



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**ESTUDIO GEOLÓGICO DE LOS CARBONATOS EN EL DEPÓSITO
DE COBRE FRANKENSTEIN, IIª REGIÓN DE ANTOFAGASTA.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

MIGUEL MONTES VERGARA

**PROFESOR GUÍA:
CARLOS PALACIOS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
BRIAN TOWNLEY
VICTOR MAKSAEV**

**SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2008**

ESTUDIO GEOLÓGICO DE LOS CARBONATOS EN EL DEPÓSITO DE COBRE FRANKENSTEIN, IIª REGIÓN DE ANTOFAGASTA.

El objetivo general de este trabajo de título es determinar la distribución espacial de los carbonatos en el depósito de cobre Frankenstein así como los efectos de la mineralogía de ganga durante la lixiviación de pilas.

Respecto a la distribución de carbonatos, se realizó un modelo geológico de carbonatos en plantas y secciones, a partir de los análisis químicos de CO_3 provenientes de las muestras de sondajes. En base a este modelo se pudo observar que la distribución de carbonatos no está directamente relacionada con la mineralización de cobre, pero al igual que ella, está controlada por las estructuras NW, NNW descritas en el área del depósito.

En relación a la estimación de carbonatos se definieron 4 casos de estudio para realizar distintos modelos de bloque, 3 kriging y un inverso a la distancia. Los resultados más satisfactorios, en relación a los compósitos utilizados, se obtuvieron precisamente a partir de este último caso y del kriging que consideraba como espacio de estimación el modelo geológico de carbonatos sin diferenciar poblaciones de carbonato (Alto, Medio y Bajo), casos 4 y 1 respectivamente. Para tener un estándar con el que se pudieran comparar los resultados de las distintas estimaciones, se realizó una quinta estimación, por inverso a la distancia, en la cual se incluyeron los análisis químicos de CO_3 de las muestras provenientes de la campaña de sondaje realizada a mediados del año 2007, muestras que no fueron incluidas ni en el modelo geológico de carbonatos ni en los 4 casos de estimación antes mencionados. Aquí también los resultados más válidos son los obtenidos a partir de los casos 1 y 4.

Con estos antecedentes, y considerando que: (1) los resultados obtenidos a partir de estos dos casos de estimación son muy similares, (2) los carbonatos no son el elemento económico del depósito, (3) estimar a través de un kriging requiere previamente realizar un modelo geológico que involucra recursos humanos y económicos, (4) con las muestras del año 2007 se cuenta con un universo de muestra lo suficientemente denso para obtener una estimación por inverso a la distancia válida, se puede concluir que, para estimar los carbonatos, el método más apropiado para aplicar en este depósito es el del inverso a la distancia.

Finalmente, en cuanto a los efectos de la mineralogía de ganga en los procesos de lixiviación, estudios anteriores indican que existe una muy buena correlación entre el contenido de carbonatos y el consumo de ácido, correlación que sin embargo presenta algún grado de dispersión para los valores bajos. A través del estudio mineralógico de 12 muestras de rechazos de columnas se pretendía determinar las especies mineralógicas que generaban esta dispersión, es decir la diferencia entre el consumo de ácido medido o real y el consumo de ácido teórico o estimado a partir del contenido de CO_3 . Sin embargo no se llegó a ningún resultado satisfactorio que permitiera determinar algún tipo de relación entre estas variables. Posiblemente sea necesario realizar un estudio más profundo con un mayor universo de muestras, recuento mineralógico y determinación de especies con difracción de rayos X, para poder determinar alguna relación entre dispersión y mineralogía de ganga, o simplemente conformarse con la buena correlación existente entre consumo de ácido y contenido de carbonatos.

AGRADECIMIENTOS

Posiblemente la sección de agradecimientos no sea el espacio más adecuado para desarrollar la creatividad literaria, capacidad que me ha estado más bien esquiva en el último tiempo por lo demás. Por lo tanto nos limitaremos a dar las gracias a todos los que correspondan de forma tradicional y que mejor que comenzar por mis propios padres.

Mamá, Papá; Padre, Madre; Viejita, Pelao. Primero que nada gracias por haberme concebido. Claro, no puedo dejar de agradecerles el apoyo económico, pero más importante para mí ha sido el apoyo afectivo permanente, la confianza en dejarme hacer lo que quiera, en armarme mi propio camino con sus debidos tropezones, pero, tan mal no estamos, ¿o sí? En ese mismo sentido también tengo que incluir a mis 3 hermanos y a un buen lote de amigos, tanto de geología como de muchísimas otras áreas. Chago, gracias por sacarme de apuro con las impresiones.

Gracias a Román y a la gente de Centenario en general.

A la gente de GV, son muchos, pero sin duda que lo menos que puedo hacer es nombrarlos. Rorra, gracias por la paciencia por la dedicación y por la buena voluntad, a pesar de estar sobrepasada en más de una ocasión. Ramón, Jozsef y Juan Carlos, gracias por las críticas, las correcciones, las ideas nuevas. Raul, (ça va?), nada que decir compañero, solo gracias y más gracias.

Por último saludar a la gente del departamento en general y a la María Rosa en particular.

Gracias.

INDICE DE CAPITULOS

Capítulo I: Introducción	1
I.1. Introducción	1
I.2. Objetivos	1
I.2.1. Objetivo general	1
I.2.2. Objetivos específicos	1
I.3. Metodología	1
I.4. Ubicación y rutas de acceso	2
I.5. Reseña histórica acerca de los procesos hidrometalúrgicos	3
I.6. Trabajos anteriores	5
Capítulo II: Marco geológico	6
II.1. Rocas estratificadas	8
II.1.1. Formación Las Tórtolas (Pzt)	8
II.1.2. Formación Cifuncho (TRc)	9
II.1.3. Formación Pan de Azúcar (Jpa)	10
II.1.4. Formación La Negra (Jln)	11
II.1.5. Formación Aeropuerto (Ka)	12
II.1.6. Formación Chile-Alemania (Tcha)	13
II.1.7. Gravas de Atacama (Tga)	13
II.2. Unidades Intrusivas	14
II.2.1. Grupo Plutónico Cifuncho (Pzgc)	14
II.2.2. Grupo Plutónico Tigrillo (TJgt)	15
II.2.3. Grupo Plutónico Matancilla (Jgm)	15
II.2.4. Grupo Plutónico Cerro del Pingo (Kgcp)	16
II.2.5. Pórfidos Pampa Mirador (Kpm)	16
II.3. Estructuras	17
II.3.1. Pliegues	17
II.3.2. Fallas	17
Capítulo III: Geología distrital de Frankenstein	19
III.1. Rocas estratificadas	20
III.2. Alteración	23
III.3. Estructuras	23
III.4. Tipo de depósito y mineralización	25
III.4.1. Distribución de la mineralización	25
III.4.2. Perfil de oxidación	26

Capítulo IV: Distribución de los carbonatos	28
IV.1. Introducción	28
IV.2. Modelo geológico de carbonatos	30
IV.3. Modelo de estimación (bloques) de carbonatos	35
IV.3.1. Definiciones y conceptos teóricos	35
IV.3.2. Casos de estudio	45
IV.3.3. Estadísticas de muestras y compósitos	45
IV.3.4. Variografía	48
IV.3.5. Estimación de recursos	56
IV.3.5.1. Propiedades del modelo de bloques	56
IV.3.5.2. Validación cruzada	57
IV.3.5.3. Planes de estimación de recursos	60
IV.3.5.4. Resultados de las estimaciones de recursos	62
IV.3.5.5. Validación de las estimaciones	64
IV.3.5.5.1 Validación estadística	64
IV.3.5.5.2. Validación gráfica	67
IV.3.5.5.3. Validación por derivas	67
IV.4. Comparación con otros modelos	71
IV.4.1. Comparación estadística	72
IV.4.2. Comparación por derivas	74
IV.4.3. Comparación bloque a bloque	74
Capítulo V: Consumo de ácido y contenido de carbonatos	77
V.1. Introducción	77
V.2. Análisis de descripciones petrográficas y mineralógicas	81
V.2.1. Muestras con bajo consumo de ácido (M-5 y M-8)	85
V.2.2. Muestras con consumo de ácido intermedio (M-1, M-6, M-7, M-10)	85
V.2.3. Muestras con consumo de ácido alto (M-2, M-9, Carga 11)	86
V.2.4. Muestras con consumo de ácido muy alto (M-3, M-4, M-11)	86
V.2.5. Muestras con consumo de ácido neto menor al estimado	86
V.2.6. Muestras con consumo de ácido neto mayor al estimado	87
V.2.7. Consumo estequiométrico versus consumo real	87
Capítulo VI: Conclusiones	89
Capítulo VII: Referencias	91

INDICE DE TABLAS

<u>Tabla 1:</u> Tipos de mena definidos por razón CuS/CuT.	26
<u>Tabla 2:</u> Categorías de CO ₃ según sus contenidos (Wt %).	28
<u>Tabla 3:</u> Casos de estudio para el modelo de estimación.	45
<u>Tabla 4:</u> Distribución de las muestras en relación a las campañas de perforación.	45
<u>Tabla 5:</u> Estadísticas de las muestras y de los compósitos.	46
<u>Tabla 6:</u> Parámetros del variograma experimental horizontal para el caso 1.	50
<u>Tabla 7:</u> Parámetros del variograma experimental vertical para el caso 1.	50
<u>Tabla 8:</u> Parámetros del variograma experimental horizontal para el modelo Bajo del caso 2.	52
<u>Tabla 9:</u> Parámetros del variograma experimental vertical para el modelo Bajo del caso 2.	53
<u>Tabla 10:</u> Parámetros del variograma experimental horizontal para el modelo Medio del caso 2.	54
<u>Tabla 11:</u> Parámetros del variograma experimental vertical para el modelo Medio del caso 2.	54
<u>Tabla 12:</u> Parámetros del variograma experimental horizontal para el modelo Alto del caso 2.	55
<u>Tabla 13:</u> Parámetros del variograma experimental vertical para el modelo Alto del caso 2.	56
<u>Tabla 14:</u> Dimensiones y tipo de modelo de bloque.	57
<u>Tabla 15:</u> Propiedades de los distintos planes de Kriging.	57
<u>Tabla 16:</u> Resultados de la validación cruzada según los distintos planes.	60
<u>Tabla 17:</u> Plan de estimación para el Caso 1.	60
<u>Tabla 18:</u> Plan de estimación para el Caso 2 en los polígonos CO ₃ Bajo.	61
<u>Tabla 19:</u> Plan de estimación para el Caso 2 en los polígonos CO ₃ Medio.	61
<u>Tabla 20:</u> Plan de estimación para el Caso 2 en los polígonos CO ₃ Alto.	61
<u>Tabla 21:</u> Plan de estimación para el Caso 3.	62
<u>Tabla 22:</u> Plan de estimación para el Caso 4.	62
<u>Tabla 23:</u> Resultados de estimación para el Caso 1.	62
<u>Tabla 24:</u> Resultados de estimación para el Caso 2.	63
<u>Tabla 25:</u> Resultados de estimación para el Caso 3.	64
<u>Tabla 26:</u> Resultados de estimación para el Caso 4.	64
<u>Tabla 27:</u> Estadísticas básicas de los compósitos y de las distintas estimaciones realizadas.	65
<u>Tabla 28:</u> Tonelajes y leyes de CO ₃ para cada caso de estimación.	66
<u>Tabla 29:</u> Estadísticas básicas de los casos 1, 2 y 4 en relación a la estimación 2007.	72
<u>Tabla 30:</u> Estadísticas básicas del caso 3 en relación a la estimación 2007.	72
<u>Tabla 31:</u> Información de las muestras.	79
<u>Tabla 32:</u> Consumo de ácido total vs consumo de ácido estequiométrico.	87

INDICE DE FIGURAS

<u>Figura 1:</u> Ubicación y vías de acceso al depósito Frankenstein.	2
<u>Figura 2:</u> Ubicación del depósito Frankenstein en el mapa geológico de Chile, escala 1:1000000.	6
<u>Figura 3:</u> Esquema estratigráfico generalizado de la hoja Taltal-Chañaral.	7

<u>Figura 4:</u> Ubicación del depósito Frankenstein en relación a las localidades (en rojo) y minas (en amarillo) cercanas.	19
<u>Figura 5:</u> Rocas Cretácicas del distrito Altamira (SAMSA, 2004).	21
<u>Figura 6:</u> Columna estratigráfica del miembro mineralizado de la Formación Aeropuerto.	22
<u>Figura 7:</u> Patrón estructural del Distrito Altamira (GEOVECTRA, 2005).	24
<u>Figura 8:</u> Estilos de mineralización en el eje y en los flancos del pliegue anticlinal (GEOVECTRA, 2005).	24
<u>Figura 9:</u> Perfiles de oxidación en el depósito Frankenstein.	27
<u>Figura 10:</u> Secuencia para el modelamiento de los carbonatos.	29
<u>Figura 11:</u> Distribución de carbonatos, modelo primario (a) v/s modelo diluido (b).	29
<u>Figura 12:</u> Vista en planta de las secciones interpretadas.	30
<u>Figura 13:</u> Perfiles del depósito de cobre Frankenstein. Al lado izquierdo se tienen los contenidos de carbonatos y al lado derecho los tipos de mena de cobre.	31
<u>Figura 14:</u> Perfiles del depósito de cobre Frankenstein. Al lado izquierdo se tienen los contenidos de carbonatos y al lado derecho los contenidos de cobre.	32
<u>Figura 15:</u> Plantas del depósito de cobre Frankenstein. Al lado izquierdo se tienen los contenidos de carbonatos y al lado derecho los tipos de mena de cobre.	33
<u>Figura 16:</u> Perfiles del depósito de cobre Frankenstein. Al lado izquierdo se tienen los contenidos de carbonatos y al lado derecho contenidos de cobre.	34
<u>Figura 17:</u> Parámetros para el cálculo de un variograma experimental.	37
<u>Figura 18:</u> Forma típica del variograma y de la covarianza.	38
<u>Figura 19:</u> comportamiento del variograma en el origen.	39
<u>Figura 20:</u> Variogramas direccionales para variables anisótropas. Izquierda anisotropía zonal, derecha anisotropía geométrica.	39
<u>Figura 21:</u> Muestras v/s Compósitos de CO ₃ para el sondaje CC06-092. Destacado en amarillo dos casos de compósitos compuestos por muestras de tres categorías.	47
<u>Figura 22:</u> Ejemplo de muestra de CO ₃ en polígono de otra categoría (Parte del Perfil 698NW).	47
<u>Figura 23:</u> Histogramas de los compósitos según el modelo al que pertenecen.	48
<u>Figura 24:</u> Variogramas experimentales y modelados para los casos 1 y 3.	51
<u>Figura 25:</u> Variogramas experimentales y modelados para el modelo Bajo del caso 2.	52
<u>Figura 26:</u> Variogramas experimentales y modelados para el modelo Medio del caso 2.	53
<u>Figura 27:</u> Variogramas experimentales y modelados para el modelo Alto del caso 2.	55
<u>Figura 28:</u> Gráficos de dispersión de valores de CO ₃ estimado vs CO ₃ real: Izquierda casos con tipo de búsqueda elipsoidal, derecha casos con tipo de búsqueda por octantes.	58
<u>Figura 29:</u> Histogramas de los bloques estimados para cada caso.	66
<u>Figura 30:</u> Curvas Tonelaje-Ley para los distintos casos de estimación.	67
<u>Figura 31:</u> Sección 233NW, Modelo de bloque v/s compósitos.	68
<u>Figura 32:</u> Derivas de los bloques estimados vs derivas de los compósitos.	70
<u>Figura 33:</u> Histogramas de los bloques estimados en el espacio del modelo geológico de carbonatos, para los casos 1, 2, 4 y Modelo 2007.	73
<u>Figura 34:</u> Histogramas de los bloques estimados en el espacio del modelo geológico de cobre 2006, para el caso 3 y Modelo 2007.	73
<u>Figura 35:</u> Derivas de los casos 1, 2, 3 y 4, y del Modelo 2007 en las distintas direcciones.	75
<u>Figura 36:</u> Gráficos de dispersión para los distintos casos en relación al Modelo 2007.	76
<u>Figura 37:</u> Correlación entre Consumo de ácido y Carbonatos (muestras antiguas).	78
<u>Figura 38:</u> Correlación entre Consumo de ácido y Carbonatos (muestras antiguas vs columnas).	80
<u>Figura 39:</u> Correlación entre Consumo de ácido y Carbonatos (totalidad de muestras).	80

INDICE DE FOTOGRAFIAS

<u>Microfotografía 1:</u> <i>Andesita porfídica amigdaloidal con masa fundamental intergranular (muestra M-3, Aumento 5X10, Nicoles cruzados).</i>	82
<u>Microfotografía 2:</u> <i>Toba de cristales con fragmentos de plagioclasa en matriz cinerítica parcialmente argilizada (muestra M-8, Aumento 5X10, Nicoles cruzados).</i>	82
<u>Microfotografía 3:</u> <i>Brecha con fragmentos de andesita en matriz de clorita y opacos (muestra M-6, Aumento 5X10, Nicoles cruzados).</i>	83
<u>Microfotografía 4:</u> <i>grano de crisocola y malaquita con remanentes de hematita especular (Muestra M-8, Aumento 32X10, Nicoles paralelos).</i>	83
<u>Microfotografía 5:</u> <i>vetilla de cuarzo con crisocola y remanentes de covelina (Muestra Carga 11, Aumento 32X10, Nicoles paralelos).</i>	84
<u>Microfotografía 6:</u> <i>grano anedral de calcosina relleno de vesícula junto con ganga impregnada con malaquita (muestra M-7, Aumento 32X10, Nicoles cruzados).</i>	84
<u>Microfotografía 7:</u> <i>asociación mineralógica hipógena formada por bornita con escasas exsoluciones de calcopirita y por un complejo entrecrecimiento lamelar entre calcosina y digenita (muestra M-4, Aumento 32X10; Nicoles paralelos).</i>	85

INDICE DE ANEXOS

<u>Anexo A:</u> <i>Modelo geológico de carbonatos.</i>	95
<u>Anexo B:</u> <i>Modelo diluido de carbonatos.</i>	106
<u>Anexo C:</u> <i>Modelos de estimación de carbonatos.</i>	130
<u>Anexo D:</u> <i>Descripciones petrográficas y mineralógicas.</i>	187

I. INTRODUCCIÓN

I.1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio de memoria para optar al título de geólogo nace por el interés de Compañía Minera Centenario Copper Ltda. en determinar el impacto de los carbonatos en los procesos de lixiviación en pilas para la recuperación de cobre, específicamente para el depósito Frankenstein, que presenta altos contenidos de CO_3 .

I.2. OBJETIVOS

I.2.1. Objetivo general:

Determinar la distribución espacial de los carbonatos en el depósito de cobre Frankenstein y los efectos de la mineralogía de ganga durante la lixiviación de pilas.

I.2.2. Objetivos específicos:

1. Modelar geológicamente la distribución de carbonatos.
2. Analizar mineralógicamente la dispersión existente en la correlación consumo de ácido – contenido de carbonatos, obtenida previamente en muestras del depósito.

I.3. METODOLOGÍA

1. Para realizar el modelo geológico de carbonatos se ocuparon los valores de CO_3 de 4209 muestras de 254 sondajes. Además, a través del software GVMapper:
 - a) se generaron 21 secciones ENE espaciadas entre 40 y 90 metros, en las cuales se desplegaron las muestras mencionadas y se interpretó la distribución de los carbonatos según 3 categorías; bajo ($< 3.5\%$), moderado ($3.5-6\%$) y alto ($>6\%$).
 - b) se generaron un total de 25 plantas, cada 5 metros de cota, correspondientes a la altura de los bancos, que se intersectaron con las secciones modeladas y con los sondajes. Luego se interpretó la distribución de los carbonatos en cada una de las plantas utilizando las tres categorías descritas.

Con esto se interpretó en 2 dimensiones, en secciones y plantas. Para generar una interpretación en 3 dimensiones se exportaron los polígonos creados en el modelo geológico a Gemcom, software que permitió realizar el modelo de bloques tridimensional, en el cual se trabajó en conjunto con la ingeniera María Angélica González.

2. Para determinar los factores que inciden en la dispersión y las diferencias observadas en la correlación entre consumo de ácido y contenidos de CO_3 se realizó un estudio petrográfico y mineralógico de 12 rechazos de columnas, mediante la descripción de briquetas transparentes

y pulidas. Se puso especial énfasis en identificar los carbonatos presentes, además de la calcita, para llegar a un equilibrio entre estas especies y los contenidos de CO₃, así como en identificar otras especies consumidoras de ácido tales como arcillas o plagioclasas que pudiesen justificar las diferencias entre consumos de ácido medidos y estimados. Cabe señalar que este estudio petrográfico fue solicitado por Compañía Minera Centenario Copper Ltda. directamente a Enrique Tidy. Por ser de interés en esta memoria hubo una participación conjunta en tal labor.

I.4. UBICACIÓN Y RUTAS DE ACCESO

El depósito de cobre Frankenstein se ubica en el distrito Altamira, cercano al límite sur de la IIª Región de Antofagasta (Figura 1). Se encuentra en el desierto de la Precordillera de los Andes, cuya fisiografía consiste de pequeñas lomas y extensas planicies a 1600 m.s.n.m., con elevaciones locales que alcanzan los 1700 m.s.n.m. El clima es árido sin caídas de agua en años normales y con temperaturas de 18 a 32°C en verano, a temperaturas bajo 0°C en invierno.

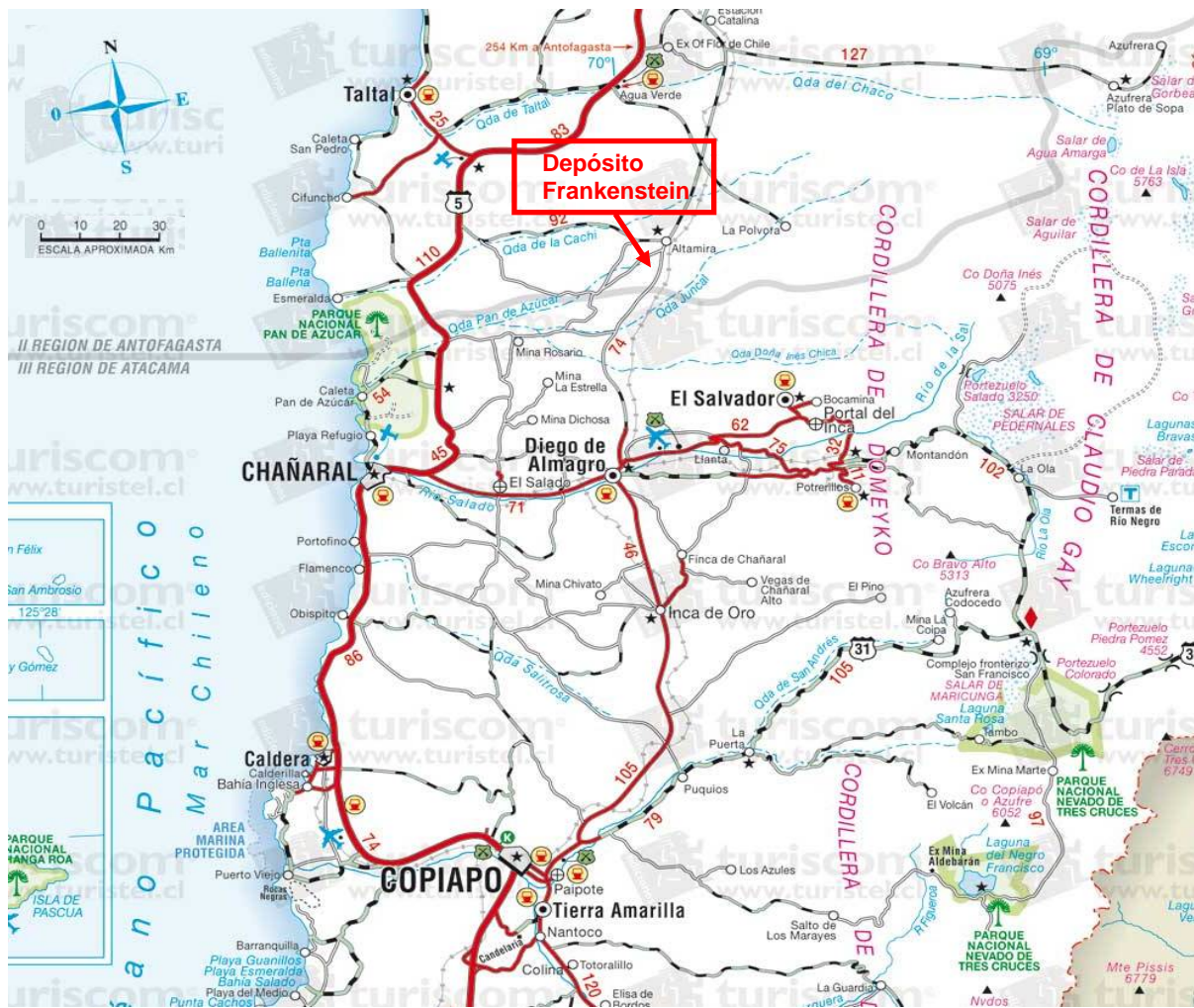


Figura 1: Ubicación y vías de acceso al depósito Frankenstein.

