riolita y algunos de color verde pistache considerados como tobas. Todos los fragmentos se encuentran distribuidos de manera caótica y son sostenidos dentro de una matriz tobácea con fragmentos oscuros (paleozoicos) que pueden alcanzar un 5% del volumen total de la roca (Foto 38).

Por la disposición, heterogeneidad en el tamaño de sus fragmentos y variedad de ellos, se sugiere que esta unidad corresponde a un evento fuertemente explosivo, el cual muy probablemente inicia la formación de la brecha Santa María.

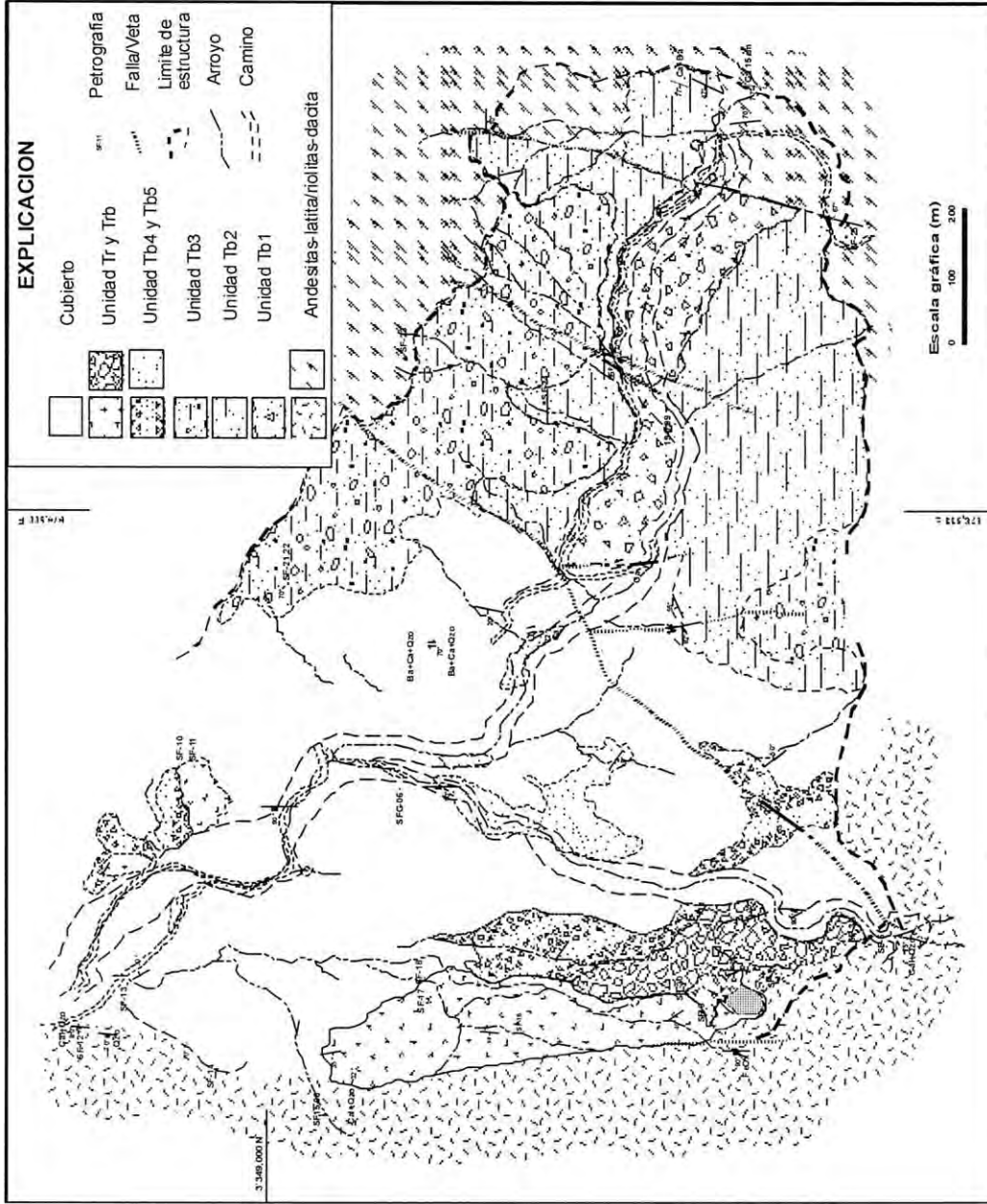


Figura 10.- Plano geológico de la brecha Santa María, mostrando los rasgos geológicos y estructurales más sobresalientes.

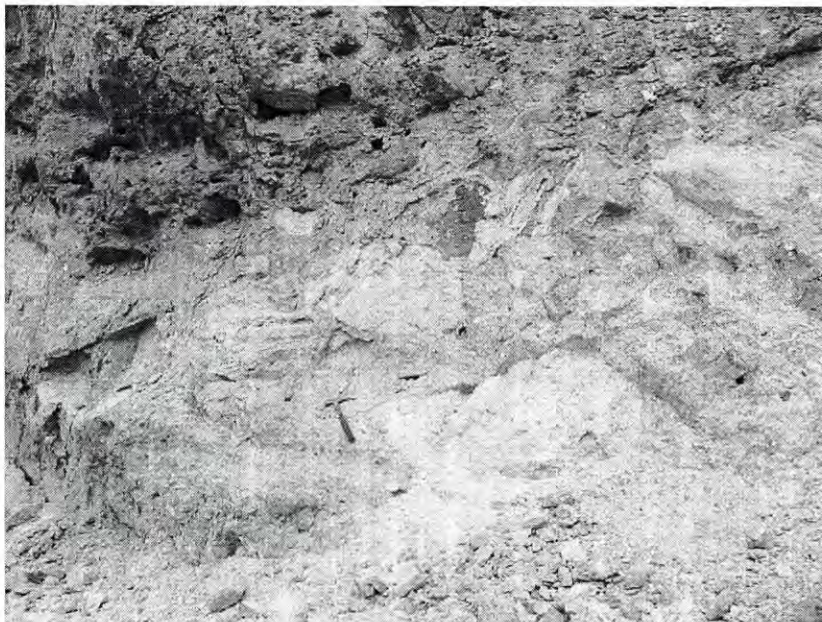


Foto 38.- Mostrando la Unidad Tb1, donde se observan grandes fragmentos de roca angulosos, algunos hasta de 1 m de diámetro, sostenidos dentro de una matriz tobácea. Encima de esta unidad y presentándose pseudo-estratificada se tiene la unidad Tb2 (ver texto).

V.2.2.- Unidad Tb2

Esta unidad descansa inmediatamente encima de Tb1 en forma concordante y al igual que esta unidad su distribución es mayor en el lado este de la estructura Santa María (Figura 10). Puede alcanzar un espesor de entre 30 a 40 m, y está compuesta de grandes bloques angulosos de 0.8 a 1 m de diámetro, principalmente de riolitas con textura fluidal, sostenidas en una matriz tobácea. A diferencia de la unidad Tb1, muestra una pseudo-estratificación (Foto 38) e inclusive parece guardar estratos muy locales y delgados, con estructuras sedimentarias del tipo estratificación cruzada y planar con grietas de disecación, indicando un ambiente fluvial perene.

La manera de presentarse de esta unidad, con grandes bloques dentro de ella y presentando cierta pseudoestratificación, con algunos indicios de procesos fluviales, parece sugerir un estado de cierta calma, después de depositarse la unidad Tb1, seguramente con algunos arroyos perenes activos durante su formación.

V.2.3.- Horizonte de granófidos

A la unidad Tb2 la infrayace en aparente discordancia un horizonte rocoso de aproximadamente 1.5 a 2 m de ancho y ampliamente extendido en el lado este de la brecha Santa María, está formado de clastos subredondeados de 10 a 25 cm de diámetro compuestos de una roca denominada en el campo como granófidos, los cuáles pueden alcanzar más del 60% del volumen total del horizonte. Generalmente los clastos son de color claro, textura granular fina muy similar en apariencia a una roca granítica. El resto de fragmentos dentro de este horizonte, corresponden a clastos oscuros posiblemente

correspondientes a rocas sedimentarias paleozoicas y andesitas, sostenidos dentro de una matriz tobácea.

Se tomaron 2 muestras para estudio petrográfico (SF24-06 y SM3A) de los fragmentos y matriz que componen este horizonte. En la sección delgada de la muestra SF24-06, los fragmentos catalogados como granófidos, presentan una textura granular fina, débilmente gráfica, con cristales de cuarzo (~15%), plagioclasa (35-40%) y feldespato (35%), con biotita y hornblenda como minerales accesorios (5%), que se encuentran alterados a clorita y cubiertos por calcita tardía (Foto 39). Esta roca corresponde a un granófido de composición cuarzo-monzonita y fuera de este nivel, este horizonte no vuelve a aparecer dentro de la estructura de la brecha Santa María.

Por otro lado, la muestra SM3A, muestra que la matriz donde se sostienen estos fragmentos, se forma de una fracción lítica compuesta de clastos de cuarcita, esquistos, vidrio volcánico, pómez y otra parte cristalina, formados de cuarzo y feldespatos generalmente quebrados con forma angulosa; en algunos casos pareciendo mezclarse con partes de vidrio?. Todos ellos son sostenidos dentro de una matriz de polvo de vidrio (Foto 40).

La disposición de este horizonte en gran parte del lado este de la brecha Santa María y encima de la unidad Tb2, con fragmentos grandes sobresalientes de granófido y fragmentos oscuros metamorfoseados paleozoicos y andesíticos, sostenidos dentro de una matriz rica en líticos, cristales, vidrio y posible pómez, sugieren una matriz con material juvenil, el cual indica un evento volcánico explosivo para esta unidad, muy probablemente durante una interacción magma-agua, generando como consecuencia una actividad freatomagmática.

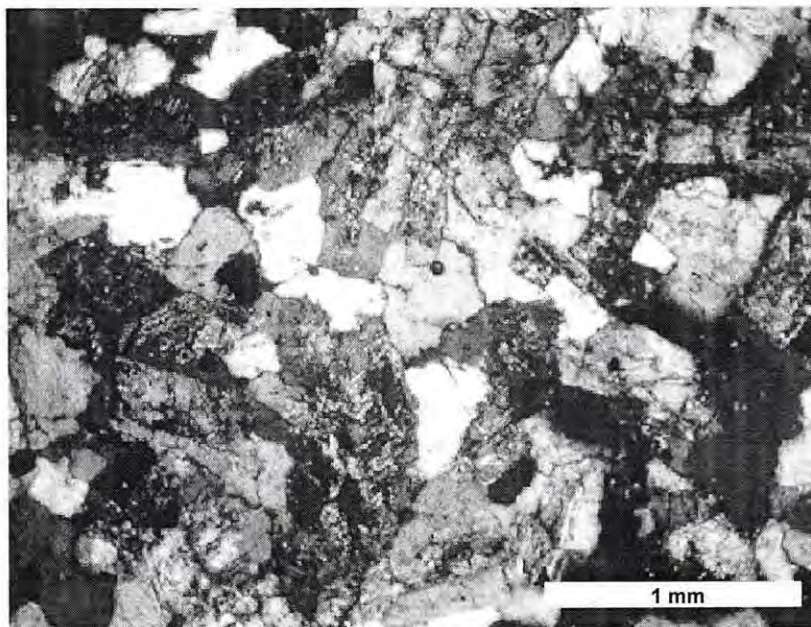


Foto 39.- Microfotografía de la muestra SF24-06 perteneciente a los fragmentos de la Unidad Tb2, mostrando una textura granular fina con cristales de cuarzo-feldespato potásico y plagioclasa intercrecidos, con biotita y hornblenda como minerales accesorios. 10X, LP.

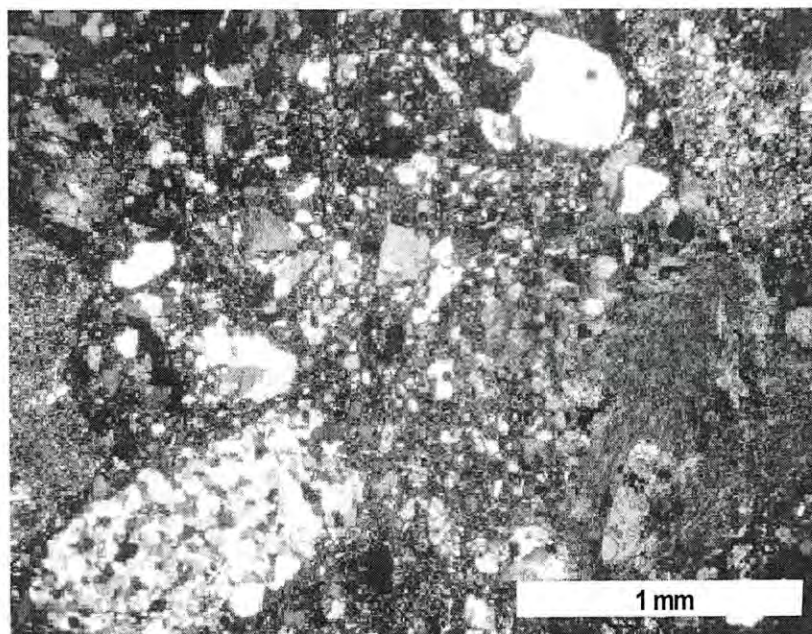


Foto 40.- Microfotografía de la muestra SM3A, mostrando parte de la matriz que sostiene a los fragmentos de granófidos de la muestra SF24-06. Se compone de una variedad de líticos (esquistos, cuarcitas, vidrio, pómez) y cristales, todos ellos angulosos, sostenidos en polvo de vidrio. 4X, LP.

V.2.4.- Unidad Tb3

Esta unidad se conserva arriba concordantemente del horizonte de granófidos que lo separa de la unidad Tb2. Se extiende hacia la parte este-centro de la brecha (Figura 10) y parece graduar hacia el sur-oeste a la unidad Tb5?, aunque no es conclusivo y parece mantenerse por debajo de ella. Se distingue por permanecer en las partes altas de las paredes norte y sur centro de la brecha, manteniendo un color gris rojizo con cierta pseudo-estratificación y actitudes generales de N 19° E con echados de 25° al SE. Contiene alrededor de 45% de fragmentos de diferente composición, variando de riolitas, andesitas hasta clastos de rocas oscuras de posibles rocas sedimentarias paleozoicas metamorfoseadas provenientes del basamento, en menos del 20% del volumen total de la roca. Generalmente los fragmentos varían de subangulosos a subredondeados, con tamaños que van desde 3 mm hasta 3 cm de diámetro, todos ellos sostenidos dentro de una matriz rojiza fina, probablemente de la misma composición que los fragmentos?.

El contacto de esta unidad Tb3, con los flujos riolíticos al norte y el sur es regularmente cortante y fácilmente distinguible. En algunas partes, cerca del contacto con la unidad de riolita-dacita, se observa un incremento en el contenido de fragmentos de riolita, algunos alcanzando hasta un metro de diámetro, sugiriendo inestabilidad de paredes con la consecuente de caída de grandes bloques de riolita dentro de la unidad Tb3. Además, se tienen partes de la brecha Tb3, descansando encima de la unidad de riolitas-dacitas, cerca del contacto lo cual sugiere que los flujos riolíticos fueron rebasados durante el efecto explosivo?.

El hecho de contener grandes fragmentos de flujos de riolita dentro de la unidad Tb3, sugiere, probablemente un alto topográfico, debido probablemente a subsidencia, sucedido a partir de las primeras explosiones, lo cual muy probablemente se tiene la formación de un bajo topográfico para la época de su depositación.

V.2.5.- Unidades Tb4 y Tb5

Básicamente estas dos unidades presentan características muy similares en su modo de formación y disposición. La unidad Tb4, aflora en la parte centro-este de la brecha Santa María (Figura 10), presenta un rumbo preferencial NW 40° SE y echados muy cercanos a los 80° hacia el NE en su base, pasando a menos de 30° en su cima ya cerca al contacto con la unidad Tb5. Puede tener 50-60 m de espesor y se presenta como una brecha con gran cantidad de fragmentos de rocas oscuras (75-90%) del volumen de la roca, correspondientes a sedimentos paleozoicos metamorfoseados y sostenidos en una matriz fina tobácea? la cuál en sección delgada (SFP-75), muestra que está formada de una gran parte de fracción lítica (esquistos, cuarcita, vidrio volcánico) y menor proporción de cristales, sostenidos en una matriz de polvo de vidrio. Tanto los fragmentos como los cristales, se encuentran quebrados, angulosos y con tamaños variables desde <0.1 hasta 2 mm en diámetro (Foto 41).

Hacia su base parece contener más fragmentos claros riolíticos, en cambio en su cima presenta cierta pseudo-estratificación y estructuras de estratificación cruzada y planar con el tamaño de sus fragmentos reduciéndose a calidad de tobas.

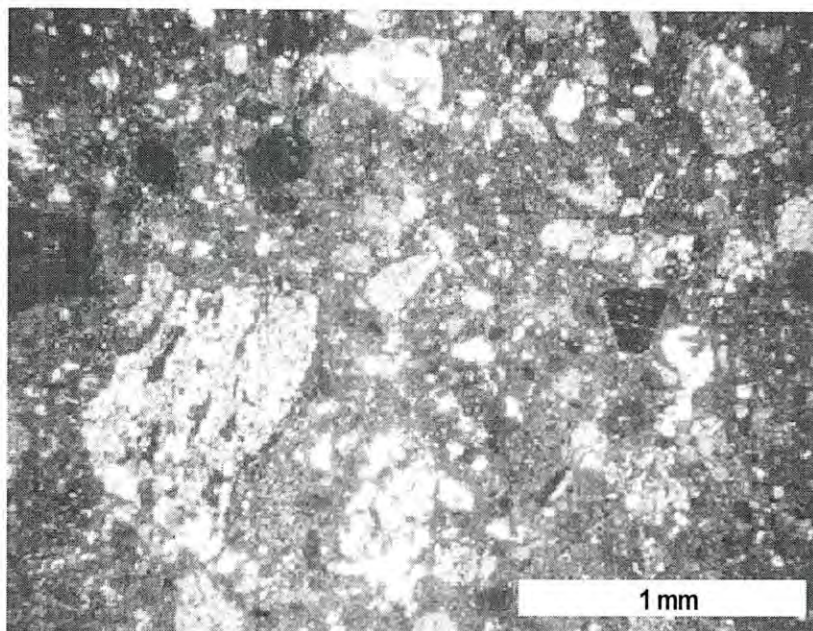


Foto 41.- Microfotografía de la muestra SFP-75, mostrando parte de la matriz de la unidad Tb4, que sostiene a los fragmentos oscuros paleozoicos. Se compone de una variedad de líticos formados de esquistos, cuarcitas y vidrio, con cristales, todos ellos angulosos, sostenidos en polvo de vidrio. 4X, LP.

La unidad Tb5, se encuentra ampliamente extendida en la parte central de la brecha Santa María (Figura 10) y descansa concordantemente encima de la unidad Tb4. Es de un color verde claro, presentando una textura piroclástica de grano fino (1-3 mm), formada de granos angulosos de color oscuros (fragmentos paleozoicos) y claros (riolitas), que entre los dos pueden alcanzar un 15% del volumen de la roca. Son sostenidos dentro de una matriz fina de color verde del tipo ceniza, con ciertas estructuras del tipo lapilli concrecional de 3 mm de diámetro o menores, con sus orillas más finas que su parte central. Otras veces, y muy regularmente se pueden tener horizontes de 2-4 m de espesor, formado de grandes bloques de riolita, con menor presencia de fragmentos más pequeños de roca oscura pertenecientes a sedimento paleozoico metamorfoseado, sugiriendo eventos explosivos durante su depósito.

En sección delgada esta unidad presenta una textura piroclástica, de grano fino, con formas angulosas y tamaños variables de 0.1 a 1 mm de diámetro. La fracción clástica alcanza más del 50% del volumen total y está conformada por esquistos, cuarcitas, esquistos con materia orgánica, etc, con un 35% del volumen y en menor presencia de rocas volcánicas (vitreas y algunos parecidos a pómez), las cuáles pueden alcanzar menos del 30%. Todos ellos sostenidos dentro de una matriz fina compuesta al parecer de polvo de vidrio y cristales. Aunque no es muy claro, se observan en la matriz algunos cristales de forma angulosa del tipo "astilla" de vidrio, aunque también podrían corresponder a fragmentos que toman esta forma ya recristalizados.

