

Capítulo 4:

Controles estructurales en la mineralización del yacimiento Mina Martha, Macizo del Deseado, Argentina.

4.1. Introducción

En general el Macizo del Deseado plantea dificultades para la realización de estudios estructurales de detalle, debido a los escasos afloramientos de planos y zonas de fallas, y a la presencia de una abundante cobertura moderna que oculta los principales rasgos estructurales de la región.

Estas dificultades han hecho que la mayoría de los estudios estructurales regionales desarrollados hasta la fecha en la comarca del Deseado tengan una gran componente de análisis de imágenes y fotolineamientos (Echavarría, 1997; Guido, 2002; Echeveste, 2005; Lopez, 2006; Mykietiuik, 2006) en lo que respecta al fallamiento regional. En tanto que en el caso de las mineralizaciones se ha recurrido al análisis de datos de orientación de las estructuras junto con los indicadores cinemáticos observados con el fin de entender la cinemática actuante durante la depositación de las vetas (Echeveste, 2005; Lopez, 2006; Mykietiuik, 2006; Jovic, 2009).

En el presente capítulo se analizan los aspectos estructurales reconocidos en los principales sistemas de vetas presentes en Mina Martha (Figura 4.1) con el objetivo de elaborar un modelo estructural que permita explicar los mecanismos tectónicos que facilitaron la formación de fallas y vetas en la zona de estudio. La existencia de un yacimiento en producción es una oportunidad única para analizar los controles estructurales que actuaron sobre las mineralizaciones presentes en el Macizo del Deseado, ya que las labores mineras permiten el estudio de las estructuras mineralizadas con un gran detalle.

4.2. Marco estructural del Macizo del Deseado

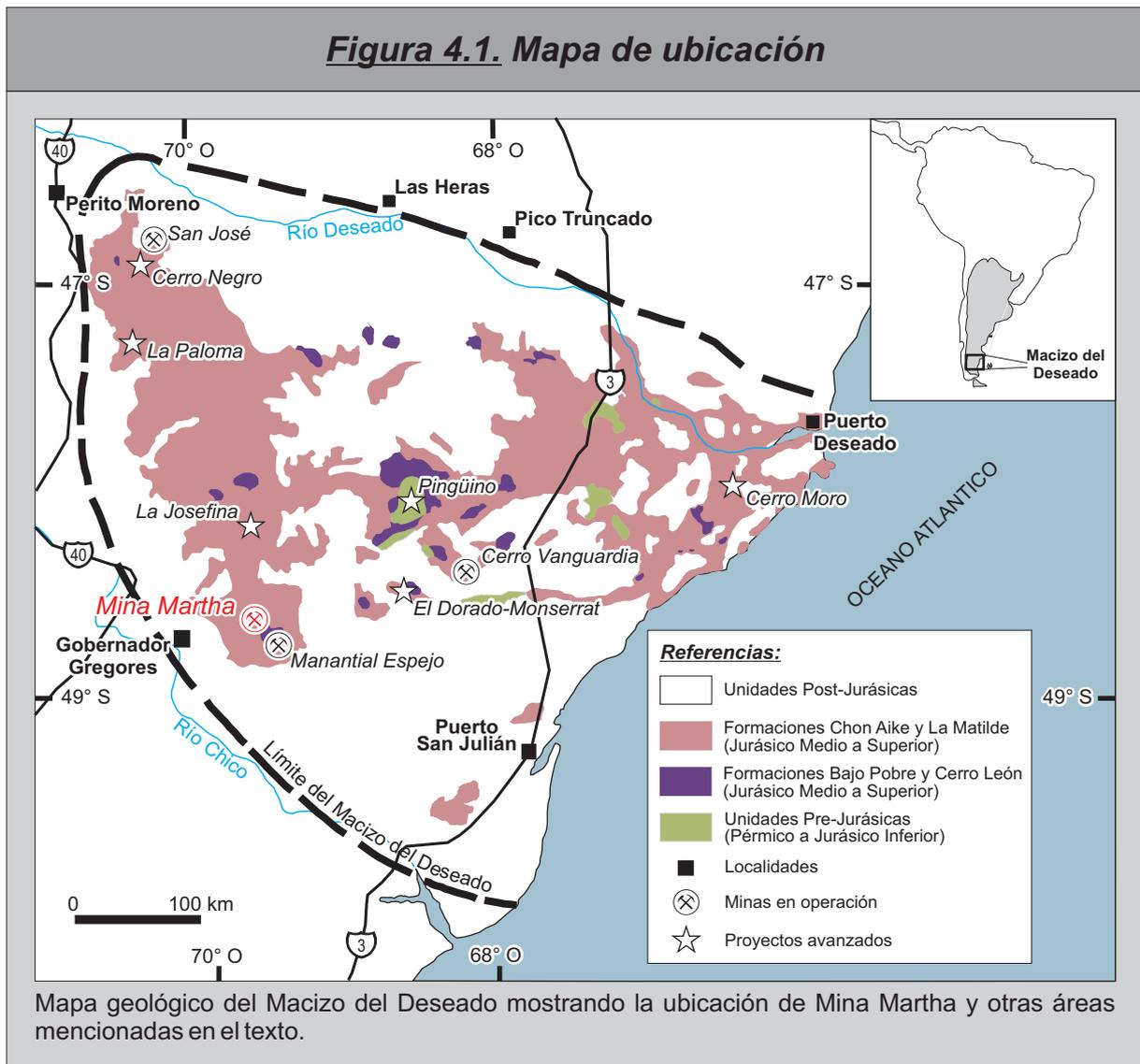
4.2.1. Marco estructural regional

El Macizo del Deseado (Figura 4.1) se caracteriza principalmente por una importante deformación de tipo frágil, que es el resultado de varias fases de deformación que se han sucedido desde el Pérmico hasta la actualidad (Ramos, 2002).

El Pérmico y el Triásico se caracterizaron por el desarrollo de un ambiente extensional dominado por sedimentación silicoclástica (Fm. La Golondrina) en grábenes asimétricos de orientación NNO-SSE a N-S (Ramos, 2002), que hacia el Triásico Superior y Jurásico Inferior evolucionan hacia una etapa de subsidencia caracterizada por sedimentación silicoclástica (Gr. El Tranquilo) y piroclástica (Fm. Roca Blanca).

Durante el Jurásico, ocurre una rápida propagación de los sistemas de rift en todo el ámbito de la Patagonia (Ramos 1996; Ramos, 2002). En el Macizo del Deseado, este ambiente extensional se habría originado como consecuencia del desarrollo de un límite transformante de placas (Falla de Agulhas-Malvinas y su prolongación continental) asociado a la apertura del Océano Atlántico (Homocv *et al.*, 1996) y que fue acompañado por el extenso vulcanismo de la Provincia Ígnea Gigante Chon Aike (Pankhurst *et al.* 1998).

Figura 4.1. Mapa de ubicación



De acuerdo a [Giacosa et al. \(2008\)](#), el período Jurásico se caracterizó por un ambiente tectónico dominado por extensión oblicua dominado por fallas principales de rumbo ONO y NNE de alto ángulo. Las fallas ONO poseerían un desplazamiento mixto dextral-normal y habrían ejercido un fuerte control sobre el vulcanismo y las mineralizaciones ([Echeveste, 2005](#); [Giacosa et al., 2008](#)); en tanto que las fallas de rumbo NNE serían estructuras de segundo orden, aunque también habrían ejercido algún tipo de control sobre las mineralizaciones y posiblemente también sobre el vulcanismo ([Moreira, 2005](#); [Moreira et al., 2008](#)).

Durante el Cretácico Inferior, con posterioridad a la depositación de la Fm. Bajo Grande y con anterioridad a la depositación de la Fm Baqueró, se instaló un sistema compresivo en la región del Deseado ([Ramos, 2002](#); [Giacosa et al., 2008](#)). Este régimen estuvo caracterizado por esfuerzos compresivos de orientación SO-NE, que produjeron la inversión de las fallas jurásicas, de manera que las fallas ONO se invirtieron de manera transpresiva-sinistral y las fallas NNE como fallas inversas.

Durante el Cretácico Superior y gran parte del Terciario, habría continuado un régimen compresivo aunque no se mencionan grandes movimientos para el Macizo del Deseado, lo que estaría indicando una relativa calma tectónica.

Finalmente, y a partir del Mioceno se inicia el levantamiento de la Cordillera de los Andes para las latitudes del Macizo del Deseado ([Ramos, 2002](#)), esto produce una elevación generalizada de las

secuencias Jurásicas y Cretácicas producto de la reactivación como fallas inversas de muchas de las fallas preexistentes (Giacosa *et al.*, 2008).

Como resultado de su historia tectónica, el Macizo del Deseado está caracterizado por una intensa deformación de tipo frágil, dominada por el desarrollo de fracturas y fallas, que pueden presentar longitudes desde pocos metros hasta de más de 30 km de longitud y conformar rasgos de escala regional (Lopez, 2006).

Además de la deformación frágil, también puede reconocerse una deformación dúctil muy localizada caracterizada por braquianticlinales suaves y amplios, como es el caso del “Anticlinal El Tranquilo”, el “Anticlinal El Fenix” y el “Anticlinal Cerro Vanguardia”. Estos plegamientos han sido interpretados de diversas maneras a lo largo de los años, De Giusto *et al.* (1980) proponen que se habrían originado en respuesta a movimientos de los bloques del basamento rígido; Giacosa *et al.* (2008) proponen para el “Anticlinal El Tranquilo” que se habría originado por inversión tectónica de fallas jurásicas durante el evento compresivo del Cretácico Inferior; finalmente Peñalba *et al.* (2008) y Jovic (2009) proponen que el “Anticlinal El Tranquilo” se habría originado en respuesta a la intrusión de cuerpos ígneos mesozóicos.

4.2.2. Marco estructural de las mineralizaciones jurásicas

El Macizo del Deseado se caracteriza por numerosas manifestaciones epitermales de variadas características y diferentes arreglos estructurales (Figura 4.1). Sin embargo, en la bibliografía se pueden reconocer dos grandes grupos de mineralizaciones en función de su orientación y cinemática.

El primer grupo de mineralizaciones se encuentra asociado al sistema de fallas propuesto por Giacosa *et al.* (2008) para el rift Jurásico, donde la dirección principal presenta una cinemática dextral-normal y una orientación general ONO a NO e incluye los sistemas de vetas de la Mina Cerro Vanguardia (Giacosa *et al.*, 2008b) y la Mina Manantial Espejo (Echeveste, 2005). La dirección secundaria de este sistema tiene una orientación NNE, una cinemática sinistral-normal, y está representado por las mineralizaciones observadas en el Proyecto La Josefina (Moreira *et al.*, 2008). Este conjunto de mineralizaciones posee una edad que varía entre 156 y 152 Ma con una moda alrededor de los 154 Ma (Moreira *et al.*, 2009; Wallier, 2009)

El segundo grupo de mineralizaciones presenta una cinemática sinistral y una orientación general NO a NNO que no puede explicarse en función de las direcciones y cinemáticas propuestas por Giacosa *et al.* (2008) para el Jurásico. Dentro de este conjunto de mineralización se encuentran las vetas de la Mina San José (Gutierrez, 2006), Veta Eureka (Lopez, 2006), Mina Martha (este trabajo), entre otros. Estas estructuras podrían estar alojándose en fracturas producto de reactivaciones de fallas antiguas presentes en el basamento de las vulcanitas jurásicas, ya que estas mineralizaciones poseen edades de entre 165 y 151 Ma (Dietrich *et al.*, 2005; Gutierrez, 2006; Lopez, 2006), que indican una superposición temporal con el primer grupo.

4.3. Metodología

Para la realización del presente estudio se recopiló la información brindada por la empresa Coeur Argentina S.R.L. Esta información consistió en mapeos de interior mina (escala 1:500), logueos de

frentes de avance de los laboreos (escala 1:100), planillas de muestreo en techos y frentes de laboreos, y finalmente modelos digitales de bloques y sólidos de las estructuras mineralizadas.

Los mapeos de interior mina fueron ampliados y completados con la información proveniente de planillas de logueo de frentes de avance y de muestreos de canaletas, para luego ser digitalizados e incorporados a una base de datos GIS (Ver Anexo II) con el fin de realizar un análisis completo de geometría de los cuerpos mineralizados y su relación con la distribución de las leyes.

Posteriormente se recopilaron todos los datos disponibles de rumbo, buzamiento y espesor de las estructuras mineralizadas y de las fallas postminerales. Estos datos fueron completados y controlados con mediciones de campo en superficie y en los niveles del yacimiento que se encontraban activos al momento de realizarse los trabajos de campo.

La información estructural fue organizada en planillas de cálculo, expresada como rumbo de buzamiento (Rbz), y dividida en función del tipo de dato (veta/falla), el nombre de la veta, el nivel de la mina, y el espesor de la estructura mineralizada.

Finalmente, para el análisis de los datos estructurales y la realización de los diagramas de polos, se utilizó el software Georient V9.4.4 (Holcombe, 2009).

4.4. Controles estructurales en los cuerpos mineralizados

4.4.1. Distribución, orientación y continuidad de las estructuras mineralizadas

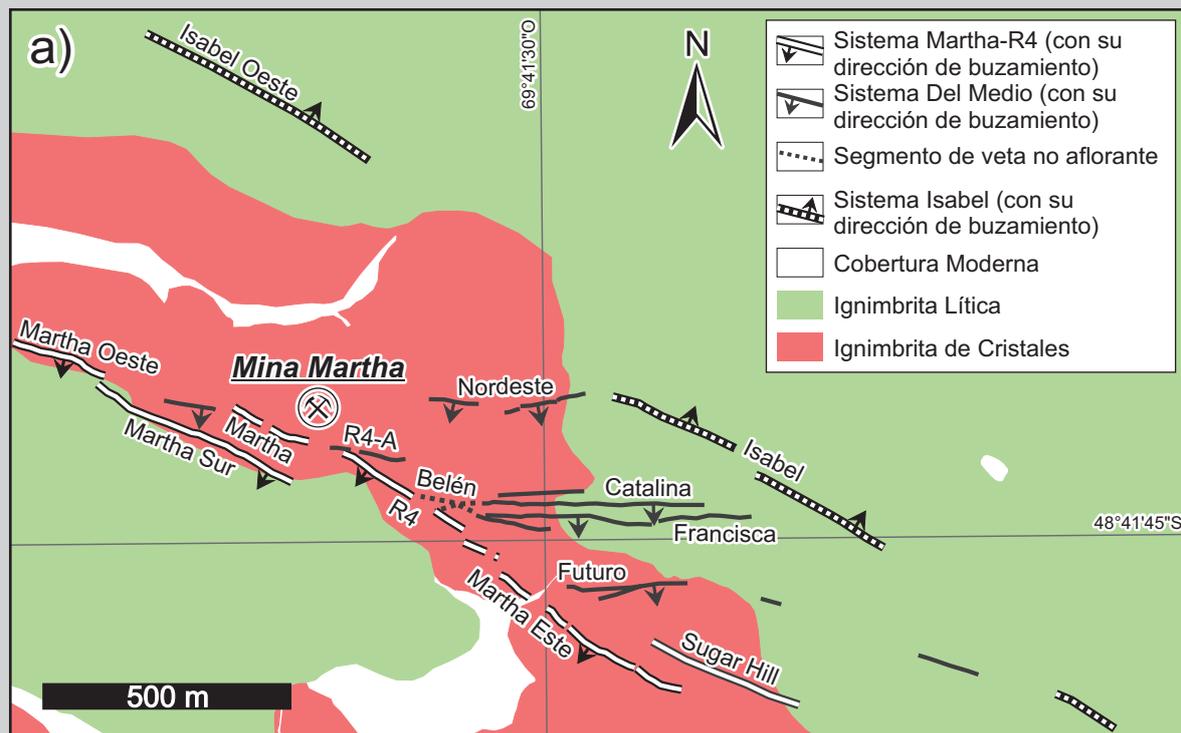
Las estructuras vetiformes presentes en Mina Martha están alojadas en ignimbritas pertenecientes al Complejo Volcánico Bahía Laura (Figura 4.2a). La mayor parte de los segmentos mineralizados con alta ley se encuentran emplazados en la Ignimbrita de Cristales y en la Ignimbrita Dacítica Fina, aunque también se ha reconocido mineralización económica cortando a las Ignimbritas Lítica y "Dacítica" (Capítulos 2 y 3).

Las vetas presentes en las inmediaciones de la mina pueden ser divididas en dos grandes sistemas de acuerdo a su orientación general (Figura 4.2a): un sistema de orientación NO-SE compuesto por las vetas Martha, R4, Martha Oeste, Martha Este, Martha Sur e Isabel que ha sido denominado como Sistema Martha-R4; y un sistema de orientación general E-O conformado por las vetas Belén, Francisca, Catalina, Nordeste, R4A y Futuro que fueron agrupadas bajo la denominación de Sistema del Medio.

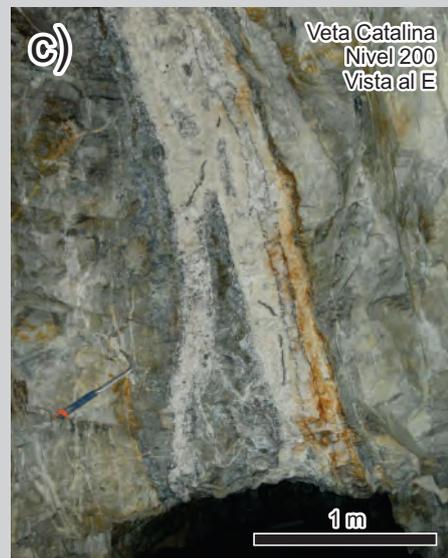
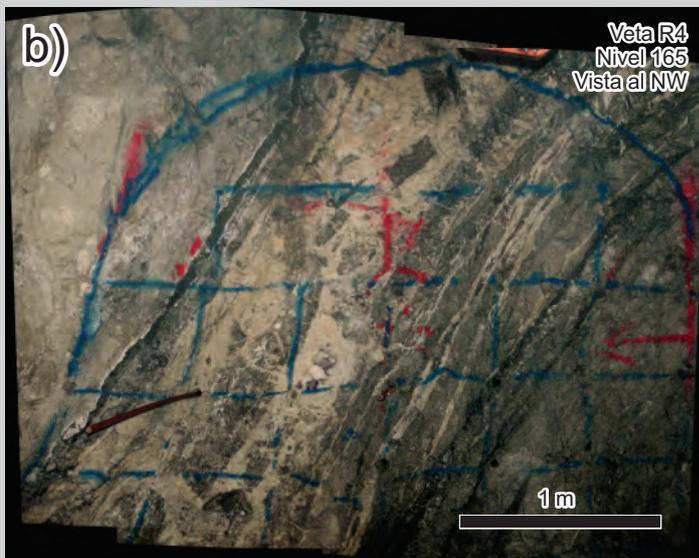
Para el análisis estructural del yacimiento se tuvieron en consideración únicamente las vetas puestas en explotación desde el inicio de actividades de la mina (Martha, R4, Belén, Catalina, Francisca y Nordeste), por ser éstas las que cuentan con un mejor acceso y un mayor volumen de información (Figura 4.2a).