El acceso al área de estudio se puede realizar:

1. desde El Salvador, el recorrido se realiza en aproximadamente 2 horas de viaje en camioneta. Los primeros 30 km son por camino asfaltado, con dirección a Diego de Almagro. Poco antes de llegar a esta ciudad existe un desvío hacia Altamira, con dirección al norte. Este camino de 74 km está en buen estado, excepto en los últimos 20 km que presentan calamina y tierra suelta.
2. desde Copiapó, el trayecto se realiza en 3 a 4 horas de viaje en camioneta, tomando la ruta 5 Norte hasta llegar a un desvío que existe poco antes de la quebrada Pan de Azúcar, aproximadamente 90 km al norte de Chañaral, con dirección al este. Este lugar también se conoce con el nombre de Las Bombas. El camino está en muy buenas condiciones hasta la mina Teresa de Colmo, pero cambia drásticamente después, con abundante presencia de calamina así como de grandes chuscales (tierra suelta). A pesar de esto el uso de tracción 4x4 no es indispensable, pero si recomendable.

I.5. RESEÑA HISTÓRICA ACERCA DE LOS PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS

Según Habashi (2005), los orígenes de la hidrometalurgia pueden atribuirse al período en que los alquimistas pasaban la mayor parte de su tiempo buscando transformar metales como el hierro en oro. El descubrimiento del Agua Regia, mezcla de HCl y HNO₃, por parte de Jabir Ibn Hayyan (720-813 DC) también es relevante en los principios de la hidrometalurgia. Esta mezcla permite la disolución del oro.

En el siglo XVI, en España y Alemania se comenzó a extraer el cobre mediante la lixiviación de pilas, dejando montones de rocas con pirita y minerales sulfurados de cobre a la intemperie y bajo la acción de la lluvia, produciendo así oxidación y disolución de cobre. De tal forma una solución con sulfato de cobre era conducida desde la pila a una batea (piscina) en la que precipitaba cobre metálico en chatarras de hierro, lo que hoy en día se conoce como proceso de cementación.

Sin embargo, la hidrometalurgia moderna se remonta a 1887 cuando fueron descubiertos dos procesos claves: el proceso de cianuración para tratar las menas de oro y el proceso Bayer para producir alúmina.

A principios del siglo XX numerosos procesos de lixiviación y de recuperación fueron propuestos, en donde la hidrometalurgia del cobre recibió particular atención. En 1903, Malzac propuso el uso de soluciones de amonio para lixiviar sulfuros de cobre, níquel y cobalto.

En Chile, menas de óxido fueron lixiviadas con ácido sulfúrico diluido, procesos realizados a gran escala. Los sulfuros de cobre eran disueltos mediante la presencia de iones férricos que actuaban como agentes oxidantes. En 1912 se comenzó a utilizar la electro obtención para recuperar el cobre en vez de realizar los procesos de cementación descritos anteriormente. En los años 60 se hizo conocido el rol de las bacterias en los procesos de lixiviación y la extracción de cobre mediante la lixiviación en pilas e *in-situ* fue ampliamente utilizada para menas de baja ley.

En los últimos 25 años Chile desplazó a Estados Unidos como primer productor mundial de cobre. Esto estuvo directamente vinculado con el desarrollo de nuevas técnicas en la hidrometalurgia extractiva de cobre. La Sociedad Minera Pudahuel (SMP) tuvo un rol importante en esto ya que, a fines de los años 70, perfeccionó y desarrolló dos técnicas de lixiviación; lixiviación en pilas TL (*thin layer*) y lixiviación BTL (*bacterial thin layer*) (Beckel, 2000).

En los últimos 15 años una importante variedad de procesos de lixiviación química y biológica han surgido para lograr, entre otras cosas, recuperar el cobre proveniente de la calcopirita (Dreisinger, 2006). Estos procesos han sido exitosos en este último punto así como en la recuperación de cobre metálico de alto valor y alta pureza. Algunos de los procesos que podemos mencionar son:

- *The Mount Gordon Copper Process*, desarrollado para tratar mena de calcosina en un depósito de Australia, que utiliza oxidación por presión a baja temperatura.
- *The Total Pressure Oxidation Process*, proceso que utiliza condiciones de alta temperatura y de oxidación total por presión para oxidar todos los minerales sulfurados en sulfatos y ácido sulfúrico.
- *The BIOCOPTM Process*, que utiliza bacterias termofilas para oxidar y lixiviar cobre a partir de concentrados de sulfuros. Una planta fue construida cerca de Chuquicamata para tratar los concentrados provenientes del depósito Mansa Mina.
- *The Seapon Copper Process* desarrollado para recuperar el cobre del depósito homónimo en Laos, cuya mineralogía es bastante compleja y consta de calcosina con pirita y de arcillas mineralizadas.
- *The Anglo American Corp. /University of British Columbia Copper Process*, proceso de lixiviación a temperatura media para concentrado de calcopirita, el cual es chancado a un tamaño pequeño (P_{80} 5-20 μm) y es lixiviado bajo condiciones de presión moderadas a una temperatura de 150 °C en un sistema de ácido sulfúrico. Agregando un surfactante se logra lixiviar la calcopirita.

En el año 2002, la Minera Michilla S.A., desarrolló y patentó el proceso de lixiviación llamado “Cuprochlor”, proceso iniciado en los años 80 por la Sociedad Minera Pudahuel, y que busca lixiviar los minerales sulfurados. Consiste básicamente en adición de cloruro de calcio, CaCl_2 , y ácido sulfúrico a la mena en la etapa de aglomeración. El mineral aglomerado en estas condiciones tiene altas concentraciones de ión Cl sobre 100 gpl, el que sumado al fierro que se está disolviendo, al alto contenido de ión cobre que se genera, la excelente aireación del mineral aglomerado y el ácido presente, crean un ciclo de oxidación auto-catalítico que persistirá mientras exista ácido. Es decir, en esta etapa del proceso se oxida más del 50% del Cu insoluble. Presenta tiempos de lixiviación que no superan los 100 a 110 días, contra períodos de casi un año que requiere la lixiviación bacteriana.

Por último, señalaremos el proceso de lixiviación férrica, que será ocupado en el depósito de cobre Frankenstein. Este proceso desarrollado por la Minera Cyprus en los años 80 permite oxidar sulfuros pobres en hierro, tales como la calcosina, la covelina y la bornita, mediante la activación de ión férrico, presenten la mena o, en caso contrario, agregado artificialmente.

Como podemos ver, los procesos de hidrometalurgia van en constante evolución con el fin de maximizar la recuperación de cierto elemento y de obtener un material lo más puro posible. Esto ha representando un desafío permanente para el hombre durante el desarrollo de esta disciplina.

I.6. TRABAJOS ANTERIORES

Existe abundante bibliografía sobre la geología del área de estudio. HARRINGTON (1961) y GARCIA (1967) caracterizaron las unidades estratificadas jurásicas del norte grande de Chile. Este último definió la Formación La Negra, presente a lo largo de la Cordillera de la Costa desde Iquique hasta el sur de Taltal. FERRARIS y DI BLASE (1978) realizaron un mapa geológico en el sector de Antofagasta caracterizando las rocas intrusivas pertenecientes al batolito costero, de edad jurásica-cretácica inferior. GONZALEZ y WALKER (1979) efectuaron un reconocimiento geológico en la hoja Altamira. NARANJO y PUIG (1984) hicieron un levantamiento geológico del área de Taltal y Chañaral realizando una descripción de las unidades presentes, tales como la Formación Aeropuerto, unidad relevante en el depósito Frankenstein. Esta unidad también fue descrita por MARINOVIC *et al.* (1995) en su levantamiento de la hoja Aguas Blancas. Previamente fue definida informalmente por ULRIKSEN (1979). ROGERS y HAWKESWORTH (1989), en base a valores bajos de razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ determinaron una escasa contaminación cortical para la Formación La Negra. BASSO (2004) determinó edades U-Pb de 169 Ma para la Formación La Negra en el área de Antofagasta. OLIVEROS (2005) realizó abundantes dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de la Formación La Negra, entre los 18°30' y 24°S, determinando que la actividad magmática ocurrió entre los 159 y 137 Ma, en el Jurásico Superior-Cretácico Inferior. También determinó edades mayores de 175 y 170 Ma en la zona de Iquique.

La Zona de Falla de Atacama (ZFA), de escala continental que se presenta a lo largo de la Cordillera de la Costa desde Iquique hasta el sur de la Serena, también ha sido objeto de numerosos estudios. ARABASZ (1971) la subdividió en diversos segmentos limitados por fallas subsidiarias de la ZFA. Hoy en día se definen 3 segmentos principales que de norte a sur son Salar del Carmen estudiado por NARANJO (1987), Paposo y El Salado-Vallenar estudiado por THIELE y PINCHEIRA (1987). Además, estudios recientes de EMPARAN y PINEDA (2000, 2005) al norte y sur de La Serena y de ARANCIBIA (2004) permiten proponer un nuevo segmento, Romeral-La Silla del Gobernador, para la ZFA. SAINT AMAND y ALLEN (1960) fueron los primeros en proponer un movimiento de rumbo para la ZFA. Para el segmento Paposo, HERVE (1987a, b) definió movimientos sinestrales durante el Cretácico inferior y movimientos normales durante el Mioceno.

JANSEN y TAYLOR (2003) realizaron un estudio sobre la influencia de la mineralogía de ganga en el consumo de ácido durante los procesos de lixiviación en pilas de óxidos de cobre.

II. MARCO GEOLÓGICO

El marco geológico se restringirá a la zona occidental y central de la hoja Taltal-Chañaral levantada por Naranjo y Puig en 1984. En ella se han descrito rocas estratificadas que comprenden edades del Paleozoico inferior al Cuaternario y rocas intrusivas con edades del Paleozoico Superior hasta el Triásico. En la figura 2 se muestra la ubicación del depósito de cobre Frankenstein, en parte del mapa geológico de Chile 1:1000000. De las unidades descritas a continuación, solamente la Formación Aeropuerto ha sido reconocida en el depósito. Además en la figura 3 se presenta un esquema estratigráfico generalizado para la hoja Taltal-Chañaral.

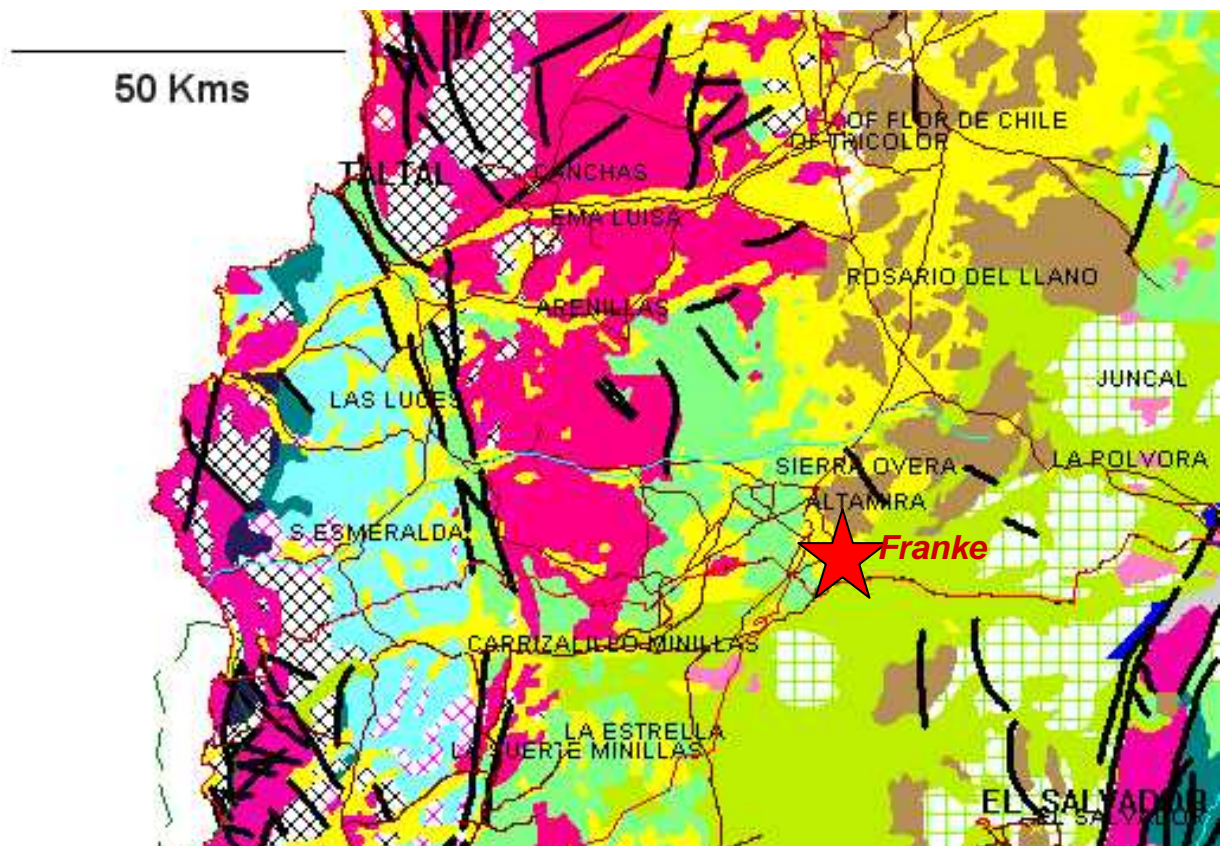


Figura 2: Ubicación del depósito Frankenstein en el mapa geológico de Chile, escala 1:1000000.

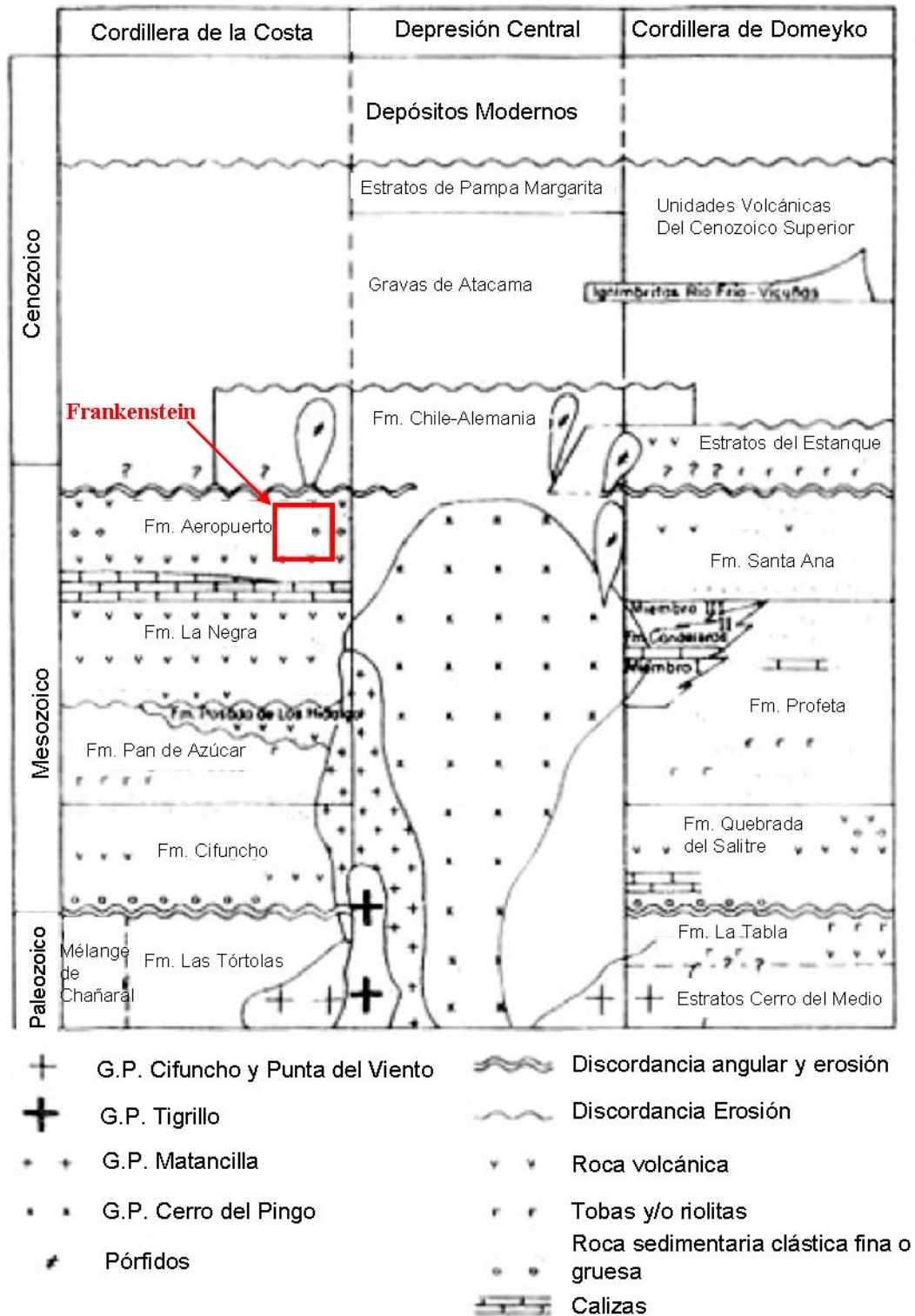


Figura 3: Esquema estratigráfico generalizado de la Hoja Taltal-Chañaral (Naranjo y Puig, 1984).

II.1. ROCAS ESTRATIFICADAS

II.1.1. Formación Las Tórtolas (Pzt)

Definición:

Ulriksen (1979) definió la Formación Las Tórtolas, o Complejo Epimetamórfico Chañaral (Godoy y Lara, 1998, 1999), como “una secuencia de 1000 m de rocas metasedimentarias, compuestas por cuarcitas, pizarras, filitas y esquistos micáceos, que afloran en la zona costera del área de Cifuncho”. La prolongación hacia el sur se conoce con el nombre de Basamento Metasedimentario (Mercado, 1977, Naranjo, 1978). En la zona de Chañaral esta formación está afectada por una deformación intensa generando discontinuidad y mezcla de estratos (Naranjo y Puig, 1984), y que Bell (1982) denominó *Mélange* de Chañaral.

Distribución y litología:

Corresponde a una serie de areniscas y lutitas interestratificadas, con intercalaciones de calizas, cherts, limonitas y metabasitas, y que presentan un metamorfismo de bajo grado. Afloran en una franja continua de 12 km de ancho de orientación NNE, desde Sierra Matancilla hasta Quebrada de Chañaral, al noreste de Taltal. Al este de la Zona de Falla Atacama, la Formación Las Tórtolas sólo es identificada en afloramientos esporádicos (Naranjo y Puig, 1984).

Al norte de Cifuncho aflora una alternancia de capas de arenisca y filitas, de espesores variables entre 10 y 50 cm, que presentan un metamorfismo de bajo grado (facies esquistos verdes).

Las areniscas son inmaduras, mal seleccionadas, de grano fino a muy fino. Han sido clasificadas como areniscas líticas feldespáticas, con fragmentos líticos que incluyen andesitas, vidrio volcánico y rocas metamórficas. Presentan abundante matriz (< 40%), principalmente secundaria producto de la alteración del material volcánico y de los feldespatos.

Las intercalaciones de caliza, mencionadas anteriormente, aparecen en la mayoría de los afloramientos y tienen espesores variables entre 0.2 y 4 m. En algunos casos, estas calizas, a su vez, presentan niveles de cherts macizos de 0.6 m de espesor.

Las metabasitas (brechas hialoclásticas y lavas de almohadilla) presentan un contacto tectónico con las sedimentitas, desconociéndose su posición estratigráfica real dentro de la formación (Naranjo y Puig, 1984).

Relaciones de contacto:

La base de la Formación Las Tórtolas es desconocida. Su techo está en contacto por discordancia angular tanto con la Formación Cifuncho como con la Formación Pan de Azúcar. Además está intruida por plutones del Pérmico (Berg y Baumann, 1985). Por otra parte, toda esta serie está intensamente deformada por lo que no se ha podido determinar un espesor real (Naranjo y Puig, 1984).

Edad y ambiente de depositación:

Bell (1982) observó abundantes trazas fósiles en las areniscas de la Formación Las Tórtolas, destacando la identificación de 13 ichnogéneros, que sugieren una edad paleozoica inferior (Ordovícico-Devónico). Bahlburg *et al.* (1987) indican también la presencia de un

conodontes Carbonífero. Además, las razones $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ en los sedimentos de esta formación indican una edad máxima de depositación de 380 Ma (Devónico Medio).

Por otra parte, Bell considera la Formación Las Tórtolas como una secuencia rítmica de turbiditas distales, asociada con sedimentitas pelágicas y rocas volcánicas depositadas en una cuenca oceánica de mar profundo. Estas turbiditas provendrían desde el NW de acuerdo a la descripción de marcas de fondo observadas en areniscas. Además el material clástico tendría una procedencia terrígena. Estos antecedentes y la presencia del *Mélange* de Chañaral indicarían que las rocas de la Formación Las Tórtolas estén asociadas a un prisma de acreción durante el Paleozoico.

II.1.2. Formación Cifuncho (TRc)

Definición:

García (1967) definió la Formación Cifuncho como “una secuencia constituida por conglomerados, areniscas, brechas volcánicas y tobas, que afloran en la Quebrada de Cifuncho”. También se incluye en esta unidad la secuencia de lavas y brechas volcánicas que Mercado (1980) definió como Formación Agua Chica en el área de Pan de Azúcar.

Distribución y litología:

Esta unidad presenta variaciones en su litología, con un predominio de rocas sedimentarias en el norte y de rocas volcánicas hacia el sur. En la ladera sur de la Quebrada Cifuncho y en la Caleta Cifuncho aflora una secuencia de ortoconglomerados pardo rojizos, polimícticos. Presentan intercalaciones de brechas volcánicas y tobas de color gris-verdoso. Se encuentran secuencias similares en los sectores de Caleta Paposos y Quebrada San Ramón.

En los sectores de Cerro Hornillos y de Quebrada La Cachina esta unidad presenta un nivel inferior de brechas piroclásticas andesíticas de color violáceo a rojizo con interestratificaciones de lavas andesíticas brechosas. Hacia el techo se intercalan niveles epiclásticos. Las rocas sedimentarias se caracterizan por una alternancia rítmica de capas de areniscas finas a gruesas con intercalaciones delgadas de lutitas y conglomerados. También se presentan algunos niveles de chert y de calizas lacustres (Naranjo y Puig, 1984).

Relaciones de contacto:

La Formación Cifuncho sobreyace a la Formación Las Tórtolas por discordancia angular y subyace a la Formación Pan de Azúcar en contacto concordante y gradual. En la Quebrada Cifuncho aflora una secuencia de aproximadamente 1000 m de espesor.

Edad y ambiente de depositación:

Ya mencionamos que la Formación Pan de Azúcar, del Hettangiano sobreyace concordantemente a la Formación Cifuncho, lo que sugiere una edad mínima del Triásico Superior para esta última. Esto se corrobora por la presencia de flora fósil similar a la flora triásica superior presente en la Formación La Ternera (Naranjo y Puig, 1984).

Las características sedimentológicas de la Formación Cifuncho y sus variaciones laterales, de norte a sur, sugieren un ambiente de depositación continental, de llanuras aluviales y lacustres,

con una fuente al NW, W más allá de la línea de costa actual (Charrier *et al.*, 2007). El importante espesor del material clástico grueso y mal seleccionado sugieren una depositación cercana a un graben o semi-graben (Suárez y Bell, 1992). Además, asociado con la sedimentación hubo un evento de volcanismo andesítico con los centros eruptivos hacia el sur de la hoja Taltal donde predominan las facies volcánicas (Naranjo y Puig, 1984).

II.1.3. Formación Pan de Azúcar (Jpa)

Definición:

Naranjo (1978) definió la Formación Pan de Azúcar como “un conjunto homogéneo de rocas sedimentarias clásticas, marinas, fosilíferas, bien estratificadas, que afloran típicamente en la Quebrada Pan de Azúcar”. Ulriksen (1979) también considero a las rocas sedimentarias marinas que afloran en el sector de Sierra Esmeralda como parte de esta formación.

Distribución y litología:

Los afloramientos de la Formación Pan de Azúcar se reconocen en forma relativamente continua desde la Quebrada Gritón hasta la Sierra Esmeralda.

En su base presenta areniscas conglomerádicas grises con intercalaciones de tobas y escasas areniscas calcáreas. Hacia arriba presenta una estratificación más fina de areniscas y lutitas con numerosas intercalaciones de tobas. También es común la presencia de concreciones calcáreas y de material fosilífero, principalmente hacia el techo (Naranjo y Puig, 1984).

Relaciones de contacto:

La Formación Pan de Azúcar sobreyace en contacto gradacional a la Formación Cifuncho. Hacia el sur de la Hoja Taltal-Chañaral está en contacto por discordancia angular con la Formación Las Tórtolas. Subyace en discordancia de erosión a la Formación La Negra. Su espesor real no ha podido ser determinado con certeza debido a la deformación que la afecta. De todas maneras se ha podido determinar un espesor mínimo de 150 m en su localidad tipo (Naranjo, 1978) y de 700 m en el sector de Sierra Esmeralda (Ulriksen, 1979).