El contenido y tamaños de fragmentos dentro de esta unidad parecen variar en zonas, pero en general se mantiene más o menos constante y aunque

no se puede reconocer el contacto con la unidad Tb3, se estima en este trabajo, una disposición encima de esta unidad conformando un contacto irregular y mal definido, dado en partes a la similitud de ambas unidades.

Por sus características, texturales, la geometría, estructuras de ambas unidades, distribución interna y naturaleza de los clastos, sugieren que la unidad Tb4, parecería corresponder a un depósitos tipo "surger", cercano a una ventana y formados a partir de una actividad freatomagmática.

En cambio la unidad Tb5, cercano al contacto con la unidad Tb4, parecería ser la continuación de este depósito, pero ya en sus partes más alejadas, se comporta como material piroclástico transportado y donde afluentes de pequeños arroyos depositan parte de esta unidad con estructuras sedimentarias de ambiente fluvial. Las estructuras de lapilli concrecional, por otro lado, sugieren condensación de vapor y depositación de ceniza en forma de gotas de agua, todo esto producto de la actividad freatomagmática previa.

V.2.6.- Unidades Tr y Trb

Estas dos unidades aunque fácilmente cartografiables, podrían corresponder a un mismo evento extrusivo. La unidad Trb, tiene un color blanco en partes rojizo, dando la apariencia de una fuerte argilización. Regularmente tiene una actitud variable de casi N-S a NW40°SE y echados de 30 a 40° al NE y un espesor aproximado de 30 m. Regularmente presenta una textura de flujo, aunque algunas zonas dentro de esta unidad se presentan con aspecto de brecha, donde fragmentos grandes de 15 a 30 cm en tamaño, parcialmente rotados, generalmente angulosos y de composición exclusivamente de riolita,

parecen ser sostenidos dentro de una matriz de la misma composición que los fragmentos, dando una apariencia de brecha de flujo o autobrecha.

La característica importante de esta unidad, es que está en contacto directo con la unidad Tb4 y los fragmentos de riolita que se presentan en la base de ella, corresponden a esta unidad (Trb). A la vez es cortada por estructuras en forma de diques irregulares de brecha de color gris a negro, de 10 a 20 centímetros de ancho, conteniendo en su gran mayoría fragmentos de rocas oscuras paleozoicas, acompañadas con sulfuros de plomo, barita, calcita y fluorita. Además, es cortada de manera tardía por una serie de fracturas rellenas con alunita, con direcciones preferenciales N10°W.

La unidad Tr, se presenta de manera alargada en el lado oeste de la estructura Santa María (Figura 10), con clara textura de flujo en distintas direcciones y echados variables, sugiriendo estructuras de flujo envolutas, típicas de flujos viscosos de composición riolítica. Por otro lado, dentro de esta misma unidad parecen presentarse texturas del tipo piroclástico, de flujo y esferulíticas. El color en esta unidad es variable, dando la apariencia en parte de haber sufrido una intensa argilización como sucede en la muestra SF-16-06; sin embargo, la aparente alteración de arcillas se la da una profunda desvitrificación. Presenta una textura vítrea, con fragmentos de roca en avanzado estado de desvitrificación, en una matriz de vidrio con líneas de flujo. En sección delgada las muestras SF-17-06 y SF-16-06, muestran que este flujo es de composición riolítica esferulítica y su apariencia de fuerte silicificación en muestra de mano, parece corresponder más a una fuerte desvitrificación-cristalización, compuesta de un mosaico de cuarzo y feldespatos acomodados entre las esferulitas (Fotos 42 y 43).

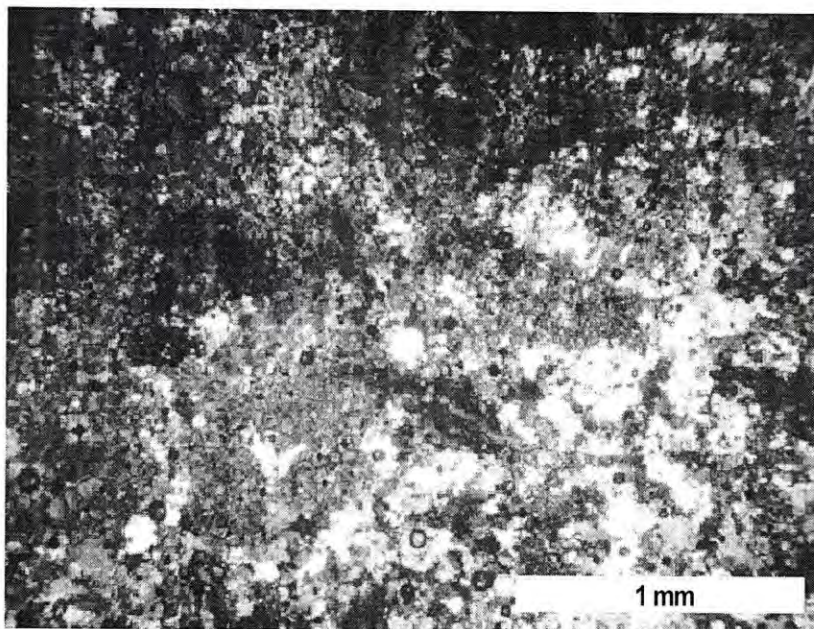


Foto 42.- Microfotografía de la muestra SF-17-06, mostrando parte de su textura, con esferulitas y cristales de cuarzo y feldespato en forma de mosaico, creciendo a partir de procesos de desvitrificación-cristalización. 4X, LP.

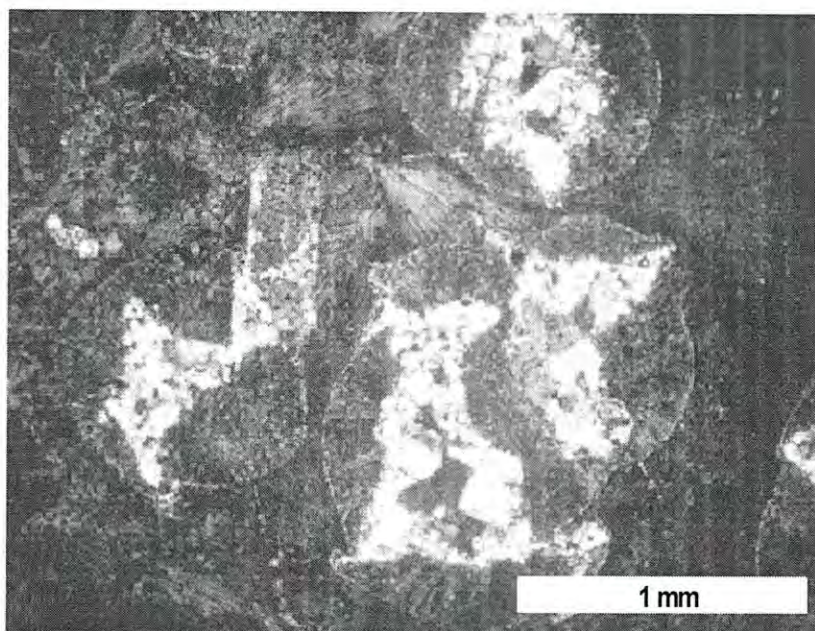


Foto 43.- Microfotografía de la muestra SF-18-06, tomada dentro de la unidad Tr, mostrando una textura esferulítica con cristales de cuarzo y feldespato creciendo en el centro de las zonas de exolución. 4X, LP.

La unidad Tr se extiende hacia el norte rebasando la mitad de la estructura de Santa María hasta desaparecer al ser cubierta por material reciente. Dentro de este mismo flujo, se tienen zonas intensamente silicificadas, aparentemente controladas por estructuras NNW-SSE o N-S, las cuales se muestran como zonas irregulares, pero siguiendo esta misma dirección. Por ejemplo, la muestra SF-14, presenta un flujo vítreo de composición riolítica, fracturado y relleno con cuarzo en forma de estructuras producidas por hidrofracturamiento, que le imprimen una fuerte silicificación a la roca (Foto 44).

La fuente de estas dos unidades, Tr y Trb, parece provenir de un punto en el sur de la estructura (Figura 10), conformado por una zona de brecha fuertemente silicificada, que forma un alto de hasta 5 m por encima de la superficie y la cuál parece ser controlada por estructuras NNW-SSE (Foto 45).

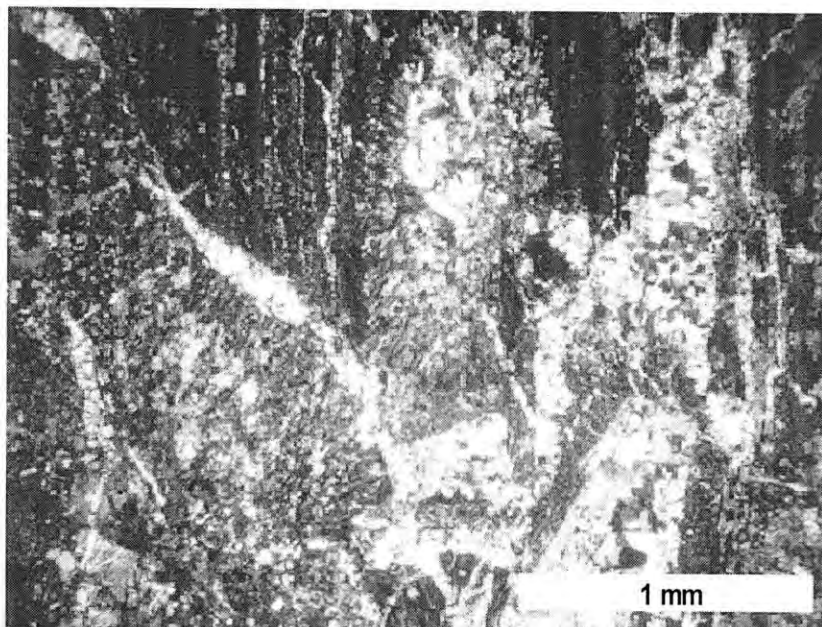


Foto 44.- Microfotografía de la muestra SF-14, mostrando fragmentos de roca riolítica, con un fuerte hidrofracturamiento orientado y relleno con cuarzo cristalino con estructuras de relleno de cavidades. 4X, LP.



Foto 45.- Al centro, zona de brecha fuertemente silicificada, la cuál podría corresponder a la fuente de las unidades Tr y Trb. Forma un alto de hasta 5 m por encima de la superficie y parece ser controlada por estructuras NNW-SSE.

VI.- ALTERACION Y MINERALIZACION

VI.1.- ALTERACION Y MINERALIZACION: BRECHA SANTA CRUZ

En el caso muy particular de la brecha Santa Cruz, las zonas de alteración (silicificación y argilización) y mineralización, se encuentran más cargadas al lado oeste de la estructura (Figura 11). Las alteraciones más significativas en esta zona, corresponden a una moderada a fuerte silicificación, regularmente acompañadas con moderada argilización. Se presentan como zonas irregulares acompañando al sistema de fracturas preferenciales NE10°SW y echados casi verticales, con pequeñas zonas de arcillas, bastante erráticas y modestas, relacionadas al mismo sistema NNE-SSW. En esta zona hay que tener cuidado, pues rocas con una aparente fuerte silicificación, podría tratarse solo de una profunda desvitrificación, que regularmente esta presente en las rocas vítreas que componen esta estructura.

Se tomaron algunas muestras a lo largo de estas zonas de alteración para su estudio en sección delgada mostrando lo siguiente:

La muestra SFP-54 (Figura 9), fue tomada en una zona de brecha, formada por fragmentos angulosos de 1-5 cm de diámetro, sostenidos en una matriz fina rojiza, con cuarzo relleno de cavidades. Esta zona es cruzada por vetillas de cuarzo, orientadas preferentemente en una dirección N25°E, asociadas a fracturamiento en la misma dirección. En sección delgada se muestra una textura de brecha, con fragmentos angulosos de rocas volcánicas de composición riolítica con estructuras de esferulitas y parches de feldespato y cuarzo en mosaicos formados entre ellas por procesos de desvitrificación. La matriz contiene incipiente presencia de cuarzo en forma de mosaico muy fino y cruzada por delgados hilillos de cuarzo tanto en los fragmentos como a la

matriz de la brecha sugiriendo una etapa de cuarzo tardía post-brechamiento. Se observan óxidos de hierro disgregados en toda la roca, dentro de la matriz y en fragmentos de la brecha (Foto 46).

La muestra SFP-53, fue tomada dentro de una zona silicificada con fuerte penetración de óxidos de hierro (Figura 9), y dentro de una zona de fuerte fracturamiento con dirección preferente NE10-20°SW. En sección delgada, se nota una roca volcánica en profundo estado de desvitrificación, con zonas alargadas de mosaicos de cuarzo microcristalino denotando una moderada silicificación en la roca. Sin embargo, es difícil diferenciar entre material derivado de desvitrificación a alteración hidrotermal (Fotos 46 y 47). Otra muestra tomada más cerca dentro de esta zona silicificada (SFP-55, Figura 9), en ejemplar de mano presenta un aspecto de brecha, en partes parece ser tectónica, con fragmentos más grandes, algunos de hasta 5-10 cm de diámetro y de forma angulosa, sostenidos en una matriz fina, la cual parece en parte haber sido tectonizada. La brecha es cortada por una serie de fracturas NE25°SW, las cuales cortan muy bien los fragmentos, pero parecen amortiguarse en la matriz impidiendo su continuación lejos del fragmento. Aunque no es claro, los fragmentos parecen presentar cierto grado de alteración del tipo cuarzo + arcillas, al parecer previo al fracturamiento. En sección delgada se tiene una textura de brecha, con fragmentos angulosos de hasta 1.5 a 2 cm en tamaño, con clara textura de flujo (Foto 48), sostenidos en una matriz conformada de fragmentos angulosos, más pequeños (0.4-0.6 mm), irregulares y al parecer profundamente alterados a arcillas dentro de un material rojizo más fino. No es muy claro pero es lo más cercano a una brecha tectónica, con alteración de arcillas.

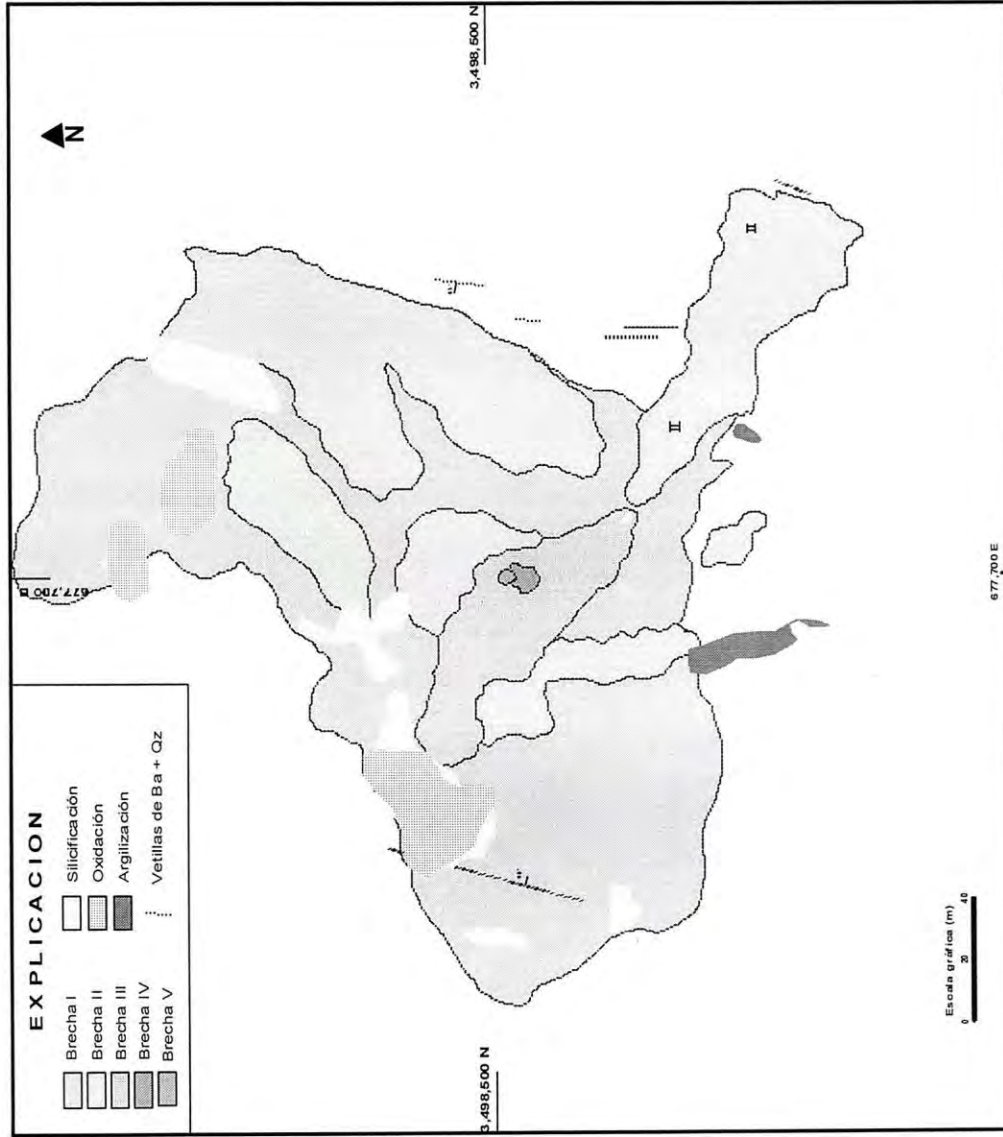


Figura 11.- Plano de la brecha Santa Cruz, mostrando la distribución de las zonas de alteración y mineralización.

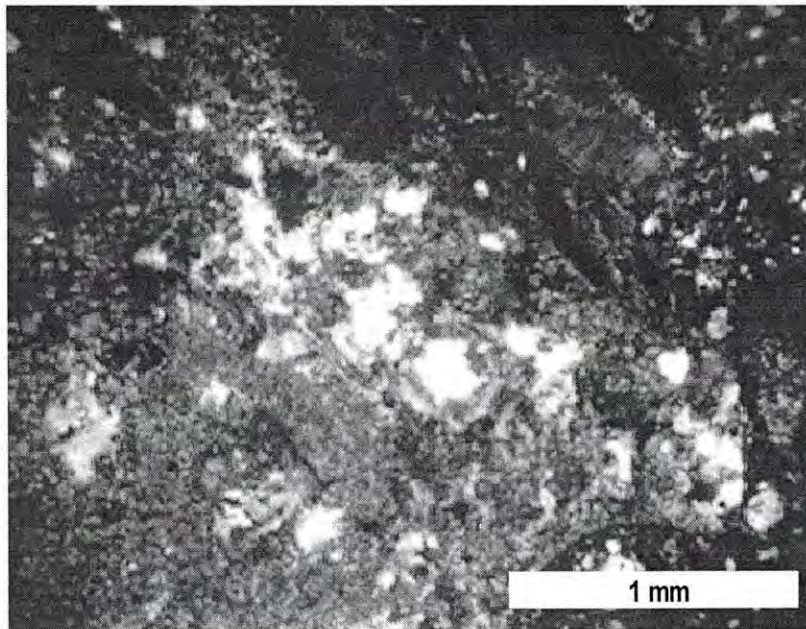


Foto 46.- Microfotografía de la muestra SFP-54, mostrando un detalle de la roca dentro de la zona de silicificación en el lado oeste de la brecha Santa Cruz. Note la textura esferulítica, con manchas blancas de silicificación en el centro de ellas. Muy probablemente, mucho del cuarzo en esta muestra es debido a desvitrificación y solo el cuarzo en vetillas puede ser tomado como hidrotermal. 4X, LP.