El Sistema Martha-R4 está compuesto por una única estructura dividida informalmente en dos segmentos, denominados Veta Martha y Veta R4 (Figura 4.2a y b), que se caracterizan por una orientación general NO-SE y una inclinación de bajo ángulo hacia el SO. El mismo está compuesto por una red anastomosada de vetas y vetillas que se bifurcan y unen conformando una estructura continua con un espesor medio de 1,5 m y un máximo de hasta 5 metros (Figura 4.2b). El conjunto se desarrolla como una corrida mineralizada con afloramientos discontinuos de casi 600 m a lo largo del rumbo y hasta 250 m de profundidad según la inclinación.

Figura 4.2. Distribución de las vetas en Mina Martha



Distribución de las estructuras mineralizadas en Mina Martha: a) Mapeo de superficie mostrando la ubicación de las distintas estructuras mineralizadas y su relación con los tres sistemas de vetas propuestos.

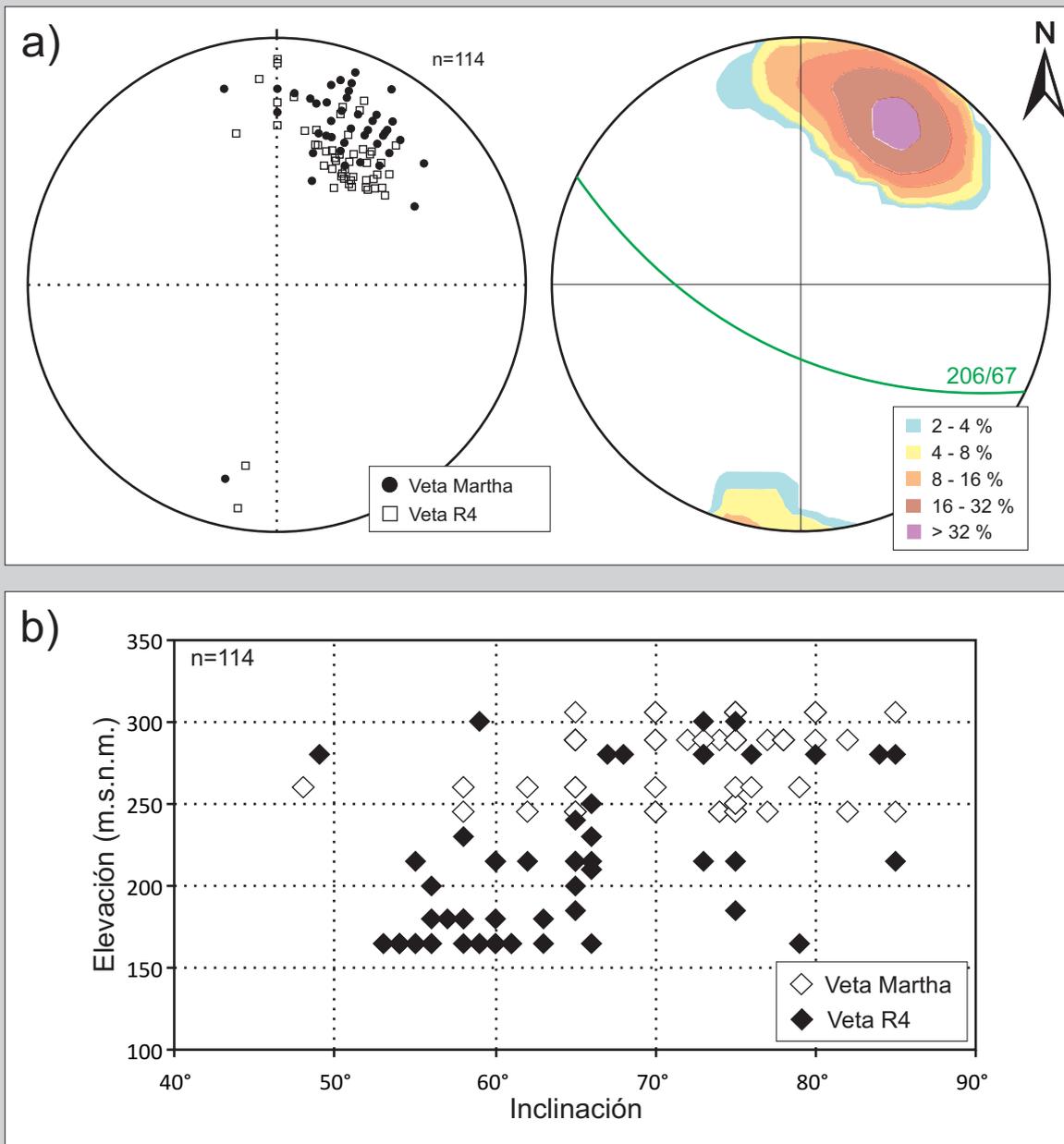


Aspecto general de las vetas en interior mina. c) Red anastomosada de vetas y vetillas conformando la Veta R4 (Sistema Martha-R4); d) Aspecto tabular de la veta Catalina (Sistema del Medio).

Como puede observarse en el diagrama de densidad de polos de la Figura 4.3a, este sistema está caracterizado por una dirección principal de orientación media con Rbz 206/67 que presenta una moderada variabilidad. Cuando se analizan las inclinaciones, se puede apreciar una progresiva disminución de las mismas al incrementarse la profundidad (Figura 4.3b), sugiriendo una posible geometría lítrica para esta estructura.

El Sistema del Medio está compuesto por varias estructuras subparalelas de rumbo general E-O e inclinación con alto ángulo hacia el S. Dentro de este sistema se encuentran las vetas Belén, Catalina,

Figura 4.3. Orientación de las vetas en Mina Martha

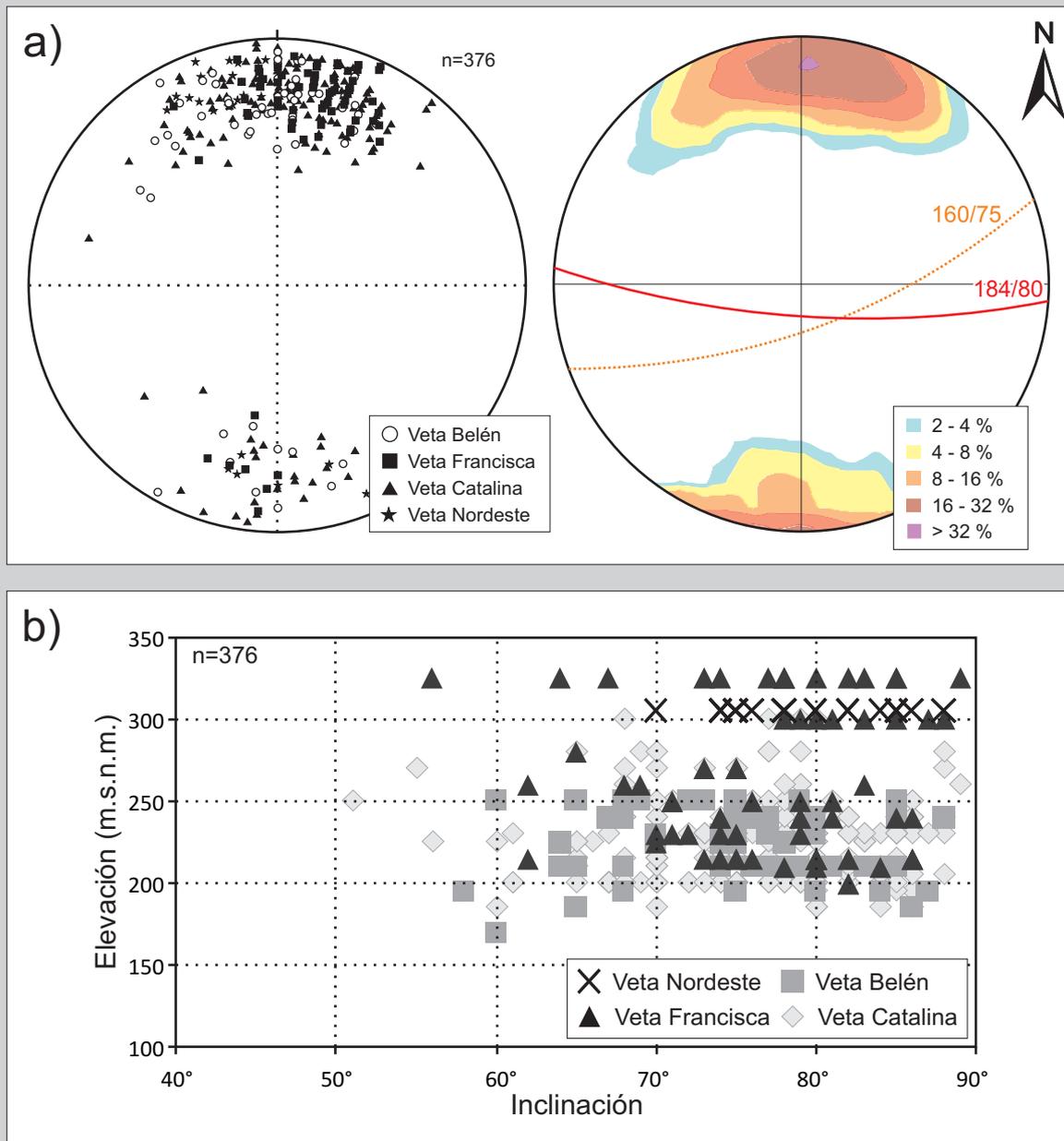


Geometría de los cuerpos mineralizados del sistema Martha-R4. a) Diagramas de polos mostrando la orientación de las principales estructuras mineralizadas (red de Wulff, hemisferio inferior). b) Gráfico bivariado mostrando la variación en las inclinaciones de las vetas en función de la profundidad.

Francisca y Nordeste (Figura 4.2a, b), que desarrollan espesores medios de entre 0,5 y 1 m, y que pueden alcanzar máximos de hasta 2,5 m. Las estructuras principales están caracterizadas por vetas continuas con geometrías tabulares (Figura 4.2c), que por sectores desarrollan ramificaciones oblicuas de menor espesor que las interconectan. El conjunto de vetas que conforman el Sistema del Medio desarrollan corridas mineralizadas de entre 150 y 450 m a lo largo del rumbo y hasta 200 m de profundidad según la inclinación.

Si bien todas las estructuras que componen este sistema poseen orientaciones con Rbz promedio ligeramente diferentes (Belén 178/79, Catalina 185/79, Francisca 191/80, Nordeste 167/85), en general están caracterizadas por una dirección principal con una orientación media de Rbz 184/80 (Figura 4.4a),

Figura 4.4. Orientación de las vetas en Mina Martha

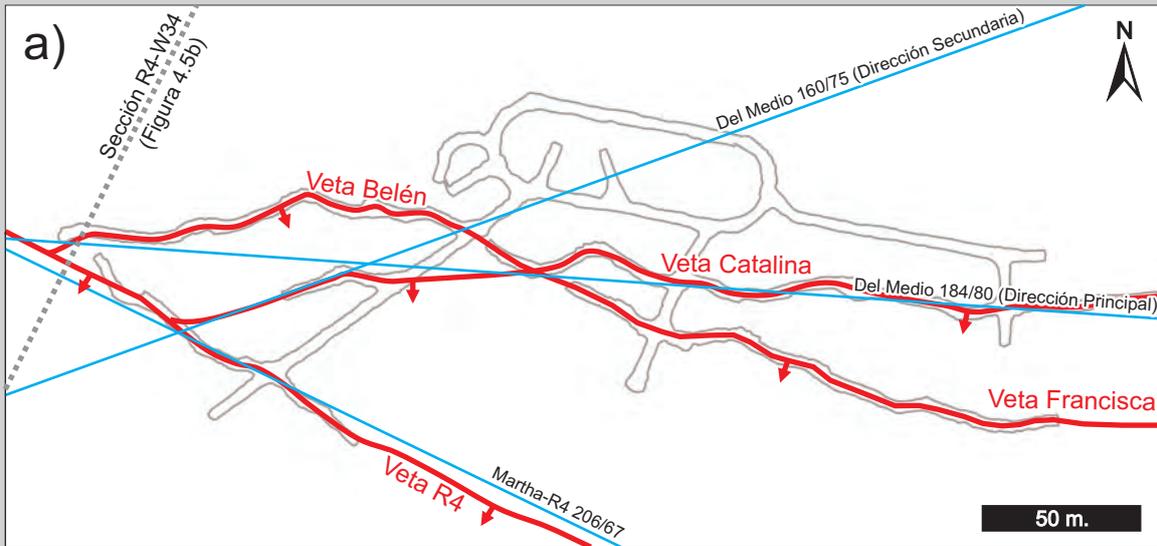


Geometría de los cuerpos mineralizados del Sistema del Medio. a) Diagramas de polos mostrando la orientación de las principales estructuras mineralizadas (red de Wulff, hemisferio inferior). b) Gráfico bivariado mostrando la variación en las inclinaciones de las vetas en función de la profundidad.

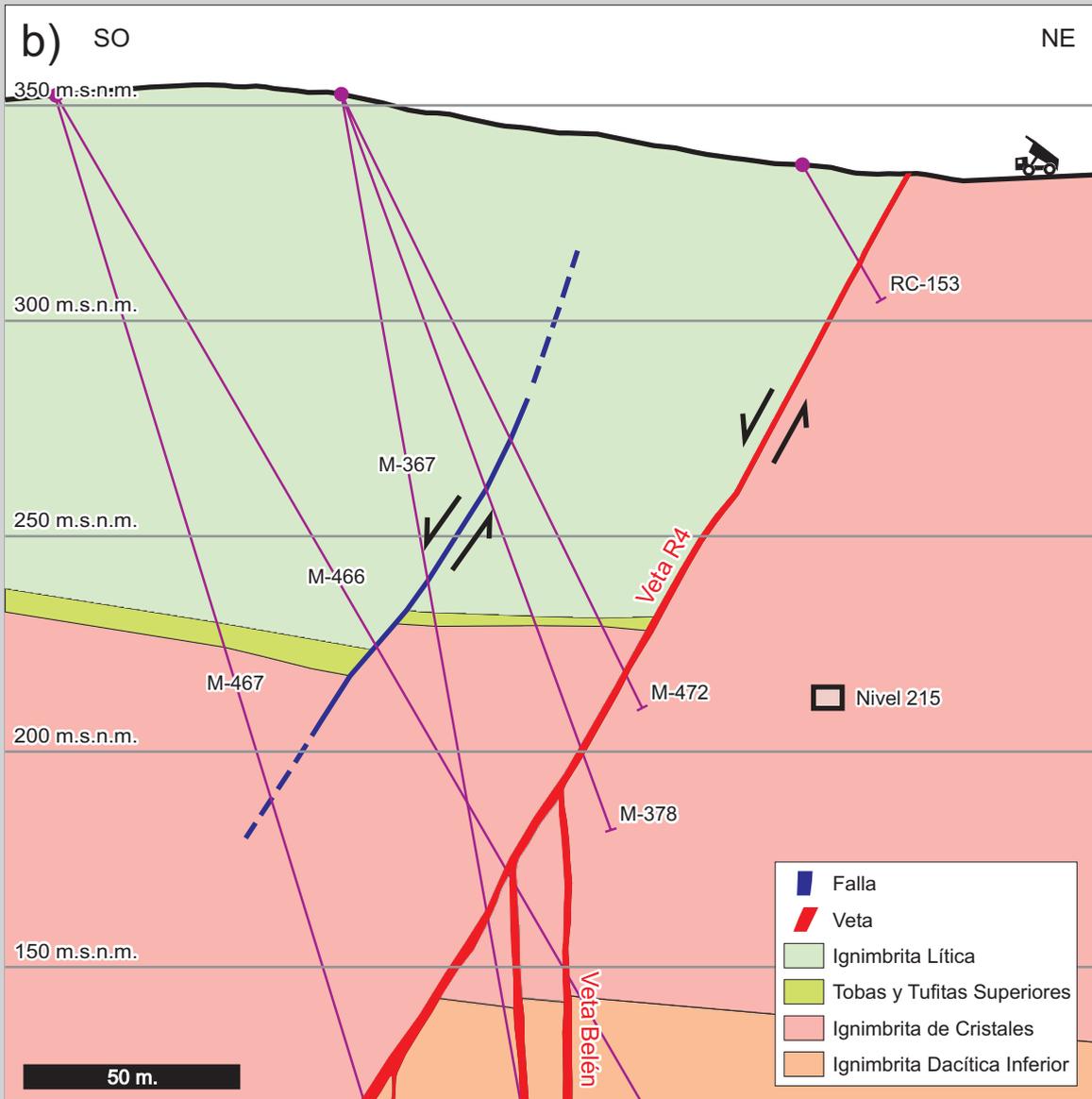
y una dirección secundaria con orientación de Rbz 160/75 que se encuentra subordinada en la mayoría de las estructuras con excepción de la Veta Nordeste, donde se corresponde con la dirección principal. Finalmente, y a diferencia del sistema anterior, los cuerpos mineralizados que lo componen se caracterizan por inclinaciones de alto ángulo en todos los niveles (Figura 4.4b).

El Sistema Martha-R4 se encuentra desarrollado dentro o en las proximidades de una falla normal bien definida que yuxtapone la Ignimbrita Lítica sobre la Ignimbrita de Cristales, y que genera desplazamientos de más de 120 m (Figura 4.5). La zona de falla posee entre 2 y 10 m de espesor y está caracterizada por una intensa fracturación dominada por la presencia de roca molida y fracturada. En los sectores más espesos la zona de falla presenta un aspecto anastomosado donde quedan englobados

Figura 4.5. Orientación de las vetas en Mina Martha



Mapa correspondiente al Nivel 185 de la mina mostrando las relaciones entre los principales sistemas de vetas.



Sección R4-W34 mostrando las relaciones entre los principales sistemas de vetas vistas en perfil.

fragmentos menos deformados de la roca de caja (Lee, 2005). Si bien los cuerpos mineralizados se desarrollan mayormente dentro de la zona de falla, también pueden observarse tanto en el bloque alto como en el bloque bajo de la falla.

Los cuerpos vetiformes que conforman el Sistema del Medio, se encuentran completamente desarrollados en el bloque bajo de la falla Martha-R4 (Figura 4.5) y a diferencia del anterior no están contenidos dentro de fallas preexistentes, aunque desarrollan pequeños desplazamientos normales de entre 5 y 20 m en los contactos entre la Ignimbrita de Cristales, las Tobas y Tufitas Inferiores y la Ignimbrita Dacítica Fina.