Edad y ambiente de depositación:

El abundante material fosilífero de la Formación Pan de Azúcar ha permitido reconocer los pisos Hettangiano-Sinemuriano Inferior y, particularmente, Hettangiano-Sinemuriano Superior en la Quebrada Pan de Azúcar.

La abundancia de amonites indica un ambiente de depositación marino mientras que las intercalaciones de depósitos tobáceos y piroclásticos señalan una intensa actividad volcánica ácida (freatomagmática ?) durante la sedimentación, cuyos centros volcánicos se habrían encontrado al noreste o en las inmediaciones de los actuales afloramientos de la Formación Pan de Azúcar (Suárez *et al.*, 1982).

II.1.4. Formación La Negra (Jln)

Definición:

García (1967) definió la Formación La Negra como una secuencia de lavas andesíticas con intercalaciones de brechas y rocas sedimentarias que afloran desde Quebrada La Negra (localidad tipo, al sur de Antofagasta) hasta el sur de Taltal, e incluso hasta la zona de Chañaral (Mercado, 1978).

Distribución y litología:

La Formación La Negra se distribuye en una franja prácticamente continua a lo largo de la Cordillera de la Costa, de 8 a 18 km de ancho, desde Quebrada la Negra hasta Chañaral, al oeste de la Zona de Falla Atacama.

Litológicamente se caracteriza principalmente por lavas andesíticas porfídicas, brechas volcánicas y tobas. Algunos niveles de lavas son “ocoíticos”, con estructuras de almohadillas. Las intercalaciones sedimentarias corresponden a depósitos continentales, caracterizados por areniscas pardo-rojizas y por lentes conglomerádicos de clastos exclusivamente andesíticos, y a depósitos marinos, tales como areniscas calcáreas, margas y calizas fosilíferas (Naranjo y Puig, 1984).

Relaciones de contacto:

La Formación La Negra se apoya en discordancia de erosión sobre la Formación Pan de Azúcar, aunque, en el área de Paposo la sobreyace en aparente concordancia. Está en contacto por Falla con la Formación Aeropuerto y es intruida por granodioritas del Grupo Plutónico Matancilla (Naranjo y Puig, 1984). En el sector de Quebrada Cifuncho se estima un espesor de más de 5000 m.

Edad y ambiente de depositación:

Los fósiles identificados en la Formación La Negra corresponden al Pliensbachiano para el sector de Cerro Blanco. Bajo este nivel sedimentario existen unos 200 m de rocas volcánicas sin base expuesta, lo que sugiere una edad menor para esta secuencia. En el sector de Cerros Buena Esperanza los niveles sedimentarios presentan fósiles atribuibles al Bajociano. Además, como mencionamos anteriormente, en el sector de Paposo la Formación La Negra está en aparente concordancia sobre la Formación Pan de Azúcar, del Sinemuriano. Estos datos permiten inferir una edad máxima Sinemuriano-Pliensbachiano para la base de la Formación La Negra (Naranjo y Puig, 1984). Por otro lado, dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ recientemente realizadas por Oliveros (2005) indican una edad de 159 a 137 Ma, Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Oxfordiano-Berriasiano), para la Formación La Negra.

Las facies presentes en la Formación La Negra y su considerable potencia hacen pensar que representa el arco volcánico del Jurásico. Las intercalaciones de depósitos marinos indicarían breves períodos de interrupción de la actividad volcánica.

II.1.5. Formación Aeropuerto (Ka)

Definición:

Ulriksen (1979) definió informalmente la Formación Aeropuerto como una secuencia volcano-clástica con intercalaciones sedimentarias continentales y marinas, y que dividió en dos miembros. Sin embargo, Naranjo y Puig (1984), considerando las similitudes entre ambos miembros, redefinieron esta unidad eliminando esta subdivisión. A pesar de esto, en el área de estudio la Formación Aeropuerto ha sido dividida en 3 miembros (Capítulo III.1.).

Distribución y litología:

La Formación Aeropuerto se presenta en el lado oriente de la Cordillera de la Costa, desde las vecindades del Aeropuerto Breas de Taltal hasta la Quebrada Pan de Azúcar. Se presenta como una secuencia volcano-sedimentaria con intercalaciones de lavas andesíticas y calizas. Esporádicamente se presentan niveles de lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados, estos últimos con clastos de andesitas porfídicas. Al norte del Aeropuerto Breas la secuencia es predominantemente volcánica andesítica, con coladas de hasta 10 m de espesor. En el sector de Juncal-Carrizalillo aflora una secuencia constituida principalmente por lavas andesíticas, en algunos casos ocoíticas y amigdaloidales, con intercalaciones de brechas conglomerádicas. Hacia el techo, las intercalaciones sedimentarias son más finas y se constituyen de brechas y areniscas (Naranjo y Puig, 1984).

Relaciones de contacto:

La base de la Formación Aeropuerto está truncada hacia el oeste por la traza de la Zona de Falla Atacama, constituyendo un límite arbitrario con la Formación La Negra, de la cual se diferencia por un carácter más clástico sedimentario y por la presencia de intercalaciones de calizas. Subyace en discordancia a la Formación Chile-Alemania del Terciario Inferior. En el sector de Juncal-Carrizalillo aflora una secuencia de aproximadamente 3000 m de espesor

Edad y ambiente de depositación:

El contenido fósil, *Exogyras* mal conservadas y fragmentadas, recolectado en la Formación Aeropuerto es característico del Cretácico. En el sector de Diego de Almagro se encontraron amonites del Valangianiano. Con estos antecedentes se le asigna una edad Cretácica Inferior, aún cuando pueda tener una edad menor al estar en contacto erosivo con la Formación Chile-Alemania (Naranjo y Puig, 1984).

La Formación Aeropuerto representaría los productos del arco volcánico durante el Cretácico Inferior, como una continuación del arco volcánico Jurásico manifestado en la Formación La Negra. Su ambiente depositacional habría sido principalmente continental, en cuencas intravolcánicas, con algunos episodios locales de transgresiones marinas (Naranjo y Puig, 1984).

II.1.6. Formación Chile-Alemania (Tcha)

Definición:

Chong (1973) definió la Formación Chile-Alemania como “una secuencia de rocas volcánicas divididas en un Miembro Inferior de riolitas y dacitas y uno Superior de andesitas y basaltos”. Sin embargo, Naranjo y Puig (1984) consideran que al menos en la Hoja Taltal no se justifica diferenciarla en dos miembros. Además incluyen a la Formación Cerro Avestruz (Chong, 1973) dentro de esta formación en base a determinaciones radiométricas que no permiten considerarlas productos de eventos volcánico independientes. El mismo Chong (1977) no considera a la Formación Cerro Avestruz como una unidad independiente al realizar una revisión de la geología.

Naranjo y Puig (1984) redefinen la Formación Chile-Alemania como “un conjunto de rocas volcánicas (lavas y piroclastos) de composición andesítico-dasítica, con basaltos y riolitas subordinadas, que afloran típicamente en los alrededores de las salitreras homónimas”. Incluyen además en esta unidad los pórfidos subvolcánicos, que corresponden a los centro de emisión de la misma.

Relaciones de contacto:

La Formación Chile-Alemania sobreyace en discordancia angular a la Formación Santa Ana del Cretácico, y en discordancia de erosión a rocas paleozoicas, granitoides del Cretácico y a la Formación Aeropuerto. Subyace, en discordancia de erosión a las Gravas de Atacama del Oligo-Mioceno (Naranjo y Puig, 1984). En el sector de Catalina se ha estimado un espesor de 700 a 1000 m para esta formación, basándose en la diferencia de cotas y suponiendo una disposición subhorizontal de sus capas.

Edad y Ambiente de depositación:

Debido a sus relaciones de contacto con la formación Santa Ana y con las Gravas de Atacama se puede asignar una edad Cretácico Superior-Terciario Inferior a la Formación Chile-Alemania. Además, se obtuvieron dataciones K-Ar de 66 ± 5 a 47 ± 2 Ma que permiten restringir esta formación al Cretácico Superior-Eoceno Medio.

La Formación Chile-Alemania representa la más occidental de las unidades volcánicas cenozoicas del sector de los Andes, formando parte de una antigua cadena volcánica de margen continental activo (Naranjo y Puig, 1984).

II.1.7. Gravas de Atacama (Tga)

Definición:

Se define informalmente Gravas de Atacama a los depósitos polimícticos, mal seleccionados y generalmente no consolidados que afloran en gran parte del Norte de Chile. Presentan algunas intercalaciones de flujos ignimbríticos y están parcialmente cubiertas por depósitos aluviales, coluviales y salinos (Naranjo y Puig, 1984). Representan acumulaciones de flujos de detritos producto de la denudación de los terrenos andinos, alzados en un medio árido

(Mortimer, 1973). Generalmente, presentan mala estratificación con espesores expuestos que varían de 5 a 150 m.

Dataciones radiométricas provenientes de las ignimbritas intercaladas en las gravas, entregan edades K-Ar de 24 ± 2 a 13.7 ± 2 Ma, que por lo tanto, permiten asignarle a las Gravas de Atacama una edad Oligoceno-Mioceno.

II.2. UNIDADES INTRUSIVAS

En las Hojas Taltal y Chañaral, las rocas intrusivas afloran principalmente en el sector occidental, mientras que en la zona oriental afloran de forma restringida. Ninguno de estos grupos ha sido identificado en la zona del proyecto.

II.2.1. Grupo Plutónico Cifuncho (Pzgc)

Definición:

Naranjo y Puig (1984) definen informalmente como Grupo Plutónico Cifuncho a “un conjunto de rocas plutónicas, de grano grueso, leucocráticas, tipo sieno y monzogranito, que afloran principalmente en la Cordillera de la Costa, al sur del paralelo $25^{\circ}30' S$ ”. Se exponen típicamente en la desembocadura de Quebrada Cifuncho, Sierra Vetada y Cerros de Cifuncho.

Relaciones de contacto:

El Grupo Plutónico Cifuncho aparece intruyendo a rocas deformadas de la Formación Las Tórtolas, presentando contactos nítidos y bien definidos. A su vez está intruido por diques andesíticos decamétricos, así como por los grupos plutónicos Tigrillo y Cerro El Pingo. La Formación Cifuncho (Triásico) se dispone en discordancia de erosión sobre esta unidad (Naranjo y Puig, 1984).

Edad y origen de la intrusión:

De acuerdo a las relaciones de contacto con las formaciones Las Tórtolas y Cifuncho mencionadas en el párrafo anterior podemos limitar la edad del Grupo Plutónico Cifuncho al Paleozoico Medio-Triásico Superior. Además, antecedentes radiométricos (K-Ar) de muestras provenientes de Caleta Cifuncho entregan edades de 259 ± 8 y 273 ± 8 Ma, que permiten asignar una edad de intrusión Pérmico Inferior (Naranjo y Puig, 1984).

Además, debido a sus altas razones iniciales de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Berg *et al.* (1983) señalaron que estos granitoides serían del tipo S.

II.2.2. Grupo Plutónico Tigrillo (TJgt)

Definición:

Naranjo y Puig (1984) denominan informalmente como Grupo Plutónico Tigrillo a rocas monzograníticas de grano grueso a aplíticas finas, que afloran en la Quebrada de Tigrillo. También se asignan a esta unidad cuerpos intrusivos que afloran al sur de Chañaral y en la Quebrada Animas Viejas.

Relaciones de contacto:

En la quebrada homónima, el Grupo Plutónico Tigrillo intruye a la Formación Las Tórtolas y a granitoides del Grupo Plutónico Cifuncho. Hacia el sur intruye al *Mélange* de Chañaral (Naranjo y Puig, 1984).

Edad de intrusión:

Dataciones radiométricas del Grupo Plutónico Tigrillo entregan edades K-Ar de 198 ± 4 a 193 ± 5.8 Ma. Considerando que estas dataciones pueden corresponder a edades de cristalización de los plutones, se podría decir que su intrusión ocurrió Triásico Superior-Liásico (Naranjo y Puig, 1984).

II.2.3. Grupo Plutónico Matancilla (Jgm)

Definición:

Naranjo y Puig (1984) denominan informalmente como Grupo Plutónico Matancilla a un conjunto de rocas petrográficamente heterogéneas, compuestas principalmente por tonalitas y granodioritas, que afloran típicamente en las quebradas Matancilla y Bandurrias en el norte de la Hoja Taltal.

Relaciones de contacto:

Intruye a las formaciones Las Tórtolas, La Negra (en quebrada Zanjones) y Pan de Azúcar (en Quebrada Cachina). Esta cubierto, en discordancia de erosión, sólo por las Gravas de Atacama y depósitos modernos (Naranjo y Puig, 1984).

Edad de intrusión:

Debido a sus relaciones de contacto, la edad máxima del Grupo Plutónico Matancilla sería post-Bajociano. Además, diversas dataciones K-Ar y Rb-Sr entregan edades entre los 160 y 150 Ma, correspondientes al Jurásico Medio-Superior.

La relación temporal y espacial que se observa entre este grupo plutónico y la Formación la Negra permite sugerir que este grupo está genéticamente relacionado con el volcanismo de La Negra (Naranjo y Puig, 1984).

II.2.4. Grupo Plutónico Cerro del Pingo (Kgcp)

Definición:

Ulriksen (1979) denominó como Grupo Plutónico Cerro del Pingo a “un gran batolito, aflorante en el sector de Cerro del Pingo, incluyendo dioritas, granodioritas y adamelitas”. Naranjo y Puig (1984) señalan que se prolonga hacia el norte y el sur de esa localidad con una gran variedad litológica que incluye dioritas, granodioritas, tonalitas, granitos y pórfidos.

Relaciones de contacto:

Intruye a la Formación Las Tórtolas, a rocas del Grupo Plutónico Cifuncho y a la Formación Aeropuerto. Está cubierto en discordancia de erosión por la Formación Chile-Alemania (Naranjo y Puig, 1984).

Edad de intrusión:

Debido a sus relaciones de contacto se puede restringir la edad del Grupo Plutónico Cerro del Pingo al Cretácico Inferior-Paleoceno. Además, numerosas dataciones K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ entregan edades entre los 121 y 109 Ma, por lo que restringen su edad al Cretácico Inferior (Naranjo y Puig, 1984).

En este caso también existe una relación temporal y espacial importante entre el grupo Plutónico Cerro del Pingo y la Formación Aeropuerto que permite vincularlos genéticamente.

II.2.5. Pórfidos Pampa Mirador (Kpm)

Definición:

Naranjo y Puig (1984) describen este intrusivo como un pórfido riolítico gris claro que aflora en Pampa Mirador, Cerro La Peineta y Cerro Chicoteado, en la parte central de la Hoja Taltal.

Relaciones de contacto:

A pesar de que sus contactos están muy mal expuestos, Naranjo y Puig (1984) interpretan que intruyen al Grupo Plutónico Cifuncho y a la Formación Aeropuerto. Además, están cubiertos en discordancia de erosión por las Gravas de Atacama.

Edad de intrusión:

Datos radiométricos entregan edades entre los 78 y 75 Ma, por lo que los Pórfidos Pampa Mirador serían del Cretácico Superior (Naranjo y Puig, 1984).

II.3. ESTRUCTURAS

II.3.1. Pliegues

De las unidades descritas en la Hoja Taltal-Chañaral y presentadas en este capítulo, podemos señalar que las unidades paleozoicas presentan una deformación penetrativa intensa mientras que las unidades más jóvenes (mezozoicas) presentan un menor grado de deformación, manifestado en un monoclinal.

Naranjo y Puig (1984) mencionan la presencia de una fábrica estructural penetrativa en la Formación Las Tórtolas. Se reconocen dos etapas de deformación, la primera (D_1) originó pliegues chevrón, que al norte tienen una orientación E-W con planos axiales manteando al N, mientras que hacia el sur, los pliegues están orientados NW-SE con planos axiales manteando al NE. La segunda fase de deformación (D_2) es de intensidad variable y no está siempre presente, pero que se reconoce porque afecta a los pliegues D_1 replegándolos. En el sector de Pan de Azúcar se han reconocido hasta 4 etapas de deformación, la primera correspondiente a un *boudinage* mientras que las 3 otras corresponden a plegamientos sobreimpuestos. Por relaciones de contacto con intrusivos se señala que esta deformación sería pre-Pérmico.

Por otra parte las unidades mesozoicas descritas en el área no presentan deformación penetrativa; forman un monoclinal simple, inclinado al este. En los niveles más plásticos de la Formación Pan de Azúcar se presentan pliegues asimétricos con longitudes de onda y amplitudes decamétricas, así como en las intercalaciones calcáreas de la Formación Aeropuerto, que presentan pliegues volcados hacia el este, con longitudes de onda de hasta 50 m, amplitudes de 30 m y planos axiales de rumbo N-S, inclinados 30° al este (Naranjo y Puig, 1984).

III.3.2. Fallas

En la Hoja Taltal-Chañaral se reconocen dos estructuras principales de tendencia N-S. Las unidades costeras están cortadas por la Zona de Falla Atacama (ZFA), mientras que las unidades de la Cordillera de Domeyko están afectadas por la falla homónima. El depósito de cobre Frankenstein se encuentra ubicado aproximadamente equidistante de ambas estructuras.

Zona de Falla Atacama (ZFA)

La ZFA corresponde a una estructura de escala continental, con una orientación general N-S y que se presenta a lo largo de la Cordillera de la Costa, desde Iquique hasta el sur de La Serena. Sus movimientos han resultado tanto en una deformación dúctil como frágil. Los antecedentes de movimientos más antiguos que se conocen corresponden a rocas miloníticas formadas en el Jurásico Medio-Superior. Se reconoce una etapa de deformación extensional durante el Jurásico Superior seguida por una etapa de un desplazamiento sinistral y de exhumación de las unidades del Cretácico Inferior durante el Cretácico Superior (Charrier *et al.*, 2007). El movimiento sinistral a lo largo de la ZFA ha sido relacionado con la convergencia oblicua de la placa Alud (Phoenix).

En la hoja Taltal la ZFA pone en contacto a la Formación Aeropuerto con las formaciones Las Tórtolas y La Negra, y con los grupos plutónicos Cifuncho y Cerro del Pingo (Naranjo y Puig, 1984).

Falla Domeyko (FD)

La FD corresponde a una falla inversa que limita al oeste la Cordillera de Domeyko y que eleva sobre las rocas mesozoicas el núcleo paleozoico de dicha cordillera. Posee un rumbo que varía de N30°E a N5°W, con manteos de 25-30° hacia el E.

Falla Taltal

Según Naranjo y Puig (1984), la Falla Taltal corresponde a “una falla oblicua, que corta y desplaza la ZFA y se reconoce por 35 km, desde el puerto homónimo hacia el sureste. Tiene un rumbo de N50°W, con manteo subvertical, y pone en contacto a la Formación Aeropuerto con la Formación Las Tórtolas y con el Grupo Plutónico Cerro del Pingo”. Esta falla corta y desplaza sinistralmente por casi 8 km al sector El Salado de la ZFA. Esto también ocurre con fallas menores subparalelas a la Falla Taltal que manifiestan desplazamientos sinestrales de 300 a 1000m.

En el área del depósito, el patrón estructural principal tiene un rumbo NW-NNW (capítulo III.), y aparentemente corresponde a la prolongación de la Falla Taltal.

III. GEOLOGÍA DISTRITAL DE FRANKENSTEIN

El depósito de cobre Frankenstein se ubica en el sur de la IIª Región de Antofagasta, en el distrito Altamira (Figura 4). En este sector se ha descrito la presencia de secuencias volcano-sedimentarias asignadas al Cretácico Inferior, intruidas por plutones del Cretácico-Paleoceno. Una estructura regional de tendencia NW-NNW, que aparentemente representa la prolongación de la Falla Taltal, controla el estilo estructural del área. La siguiente información proviene casi exclusivamente de un informe elaborado por GEOVECTRA en el año 2005. En caso contrario los autores son especificados.

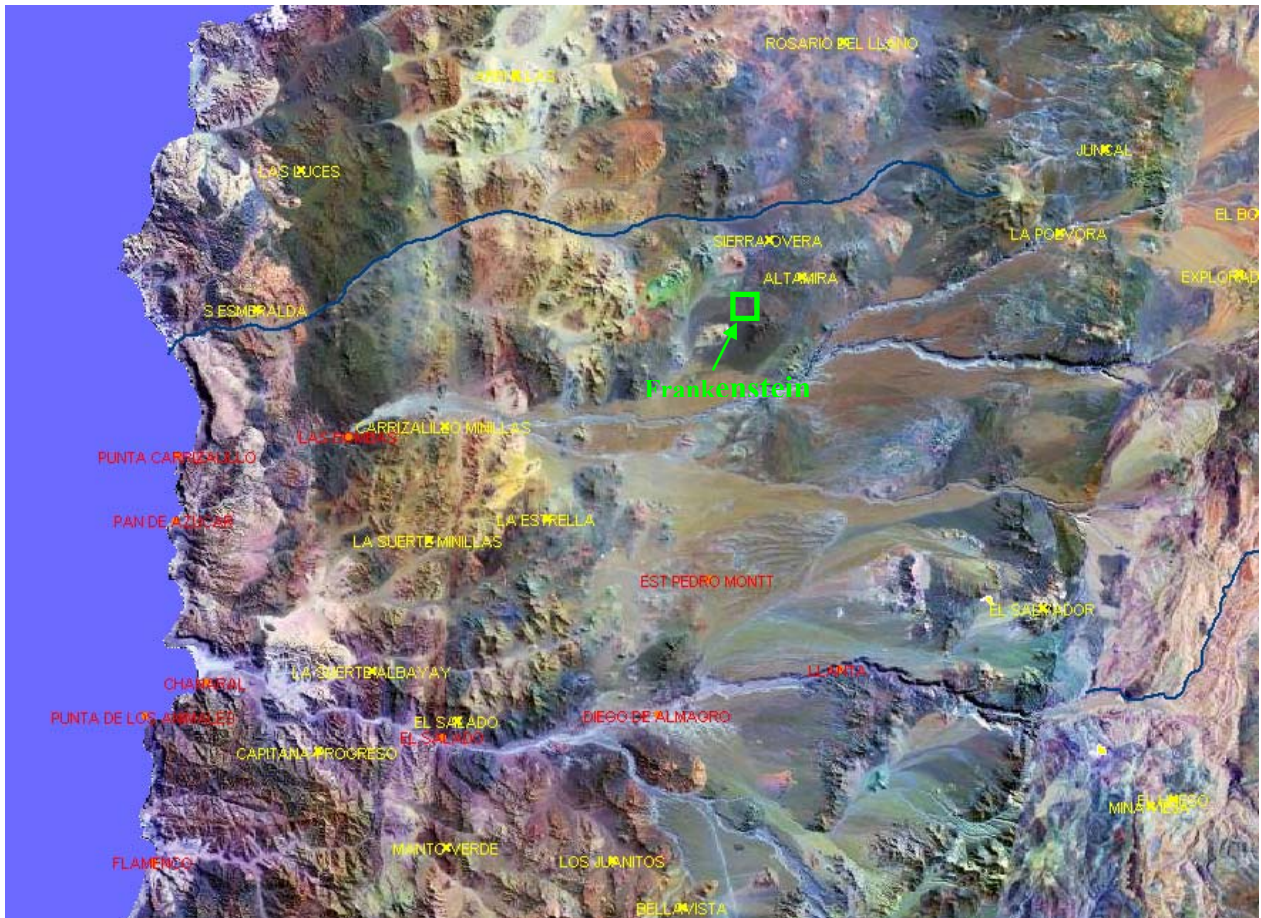
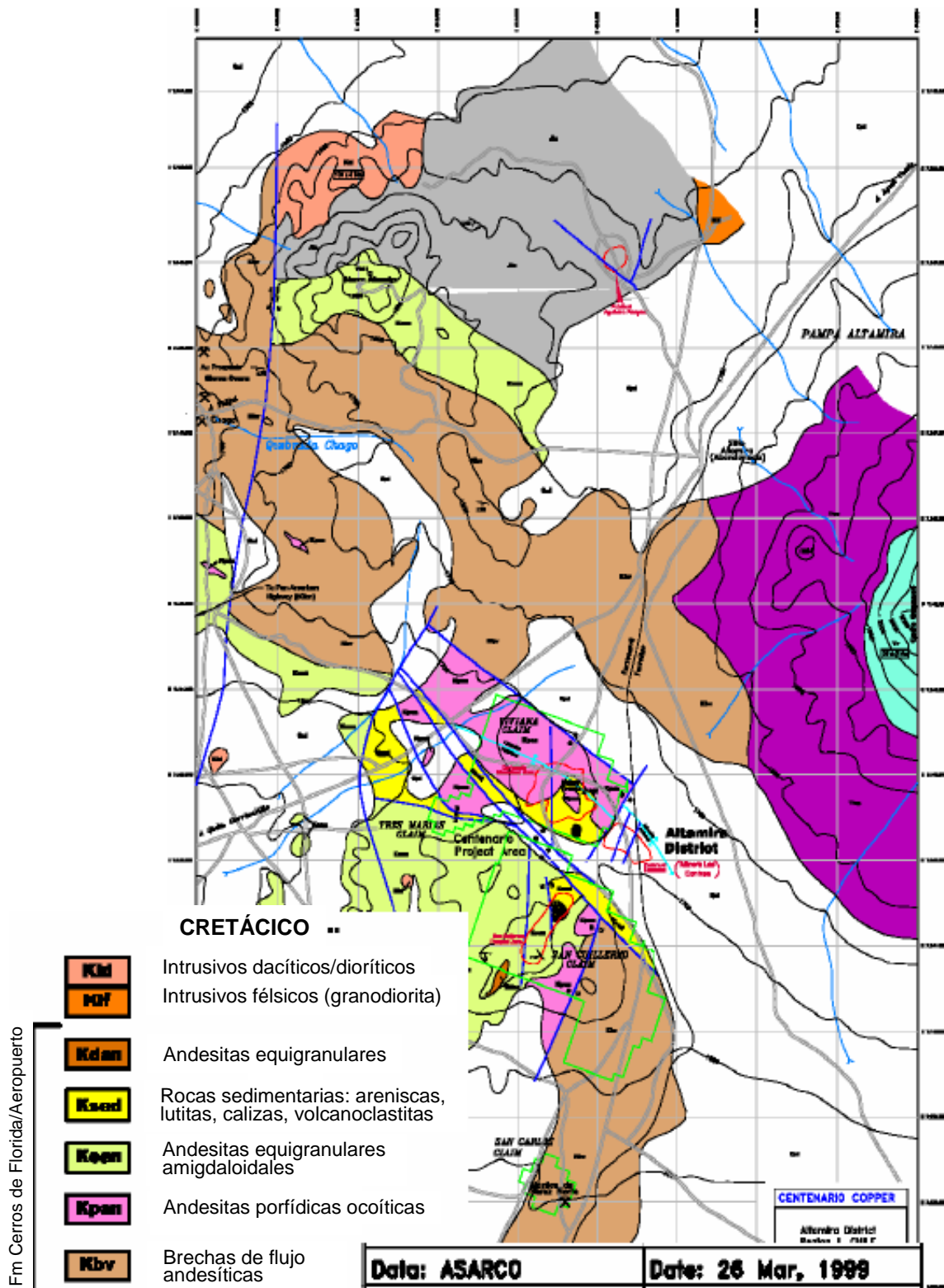


Figura 4: Ubicación del depósito Frankenstein en relación a las localidades (en rojo) y minas (en amarillo) cercanas.