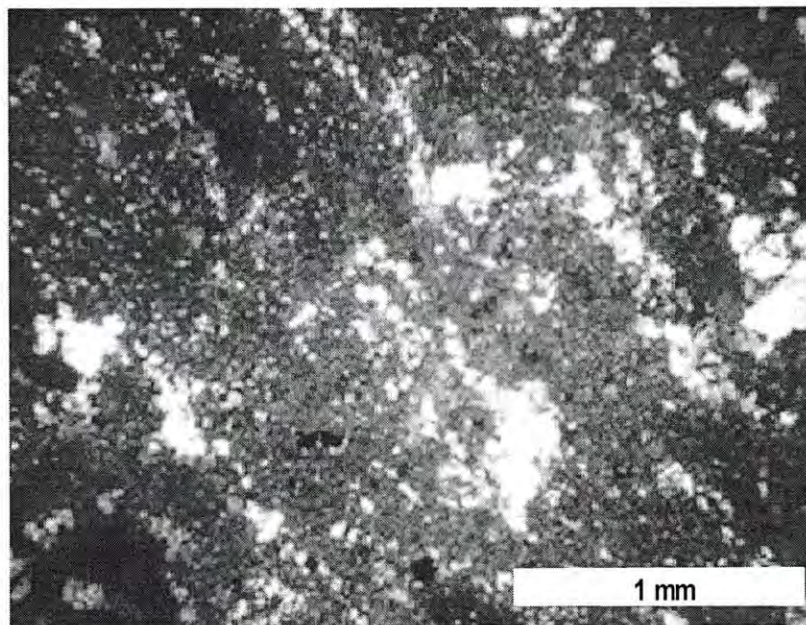


Foto 47.- Microfotografía de la muestra SFP-53, mostrando un detalle de la roca dentro de la zona de silicificación en el lado oeste de la brecha Santa Cruz. Note las franjas alargadas de color claro, formadas por sílice, las cuales dan un aspecto de textura primaria de la roca, quizás más por producto de desvitrificación de la roca. 4X, LP.

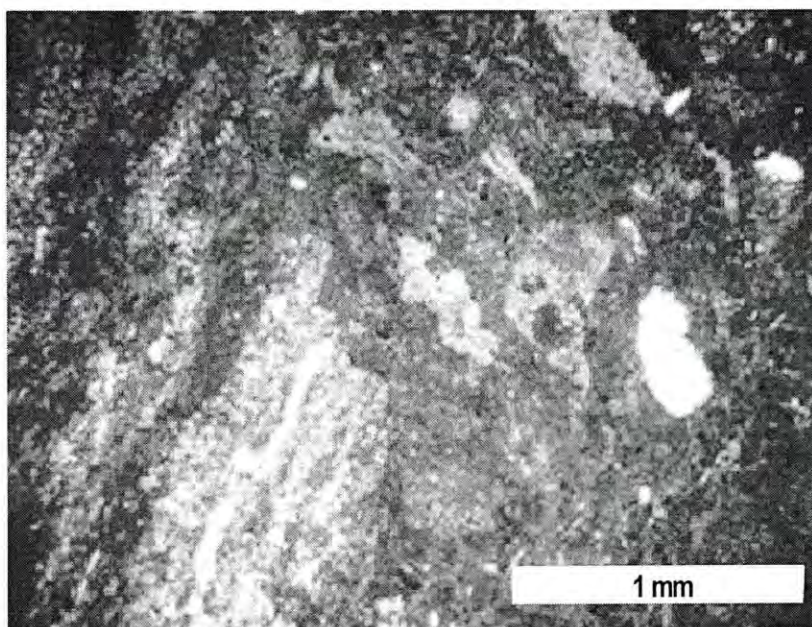


Foto 48.- Microfotografía de la muestra SFP-55, mostrando una estructura de brecha, con fragmentos con clara textura de flujo (parte izquierda de la foto), matriz fina con fragmentos claros (argilizados?) en material rojizo. Note como los fragmentos más pequeños son alargados y ligeramente fluidizados. 4X, LP.

En general podemos decir que aunque se tiene una zona más alterada en el lado oeste de la estructura de la Santa Cruz, aún su grado de alteración no es claro, dada la fuerte producción de sílice, alumina y feldespatos creados durante la desvitrificación la cual impide su completa identificación. Lo que si es claro en la Figura 11, es que se tiene una mayor presencia de fracturas unidireccionales que acompañan a esta alteración hidrotermal y oxidación en este lado de la brecha.

En su parte oeste (Figura 11), la brecha es cortada de manera tardía por una serie de estructuras rellenas con calcita en sus costados y barita + cuarzo en su centro. Regularmente tienen una dirección NNE-SSW y se pueden encontrar de manera esporádica dentro del área brechada. Fuera de la brecha, por el arroyo que dá a la brecha Santa María, se tienen este mismo tipo de estructuras de calcita + barita + cuarzo, dentro de fracturas, orientadas $NE4^{\circ}SW$ y 72° de echado al NW. Una particularidad de estas vetillas, es que presentan movimiento sinistral posterior a su formación, triturando a los minerales depositados dentro de ellas y desarrollando un fallamiento o fracturas secundarias $NE40^{\circ}SW$ producto del movimiento sinistral. La presencia de estas estructuras dentro y fuera de la brecha Santa Cruz, de algún modo soporta la idea de un evento posterior mineralizado a la formación de esta brecha.

Fuera de esta estructura, sobre su lado más sur occidental y tratando de cortar esta zona de intenso fracturamiento NNE-SSW acompañada de silicificación, argilización y zonas con óxidos de hierro, se dió un barrenado denominado BDF-20003, de 450.05 m de profundidad, donde se cortaron distintos tramos de brecha definidas como de inyección, con valores anómalos

de Zn, Cu, Pb (Au) (comunicación personal de geólogos de San Felipe). En una muestra tomada a 256.90 m, sobre este mismo barreno, se tiene un intervalo de brecha, compuesto de fragmentos claros al parecer de rocas volcánicas, angulosos y tamaños variables desde 2-3 mm hasta 1-4 cm de diámetro, sostenidos en una matriz fina y de color oscuro. En sección delgada (BDF-20003, 256.90 m), se observan fragmentos angulosos de rocas volcánicas con texturas que van desde flujos hasta piroclásticos con una fuerte presencia de vidrio, acompañados de algunos clastos de rocas metamórficas del tipo gneis y algunos al parecer del tipo sedimentario. Se encuentran sostenidos dentro de una matriz fina, formada de cristales y fragmentos de roca, algunos de vidrio, generalmente angulosos y con tamaños variables desde 0.1 a 0.4 mm (Fotos 49 y 50). Pueden observarse minerales oscuros de formas cúbicas, los cuales seguramente corresponden a pirita o algún otro sulfuro.

Rocas similares a esta muestra BDF-20003 (256.90 m) se observan dentro y cerca a estas estructuras brechoides (Santa Cruz y Santa María), generalmente controladas por estructuras NNE-SSW y con anomalías de Pb, Zn, Cu y Au (comunicación personal de geólogos de San Felipe).

Otra muestra sobre este mismo barreno, pero a 292.75 m (BDF-20003, 292.75 m), fue tomada sobre una zona de brecha, compuesta mayormente por fragmentos angulosos de rocas claras correspondientes a rocas volcánicas (riolitas?) y solo esporádicos fragmentos angulosos oscuros de rocas metamórficas paleozoicas (Foto 51), sostenidos en una matriz fina clara del tipo volcánico, con sulfuros diseminados.

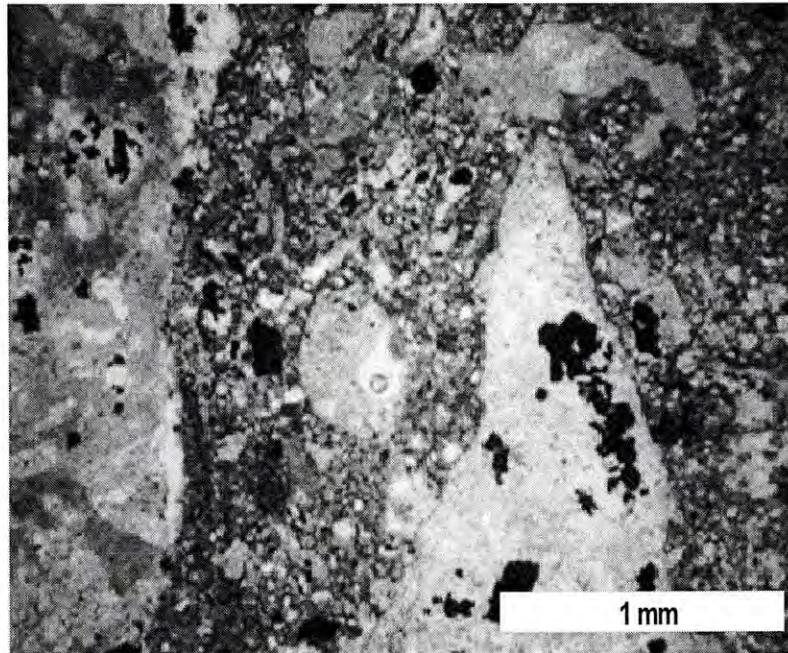


Foto 49.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (256.90 m), mostrando parte de los fragmentos angulosos de roca volcánica con vidrio, sostenidos dentro de una matriz fina, compuesta de cristales y fragmentos metamórficos y volcánicas (vidrio y roca), y polvo de vidrio. 4X, LN.

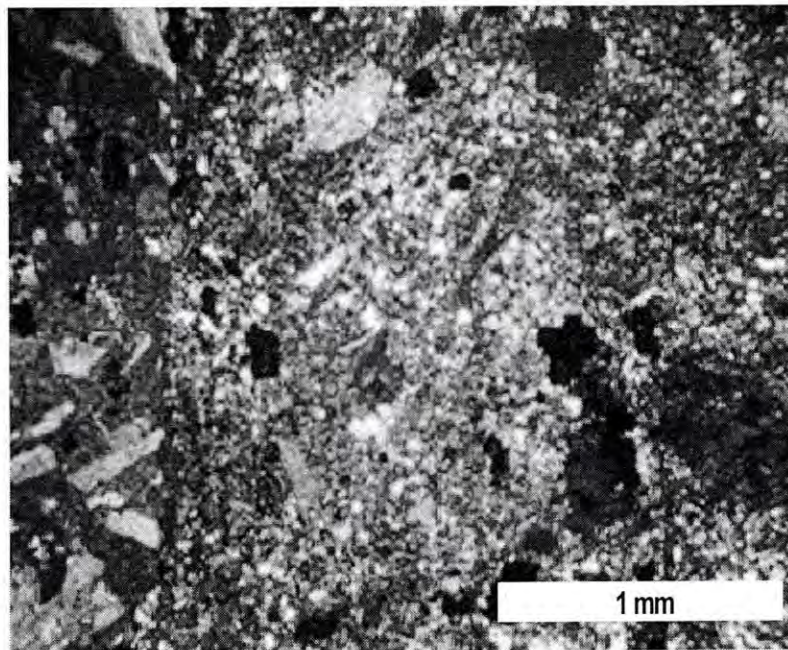


Foto 50.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (256.90 m), la misma muestra pero con LP, mostrando la matriz que sostiene a los fragmentos angulosos. 4X, LP.

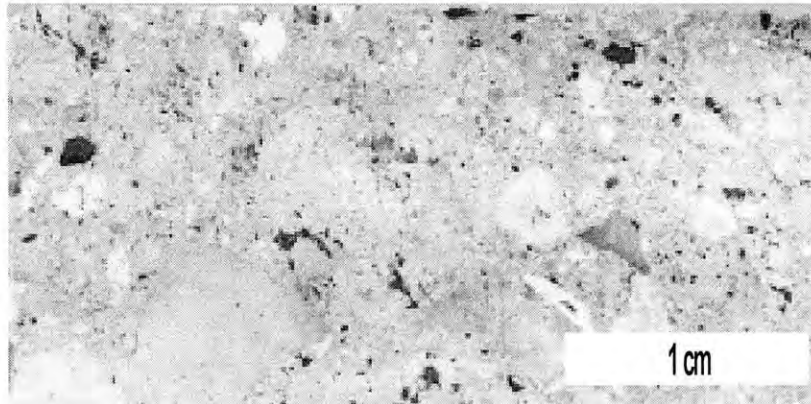


Foto 51.- Mostrando parte del núcleo del barreno BDF-20003 (292.75 m), apreciándose la textura de brecha, con un alto contenido de fragmentos anguloso de rocas volcánicas de color claro, angulosos y tamaños variables de hasta 1.5 cm los más grandes. Son sostenidos en una matriz fina volcánica?.

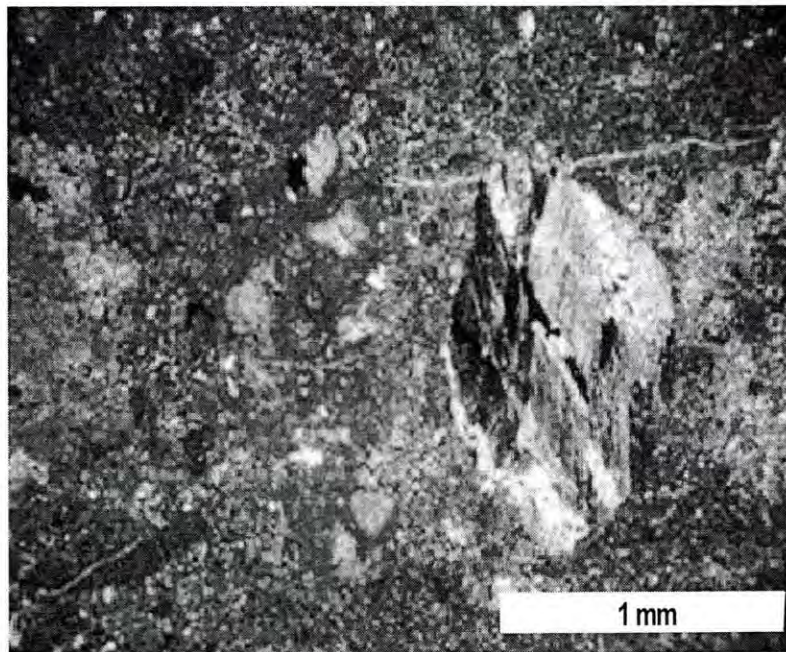


Foto 52.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (297.75 m), mostrando un detalle de la matriz de la brecha, con fragmentos de vidrio (oscuro) y clastos de rocas metamórficas, sostenidos dentro de material más fino o vidrio?. 4X, LP.

En sección delgada se observa una textura de brecha con fragmentos angulosos de rocas volcánicas, textura fina fuertemente desvitrificadas o recristalizadas, sostenidas dentro de una matriz formada de pequeños fragmentos angulosos del mismo tipo de la roca, algunos de vidrio y muy pocos de rocas metamórficas paleozoicas (Foto 52). En algunas partes la matriz de esta brecha, presenta mosaicos de cristales irregulares de cuarzo la cual da la apariencia de una incipiente a mediana silicificación en la roca, (Foto 53). Se observan algunos cristales opacos, muy finos, principalmente dentro de la matriz de la brecha y pocos de ellos diseminados en los fragmentos. Al microscopio, estos minerales opacos, corresponden a sulfuros compuestos de esfalerita<<calcopirita<<<galena+pirita (Foto 54). Da la impresión de tratarse de fragmentos irregulares, con una paragénesis de minerales en el orden descrito líneas arriba, con tamaños variables y formas regularmente angulosas, compuestos de sulfuros dentro de la matriz de la brecha. La calcopirita es común dentro de la esfalerita, como exoluciones y menor contenido de galena mezclada con la esfalerita, (Foto 55). Algunos fragmentos, contienen pirita muy fina diseminada en la roca, en forma de pequeños cubos de menos de 0.5 mm de diámetro.

En el mismo barreno pero a 317.65 m, se presenta una roca volcánica con fuerte silicificación, textura esferulítica y sulfuros de calcopirita-galena-pirita en manchas irregulares entre las esferulitas o en delgadas vetillas. En sección delgada, se presenta una roca con textura esferulítica, presentado un avanzado estado de desvitrificación en su matriz, con la presencia, en forma de mosaicos, de minerales claros compuestos de cuarzo y feldespato que le dan la apariencia de silicificación a la roca (Foto 56).

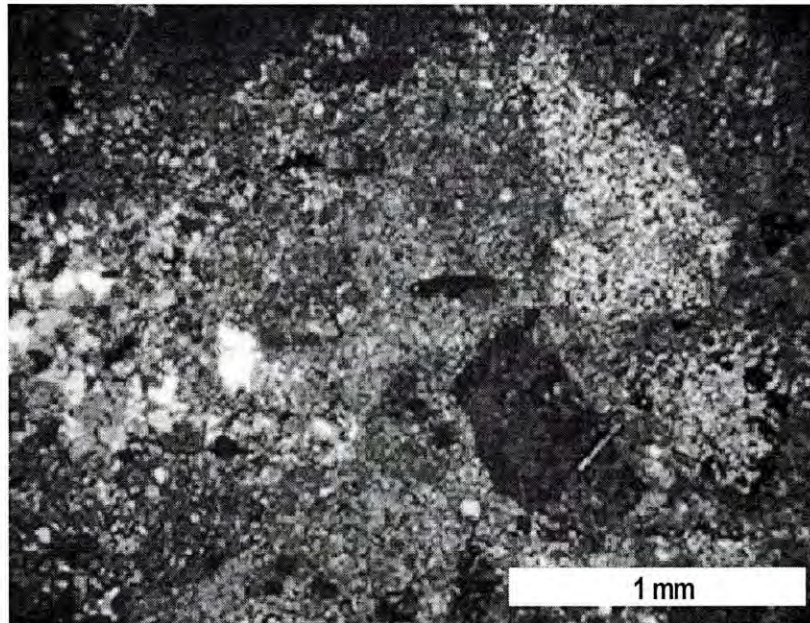


Foto 53.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (297.75 m), mostrando otro detalle de la matriz de la brecha, con fragmentos de vidrio (oscuro) y zonas con mosaicos irregulares de cuarzo (parte izquierda centro de la foto), denotando una incipiente a moderada silicificación en la matriz de la roca. 4X, LP.

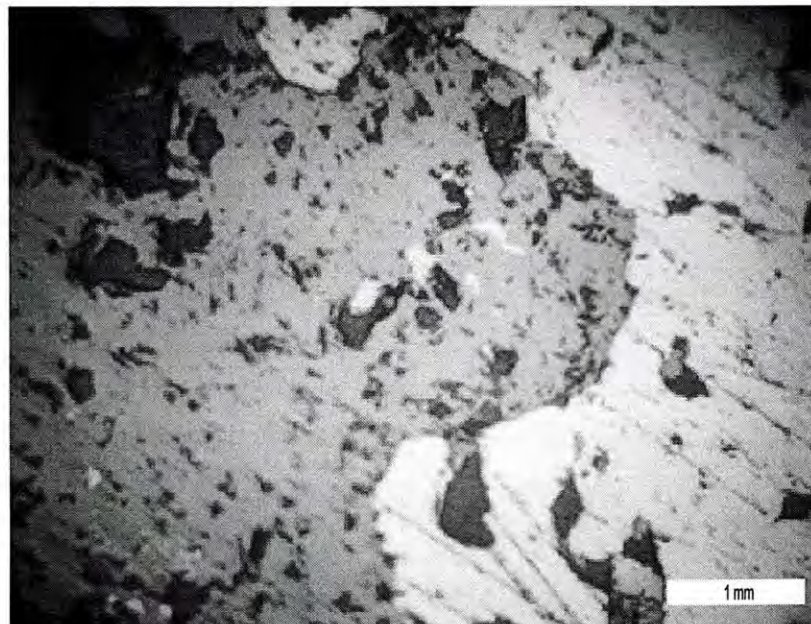


Foto 54.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (297.75 m) en sección pulida, mostrando parte de los fragmentos de sulfuros dentro de la matriz, donde se nota la relación de pirita posterior a la esfalerita y diminutas exoluciones de calcopirita (mineral amarillo brillante) dentro del cristal de esfalerita (color gris). 20X, LN.