Dentro de este esquema las vetas Belén y Francisca conforman una única estructura que cruza a la Veta Catalina sin generar un desplazamiento aparente, formando un arreglo similar a una "x" en la parte central del sistema (Figura 4.5a). A medida que estas estructuras se aproximan al Sistema Martha-R4 cambian su orientación, haciéndose predominante la dirección secundaria del sistema, para luego converger y fusionarse con la Veta R4 (Figura 4.5).

4.4.2. Geometría del relleno en las estructuras mineralizadas

Para este trabajo se sigue la denominación utilizada por Micklethwaite (2009), quien considera a las vetas como rocas de falla que cementan estructuras a lo largo de las cuales ha ocurrido un desplazamiento de cizalla significativo, ya sea a lo largo de la inclinación (falla normal o inversa), a lo largo del rumbo (fallas transcurrentes), o bien de tipo mixto.

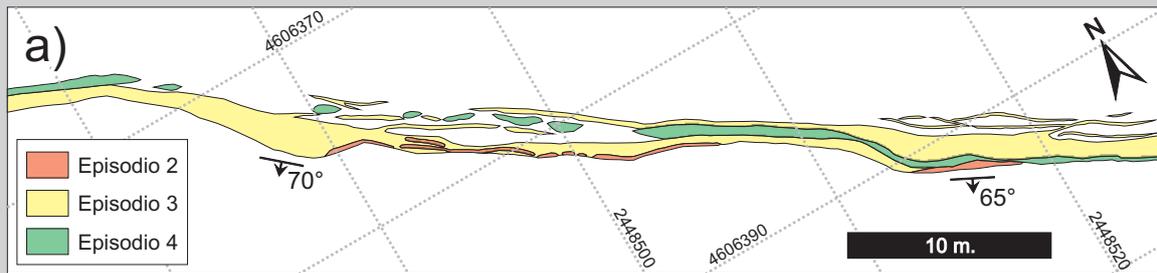
Las estructuras mineralizadas reconocidas en Mina Martha se caracterizan por un relleno hidrotermal compuesto por 9 etapas mineralizantes que pueden ser resumidas en 4 episodios (Capítulo 3). El primero de ellos (E1) se compone por una red de vetillas estériles de cuarzo con salbandas de adularia y se encuentra poco representado en el yacimiento.

El segundo episodio (E2) es el responsable de las altas leyes presentes en ambos sistemas de vetas del yacimiento, y está compuesto por 4 pulsos que muestran un contenido de sulfuros de plata y metales base progresivamente menor, y ganga de adularia y cuarzo con cantidades menores de sericita. Las texturas típicas de este episodio corresponden a brechas, aunque también pueden observarse sectores con bandeados crustiformes.

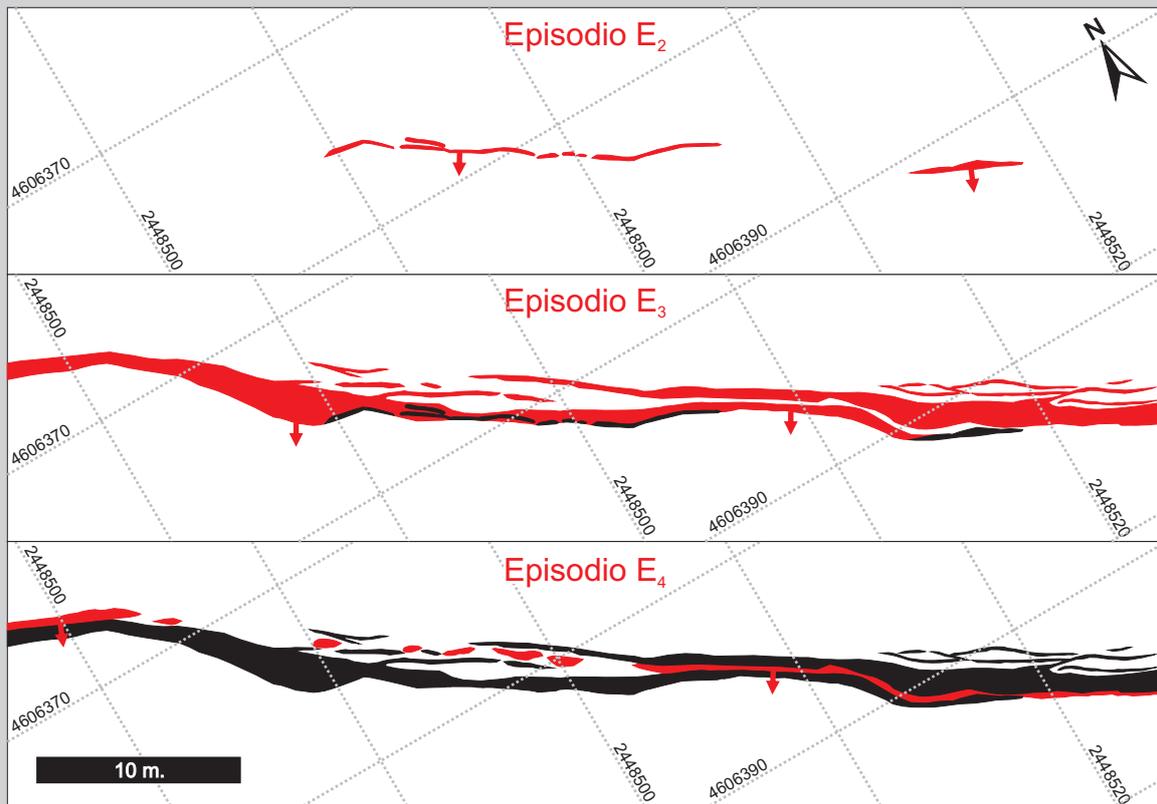
El tercer episodio (E3) consiste en 2 pulsos estériles caracterizados por abundante adularia masiva y cuarzo en menores proporciones. Estos pulsos poseen texturas típicamente brechosas y son de amplia distribución en todas las estructuras mineralizadas del yacimiento, llegando en algunos casos a constituir el 95% de las vetas.

Por último, el cuarto episodio (E4) está formado por dos etapas tardías que remobilizan parcialmente los metales depositados durante E2. Se caracteriza por brechas con relleno calcedónico discontinuas con un contenido de sulfuros fuertemente variable al que se asocian finas vetillas de sulfosales de plata que localmente pueden constituir una red densa. El mismo tiene una amplia distribución en el Sistema Martha-R4, sin embargo se encuentra ausente en el Sistema del Medio. Como fuese planteado en el Capítulo 3, este episodio corresponde a un evento tardío dentro del esquema paragenético de Mina Martha, sin embargo puede ser localmente muy importante ya que contribuye a incrementar la ley de la mineralización.

Figura 4.6. Geometría del relleno de las estructuras mineralizadas



Mapa del Nivel 289 de la Veta Martha, mostrando la distribución de los principales estadios de la mineralización (basado en los mapeos de González Guillot et al., 2004)



Crecimiento secuencial de la Veta Martha entre los episodios 2 y 4. En negro se grafican los segmentos preexistentes al momento de la deposición de cada episodio (en rojo).

Partiendo de los mapeos realizados por [Gonzalez Guillot et al. \(2004\)](#), se realizó un análisis de la distribución espacial de los episodios E₂, E₃ y E₄ dentro del relleno hidrotermal de la Veta Martha, a lo largo de 60 m del nivel 289 de la mina (Figura 4.6a).

Como puede observarse en la Figura 4.6 (a y b), el episodio de alta ley E₂ se desarrolla hacia el techo de la estructura formando dos segmentos desconectados, que desarrollan 20 m y 5 m de longitud según su rumbo y espesores que alcanzan hasta 0,4 m.

A diferencia del anterior, el episodio de baja ley E₃ se desarrolla mayormente hacia el piso de la estructura (Figura 4.6a y b), y se caracteriza por una elevada continuidad según su rumbo y por desarrollar importantes espesores de hasta 2 m.

Finalmente el episodio E₄, que desarrolla sectores de alta ley únicamente en las proximidades de E₂, está caracterizado por un desarrollo discontinuo dominado por cuerpos lenticulares separados entre 1 y 10 m (Figura 4.6a y b), y puede reconocerse tanto hacia el techo como hacia el piso de la estructura con

espesores máximos de hasta 0,7 m.

La presencia de sucesivas etapas de relleno es indicativa de múltiples episodios de apertura y relleno en las estructuras (Gonzalez Guillot *et al.*, 2004; Micklethwaite, 2009; Wallier, 2009), lo que sugiere que las fallas que contienen la mineralización crecieron en forma progresiva a medida que los fluidos circulaban y producían la depositación de la mineralización. Asimismo, la continuidad y similitud del relleno hidrotermal observado en ambos sistemas estaría sugiriendo que ambos conjuntos de vetas se originaron en forma simultánea.

Se denomina zonas o estructuras de transferencia (transfer structures) a las que conectan dos segmentos de falla vecinos, y que se generan como resultado del crecimiento y propagación de las mismas (Cunningham y Mann, 2008; Micklethwaite, 2009; Rossello, 2001; Rossello, 2009). Este tipo de estructuras son de tipo fractal, es decir que se repiten en forma independiente a la escala de observación; y reciben distintas denominaciones de acuerdo al arreglo geométrico y cinemático que presenten (rampas de relevo, solapamientos, resaltos o sigmoides, colas de caballo, etc.).

Mina Martha se caracteriza por la presencia de estructuras de transferencia en la mayoría de las vetas, aunque las mejores desarrolladas corresponden a las denominadas zonas de solapamiento y los sigmoides o resaltos extensionales.

Se denominan zonas de solapamiento (step-overs) a las áreas desarrolladas entre dos segmentos de falla/veta vecinos que presentan un arreglo en echelon, y que pueden o no estar conectadas por fallas/vetas de menor jerarquía (Micklethwaite, 2009). En el caso de Mina Martha (Figura 4.7), estas estructuras generalmente presentan dimensiones que van desde decenas de metros (Figura 4.7a) hasta unos pocos metros (Figura 4.7b y c), y en general los segmentos principales de veta se encuentran conectados por estructuras menores que terminan definiendo estructuras de tipo flor negativa (Figura 4.7b) (Cunningham y Mann, 2008; Rossello, 2001).

Los sigmoides (jogs) corresponden segmentos de estructura con geometría sigmoidal a lenticular que se dan como resultado de resaltos o cambios en el rumbo y/o la inclinación de las vetas (Micklethwaite, 2009; Rossello, 2009), y representan zonas de apertura localizada dentro de los sistemas de fallas/vetas. Ambos sistemas de vetas se caracterizan por la presencia de sigmoides dilatacionales con cinemática mixta de tipo normal-sinistral y variadas dimensiones (desde unos pocos centímetros hasta varias decenas de metros; Figura 4.8). Estos se desarrollan como rellenos de resaltos de alivio (releasing bends), principalmente a lo largo de cambios de rumbo e inclinación de las estructuras mineralizadas de ambos sistemas. Si bien Lee (2005) menciona la presencia de sigmoides desarrollados en resaltos constrictivos (restraining bends), los mismos no pudieron ser observados durante los trabajos de campo, por encontrarse en sectores inaccesibles de los laboreos mineros.

Si bien las estructuras observadas en el interior mina suelen estar caracterizadas por rellenos hidrotermales multipulso (donde participan mayormente E2 y E3), en algunos casos pueden observarse jogs rellenos con diferentes episodios que desarrollan geometrías similares, lo que estaría indicando que fueron formados bajo un mismo régimen tectónico (Figura 4.9).

Una característica de las estructuras mineralizadas reconocidas en Mina Martha es la diferencia textural que existe en los rellenos de las estructuras pertenecientes a los dos grandes sistemas de vetas. Las vetas del Sistema Martha-R4 se caracterizan por jogs dilatacionales de varios metros de extensión que están rellenos por material hidrotermal dominado por texturas típicamente brechosas, donde los

Figura 4.7. Zonas de transferencia



Zonas de transferencia en los diferentes sistemas de vetas de Mina Martha. a) Zona de transferencia en las vetas del Medio, desarrollada entre la Veta Francisca y la Veta Catalina (nivel 270); (b) Zona de transferencia dentro de la Veta R4 (nivel 280); c) Zona de transferencia con desarrollo de vetillas tensionales en la Veta Futuro. Vista en Superficie.

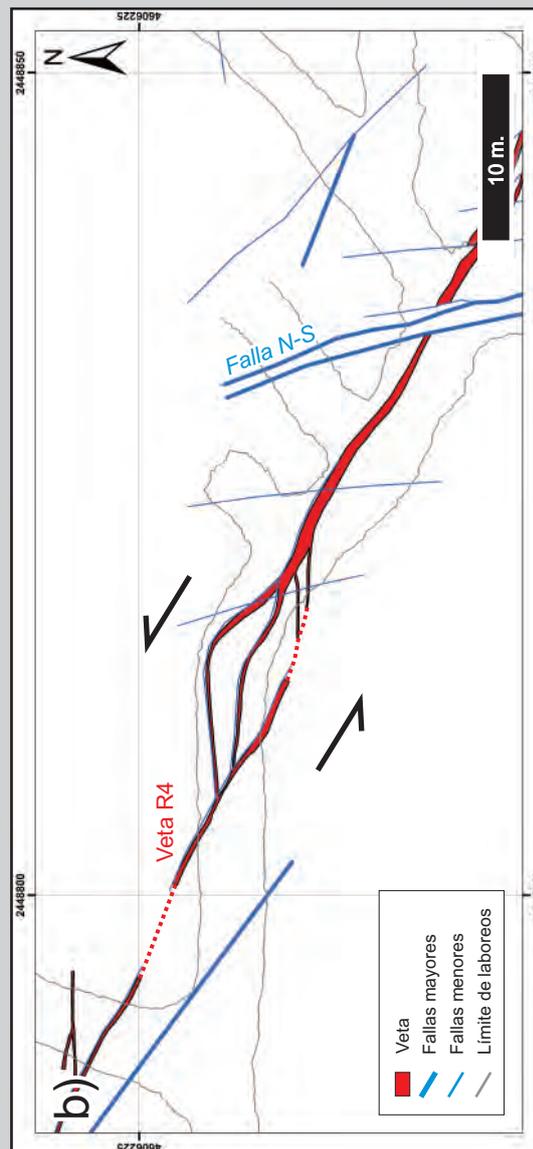
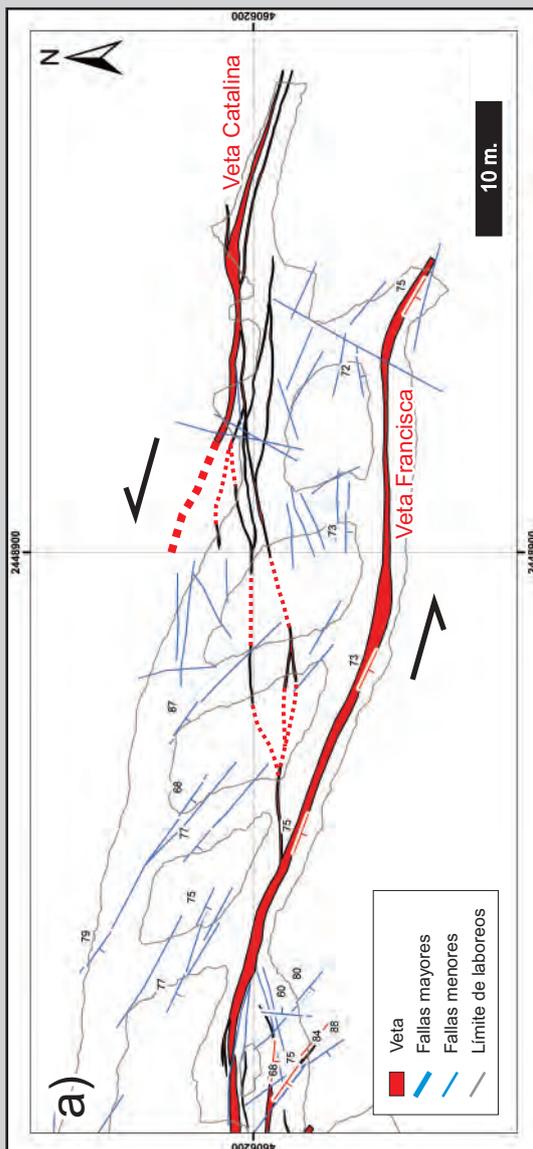
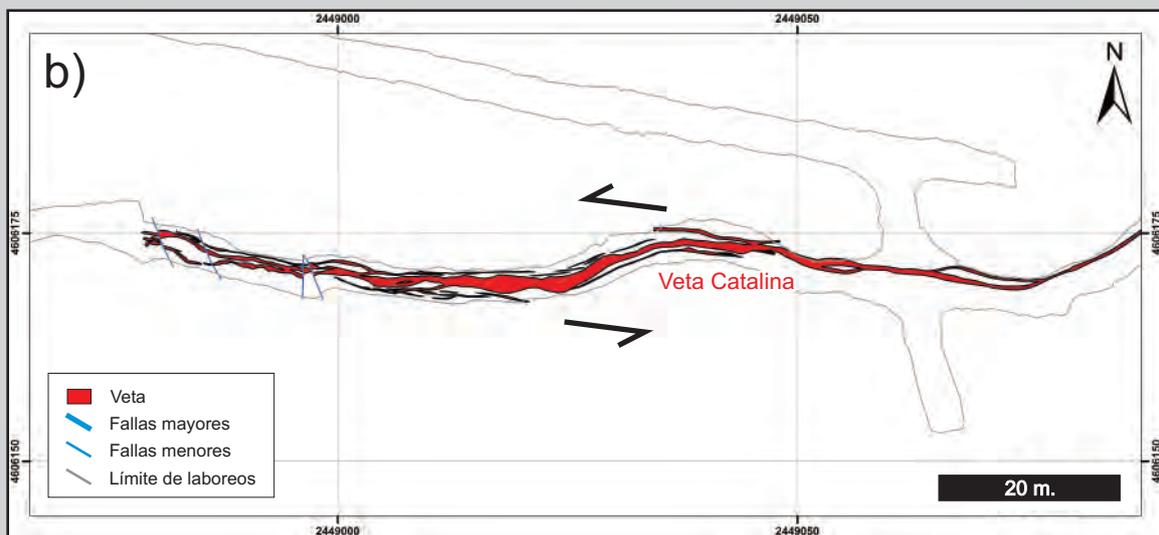
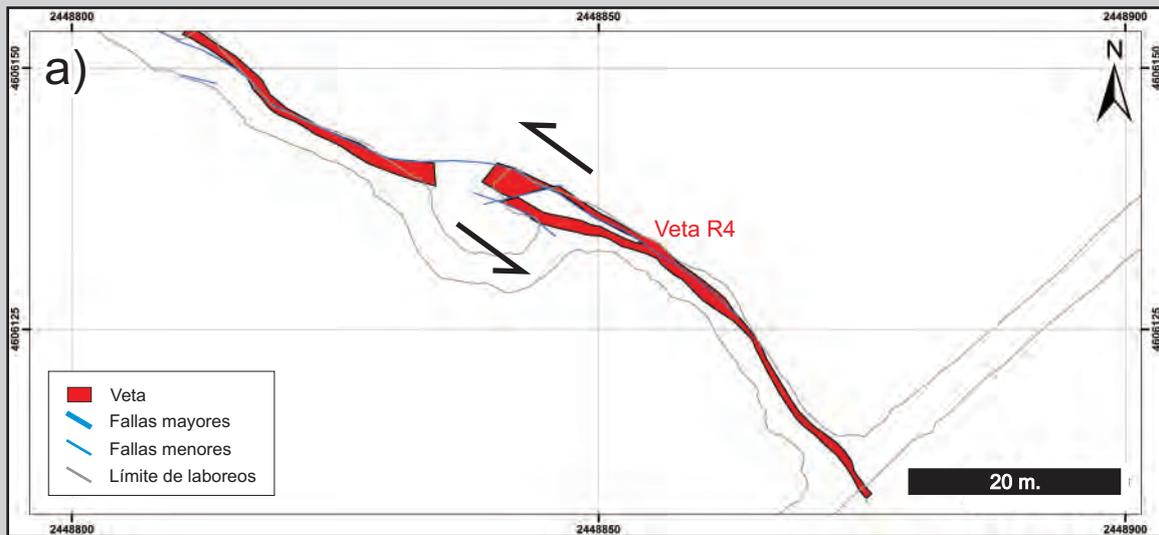
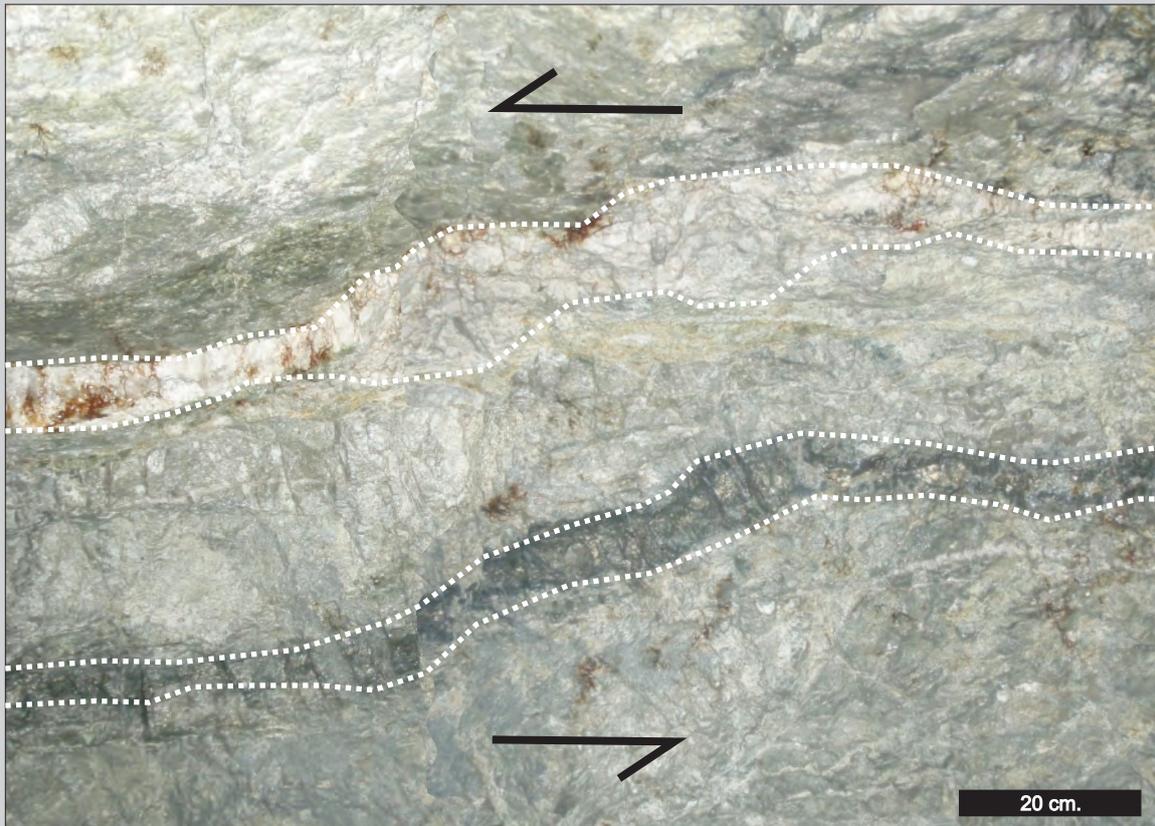


