

CONTROL ESTRUCTURAL DE LA MINERALIZACIÓN EPITERMAL DEL DISTRITO MANANTIAL ESPEJO, SANTA CRUZ

Horacio ECHEVESTE

Instituto de Recursos Minerales, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. La Plata.
E-mail: hecheves@inremi.unlp.edu.ar

RESUMEN

El análisis estructural del distrito minero Manantial Espejo, ha permitido plantear la existencia de al menos dos sistemas de deformación extensional frágil, activos con anterioridad a los 159 Ma (Calloviano), a los que se asocian el volcanismo riolítico y la actividad epitermal de la región. El más antiguo respondería a un esfuerzo principal σ_1 NNO-SSE que produce dos sistemas de fracturas, uno en torno a 25° y el otro en torno a 140°. Estas fracturas fueron receptivas al ascenso de magma riolítico que generó diques y a la circulación de fluidos acuosos bicarbonatados asociados a la presencia de un sistema tipo *hot spring* que formó vetas de calcita y depósitos de travertino en la superficie. Un segundo sistema de deformación, posterior al anterior, habría producido un sistema de cizalla simple con un $\sigma_1 \sim N 35^\circ O$, similar a un sistema conjugado de cizallas de Riedel, con fracturas de extensión entre 120° y 150° que originaron fallas directas con inclinaciones al NNE y SSO. Estas fallas, con movimiento combinado normal y dextrógiro, cortaron y desplazaron a las estructuras rellenas de la etapa anterior y produjeron inflexiones en apertura (*dilatational jogs*), diaclasas en *écbelon* y lazos sigmoides que constituyeron en su mayoría los nuevos canales de circulación de fluidos hidrotermales, evolucionados hacia aguas neutras silíceas. La descompresión con consecuente liberación de CO₂ de las soluciones mineralizantes asociada a la reactivación de las fracturas generaron las estructuras bandeadas costriforme-coloformes típicas de las principales vetas del distrito. Este último sistema de deformación se mantuvo activo al menos hasta el Oligoceno superior.

Palabras clave: *Manantial Espejo, Estructuras extensionales, Macizo del Deseado, vetas epitermales.*

ABSTRACT: *Structural control of the epithermal mineralization in the Manantial Espejo ore district, Santa Cruz.* The structural analysis of the Manantial Espejo Au-Ag district allows to identify the existence of at least two brittle extensional deformation systems that were active before 159 Ma (Callovian). Rhyolitic volcanism and epithermal activity in the region were associated with these systems. The oldest of them was due to a main σ_1 NNO-SSE stress that produced two fracture systems: one at approximately 25° and the other at around 140°. These fractures hosted the rising rhyolitic magma, which generated dikes, and channelled of carbonate-rich waters associated with the presence of a hot spring type system, which formed calcite veins and travertine deposits on the surface. A second deformation system occurred after the former one and produced a simple shear system with a $\sigma_1 \sim N 35^\circ W$ similar to a conjugate Riedel shear system. The shear system has extension fractures between 120° and 150° that originated normal faults with NNE and SSW slope. These faults, with combined normal and dextral movements, cut and displaced the structures from the previous period and produced dilatational jogs, *écbelon* type joints, and sigmoidal veins that created most of the new circulation channels of the now silica-saturated hydrothermal fluids. The decompression and consequent release of the CO₂ of the mineralizing solutions produced by the reactivation of the fractures did generate the typical crustiform-coloform banded structures of the principal veins of the district. This last deformation system remained active until, at least, the Late Oligocene.

Keywords: *Manantial Espejo, Extensional structures, Deseado Massif, Epithermal veins.*

INTRODUCCIÓN

Manantial Espejo es un distrito minero formado por un conjunto de vetas de cuarzo portadoras de plata y oro alojadas en rocas ignimbríticas de edad jurásica emplazado en la Patagonia sur extraandina, provincia de Santa Cruz. Una de las ca-

racterísticas geológicas dominantes de la región, denominada macizo del Deseado, es la presencia de una fuerte actividad volcánica riolítica explosiva de edad jurásica que formó, junto al macizo Nordpatagónico y parte de la Península Antártica, una de las más grandes provincias ígneas silíceas (Pankhurst *et al.* 1998). Este

intenso volcanismo (bimodal, andesítico-riolítico) se habría desarrollado en un régimen de deformación de tipo extensional en un ambiente tectónico de retroarco (de Barrio *et al.* 1999), inducido por una subducción lenta a muy lenta en el margen suroccidental de Gondwana (Ramos 1988) y vinculado a la apertura del Atlán-

tico (Uliana *et al.* 1985, Riley *et al.* 2001). La fracturación de Gondwana occidental se asociaría temporalmente al desarrollo de una pluma cuya actividad quedó registrada en la provincia basáltica de Karoo, Sudáfrica, y en la provincia de Ferrar, Antártida (Pankhurst *et al.* 2000). La actividad volcánica en el macizo del Deseado tuvo su máximo desarrollo entre 175 y 165 Ma (Ramos 2002), aunque persistió al menos hasta los 144 Ma (Féraud *et al.* 1999). La tectónica distensiva, a la que se vincula la significativa actividad volcánica jurásica del macizo del Deseado (Uliana *et al.* 1985), se mantuvo activa una vez terminado el paroxismo volcánico, favoreciendo la formación de fracturas que se comportaron como trampas al ser rellenadas por fluidos acuosos mineralizantes asociados a los estadios finales de ese volcanismo (Fernández y de Barrio 1994, Schalamuk *et al.* 1997). Se han reconocido más de veinte depósitos minerales formados en este ambiente volcánico, desde simples manifestaciones a yacimientos de clase mundial como Cerro Vanguardia (Fernández *et al.* 2008). Corresponden en su gran mayoría a depósitos epitermales de baja sulfuración a sulfuración intermedia, portadores de metales preciosos, algunos de ellos superficiales, asociados a sistemas de *hot spring*. Las mineralizaciones consisten en su mayoría en vetas de cuarzo portadoras de oro y plata, como Cerro Vanguardia y San José y otros mayoritariamente argentíferos como el caso de mina Marta. Manantial Espejo es uno de estos depósitos, ricos en plata, que se encuentran en avanzado estado de exploración, cuenta con más de 13.600 m de estructuras mineralizadas. A finales de 2001 el proyecto tenía recursos medidos e indicados de más de 37 millones de onzas de plata y más de 600.000 onzas de oro, y recursos inferidos de 1,59 millones de toneladas de mineral con leyes de 259 g/tonelada de plata y 3,65 g/tonelada de oro.

MARCO GEOLÓGICO

El distrito Manantial Espejo, se encuentra próximo al margen sudoeste del maci-

zo del Deseado, en el centro de la provincia de Santa Cruz (Fig. 1) a 44 km al este de la población de Gobernador Gregores y a 166 km de Puerto San Julián.