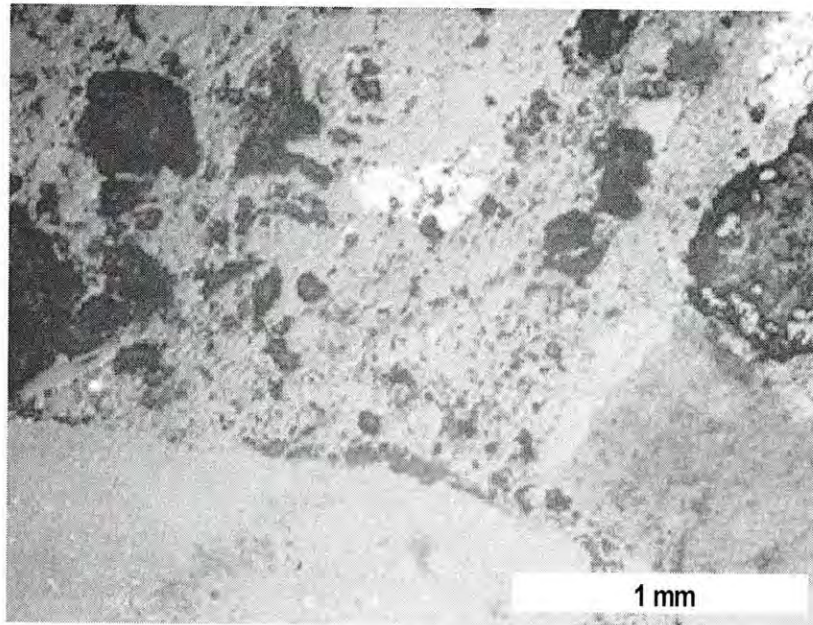


Foto 55.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (297.75 m) en sección pulida, mostrando la distribución y forma de los sulfuros presentes en esta sección. Note como la esfalerita (cristal gris en la parte centro de la foto) tiene una forma angulosa y tamaños del orden de 0.4 mm presente en la matriz de la roca. También note la presencia de pirita muy fina disseminada (<0.5 mm) en un fragmento de roca volcánica en la parte inferior de la foto. 4X, LP.

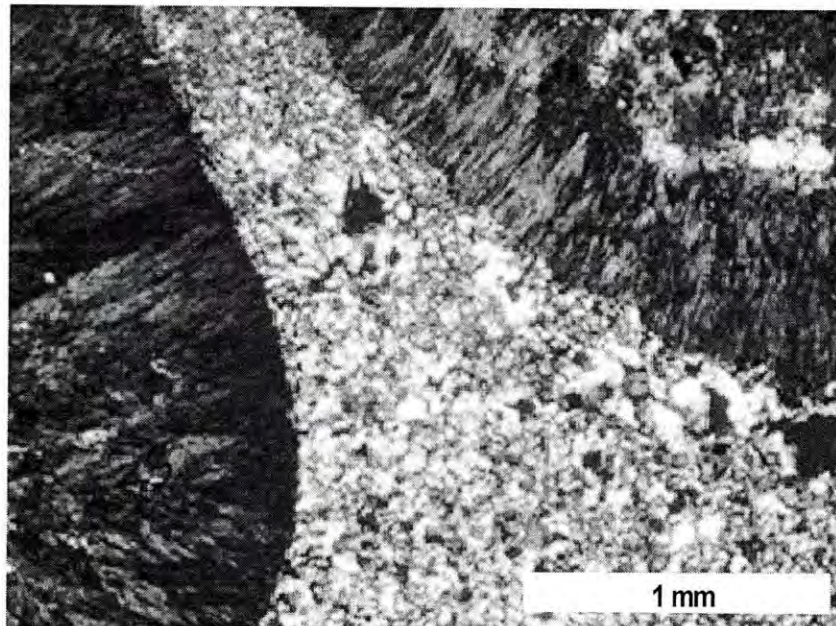


Foto 56.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (317.65 m), mostrando en detalle la matriz de la textura esferulítica, formada de un mosaicos de cristales de cuarzo y feldespato, que le da la apariencia silicificada a la roca en muestra de mano. 4X, LP.

Hacia el término de esta intervalo a 432.95 m, se tiene una roca volcánica con textura de flujo y composición riolítica en avanzando estado de desvitrificación, con sulfuros diseminados y algunos acomodados a lo largo de las líneas de flujo (Foto 57). Los sulfuros corresponden a esfalerita + galena + pirita, finamente diseminada en la roca, con un aparente mayor presencia de galena en este intervalo que los anteriores (ver Foto 58).

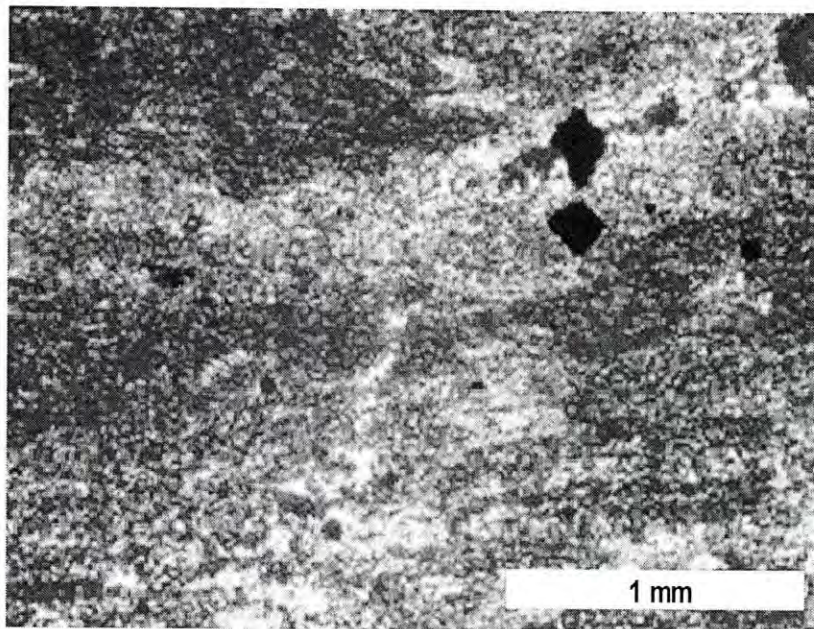


Foto 57.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (432.95 m), mostrando una textura de flujo con sulfuros (oscuros), diseminados y algunos siguiendo las líneas de flujo. 4X, LP.

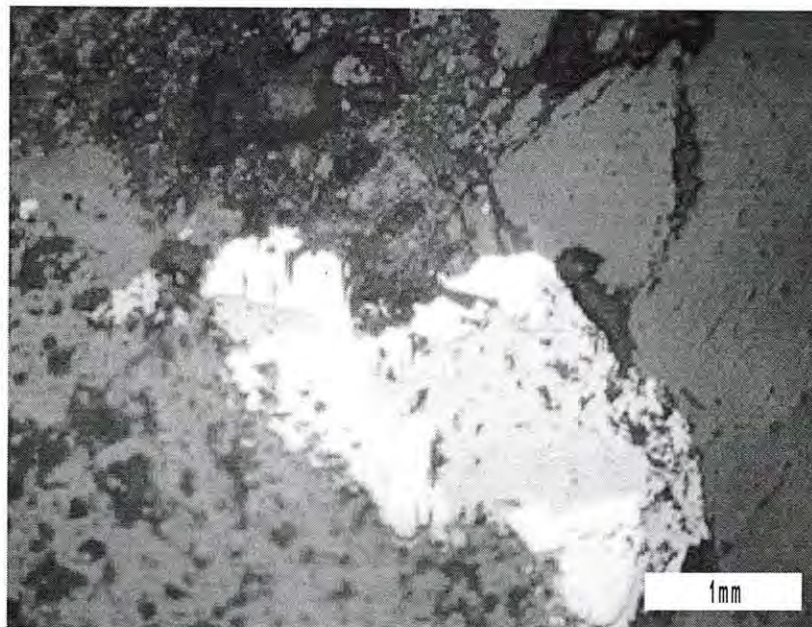


Foto 58.- Microfotografía de la muestra BDF-20003 (432.95 m) en sección pulida, mostrando la relación de galena-esfalerita en los granos diseminados en la roca de 0.5 mm de diámetro. 20X, LN.

VI.2.- ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN: BRECHA SANTA MARÍA

Dentro de esta zona se tienen llamativas zonas blanqueadas principalmente en el lado oeste y suroeste, con formas alargadas en dirección casi N-S y de pocas decenas o centenas de metros cuadrados de área (Figuras 10 y 12), presentando una fuerte silicificación, algunas veces acompañada con óxidos de hierro (hematita), principalmente a lo largo de fracturas. Las zonas silicificadas generalmente se componen de flujos o piroclastos riolíticos presentando hidrofracturamiento, con microfracturas en el mismo sentido, regularmente con sílice relleno éstas fracturas, como se observa en las muestras SF-14 y SF-10 (Figura 10). Por lo general estas zonas silicificadas son acompañadas o están asociadas al emplazamientos de diques irregulares de color oscuro, estructura de brecha fina (brechas de flujo), con valores anómalos de Pb, Zn (Au, Ag); los cuales cortan a la unidad de flujos riolíticos (Tr), indicando estados tardíos de mineralización. Se tomaron varias muestras para la descripción petrográfica de estos diques los cuales generalmente son estructuras controladas por fracturas N-S y NNE-SSW distribuidos en toda el área de Santa María de oeste a este; todos ellos son muy similares en apariencia, textura y disposición, con un color oscuro que resalta de la roca color claro que los aloja (flujos o tobas riolíticas) y que le imprimen la presencia de fragmentos de sedimentos oscuros de grano fino (alto contenido de materia orgánica?) o granos metamórficos (gneises, cuarcitas etc.) provenientes de las rocas paleozoicas que fungen como basamento en esta localidad. Pueden tener más del 50% de fragmentos oscuros, raramente se tienen fragmentos de riolitas y sus tamaños son variables con diámetros que van desde <0.1 hasta 1.4 mm y de formas angulosas. Algo de materia cristalina se ha desprendido de

estos fragmentos, comportándose como granos de cristales individuales principalmente de cuarzo. Todos ellos son sostenidos dentro de una matriz fina microcristalina que en parte da la apariencia de ser del tipo volcánico muy fino?, ver Fotos 59 y 60 de las muestras SF-8 y SF-11 (Figura 10). Note como en ambas secciones su parecido textural, estructural y mineralógico-litológico es excepcional, independiente de su disposición ya sea en el lado sur y norte respectivamente, con una diferencia en la presencia de minerales arcillosos en la muestra SF-8, desarrollados probablemente por procesos deutéricos y con algunos cambios hidrotermales como es la presencia de sericita.

En algunos de estas brechas se tienen los fragmentos de rocas metamórficas sostenidos dentro de una matriz más volcánica, como sucede en las muestras SF-4 y SF-13, Fotos 61 y 62, localizada al norte y sur de la estructura (Figura 10). Como se puede apreciar en la Foto 61, la matriz tiene una apariencia más volcánica, vítrea al parecer material desvitrificado, con contactos rectos y abruptos; la muestra SF-13, Foto 62, se presenta muy similar a las muestras SF-8 y SF-11, solo con una fuerte presencia de vidrio volcánico del tipo esferulítico, desprendido de la roca hospedante. La matriz en esta sección, contiene gran cantidad de pequeños fragmentos de forma angular de rocas metamórficas mezcladas con material más fino (vidrio?).

R11 T. 1526

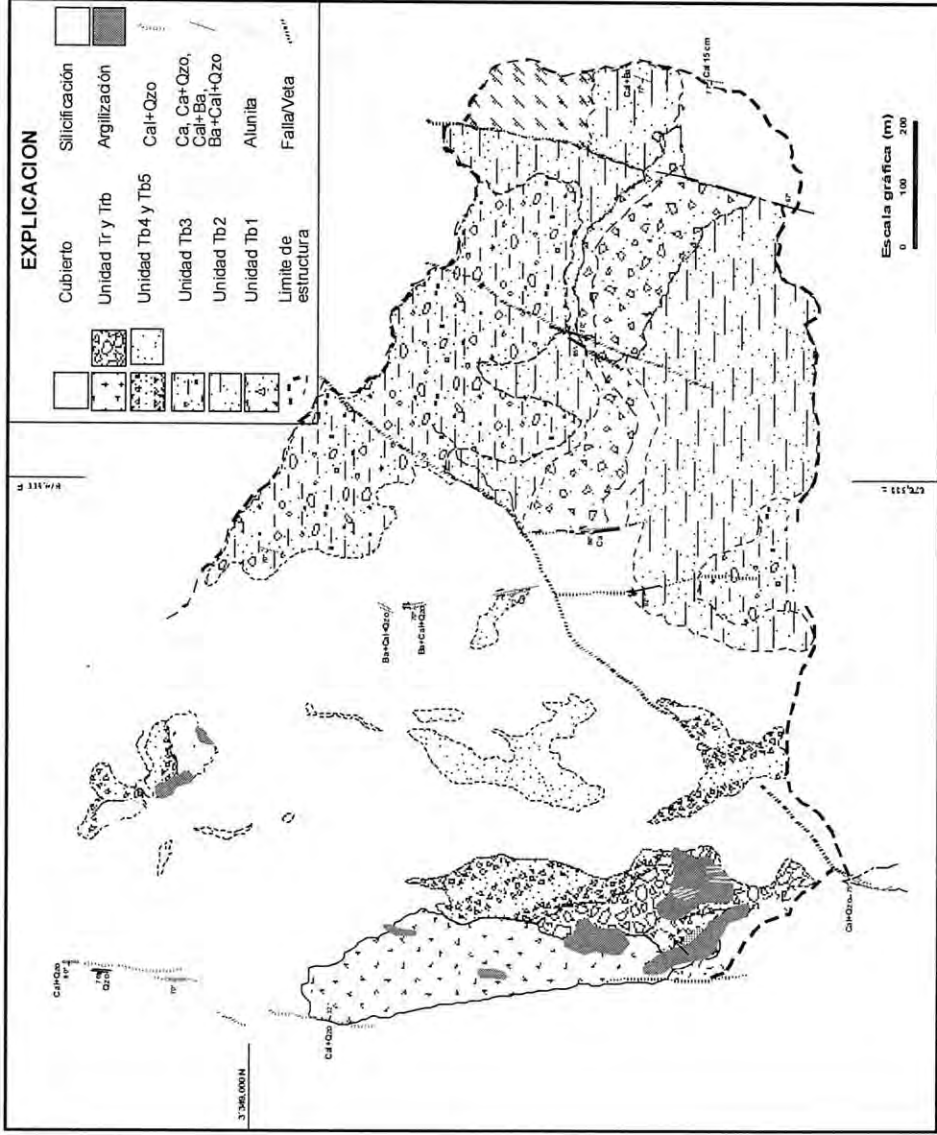


Figura 12.- Plano de la brecha Santa María, mostrando la distribución de las zonas de alteración y mineralización.

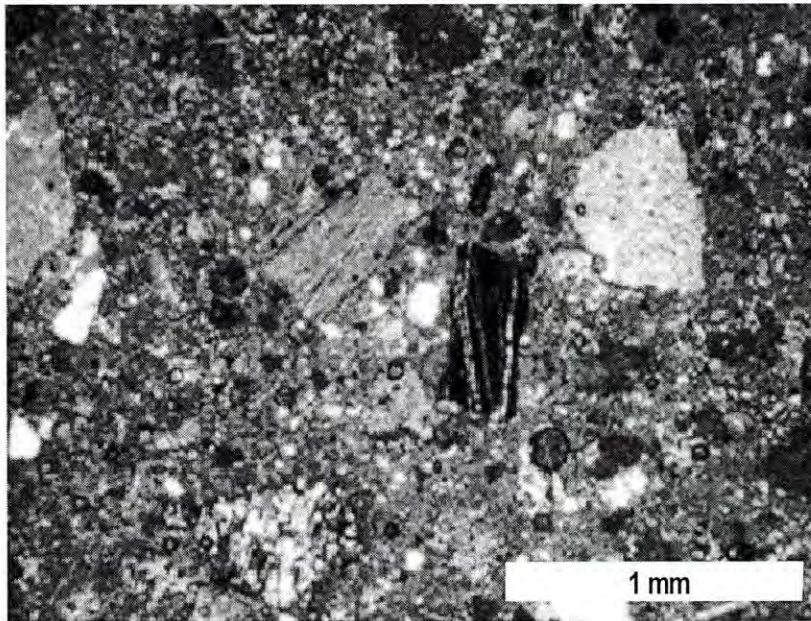


Foto 59.- Microfotografía de la muestra SF-8, tomada de uno de los diques de brecha comunes en esta zona (Figura 10). Note la textura de brecha, con alto contenido de fragmentos oscuros paleozoicos, sostenidos en matriz fina del tipo ceniza. También observe el desarrollo de arcillas en algunos fragmentos. 4X, LP.

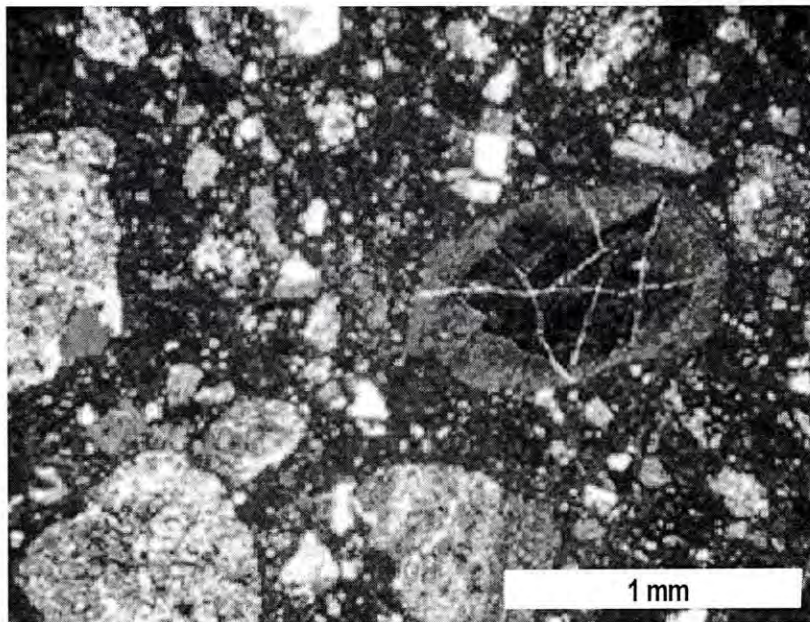


Foto 60.- Microfotografía de la muestra SF-11, tomada de uno de los diques de brecha comunes en esta zona (Figura 10). Note la textura de brecha, similar en apariencia que la muestra SF-8, con un alto contenido de fragmentos metamórficos paleozoicos, sostenidos en matriz fina del tipo ceniza, con menos arcillas que la muestra anterior. 4X, LP.

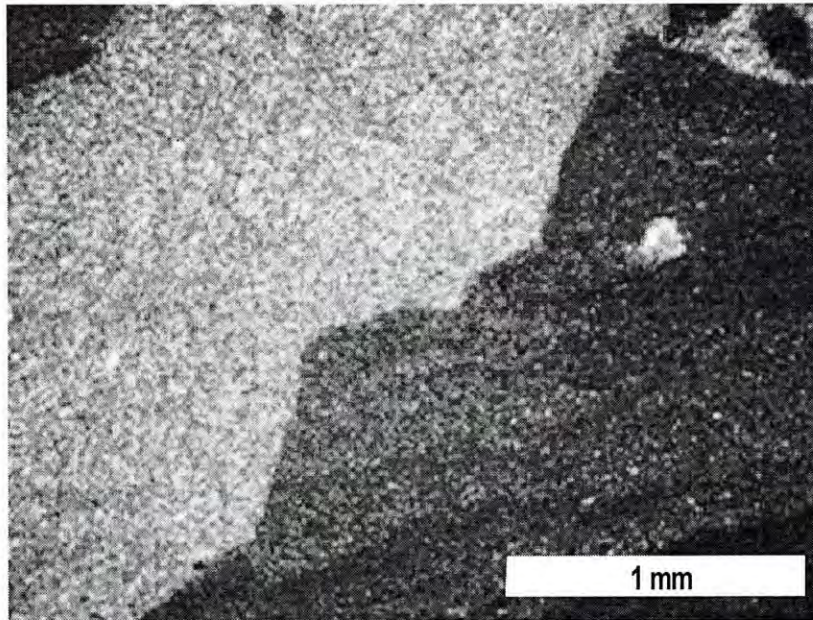


Foto 61.- Microfotografía de la muestra SF6-06, mostrando la relación matriz fragmentos de roca. Note el fragmento oscuro de grano muy fino, laminar correspondiente a una limonita carbonosa, sostenida o en contacto con una roca de grano fino, pareciendo material volcánico desvitrificado. 4X, LP.