Figura 4.8. Jogs dilatacionales



Jogs dilatacionales en los diferentes sistemas de vetas de Mina Martha. a) Sigmoide sinestral en la Veta R4 (Nivel 200); b) Sigmoide sinestral en la Veta Catalina (Nivel 170); c) Fotografía de un sigmoide sinestral en la Veta Martha Sur (Superficie); d) Vista en planta de un sigmoide sinestral en la Veta Catalina (Superficie).

Figura 4.9. Tipo de rellenos en jogs dilatacionales



Sigmoides sinestrales en Veta Belén (Nivel 170). El sigmoide superior se encuentra relleno con material hidrotermal correspondiente al episodio E3 (estéril), en tanto que el sigmoide inferior está caracterizado por relleno correspondiente al episodio E2 (mineralizado).

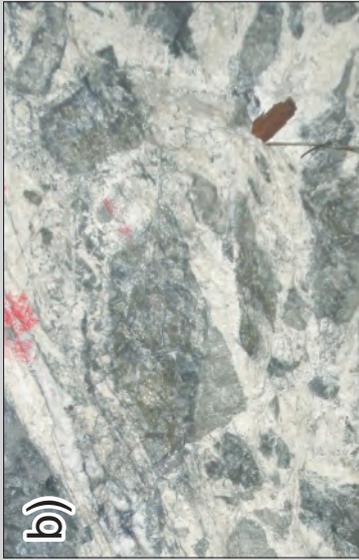
bandeados costriformes y los espacios abiertos están prácticamente ausentes o muy restringidos (Figura 4.10a y b). A diferencia del sistema anterior, el Sistema del Medio se caracteriza por jogs mas pequeños caracterizados por rellenos hidrotermales donde predominan los bandeados costriformes y el desarrollo de grandes cavidades drusiformes ubicadas en los sectores centrales (Figura 4.10c y d), y si bien pueden reconocerse sectores brechosos, éstos son de extensión restringida dentro de los sigmoides. Como el relleno hidrotermal observado en ambos sistemas se originó en forma sincrónica, las diferencias texturales observadas estarían indicando que el Sistema del Medio acomodó un mayor porcentaje de apertura que el Sistema Martha-R4, que habría soportado una mayor componente de cizalla.

4.4.3. Cinemática de las estructuras mineralizadas

Durante los trabajos de campo no se pudieron observar estriados, ni una orientación preferencial de las fibras minerales dentro de las estructuras mineralizadas, lo que dificultó la determinación de la dirección de apertura de las vetas. No obstante, la geometría de los sigmoides (jogs), zonas de transferencia (step-overs) y lo observado en las secciones geológicas, permiten interpretar un desplazamiento mixto de tipo normal-sinistral para todos los sistemas de vetas (Figuras 4.5b, 4.7 y 4.8).

Si bien la presencia de rellenos hidrotermales es indicativo de una importante apertura en ambos sistemas de vetas, las diferencias texturales observadas en los sigmoides, sugieren una mayor componente de dilatación en el Sistema del Medio en comparación con lo observado en las estructuras

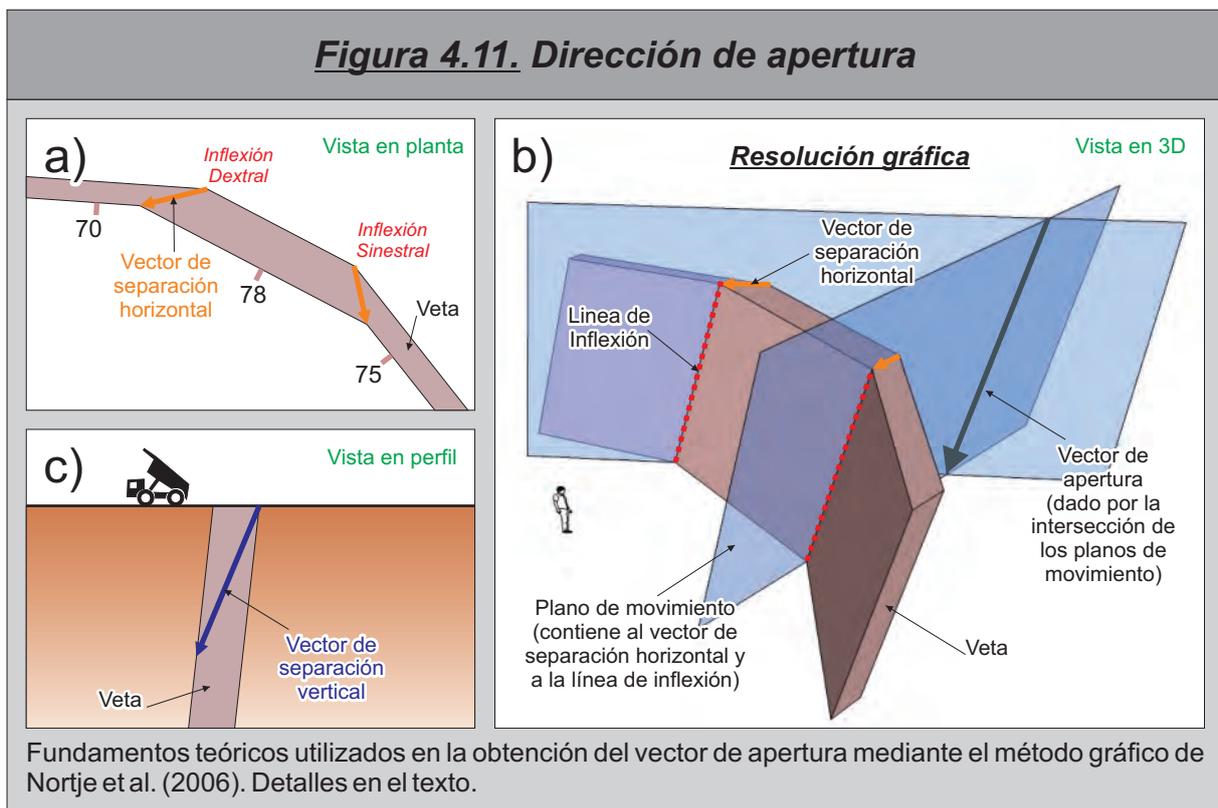
Figura 4.10. Texturas en jogs dilatacionales



a) Sigmoide sinistral en Veta R4 (Nivel 165), caracterizado por la presencia de brechas con relleno de cuarzo y adularia masivos. b) Detalle de las brechas.



c) Sigmoide sinistral en Veta Catalina (Nivel 185), caracterizado por la presencia de grandes espacios abiertos ocupados por drusas de cuarzo y adularia. d) Detalle de las drusas.



que componen el Sistema Martha-R4.

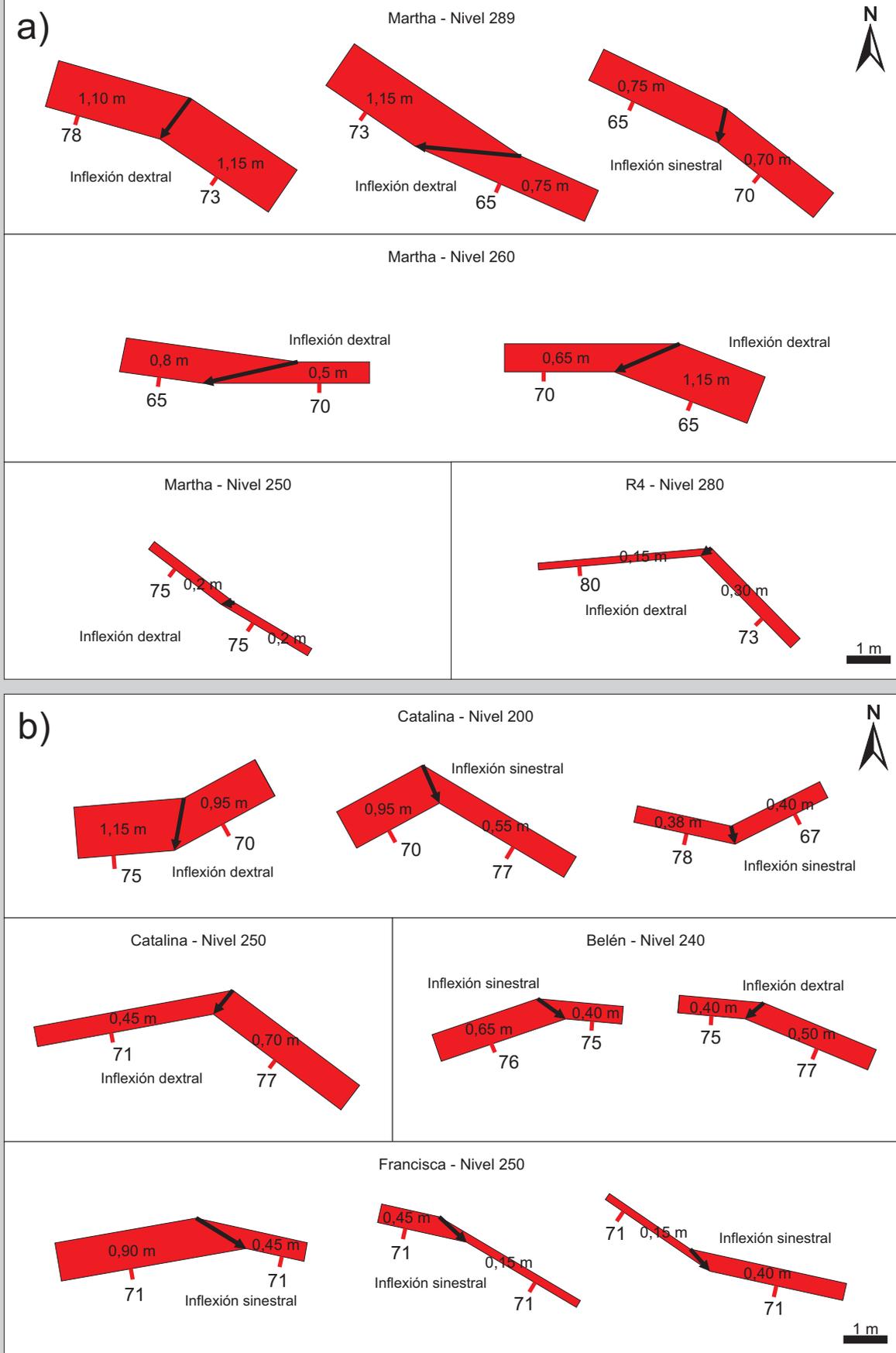
Nortje *et al.* (2006) desarrolló una metodología para calcular el vector de apertura de estructuras vetiformes utilizando las orientaciones de inflexiones presentes en las estructuras mineralizadas. Una inflexión corresponde a la unión de dos segmentos planares de veta que poseen una orientación diferente (Figura 4.11a), de acuerdo al ángulo que formen ambos segmentos estos pueden tener o no el mismo espesor. Para poder utilizar este método ambos segmentos deben haberse formado simultáneamente; asunción que en Mina Martha está apoyada por la continuidad del relleno hidrotermal a ambos lados de las inflexiones.

La geometría de las inflexiones pueden ser descritas con los términos “dextral” y “sinistral” (Figura 4.11a) realizando una analogía con los sigmoides extensionales. Éstas inflexiones pueden relacionarse con el sentido del desplazamiento de la estructura, de manera que los segmentos de veta más finos acomodan la mayor cantidad de desplazamiento de rumbo, en tanto que el segmento más grueso tiende a acomodar la mayor cantidad de apertura.

Cuando dos segmentos de la veta con orientaciones diferentes se encuentran (Figura 4.11b), se generan dos líneas de inflexión (una ubicada en el techo y otra en el piso de la veta) que definen el plano de movimiento. En ese plano está contenido el vector de apertura de la veta. Sin embargo solamente con esa información, el vector de apertura de la estructura no queda definido, y cualquier distancia medida entre las dos líneas de inflexión corresponde a una separación aparente (Figura 4.11a y c), y no se corresponde necesariamente con la dirección del vector de apertura.

Cuando existen varias inflexiones con diferentes orientaciones en una misma estructura que se han abierto simultáneamente, estas definen planos de movimiento de diferente orientación (Figura 4.11b). Dado que dentro de cada uno de estos planos está incluido el vector de apertura, la intersección estadística de todos esos planos terminará por definir el vector de apertura para la estructura mineralizada (Nortje *et al.*, 2006).

Figura 4.12. Inflexiones en las vetas de Mina Martha

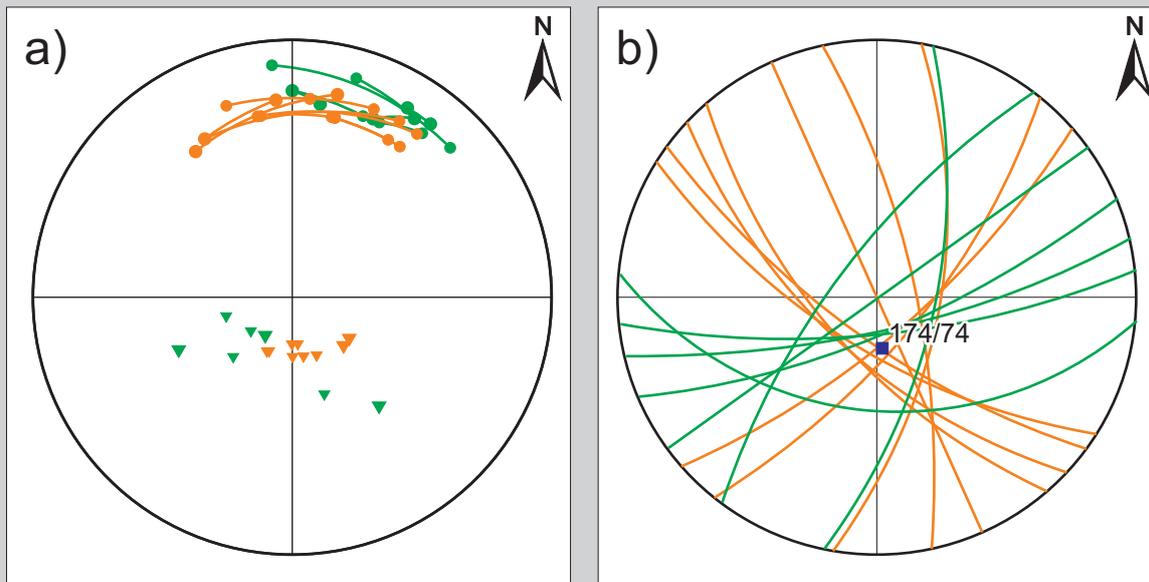


Inflexiones reconocidas en los principales sistemas de vetas de Mina Martha. a) Sistema Martha-R4; b) Sistema del Medio.