La zona está cubierta, casi en su totalidad, por rocas volcánicas y volcanoclásticas jurásicas, intermedias a ácidas, de las formaciones Bajo Pobre y Chon Aike del Grupo Bahía Laura (Schalamuk *et al.* 1998). Durante el mapeo regional del distrito y zonas aledañas a escala 1:50.000 (Echeveste 2005a) fueron reconocidas 14 unidades volcánicas, la mayoría ignimbritas simples, definidas por sus características de campo, petrografía y geoquímica y lavas intermedias y ácidas. Asimismo se identificaron cinco unidades sedimentarias de distintas edades, jurásicas a recientes. En la figura 2 se presenta una columna estratigráfica simplificada con las unidades volcánicas aflorantes en la zona de las vetas. Las volcanitas jurásicas se depositaron sobre un basamento conformado por granitos (Echeveste 2005a) y esquistos, los primeros reconocidos en dos pequeños afloramientos (Fig. 1). Los esquistos, similares a los que más al norte constituyen la Formación La Modesta (Pezzi 1970), se presentan como bloques en la facies proximal de una de las unidades ignimbritas identificadas. La presencia de estas rocas del basamento ubicaría a la región en la proximidad del límite sudoeste de la cuenca jurásica. La ausencia de otras unidades sedimentarias pre-jurásicas como así también la morfología extendida de las unidades ignimbritas, escasamente encausadas, permite inferir que el volcanismo intermedio a ácido se desarrolló sobre un relieve maduro constituido por una peneplanicie desarrollada sobre el basamento ígneo-metamórfico. Dentro de las unidades jurásicas, las más antiguas son lavas andesíticas que ocupan zonas deprimidas, cubiertas por ignimbritas dacíticas y riolíticas de alto grado con intercalaciones de tobas de caída, tuffitas y depósitos químicos y biogénicos de carbonatos y sílice (Fig. 2). Estos últimos corresponden a travertinos que representan las primeras evidencias del establecimiento de un sistema de *hot spring*

en la región (Echeveste 2005b). Los fluidos bicarbonatados, además de precipitar calcita en superficie, rellenaron fracturas, posiblemente fallas, con orientación NNE y NNO. Pequeños domos y diques riolíticos asociados, de rumbo NNE, cortan la secuencia volcano-sedimentaria. La interacción de estos magmas ácidos en su ascenso con aguas subterráneas o sedimentos saturados, produjo una brecha hidroclástica (en el sentido de McPhie *et al.* 1993) conformada por fragmentos de lava y de ignimbritas, tuffitas y rocas laminadas silicificadas pertenecientes a las unidades que constituían las rocas de caja del magma ascendente y depósitos superficiales. Posteriormente a las unidades mencionadas, se depositaron en la zona al menos cuatro flujos ignimbriticos más, cuyas relaciones temporales no son del todo claras debido a la ausencia de contactos estratigráficos entre ellos.

La evolución del sistema *hot spring* concluyó con la formación del conjunto de vetas de cuarzo portadoras de plata y oro que ocupan una faja NNO de unos 15 km de largo por 4 km de ancho. La orientación principal de las vetas es NNO, asociadas a fallas directas y de desplazamiento de rumbo de tipo dextral que cortan a toda la secuencia volcánica. Las soluciones hidrotermales produjeron alteración filica en las rocas encajantes y transformando en jasperoides a la mayoría de los cuerpos de travertino (Echeveste 2005b). Por encima de las unidades jurásicas se reconocieron pequeños afloramientos aislados de la Formación Monte León (Bertels 1970) de edad oligocena y psefitas de la Formación La Avenida del Cenozoico Superior.

Dataciones U/Pb por el método SHRIMP sobre cristales de circón pertenecientes a la ignimbrita dacítica que constituye la unidad ácida más antigua y que además es caja de la veta más importante del distrito, dieron dos grupos de edades (Echeveste 2005a). Los núcleos presentan una edad de ~ 165 Ma, interpretada como la edad de inicio de la actividad volcánica ácida en la región. En tanto, los bordes de los cristales dieron una edad de ~ 159 Ma pro-

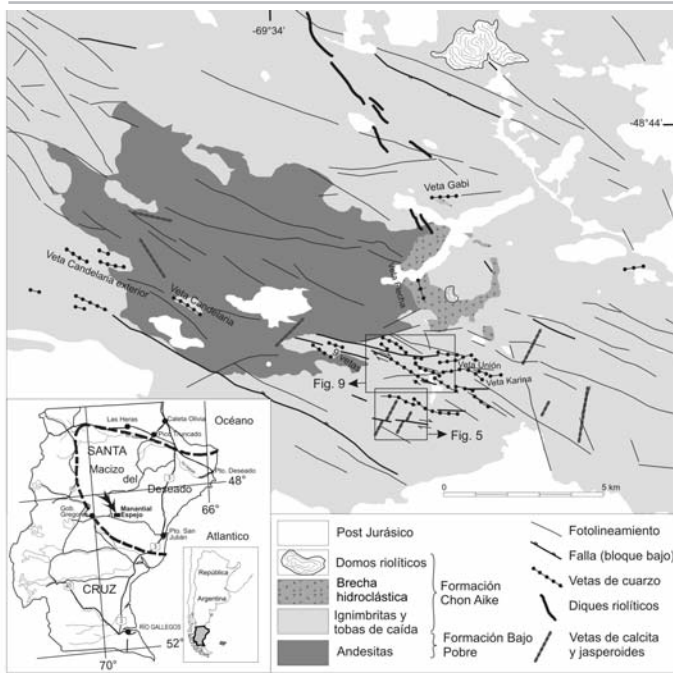


Figura 1: Mapa geológico simplificado del distrito Manantial Espejo (modificado de Echeveste 2005a) donde se indican los principales tipos de rocas y características estructurales.

vógiro y una dirección conjugada de azimut 60° (de movimiento dextrógiro) y Bajo Grande de mayor desarrollo y posterior, con una dirección principal de azimut 116° y una conjugada en 35° (Fig. 3a) (Panza 1982). Para la dirección principal del sistema Bajo Grande, sobre la base de relaciones geológicas, sugiere un movimiento horizontal levógiro y quizás dextrógiro para su conjugada, con componentes verticales poco importantes para ambos sistemas. Asimismo, sobre la base de estos desplazamientos, plantea esfuerzos compresivos provenientes del oeste en el primer caso y del oeste-sudoeste en el segundo caso.

Por otra parte, Reimer *et al.* (1996) encuentran tres sistemas principales de deformación frágil, el más antiguo que llaman La Frisia, activo durante el Calloviano alto y Oxfordiano temprano, genera a partir de un σ_1 en 15° , una dirección de cizalla y fallas de sentido dextrógiro de azimut 170° con una dirección de cizalla conjugada levógira de 40° (Fig. 3b). La migración del σ_1 hacia el oeste produce el sistema de cizalla Zanjón del Pescado con una dirección de máximo esfuerzo en 350° que genera planos de cizalla levógiros de azi-

ducto del rejuvenecimiento asociado a la fuerte alteración fílica de las cajas de las vetas, indicando por lo tanto la edad probable de mineralización (Moreira *et al.* 2009).

MARCO ESTRUCTURAL REGIONAL

El desarrollo tectónico del macizo del Deseado durante el Mesozoico y Cenozoico está relacionado con la ruptura del sur de Gondwana y la apertura del Atlántico, que produjo una deformación de las rocas de la región por la combinación de dos regímenes tectónicos diferentes, compresivo al oeste, relacionado a subducción del margen convergente, y extensional al este, generado por los estadios de *rift* temprano durante la apertura del Atlántico sur (Reimer *et al.* 1996). El atenuamiento cortical concomitante con el volcanismo ácido y el sistema de *rift* en posición de retroarco (Bertrand *et al.* 1999, Féraud *et al.* 1999), originó una estructura de bloques con la formación de *hemigrabens* limitados por fallas de orientación noroeste que fueron rellenados por los productos de la actividad volcánica (Uliana *et al.* 1985).