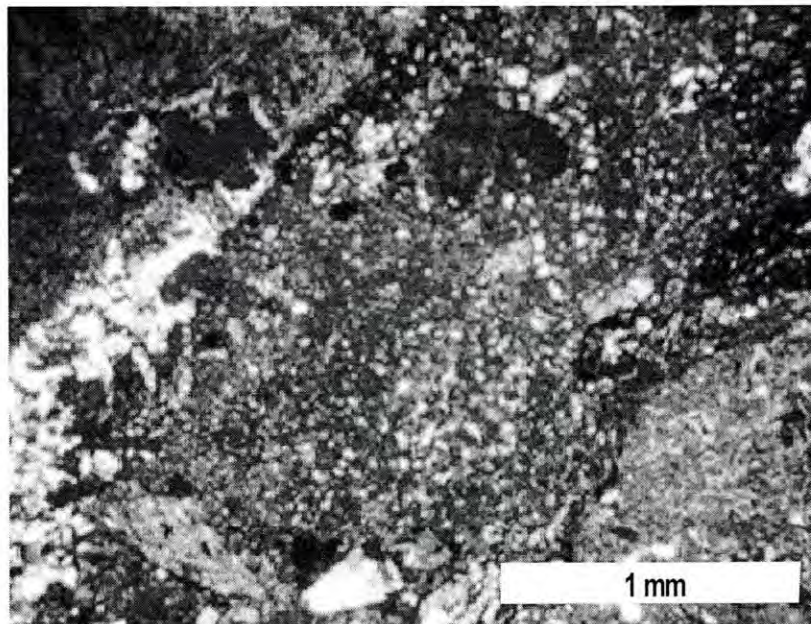


Foto 62.- Microfotografía de la muestra SF-11, mostrando la relación matriz fragmentos de roca. Note el fragmento de vidrio color oscuro y cristales de cuarzo-feldespatos en el lado izquierdo superior, en contacto con una matriz fina microcristalina con fragmentos angulosos de rocas metamórficas. 4X, LP.

De manera claramente tardía, se tiene la presencia de una serie de vetillas con estructuras crustiformes, compuestas de calcita + cuarzo + fluorita, principalmente en el lado oeste de la brecha Santa María que pueden alcanzar de 30 a 60 cm de ancho, aunque otras solo tienen pocos centímetros, manteniendo un rumbo más o menos constante NNE-SSW, con aparente movimientos de reactivación sinistral. Se tienen otro tipo de vetillas compuestas de calcita + barita, distribuidas dentro y fuera de la brecha y recargadas un poco hacia su lado este. La presencia de sulfuros en esta zona es errática y se presentan como vetillas irregulares de galena<esfalerita, asociados a las diques de brechas de inyección y rara vez se ven acompañados de cuarzo + fluorita, lo cual sugiere que podría acompañar a las vetillas de calcita + cuarzo + fluorita.

De manera general se puede decir que las vetas de calcita + barita son muy concurrentes en esta zona de Santa María y son muy similares en apariencia y en tiempo a las descritas en la brecha Santa Cruz.

Por último se tiene una serie de vetillas de alunita con direcciones preferenciales NNW-SSE, encajonadas preferentemente en la unidad Trb.

Una secuencia de eventos en el área de Santa María puede resumirse de la siguiente manera, tratando de correlacionar los distintos eventos sucedidos tanto en la brecha Santa Cruz y Santa María. Así como relacionarlos a sucesos más regionales como es la efusión de las unidades de andesitas-latita, riolitas-dacita e ignimbritas (~ 6.0 Ma). Tabla 1.

	Santa María		Santa Cruz		
	Andesitas-latita (~9.6 Ma)				
	Riolitas-dacita				
Brechas	Tb1		Brecha I		
			Brecha II		
	Tb2				
	Colapso?		Brecha III		
	Tb3				
	Tb4 y Tb5		Brecha IV		
	Tr y Trb		Brecha V		
Mineralización	Brechas de inyección	Sulfuros	Brechas de inyección	Sulfuros	Cpy, Gal, Py,
	Vetillas de Cal+qz+F				
	Vetillas de Cal+Ba+qz		Vetillas de Cal+Ba		
	Vetillas de alunita				
	Ignimbritas (~6 Ma)				

Tabla 1.- Secuencia de eventos registrados tanto en la brecha Santa María como en la brecha Santa Cruz.

VII.- ISOTOPOS ESTABLES

Para el estudio de isótopos estables se tomaron 8 muestras para isótopos de azufre y 5 más para O y C. Todas ellas relacionadas a la etapa de mineralización y relacionadas a la serie de estructuras N-S y NNE-SSW (Tablas 2 y 3). Todas ellas fueron analizadas en el laboratorio de isótopos estables del Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona.

VII.1.- ISOTOPOS DE AZUFRE

En la Tabla 2, se tienen las muestras tomadas para estudios de isótopos estables de S. Las 4 primeras corresponden a sulfuros asociados a zonas de brecha de inyección, presentes en distintos intervalos a lo largo del barrenado BDF-20003, las cuáles seguramente siguen la dirección del sistema de estructuras NNE, las cuáles pueden extenderse por varios kilómetros, presentando regularmente una moderada a fuerte silicificación dentro de ellas y acompañadas de menos óxidos de hierro (hematita). Es muy probable que la estructura que delimita el lado oeste de la brecha Santa Cruz, sea parte de este sistema NNE. Las 4 muestras restantes, fueron tomadas dentro de la brecha Santa María, las últimas tres en vetillas tardías relacionadas a la etapa de mineralización (Tabla 2) y la primera de ellas en las vetillas de alunita, definida como la etapa más tardía.

De entrada todas las muestras de sulfuros recolectados en el barrenado BDF-20003 en el área de Santa Cruz junto con la barita, sulfuros y pirita+fluorita recolectadas en varias vetillas en la brecha Santa María, presentan resultados muy similares del orden de 0.1 a 3.6 de $\delta^{34}\text{S}$ ‰ (Tabla 2, Figura 13), que sugieren que el azufre presente en ellos, tiene un componente

muy fuerte volcánico, lo cual se inserta muy bien en un ambiente como el descrito para el desarrollo y evolución de las unidades y estructuras presentes en las brechas de Santa Cruz y Santa María. Sin embargo, para la muestra de alunita, el valor de 17.8 $\delta^{34}\text{S}$ ‰, sugiere un componente más positivo de $\delta^{34}\text{S}$, lo cual parece indicar una fuente de azufre a partir de evaporitas (Figura 14).

Muestra	Mineral (s)	$\delta^{34}\text{S}$ ‰	Observaciones
BDF-20003-1	galena	0.1	Brecha Santa Cruz
BDF-20003-2	galena	0.8	Brecha Santa Cruz
BDF-20003-3	calcopirita	3.0	Brecha Santa Cruz
BDF-20003-4	pirita	3.3	Brecha Santa Cruz
SF-16	alunita?	17.8	Brecha Santa María
SF-21	barita	1.2	Brecha Santa María
SF29s-06	galena-esfalerita	3.6	Brecha Santa María
SF15-06	pirita+fluorita	0.9	Brecha Santa María

Tabla 2.- Isótopos de azufre.

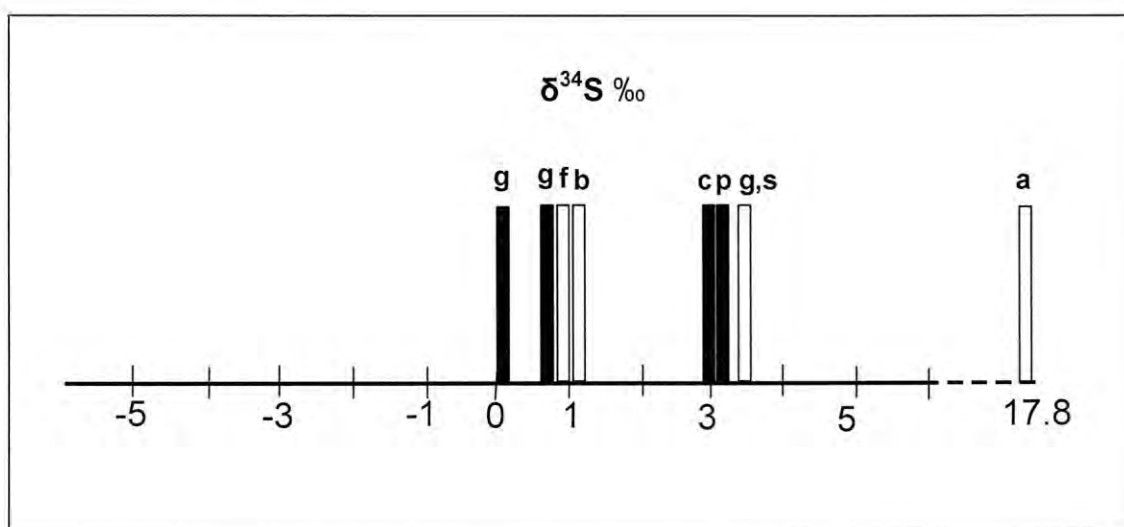


Figura 13.- Valores de isótopos estables de S, para distintas muestras tomadas en las áreas de Santa Cruz (barras negras) y Santa María (barras blancas). g-galena; s-esfalerita; cp-calcopirita; f-pirita+fluorita; a-alunita; b-barita.

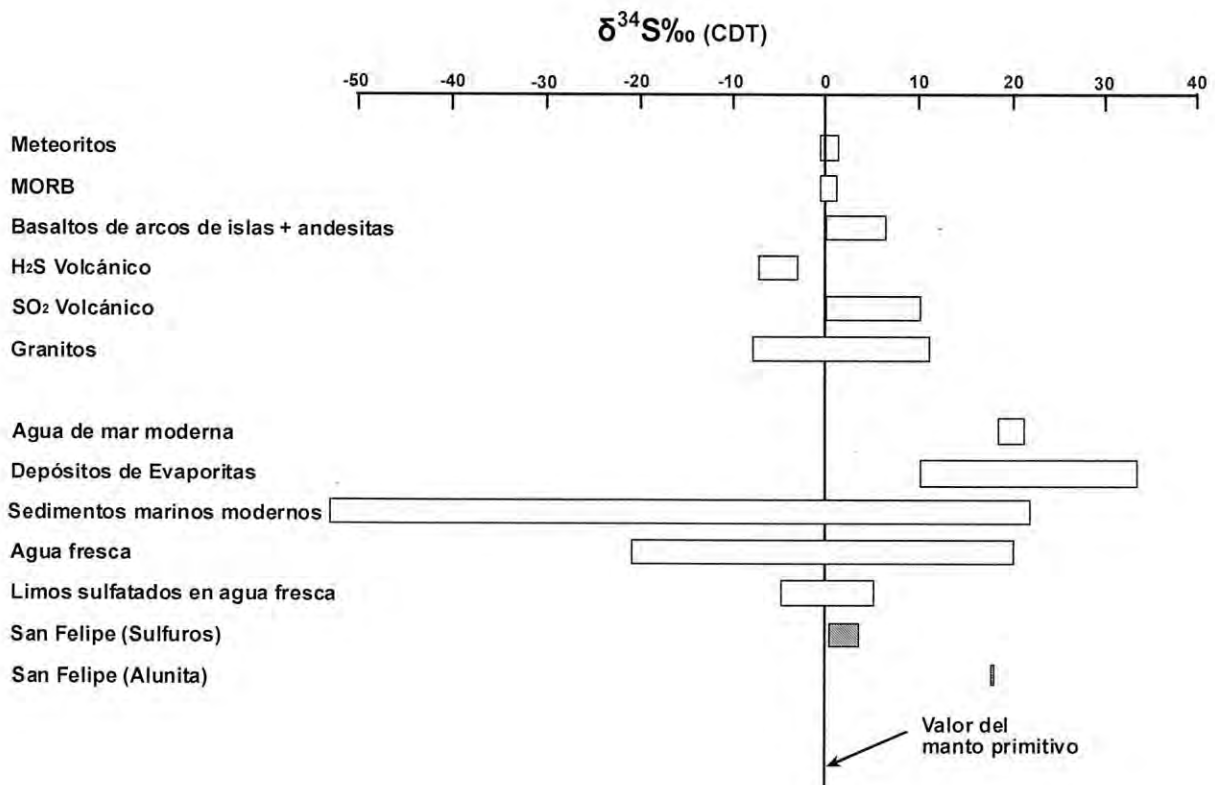


Figura 14.- Reservorios naturales para isótopos de sulfuros. Los valores de isótopos estables de azufre se presentan en un rango de 0.1 a 3.6 de $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$ para diferentes sulfuros y de 17.8 $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$, para la alunita. Tomado de Rollinson (1993).

VII.2.- ISOTOPOS DE OXIGENO Y CARBONO

La Tabla 3, presenta las distintas muestras tomadas para estudios de isótopos de O y C, todas ellas provenientes del mineral calcita recolectada en varias localidades dentro del distrito de San Felipe. Las tres primeras muestras fueron tomadas sobre algunas vetillas de cal+ba+qz? dentro del área de Santa María, una más en la veta esmeralda al oeste del distrito y la última de la veta-falla Moctezuma, en la parte centro.

Todas las muestras dan valores de $\delta^{18}\text{O}$ negativos del orden de -12.82 a -23.67 ‰, lo cual sugiere muy probablemente que los fluidos involucrados en la formación de estos minerales tiene una fuerte presencia de agua meteórica

(Figura 15). En cambio los valores de $\delta^{12}\text{C}$ que varían de -4.03 a -8.07 ‰, parecen indicar un origen más mantélico, lo cual es congruente con un medio ambiente volcánico con una mezcla de agua meteórica y fluidos magmáticos profundos, dado el escenario tectónico en que se desarrollan (Figura 16).

Muestra	Mineral	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{12}\text{C}$	Observaciones
SF-5	calcita	-18.62	-4.76	Sta María, vns cla + qz
SF-12	calcita	-12.82	-5.91	Sta María, vns cal + qz
SF22-06	calcita	-16.78	-4.09	Vns con calcita-barita
SF27-06	calcita	-23.67	-8.07	Veta Esmeralda
SF-29-06	calcita	-14.12	-4.03	Veta Moctezuma

Tabla 3.- Isótopos de oxígeno y carbono.

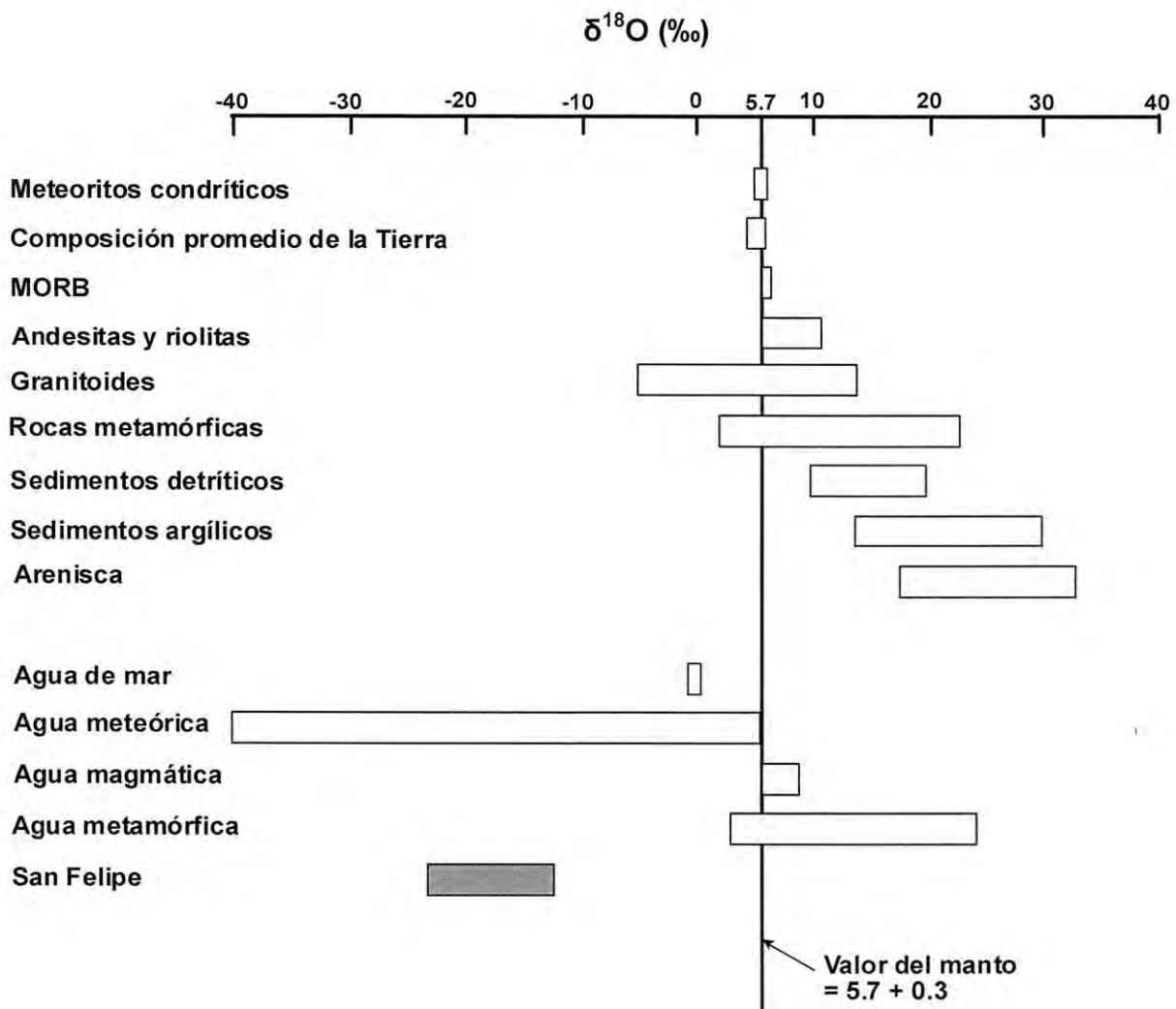


Figura 15.- Reservorios naturales para isótopos de oxígeno. Los valores de isótopos estables de oxígeno, se presentan en un rango de -12.82 a -23.67 $\delta^{18}\text{O}$ ‰. Tomado de Rollinson (1993).

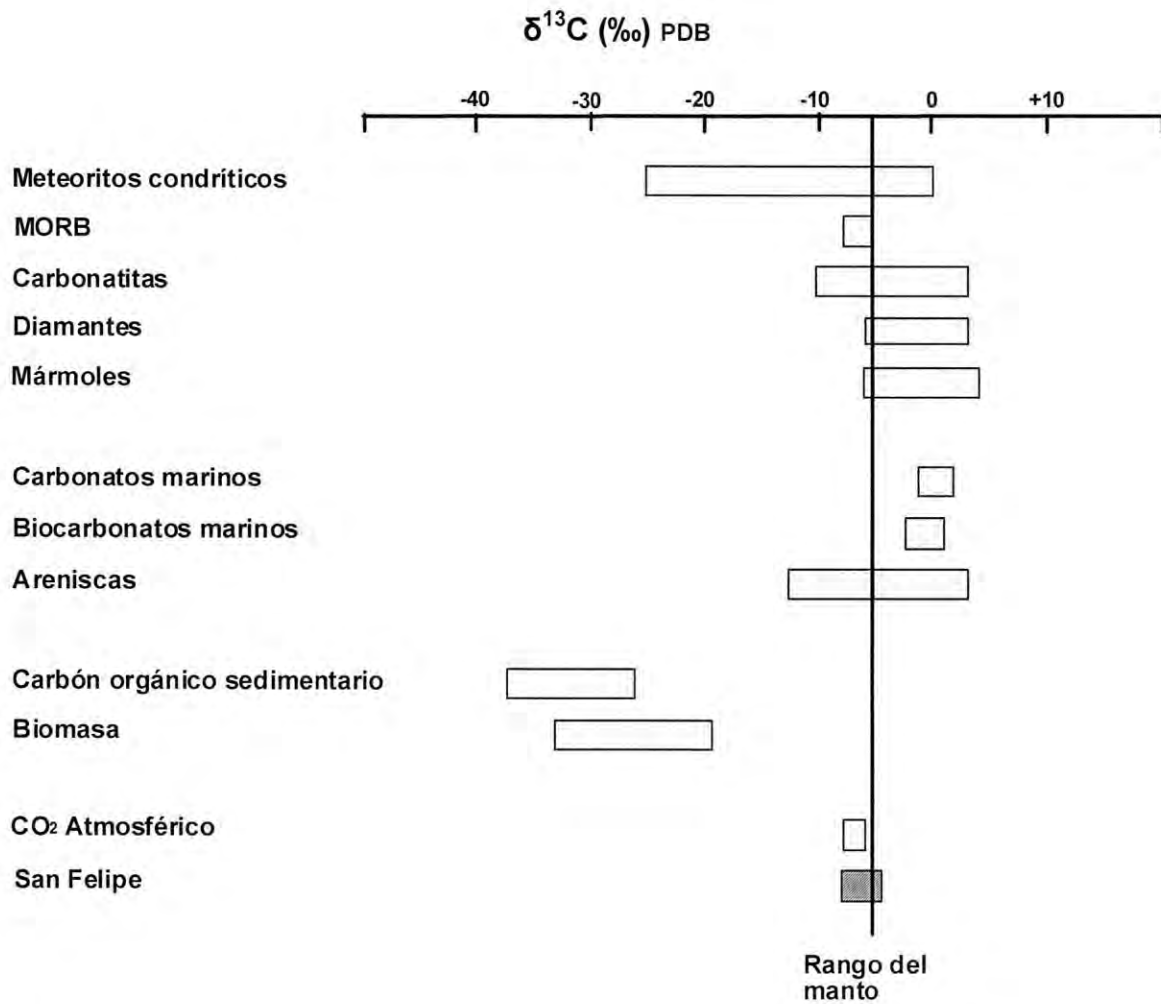


Figura 16.- Reservorios naturales para isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$). Los valores de isótopos estables de carbono, se presentan en un rango de -4.03 a -8.07 $\delta^{13}\text{C}$ ‰. Tomado de Rollinson (1993).