Tabla 4.1. Análisis cinemático de las inflexiones

Sistema	Nivel	Segmento	Tipo de inflexión	Segmento				Linea de Inflexión		Vector Horizontal de Apertura		Plano de Movimiento	
				Rumbo	Rbz	Inclinación	Espezor	Dirección	Buzamiento	Dirección	Buzamiento	Rbz	Inclinación
Sistema Martha - R4	Martha - N289	A	Dextral	106	196	78	1,1	254	68	217	0	307	76
				124	214	73	1,15						
	Martha - N289	B	Dextral	124	214	73	1,15	142	45	275	0	185	54
				114	204	65	0,75						
	Martha - N289	C	Sinestral	116	206	65	0,75	162	57	192	0	102	72
				128	218	70	0,7						
	R4 - N280	D	Dextral	85	175	80	0,15	230	73	234	0	144	89
				136	226	73	0,3						
	Martha - N260	E	Dextral	98	188	65	0,8	244	50	257	0	167	79
				90	180	70	0,5						
Martha - N260	F	Dextral	90	180	70	0,65	224	63	247	0	157	79	
			111	201	65	1,15							
Martha - N250	G	Dextral	128	218	75	0,2	215	75	264	0	174	79	
			121	211	75	0,2							
Sistema del Medio	Catalina - N200	H	Dextral	85	175	75	1,15	127	68	190	0	100	70
				61	151	70	0,95						
	Catalina - N200	I	Sinestral	61	151	70	0,95	159	70	156	0	246	89
				121	211	77	0,55						
	Catalina - N200	J	Sinestral	102	192	78	0,38	135	68	168	0	78	78
				63	153	67	0,4						
	Catalina - N250	K	Dextral	79	169	71	0,45	171	71	219	0	129	76
				127	217	77	0,7						
	Bélen - N240	L	Sinestral	71	161	76	0,65	182	75	126	0	216	77
				95	185	75	0,4						
Bélen - N240	M	Dextral	95	185	75	0,4	175	75	229	0	139	78	
			113	203	77	0,5							
Francisca - N250	N	Sinestral	80	170	71	0,9	181	71	122	0	212	74	
			103	193	71	0,45							
Francisca - N250	O	Sinestral	103	193	71	0,45	205	71	133	0	223	72	
			121	211	71	0,15							
Francisca - N250	P	Sinestral	125	215	71	0,15	205	71	139	0	229	73	
			102	192	71	0,4							

Figura 4.13. Análisis cinemático según Nortje et al. (2006)



Resolución gráfica por el método de Nortje et al. (2006) para las vetas de Mina Martha. a) Obtención del Rbz de las líneas de inflexión (triángulos) a partir de ambos segmentos de las inflexiones de la Figura 4.12 (círculos unidos por líneas); b) Intersección estadística de los planos de movimiento. Red de Wulff, hemisferio inferior (Verde: Sistema Martha-R4, Naranja: Sistema del Medio).

Para las vetas Martha y R4 se pudieron reconocer un total de siete inflexiones, seis de ellas dextrales y una única inflexión sinistral (Figura 4.12a); en tanto que para las Vetas del Medio se pudieron mapear nueve inflexiones, tres de ellas dextrales y seis sinestrales (Figura 4.12b). Dado que todas las estructuras fueron generadas bajo el mismo régimen tectónico, los datos de ambos sistemas de vetas fueron tratados juntos para aumentar la eficacia estadística del método.

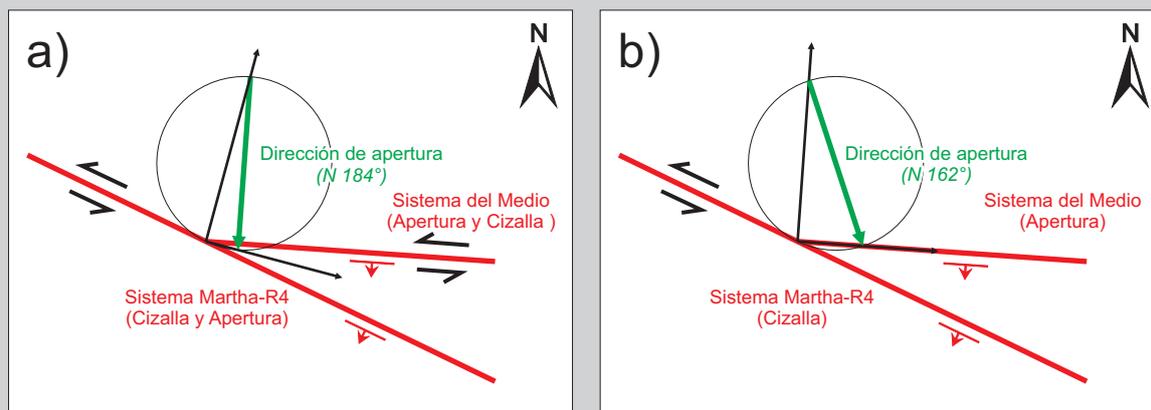
De esta manera, utilizando la orientación de los dos segmentos planares de la veta que definen una inflexión, es posible determinar la orientación de la línea de inflexión (Figura 4.13a). Una vez obtenida esta orientación, es posible determinar la orientación del plano de movimiento al combinarla con la orientación del vector de separación horizontal medido sobre cada inflexión de la estructura (Figura 4.13b). Por último, la reconstrucción de los dieciséis planos de movimiento (Tabla 4.1 y Figura 4.13b) definen un vector de apertura (intersección estadística) con un Rbz medio de 174/74.

Con el fin de cotejar los resultados del método de Nortje et al. (2006), se utilizó el método gráfico de McCoss (1986) para determinar la dirección de apertura en las estructuras mineralizadas. Al tratarse de una construcción geométrica sencilla, este método gráfico presenta la ventaja de ser rápido y expeditivo. El método consiste en determinar dos direcciones principales en función de observaciones de campo: la orientación de la zona de falla que acomoda la mayor deformación por cizalla, y la dirección de máxima apertura dentro de esa zona de falla (a partir de fibras minerales orientadas, sigmoides, vetas tensionales, etc.).

En el caso de Mina Martha, las observaciones de campo muestran que ambos sistemas de vetas están caracterizados por un desplazamiento mixto con una componente de cizalla y una componente de apertura. Sin embargo la componente de cizalla parece ser mayor en el Sistema Martha-R4 que en el Sistema del Medio donde la apertura predomina por sobre la cizalla.

Estas características permiten plantear dos hipótesis contrastantes utilizando las orientaciones

Figura 4.14. Análisis cinemático según McCoss (1986)



Resolución gráfica según el método de McCoss (1986) utilizando las orientaciones medias de ambos sistemas de vetas. Para obtener el vector de apertura se consideraron dos hipótesis de máxima: a) La primera de ellas supone una igual proporción de cizalla y apertura en ambos sistemas de vetas; b) En la segunda se asume que el Sistema Martha-R4 acomoda toda la deformación por cizalla mientras que el Sistema del Medio acomoda toda la apertura.

medias de cada sistema de vetas. La primera de ellas supone que ambos sistemas experimentaron iguales proporciones de cizalla y apertura (Figura 4.14a). La segunda hipótesis consiste en que el sistema Martha-R4 acomoda toda la deformación por cizalla y que el Sistema del Medio representa una situación de apertura pura (Figura 4.14b). De acuerdo a lo expuesto y a las construcciones geométricas de la Figura 4.14, la dirección de apertura tendría una orientación que se encontraría entre N184° y N162°, y cuyo valor promedio es N173°.

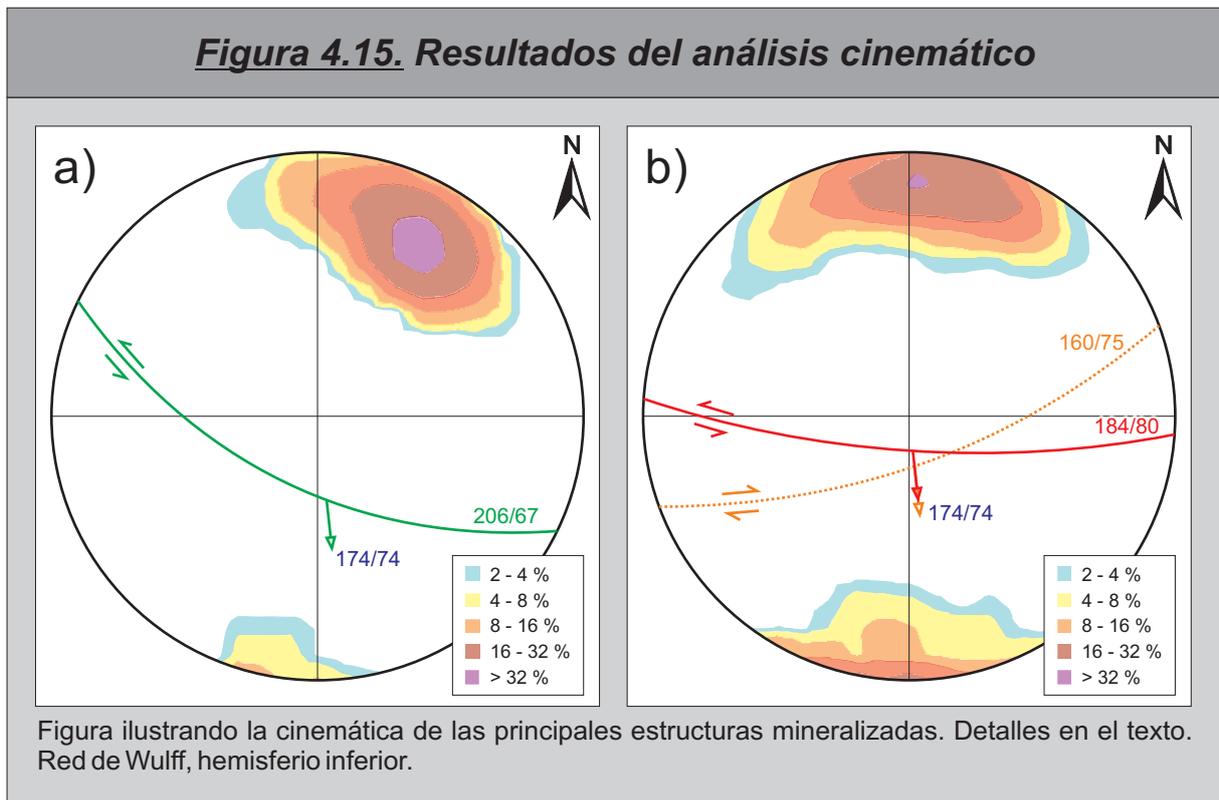
Al comparar los resultados, ambos métodos coinciden en que las vetas se formaron bajo un régimen extensional con un vector de apertura orientado hacia el SSE, con azimut promedio de N174° según Nortje *et al.* (2006) y N173°±11° según McCoss (1986), y una inclinación media de 74° (Nortje *et al.*, 2006).

Cuando estas direcciones son analizadas en función de las orientaciones de ambos sistemas de vetas (Figura 4.15), se puede apreciar que ambos sistemas se caracterizan por una cinemática mixta de tipo normal-sinistral que es acompañada por una importante dilatación.

Dentro de este esquema, las estructuras Martha y R4 acomodan la mayor parte de la deformación por cizalla mediante un desplazamiento de tipo normal con una importante componente sinistral (Figura 4.15a). A diferencia del anterior, las estructuras del Sistema del Medio se caracterizan por dos cinemáticas opuestas, donde la dirección principal estaría caracterizada por un desplazamiento normal-sinistral y la dirección secundaria por un comportamiento normal-dextral (Figura 4.15b). Sin embargo, en ambos casos, el desplazamiento según el rumbo se encuentra subordinado respecto al desplazamiento según la inclinación.

Este esquema cinemático propuesto es coherente con la geometría de los sigmoides, las zonas de transferencias y las diferencias texturales reconocidas tanto sobre la veta Martha-R4 como en la dirección principal de las vetas del Medio. No obstante, en el caso de la dirección secundaria del Sistema del Medio, las observaciones de campo no son suficientes como para corroborar o descartar el posible comportamiento normal-dextral descrito anteriormente.

Figura 4.15. Resultados del análisis cinemático



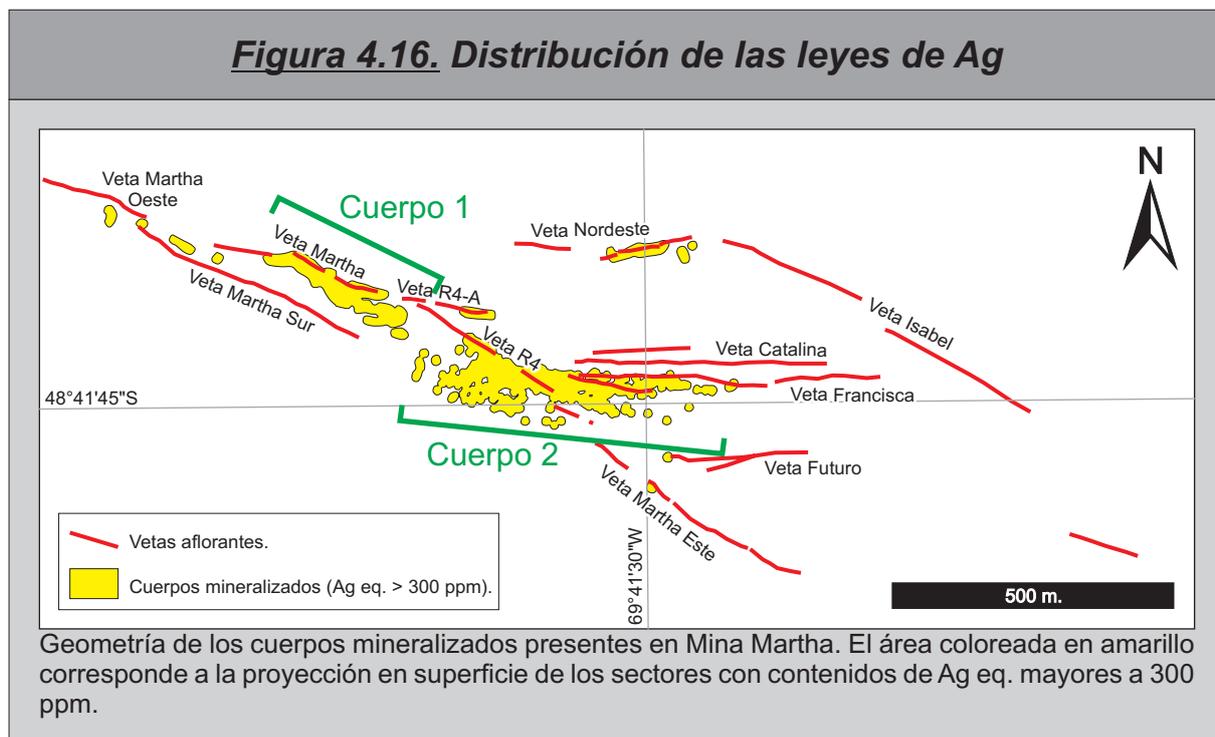
4.4.4. Controles sobre las leyes de la mineralización

Mina Martha conforma un yacimiento caracterizado por una mineralización principalmente argentífera, con oro, metales base, arsénico y antimonio asociados (Capítulo 3; [Gonzalez Guillot et al., 2004](#); [Sims, 2010](#)). Las vetas presentes en ambos sistemas mineralizados poseen contenidos medios de plata en el orden de los 3.500 g/t, que pueden llegar a alcanzar valores máximos de hasta 20.000 g/t ([Schalamuk et al., 2002](#); [Páez et al. 2008](#); [Sims, 2010](#)). La mineralización reconocida hasta el momento en ambos sistemas de vetas se caracteriza por formar clavos (ore shoots) en general discontinuos y con geometría irregular (Figuras 4.16, 4.17 y 4.18), donde se pueden reconocer varios órdenes de magnitud en función de su dimensión, orientación y continuidad.

A escala de yacimiento pueden reconocerse dos grandes áreas donde se desarrollan los sectores de alta ley (Cuerpo 1 y Cuerpo 2 de la Figura 4.16), el primero de ellos compuesto por los tramos de alta ley de la veta Martha y R4-A, y el segundo de ellos agrupando los tramos más ricos de las vetas R4, Catalina, Belén y Francisca. Dentro de este esquema, también pueden reconocerse otros tramos mineralizados de menor jerarquía en las vetas Nordeste, R4-A y Martha Oeste.

En la Figura 4.16 puede observarse que los sectores de alta ley con mayor desarrollo dentro del yacimiento se encuentran principalmente en las proximidades de las intersecciones entre estructuras mineralizadas. En el caso del Cuerpo 1, la zona de alta ley se desarrolla hacia la intersección entre la veta Martha y la veta R4-A, mientras que en el caso del Cuerpo 2 se da entre la veta R4 y el Sistema del Medio. La misma tendencia se observa con las zonas de alta ley de la veta Nordeste, en las proximidades de la veta Isabel, y en el caso Martha Oeste cerca de la intersección con las vetas Martha y Martha Sur. En todos los casos, las zonas de alta ley se cierran progresivamente al alejarse de las respectivas intersecciones. Este comportamiento está señalando un fuerte control estructural para los sectores mineralizados dentro del yacimiento.

Figura 4.16. Distribución de las leyes de Ag



Según las secciones longitudinales de las principales vetas (Figuras 4.17 y 4.18), pueden reconocerse dos órdenes de magnitud para los clavos de alta ley. Los clavos de primer orden se desarrollan como zonas amplias que ocupan casi toda la longitud de las estructuras mineralizadas, por lo que su superficie puede exceder los 15.000 m². Se caracterizan por leyes medias a altas, aunque suelen ser irregulares e incluir sectores de baja ley. Estos clavos conforman sectores con una inclinación general muy suave, que definen un rake sobre el plano de las vetas que inclina entre 10° y 15° hacia el sudeste. Estos niveles subhorizontales están desarrollados en las proximidades de cambios litológicos en la roca de caja de las vetas, y son el resultado de la superposición en el espacio de varios clavos de segundo orden.