La zona en estudio, el sector sur-occidental del macizo del Deseado, presenta al fallamiento como principal producto de

la actividad diastrófica mencionada que permite caracterizar a la estructura de la comarca como del tipo bloques limitados por fracturas (Panza *et al.* 1998). Se han reconocido en la región dos sistemas principales de fracturación: El Tranquilo, más antiguo con un azimut promedio en 145° (dirección principal) de desplazamiento le-

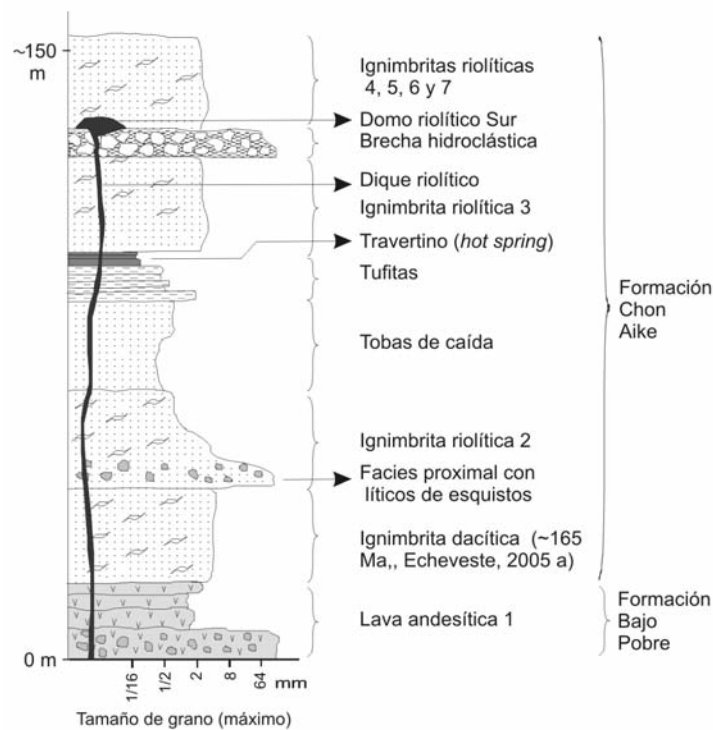


Figura 2: Columna geológica simplificada de las unidades volcánicas y volcánicas de la zona de las vetas del distrito Manantial Espejo. Modificado de Echeveste (2005b).

mut 15° y una conjugada dextrógira en 145°. Por último, durante el Cretácico temprano alto, una nueva migración del máximo esfuerzo en el mismo sentido anti horario que lo ubica en 315°, desarrolla un nuevo sistema de cizalla conjugado que reconocen como Bajo Grande, con fallas levógiras de azimut 160° y planos de cizalla dextrógiras en 290°. Es importante destacar que este último sistema (Bajo Grande) de Reimer *et al.* (1996) comparte la dirección ONO (290°-296°) con la dirección principal del sistema del mismo nombre de Panza (1982), aunque con un sentido contrario en el desplazamiento horizontal. Si bien existe coincidencia en la mayoría de las direcciones de fracturación señaladas por Reimer *et al.* (1996) con respecto a las indicadas por Panza (1982, 1984), la asignación de estas a uno u otro sistema y la interpretación de las direcciones de los esfuerzos que las produjeron, son muy diferentes.

Echavarría (1997) postula que las direcciones N 30° O y N 60° O (sistemas El Tranquilo y Bajo Grande de Panza (1982), respectivamente) son las que han transmitido los esfuerzos principales por deformación por cizalla, el primero desarrollado en el sector oeste del macizo y el segundo hacia el sector central y oriental con esfuerzos compresivos provenientes del oeste-noroeste y del sudoeste respectivamente. También encuentra que el sistema Bajo Grande afecta sedimentos modernos, lo que indica que es un sistema que se ha reactivado prácticamente hasta la actualidad. Sin embargo, advierte sobre la dificultad de reconocer estructuras en el campo que aporten evidencias para establecer los movimientos relativos de esas reactivaciones.

ESTRUCTURA DEL DISTRITO

El análisis estructural de la zona relevada durante este estudio se ha encarado desde dos puntos de vista, por un lado examinando y evaluando el conjunto de lineamientos observados en la imagen satelital y fotografías aéreas y por el otro, revisando el comportamiento de fallas, diaclasas, diques

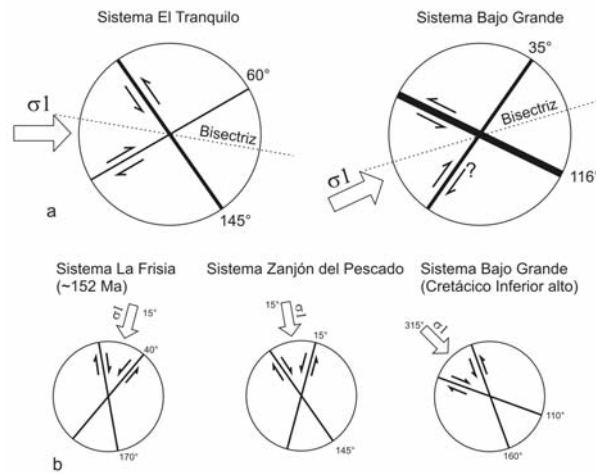


Figura 3: a) Sistemas de fracturación de Panza (1982, 1984) definido para las zonas de Gobernador Moyano y Cerro Vanguardia y posteriormente extendido al resto del macizo del Deseado. El sistema El Tranquilo es el más antiguo y menos representado. El sistema Bajo Grande es posterior y de mayor desarrollo; b) Sistemas de deformación de Reimer *et al.* (1996).

y vetas observadas y medidas en el campo. Los lineamientos fueron reconocidos y medidos (azimut y longitud) en una composición imagen satelital-fotografía aérea a escala 1:50.000, agrupándose en intervalos de 10 grados. La distribución de frecuencias de lineamientos (Fig. 4a) muestra una distribución bimodal, con una moda muy fuerte en torno a 115° de azimut y otra muy débil en 10°-20°. La primera representa la estructuración principal y afecta, además de las unidades jurásicas, a las coquinas de la Formación Monte León (Patagoniano) del Oligoceno superior-Mioceno inferior. Con respecto a las estructuras medidas en el campo, se han dividido para su análisis en diaclasas y fallas. Las primeras, de las que se midieron alrededor de un centenar, se distribuyen según tres sistemas principales (Fig. 4b), el más importante

entre 100° y 120° y dos secundarios en torno a 70° y 175°. La mayoría de las diaclasas medidas presentan inclinaciones fuertes (Fig. 4c) con un promedio de 76°. Por otra parte, si bien la presencia de fallas fue difícil de determinar tanto en el campo como en el análisis de imagen y fotografías aéreas, el levantamiento detallado de las unidades volcánicas, el reconocimiento de brechas asociadas a fallas y el desplazamiento en el sentido del rumbo de algunas estructuras de relleno, permitió la determinación de diecinueve de estas estructuras, la mayoría de ellas de orientación ONO (Fig. 4d). En pocas ocasiones pudo determinarse el movimiento relativo de los bloques; cuando éste se ha reconocido, en general fue debido a la dislocación de la posición estratigráfica de las unidades volcánicas, correspondiendo en general a fallas directas con planos de