III.1. ROCAS ESTRATIFICADAS

Las rocas del distrito Altamira están asignadas a la Formación Aeropuerto (Figura 5, SAMSA 2004). Esta formación de edad Neocomiana sobreyace concordantemente y en contacto por falla (Naranjo y Puig (1984) a la Formación La Negra. La Formación Aeropuerto sobreyace a una alternancia de brecha andesítica y unidades sedimentarias aglomerádicas, que representan la transición del arco volcánico Jurásico al arco continental desarrollado durante el Cretácico Inferior. Esta transición se observa unos 5 km al norte del Distrito Altamira. A pesar de lo mencionado en el capítulo II.1.5., la Formación Aeropuerto ha sido separada informalmente en 3 miembros:

- El miembro inferior corresponde a una secuencia de andesitas y de brecha de flujo de aproximadamente 250 m de espesor que corresponden a la unidad inferior de la formación. Las andesitas son generalmente afaníticas y las brechas de flujo presentan fragmentos tanto angulares como sub-redondeados. Son de origen sub-aéreo y se encuentran en la mayoría de los sondajes profundos bajo el depósito Frankenstein.
- La parte media de la Formación Aeropuerto, que alberga la mineralización de cobre en el depósito Frankenstein, es de aproximadamente 100 a 200 m de espesor y está dominada por flujos de lavas porfídicas intercalados con rocas sedimentarias, areniscas volcánicas, limolitas y calizas, que se presentan como grandes lentes, sugiriendo un origen fluvial o lacustre. La mayoría de las zonas de mena se encuentran en andesitas amigdaloidales porfídicas y en ocoitas, aunque una porción importante está albergada en andesitas afaníticas y una menor cantidad en rocas volcanoclásticas y calcáreas. En la figura 6, se presenta el mapeo de un pique. Este representa una columna estratigráfica tipo de este miembro. Actualmente está en discusión el origen de las ocoitas, pero se cree que pueden corresponder a cuerpos intrusivos presentes tanto en diques como en sills.
- El miembro superior de esta formación se caracteriza por andesitas afaníticas, en contraste con los flujos porfídicos de la parte media.



Fm Cerros de Florida/Aeropuerto

Figura 5: Rocas Cretácicas del distrito Altamira (SAMSA, 2004)

SHAFT 3

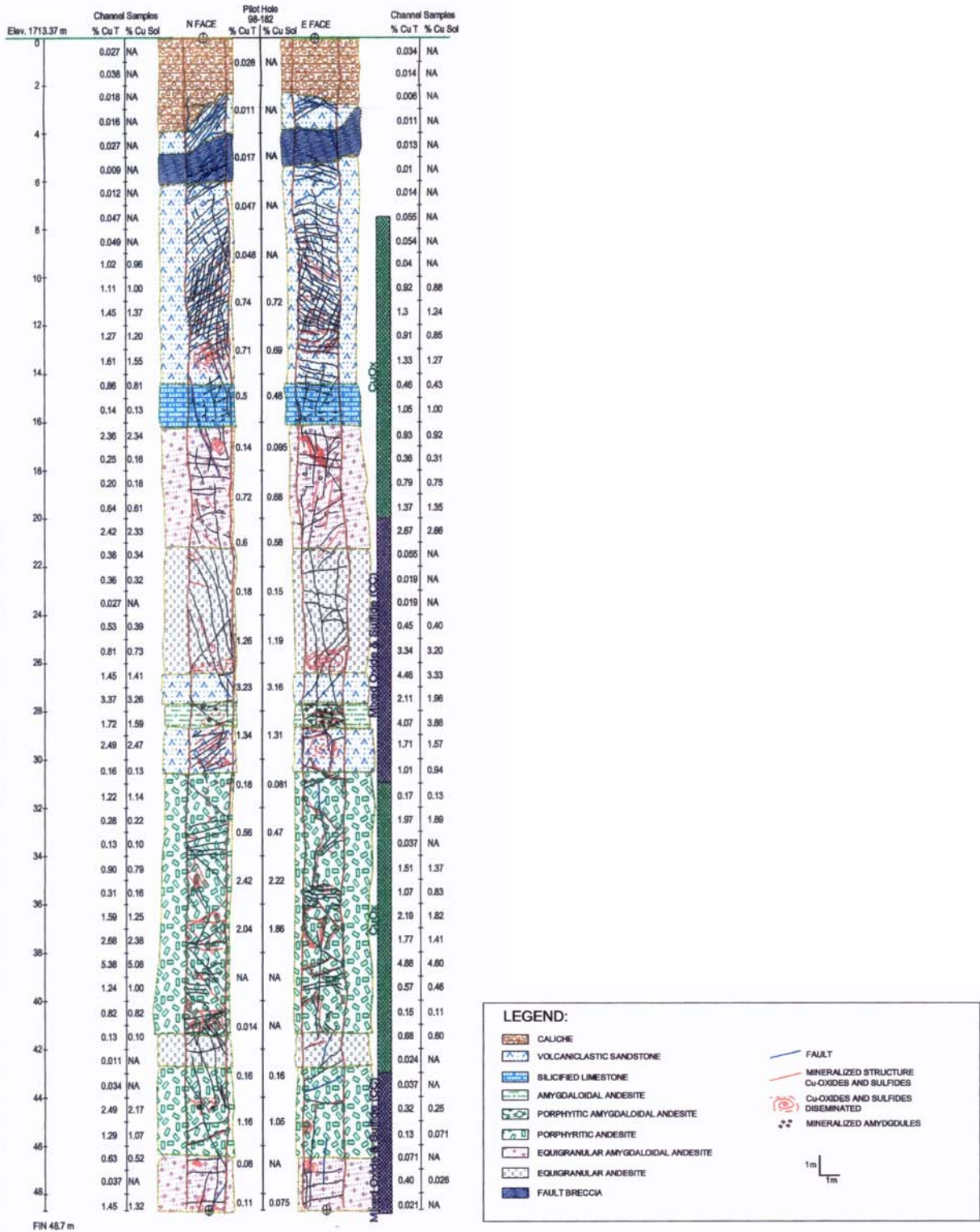


Figura 6: Columna estratigráfica del miembro mineralizado de la Formación Aeropuerto

III.2. ALTERACIÓN

Las andesitas del distrito, al igual que gran parte de las rocas volcánicas Mesozoicas, están afectadas por un metamorfismo regional de facies esquistos verdes. Una fuerte alteración propilítica local, caracterizada principalmente por una intensa cloritización, epidota, calcita, arcillas esmectita y caolinita, especularita más venillas de cuarzo locales se superpone a la asociación de metamorfismo regional que presenta una mineralogía similar. Esto dificulta diferenciar las rocas con alteración hidrotermal de las rocas de cajas metamorfoseadas e inalteradas. Sin embargo existen algunas características que permiten distinguir unas de otras:

- Una variedad de clorita verde oscura representa el metamorfismo regional mientras que una variedad verde azulosa representa el evento de alteración local.
- La magnetita está presente regionalmente en las andesitas, pero localmente, el evento hidrotermal la altera a especularita.
- La abundancia de calcita en los flujos andesíticos es un indicador de la intensidad de la alteración: este carbonato es uno de los principales componentes de las estructuras alimentadoras del evento hidrotermal y se presenta en la roca caja a través de microfracturas, relleno de amígdalas, y reemplazo de fenocristales y masa fundamental.

III.3. ESTRUCTURAS

En el distrito Altamira se han descrito cuatro patrones estructurales principales:

1. El patrón estructural principal dentro del distrito Altamira corresponde a fallas y ejes de pliegue, así como al rumbo principal de la estratigrafía, de orientación NS-NW (N10-50°W).
2. Existen también patrones secundarios, uno de orientación WNW (N60-70°W) que puede ser anterior, ya que estas fallas están segmentadas por las citadas anteriormente y por otras de orientación NS (N10-20°E) (Figura 7, GEOVECTRA 2005).
3. Un cuarto patrón estructural, de dirección NE (N35-40°E), representa los eventos tectónicos del Terciario Medio-Superior y es responsable del descenso del bloque Altamira (Cenizas) respecto del bloque Frankenstein.

En el Cerro Franke se aprecia un pliegue anticlinal de rumbo N20-40°W, que presenta una inclinación levemente mayor en el flanco SW (mayor a 20°) que en el flanco NE (5-15°). A lo largo de su eje presenta una zona de cresta con estratificación sub-horizontal y con un espesor de 100 a 200 m. Sin embargo, trabajos anteriores (McClave, 1998) sugieren que este pliegue anticlinal también buza hacia el NNW y SSE definiendo un domo estructural. La geometría de la mena está estrechamente vinculada con este arreglo estructural: mientras en los flancos del anticlinal se presenta en uno o más horizontes de espesor limitado (1-5 m), en la zona de la cresta del pliegue se presenta en horizontes más potentes (10-30 m) y de mayor ley separados por horizontes estériles relativamente delgados (Figura 8, GEOVECTRA 2005).

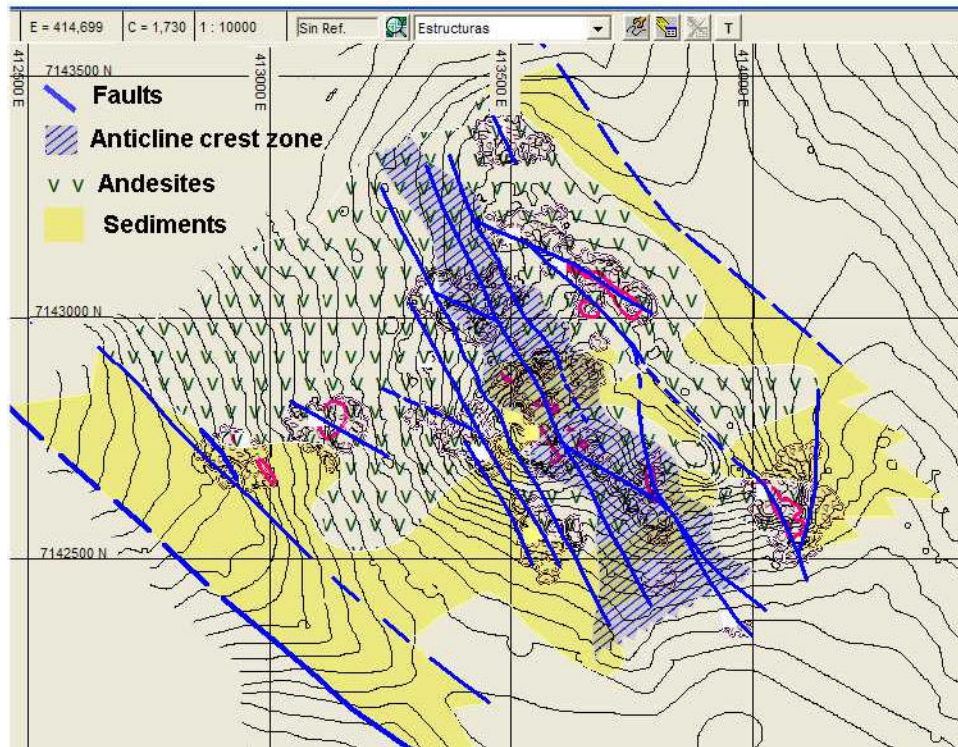


Figura 7: Patrón estructural del Distrito Altamira (GEOVECTRA, 2005).

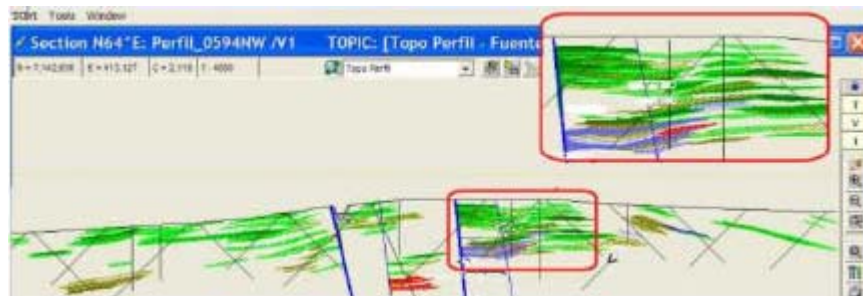


Figura 8: Estilos de mineralización en el eje y en los flancos del pliegue anticlinal (GEOVECTRA, 2005)

A los costados de esta zona de cresta se han descritos numerosas fallas sub-verticales, también de orientación NNW, que aparentemente representan uno de los controles de mineralización más importantes para el emplazamiento de cobre de alta ley en el depósito Frankenstein. Otro control para la mineralización está dado por las estructuras de orientación WNW. Aparentemente el control NNW predomina en el sector profundo del depósito (sulfuros) mientras que el control WNW claramente predomina en el sector superior (óxidos y zonas mixtas).

III.4. TIPO DE DEPÓSITO Y MINERALIZACIÓN

Los depósitos hidrotermales en stockwork en andesitas son bastante comunes en la Cordillera de la Costa del norte de Chile. La mayoría de ellos están relacionados con la Formación La Negra, asociada al volcanismo de arco magmático durante el Jurásico Superior y el origen de los fluidos hidrotermales estaría asociado a intrusivos dioríticos de edades similares.

El depósito de cobre Frankenstein tiene características similares con los de la Formación La Negra, aunque es levemente más joven; está asociado con el volcanismo sub-aéreo asignado a la Formación Aeropuerto. Presenta una mineralización de sulfuros de cobre (\pm plata) hidrotermal, que han sido parcialmente oxidados, y que se presentan como stockwork, en andesitas.

Una de las interrogantes que han surgido en este depósito es el origen de los fluidos hidrotermales que dieron origen a la mineralización. Por un lado, basándose en la naturaleza porfídica (ocoítica) de las andesitas en el distrito Altamira y a la apariencia de domo, aproximadamente sobre el depósito de Frankenstein, Smith (1988) especuló que podría existir un centro intrusivo bajo el depósito, que diera origen a los fluidos hidrotermales. Sin embargo, no se han registrado intrusivos en los sondajes profundos realizados en el área del cerro Frankenstein. Por otra parte, aunque en el depósito Frankenstein no está claro si las ocoitas corresponden a lavas o a cuerpos intrusivos hipabisales distribuidos de manera pseudoconcordante entre los flujos de lava andesíticos, nuevos antecedentes en el depósito China, ubicado 7 km al suroeste del anterior, indican que todas las ocoitas identificadas son claramente intrusivas y por ende serían las que dieron origen a los fluidos hidrotermales que generaron la mineralización.

Los fluidos hidrotermales inyectados aparentemente eran ricos en cobre pero pobres en hierro y en azufre, por lo que la mineralización primaria resultó principalmente en calcosina, con covelina y bornita menor y trazas de calcopirita. Debido a la ausencia de piritita, no se generó ácido sulfúrico durante el proceso de oxidación y por lo tanto la conversión de los sulfuros primarios en minerales secundarios (óxidos de cobre principalmente y sulfuros secundarios menor) ocurrió principalmente *in-situ*, con un desplazamiento limitado de la mineralización desde su lugar de origen.

III.4.1. Distribución de la mineralización:

La zona de alta ley ($>2\%$ CuT) del depósito de cobre Frankenstein está compuesta por numerosos cuerpos estratiformes de distintos tamaños, cada uno con al menos una falla, de orientación NNW, WNW o NS, asociada. El tamaño horizontal de estos cuerpos varía desde unos pocos metros a decenas de metros desde los alimentadores, y la desaparición de la mineralización hacia los bordes ocurre abruptamente aún si el horizonte favorable persiste. La potencia de estos cuerpos está relacionada con el lugar en que ocurre la mineralización tal como se explicó en el punto III.3., Figura 8. Las leyes son muy variables dentro de los cuerpos. Se cree que las fallas asociadas a estos cuerpos fueron utilizadas por los fluidos hidrotermales para introducirse en los horizontes con permeabilidad favorable, tales como flujos vesiculares, contactos, microfracturas y stockwork.

Por otra parte la roca caja entre estructuras mineralizadas (entre zonas de mena a gran escala o entre fracturas en muestra de mano) tiende a tener nula mineralización ($<0.01\%$ CuT), y generalmente no se presentan envoltorios de baja ley alrededor de las zonas mineralizadas.

Es muy común que la mineralización ocurra a un solo lado de una falla alimentadora, probablemente por una diferencia en la permeabilidad de la roca caja a ambos lados de la falla, más que por un desplazamiento post-mineralización.

III.4.2. Perfil de oxidación:

La edad de la superficie actual en el distrito Altamira no está bien definida, pero al no haber sido descrito algún perfil de erosión en las Gravas de Atacama en esta región, se puede asumir una edad Mioceno-Plioceno, similar a la de las pampas de nitrato ubicadas 50 km al norte. Esto significa que el depósito Frankenstein ha estado expuesto a oxidación durante al menos 2 Ma, tiempo suficiente para desarrollar un perfil supérgeno estable.

Aunque la ausencia de pirita impide el desarrollo de un perfil lixiviado/enriquecido, calcosina primaria y otros sulfuros subordinados han sido oxidados a una asociación compleja de carbonatos (principalmente malaquita), haluros (atacamita) y crisocola. También han sido identificadas trazas de óxidos negros cerca de la superficie así como la conversión *in situ* de calcosina primaria en calcosina secundaria.

El perfil de oxidación es aún más complicado al no existir una superficie clara que corresponda al techo de los sulfuros y a la base de los óxidos (Figura 8, GEOVECTRA 2005). La mineralización de los primeros 20 m suele estar casi completamente oxidada. Se evidencia alguna migración lateral de la mineralización por la presencia de minerales oxidados de cobre en rocas supuestamente estériles, tales como areniscas volcánicas, rocas calcáreas e incluso en la costra superficial de caliche. Entre los 20 y 60 m, predominan las zonas de mixtos, con sulfuros subordinados mientras que en niveles más profundos comienzan a predominar los sulfuros. Sin embargo, las inversiones de esta secuencia son muy comunes, apareciendo niveles de óxidos bajo zonas de sulfuros (Figura 9, GEOVECTRA 2005).

Cabe mencionar por último que se utilizó la razón de cobre soluble/cobre total (CuS/CuT) para definir los diferentes grados de oxidación, en base a muestras de mano de las cuales se realizaron descripciones mineralógicas y se obtuvieron análisis químicos. Así, se definieron 4 categorías de menas que se presentan en la tabla 1.

TIPO DE MENA	CuS/CuT	OBSERVACIONES
Óxido	[0.8-1]	o profundidad < 20m
Mixto, Óxido>Sulfuro	[0.5-0.8]	o con sulfuros visibles
Mixto, Sulfuro>Óxido	[0.2-0.5]	o con óxidos visibles
Sulfuro	[0-0.2]	

Tabla 1: Tipos de mena definidos por razón CuS/CuT

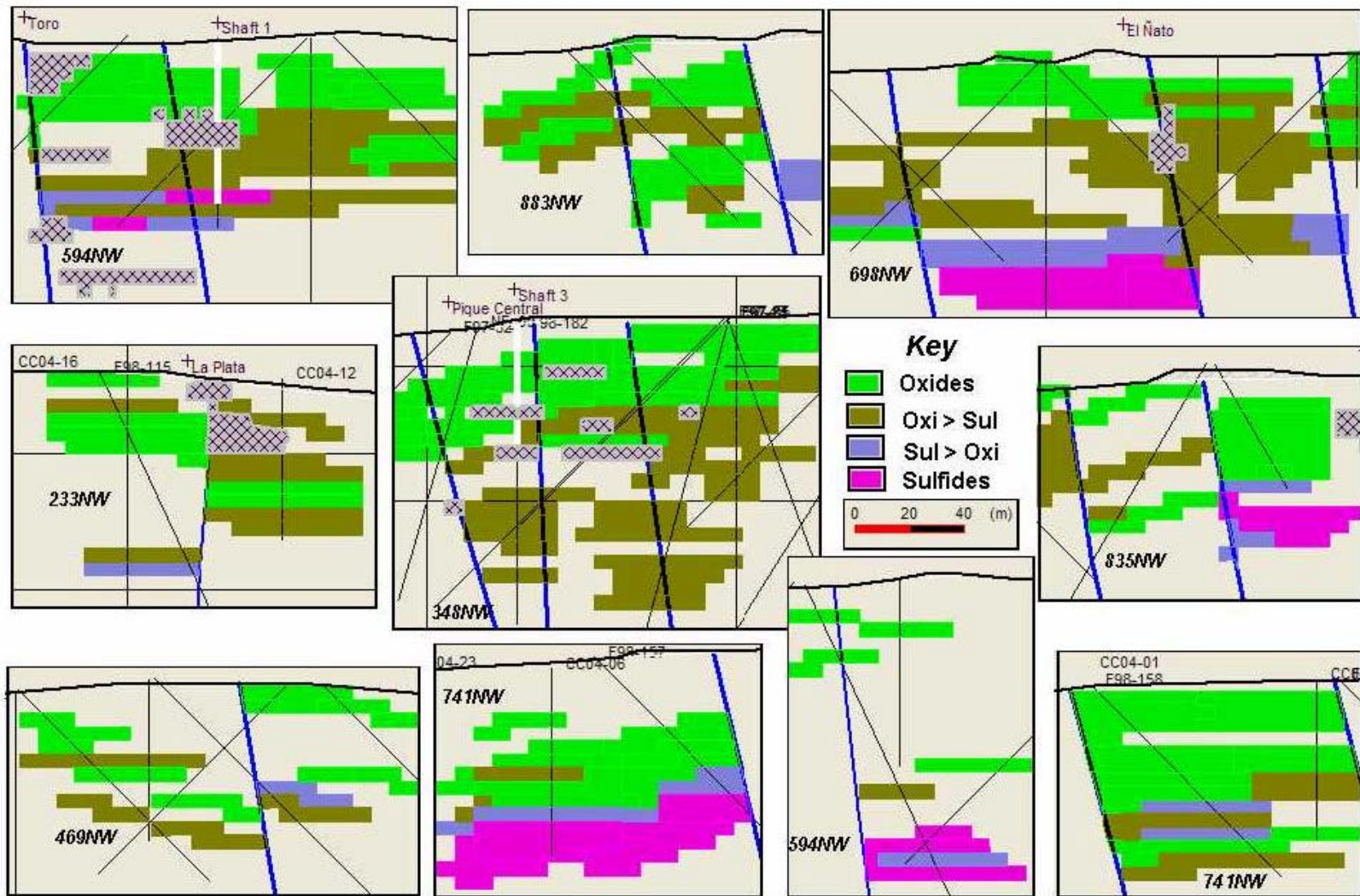


Figura 9: Perfiles de oxidación en el depósito Frankenstein

IV. DISTRIBUCIÓN DE LOS CARBONATOS

IV.1. INTRODUCCIÓN

Para realizar el modelo geológico de carbonatos se utilizaron los análisis químicos de las muestras provenientes de distintas campañas de sondajes, principalmente de aire reverso, realizadas en el área de estudio. Luego, para realizar la interpretación de la distribución de carbonatos, la metodología empleada fue la siguiente:

- A través del software GVMapper se generó un set de secciones para realizar un modelo geológico “primario” de carbonatos.
- Utilizando el mismo set de secciones se realizó un modelo “diluido” de carbonatos.
- Se generó un set de plantas en las cuales se interpretó la distribución de los carbonatos mediante los sondajes y las secciones interpretadas.
- Se exportaron los polígonos generados a Gemcom para realizar un modelo de bloque en 3 dimensiones

Estos pasos están graficados en la figura 10. El modelo geológico “primario” es el que se obtiene directamente a partir de los datos químicos de los sondajes (generalmente una muestra cada 2 m) y de la interpretación geológica (*e.g.* mayor contenido de CO₃ a lo largo de las estructuras). Para simplificar la complejidad del modelo “primario” se obtiene un modelo “diluido” de menor resolución en las mismas secciones. Los datos de los análisis químicos se compositan cada 5 metros de cota y la distribución de los carbonatos se reinterpreta en cuerpos de al menos 5 m de espesor. Se presenta un ejemplo de esta reinterpretación en la figura 11. Esto permite también que el modelo geológico quede representado de mejor manera en el futuro modelo de bloque, en la dirección vertical. Por último cabe destacar que la distribución de los carbonatos se realizó en base a 3 categorías (Tabla 2):

CATEGORÍAS DE CO ₃	CONTENIDOS DE CO ₃ (Wt %)
Bajo	[0.0-3.5]
Medio	(3.5-6.0]
Alto	(6.0-100]

Tabla 2: Categorías de CO₃ según sus contenidos (Wt %)

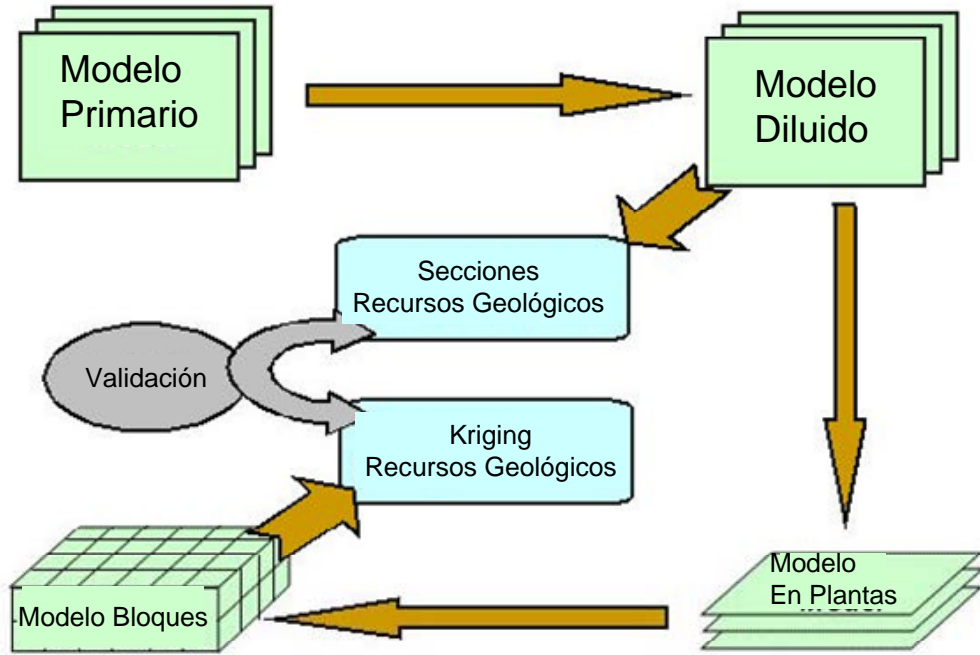


Figura 10: Secuencia para el modelamiento de los carbonatos.

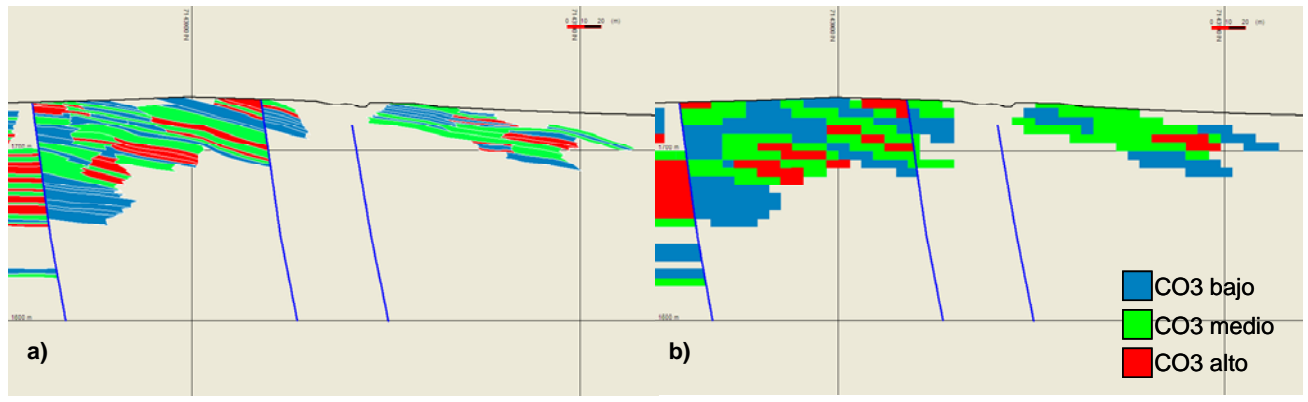


Figura 11: Distribución de carbonatos, modelo primario (a) v/s modelo diluido (b).

IV.2. MODELO GEOLÓGICO DE CARBONATOS

A través del software GVMapper se generó un set de 21 secciones de orientación WNW, con un espaciamiento variable entre 45 y 95 m (Figura 12). Estas secciones corresponden a las mismas en las cuales previamente se interpretó la distribución del cobre y en las cuales, además, se tenía una interpretación tanto litológica como estructural.

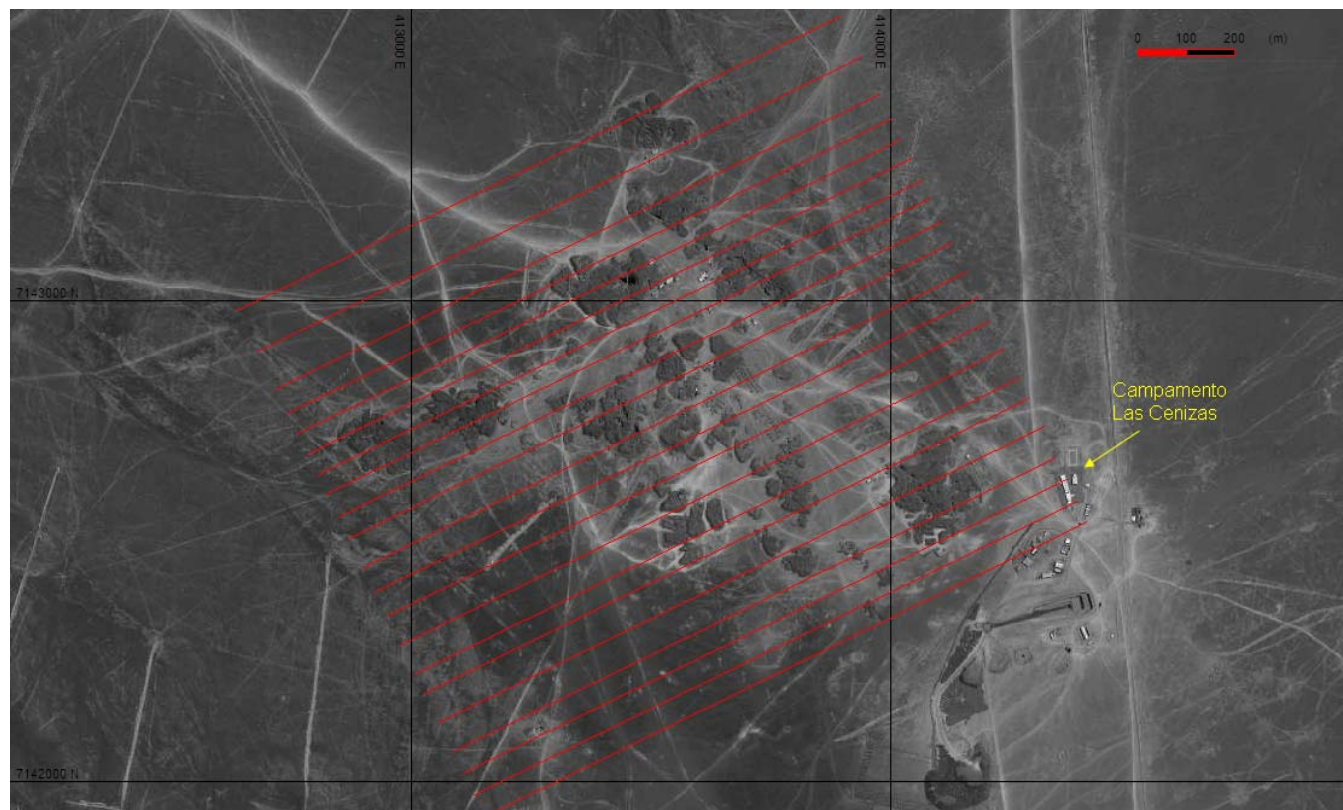


Figura 12: Vista en planta de las secciones interpretadas.

En ellas, y gracias a los análisis químicos de CO_3 de 4209 muestras provenientes de 254 sondajes se interpretó el modelo primario de carbonatos (Anexo A) y posteriormente el modelo diluido de carbonatos (Anexo B), diferenciando poblaciones (grupos de datos que se comportan geoestadísticamente de manera distinta, en términos de distribución) con los límites mencionados anteriormente (tabla 2). La totalidad de las secciones y plantas interpretadas se presentan en el anexo A.

En el perfil norte del yacimiento (Figura 13e) se observan altos contenidos de carbonatos en el lado oeste de la sección, en los niveles de mayor profundidad, y contenidos bajos en los niveles más someros mientras que en el lado este los contenidos son principalmente bajos. En la zona central (Figura 13c) los niveles con mayor contenido se encuentran bajo el domo y al E de él; al W, excepto unos pocos niveles, los contenidos de carbonatos pasan a ser bajos ($<3.5\%$). En el perfil sur del yacimiento (Figura 13a), al igual que en el perfil central, los altos contenidos de

carbonatos se presentan principalmente en el sector del domo y al E, aunque en este caso también se presentan niveles de alto contenido al W, sector donde los contenidos son muy variables.

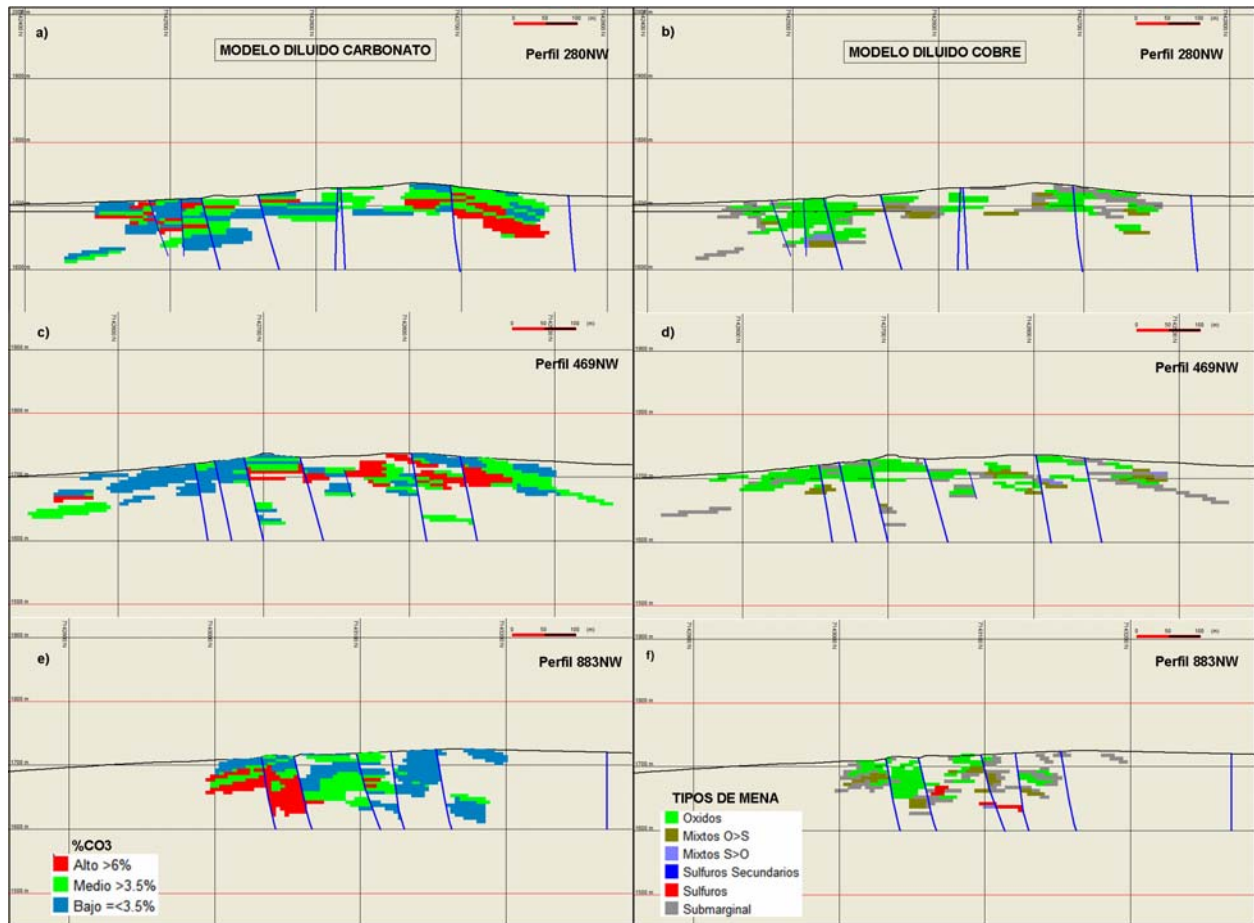


Figura 13: Perfiles del depósito de cobre Frankenstein. Al lado izquierdo se tienen los contenidos de carbonatos y al lado derecho los tipos de mena de cobre.

Respecto a los dos modelos (carbonato y cobre) es necesario hacer notar una diferencia importante. Mientras que en el modelo de cobre las zonas no interpretadas corresponden a áreas a priori estériles, en el modelo de carbonatos corresponden a áreas sin información pero en ningún caso sin carbonatos. Las zonas no interpretadas pueden tener contenidos de carbonatos altos, moderados o bajos. En este modelo se puso especial énfasis en interpretar la distribución de los carbonatos en las zonas mineralizadas, y por lo tanto la geometría de los cuerpos parece ser bastante similar. Sin embargo, los contenidos de carbonatos aparecen como independientes de la mineralización. No hay una relación evidente ni con el tipo de mena (óxidos, mixtos, sulfuros; Figura 13 b, d, f) ni con los contenidos de cobre (Figura 14). A pesar de esto último, en algunas plantas características (Figura 15, 16) se observa que al igual que la mineralización de cobre, los carbonatos están en algún grado relacionado con las estructuras y los cuerpos presentan preferencialmente una orientación NNW, NW.

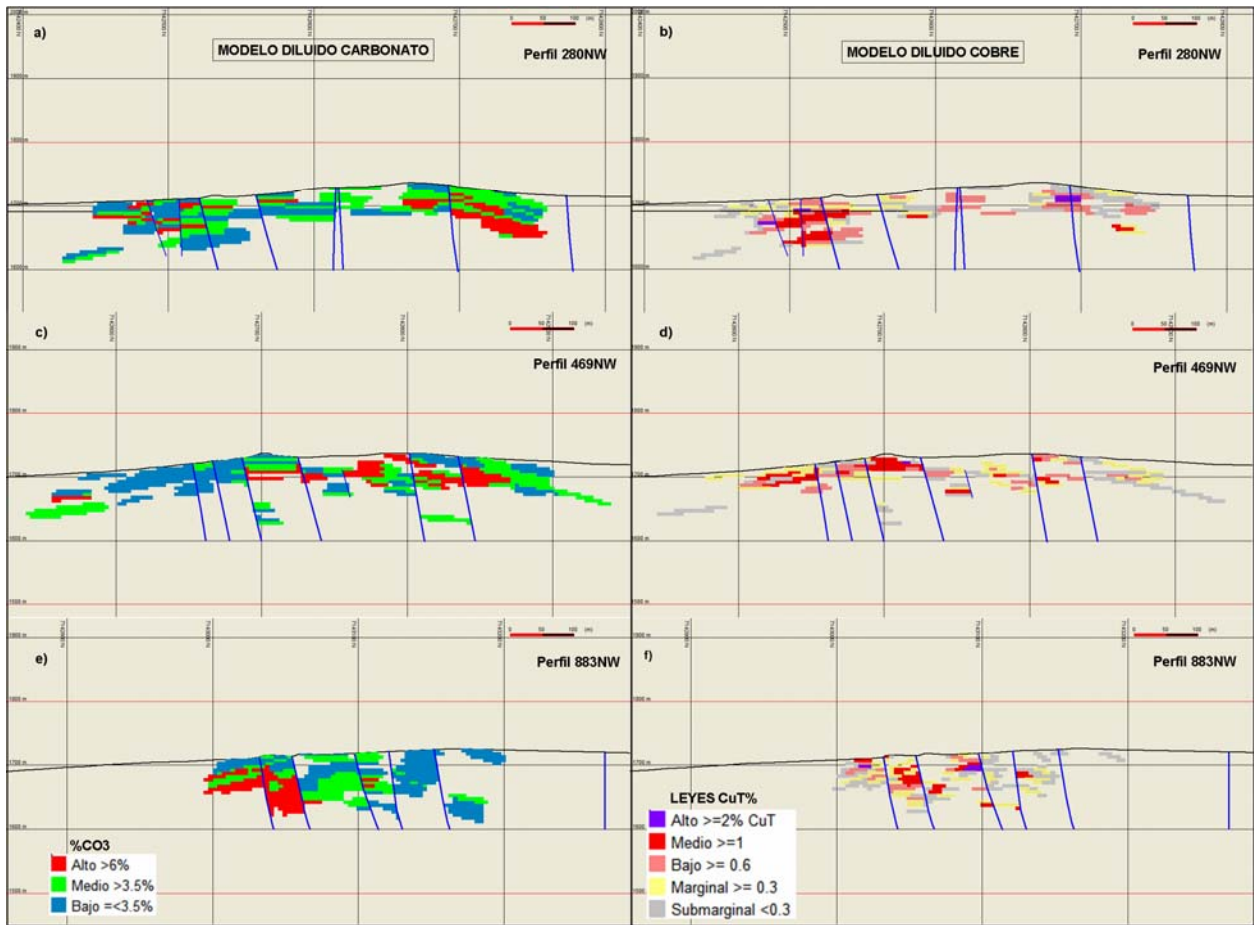


Figura 14: *Perfiles del depósito de cobre Frankenstein. Al lado izquierdo se tienen los contenidos de carbonatos y al lado derecho los contenidos de cobre.*

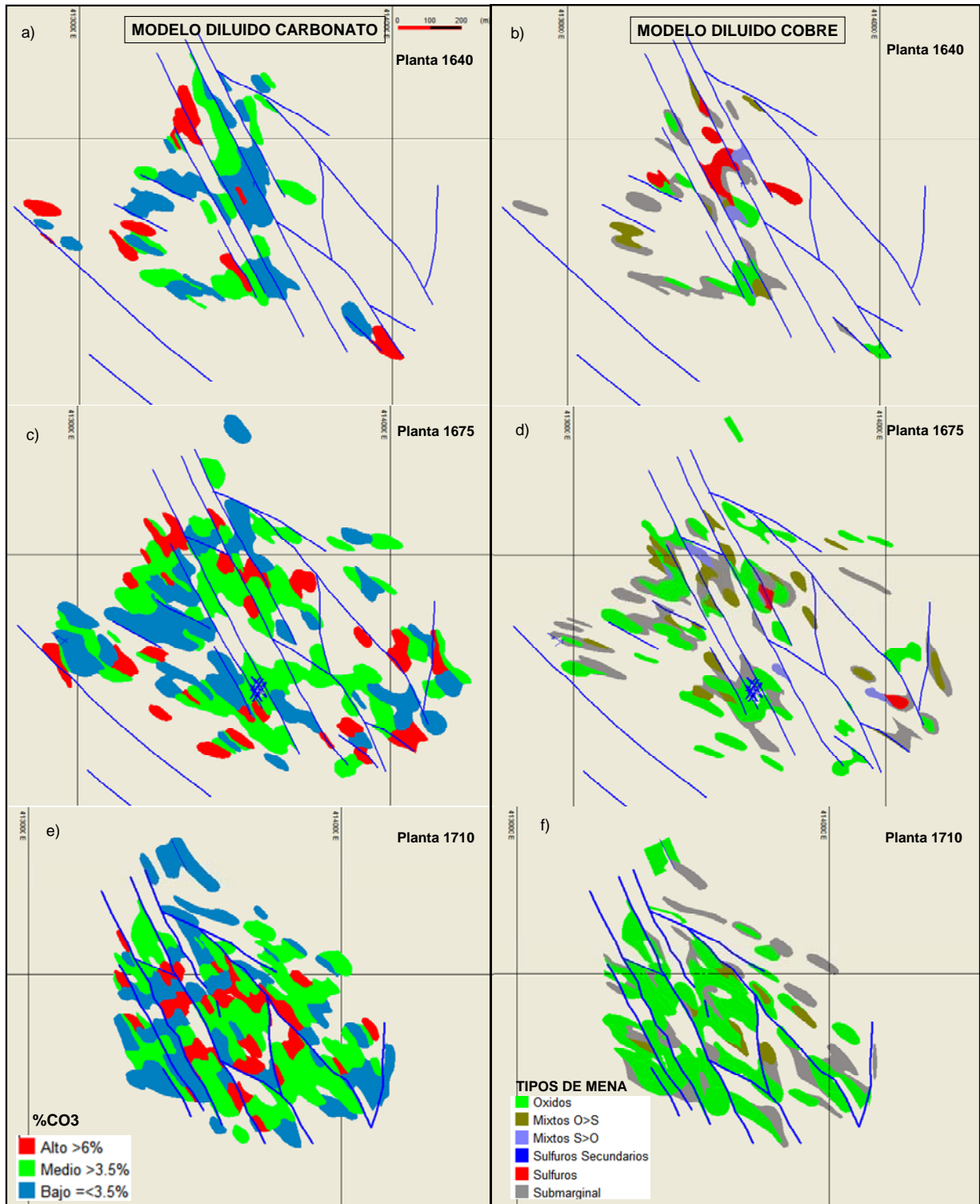


Figura 15: Plantas del depósito de cobre Frankenstein. Al lado izquierdo se tienen los contenidos de carbonatos y al lado derecho los tipos de mena de cobre.