Los clavos de segundo orden son más pequeños que los anteriores, en general no superan los 2.500 m², y están definidos por zonas de mayor ley dentro de los clavos de primer orden. Estos clavos forman zonas conspicuas de muy alta ley dentro de las vetas, y presentan una inclinación opuesta a los clavos de primer orden, con rakes medidos sobre el plano de la veta que varían entre 30° y 40° hacia el sudoeste (Figuras 4.17 y 4.18).

Existe una correlación entre la posición de los clavos de segundo orden y los sigmoides extensionales observados en ambos sistemas de vetas. En el perfil MH-11 (Figura 4.19) se puede apreciar que un tramo de alta ley de la veta Martha coincide con un sector subvertical de la veta que define una zona de apertura con geometría sigmoidal. Al analizar la posición de este perfil dentro de la sección longitudinal correspondiente a la veta Martha (Figura 4.17 y 4.19), se puede reconocer una correspondencia entre este sigmoide y uno de los clavos mineralizados de segundo orden. Algo similar puede observarse en la sección R4-E25 y en el nivel 170 (Figura 4.20 y Figura 4.8b), donde la mineralización de alta ley se asocia a estructuras sigmoidales desarrolladas en las vetas Catalina y Francisca. Al considerar la posición de este perfil en la sección longitudinal de la veta Catalina (Figura 4.18), también se puede observar una correlación entre la estructura sigmoidal y uno de los clavos de segundo orden.

De lo expuesto anteriormente, se puede concluir que el rake de los clavos de segundo orden corresponde al eje mayor de los sigmoides extensionales. Esta orientación es aproximadamente

Figura 4.17. Sección longitudinal de la veta Martha-R4

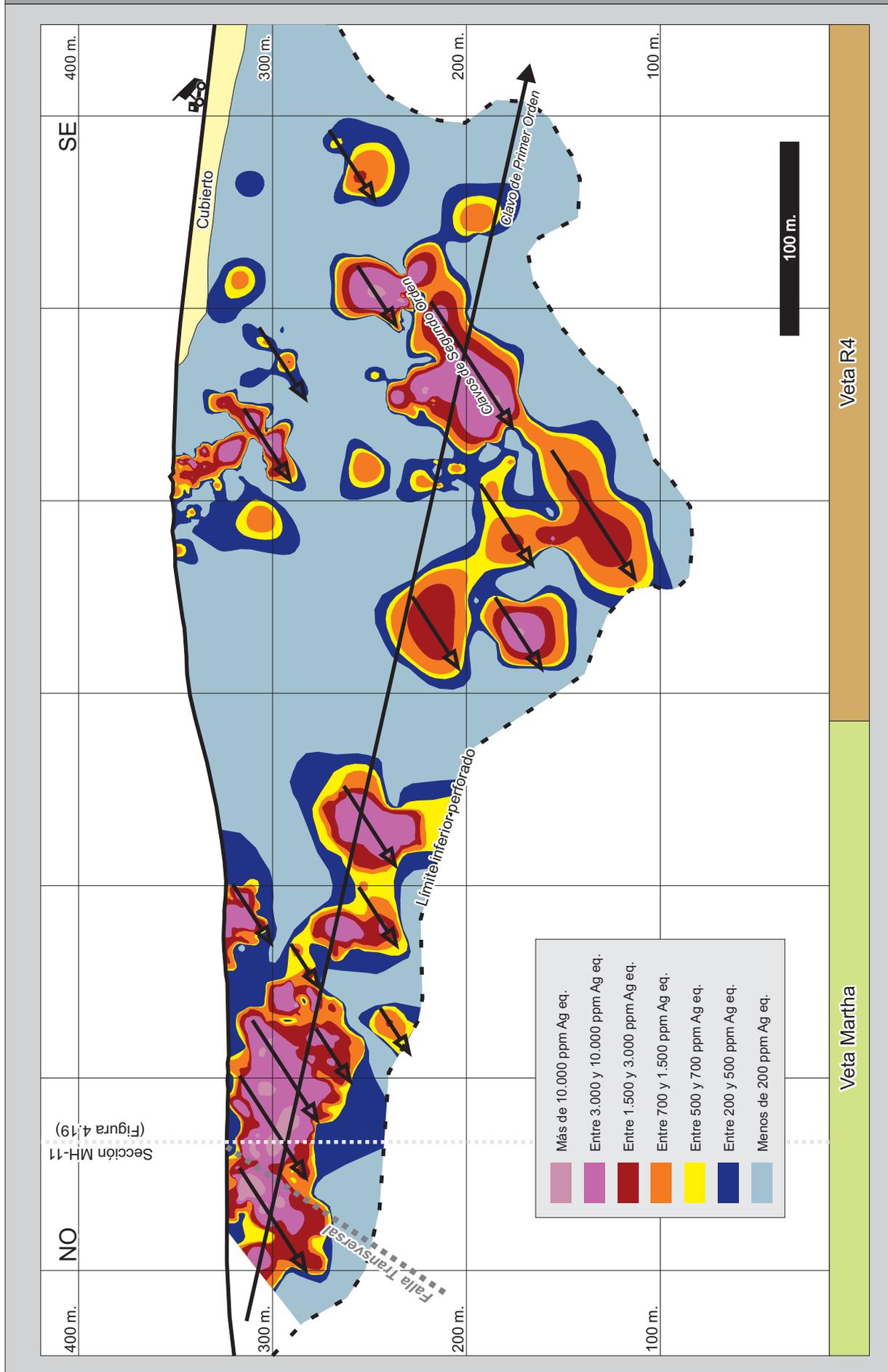


Figura 4.18. Sección longitudinal de la veta Catalina

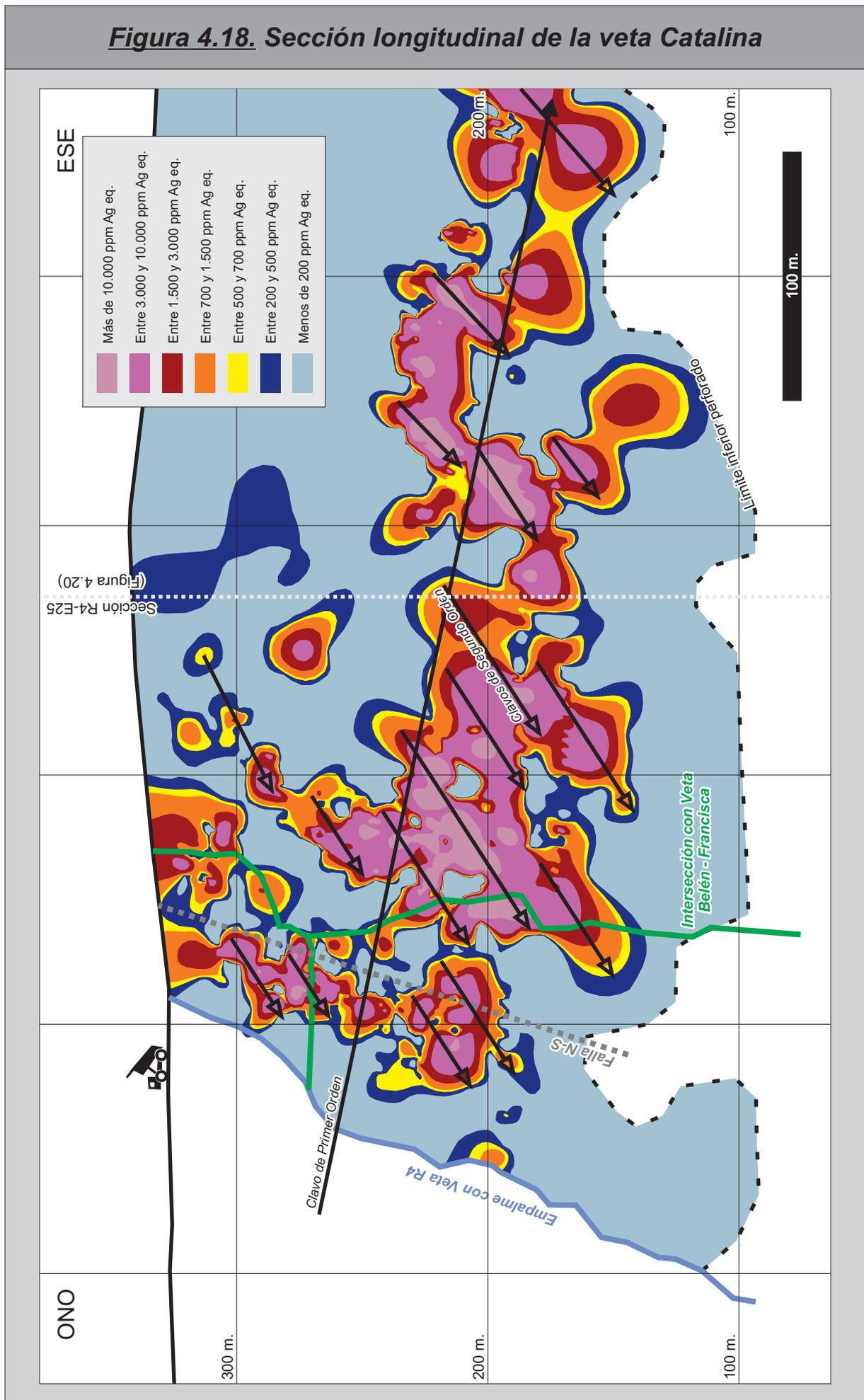
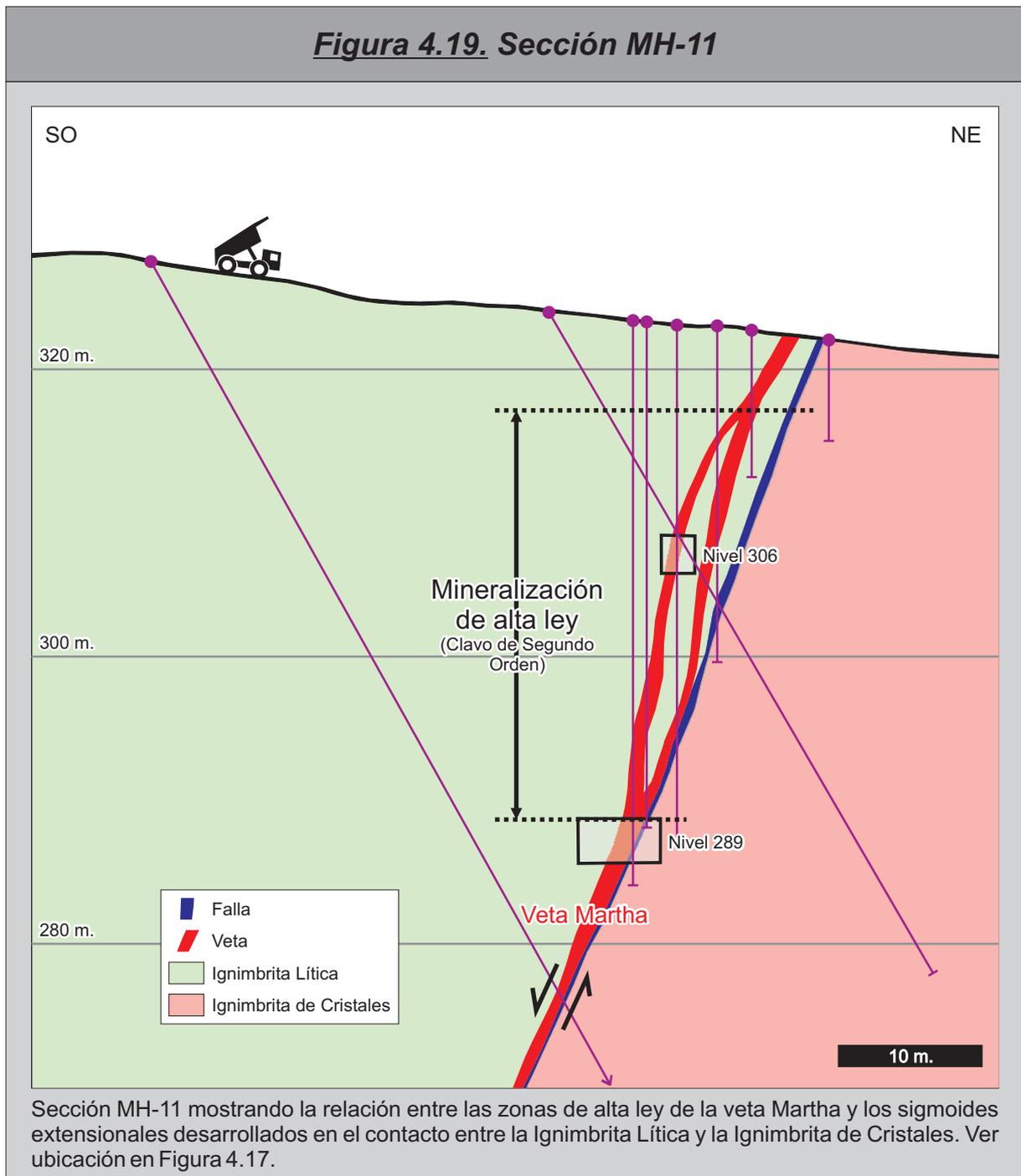


Figura 4.19. Sección MH-11

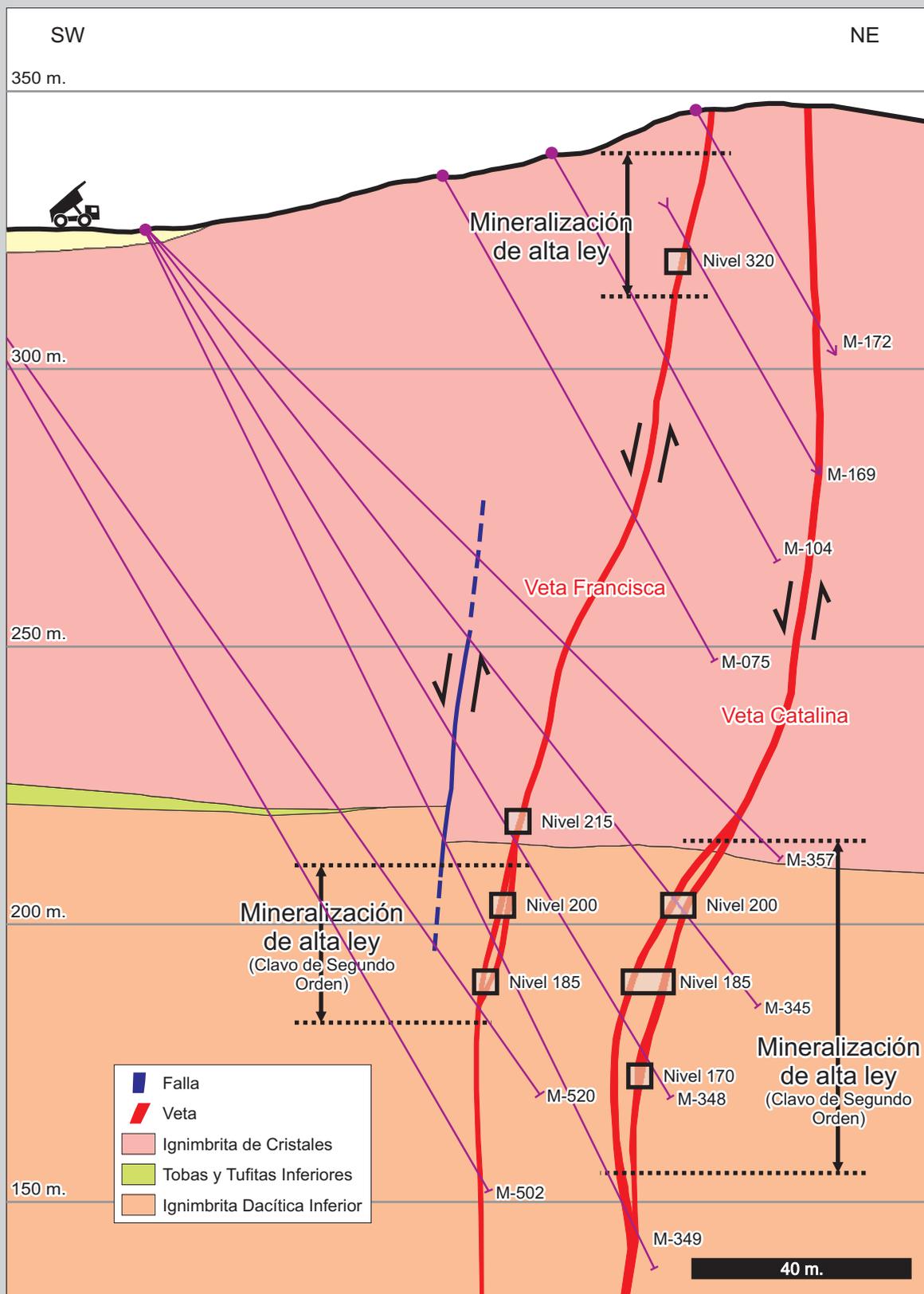


perpendicular al vector de desplazamiento determinado para las vetas, y por lo tanto es compatible con el tipo de cinemática mixta de tipo normal-sinistral observada en ambos sistemas de vetas (Sibson, 1996; Nelson, 2006).

Al observar en detalle la posición de los sigmoides, puede observarse que los mismos se desarrollan en las proximidades de cambios litológicos (Figura 4.19 y Figura 4.20), o bien en sectores con variaciones en el soldamiento de las ignimbritas (Lee, 2005). Esto estaría indicando que las diferencias de competencia entre las diferentes litologías habrían controlado, al menos parcialmente, el desarrollo en la vertical de los sigmoides, y por lo tanto la posición de los clavos de segundo orden dentro del yacimiento (Reid *et al.*, 1975; Davis y Reynolds, 1996; Brathwaite *et al.*, 2001).