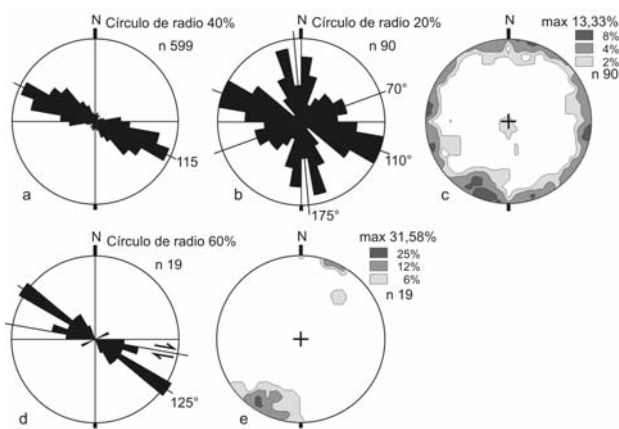


Figura 4: a) Gráficos de rosas de la frecuencia de lineamientos; b) Gráficos de rosas de la frecuencia de diaclasas; c) Proyección estereográfica equiareal de polos de diaclasas, hemisferio inferior; d) Gráficos de rosas de la frecuencia de fallas; e) Proyección equiareal de polos de fallas, hemisferio inferior.

falla que inclinan preferentemente NNE (Fig. 4e) o fallas directas combinadas con desplazamiento en el sentido del rumbo (dextrógiro) como son la que ocupa la veta María (véase Fig. 9) y la que desplaza a los jasperoides subverticales Sandra y Ayelén Oeste (Fig. 5). Los desplazamientos que se han podido medir o estimar en estas fallas son moderados a leves. Por ejemplo la falla que desplaza a Sandra tiene un movimiento dextrógiro con una separación horizontal de unos 55 metros. En el caso de la falla que aloja a la veta María, los numerosos sondeos exploratorios han permitido estimar un rechazo vertical de al menos unos 140 metros.

De la figura 4 se desprende la existencia de una dirección de fallamiento principal de azimut 125° correspondiente mayoritariamente a fallas directas o donde la componente principal de desplazamiento fue en la dirección de la inclinación, mientras que la dirección donde se detectó desplazamiento de rumbo, de carácter dextrógiro, (indicada en la figura 4d por el par de flechas que indican el sentido de la cizalla), está claramente subordinada.

Estructuras de relleno

Diques riolíticos y jasperoides: Los cuerpos subverticales de travertino, algunos de ellos luego transformados en jasperoides, por ejemplo Sandra y Ayelén Oeste (Fig. 5), se formaron durante la etapa inicial del sistema de *hot spring*, asociados a la precipitación de travertinos en superficie. Son filones estériles de calcita o formados por sílice de baja cristalinidad producto del reemplazo de calcita por calcedonia (Echeveste 2005b). Presentan rumbos entre $N 25^\circ-45^\circ E$ y $N 40^\circ O$ (Figs. 1 y 6), es decir, ocupan direcciones muy escasamente representadas en el conjunto de estructuras del distrito, no obstante presentar algunos de ellos corridas de hasta 1.000 m con espesores ~ 2 m y constituir importantes crestones que sobresalen más de 2 m en el terreno. Como ya se mencionó, están afectadas por el fallamiento dextrógiro de azimut $95^\circ-110^\circ$, dirección que está íntimamente relacionada con la generación del resto de las

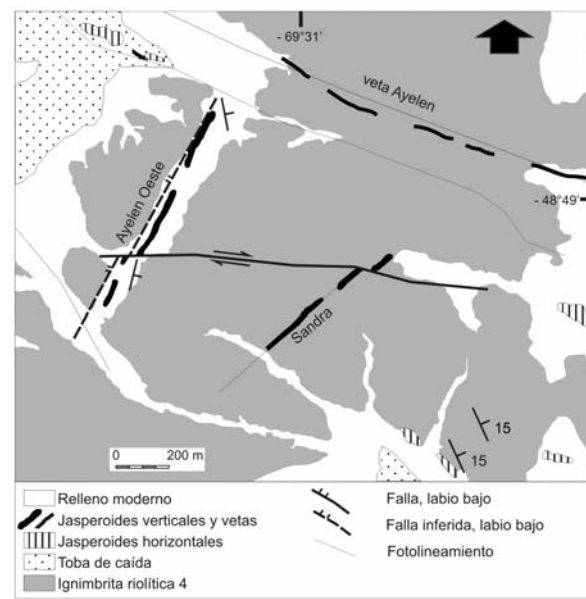


Figura 5: Mapa geológico de detalle del sector de los jasperoides Ayelén Oeste y Sandra.

estructuras mineralizadas, lo que indica la existencia de un episodio temprano de deformación que ofrecía la dirección NE y NO como receptiva a la circulación de fluidos bicarbonatados.

Asimismo, el emplazamiento de diques de riolita, de rumbo NO, ubicados al norte de la brecha hidroclástica (Figs. 1 y 6), indica que la dirección $N 40^\circ O$ también fue receptiva a ser rellenada por el magma riolítico ascendente. Los diques riolíticos están asociados al intrusivo subvolcánico que genera la brecha hidroclástica, es decir ocuparon fracturas formadas por ese episodio de deformación temprano.

Vetas y vetillas: La mineralización en Manantial Espejo está formada por un sistema de vetillas y vetas alojadas en diaclasas y fallas. Las primeras, desde pocos milímetros a algunos centímetros, se distribuyen según una dirección principal de 110° , coincidente con la dirección principal del conjunto de todas las diaclasas, y otra secundaria en 15° (Fig. 6b), dirección que no aparece tan claramente identifica-

da en el diagrama de rosas de diaclasas. Por otra parte las vetas se orientan preferentemente según una dirección en torno a un azimut de 110° (Fig. 6c).

No obstante la escasa presencia en general de indicadores cinemáticos, la observación detallada en el cambio de orientación o espesor de algunas de estas estructuras de relleno permitió inferir el movimiento relativo de los bloques que las limitan. En todos los casos este movimiento corresponde a fallas que han tenido movimiento dextrógiro. En el caso de la veta María del Este, que en algunos sectores está constituida por un conjunto de vetillas anastomosadas (Fig. 7), la estructura que se ha rellenado corresponde a fracturas sigmoidales que unen fallas, tipo lazo sigmoide en la nomenclatura de Sibson (1990). El relleno principal está constituido por vetillas mayores paralelas con un azimut de 105° , coincidente con el rumbo general de la estructura, mientras que las vetillas menores se disponen entre las anteriores con un azimut de

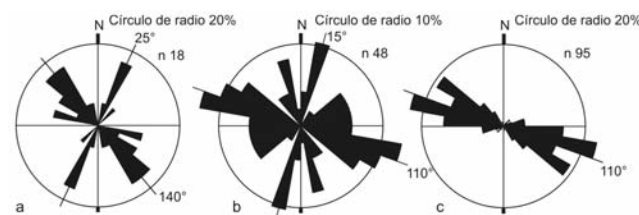


Figura 6: a) Orientación de los diques riolíticos, vetas de calcita y jasperoides verticales; b) Diagrama de rosas de frecuencia de vetillas; c) Diagrama de frecuencia de vetas.