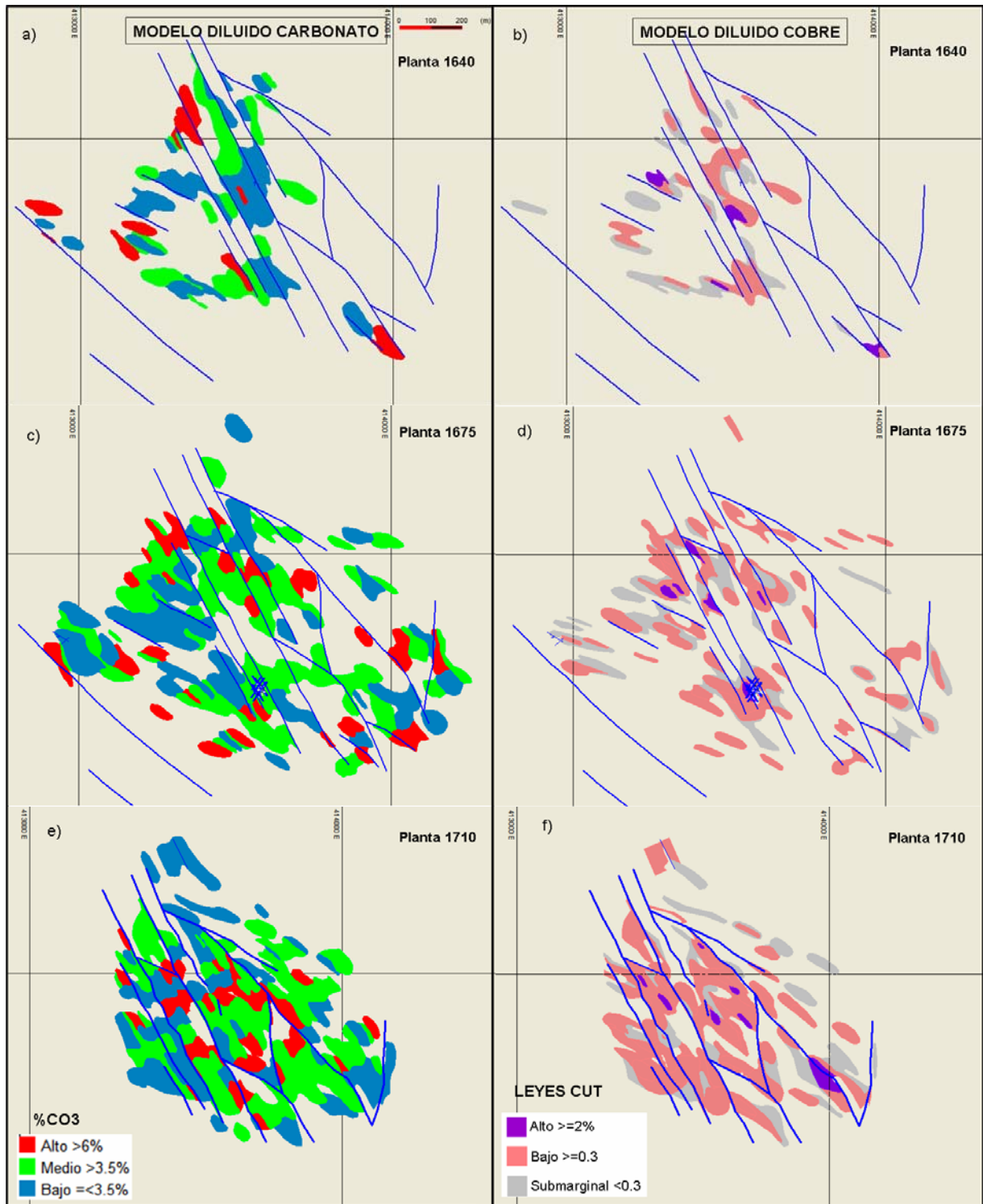


Figura 16: Perfiles del depósito de cobre Frankenstein. Al lado izquierdo se tienen los contenidos de carbonatos y al lado derecho contenidos de cobre.

IV.3. MODELO DE ESTIMACIÓN (DE BLOQUES) DE CARBONATOS

IV.3.1. Definiciones y conceptos teóricos

Antes de presentar los resultados obtenidos introduciremos algunos conceptos estadísticos y geoestadísticos básicos necesarios para la comprensión de los mismos. Esta información fue obtenida en su totalidad de los apuntes del año 2001 del curso “Evaluación Geoestadística de Yacimientos” dictado en la Universidad de Chile.

Media m, \bar{X} :

Corresponde al estimador de la media de la población y se calcula como el promedio aritmético de los valores experimentales $z(x_a)$:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n z(x_a)$$

Varianza s^2, σ^2 :

Corresponde al estimador de la varianza de la población y está dada por el promedio de las diferencias al cuadrado de los valores y la media de los datos.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n (z(x_a) - m)^2$$

Dado que son diferencias al cuadrado, la varianza es muy sensible a valores erráticos muy altos. Una desventaja de este parámetro es que sus unidades son las de la variable al cuadrado.

Desviación estándar s, σ :

Corresponde simplemente a la raíz cuadrada de la varianza. Se usa frecuentemente en lugar de la varianza puesto que tiene las mismas unidades que la variable que describe.

Coefficiente de variación (CV):

Se utiliza para comparar la dispersión de la distribución relativa a la media (se asume aquí que se estudian variables positivas), dividiendo el valor de la desviación estándar por la media:

$$CV = \frac{s}{m}$$

Un coeficiente de variación mayor que 1 indica la presencia de algunas muestras erráticas altas que pueden tener un importante impacto en las estimaciones finales.

Esperanza matemática o momento de primer orden:

Sea $Z(x_0)$ una variable aleatoria definida en el punto x_0 . Si la función de distribución de $Z(x_0)$ tiene una esperanza, esta es una función de x_0 y se escribe:

$$E(Z(x_0)) = m(x_0).$$

La esperanza de la variable aleatoria $Z(x_0)$ en un punto x_0 dado es un valor numérico que representa la “media” alrededor de la cual los valores de $Z(x_0)$ se distribuyen según la ley de probabilidades P de $Z(x_0)$.

Variograma:

Por excelencia es la herramienta de la geoestadística y, al igual que la covarianza, permite medir la variabilidad del fenómeno regionalizado.

Se deben considerar dos valores numéricos $Z(x)$ y $Z(x+h)$, en dos puntos x y $x+h$ separados por el vector h . La variabilidad entre estas dos cantidades está caracterizada por la función variograma $\gamma(x, h)$, que está definida como la mitad de la varianza de la variable aleatoria $[Z(x) - Z(x+h)]$. Sin embargo, bajo la hipótesis de estacionaridad de segundo orden (o casi-estacionaridad), se cumple que:

$$(E(Z(x) - Z(x+h)))^2 = 0,$$

y por lo tanto, la expresión del variograma se reduce a:

$$\gamma(x, h) = \frac{1}{2} E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\}.$$

Considerando el caso general, el variograma $\gamma(x, h)$ es una función tanto del punto x como del vector h . Ahora, en aplicaciones mineras se introduce la *hipótesis intrínseca*, que señala que la función variograma $\gamma(x, h)$ depende sólo de h y no de la posición x . Así, se puede estimar el variograma $\gamma(h)$ con los datos disponibles.

En términos simples, un variograma es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable (en este caso los compósitos) en un área definida. Para distancias mayores a cierto valor, la variación se hace independiente de la distancia. Esta distancia corresponde al alcance, en la que se llega a la meseta.

Cálculo de variogramas experimentales:

Para calcular un variograma no se puede esperar que los datos estén separados exactamente por el vector h . Esto puede ocurrir solo si se tienen datos en una malla regular. Por lo tanto, en el cálculo de un variograma experimental se utiliza una aproximación, en la cual se consideran los siguientes parámetros:

- Paso p : es la distancia a la que se calcularán los puntos del variograma experimental.
- Número de pasos n_p : corresponde al número de pasos a calcular (según el tamaño del dominio)
- Tolerancia del paso Δp : corresponde a la tolerancia en la separación, de manera que los puntos puedan encontrarse a una distancia mayor o menor al paso.
- Azimut θ : es la dirección en la que se calcula el variograma, medida en un plano horizontal respecto al norte, en el sentido de los punteros del reloj.
- Tolerancia angular en el azimut $\Delta\theta$: es el parámetro a través del cual se aproxima el cálculo del variograma experimental, y corresponde al ángulo dentro del que se consideran válidos los datos para el cálculo de la diferencia.

- Ancho de banda Δh_H : corresponde a una banda dentro de la cual se consideran válidos los datos para el cálculo del variograma, y se mide perpendicular a la dirección del azimut.
- Inclinación φ : es la dirección, medida en el plano vertical del azimut, en la que se calcula el variograma. Una inclinación de 0° corresponde a la dirección horizontal, considerándose positiva la dirección “hacia arriba” y negativa la dirección “hacia abajo”.
- Tolerancia angular en la inclinación $\Delta\varphi$: corresponde al ángulo dentro del cual se considera válido un punto, para el cálculo de la diferencia, en el mismo plano vertical en que se definió la inclinación.
- Ancho de banda en la inclinación Δh_V : al igual que el ancho de banda en el azimut, corresponde a la dimensión vertical de la banda dentro de la cual se consideran los datos válidos para calcular el variograma.
- Número de pares mínimo: se puede considerar que un punto del variograma es válido si su cálculo se hizo con un número de pares superior a este parámetro.
- Desplazamiento inicial: es la distancia que se considera desde el punto para iniciar la búsqueda de los demás datos.

En la figura 17 se presenta una descripción en dos dimensiones de algunos de los parámetros descritos.

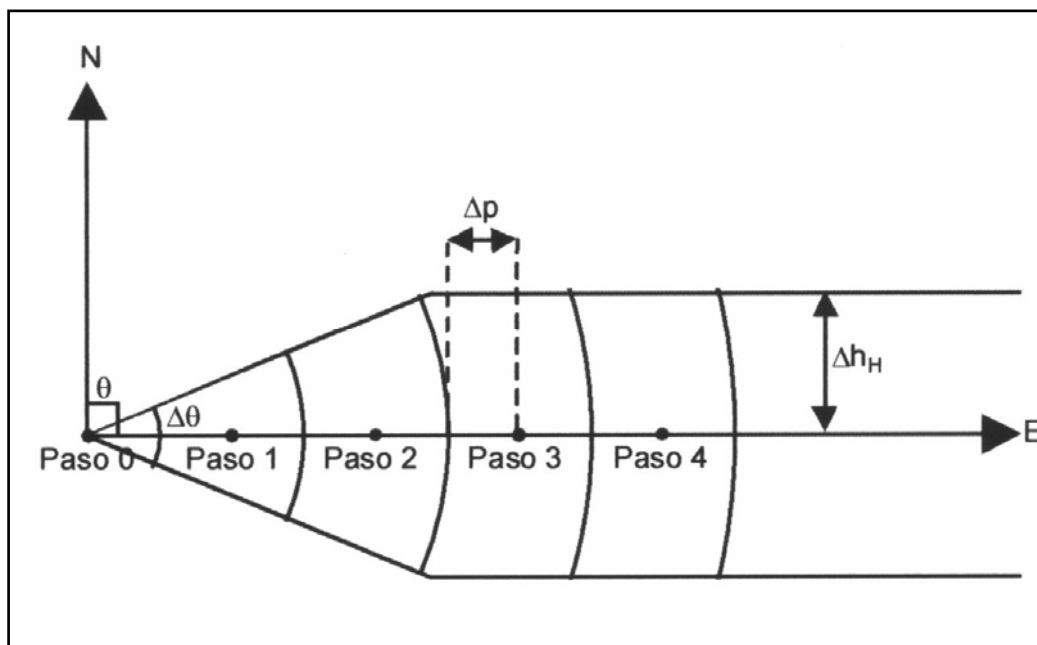


Figura 17: Parámetros para el cálculo de un variograma experimental.

Modelos de variogramas:

El comportamiento del variograma depende del tipo de variable que se está analizando.

- **Comportamiento en el infinito:**

En el caso del modelo de carbonatos se asume que la variable es del tipo estacionaria. Para este tipo de variable, el variograma tenderá a estabilizarse para una determinada

distancia llamada alcance, en un valor que a priori debería corresponder a su varianza y que se conoce como meseta. La forma típica de variograma para este tipo de variables se presenta en la figura 18. Existen otros tipos de variogramas según la naturaleza de las variables pero no se detallarán acá.

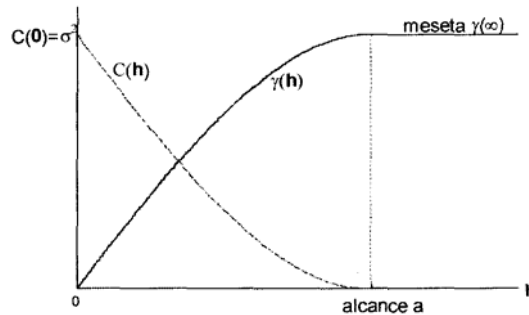


Figura 18: Forma típica del variograma y de la covarianza.

- **Comportamiento en el origen:**

Además del comportamiento en el infinito una de las características más importantes del variograma es su comportamiento en el origen. Esto da una idea muy clara de la continuidad de la variable en el dominio D. Básicamente se tienen cuatro comportamientos posibles (Figura 19):

- Parabólico: caracteriza una variabilidad muy regular
- Lineal: en este caso la variable tiene un comportamiento regular, pero menos suave que en el caso anterior. Visualmente se puede entender como más rugosa que cuando el comportamiento es parabólico en el entorno del origen.
- Efecto pepita (discontinuo): en este caso se tiene que cuando $|h|$ tiende a 0, $\gamma(h)$ no tiende a 0, o sea que dos puntos muy cercanos presentan una correlación muy baja (por definición $\gamma(0) = 0$), lo que se puede deber a mineralización discontinua (en pepitas por ejemplo) o debido a que la escala de trabajo impide ver la presencia de una estructura (variograma) de muy corto alcance. Además errores de muestreo, de preparación de muestras, de análisis químico, etc, también se reflejan en este valor.

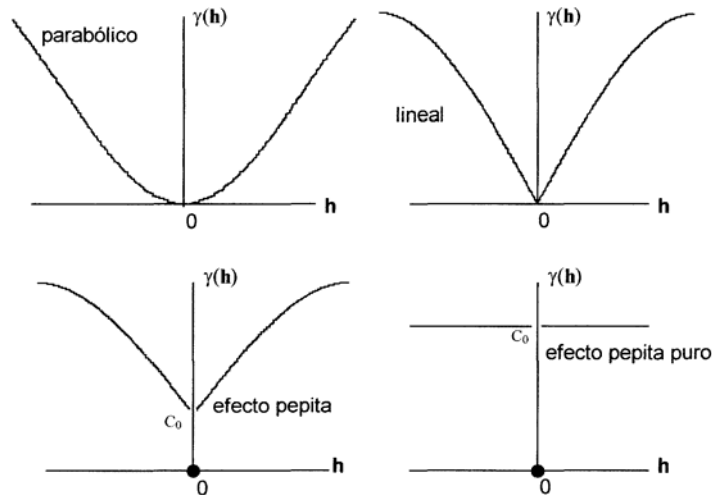


Figura 19: comportamiento del variograma en el origen.

Anisotropía:

Cuando una variable no tiene el mismo comportamiento espacial en todas las direcciones se tiene una anisotropía. Un tipo es la anisotropía geométrica, en cuyo caso, los alcances son distintos en las diferentes direcciones. Otro tipo de anisotropía es la zonal, que corresponde al caso en que la varianza de la variable es diferente en distintas direcciones (generalmente la diferencia está en el plano horizontal). En los variogramas se manifiesta como una diferencia en las mesetas según las diferentes direcciones, tal como se aprecia en el ejemplo de la figura 20.

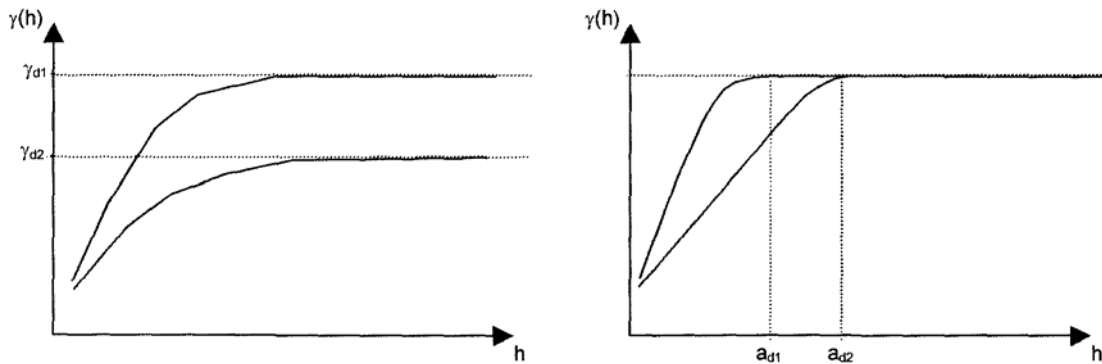


Figura 20: Variogramas direccionales para variables anisótropas. Izquierda anisotropía zonal, derecha anisotropía geométrica.

Métodos de estimación:

- **Polígonos:** este método consiste simplemente en ponderar el valor de la variable en cada punto por el área o volumen de influencia. En tres dimensiones, el procedimiento del cálculo consiste en crear una malla fina de nodos y asignar a cada uno el valor de la muestra más cercana. De esta manera se pueden realizar estimaciones tanto globales como

locales. Para realizar una estimación global se requiere tener bien delimitado el campo de estudio.

- **Estimación local:** $Z(x) = Z(x_a)$

donde x_a es el punto más cercano a x ,
 $Z(x_a)$ es el valor de la variable en el punto muestreado x_a .

- **Estimación global:**
$$m = \frac{1}{V} \sum_{a=1}^n V_a \times Z(x_a)$$

donde V es el volumen total del dominio,
 V_a es volumen de influencia de la muestra en el punto x_a

- **Inverso de la distancia:** este método sirve para realizar estimaciones locales y consiste en ponderar las muestras cercanas al punto a estimar por el inverso de la distancia elevado a alguna potencia (en general entre 1 y 2). Este tipo de estimación no utiliza variografía. La suma de todas las muestras ponderadas dividida por la suma de los ponderadores entrega el valor estimado en el punto que se quería estimar.

$$Z(x) = \frac{\sum_{\alpha=1}^{n(x)} \frac{Z(x_{\alpha})}{d_{\alpha}^p}}{\sum_{\alpha=1}^{n(x)} \frac{1}{d_{\alpha}^p}}$$

donde:

- $n(x)$ corresponde al número de muestras utilizadas para estimar el punto x , que puede estar definido por un radio de búsqueda por ejemplo.
- p es la potencia a la que se eleva el inverso de la distancia
- $Z(x_{\alpha})$ es el valor de la variable en el punto x_{α} .
- **Kriging:** el origen de este tipo de estimación está en minimizar el error de estimación, es decir, que la varianza de estimación sea mínima. Existen distintos tipos de kriging. Aquí veremos el kriging simple y el kriging ordinario. Este último fue el utilizado en la estimación de carbonatos en el depósito de cobre Frankenstein.

Kriging simple:

Se considera que la media m del dominio (espacio) es conocida. Además se conoce el valor de la variable que se quiere estimar en n puntos de medición $Z(x_{\alpha})$, $\alpha=1, \dots, n$.

Se asume inicialmente que la media es nula. Bajo estas condiciones, el valor estimado será una combinación lineal ponderada de los valores conocidos:

$$Z^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \times Z(x_{\alpha})$$

Así, la varianza de estimación es la varianza de la diferencia entre el valor estimado menos el valor real desconocido del punto a estimar. Esta varianza se puede descomponer en la doble suma ponderada de las covarianzas de las distancias entre las muestras más la covarianza a priori del modelo variográfico utilizado, menos dos veces la suma ponderada de las covarianzas entre el punto a estimar y los puntos medidos:

$$\begin{aligned} \text{Var}[Z^*(x_0) - Z(x_0)] &= \text{Var}\left[\left(\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \times Z(x_{\alpha})\right) - Z(x_0)\right] \\ &= \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\alpha} \cdot \lambda_{\beta} \cdot C(x_{\alpha} - x_{\beta}) + C(0) - 2 \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \cdot C(x_{\alpha} - x_0) \end{aligned}$$

Para obtener los ponderadores que minimizan esta varianza se debe derivar e igualar a 0 la expresión anterior, obteniéndose el sistema de kriging simple:

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} \cdot C(x_{\alpha} - x_{\beta}) = C(x_{\alpha} - x_0) \quad \forall \alpha = 1, \dots, n$$

Este sistema es un sistema lineal que tiene igual número de ecuaciones y de incógnitas, y que corresponden al número de datos disponibles n . Este sistema se presenta también en escritura matricial:

$$\begin{aligned} [C(x_{\alpha} - x_{\beta})] \quad [\lambda_{\beta}] &= [C(x_{\alpha} - x_0)] \\ \begin{pmatrix} C(x_1 - x_1) & \cdots & C(x_1 - x_n) \\ \vdots & & \vdots \\ C(x_n - x_1) & \cdots & C(x_n - x_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} C(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ C(x_n - x_0) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Con esto los ponderadores óptimos serán:

$$[\lambda] = [C(x_{\alpha} - x_{\beta})]^{-1} [C(x_{\alpha} - x_0)].$$

Reemplazando estos valores en la expresión de la varianza de estimación, que ahora se llamará varianza de kriging, se obtiene:

$$\sigma_{KS}^2(x_0) = C(0) - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \cdot C(x_{\alpha} - x_0)$$

El mismo sistema y la solución pueden plantearse en términos del variograma:

$$[\gamma(x_{\alpha} - x_{\beta})] \quad [\lambda_{\beta}] = [\gamma(x_{\alpha} - x_0)]$$

$$\begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \cdots & \gamma(x_1 - x_n) \\ \vdots & & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \cdots & \gamma(x_n - x_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x_0) \end{pmatrix}$$

El haber asumido la media nula es una decisión que no parece muy práctica en el caso minero, en que las variables regionalizadas son en su mayoría mayores que cero. Sin embargo, lo que se hace es trabajar con la variable Z -m que tiene media nula, resolver el sistema como se muestra en los párrafos anteriores y luego volver a Z una vez que se tengan los ponderadores óptimos y se haya resuelto el sistema, de la siguiente forma:

$$Z^*(x_0) - m = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \cdot [Z(x_{\alpha}) - m]$$

o bien,

$$Z^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \cdot Z(x_{\alpha}) + \left(1 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}\right) \cdot m$$

Kriging ordinario:

En la mayoría de los casos la media no es conocida, por lo que el kriging simple no se puede aplicar. Es necesario entonces, replantear el sistema de kriging recién revisado, de manera de obtener los ponderadores sin considerar la media.

Nuevamente, el estimador que se utiliza es una combinación lineal de los valores medidos de la variable en una vecindad:

$$Z^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \cdot Z(x_{\alpha})$$

Sin embargo, en este caso debe imponerse la condición de insesgo, es decir que la esperanza del error de estimación sea nula:

$$\begin{aligned}
E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] &= \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} E[Z(x_{\alpha})] - E[Z(x_0)] \\
&= \qquad \qquad \qquad = \qquad \qquad \qquad = \\
&= m \left(\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} - 1 \right)
\end{aligned}$$

Esto lleva a la siguiente restricción:

$$\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1$$

Ahora, nuevamente se debe minimizar la varianza de estimación, pero sujeta a esta restricción:

$$\min \text{Var}[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\alpha} \cdot \lambda_{\beta} \cdot C(x_{\alpha} - x_{\beta}) + C(0) - 2 \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \cdot C(x_{\alpha} - x_0)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1$$

Este problema se resuelva utilizando la técnica de los multiplicadores de Lagrange. Para esto, se minimiza la siguiente función:

$$\sigma_E^2 - 2 \cdot \mu \cdot \left(\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} - 1 \right)$$

Igualando a cero sus derivadas parciales respecto a los ponderadores y al multiplicador de Lagrange, se obtiene el sistema de kriging ordinario:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial \lambda_{\alpha}} = 0 : \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} C(x_{\alpha} - x_{\beta}) - \mu = C(x_{\alpha} - x_0) \quad \forall \alpha = 1, \dots, n \\ \frac{\partial}{\partial \mu} = 0 \end{array} \right.$$

o matricialmente,

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} C(x_{\alpha} - x_{\beta}) & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} & \qquad \qquad \begin{bmatrix} \lambda_{\beta} \\ -\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_{\alpha} - x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \\
\begin{pmatrix} C(x_1 - x_1) & \cdots & C(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ C(x_n - x_1) & \cdots & C(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ C(x_n - x_0) \\ 1 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

y la varianza de kriging vale:

$$\sigma_{KO}^2(x_0) = \sigma^2 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha} - x_0) + \mu$$

Se puede utilizar equivalentemente el variograma en lugar de la covarianza, obteniéndose el sistema siguiente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \lambda_{\beta} \gamma(x_{\alpha} - x_{\beta}) + \mu = \gamma(x_{\alpha} - x_0) \quad \forall \alpha = 1, \dots, n \\ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1 \end{array} \right.$$

o matricialmente,

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_{\alpha} - x_{\beta}) & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \lambda_{\beta} \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_{\alpha} - x_0) \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \cdots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \cdots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x_0) \\ 1 \end{pmatrix}$$

y la varianza de kriging vale:

$$\sigma_{KO}^2(x_0) = \sigma^2 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \gamma(x_{\alpha} - x_0) + \mu$$

IV.3.2. Casos de estudio

Para la estimación de carbonatos se establecieron 4 casos de estudio que se presentan en la siguiente tabla:

CASO DE ESTUDIO	DESCRIPCIÓN	TIPO DE ESTIMACIÓN
Caso 1	Considera como espacio de estimación el modelo geológico de carbonatos, sin diferenciar poblaciones	Krigeo Ordinario
Caso 2	Considera como espacio de estimación el modelo geológico de carbonatos y diferencia las poblaciones Bajo-Medio-Alto	Krigeo Ordinario
Caso 3	Considera como espacio de estimación el modelo geológico de cobre 2006, sin diferenciar poblaciones	Krigeo Ordinario
Caso 4	Considera como espacio de estimación el modelo de carbonatos	Inverso de la distancia

Tabla 3: Casos de estudio para el modelo de estimación.

En el caso 2, las poblaciones mencionadas corresponden a las mismas definidas anteriormente en la tabla 2. Para este caso hablaremos de Modelo Bajo, Modelo Medio y Modelo Alto

IV.3.3. Estadísticas de muestras y compósitos

Al igual que en el modelo geológico, para realizar los modelos de estimación se utilizaron los análisis químicos de 4209 muestras de sondajes, provenientes de campañas de perforación del año 1997 al año 2006, las que se detallan a continuación:

DISTRIBUCIÓN MUESTRAS CO3		
Campaña	Nº Muestras	%
1997	928	22%
1998	1,003	24%
2004	677	16%
2006	1,601	38%
Total	4,209	100%

Tabla 4: Distribución de las muestras en relación a las campañas de perforación.