Otro control importante en la distribución de las zonas de alta ley corresponde a la distribución de los pulsos mineralizantes a lo largo de las estructuras. Como puede apreciarse en la Figura 4.6, el episodio de alta ley E2 posee una distribución discontinua, formando tramos aislados dentro de las vetas. Algo

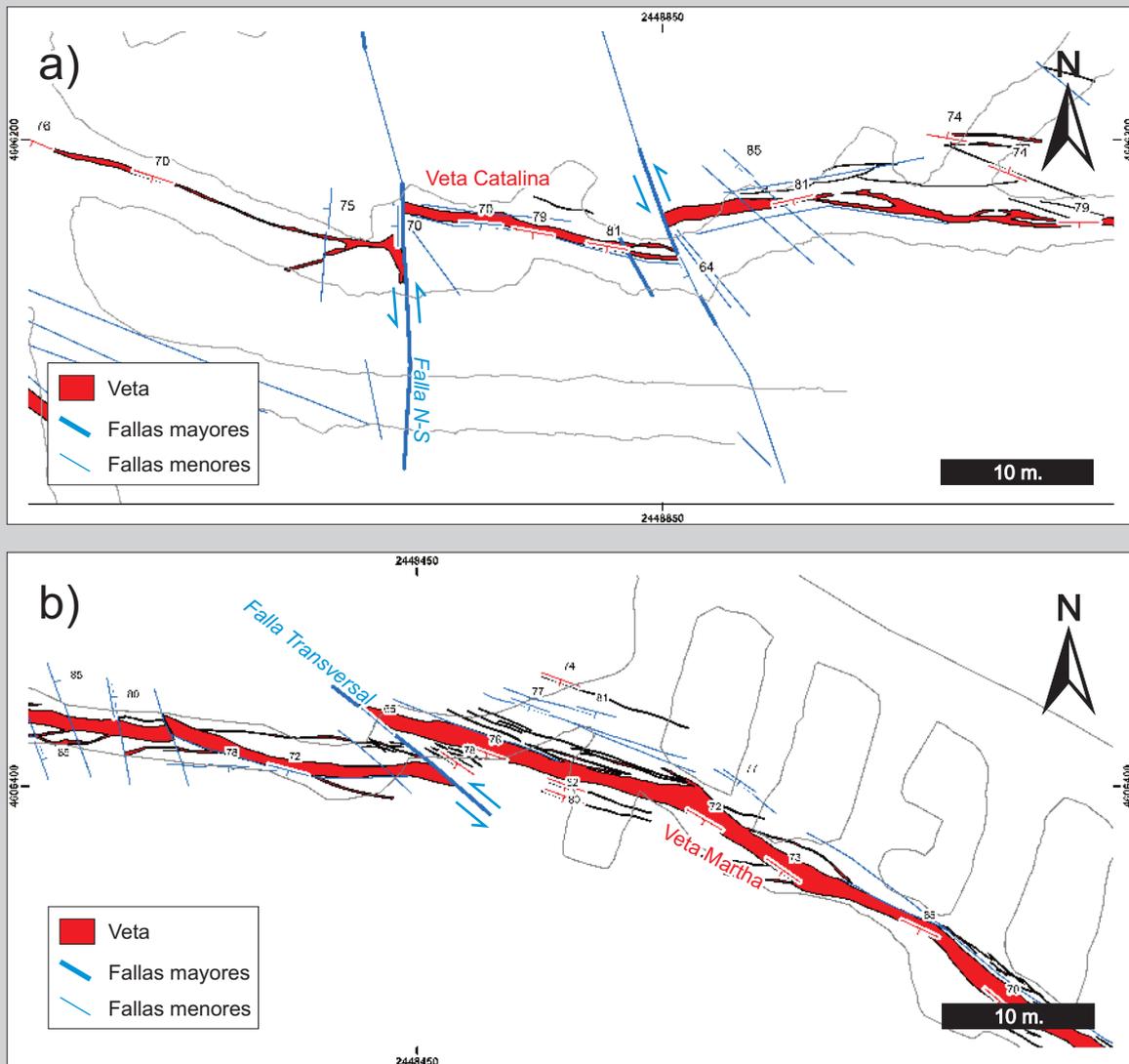
Figura 4.20. Sección R4-E25



Sección R4-E25 mostrando la relación entre zonas de alta ley de las vetas Catalina y Francisca y los sigmoides extensionales desarrollados en el contacto entre la Ignimbrita de Cristales y la Ignimbrita Dacítica Fina. Ver ubicación en figura 4. 18.

similar ocurre con el episodio removilizado E4, que si bien es un poco más continuo, solo desarrolla alta ley en las proximidades del episodio E2. La estrecha correlación que existe entre las altas leyes y la presencia del episodio E2, y entre las altas leyes y la posición de los sigmoides, sugiere que estos últimos

Figura 4.21. Fallas post-mineralización



Detalle del mapeo geológico de interior mina mostrando el comportamiento del fallamiento post-mineralización en (a) Veta Catalina (nivel 240), y (b) Veta Martha (nivel 289).

actuaron como vías preferenciales durante el ascenso y depositación de los fluidos mineralizantes.

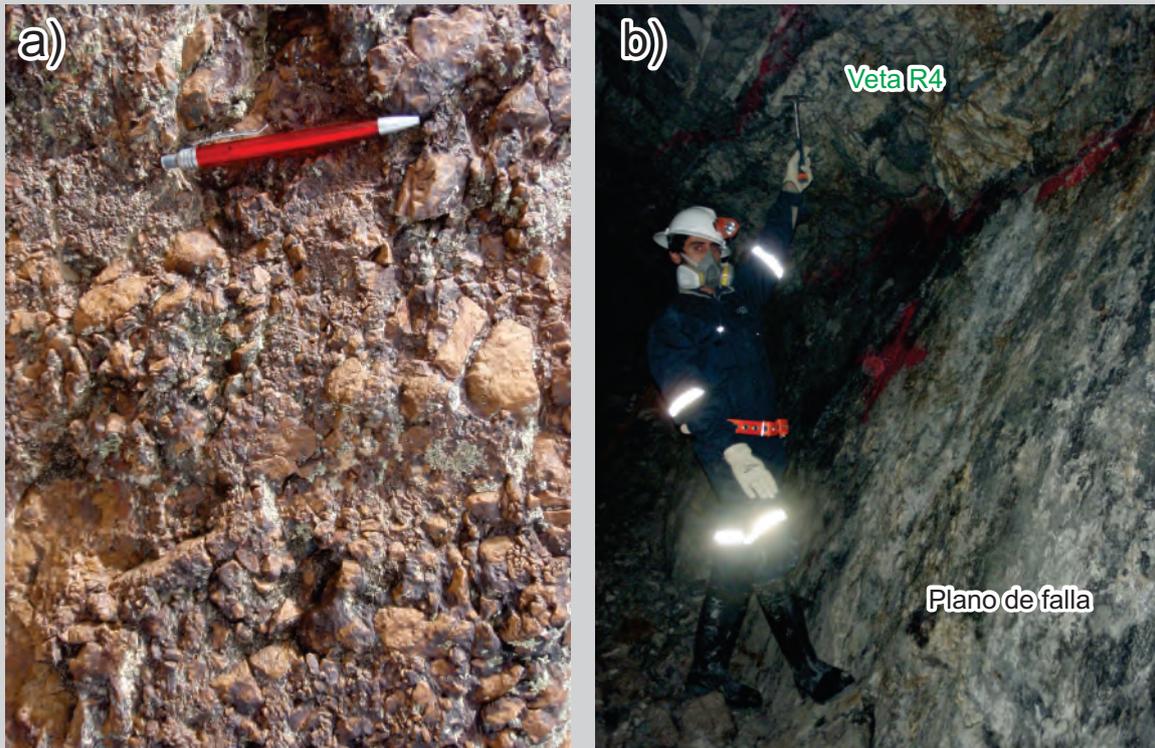
4.5. Controles estructurales post-mineralización

4.5.1. Fallamiento post-mineralización

En superficie las fallas son de difícil observación. Muchas de ellas se corresponden con lineamientos en imágenes y fotos aéreas, y en el campo solo pueden ser corroboradas por desplazamientos en los mantos de rocas piroclásticas, también pueden ser inferidas por escarpas, y muy ocasionalmente por la presencia de brechas tectónicas y/o espejos de fricción. Sin embargo la presencia de galerías y labores de acceso en la mina, facilita en gran medida el reconocimiento y la medición de los distintos juegos de fallas que afectaron a la mineralización con posterioridad a su formación.

El fallamiento post-mineralización en Mina Martha (Figura 4.21) está caracterizado por estructuras que cortan a las vetas y a sus halos de alteración, ya sea con o sin un aparente desplazamiento de los

Figura 4.22. Fallas post-mineralización



Vista de los dos estilos de fallamiento post-mineralización reconocidos en Mina Martha. a) Brecha clasto sostén oxidada; veta Martha Oeste, superficie. b) Zona de falla con relleno arcilloso; veta R4, Nivel 205.

cuerpos mineralizados (Ver Anexo II). Se han podido reconocer dos estilos de fallamiento afectando ambos sistemas de vetas, el primero de ellos caracterizado por brechas clasto sostén y el segundo por un relleno arcilloso a lo largo de planos de fractura (Figura 4.22).

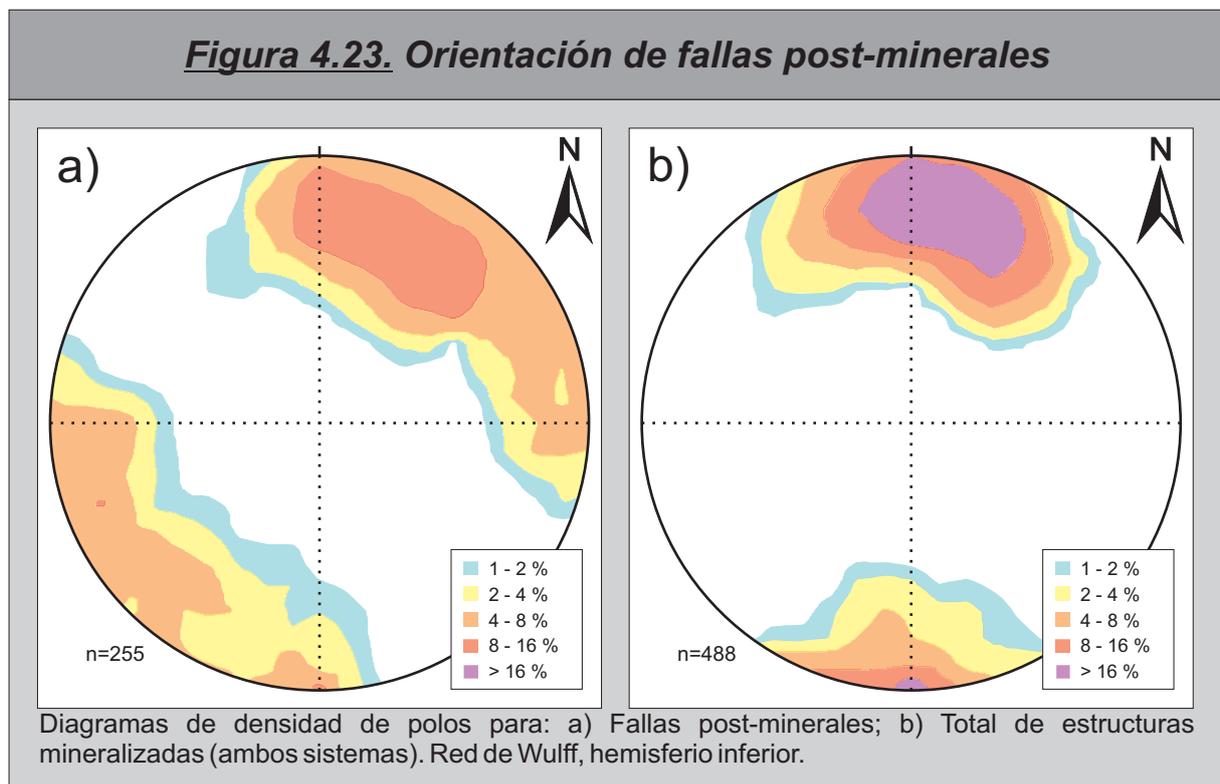
Las primeras corresponden a brechas tectónicas clasto sostén con desarrollo de pequeños espacios vacíos (Figura 4.22a). Se caracterizan por clastos sub-angulosos con una distribución seriada en el tamaño de los mismos, que presentan dimensiones máximas de alrededor de 6 cm. Los clastos no presentan ninguna orientación definida y son de naturaleza heterolitológica, incluyendo fragmentos de roca de caja junto con clastos provenientes de la mineralización, que se presentan teñidos de un color castaño rojizo producto de una pátina de óxidos de hierro.

Este tipo de brechas presentan contactos irregulares y espesores variables de entre 0,3 y 1 m, y fueron observadas únicamente a lo largo de los planos que ocupan las vetas, tanto en interior mina como en superficie, indicando que se originaron a partir de una reactivación de las fallas que contienen las estructuras mineralizadas. No se pudo observar la presencia de estriados o algún otro tipo de indicador cinemático asociado.

El segundo tipo de fracturas se caracteriza por planos y zonas de falla (Figura 4.22b) con contactos netos y abundante relleno arcilloso ocasionalmente acompañado por pirita fina diseminada. Se trata de estructuras con espesores de entre 0,5 cm hasta más de un metro, que se desarrollan tanto en forma paralela como también cortando a las estructuras vetiformes, indicando que corresponden tanto a estructuras nuevas, como a reactivaciones de los planos de falla que contienen a las vetas.

Cuando se comparan las orientaciones de estas fallas (Figura 4.23a) con el total de las estructuras

Figura 4.23. Orientación de fallas post-minerales



mineralizadas (Figura 4.23b), puede observarse que la mayoría de las mismas corresponden a reactivaciones de los planos que contienen a las vetas, tanto del Sistema Martha-R4 como del Sistema del Medio. Sin embargo pueden reconocerse dos direcciones de fallamiento completamente nuevas (Figura 4.21), ambas desarrolladas con frecuencias similares, la primera de ellas con orientación media NNO-SSE a N-S e inclinaciones de alto ángulo hacia el este y en menor medida hacia el oeste. La segunda dirección posee una orientación NO-SE e inclinaciones también con alto ángulo hacia el oeste y en menor medida hacia el este. Las relaciones de corte entre ambos sistemas no son claras y parecen cortarse mutuamente (Ver Anexo II), lo que podría indicar que se formaron simultáneamente.

El primer sistema de estructuras puede ejemplificarse con la llamada “Falla N-S”, que posee una orientación NNO-SSE a N-S e inclinaciones de alto ángulo hacia el oeste, y afecta principalmente al sistema del medio en las proximidades de su intersección con el Sistema Martha-R4 (Figura 4.21b). El segundo sistema, está ejemplificado por la denominada “Falla Transversal” que desplaza a la veta Martha, y que está caracterizada por un rumbo NO-SE e inclinaciones del orden de los 70° hacia el SO (Figura 4.21a). En ambos casos se trata de zonas de falla de hasta 1 m de potencia que desplazan las estructuras mineralizadas con una cinemática mixta de tipo normal-sinistral (Lee, 2005), aunque la observación directa de estriados y otros indicadores cinemáticos es muy difícil.

4.5.2. Controles sobre las leyes de la mineralización

Las fallas post-minerales jugaron un papel importante en la configuración definitiva de los clavos presentes en Mina Martha. El efecto más evidente, fue el de producir desplazamientos en los cuerpos mineralizados, poniendo en contacto sectores de alta ley con sectores de baja ley, aumentando de esa manera la irregularidad de las zonas mineralizadas.

Otro efecto importante del fallamiento post-mineralización, fue el de generar zonas de mayor permeabilidad que permitieron la infiltración de aguas meteóricas hasta niveles profundos del

yacimiento, aumentando localmente la profundidad de la zona de oxidación (Capítulo 3).

El efecto combinado del fallamiento con la posterior oxidación, dio lugar a la destrucción y movilización de la mineralización primaria en las proximidades de las fallas, con la consecuente disminución de la ley en los sectores afectados, especialmente en las partes más altas de los cuerpos mineralizados. Este efecto puede observarse como sectores lineales de baja ley en las secciones longitudinales de las principales vetas, y particularmente en las proximidades de las fallas "Transversal" (Figuras 4.17) y "N-S" (Figuras 4.18).

4.6. Consideraciones finales

La migración de los fluidos dentro de la corteza está fuertemente influenciada por las interconexiones existentes entre las diversas discontinuidades, heterogeneidades tales como fallas, diaclasas, planos de estratificación, foliaciones, etc. (Sibson, 1996; Cox, 2005).

De esta manera, el mapeo detallado de las estructuras mineralizadas, el estudio de su secuencia paragenética y el entendimiento de la geometría y orientación de los elementos estructurales, conforman una herramienta fundamental a la hora de entender la génesis y la evolución de los sistemas hidrotermales, especialmente en lo referente a depósitos de tipo vetiforme (Gemmell *et al.*, 1988; Kreuzer, 2004; Begbie *et al.*, 2007; Kolb y Haegemann, 2009; Wallier, 2009; Micklethwaite, 2009).

Mina Martha se caracteriza por la presencia de dos sistemas principales de estructuras mineralizadas, el Sistema Martha-R4 con orientación media de Rbz 206/67, y el Sistema del Medio con una orientación principal de Rbz 184/80 y una secundaria con Rbz 160/75.