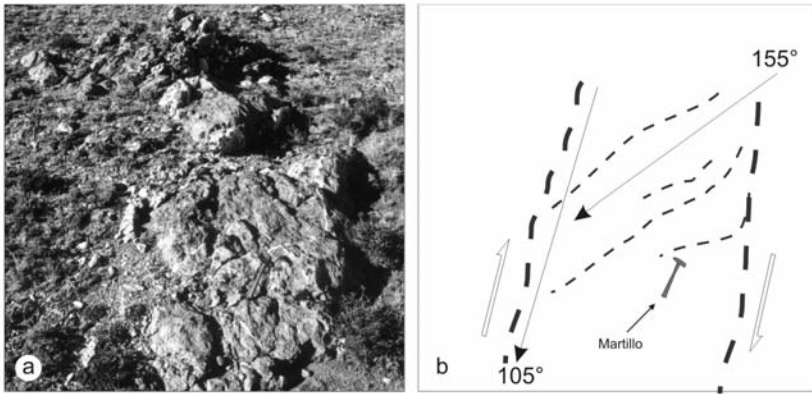


Figura 7: a) Afloramiento de parte de la veta María del Este; b) La dirección principal de la estructura tiene azimut 105° (líneas gruesas) y las vetillas asociadas (líneas finas) un azimut aproximado de 155° tipo lazo sigmoide.

155° constituyendo lazos sigmoide producidos posiblemente por una cizalla simple de movimiento dextrógiro como se observa en la figura 8a.

En la zona de las Nueve Vetas, al oeste de veta María (Fig. 1), el conjunto de vetillas situado más al norte constituye una lomada de 121° de azimut mientras que las vetillas individuales se disponen con azimut entre 145 y 174° , oblicuas a la dirección de la lomada, formando un ángulo con ésta de entre 24° y 53° . Esta disposición es interpretada como el relleno de diaclasas o fracturas en *échelon* (homólogas a las *extension gash veins*), asociadas también a una deformación por cizalla simple de carácter dextrógiro (Fig. 8b).

Respecto a la veta María, de unos 800 m de corrida, está emplazada en una falla combinada cuyo principal desplazamiento es el directo, tiene un azimut general de 120° e inclinación $\sim 65^\circ$ al SSO (Fig. 9a). Su espesor en superficie varía entre 0,5 y 22 m con una media en torno a los 8 metros. Una de sus características más notorias es su estructura bandeada costriforme-coloforme, distintiva de las mineralizaciones epitermales, en bandas subparalelas con espesores entre ~ 5 cm a menores a 1 mm, indicativas de múltiples reaperturas de la fractura hospedante y del aporte continuo de pulsos mineralizantes. Las bandas no siempre son paralelas, en ocasiones cortan en forma oblicua a otras previas se anastomosan o rodean

trozos fracturados de la veta constituyendo estructuras en cucarda, indicando que la reapertura de la fractura hospedante se activó fracturando el relleno previo. Su azimut no es constante, varía a lo largo de sus 800 m de corrida entre 110° y 140° , desarrollando sus máximos espesores cuando se orienta en esta última dirección (Dubé 1997, Echeveste 2005b). Esta variación en el espesor, controlado por los cambios en la orientación de la fractura, puede explicarse por un movimiento dextrógiro de la falla además del movimiento gravitacional (Figs. 8c y 9b), constituyendo verdaderas inflexiones en apertura (*dilational jogs* en la nomenclatura de Sibson 1990), interpretación ya realizada por otros autores (Dubé 1997).

Por otra parte, el análisis de los sondeos exploratorios realizados en el techo de la estructura, permite comprobar la existencia de un conjunto de vetas y vetillas que responden al relleno de fracturas asocia-

dos a la falla principal ocupada por María (Fig. 9c) y que constituyen también inflexiones en apertura (*dilational jogs*) producidos por el movimiento directo de la falla principal y las fracturas asociadas en el bloque del techo, posiblemente del tipo de dúplex extensionales.

INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

La estructuración del distrito Manantial Espejo parece responder a dos sistemas de deformación frágil. El primero y más antiguo, está representado por fracturas de rumbos principales NO y NNE que posibilitaron la movilización del magma riolítico y formación de diques y la circulación de fluidos bicarbonatados en la etapa inicial de *hot spring* con formación de vetas de calcita y depósitos de travertino en la superficie. Las fracturas ocupadas por los diques riolíticos representarían las fallas normales de rumbo noroeste y de ángulo alto que Uliana *et al.* (1985) reconocen como limitantes de los *hemigrabens* producidos durante el atenuamiento cortical concomitante con el volcanismo riolítico. Asimismo, el estudio de numerosas regiones en el mundo con ambientes de *hot spring* actuales o recientes, ha permitido comprobar que existe una estrecha relación entre tectónica distensiva y localización de depósitos de travertino (Hancock *et al.* 1999). La posición estratigráfica de los niveles calcáreos identificados en Manantial Espejo indican que el ambiente de *hot spring* comenzó a desarrollarse tempranamente en el distri-

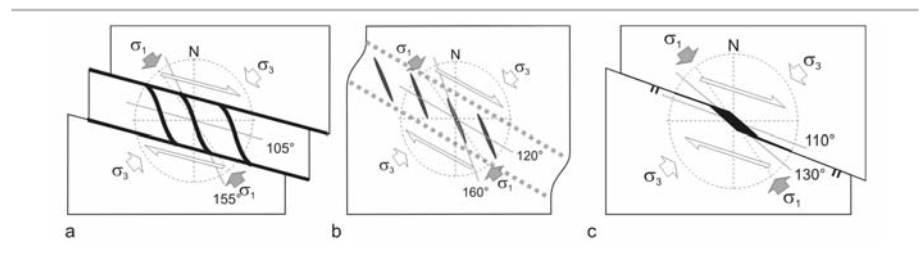


Figura 8: a) Esquema donde se indican los esfuerzos interpretados responsables de la formación de lazos sigmoide en la veta María del Este; b) Esquema mostrando la disposición de vetillas extensionales en *échelon* en la zona de 9 Vetas; c) El desplazamiento dextrógiro de la falla donde se aloja la veta María permite un aumento de espesor de la misma cuando su azimut se acerca a 130° , constituyendo inflexiones en apertura (*dilational jogs*).

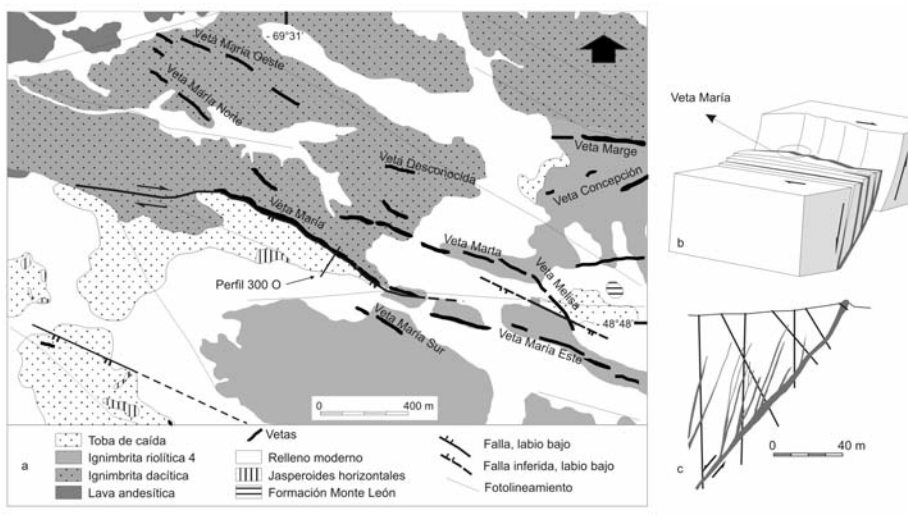


Figura 9: a) Mapa de detalle del sector de la veta María, principal estructura del distrito; b) Esquema de la falla directa que aloja a la veta María donde se combinan el desplazamiento directo, con un rechazo vertical de unos 140 m, con movimiento dextrógiro; c) Perfil de la veta María en la sección 300 oeste (modificado de Wallis 2001) donde se observa un conjunto de vetas y vetillas asociadas a la estructura principal dispuestas en el techo.