VIII.- GEOQUIMICA

En este capítulo se hablará de 4 secuencias de rocas en el distrito de San Felipe, las cuáles fueron cartografiadas. Solamente la secuencia de basalto no se describió en capítulos anteriores debido a que solamente se tomó una muestra en campo. En total, se tomaron y analizaron 12 muestras de rocas volcánicas dentro de las secuencias definidas como: basalto (1), andesitas-latita (4); riolitas-dacita (2) y riolitas (ignimbritas) (5); su localización se presenta en la Figura 8, donde se observa que los datos fueron estratégicamente tomados en tres secciones estratigráficas medidas, las cuáles fueron divididas en cuatro unidades perfectamente diferenciables en el campo denominadas en orden cronológico de abajo hacia arriba como: Basalto, andesitas-latita; riolitas-dacita y riolitas (ignimbritas).

Cabe señalar que la mayoría de las muestras se encuentran alteradas, lo cuál se refleja en los análisis geoquímicos como en el caso del LOI.

En las Tablas 4 y 5, se tiene la composición geoquímica de las rocas investigadas (elementos mayores, trazas y REE).

Roca	Basalto	Andesitas-latita				Riolitas-dacita		Ignimbritas				
Muestra	81	87	88	91	92	84	98	69	96	101	SM-5	65
SiO ₂	45.82	59.86	58.52	58.11	59.3	66.58	68.34	71.07	72.96	76.16	71.14	75.8
TiO ₂	1.14	0.65	0.81	0.62	0.7	0.59	0.11	0.05	0.16	0.06	0.07	0.1
Al ₂ O ₃	14.38	16.74	17.39	15.66	15.58	14.8	10.55	12.12	12.32	11.65	12.34	10.55
Fe ₂ O ₃	9.97	3.48	5.33	4.17	5.01	3.47	2.01	1.35	3.36	1.45	1.96	1.78
FeO	0.96	0.38	0.76	0.32	0.58	1.28	0.13	0.77	0.32	0.26	1.02	0.13
MnO	0.06	0.04	0.07	0.07	0.1	0.05	0.02	0.01	0.05	0.02	0.02	0.02
MgO	8.96	2.11	2.34	1.64	2.28	1.64	0.44	0.13	0.1	0.14	0.1	0.15
CaO	7.66	4.07	5.06	4.82	5.65	1.99	3.09	0.91	0.83	0.87	0.97	0.4
Na ₂ O	2.17	4.03	4.04	2.76	2.95	2.57	1.58	3.72	2.26	3.33	3.3	1.2
K ₂ O	0.92	2.67	1.93	4.11	2.96	2.97	1.25	2.54	5.78	3.75	4.08	6.43
P ₂ O ₅	0.4	0.24	0.21	0.17	0.19	0.22	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	0.05
LOI	6.41	4.28	2.25	5.77	3.59	3.62	11.2	6.08	0.85	1.02	4.47	1.52
Total	98.2	98.42	98.17	98.13	98.52	98.72	98.96	98.11	98.94	98.58	98.65	98.1

Tabla 4.- Composición geoquímica de las rocas volcánicas investigadas, mostrando los valores de elementos mayores. LOI = pérdida por calcinación.

Roca	Basalto	Andesitas-latita				Riolitas-dacita		Ignimbritas				
Muestra	81	87	88	91	92	84	98	69	96	101	SM-5	65
Ag	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ba	1160	1380	1280	1515	1245	1440	1380	1040	1945	1160	1625	890
Ce	87.1	75.9	43.8	58.6	56.6	57.5	69.1	62.2	78.4	61.4	94.9	72.3
Co	43.5	9.2	11.4	10.2	12.6	8.7	0.6	1	0.7	1.2	0.6	0.6
Cr	590	10	50	70	50	20	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Cs	1.9	5.2	3.5	9.6	4.7	5.7	81.1	10.2	4.9	3	16.6	11.8
Cu	18	9	7	5	10	11	7	5	9	7	13	9
Dy	3.8	2.6	2.9	2.6	2.8	2.1	6.9	6.1	8.5	6	9.9	6.6
Er	2	1.3	1.7	1.5	1.5	1.1	4.2	3.9	5.2	3.8	6.3	4.4
Eu	2.3	1.2	0.9	0.4	1.5	2.9	1.4	1.5	1.3	0.4	1.1	0.4
Ga	19	20	19	18	19	18	19	17	20	17	24	20
Gd	7.3	4.8	4.2	3.9	3.9	3.5	7.2	6.5	8.6	6.5	10.6	7
Hf	4	5	4	5	5	5	7	5	8	5	9	8
Ho	0.7	0.4	0.6	0.4	0.5	0.3	1.4	1.3	1.8	1.4	2.1	1.4
La	39.4	37.2	20.3	28.6	27.7	27.2	33.3	29	31.9	29.5	45.1	38.1
Lu	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.5	0.5	0.7	0.6	0.8	0.6
Mo	<2	<2	<2	<2	<2	5	<2	2	2	<2	3	<2
Nb	8	8	7	8	7	6	12	7	13	7	17	14
Nd	44.2	34.9	22.2	26.9	26.5	27.4	34.5	28.1	35.7	29.5	49.3	43.7
Ni	300	13	18	30	18	16	5	7	6	6	8	5
Pb	9	6	7	8	10	<5	<5	9	7	9	21	7
Pr	11.4	9.6	5.7	7.3	7.1	7.4	8.9	7.5	9	7.6	12.8	10.8
Rb	11.3	88.6	61.9	154.5	98.8	135	119	194.5	199.5	134	201	288
Sm	8.3	5.4	4.3	4.8	5.3	4.6	7.7	6	8.3	6	10.4	7.4
Sn	1	<1	1	1	1	<1	3	4	3	3	4	3
Sr	1120	978	785	479	637	659	1725	64.7	109.5	61.5	133	162
Ta	<0.5	0.5	<0.5	0.5	0.5	<0.5	0.9	0.7	0.9	0.6	1.2	0.9
Tb	0.9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	1.2	1.1	1.5	1.1	1.7	1.1
Th	4	6	4	7	7	4	8	11	9	11	11	9
Tl	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.5	0.5	0.8	1.3	0.7	<0.5	0.6	1.2
Tm	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.5	0.6	0.8	0.6	0.9	0.6
U	1.4	1.5	1.3	2.2	2.1	1.2	3	3.9	3.8	3.6	3.9	3.8
V	234	66	158	82	120	55	7	6	10	10	8	<5
W	<1	1	<1	1	1	5	<1	1	1	1	1	<1
Y	21.5	15	17.4	14.8	16.2	11.6	40.7	39.5	54.1	44.3	63.9	42.9
Yb	1.6	1.1	1.5	1.3	1.3	0.9	3.8	3.7	5	3.6	5.6	4.4
Zn	102	74	59	73	71	53	112	58	92	50	140	70
Zr	167.5	192	149	178	160	157	258	140.5	347	138	315	288

Tabla 5.- Composición geoquímica de las rocas volcánicas investigadas, mostrando los valores de elementos trazas y REE (en ppm), analizados por ICP-MS en Chemex Lab.

Las 4 secuencias, fueron graficadas en la Figura 17 utilizando el diagrama de TAS de Le Bas et al. (1986). A este diagrama se le ha incorporado a través de los años la línea de discriminación del dominio magmático alcalino a subalcalino de Irvine y Baragar (1971), la cuál es la mayormente aceptada y válida para la discriminación en este tipo de estudios. El diagrama de TAS sirve para clasificar y nombrar las rocas volcánicas desde un enfoque geoquímico y que, de forma modal, son difíciles de clasificar. En este caso, se graficaron los principales grupos de rocas del distrito de San Felipe (basalto, andesitas-latita, riolitas-dacita y riolitas (ignimbritas)) y se observa que caen en el dominio subalcalino, por debajo de la línea de Irvine y Baragar (1971) y se reparten en los campos 2, 4, 5, 6 y 9. Específicamente el campo 9, incluye las muestras SFG-87 y SFG-91, las cuales al aplicar la base del criterio secundario del TAS que incluyen el discriminante $[Na_2O - 2.0 \leq K_2O]$, clasifican a estas dos rocas como del tipo latita (Figura 17).

La distribución de las muestras en el diagrama (Figura 17), trazan una línea semiparalela a la línea de Irvine y Baragar (1971), la cuál parece seguir un control evolutivo simple por cristalización fraccionada; salvo las muestras SFG-98 (riolitas-dacita) y SFG-81 (basalto), las muestras restantes marcan una cierta tendencia a enriquecerse en SiO_2 proporcionalmente al ser más ricas en álcalis. Analizando esto en términos de edades, las secuencias de rocas volcánicas de ~9 Ma (andesitas-latita y riolitas-dacita) tienden a ser menos enriquecidas en SiO_2 al ser menos ricas en álcalis, a diferencia de la secuencia de ignimbritas de ~6 Ma, que tienden a enriquecerse en SiO_2 al ser más ricas en álcalis.

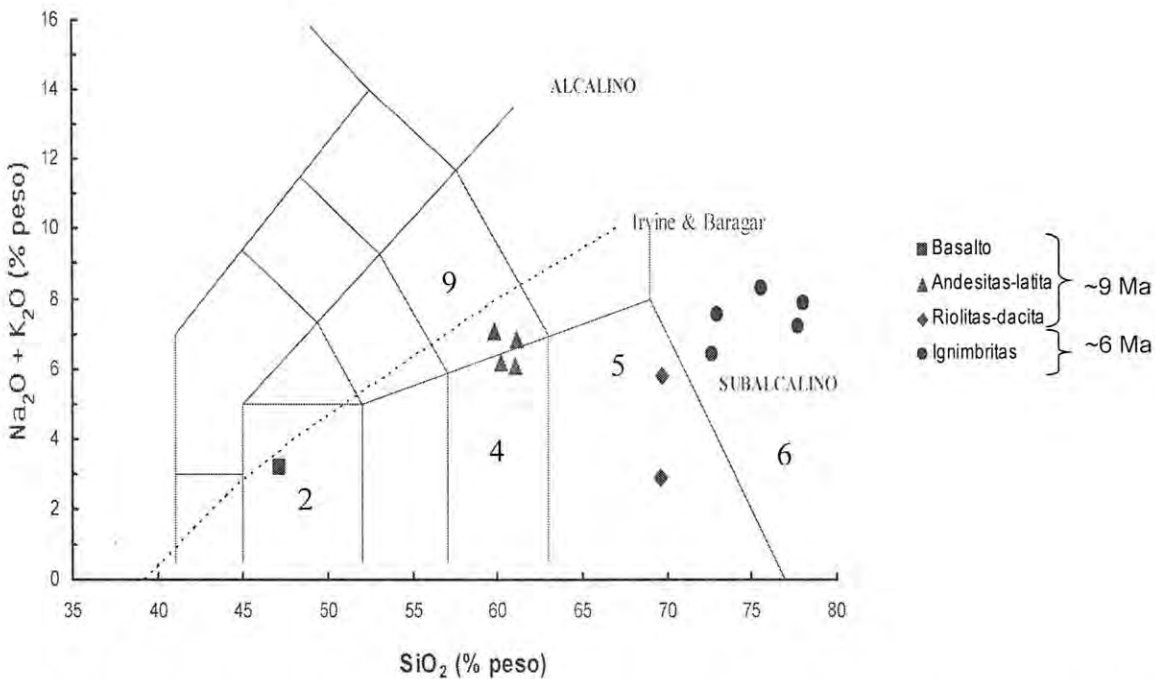


Figura 17.- Diagrama TAS de Le Bas et al. (1986) (álcalis totales vs SiO_2). Incluye las cuatro secuencias de rocas principales en el distrito de San Felipe. 2) basalto; 4) andesita, 5) dacita, 6) riolita, 9) traquiandesita.

Los diagramas de variación tipo Harker, presentan los óxidos mayores en función de la sílice separando claramente las 4 secuencias que aparecen en el diagrama de TAS. Los patrones que presentan los óxidos de Ti, Fe_2O_3 , Mg y Ca, son firmas primarias, no hay removilización de estos elementos. También se observa que la secuencia de ignimbritas de ~6 Ma son más enriquecidas en sílice que las otras secuencias. Para los patrones que presentan los óxidos de Na, K, P, Al, Mn y FeO, si presentan una movilización lo cuál es de esperar considerando el contexto geológico (Figuras 18 y 19).

Para mostrar más claramente las diferencias químicas entre estos 2 grupos, se emplean los diagramas de variación que hacen intervenir los álcalis. El diagrama $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de Peccerillo y Taylor (1976), separa las rocas de acuerdo en su variación en sílice, sin embargo no se muestra una diferencia entre calcoalcalino y alto calcoalcalino (Figura 20).

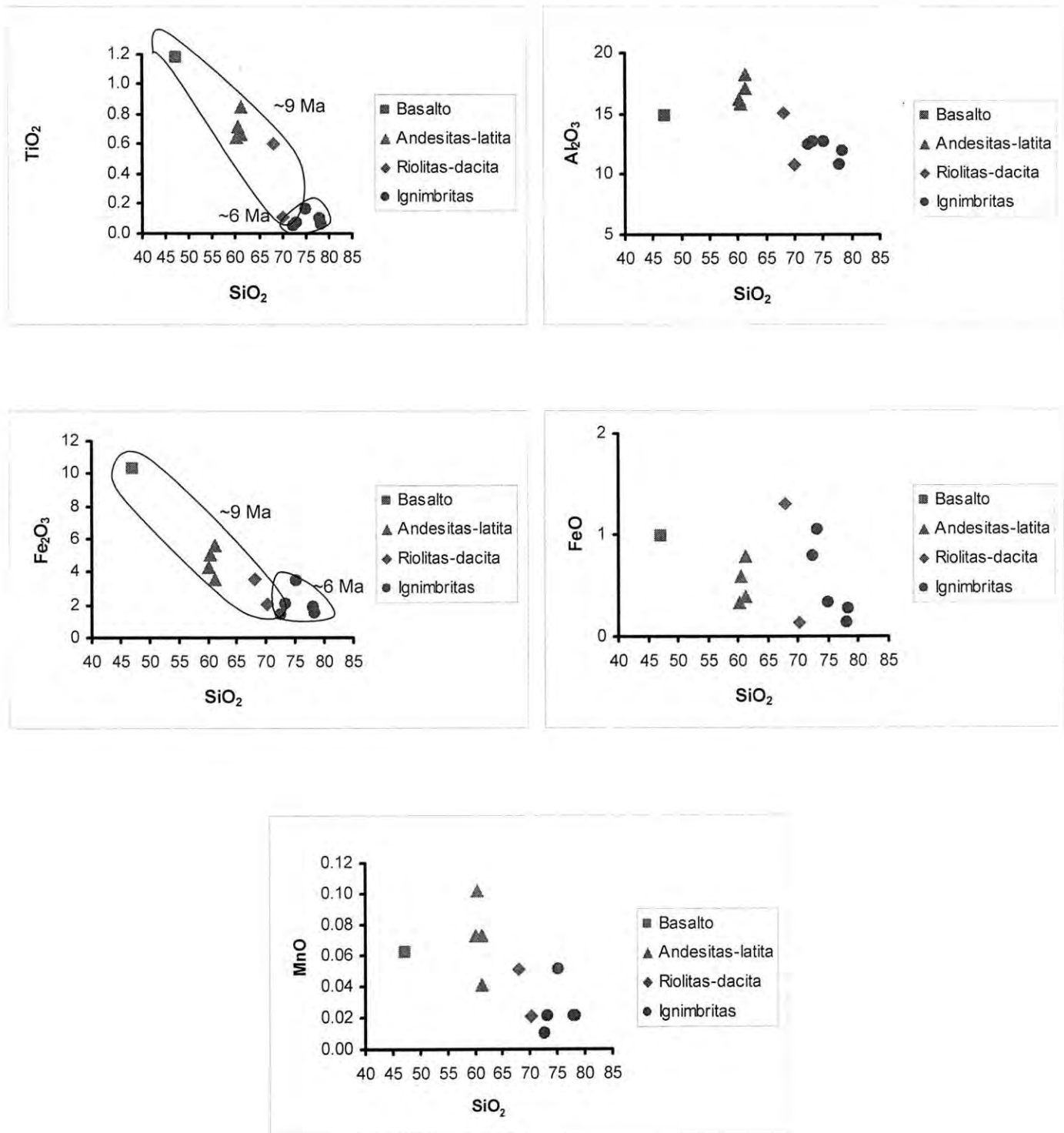


Figura 18.- Diagramas tipo Harker de los óxidos mayores (Ti, Al, Fe y Mn) contra SiO_2 donde se incluyen las cuatro secuencias de rocas cartografiadas en el distrito minero de San Felipe.

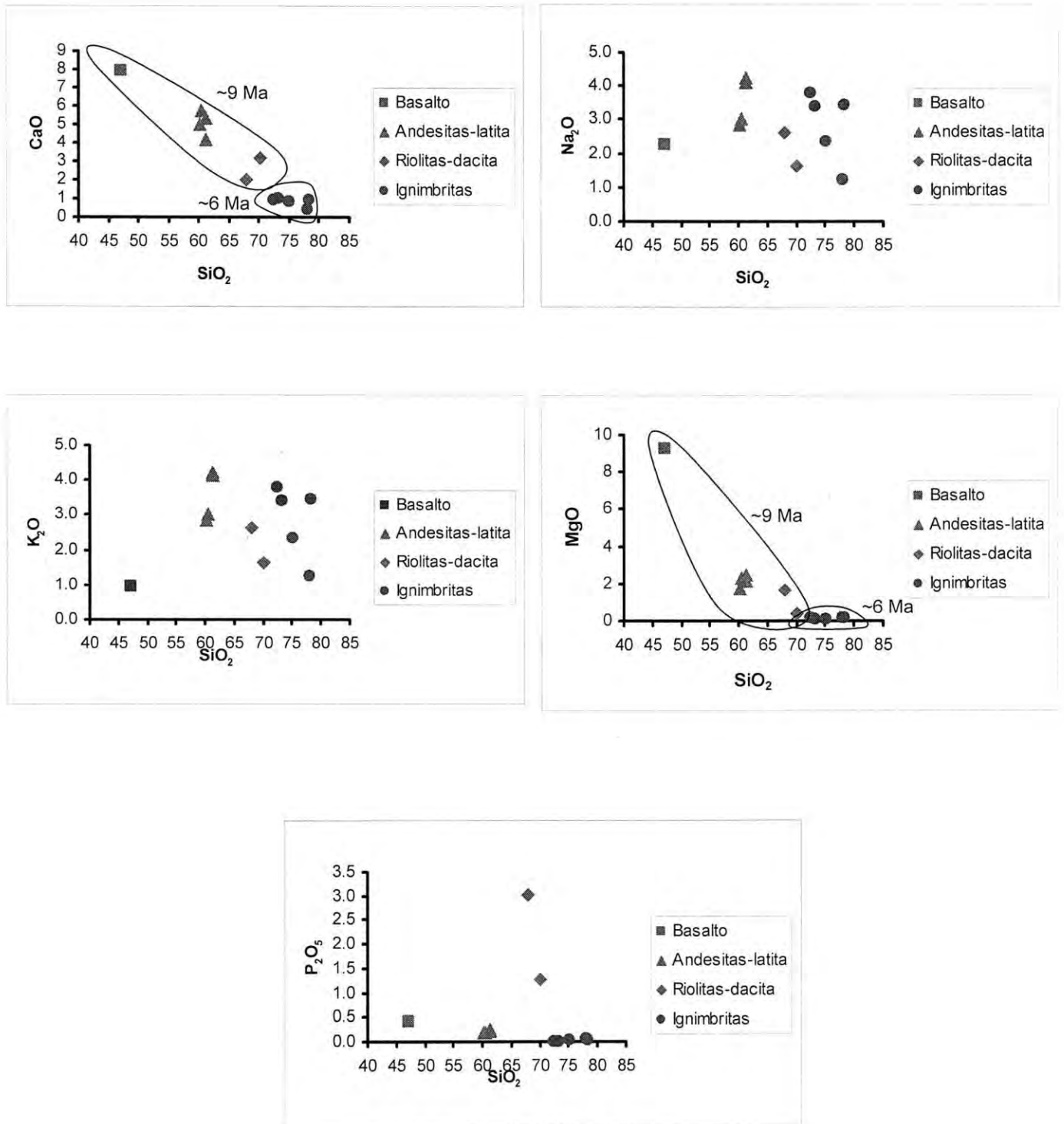


Figura 19.- Diagramas tipo Harker de los óxidos mayores (Ca, Na, K, Mg y P) contra SiO_2 donde se incluyen las cuatro secuencias de rocas cartografiadas en el distrito minero de San Felipe.