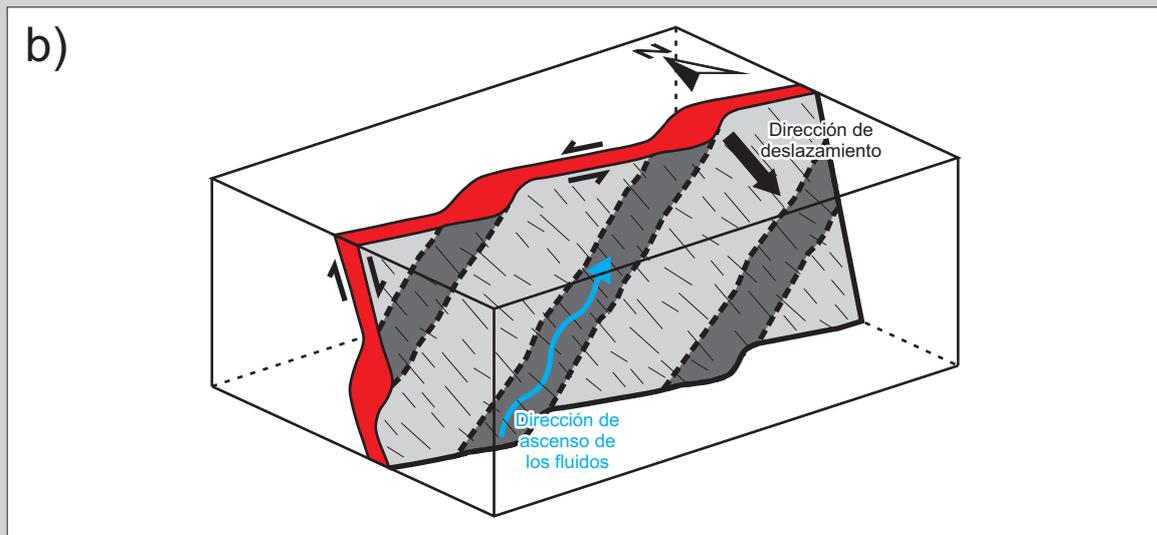
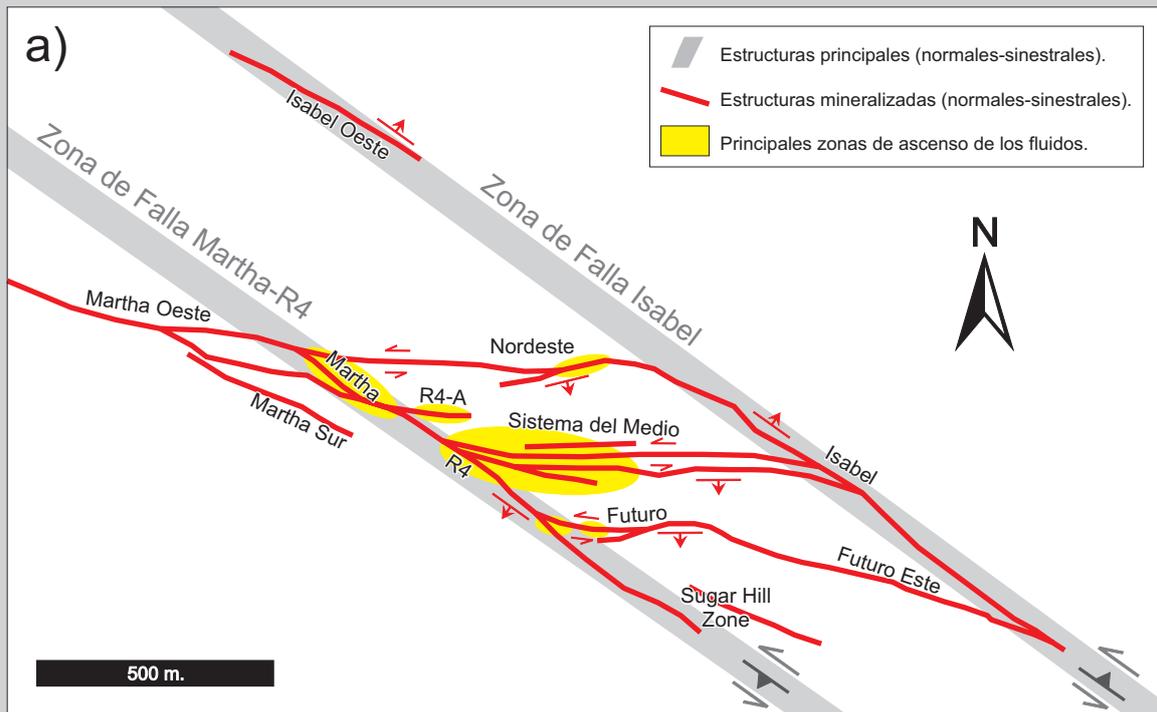
La geometría de los sigmoides y zonas de transferencia junto con la aplicación de métodos geométricos, permitieron determinar una dirección de apertura hacia N174° caracterizada por una inclinación de alto ángulo para ambos sistemas, que fue acompañada con una gran dilatación.

Del arreglo geométrico observado en ambos sistemas de vetas, se deduce que el ambiente tectónico activo al momento del funcionamiento del sistema hidrotermal registrado en Mina Martha corresponde a un régimen transtensivo caracterizado por una cinemática mixta de tipo normal-sinistral (Figura 4.24). Dentro de este esquema, el Sistema del Medio se habría originado como parte de una zona de transferencia "dura" (*hard-linked*) durante la reactivación de dos zonas de falla de orientación NO-SE (Zona de Falla Martha-R4 y Zona de Falla Isabel).

La reactivación de la falla que contiene a la veta Martha y la nucleación de nuevas fracturas en el caso de las vetas del Medio, permitieron el desarrollo de los canales para el ascenso de los fluidos hidrotermales.

La continuidad de los rellenos hidrotermales observados en las vetas, así como también sus relaciones de corte sugieren que todas las estructuras se habrían formado durante un mismo evento hidrotermal. Sin embargo, la distribución de los diferentes pulsos mineralizantes (Figura 4.6) permite interpretar un crecimiento progresivo de las vetas, originado por múltiples episodios de apertura y relleno, en forma similar a lo registrado para otros depósitos epitermales (Gemmell *et al.*, 1988; Simmons *et al.*, 2005; Wallier, 2009). De esta manera, las estructuras mineralizadas se habrían originado como segmentos relativamente aislados durante el episodio E2, que habrían coalescido para formar una estructura continua recién a partir del episodio E3.

Figura 4.24. Modelo estructural



Modelo estructural para Mina Martha. a) Esquema idealizado integrando a las estructuras mineralizadas, sus relaciones mutuas y su vinculación con los sectores de alta ley. b) Modelo idealizado de una estructura, mostrando la relación entre los sigmoides y los canales de ascenso de los fluidos hidrotermales.

La propagación y unión de los segmentos iniciales de las estructuras habrían sido las responsables de la generación de los numerosos sigmoides, codos y zonas de transferencia observados (Figuras 4.7, 4.8 y 4.12). El resultado final de este mecanismo de crecimiento es la geometría curvilinear característica de todas las estructuras vetiformes presentes en el yacimiento. Por último, los elevados espesores registrados para E3 estarían sugiriendo que durante este episodio se produjo el mayor desplazamiento y apertura dentro del sistema de vetas, hipótesis sustentada también por las texturas que caracterizan a los rellenos hidrotermales de este episodio.

Las zonas de alta ley de Mina Martha se dividen en dos grandes cuerpos y varias zonas menores asociadas a intersecciones entre vetas (Figura 4.16). A su vez, dentro de cada estructura mineralizada

pueden observarse clavos de primer orden (Figura 4.17 y Figura 4.18), con superficies mayores a los 15.000 m² e inclinaciones suaves hacia el sudeste, que estarían vinculados a cambios litológicos dentro de la roca de caja de las vetas. Por último, pueden reconocerse clavos de segundo orden (Figura 4.17 y Figura 4.18), que en general no superan los 2500 m² e inclinan hacia el sudoeste, y que corresponden a sigmoides extensionales desarrollados a lo largo de los cambios de rumbo e inclinación de las estructuras.

En los depósitos epitermales la dirección de flujo de las soluciones hidrotermales a través de los cuerpos rocosos se produce hacia el menor gradiente hidráulico siguiendo principalmente zonas de debilidad (Sibson, 1996; Cox, 2005). Sin embargo, la presencia de irregularidades en las zonas de fractura (tales como sigmoides, intersecciones con otras estructuras, etc.) dan lugar a zonas donde el flujo se canaliza y concentra (Sibson, 1996; Rowland y Sibson, 2004; Cox, 2005). Estos conductos de alta permeabilidad serían fundamentales para la formación de depósitos minerales de relevancia económica (Simmons y Browne, 2000; Simmons y Brown, 2006; Micklethwaite, 2009).

En el caso de Mina Martha, al tratarse de un depósito epitermal desarrollado en niveles altos de la corteza, el gradiente hidráulico disminuye en forma aproximadamente vertical hacia la superficie (Sibson, 1996), de manera que el movimiento de los fluidos debería ser esencialmente ascendente. Sin embargo la presencia de intersecciones entre estructuras y sigmoides de apertura (en ambos casos buzantes hacia el OSO), desvían y concentran el flujo de las soluciones en forma ascendente pero en forma paralela al eje de los sigmoides, desde el OSO hacia el ESE siguiendo un rake aproximado de 40°.

De esta manera pueden reconocerse tres escalas diferentes para los controles estructurales que permitieron el desarrollo de la mineralización en Mina Martha (Figura 4.24). A escala regional, los fluidos hidrotermales se concentraron en zonas de transferencia desarrolladas entre zonas de falla de rumbo NO (Figura 4.24a), de manera similar a la descrita por Rowland y Sibson (2004) para el área de Taupo en Nueva Zelanda. A escala del yacimiento, los fluidos hidrotermales aprovecharon zonas de intersección entre estructuras para canalizar y concentrar el pasaje de los fluidos mineralizantes (Figura 4.24a). Por último, a la escala de cada veta, los fluidos hidrotermales aprovecharon zonas de apertura localizada, como los sigmoides, para terminar de canalizar y concentrar el flujo de los fluidos y originar de esa manera los sectores de mayor ley dentro del yacimiento (Figura 4.24b).

Finalmente, la mineralización fue modificada por un evento de fallamiento post-mineral que produce el desplazamiento de los cuerpos mineralizados, y la segmentación de los clavos de alta ley. Dentro de este esquema, y en función de sus atributos texturales, el episodio removilizado E4 probablemente represente el solapamiento entre las últimas etapas del sistema hidrotermal y el comienzo del fallamiento post-mineral.

4.7. Referencias

- BEGBIE, M.J., SPORLI, K.B., MAUK, J.L., 2007. Structural Evolution of the Golden Cross Epithermal Au-Ag Deposit, New Zealand. *Economic Geology* 102: 873-892.
- BRATHWAITE, R.L., CARGILL, H.J., CHRISTIE, A.B., SWAIN, A., 2001. Lithological and spatial controls on the

distribution of quartz veins in andesite- and rhyolite-hosted epithermal Au-Ag deposits of the Hauraki Goldfield, New Zealand. *Mineralium Deposita* 36: 1-12.

- COX, S.F., 2005. Coupling between deformation, fluid pressures and fluid flow in ore producing hydrothermal systems at depth in the crust. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume: 1-35.

- CUNNINGHAM, W.D., MANN, P., 2008. Tectonics of Strike-Slip Restraining and Releasing Bends. En: CUNNINGHAM, W.D., MANN, P. (eds). Tectonics of Strike-Slip Restraining and Releasing Bends. Geological Society, Special Publication 290: 1–12. London.
- DAVIS, G.H., REYNOLDS, S.J., 1996. Structural geology of rocks and regions. 2° Edición, John Wiley & Sons, Inc.. 776 p. Nueva York.
- DE GIUSTO, J., DI PERSIA A., PEZZI, E., 1980. El Nesocratón del Deseado. Publicado en: II Simposio de Geología Regional Argentina. Tomo 2: 1389-1430. Academia Nacional Ciencias, Córdoba.
- DIETRICH, A., NELSON, E., GUTIERREZ, R., LAYER, P., 2005, Structural control of vein formation and mineralization at the epithermal Huevos Verdes Ag-Au vein system, San Jose District, Deseado Massif, Argentina. Geological Society of America, Annual Meeting Salt Lake City. Abstract N°39-7.
- ECHAVARRÍA, L., 1997. Estudio geológico-minero del área El Dorado-Montserrat, Departamento Magallanes, provincia de Santa Cruz. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. Inédito.
- ECHEVESTE, H., 2005. 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.
- GEMMELL, J.B., SIMMONS, S.F., ZANTOP, H., 1988. The Santo Nino silver-lead-zinc vein, Fresnillo District, Zacatecas, Mexico; Part I, Structure, vein stratigraphy, and mineralogy. Economic Geology 83: 1597-1618.
- GIACOSA, R., ZUBIA, M., MARTÍNEZ, H. FUENTES, J., SÁNCHEZ, M., 2008. Evolución estructural meso-cenozoica del sector oriental de la Comarca del Deseado, (68° 00' y 69° 30'O, 47°00'S y 48°30'S Santa Cruz, Argentina). Actas del XVII Congreso Geológico Argentino, Jujuy, Tomo 2: 837-838.
- GIACOSA, R., ZUBIA, M., SANCHES, M., FUENTES, J. MARTINEZ, H., 2008b. Sistemas Auroargentíferos del Sector Oriental de la Región del Deseado: Estructura e inserción en la evolución tectónica Mesozoica (Santa Cruz, Argentina). Actas del XVII Congreso Geológico Argentino, Jujuy, Tomo 2: 841-842.
- GONZALEZ GUILLOT, M., DE BARRIO, R., GANEM, F., 2004. Mina Martha, un Yacimiento Epitermal Argentífero en el Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz. VII Congreso de Mineralogía y Metalogenia, Actas: 119-204. Río Cuarto.
- GUIDO, D., 2002. Geología y Metalogénesis del sector oriental del macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. Inédito.
- GUTIERREZ, R., 2006. Geology of the Huevos Verdes silver-gold vein system, San José District, Deseado Massif, Patagonia, Argentina. Tesis de Maestría del Colorado School of Mines, Golden, Colorado. 166 p Inédito.
- HOLCOMBE, R.J., 2009. Georient v9.4.4, Stereographic projections and rose diagram software. Dept. of Earth Sciences, University of Queensland, Australia. <http://www.holcombe.net.au/software/>
- HOMOVC, J., CONSTANTINI, L., FERREIRA, R., PELLON DE MIRANDA, A., 1996. Evolution of the Deseado Massif in Argentina, and its relationship with the San Julián Offshore Area in the South Atlantic Ocean. Informe YPF SA Argentina - Petrobras International Brazil.
- JOVIC, S.M., 2009. Geología y metalogénesis de las mineralizaciones polimetálicas del área El Tranquilo (Cerro León), sector central del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. Inédito.
- KOLB, J., HAGEMANN, S., 2009. Structural control of low-sulfidation epithermal gold mineralization in the Rosario–Bunawan district, East Mindanao Ridge, Philippines. Mineralium Deposita 44 (7): 795-815.
- KREUZER O.P., 2004. How to resolve the controls on mesothermal vein systems in a goldfield characterized by sparse kinematic information and fault reactivation: a structural and graphical approach. Journal of Structural Geology 26 (6-7): 1043-1065.
- LEE, C., 2005. Structural setting of Ag-Au mineralization in the Martha Deposit District and surrounding areas, Santa Cruz, Argentina. Reporte interno de Coeur d'Alene Mines. Preparado por SRK Consulting. 58 pp.
- LOPEZ, R.G., 2006. Estudio Geológico-Metalogenético del área oriental al curso medio del Río Pinturas, sector noroeste del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz,

Argentina. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. Inédito.

- McCOSS, A.M., 1986. Simple constructions for deformation in transpression/ transtension zones. *Journal of Structural Geology* 8(6): 715-718.

- MICKLETHWAITE, S., 2009. Mechanisms of faulting and permeability enhancement during epithermal mineralisation: Cracow goldfield, Australia. *Journal of Structural Geology* 31: 288–300.

- MOREIRA, P., 2005. Geología y Metalogénesis del Distrito La Josefina, Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. Inédito.

- MOREIRA, P., FERNANDEZ, R., CABANA, C., SCHALAMUK, I. B., 2008. Análisis estructural de las mineralizaciones Jurásicas del proyecto epitermal La Josefina (Au-Ag), Macizo del Deseado, Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63 (2): 244 – 253.

- MOREIRA, P., ECHEVESTE, H., FERNANDEZ R. HARTMANN, L., SANTOS, J. SCHALAMUK, I., 2009. Depositional age of Jurassic epithermal gold-silver ore in the Deseado Massif, Patagonia, Argentina, based on Manantial Espejo and La Josefina prospects. *N. Jb. Geol. Paläont, abh.*, 253:25-40, Stuttgart.

- MYKIETIUK, K., 2006. Volcanismo y alteración hidrotermal en el prospecto de metales preciosos del área de la estancia La Esperanza, Macizo del Deseado, Santa Cruz. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. Inédito.

- NELSON, E.P., 2006. Drill-hole design for dilational ore shoot targets in fault-fill veins. *Economic Geology* 101: 1079–1085.

- NORTJE G., ROWLAND J., SPÖRLI K., BLENKINSOP T., RABONE S., 2006. Vein deflections and thickness variations of epithermal quartz veins as indicators of fracture coalescence. *Journal of Structural Geology* 28:1396–1405

- PAEZ, G.N., RUIZ, R., GUIDO, D.M. y SCHALAMUK, I.B., 2008. Historia del Yacimiento Argentífero Mina Martha, Macizo Del Deseado, Santa Cruz. XVII Congreso Geológico Argentino. *Actas (II)*: 661-662. Jujuy, Argentina.

- PANKHURST, R., LEAT, P., SRUOGA, P., RAPELA, C.,

MARQUEZ, M., STOREY, B., RILEY, T., 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.

- PEÑALVA, G., JOVIC, S., CHERNICOFF, C., GUIDO, D., SCHALAMUK, I., 2008. Cuerpos intrusivos asociados a las mineralizaciones polimetálicas del depósito Cerro León, área del anticlinal El Tranquilo, Santa Cruz: Evidencias Geofísicas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63(1): 14-23.

- RAMOS, V., 1996. Evolución tectónica de la Plataforma Continental. En: Ramos y Turic (editores). *Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental Argentina*. Asociación Geológica Argentina e Instituto del Petróleo: 385-404.

- RAMOS, V., 2002. Evolución Tectónica. En: M. Haller (ed): *Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz. Relatorio del XV Congreso Geológico Argentino*. El Calafate, I-23: 235-387.

- REID, R. R., CADDEY, S. W., RANKIN, J. W., 1975. Primary refraction control of ore shoots, with examples from the Coeur d'Alene District, Idaho. *Economic Geology* 70: 1050-1061.

- ROSSELLO, E., 2001. Sistemas tectónicos transcurrentes: una síntesis de sus condiciones mecánicas y aplicaciones geoeconómicas. En: CORTES, J.M., ROSSELLO, E., DALLA SALDA, L. (Eds.). *Avances en Microtectónica. Publicación Especial (Serie D) N°5*: 19-43. Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires.

- ROSSELLO, E.A., 2009. Localización de espacios dilatantes en el fallamiento: controles de la mineralización y pronósticos económicos. 9^{no} Congreso de Geología Económica, *Actas*: 229-234.

- ROWLAND, J.V., SIBSON, R.H., 2004. Structural Controls on hydrothermal flow in a segmented rift system, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geofluids* 4: 259-283.

- SCHALAMUK I, DE BARRIO R, ZUBIA M, GENINI A, VALVANO J., 2002. Mineralizaciones auro-argentíferas del Macizo del Deseado y su encuadre metalogénico. En: Haller MJ (ed.) *Geología y recursos naturales de Santa Cruz. Relatorio 15° Congreso Geológico Argentino*: 679–713.

- SIBSON, R.H., 1996. Structural permeability of fluid-

driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology* 18(8): 1031-1042.

- SIMS, J., 2010. Martha Mine, Santa Cruz, Argentina: Technical Report. Informe técnico según norma NI43-101: 105 p. Disponible en: <http://www.sedar.com>.
- SIMMONS, S.F., BROWNE, P.R.L., 2000. Hydrothermal Minerals and Precious Metals in the Broadlands-Ohaaki Geothermal System: Implications for Understanding Low-Sulfidation Epithermal Environments. *Economic Geology* 95: 971-999.
- SIMMONS, S.F., WHITE, N.C., JOHN, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p: 485–522.
- SIMMONS, S.F., BROWN, K.L., 2006. Gold in magmatic hydrothermal solutions and the rapid formation of a giant ore deposit. *Science* 314: 288–291.
- WALLIER, S., 2009. The geology and evolution of the Manantial Espejo epithermal silver (+gold) deposit, Deseado Massif, Argentina. Tesis Doctoral de la University of British Columbia, Vancouver. 303p. Inédito. Disponible en: <http://circle.ubc.ca/handle/2429/17439>.