to, posiblemente asociado al régimen tectónico extensional del sistema Zanjón del Pescado (Reimer *et al.* 1996) que produjo fracturas (fallas directas) en torno a N 25° E y N 40° O como consecuencia de una orientación de los esfuerzos principales máximos σ_1 ubicado entre N10° O a N 15° O (Fig. 10a). Las fallas generadas, habrían constituido los principales canales de circulación de fluidos hidrotermales ligeramente alcalinos a neutros, mayormente bicarbonatadas que condujeron a la formación de vetas de calcita alojadas en la lava andesítica de la Formación Bajo Pobre y en las unidades ignimbríticas más antiguas de la Formación Chon Aike. Estas mismas soluciones al alcanzar la superficie y perder el CO_2 disuelto, habrían precipitado carbonato de calcio (según la reacción $\text{Ca}+2+2\text{CO}_3\text{H}-1= \text{CO}_3\text{Ca}+\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$) formando los niveles de travertino con texturas y estructuras típicas de ambiente de *hot spring* (Echeveste 2005b). La silificación posterior de los depósitos de carbonato de calcio produjo jasperoides laminados verticales (reemplazo del carbonato que rellenaron los canales de ascenso de los fluidos) y jasperoides subhorizontales (reemplazo de travertinos), con características similares a aquellas de sinter silíceo. Un reacondicionamiento en la dirección del

esfuerzo principal, produce un nuevo campo de esfuerzos que genera un conjunto de fallas directas con dirección predominante ONO y moderado desplazamiento en el sentido de la inclinación (~ 150 - 200 m), combinado en algunos casos con desplazamiento de rumbo dextrógiro en 110° de azimut. Estas fallas, con componente horizontal dextrógira, desplazan algunas de las estructuras rellenas del sistema anterior y constituyen en su mayoría los nuevos canales de circulación de fluidos, ahora evolucionados hacia aguas neutras silíceas, y terminan alojando las vetas argento-auríferas. Las diaclasas, se desarrollaron en tres direcciones, la más importante, de azimut 125° , comparte su dirección con el sistema de fallas, mientras que los subordinados se encuentran en 70° y 175° . La actitud de las fallas directas y la disposición de las estructuras mineralizadas, vetillas y vetas de cuarzo, indican una extensión general σ_3 en sentido NE que hace inferir una dirección NO para el esfuerzo principal σ_1 que correspondería al sistema Bajo Grande, posterior al anterior. Durante el segundo sistema (Bajo Grande), con una orientación del máximo esfuerzo del σ_1 ubicado $\sim \text{N}35^\circ\text{O}$ (Fig. 10 b), se habría producido un sistema de cizalla simple que originó fallas dextróginas

con azimut entre 95 y 110° e inclinaciones cercanas a la vertical a las que se asocia un sistema de fracturas o diaclasas en *echelon* y lazos sigmoides dispuestos entre 145° y 174° . Asimismo se produjeron fracturas de extensión entre 120° y 150° que originan fallas directas con inclinaciones al NNE y SSO ($\sim 65^\circ$ al SSO en el caso de la veta María) que actuaron como estructuras receptoras para la circulación de fluidos y posterior relleno. En el caso de la veta María, la combinación con un movimiento dextrógiro en el sentido del rumbo produce inflexiones en apertura que aumentan su espesor en los sectores donde su azimut cambia de $\sim 110^\circ$ a $\sim 140^\circ$. La delicada variación textural dentro de la estructura bandeada costriforme-coloforme, especialmente presente en la veta María, indica sutiles cambios en las condiciones de los fluidos y/o su entorno, responsables de la precipitación de los minerales de mena y ganga. Estos cambios pueden responder a múltiples factores: variaciones en la temperatura, en la salinidad de las soluciones o en la posición del nivel freático (que condiciona la presión y por lo tanto el nivel de ebullición); a la mezcla de soluciones o la caída de presión confinante debida principalmente a la apertura de la fractura hospedante de la veta en formación. Este último es el mecanismo más probable responsable de las estructuras bandeadas de los depósitos epitermales, ya que cada nueva caída de presión produce ebullición, que resulta en una disminución de temperatura con aumento del pH y consecuente precipitación mineral (Buchanan 1981). La escasa profundidad de emplazamiento de esta veta, 200 a 350 metros según las texturas dominantes (Echeveste 2005a), en condiciones de presión hidrosférica de acuerdo al modelo de Morrison *et al.* (1989), sugieren que el desplazamiento dextrógiro de la falla por actividad sísmica produjo inflexiones en apertura (*dilatational jogs*) que actuaron como un mecanismo de succión con el consecuente ascenso de los fluidos y brusca caída de presión que favoreció la ebullición y la precipitación mineral. La geometría de las vetas y

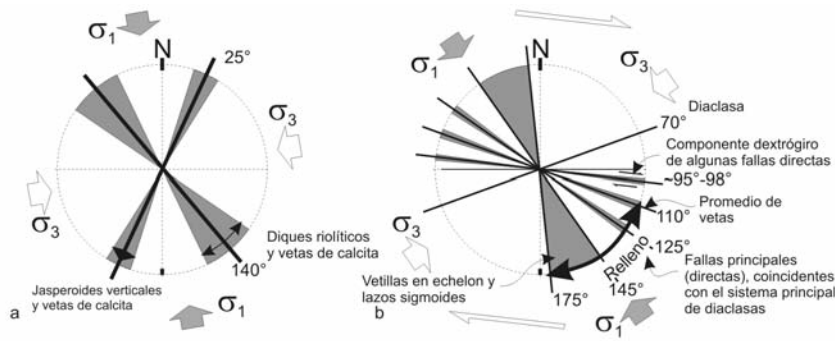


Figura 10: a) Estado temprano de deformación en el distrito Manantial Espejo con formación de fracturas posteriormente rellenas por calcita y ocupadas por diques de riolitas. La posición de éstas, sugiere una dirección para el máximo esfuerzo entre N10°-15°O correspondiente al sistema Zanjón del Pescado (Reimer *et al.* 1996); b) La migración de la dirección de σ_1 al NO origina un sistema de cizalla simple con diaclasas y fallas directas principalmente en azimut 125° estas últimas en ocasiones con movimiento dextrógiro. La extensión NE facilita el relleno de las estructuras formadas por parte de los fluidos acuosos epitermales responsables de la mineralización argento-aurífera.

vetillas presentes en el techo de la veta María recuerdan a una flor negativa, propia de un régimen transtensivo.

El modelo propuesto en el caso de la figura 10b se podría asimilar a un sistema conjugado de cizallas de Riedel (Fig. 11), con σ_1 y σ_3 horizontales (y σ_2 vertical), donde las fallas dextrógiras coincidirían con la cizalla sintética de Riedel (R1), el diaclasamiento de azimut 70° correspondería al sistema sintético P o cizalla P, en tanto que las fallas directas lo hacen con las fallas extensionales.