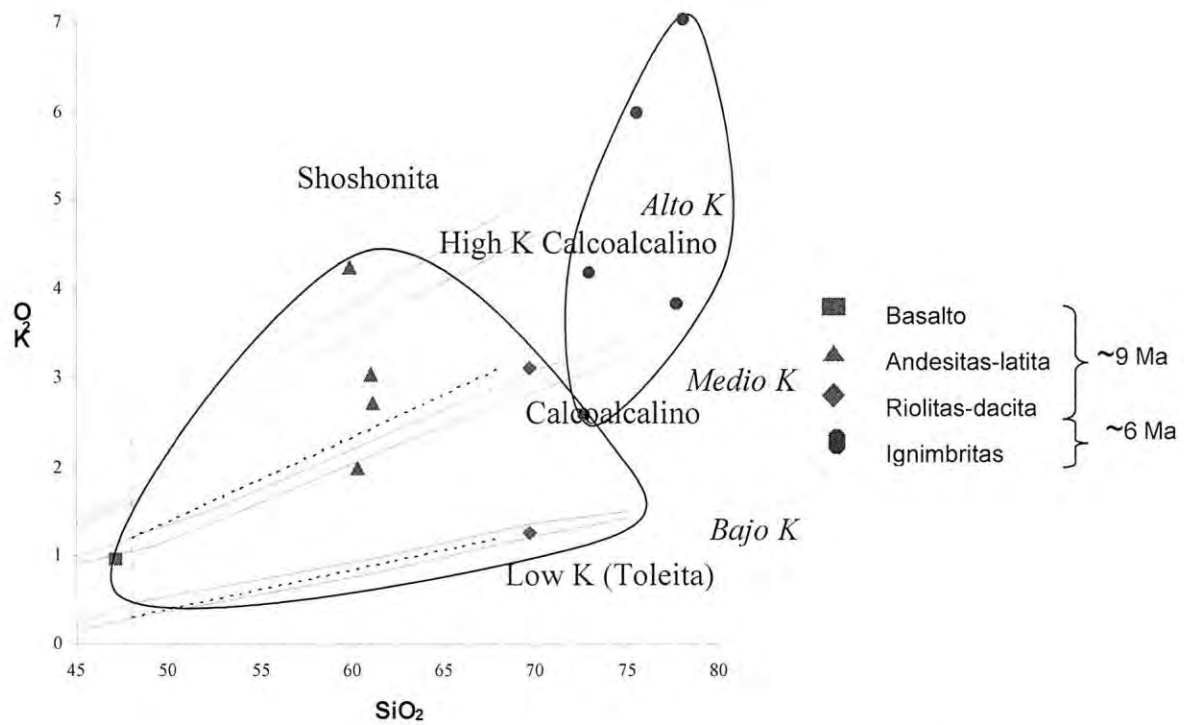


Figura 20.- Diagrama de K₂O vs SiO₂ de Peccerillo y Taylor (1976, modificado), que subdivide las rocas subcalcinas, para las secuencias de rocas principales en el distrito de San Felipe.

En la Figura 21, el diagrama de $[\text{SiO}_2/(\text{FeO}_t/\text{MgO})]$ de Miyashiro (1974), permite precisar el carácter predominantemente calcoalcalino para estas rocas, con excepción de la secuencia de ignimbritas, ya que su relación de $(\text{FeO}_t/\text{MgO})$, oscila entre 11 y 34, por lo que no se incluye en esta figura.

En el diagrama de discriminación tectonomagmática Hf/3-Th-Ta para basaltos y rocas más diferenciadas según Wood et al., (1980), se observa que las secuencias de rocas principales en el distrito minero de San Felipe (basalto, andesitas-latita, riolitas-dacita y riolitas (ignimbritas)); caen en el campo de basaltos de placa en destrucción (Figura 22).

Los diagramas de multielementos permiten visualizar rápidamente y en conjunto un gran número de elementos químicos, principalmente en trazas que ayudan a comparar sus comportamientos entre las distintas secuencias. En la Figura 23, se presenta el diagrama multielementos normalizado a condrita de Sun y McDonough (1989) el cuál presenta un arreglo espectral relativamente uniforme. Las firmas geoquímicas de los elementos traza indican una clara zona de subducción (específicamente por las anomalías negativas en Nb-Ta), sin embargo, no se observan firmas bimodales para hablar de una distensión o rift aunque el patrón parecido a intraplaca de los elementos incompatibles y la anomalía de Nb-Ta, son los que definen la apertura.

Para el caso de la secuencia de rocas andesitas-latita, la muestra SFG-88 es la menos enriquecida y se ubica en la base del arreglo, las 4 muestras presentan anomalías negativas acentuadas en Nb, Ta, Nd y Eu y una marcada anomalía positiva en K y Sr. La muestra SFG-81 (basalto), muestra un arreglo espectral parecido al de la secuencia de andesitas-latita.

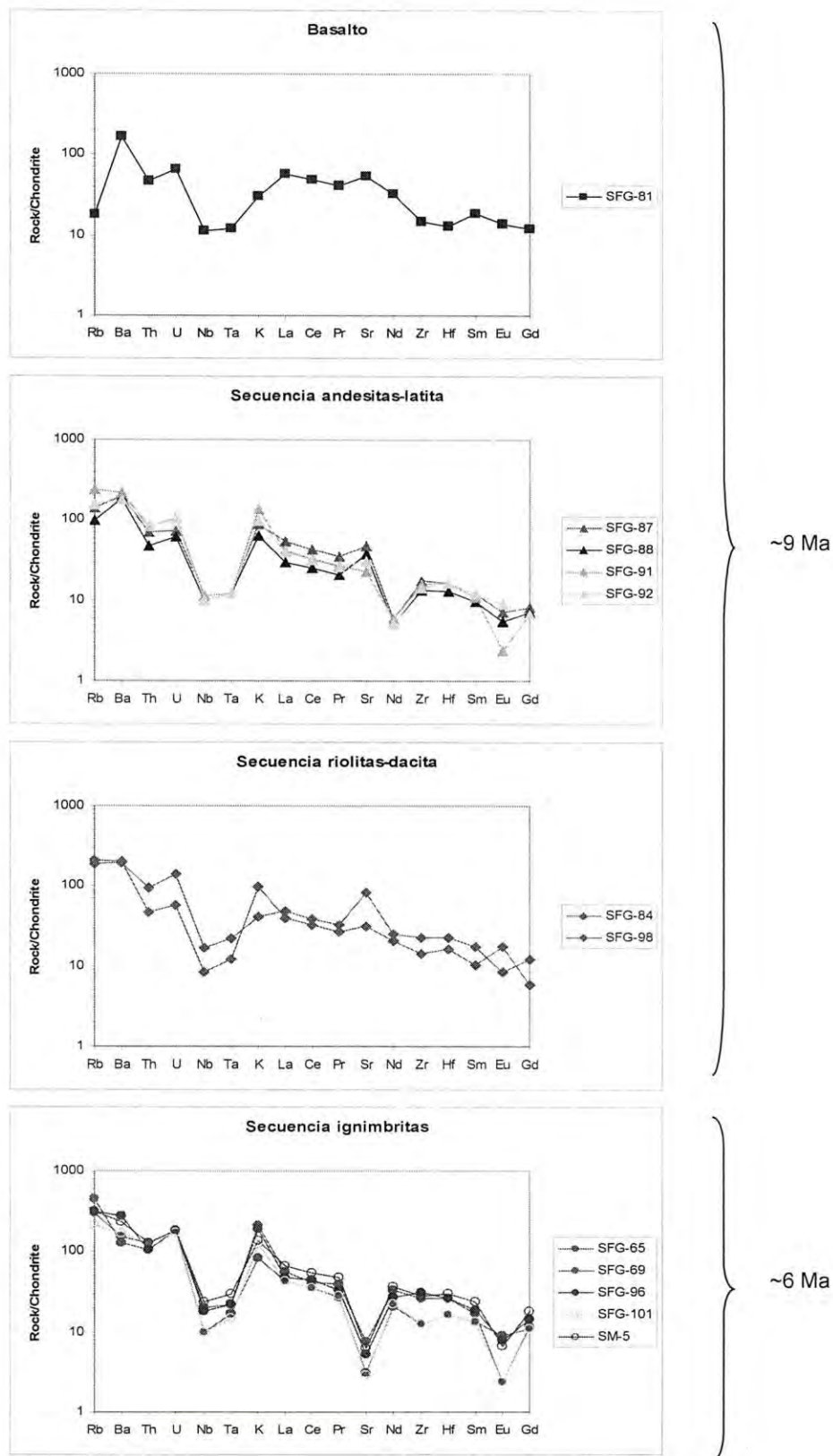


Figura 23.- Diagrama multielementos para las rocas volcánicas del distrito minero de San Felipe (Sun y McDonough, 1989, condrita).

En el caso del espectro de la secuencia de riolitas-dacita, la muestra SFG-84 es la menos enriquecida y se ubica en la base del arreglo, las 2 muestras presentan anomalías negativas acentuadas en Nb y Ta así como una muy marcada anomalía positiva en U, K y Sr. La muestra SFG-84, muestra una anomalía positiva en Eu, mientras que en la muestra SFP-98, la anomalía en Eu es negativa.

El espectro de la secuencia de riolitas (ignimbritas), la muestra SFG-101 es la menos enriquecida, las 5 muestras presentan anomalías negativas muy marcadas en Nb, Ta, Sr y Eu, así como una anomalía positiva en K.

El diagrama de tierras raras (REE) en la Figura 24, normalizado a manto primitivo según McDonough et al., (1991), muestra los espectros para las secuencias de rocas principales en el distrito minero de San Felipe (basalto, andesitas-latita, riolitas-dacita y riolitas (ignimbritas)). En todas las secuencias, se presenta un espectro con una pendiente similar en tierras raras ligeras (La-Sm) y tienden a ser menos fuertes o hasta horizontales para las tierras raras pesadas (Gd-Lu).

Las muestras SFG-84 y SFG-98 de la secuencia de riolitas-dacita, se comporta más como del tipo de andesitas-latita, lo que podría indicar posiblemente una evolución genética muy cercana entre estas dos unidades (Figura 24).

La anomalía negativa en Eu es característica de todas las secuencias, lo que nos indica una ausencia de plagioclasa en la fuente.

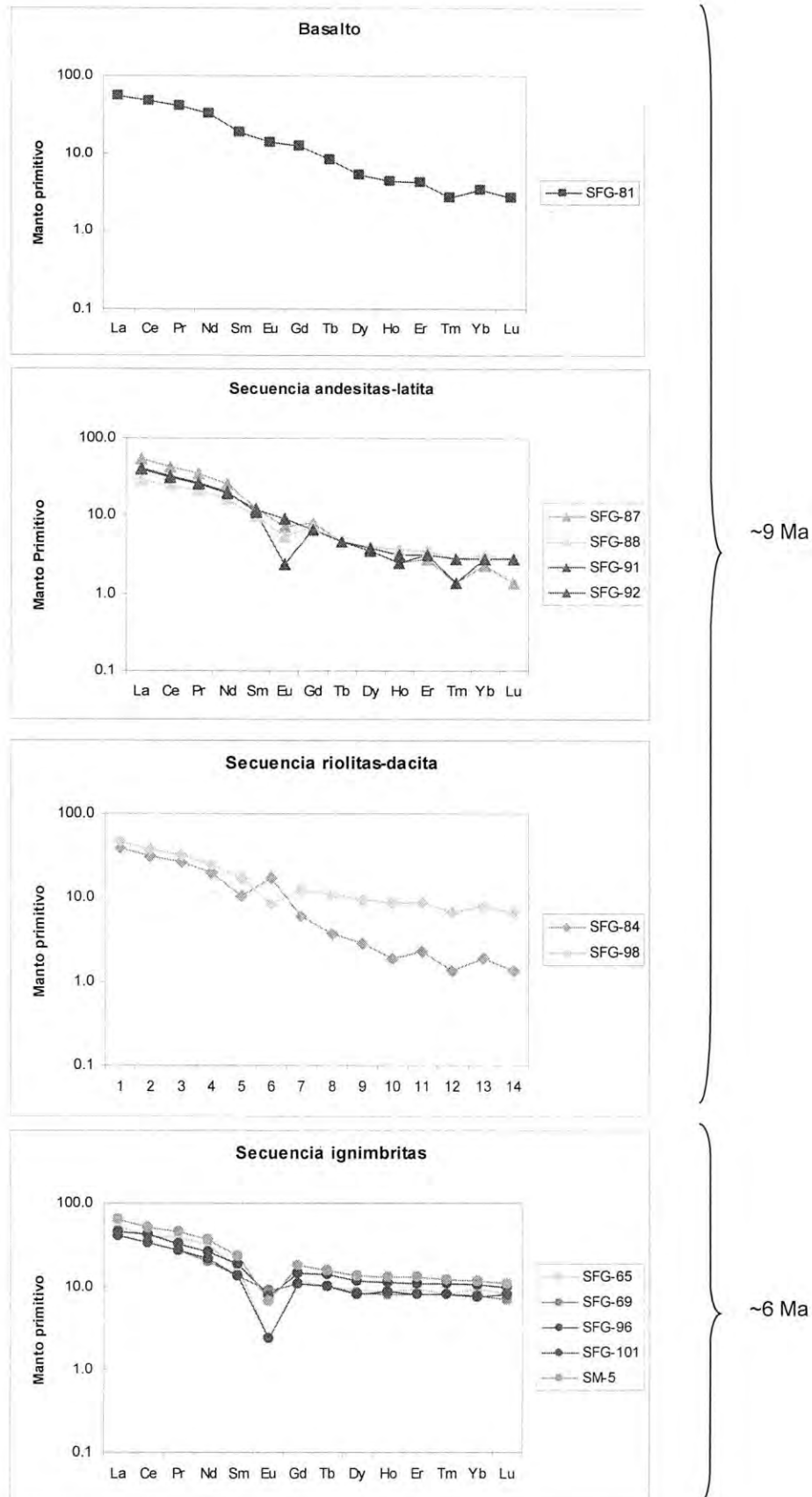


Figura 24.- Diagrama de tierras raras (REE), de las rocas volcánicas del distrito minero de San Felipe (McDonough et al, 1991, manto primitivo).

IX.- EDADES RADIOMÉTRICAS

Para el estudio geocronológico por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, se analizaron 2 muestras de la secuencia de rocas volcánicas, en un espectrómetro de masas tipo MS-10, siguiendo la metodología del Laboratorio de Geocronología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) que se encuentra a cargo de la Dra. Margarita López Martínez.

Basado en características como petrología, estratigrafía y petrografía, la secuencia de rocas volcánicas en el distrito de San Felipe fue dividida en cuatro secuencias denominadas como: 1) basalto; 2) andesitas-latita; 3) riolitas-dacita y 4) riolitas (ignimbritas). Aunque las cuatro secuencias presentan una firma calcoalcalina, ellas pueden ser perfectamente diferenciadas en los diagramas TAS, de variación tipo Harker, discriminatorios de ambientes tectónicos y aún en los diagramas de REE (Figuras 17, 18 y 22 respectivamente), los cuales nos obliga a pensar en un ambiente de transición entre lo que es la etapa de subducción para las unidades 1, 2 y una época de transición durante la etapa extensional anterior a la real apertura del Golfo de California.

La secuencia de andesitas-latita, tiene una amplia distribución dentro del distrito y aún a nivel más regional, está formado por una secuencia de más de 500 m de espesor y está conformada por una gran proporción de rocas piroclásticas y aglomerados y menor contenido de flujos, regularmente delgados e interestratificados dentro de la secuencia piroclástica. Se tomó una muestra para ser fechada por el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en la matriz del flujo interestratificado señalado con la muestra SFP-91, y ubicada dentro de una secuencia de aglomerados en la sección estratigráfica medida denominada

Santa María (Figura 6). Muy probablemente esta muestra corresponda a las partes superiores de esta secuencia, lo que marcaría una edad tardía durante su formación o la casi culminación de este tipo de vulcanismo. La Figura 25, muestra una edad plataforma ("plateau age") con una edad de 9.6 ± 1.0 Ma.

Una segunda muestra fue recolectada en la parte inferior de la secuencia ignimbrítica, dentro de un vitrófido ubicado en la columna estratigráfica de Santa María (Figura 6) y representa la base de la secuencia de ignimbritas. Para esta muestra se fecharon tanto los fenocristales de sanidina como la matriz vítrea (Figura 26), las dos mesetas, las cuales dan edades de ~12 y 5.7 Ma respectivamente. Una interpretación para estas dos edades en la misma muestra se pueda deber a que los fenocristales hayan sido heredados de las rocas inferiores dentro de la secuencia estratigráfica (grupo 2, de andesitas-latita) y puestos dentro de una roca rápidamente enfriada como sucede con esta unidad de vidrio.

Lo que si es claro es que los dos rangos de edades han sido registrados en esta región por diferentes autores en una serie de artículos, dentro de los cuáles destacan los siguientes:

Gastil et al. (1979), asignaron edades a rocas volcánicas calcoalcalinas (andesíticas y dacíticas) en Sierra Pinta de ca. 9 Ma.

Stock (1989 y 1993), asigna edades de 6.47 y 5.8 Ma a andesitas y riolitas fluidales respectivamente, así como edades de 10.85 y 12.7 Ma para tobas y basaltos respectivamente; esto en el sur de Valle Chico, ubicado al lado de la sierra San Felipe.

Martín-Barajas et al. (1995), asignan una edad de 6.44 Ma para una muestra fechada con $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en sanidina al noreste de la Provincia Volcánica de Puertecitos.

Stock et al. (1999), reportan la edad de la toba San Felipe de ~12.6 Ma, autores como Lewis y Nagy han usado diferentes técnicas para sus dataciones sobre la misma toba, pero ambos han arrojado edades similares de 12 Ma para sus muestras recolectadas en Sierra San Fermín y Santa Isabel respectivamente.

En otra región, Sonora, Vidal-Solano et al. (2007), reporta localidades con afloramientos de ignimbritas hiperalcalinas en Sonora central y parte de la costa de la Baja California, todas ellas con edades de ~12 Ma, como en el caso del cerro Las Cuevitas en los alrededores de Hermosillo, con una edad de 12.44 Ma fechada sobre estas ignimbritas.

Paz-Moreno (1992), reportó una edad de 11.87 Ma sobre ignimbritas hiperalcalinas, en el cerro Ventanas, en la región de El Gavilán, Sonora Central.