A partir de estas muestras se realizaron compósitos de 5 m, correspondientes a la altura del banco. Las estadísticas de las muestras y de los compósitos son las siguientes:

Muestras	CO3 Total	CO3 en Modelo Carbonatos	CO3 en polígonos CO3 Bajo	CO3 en polígonos CO3 Medio	CO3 en polígonos CO3 Alto	CO3 en Modelo Cu
Nº Datos	4,209	4,088	1,697	1,491	900	3,138
Mín [%]	0.12	0.12	0.12	0.18	0.39	0.12
Máx [%]	34.3	19.8	11.05	16.15	19.8	19.8
Media [%]	4.26	4.29	2.3	4.54	7.61	4.3
σ [%]	2.92	2.82	1.42	1.76	2.94	2.8
σ^2 [% ²]	8.53	7.96	2.02	3.1	8.64	7.85
CV	0.69	0.66	0.62	0.39	0.39	0.65

Compósitos	CO3 Total	CO3 en Modelo Carbonatos	CO3 en polígonos CO3 Bajo	CO3 en polígonos CO3 Medio	CO3 en polígonos CO3 Alto	CO3 en Modelo Cu
Nº Datos	1,855	1,772	754	643	375	1,175
Mín [%]	0.14	0.14	0.14	0.55	0.76	0.14
Máx [%]	23.29	18.45	8.57	10.02	18.45	14.02
Media [%]	4.19	4.23	2.25	4.55	7.66	4.29
σ [%]	2.53	2.44	1.05	1.01	2.1	2.36
σ^2 [% ²]	6.4	5.96	1.1	1.02	4.41	5.57
CV	0.6	0.58	0.47	0.22	0.27	0.55

Tabla 5: Estadísticas de las muestras y de los compósitos.

Respecto a estos resultados podemos destacar que los valores de las medias son consistentes. Por ejemplo la media de los compósitos utilizados en los polígonos CO3 Bajo (0-3.5%) es de 2.25%. Puede llamar la atención de que los valores máximos de las categorías CO3 Bajo y CO3 Medio y los valores mínimos de las categorías CO3 Medio y CO3 Alto caigan fuera del rango definido, tanto para las muestras como para los compósitos. Esto puede tener dos explicaciones. La primera es que en muchos casos un compósito se origina a partir de muestras de distintas categorías y por lo tanto una muestra de CO3 bajo, por ejemplo, puede pertenecer a un compósito de CO3 alto y por lo tanto a un polígono CO3 alto (Figura 21). La segunda situación se da cuando dos muestras o compósitos muy cercanos tienen valores muy distintos pero, sin embargo, son considerados como parte de un mismo polígono (Figura 22).

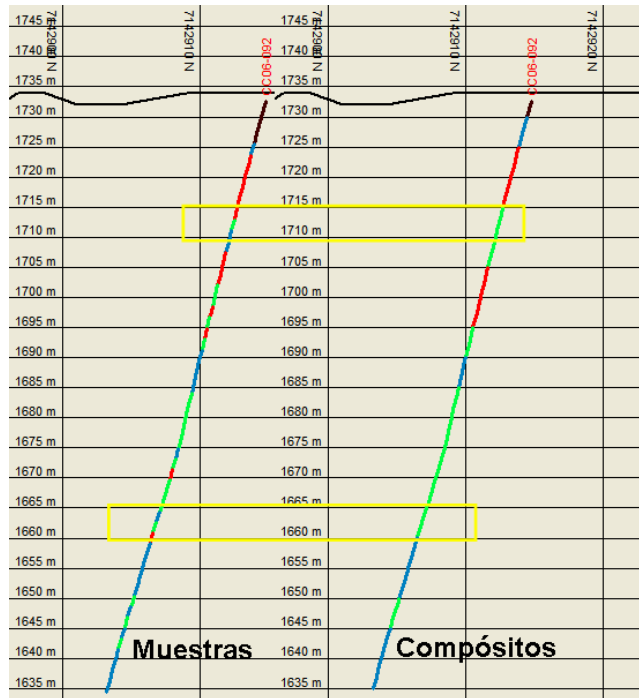


Figura 21: Muestras v/s Compósitos de CO_3 para el sondaje CC06-092. Destacado en amarillo dos casos de compósitos compuestos por muestras de tres categorías.

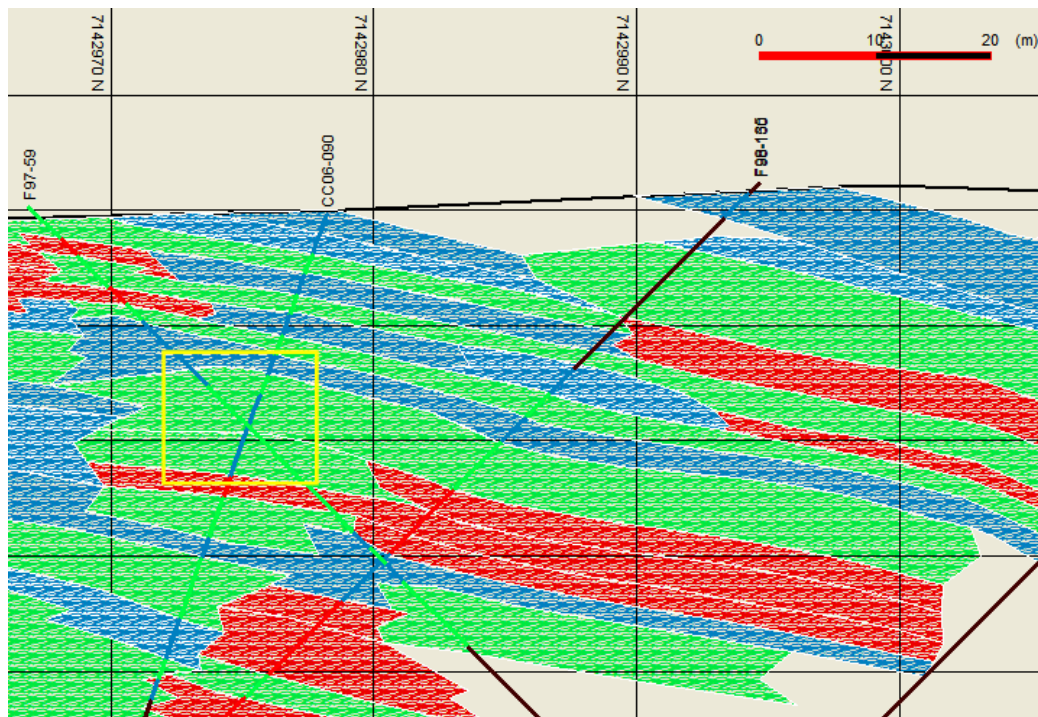


Figura 22: Ejemplo de muestra de CO_3 en polígono de otra categoría (Parte del Perfil 698NW).

Al considerar la totalidad de los compósitos de CO₃ que pertenecen al modelo de carbonatos se observa que tienen una distribución aproximadamente log-normal (Figura 23 a), situación que no ocurre cuando realizamos los histogramas de los compósitos separados por poblaciones (Figuras 23 b, c y d).

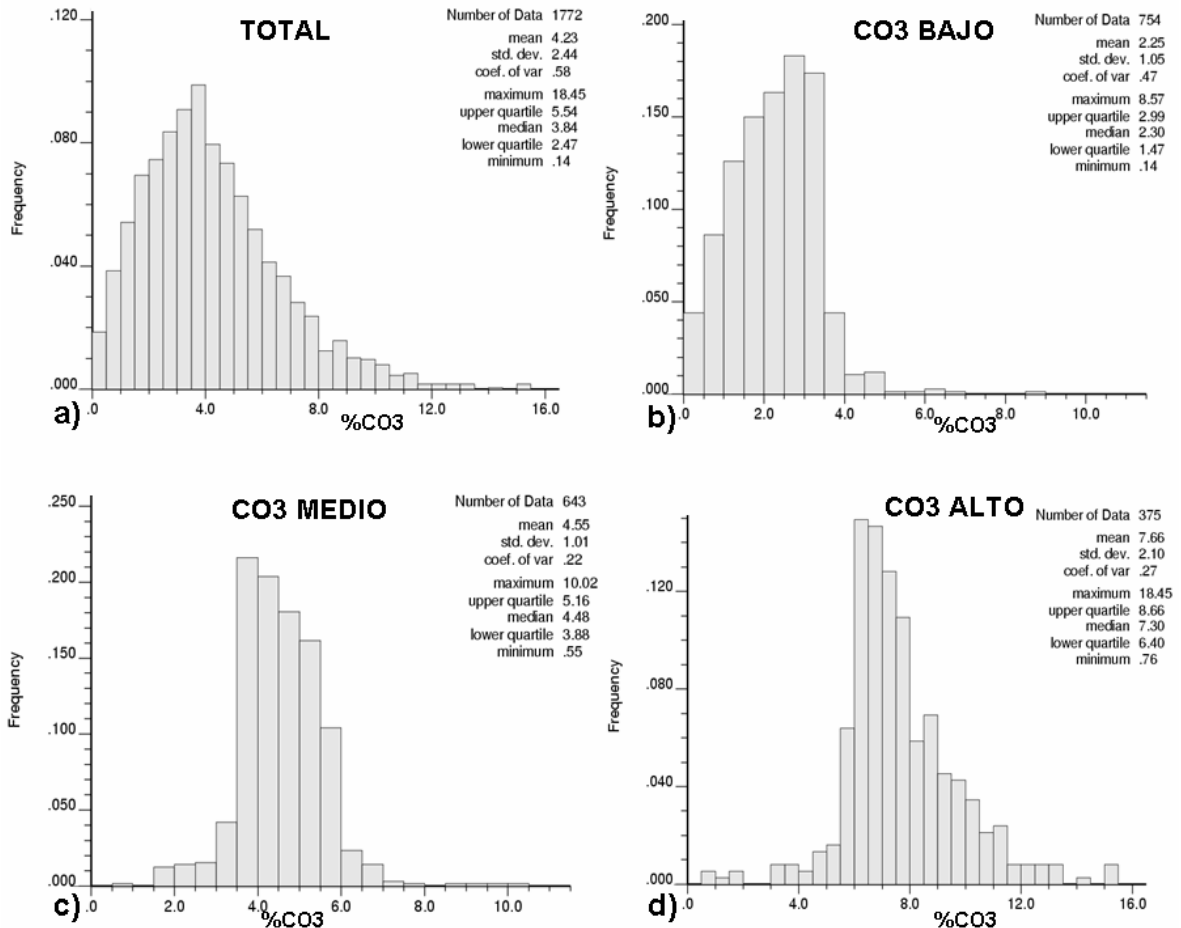


Figura 23: Histogramas de los compósitos según el modelo al que pertenecen.

IV.3.4. Variografía

Para obtener el variograma modelado que nos permitirá representar la variabilidad de los compósitos, debemos determinar primero el variograma experimental. Este se obtiene a través de un proceso iterativo en el cual interactúan distintos factores:

- Direcciones principales de anisotropía, que se obtienen a partir del modelo geológico. Siempre corresponden a 3 direcciones ortogonales, en este caso 2 horizontales y una vertical. En este caso en la horizontal son N28W, N62E.
- El paso, cuyo largo se determina para cada dirección y que depende tanto de la anisotropía como de la malla de sondajes. Se prueba con distintos largos de paso hasta obtener una forma de variograma conocida y comprensible. Si el paso escogido es muy pequeño se tendrá mucho ruido, mientras que si el paso escogido es muy grande el

variograma tenderá a ser plano. El número de pasos se determina por el tamaño del yacimiento y de tal forma de alcanzar la meseta.

- La tolerancia del paso corresponde a la mitad del paso, ya que al tener una malla irregular nos permite abarcar todas las muestras en cierta dirección.
- Anchos de banda: se determinan tanto en la horizontal como en la vertical, y se eligen los valores mínimos que permitan obtener una forma de variograma comprensible.

A partir del variograma experimental se obtiene:

- El efecto pepa, que se determina gráficamente pero considerando también antecedentes tales como la cantidad de pares de datos que generan este punto.
- El tipo de variograma. Los más comunes son esférico, exponencial y lineal. La forma de la curva nos indica esta característica.
- El alcance, que se determina gráficamente pero que depende también de la malla de sondajes y del modelo geológico.
- La meseta, que se determina gráficamente.

Una vez que se tienen definidos estos valores, se ingresan al software GSLib (Geostatistical Software Library). Gráficamente se verifica que las curvas modeladas coincidan con los variogramas experimentales. Para ello, eventualmente es necesario modificar alguno de los valores ingresados al software (efecto pepa, tipo de variograma, alcance, meseta). Una vez que se verifica gráficamente la coincidencia aproximada entre variograma experimental y modelado, el software nos entrega la expresión matemática que representa el modelo variográfico que será utilizado en la estimación de CO_3 y que convencionalmente se escribe:

$$\gamma_n = C_0 + C_{1 \text{ tipo de variograma}} (a_1 + a_2 + a_3) + C_{2 \text{ tipo de variograma}} (a_1 + a_2 + a_3) + \dots$$

donde:

n corresponde a la dirección principal, la de mayor continuidad de anisotropía

C_0 corresponde al efecto pepa

C_n corresponde a las mesetas diferenciales (la primera meseta diferencial es la diferencia entre la primera meseta y el efecto pepa, la segunda meseta diferencial es la diferencia entre la segunda meseta y la primera meseta, etc).

a_n corresponde a los alcances en las direcciones principales. a_1 corresponde al alcance de la dirección horizontal perpendicular a la dirección principal, a_2 al alcance en la dirección principal y a_3 al alcance en la dirección vertical, perpendicular a las dos anteriores.

Para los casos 1 y 3, el modelo variográfico se obtuvo a partir de la totalidad de los compósitos. Los resultados de los variogramas experimentales y modelados se presentan en la figura 24. Los variogramas experimentales están representados por líneas discontinuas y puntos mientras que los modelados lo están por líneas continuas. Cada color representa una dirección de anisotropía señalada en la leyenda del gráfico.

El resumen de los parámetros tales como largo del paso, número de pasos, tolerancia al paso, azimut (θ), tolerancia angular en el azimut ($\Delta\theta$) ancho de banda horizontal (Δh_H), inclinación (φ), tolerancia angular en la inclinación ($\Delta\varphi$) y ancho de banda en la inclinación (Δh_V) se presentan en las tablas 6 y 7.

Nº Pasos	15					
Paso	20m					
Tolerancia al paso	10m					
Tipo	(-) Covarianza					
	θ	$\Delta\theta$	Δh_H	φ	$\Delta\varphi$	Δh_V
Hz N28W	-28°	22.5°	20m	0°	22.5°	20m
Hz N62E	62°	22.5°	20m	0°	22.5°	20m

Tabla 6: Parámetros del variograma experimental horizontal para el caso 1.

Nº Pasos	7					
Paso	5m					
Tolerancia al paso	2.5m					
Tipo	(-) Covarianza					
	θ	$\Delta\theta$	Δh_H	φ	$\Delta\varphi$	Δh_V
Vertical	0°	22.5°	20m	-90°	22.5°	15m

Tabla 7: Parámetros del variograma experimental vertical para el caso 1.

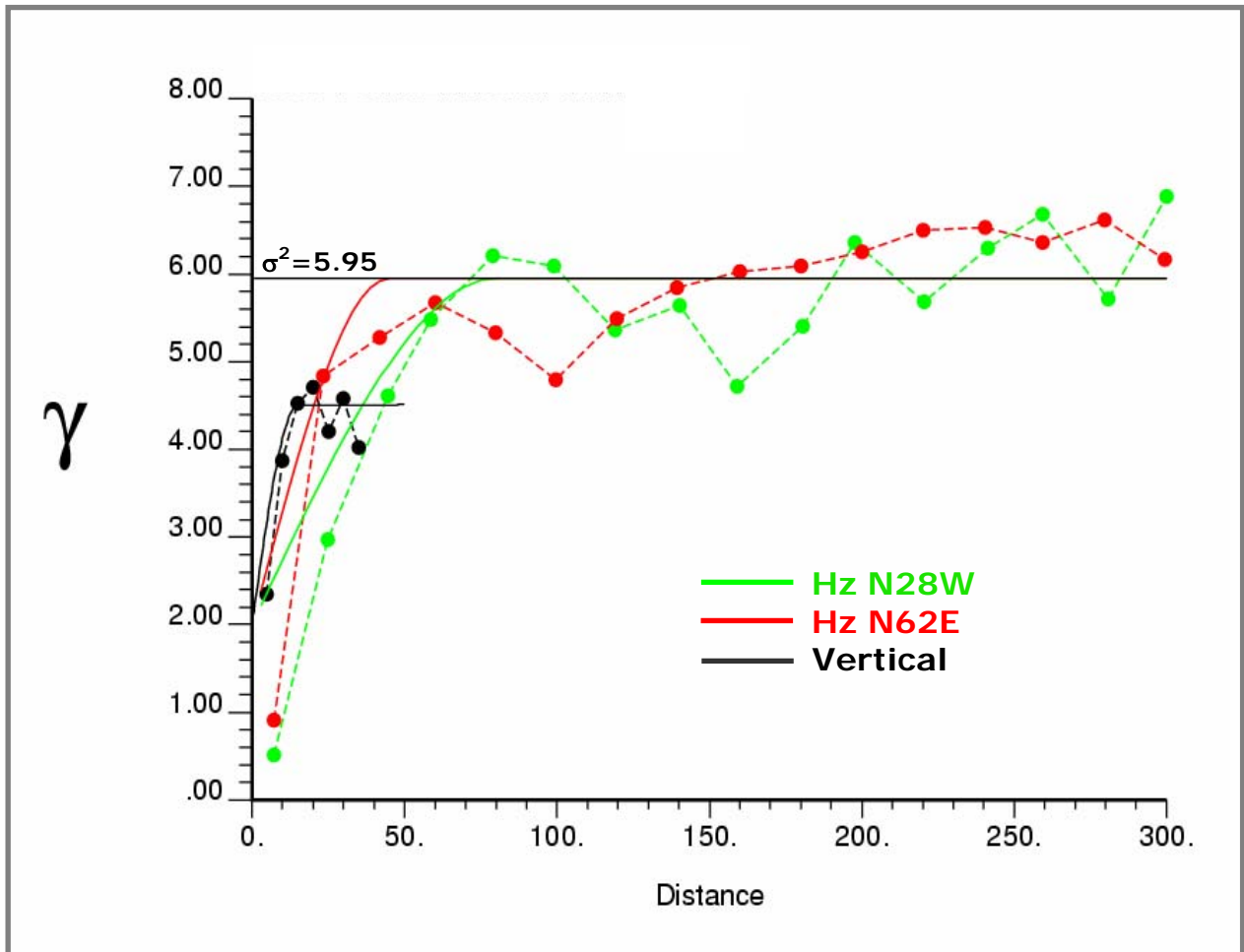


Figura 24: Variogramas experimentales y modelados para los casos 1 y 3.

Finalmente, el modelo variográfico que se utilizará en la estimación de carbonatos para los casos 1 y 3 es el siguiente:

$$\gamma_{N28W} = 2.00 + 2.50sph(45,80,15) + 1.45sph(45,80,\infty)$$

Para el caso 2 se determinaron 3 variogramas, discriminando por poblaciones. En las figuras 25, 26 y 27 se tienen los resultados de los variogramas experimentales y modelados para cada población. En las tablas 8 a 13, a su vez, se tienen los valores de los parámetros definidos para determinar los variogramas experimentales y a continuación de las tablas de cada población se presentan los modelos variográficos para cada población.

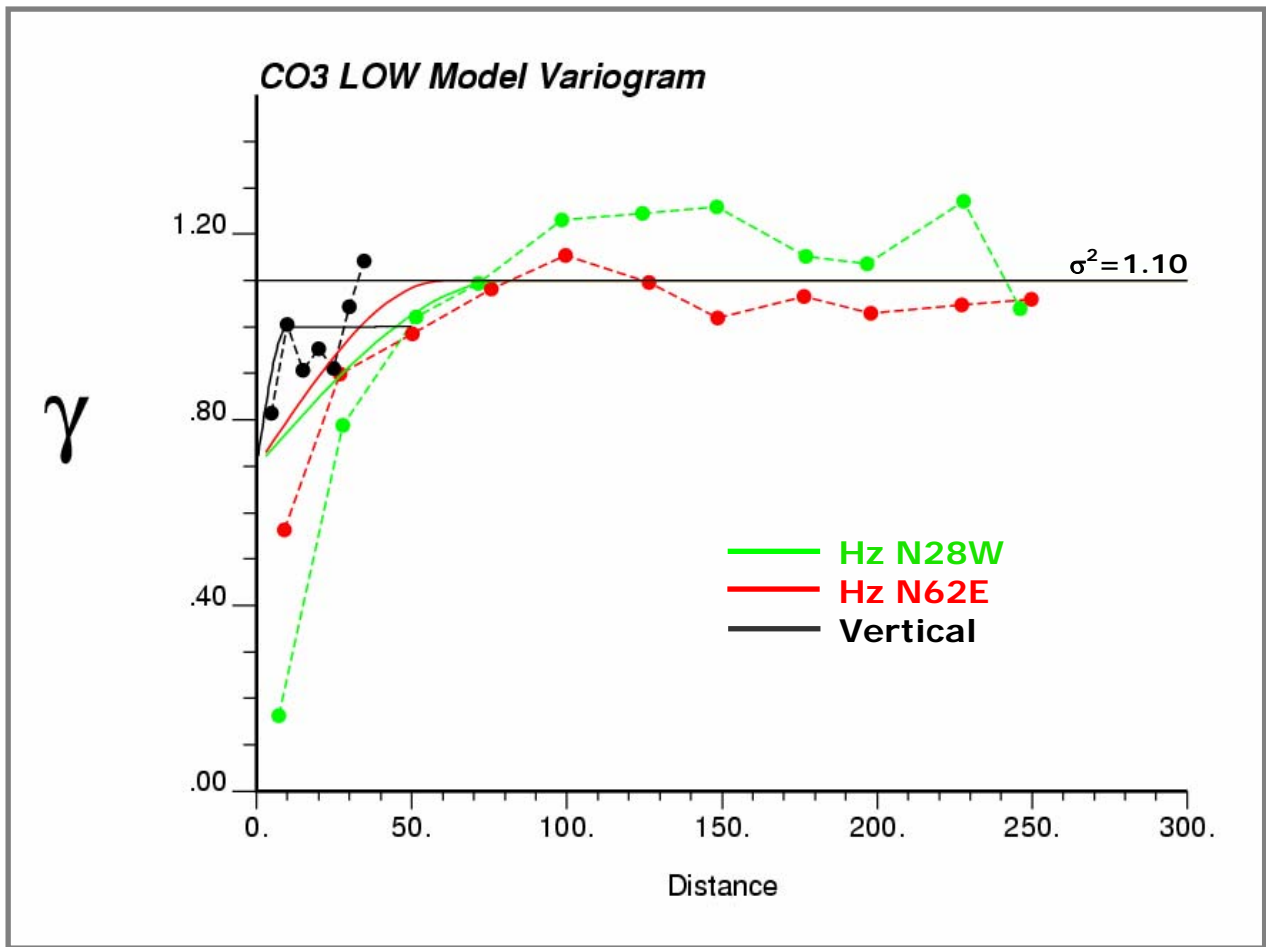


Figura 25: Variogramas experimentales y modelados para el modelo Bajo del caso 2.

Nº Pasos	10					
Paso	25m					
Tolerancia al paso	12.5m					
Tipo	(-) Covarianza					
	θ	$\Delta\theta$	Δh_H	φ	$\Delta\varphi$	Δh_V
Hz N28W	-28°	22.5°	15m	0°	22.5°	15m
Hz N62E	62°	22.5°	15m	0°	22.5°	15m

Tabla 8: Parámetros del variograma experimental horizontal para el modelo Bajo del caso 2.