Con respecto al sentido de la cizalla en las estructuras ONO existe una disparidad entre lo observado por el autor de este trabajo en el área de Manantial Espejo, con lo indicado para otros sectores de macizo del Deseado (Panza 1982, Echavarría 1997). Mientras que en este trabajo se consigna un desplazamiento dextrógiro para esa dirección (dirección principal del sistema Bajo Grande), Panza (1982), sobre la base de la existencia de pliegues de arrastre asociados a fallas de rumbo N 45°-50° O, 75 km al NNE de la zona de Manantial Espejo, interpreta un movimiento levógiro. Sin embargo, sí hay coincidencia con la interpretación que hacen Reimer *et al.* (1996) para su sistema de cizalla Bajo Grande donde la dirección de cizalla 290° es dextrógiro. También un comportamiento dextrógiro encuentra

Dubé (1997) en fallas de rumbo E-O en la Formación Bajo Pobre en la zona occidental del distrito Manantial Espejo con estriaciones subhorizontales con plunge de 4° al ONO. Este dominio estructural implica la existencia de un esfuerzo principal proveniente del NO. Resultados similares fueron encontrados para el área La Josefina (Fernández *et al.* 1996), para la zona de la estancia La Esperanza (Mykietiuik *et al.* 2002) y para el extremo NO del macizo del Deseado (Lopez *et al.* 2002). Los dos últimos señalan un movimiento dextrógiro en la dirección 90°-100° aunque desarrollada a partir de un sistema de cizalla conjugada de Riedel con orientación N-S y por lo tanto coincidente con la dirección de cizalla R' o R2 antitética. El sistema Zanjón del Pescado tendría una edad oxfordiana-kimmeridgiana

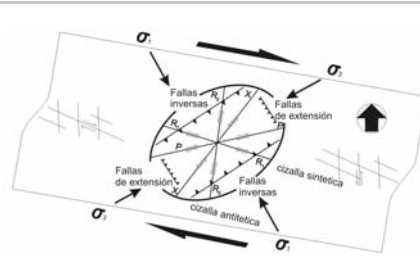


Figura 10: Campo de esfuerzos para el distrito Manantial Espejo durante el emplazamiento de las vetas, modificado de McClay (1987) y Allmendinger (1987).

(Reimer *et al.* 1996), aunque en la zona de Manantial Espejo sería más antigua, ya que sus fracturas alojan a los diques riolíticos cuya edad varía entre 165 Ma (edad de la ignimbrita dacítica, la unidad ácida más antigua del distrito) y 159 Ma, edad probable de la mineralización (Echeveste 2005a), es decir sería anterior al Calloviano. En cuanto al período en que se habría formado el sistema Bajo Grande en la zona de Manantial Espejo, es decididamente anterior al propuesto por Reimer *et al.* (1996) (Cretácico Inferior alto) ya que en él se emplazan estructuras mineralizadas de una edad ~ 159 Ma. En la zona estudiada, este sistema permaneció activo al menos hasta el Oligoceno superior, ya que corta a sedimentitas oligo-miocenas. Por otra parte, la deformación de tipo extensional en el basamento pre jurásico del macizo del Deseado vinculada al volcanismo riolítico (Uliana *et al.* 1985) tuvo su máximo desarrollo entre 175 y 165 Ma (Ramos 2002) con reactivaciones posteriores, hasta los 155 Ma, responsables de las mineralizaciones epitermales auríferas (Saunders 1998 en Ramos 2002).

CONCLUSIONES

El distrito Manantial Espejo y sus zonas aledañas se caracterizan por un estilo estructural dominado por un sistema de bloques limitados por fallas directas propias de un régimen extensional con deformación frágil. La comarca fue sometida al menos a dos sistemas de esfuerzos, el primero con un σ_1 próximo a N10°-15°O (aproximadamente coincidente con el sistemas Zanjón del Pescado de Reimer *et al.* 1996), genera un sistema de cizalla conjugado con dos direcciones principales, uno en ~140° y el otro en ~25° y se desarrolló previamente a ~ 165 Ma. Este sistema fue receptivo al emplazamiento de los diques riolíticos y vetas de calcita formadas en estadios tempranos del sistemas hidrotermal.

El segundo sistema de esfuerzo, desarrollado posteriormente aunque previamente a 159 Ma, se produce a partir de una orientación de los esfuerzos principales

máximos σ_1 ubicado entre N 35° - 45° O y genera un sistema de cizalla de dirección ONO-ESE de carácter dextrógiro equivalente a un sistema conjugado de cizalla de Riedel con: a) Un conjunto de fallas dextróginas entre 95° y 110°, b) Un sistema de fracturas o diaclasas sigmoidales y *en échelon* entre 145° y 174°, c) Un conjunto de fallas directas con azimut \sim 125° con inclinaciones fuertes, tanto al NNE como al SSO y d) Un sistema de diaclasas de azimut 70°.

Este sistema de deformación, con la dirección del mínimo esfuerzo de dirección NE-SO, produce un fallamiento principal por extensión que genera un sistema de bloques asimétricos de orientación ONO. Asimismo, las estructuras en el intervalo entre 110° a 175° se presentaron como un sistema receptivo, apto para ser rellenado por fluidos ascendentes que generaron el sistema principal de vetas de cuarzo. El aumento en espesor de la veta María en los sectores en que su azimut se recuesta hacia el sur, indica que el movimiento dextrógiro de la estructura que estaba siendo rellenada se mantuvo durante el ascenso de los fluidos hidrotermales produciendo inflexiones en apertura (y posiblemente mecanismos de succión) con consecuentes caída de presión y precipitación de la sílice y minerales de mena, es decir, el fluido ocupaba los espacios generados por el lento desplazamiento de la falla en múltiples episodios que condicionaron su típica estructura bandeada costriiforme-coloforme en condiciones de presión hidrostática.

A escala regional, la deformación frágil que originó el sistema de bloques de orientación NO, habría producido en la comarca de Manantial Espejo la contraparte de lo observado en la zona NE del macizo del Deseado (Uliana *et al.* 1985), es decir un aumento de la pila volcánica de SO a NE producto de la simultaneidad entre el volcanismo y el fallamiento directo con planos de falla inclinados principalmente al NE. Esta característica fue también observada por Ramos (2002) quien, en un perfil EO, define varios bloques limitados al NE por fallas como las

indicadas y que ubican al bloque El Tranquilo-Manantial Espejo como el más elevado según ese perfil y que explicaría la proximidad de rocas del basamento en la región, todo el sistema de *hemigrabens* tiene una basculación regional hacia el este. Asimismo el desplazamiento dextrógiro de los bloques es coincidente con el sistema transcurrente de dirección NO de escala continental propuesto para Patagonia (Rapela y Pankhurst 1992).

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Dr. Juan Franzese por la lectura crítica del manuscrito y por las importantes sugerencias que contribuyeron al mejoramiento del mismo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Allmendinger, R. 1987. Técnicas modernas de análisis estructural. Asociación Geológica Argentina, Serie B, Didáctica y Complementaria 16, 90 p.
- Bertels, A. 1970. Sobre el "Piso Patagoniano" y la representación de la época del Oligoceno en Patagonia austral (República Argentina). Revista de la Asociación Geológica Argentina 25(4): 495-501.
- Bertrand, H., Féraud, G., Haller, M., Luais, B., Alric, V. y Fornari, M. 1999. The Mesozoic silicic large igneous province of Patagonia: chronology and origin evidenced by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Sm-Nd isotopes. 2° Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Actas: 167-169, Carlos Paz, Córdoba.
- Buchanan, L.J. 1981. Precious metal deposits associated with volcanic environments in the southwest. Arizona Geological Society Digest 14: 237-262.
- de Barrio, R., Panza, L. y Nullo, F. 1999. Jurásico y Cretácico del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. En: R. Caminos (ed.) Geología Argentina, SEGEMAR Anales 29: 511-527, Buenos Aires.
- Dubé, B. 1997. Low sulphidation gold mineralization in the Jurassic Deseado Massif, Santa Cruz province, South Argentina. Mission Report (inédito), 57 p.
- Echavarría, L. 1997. Estudio geológico-minero del área El Dorado-Montserrat, Departa-

mento Magallanes, provincia de Santa Cruz. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata (inédito), 221 p., La Plata.