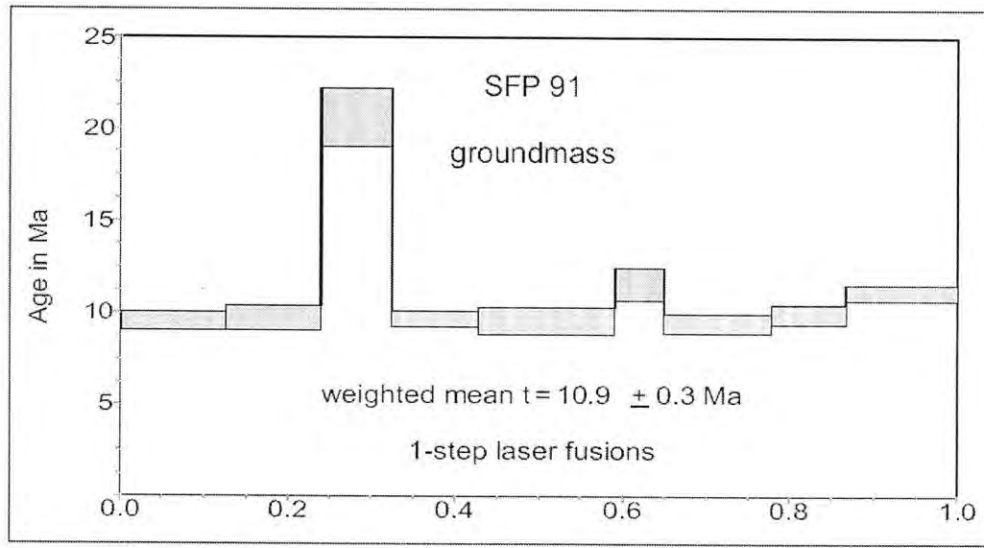


Figura 25.- Edad geocronológica de la secuencia andesitas-latita (SFP-91).

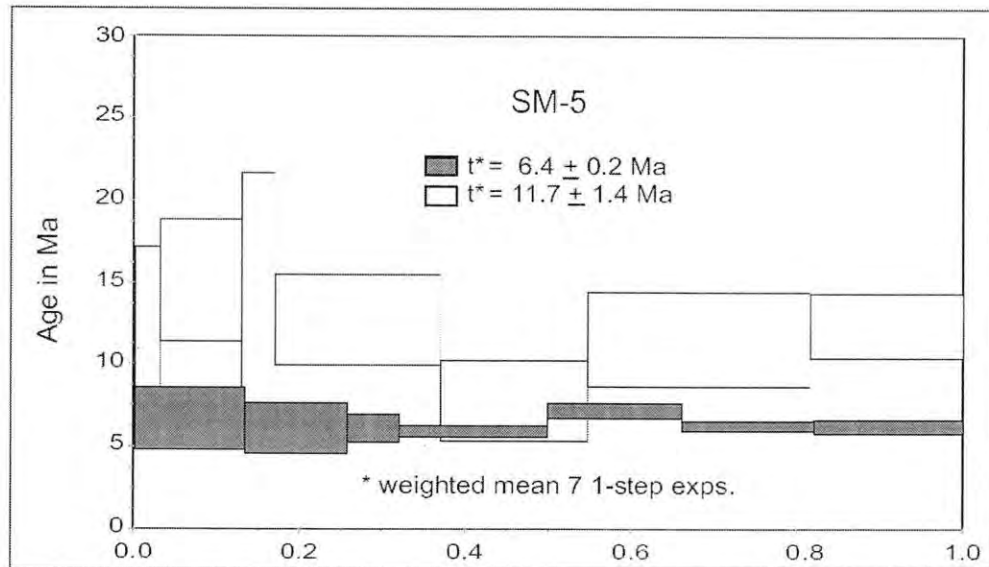


Figura 26.- Edad geocronológica de la secuencia de riolitas (ignimbrita) (vidrio volcánico y fenocristales de sanidina), SM-5.

X.- DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los datos obtenidos en este estudio marcan un escenario geológico-tectónico dentro de un marco transicional entre una zona de subducción y un régimen de extensión durante la apertura del Golfo de California, que inicia hace aproximadamente 12 Ma (Protogolfo) y se extiende hasta cerca de 5 a 3.5 Ma donde inicia la real apertura del Golfo.

Antes de 12 Ma, se depositan un importante volumen de rocas volcánicas de composición andesitas-latita compuestas de piroclastos y flujos que se presentan en gran parte de esta región del norte de Baja California y denominadas como rocas de arco volcánico (Martín-Barajas et al., 1995). A los 12 Ma irrumpe en este escenario geológico una serie de eventos explosivos del tipo ignimbrítico conocido como la toba San Felipe, la cual tiene una amplia distribución y se perfila en tiempo y espacio como relacionado al inicio de la apertura del Golfo de California (Stock et. al., 1999).

Dentro del distrito se tienen el desarrollo de cuerpos brechoides, los cuales han sido llamados como brecha Santa Cruz y Santa María, componiéndose de una serie de cuerpos de brechas freatomagmáticas alojadas en cuerpos tabulares en forma de diques y direcciones NNE-SSW, los cuales se encuentran dentro de un sistema que evolucionó a partir de cuerpos intrusivos poco profundos interactuando con niveles freáticos superficiales, desarrollando brechas de explosión tipo ignimbrítico como sucede en la brecha Santa Cruz (unidades II, III, IV y V) y Santa María (unidades Tb1, Tb2 y Tb3), seguido con la extrusión de flujos riolíticos y su desarrollo de cuerpos tipo *surger*, como sucede en la brecha Santa María (unidades Tb4, Tb5 y Trb, Tr). La evolución de las dos brechas culmina con la introducción de brechas de

inyección, compuestas de material de rocas metamórficas paleozoicas y volcánicas, sostenidas dentro de un matriz de material magmático-volcánico (fuente). Esta etapa culminante extrusiva, trae consigo mineralización del tipo Pb, Zn (Au, Cu) y muy relacionada a cuerpos de brecha de inyección.

Edades de ~9 Ma en la parte superior de la secuencia de andesitas-latita y de aproximadamente 5 Ma en la base de ignimbritas, en conjunto con observaciones de campo y datos geoquímicos, sugieren que la formación de estas brechas son el preludio de la formación del evento ignimbrítico sucedido en esta región hace ~6 Ma, lo cual se ubica dentro de la época extensional del Golfo de California. Datos de isótopos estables de S, C y O, señalan una fuente de azufre volcánico, probablemente como H₂S como compuesto de azufre mas activo, interacción de agua meteórica, como lo testifican los valores muy negativo de $\delta^{18}\text{O}$ e inclusión de carbón magmático, lo que lo encuadran dentro de un ambiente volcánico-magmático.

La brecha Santa Cruz, es de forma irregular, formada en parte inferior por brechas de flujo (brecha I), con depósito de brecha explosivas y en parte colapsadas (brechas II y III) y material piroclástico depositado en zonas ligeramente húmedas y en estado semiplástico como lo atestiguan las estructuras de aplastamiento (brechas IV y V). La parte oeste de la brecha es la que presenta alteración hidrotermal, compuesta principalmente de silicificación con una intensidad moderada, acompañada de óxidos de hierro en fracturas unidireccionales, asociada a una serie de estructuras NNE-SSW y N-S, y fracturas tardía rellenas de barita, calcita y cuarzo. Detalle en el barreno BDF-20003, denota la presencia de una serie de intervalos de brecha de carácter muy probablemente explosiva, con clastos claros de rocas volcánicas riolíticas,

cementadas con material en parte oscuro, formado de clastos metamórficos y vidrio volcánico y rocas vítreas, semejando en parte material juvenil.

Generalmente, estos intervalos se encuentran acompañados de sulfuros (esfalerita + calcopirita + galena + pirita). Este tipo de brecha ocurre muy frecuentemente en el distrito, dentro y cerca de las brechas de Santa Cruz y Santa María, principalmente alojadas en estructuras unidireccionales N-S y NNE-SSW, a las cuales los geólogos de San Felipe las han denominado brechas de inyección. Este tipo de estructuras parecen ser producto de mecanismos freatomagmáticos, compuestas de brechas de explosión con contenido de material oscuro y presencia de sulfuros, con moderada introducción de sílice. Es muy probable que este tipo de estructuras brechoideas sean tardías y corten regularmente a la secuencia volcánica piroclástica que compone a estas dos estructuras denominadas Santa Cruz y Santa María.

La brecha Santa María, lejos de tener una forma cercana a lo elíptico, es más bien alargada en sentido este-oeste. Se conforma de una serie de unidades designadas de la mas antigua a la mas reciente como: Tb1, Tb2, horizonte de granófidios, Tb3, Tb4, Tb5, Trb y Tr, las cuales corresponden a una serie de eventos explosivos, los cuales parecen tener su punto de extrusión o efusión a lo largo de las estructuras N-S y NNE-SSW localizadas al oeste de la brecha Santa María, justo en el lado donde se tiene mayor alteración de esta zona.

La formación y evolución de la brecha Santa María y Santa Cruz, se ajustan muy bien a la etapa inicial de la formación de la secuencia ignimbrítica en esta zona, la cual parece haber iniciado antes de 6 Ma.

BIBLIOGRAFIA

- Angelier, J., Colleta, B., Chorowicz, J., Ortlieb, L., Rangin, C., 1981. Fault tectonics of the Baja California peninsula and the opening of the Sea of Cortez, Mexico. *J. Struct. Geol.* v. 3. pp. 347-357.
- Atwater, T., 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic evolution of western North America. *Geological Society of America Bulletin*, v. 81. pp. 3513-3536.
- Atwater, T., 1989. Plate tectonic history of northeast Pacific and western North America, in Winterer, E. L., Hussong D. M., and Decaer, R. W., (eds). *The eastern Pacific Ocean and Hawaii: Boulder, Colorado. Geological Society of America, The Geology of North America*, v. N. pp. 21-78.
- Batiza, R., 1978. Geology, petrology, and geochemistry of Isla Tortuga, a recently formed tholeiitic island in the Gulf of California. *Geological Society of American Bulletin*. Pp. 1309-1324.
- Demant, A., 1981. Plio-Quaternary volcanism of the Santa Rosalia area, Baja California, Mexico. In: Ortlieb, L., Roldan, J. (Eds.), *Geology of northwestern Mexico and southern Arizona. Geological Society of American Bulletin. Cordilleran section annual meeting. Hermosillo, Sonora, Mexico*. Pp. 295-305.
- Dickinson, W.R., Snyder, W. S., 1979. Geometry of subducted slabs related to San Andreas transform. *Journal of Geology*. v. 87. pp. 609-627.
- Elders, W.A., Rex, R.W., Meiday, T., Robinson, P.T., Biehler, S., 1972. Crustal spreading in southern California. *Science*. v. 178. pp. 15-24.
- Gastil, R.G., Phillips, R.P., Allison, E.C., 1971. Mapa de reconocimiento geológico del estado de Baja California. *Geological Society of America*.
- Gastil, R.G., Phillips, R.P., Allison, E.C., 1975. Reconnaissance geology of the State of Baja California: *Geological Society of America. Memoir 140*. pp. 170.
- Gastil, R.G., Krummenacher, D., Minch, J., 1979. The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California: *Geological Society of America Bulletin. Part I*. v. 90. pp. 839-857.
- Gastil, R.G., Morgan, G., Krummenacher, D., 1981. The tectonic history of peninsular California and adjacent Mexico. In the *Geotectonic Development of California*, ed. W. G. Ernst. Rubey. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ. v. 1. pp. 284-306.
- Gastil, R.G., Miller R., 1984. Prebatolithic Paleogeography of Peninsular California and adjacent Mexico: in Frizzell, Virgil A. Jr, *Geology of the Baja California Peninsula: Pacific section S.E.P.M.*, v. 39. pp. 9-16.

- Gastil, R.G., 1990a. "Zones plutons" of the Peninsular Range in southern and Baja California, in Shimizu, M., and Gastil, G., eds. Recent advances in concepts concerning zoned plutons in Japan and southern and Baja California. The University Museum, The University of Tokyo, Nature and Culture 2. pp. 79-90.
- Gastil R.G., 1990b. The boundary between the magnetite-series, and ilmenite-series granitic rocks in peninsular California, *in* Shimizu, M., and Gastil, G., eds. Recent advances in concepts concerning zoned plutons in Japan and southern and Baja California: The University Museum, The University of Tokyo, Nature and Culture 2. pp. 91-100.
- Gastil R.G., 1993. Prebatholithic History of Peninsular California, special paper 279, Geological Society of America. pp.145-155.
- Gerencia de exploración y geología de la compañía minera San Felipe., 2004. Geología del distrito de San Felipe.
- Halfman, S.E., Lippmann, M.J., Zelwer, R., Howard, J.H., 1984. Geologic interpretation of geothermal fluid movement in the Cerro Prieto field, Baja California, Mexico. American Association petrology Geology. Bulletin 68. pp. 18-30.
- Hamilton, W., 1971. Recognition of space photographs of structural elements of Baja California. United States Geological Survey. Prof. paper. pp. 718.
- Hausback, B.P., 1984. Cenozoic volcanism and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico. In: Fritzell, V.A. (Ed.), Geology of the Baja California Peninsula. Pacific section. S.E.P.M. Los Angeles, CA. pp. 219-236.
- Henry, C.D., Aranda-Gómez, J.J., 1992. The real southern Basin and Range: Mid- to late Cenozoic extension in Mexico: Geology. v. 20. pp. 701-704.
- Ibarra-Serrano, A., 1997. Geología y tipos de mineralización del yacimiento San Felipe. Compañía San Felipe S.A de C.V. Unidad San Felipe Mexicali, B.C. Reporte interno. pp. 10-15.
- INEGI, 2000. Síntesis de información geográfica del Estado de Sonora.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R., 1971. A guide to the chemical classification of common volcanic rocks: Canadian Journal of Earth Sciences. v. 8. pp. 523-548.
- Karig, D.E., Jansky, W., 1972. The Protogulf of California: Earth Planetary Science Letters. v. 17. pp. 169-174.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: Journal of Petrology. v. 27. pp. 745-750.

- Lewis C.J., Stock J.M., 1998. Paleomagnetic evidence of localized vertical-axis rotation during Neogene extension of the Sierra San Fermín, northeastern Baja California, Mexico. *Journal of Geophysical Research*. v. 103 (B2). pp. 2455-2470.
- Lomnitz, C., Mooser, F., Allen, C.R., Brune, J.N., Thatcher, W., 1970. Seismicity of the Gulf of California region, Mexico-preliminary results. *Geofísica Internacional*. v. 10 (2). pp. 37-48.
- Lonsdale, P., 1989. Geology and tectonic history of the Gulf of California, in Winterer, D., Hussong, M y Decker, R.W., eds., *The eastern Pacific and Hawaii*, Geological Society of America, Boulder, Co., *The Geology of North America*. V. N. pp. 499-521.
- Mammerickx, J., Klitgord, K.D., 1982. Northern East Pacific Rise: evolution from 25 m.y. B. P. to the present. *Journal Geophysical Research*. v. 87. pp. 6751-6759.
- Martín-Barajas, A., Stock, J.M., Layer, P., Hausback, B., Renee, P., López-Martínez, M., 1995. Arc-rift transition volcanism in the Puertecitos Volcanic Province, northeastern Baja California, Mexico. *Geological Society of American Bulletin*. v. 107 (4). pp. 407-424.
- Martín-Barajas, A., 2000. Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. LIII. pp. 72-83.
- McEldowney., R.C., 1970. Geology of the northern Sierra Pinta, Baja California, Mexico. M.S. Thesis, San Diego State College, San Diego, C.A. pp. 79.
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Amer. J. Sci*. v. 274. pp. 321-335.
- Moore, D.G., 1973. Plate-edge deformation and crustal growth, Gulf of California structural province. *Geological Society of American Bulletin*. V. 84. pp. 1883-1906.
- Nagy, E.A., 1997. Extensional Deformation and Volcanism within the northern Puertecitos Volcanic Province, Sierra Santa Isabel, Baja California, Mexico. PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA. pp. 363.
- Nagy E.A., Grove, M., Stock, J.M., 1999. Age and stratigraphic relationships of pre-and syn-rift volcanic deposits in the northern Puertecitos Volcanic Province, Baja California, Mexico. *Volcanology Geothermal Research*. v. 93. pp. 1-30.

- Ortega-Rivera A., 2003. Geochronological constrains on the tectonic history of the Peninsular Ranges batholith of alta and Baja California: Tectonic implications for western México. Geological Society of America. Special Paper 374. pp. 297-335.
- Paz-Moreno, F.A., 1992. Le volcanisme mio-plio-quatenaire de l'Etat du Sonora (nord-ouest du Mexique): évolution spatiale et chronologique; implications pétrogénétiques: Université Aix-Marseille III. Thèse de Doctorat. pp. 220.
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey: Contributions to Mineralogy and Petrology. v. 58. pp. 63-81.
- Rollinson, Hugh R., 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. pp. 250-271.
- Sawlan, M.G., 1991. Magmatic evolution of the Gulf of California rift, in Dauphin, J. p., and Simoneit, B. R., eds., The Gulf and Peninsular Province of the Californias. America Association of Petroleum Geologists Memoir 47. pp. 301-369.
- Sawlan, M.G., Smith, J.G., 1984. Petrologic characteristics, age and tectonic setting of Neogene volcanic rocks in northern Baja California Sur, Mexico. In: Fritzell, V.A. (Ed.), Geology of the Baja California Peninsula. Pacific section. S.E.P.M. Los Angeles, CA. Pp. 237-251.
- Sedlock R.L., 2003. Geology and tectonics of the Baja California Peninsula and adjacent areas. Geological Society of America, Special Paper 374. pp.1-42.
- Silver L.T., Taylor H.P., Chappell, B., 1979. Some petrological, geochemical, and geochronological observations of the peninsular Ranges batholith near to the international border of the USA and Mexico, in Abbot , P.L., and Todd, V.R., eds., Mesozoic crystalline rocks: geological Society of America Annual meeting Guidebook. pp. 83-110.
- Spencer, J.E., Normark, W.R., 1979. Tosco-Abreojos fault zone: a Neogene transform plate boundary within the Pacific margin of southern Baja California, Mexico. Geology 7. pp. 554-557.
- Stock, J.M., 1989. Sequence and geochronology of Miocene rocks adjacent to the main gulf escarpment: southern Valle Chico, Baja California Norte, Mexico: Geofísica Internacional. v. 8. n. 5. pp. 851-896.
- Stock, J.M., Hodges, K.V., 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate: Tectonics. v. 8. pp. 99-115.

- Stock, J.M., Hodges, K.V., 1990. Miocene to recent structural development of an extensional accommodation zone, north-eastern Baja California, Mexico. *Journal Structural Geology*. v. 12 (3). pp. 315-328.
- Stock, J.M., Martín-Barajas, A., Suárez-Vidal, F., Miller, M., 1991. Miocene to Holocene extensional tectonics and volcanic stratigraphy of NE Baja California, Mexico, in Walawender, M., and Hanan, B., eds. *Geological Excursions in southern California and Mexico*. Geological Society of America Meeting guidebook, Field trip 2. San Diego State University. pp. 44-67.
- Stock, J.M., 1993. *Geology of Southern Valle Chico and adjacent regions, Baja California, Mexico*. Geological Society of America. Map and Chart Series: MCH076.
- Stock, J.M., Martín-Barajas, A., Tellez Duarte, M., 1996. Early rift sedimentation and structure along the NE margin of Baja California. In: Abbott, P.L., Cooper, J.D. (Eds.), *American Association of Petroleum Geologists Field Conference Guide 1996*. Pacific Section S.E.P.M. v. 80. pp. 337-372.
- Stock, J.M., Lewis, C.J., Nagy, E.A., 1999. The tuff of San Felipe: an extensive Middle Miocene pyroclastic flow deposit in Baja California, Mexico. *Journal Volcanology Geothermal Research*. v. 93. pp. 53-74.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process, *in* Saunders, A.D., y Norry, M.J., eds. *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society of London Special Publications. v. 42. pp. 313-345.
- Vidal-Solano, J.R., Paz-Moreno, F.A., Demant, A., López-Martínez, M., 2007. Ignimbritas hiperalcalinas del Mioceno medio en Sonora Central: Revaluación de la estratigrafía y significado del volcanismo terciario. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. v. 24. Num. 1. pp. 47-67.
- Umhoefer, P.J., Dorsey, J.R., Renne, P.R., 1994. Tectonics of the Pliocene Loreto Basin, Baja California Sur, Mexico, and evolution of the Gulf of California. *Geology*. v. 22. Pp. 646-652.
- Umhoefer, P.J., Dorsey, J.R., 1997. Translation of terranes—Lessons from central Baja California, Mexico. *Geology*. v. 25. pp. 1007-1010.
- Wood, D.A., 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.* pp. 11-30.