- Echeveste, H. 2005a. Metalogénesis del distrito argento-aurífero Manantial Espejo, Macizo del Deseado. Provincia de Santa Cruz. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (inédito), 251 p., La Plata.
- Echeveste, H. 2005b. Travertines and jasperoids of the Manantial Espejo, a jurassic hot spring environment. Macizo del Deseado, Santa Cruz province, Argentina. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis 12(1): 23-39.
- Féraud, G., Alric V., Fornari, M., Bertrand, H. y Haller M. 1999. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Jurassic volcanic province of Patagonia: migrating magmatism related to Gondwana break-up and subduction. Earth and Planetary Science Letters 172: 83-96.
- Fernández, R.R. y de Barrio, R.E. 1994. Mineralizaciones de oro y plata del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. Argentina. Revista Comunicaciones 45: 59-66, Universidad de Chile.
- Fernández R., Echeveste H., Echavarría L. y Schalamuk I. 1996. Control volcánico y tectónico de la mineralización epitermal del área La Josefina, Macizo del Deseado, Santa Cruz, Argentina. 13° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 41-54, Buenos Aires.
- Fernández, R.R., Blesa, A., Moreira, P., Echeveste, H., Mykietiuik, K., Andrada de Palomera, P. y Tessone, M. 2008. Los depósitos de oro y plata vinculados al magmatismo jurásico de la Patagonia: revisión y perspectivas para la exploración. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63(4): 665-681.
- Hancock, P.L., Chalmers, R.M.L., Altunel, E. y Cakir, Z. 1999. Travertines: using travertines in active faults studies. Journal of Structural Geology 21: 903-916.
- Lopez, R. G., Gomez, J.C., de Barrio, R.E. y Schalamuk, I. 2002. Lineaments analysis in epithermal deposits exploration, southern Argentina. In: Vearncombe S. (ed.) Applied Structural Geology for Mineral Exploration and Mining. Australian Institute of Geoscientists Bulletin 36:114-117.
- McClay, K.R. 1987. The mapping of geological

- structures. En: Keith Cox (ed.) Geological Society of London Handbook, Open University Press, 161 p.
- McPhie, J., Doyle, M. y Allen, R. 1993. Volcanic Textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. CODES, University of Tasmania, 198 p., Tasmania, Australia.
- Moreira, P., Echeveste, H., Fernández, R., Hartmann, L., Santos, J. y Schalamuk, I. 2009. Depositional age of Jurassic gold-silver ore in the Deseado massif, Patagonia, Argentina, base on Manantial Espejo and La Josefina prospects. *Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen* 253(1): 25-40.
- Morrison, G., Dong, G. y Jáireth S. 1989. Textural zoning in epithermal quartz veins in Queensland. Manual de campo. Tomesville, James Cook University of North Queensland. AMIRA project (P247), 25 p.
- Mykietiuik, K., Gobbo, E. y Fernández, R. 2002. Análisis Estructural vinculado a alteraciones hidrotermales en el área de la Estancia La Esperanza, Macizo del Deseado, Santa Cruz. 6° Congreso de Mineralogía y Metalogénia, Actas: 295-300, Buenos Aires.
- Pankhurst, R. J., Leat P.T., Sruoga P., Rapela C.W., Márquez M., Storey B.C. y Riley T.R. 1998. The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica: A silicic large igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 81: 113-136.
- Pankhurst, R. J., Riley, T. R., Fanning, C. M. y Kelley, S. P. 2000. Episodic Silicic Volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of magmatism associated with the Break-up of Gondwana. *Journal of Petrology* 41(5): 605-625.
- Panza, J.L. 1982. Descripción geológica de las Hojas 53e, "Gobernador Moyano" y 54e, "Cerro Vanguardia", provincia de Santa Cruz. Servicio Geológico Nacional, (Inédito), 197 p.
- Panza, J.L. 1984. Descripción geológica de las Hojas 54f, "Bajo de La Leona" y 54g, "Bahía Laura", provincia de Santa Cruz. Servicio Geológico Nacional, (Inédito), 197 p.
- Panza, J., Marín G. y Zubia M. 1998. Hoja Geológica 4969-I, Gobernador Gregores, escala 1:250.000, provincia de Santa Cruz. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 239, 104 p.
- Pezzi, E. 1970. Informe geológico zonas cerro Huemul y estancia La Josefina, Santa Cruz. Yacimientos Petrolíferos Fiscales 157, (inédito), 21 p., Buenos Aires.
- Ramos, V. 1988. Late Proterozoic-Early Paleozoic of South America. A collisional history. *Episodes* 11: 168-175.
- Ramos V. 2002. Evolución Tectónica. En: Haller, M. (ed.): *Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz*, Relatorio 15° Congreso Geológico Argentino. I-23: 365-387.
- Rapela, C. y Pankhurst, R. 1992. The granites of northern Patagonia and the Gastre Fault system in relation to the break-up of Gondwana. En B.C., Alabaster y Pankhurst, R. (eds.) *Magmatism and the causes of continental break-up*, Geological Society, Special Publication 68: 209-220, London.
- Reimer, W., Miller, H. y Mehl, H. 1996. Mesozoic and Cenozoic palaeo-stress field of the South Patagonian Massif deduced from structural and remote sensing data. En Storey, B.C., King, E.C. y Livermore, R.A. (eds.) *Weddell Sea Tectonics and Gondwana Break-up*. Geological Society, Special Publications 108: 73-85, London.
- Riley, T., Leat, P., Pankhurst, R. y Harris, C. 2001. Origin of large volume rhyolitic volcanism in Antarctic Peninsula and Patagonia by crustal melting. *Journal of Petrology* 42(6): 1043-1065.
- Schalamuk, I.B., Zubia, M., Genini, A. y Fernández, R.R. 1997. Jurassic Epithermal Au-Ag deposits of Patagonia, Argentina. *Ore Geology Reviews* 12(3): 173-186.
- Schalamuk, I.B., Echeveste, H., Etcheverry, R. y Ametrano, S. 1998. Metalogénesis del yacimiento de oro-plata "Manantial Espejo", Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. *Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* 50: 217-236, Buenos Aires
- Sibson, R.H. 1990. Faulting and fluid flow. En Nesbitt, B.E. (ed.) *Short course on fluids in tectonically active regimes of the continental crust*. Mineralogical Association of Canada: 93-132.
- Uliana, M., Biddle, K., Phelps, D. y Gust, D. 1985. Significado del vulcanismo y extensión mesojurásicos en el extremo meridional de Sudamérica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 40(3-4): 231-253.
- Wallis, C.S. 2001. Manantial Espejo Property, Technical Report, PAH Project No. 9814b. Pincock Allen & Holt report (inédito), 73 p.

Recibido: 7 de octubre, 2009

Aceptado: 7 de abril, 2010