Nº Pasos	7					
Paso	5m					
Tolerancia al paso	2.5m					
Tipo	(-) Covarianza					
	θ	$\Delta\theta$	Δh_H	φ	$\Delta\varphi$	Δh_V
Vertical	0°	22.5°	20m	-90°	22.5°	15m

Tabla 9: Parámetros del variograma experimental vertical para el modelo Bajo del caso 2.

$$\gamma_{N28W} = 0.7 + 0.3sph(60,80,10) + 0.1sph(60,80,\infty)$$

Sobre 643 compósitos

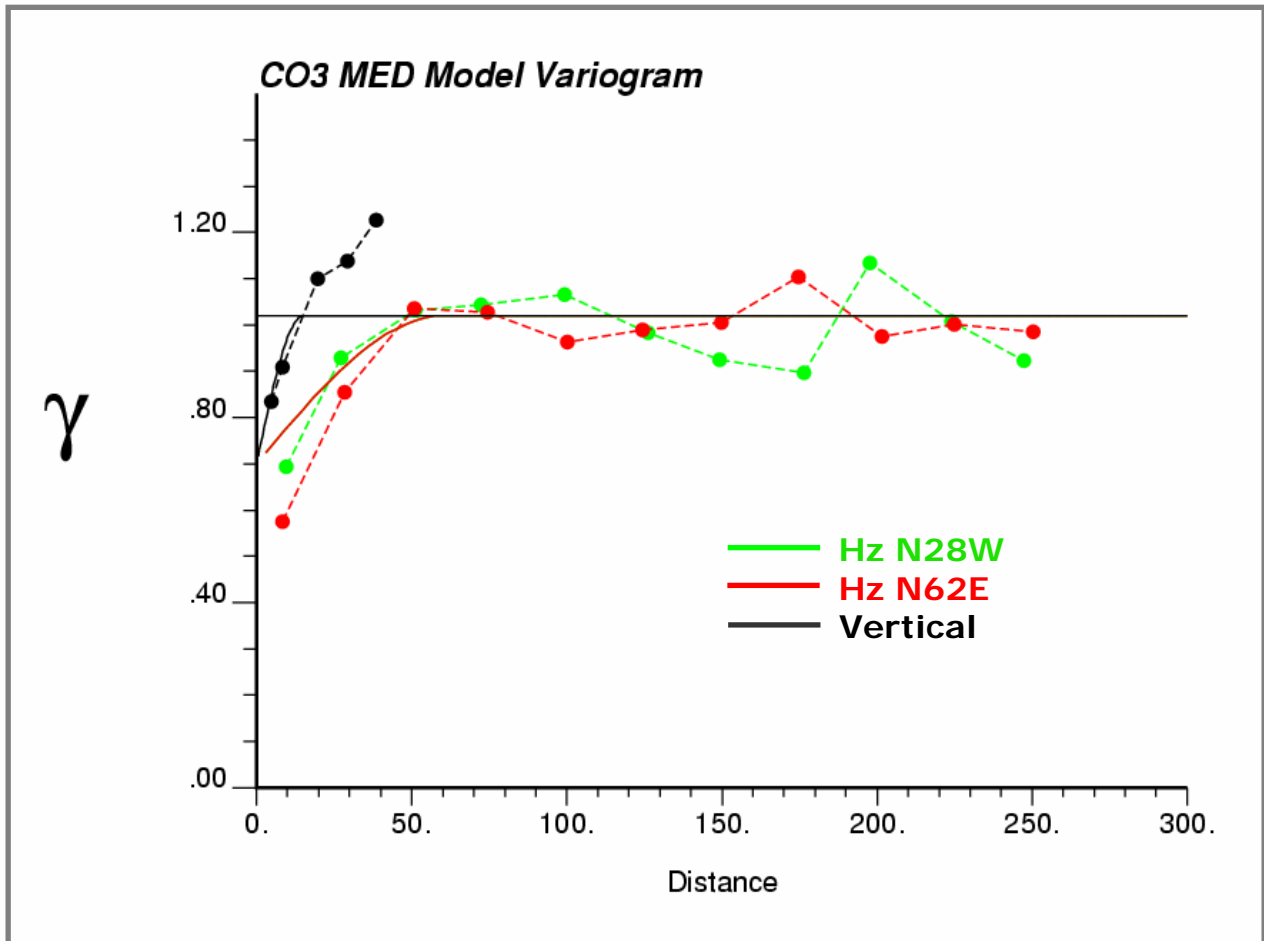


Figura 26: Variogramas experimentales y modelados para el modelo Medio del caso 2.

Nº Pasos	10					
Paso	25m					
Tol. al paso	12.5m					
Tipo	(-) Covarianza					
	Azm	Atol	BandH	Dip	Dtol	BandV
Hz N28W	-28°	25°	20m	0°	25°	20m
Hz N62E	62°	22.5°	20m	0°	22.5°	20m

Tabla 10: *Parámetros del variograma experimental horizontal para el modelo Medio del caso 2.*

Nº Pasos	4					
Paso	10m					
Tol. al paso	5m					
Tipo	(-) Covarianza					
	Azm	Atol	BandH	Dip	Dtol	BandV
Vertical	0°	22.5°	20m	-90°	22.5°	20m

Tabla 11: *Parámetros del variograma experimental vertical para el modelo Medio del caso 2.*

$$\gamma_{N28W} = 0.7 + 0.32.sph(60,60,15)$$

Sobre 375 compósitos

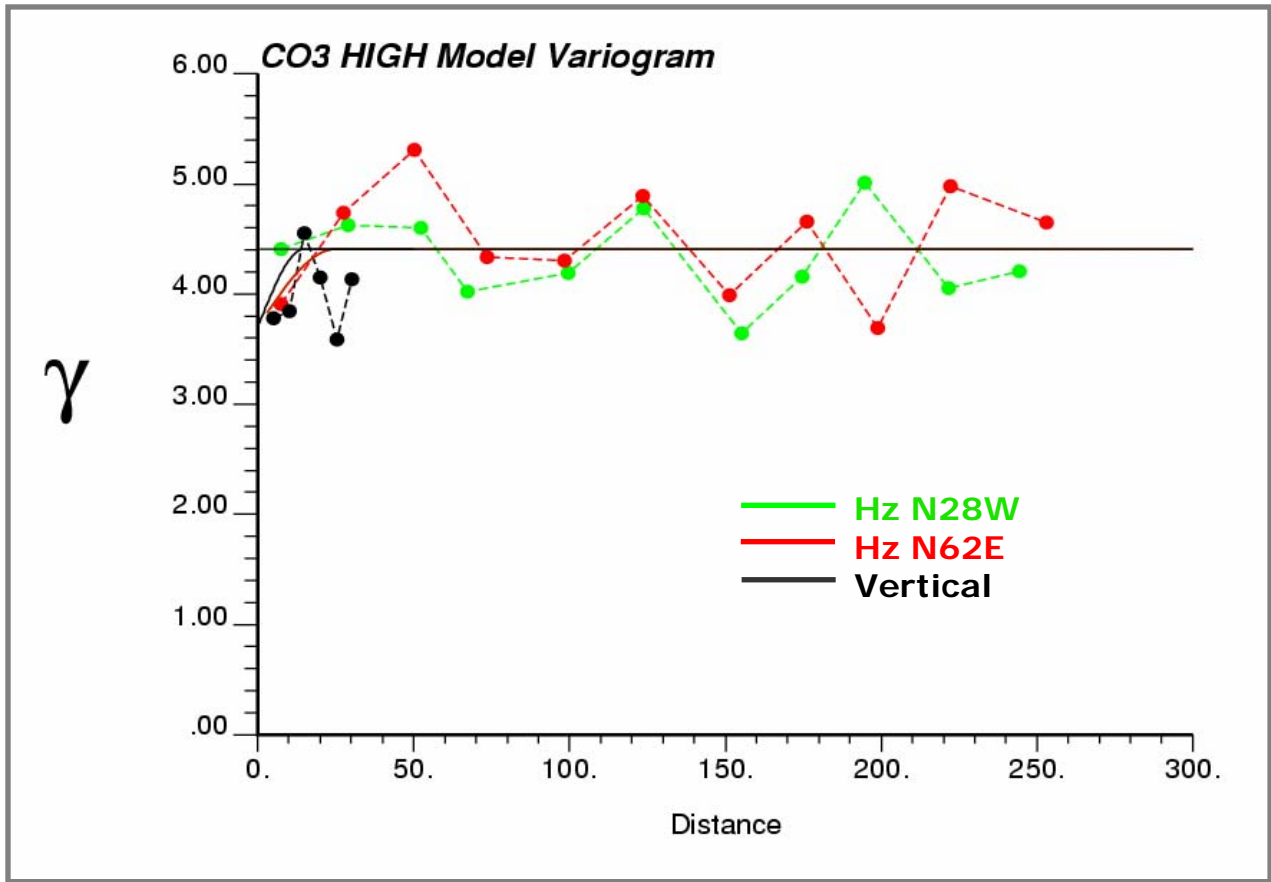


Figura 27: Variogramas experimentales y modelados para el modelo Alto del caso 2.

N° Pasos	10					
Paso	25m					
Tol. al paso	12.5m					
Tipo	(-) Covarianza					
	Azm	Atol	BandH	Dip	Dtol	BandV
Hz N28W	-28°	20.0°	15m	0°	22.5°	20m
Hz N62E	62°	20.0°	15m	0°	20.0°	15m

Tabla 12: Parámetros del variograma experimental horizontal para el modelo Alto del caso 2.

Nº Pasos	6					
Paso	5m					
Tol. al paso	2.5m					
Tipo	(-) Covarianza					
	Azm	Atol	BandH	Dip	Dtol	BandV
Vertical	0°	22.5°	20m	-90°	22.5°	20m

Tabla 13: *Parámetros del variograma experimental vertical para el modelo Alto del caso 2.*

$$\gamma_{N28W} = 3.7 + 0.71sph(25,25,15)$$

La variografía obtenida para los casos 1 y 3, con la totalidad de los compósitos, es la mejor; el variograma modelado se aproxima bastante al variograma experimental, y tanto las mesetas como los alcances son relativamente evidentes. Sin embargo, el efecto pepa es difícil de determinar porque cuando h tiende a 0 se tienen muy pocos pares de puntos para determinarlo. Además presenta un valor muy alto (se considera alto el valor del efecto pepa cuando está sobre el 30% del valor de la meseta. Para el caso 2, la situación se agrava. Al separar en modelos Bajo, Medio y Alto, los variogramas se obtienen a partir de un número muy pequeño de compósitos. Las mesetas y los alcances se hacen difíciles de determinar, los efectos pepas son aún mayores con respecto a las mesetas y para los modelos Medio y Alto el comportamiento del variograma tiende al efecto pepa puro (ver figura 18), situación en que no hay ninguna correlación entre las muestras y la distancia, y en la que el variograma por lo tanto no es válido.

IV.3.5. Estimación de recursos

IV.3.5.1. Propiedades del modelo de bloques

Al momento de determinar las dimensiones del cuerpo en que se va a realizar el modelo de bloque siempre se considera un volumen mayor al que abarcan realmente los recursos estimados. Esto se debe a un tema netamente minero: es necesario que el futuro rajo quede totalmente contenido en este modelo. En la tabla 14 se presentan las coordenadas y dimensiones en que se realizó el modelo de bloques, así como el tipo de modelo utilizado. El tipo de modelo porcentual contiene los porcentajes del bloque que están dentro de cada polígono, y se utilizan más adelante para el cálculo del tonelaje. El tamaño del bloque y la elección de un modelo porcentual se debe a lo pequeño que son los cuerpos en la vertical y a lo irregulares que son en la horizontal. Esto permite tener un mayor grado de selectividad.

	Coordenada Mín [m]	Coordenada Máx [m]	Largo [m]	N° Bloques	Tamaño Bloque
Este	412,700	414,250	1,550	310	5
Norte	7,140,575	7,143,595	3,020	604	5
Cota	1,600	1,800	200	40	5

N° Total Bloques	7,489,600
Volumen Modelo [m3]	936,200,000
Tipo de Modelo	Porcentajes

Tabla 14: Dimensiones y tipo de modelo de bloque.

IV.3.5.2. Validación cruzada

La validación cruzada corresponde a un Kriging puntual que se utiliza para escoger el mejor plan de estimación de Kriging. Antes de realizar esta validación se definieron 10 planes de Kriging que se presentan en la tabla 15:

Plan de Kriging	I	II	III	IV	V
Tipo de Búsqueda	Elipsoidal	Elipsoidal	Elipsoidal	Elipsoidal	Elipsoidal
Máximo de muestras por octante	-	-	-	-	-
Mínimo de octantes con información	-	-	-	-	-
Orientación búsqueda	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W
Radio de Búsqueda [m]	22.5 / 40 / 7.5	5 / 5 / 5	5 / 5 / 5	45 / 80 / 15	144 / 240 / 30
Mínimo n° de muestras	2	2	1	2	1
Máximo n° de muestras	16	16	8	16	16

Plan de Kriging	VI	VII	VIII	IX	X
Tipo de Búsqueda	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes
Máximo de muestras por octante	2	2	2	2	2
Mínimo de octantes con información	2	2	1	2	1
Orientación búsqueda	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W
Radio de Búsqueda [m]	22.5 / 40 / 7.5	5 / 5 / 5	5 / 5 / 5	45 / 80 / 15	144 / 240 / 30
Mínimo n° de muestras	2	2	1	2	1
Máximo n° de muestras	16	16	8	16	16

Tabla 15: Propiedades de los distintos planes de Kriging.

De estos planes podemos destacar las siguientes características:

- Planes II, III, VII y VIII: presentan un radio de búsqueda muy pequeño, para asegurar la estimación de bloques cruzados por un sondaje.
- Planes I y VI: planes de mayor exigencia para los bloques que no son cruzados por un sondaje. Tienen un radio de búsqueda igual a la mitad del alcance del variograma.
- Planes IV y IX: similares a los del caso anterior, pero con un radio de búsqueda igual al alcance del variograma.

- Planes V y X: planes de relleno, aseguran la estimación de todos los bloques comprendidos dentro del modelo geológico de carbonatos.

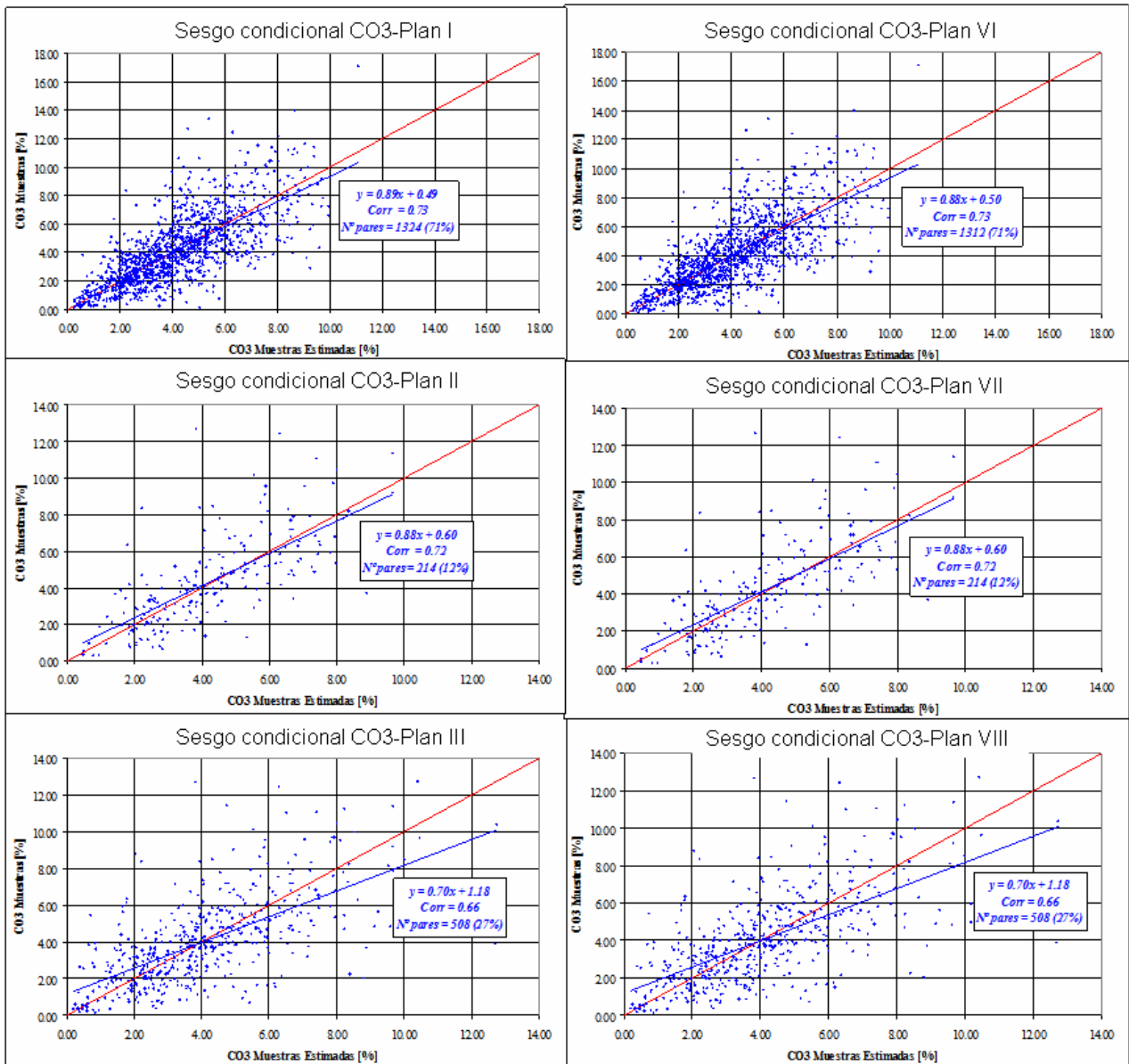


Figura 28 a: Gráficos de dispersión de valores de CO₃ estimado vs CO₃ real: Izquierda casos con tipo de búsqueda elipsoidal, derecha casos con tipo de búsqueda por octantes.

La validación cruzada consiste en asumir como desconocida una muestra (compósito) y estimarla según uno de los planes definidos en la tabla 15. Esto se realiza para cada una de las muestras. En muchos casos dicha muestra no cumple con los requisitos del plan y por lo tanto no es estimada. En caso contrario se obtiene un valor estimado, además del valor real, para cada muestra. Luego se realiza el mismo proceso con cada uno de los planes. Esta validación nos permite determinar los sesgos globales y condicionales de cada plan. El sesgo global se obtiene comparando la media de las muestras originales con la media de las muestras estimadas, mientras

que el sesgo condicional se determina gráficamente, a partir de la recta generada por los pares de muestras originales/estimadas mediante una regresión y a partir de la dispersión que presentan los pares de muestra respecto a esta recta (Figura 28 a y b). Se espera que esta recta sea lo más cercana posible a $y = x$.

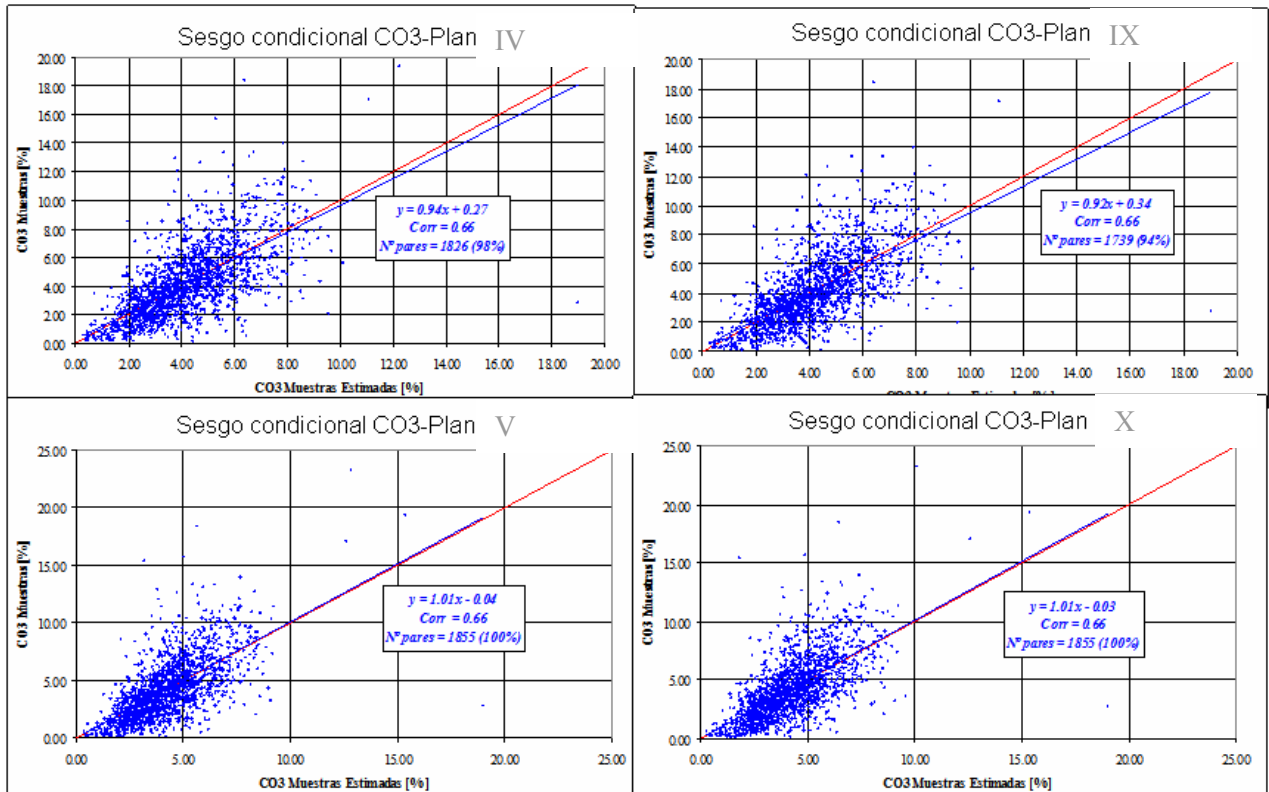


Figura 28 b: Gráficos de dispersión de valores de CO_3 estimado vs CO_3 real: Izquierda casos con tipo de búsqueda elipsoidal, derecha casos con tipo de búsqueda por octantes.

Los planes de estimación con radio de búsqueda pequeño (II, III, VII y VIII) fueron definidos para que los bloques cruzados por algún(os) compósito(s) sean estimados exclusivamente en base a ese(os) compósito(s). De la figura 26 podemos observar que estos planes presentan un sesgo condicional bastante importante. Además, recordemos del variograma que el efecto pepa es alto, por lo tanto al suponer una muestra como desconocida bajo alguno de estos planes, su estimación se basará en las pocas muestras que estén en las vecindades y presentará generalmente valores que difieren considerablemente. Por esto mismo la validación cruzada no es representativa para estos planes. Para el resto de los planes existe una dispersión bastante alta pero las líneas de tendencias son bastante cercanas a la línea de 45° y por lo tanto no presentan un sesgo condicional tan alto.

En la tabla 16 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de las validaciones cruzadas. Estas validaciones se hicieron considerando las muestras que pertenecen al espacio del modelo geológico de carbonatos, correspondientes a los casos 1, 2 y 4 definidos en la tabla 3. Estos resultados se asumen como validos también para el caso 3, restringido espacialmente al modelo geológico de cobre, de menor dimensión y por ende con menos muestras.

Plan Kriging	SESGO GLOBAL			SESGO CONDICIONAL				
	Media Muestras		Diferencia	Nº Pares	% Datos	ρ	Recta	
	Originales	Estimadas					Pendiente	Inters. Eje Y
Elipsoidal								
I	4.17	4.16	-0.01	1,324	71%	0.73	0.89	0.49
II	4.32	4.21	-0.11	214	12%	0.72	0.88	0.60
III	4.04	4.09	0.05	508	27%	0.66	0.70	1.18
IV	4.18	4.19	0.01	1,826	98%	0.66	0.94	0.27
V	4.19	4.19	0.00	1,855	100%	0.66	1.01	0.04
Octantes								
VI	4.17	4.15	-0.02	1,312	71%	0.73	0.88	0.50
VII	4.32	4.21	-0.11	214	12%	0.72	0.88	0.60
VIII	4.04	4.09	0.05	508	27%	0.66	0.70	1.18
IX	4.19	4.19	0.00	1,739	94%	0.66	0.92	0.34
X	4.19	4.17	-0.02	1,855	100%	0.66	1.01	0.03

Tabla 16: Resultados de la validación cruzada según los distintos planes.

En base a los resultados obtenidos de la validación cruzada podemos concluir que:

- Todos los planes pueden ser considerados como globalmente insesgados.
- Ningún sesgo condicional es demasiado importante excepto para los planes de radio de búsqueda pequeño para los cuales la validación cruzada no es representativa.

IV.3.5.3. Planes de estimación de recursos

En base a los resultados obtenidos en la validación cruzada, los planes de estimación escogidos se presentan en las siguientes tablas:

- Plan Caso 1 (considera como espacio de estimación el modelo geológico de carbonatos, sin diferenciar poblaciones)

	1ª corrida	2ª corrida	3ª corrida	4ª corrida	5ª corrida
Plan de Kriging TOTAL	VII	VIII	VI	IX	X
Tipo de Búsqueda	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes
Máximo de muestras por octante	2	2	2	2	2
Mínimo de octantes con información	2	1	2	2	1
Orientación búsqueda	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W
Radio de Búsqueda [m]	5 / 5 / 5	5 / 5 / 5	22.5 / 40 / 7.5	45 / 80 / 15	144 / 240 / 30
Mínimo nº de muestras	2	1	2	2	1
Máximo nº de muestras	16	8	16	16	16

Tabla 17: Plan de estimación para el Caso 1.

- Plan Caso 2 (considera como espacio de estimación el modelo geológico de carbonatos y diferencia las poblaciones Bajo-Medio-Alto)

	1ª corrida	2ª corrida	3ª corrida	4ª corrida	5ª corrida
Plan de Kriging Bajo	VII	VIII	VI	IX	X
Tipo de Búsqueda	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes
Máximo de muestras por octante	2	2	2	2	2
Mínimo de octantes con información	2	1	2	2	1
Orientación búsqueda	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W
Radio de Búsqueda [m]	5 / 5 / 5	5 / 5 / 5	30 / 40 / 5	60 / 80 / 10	240 / 320 / 30
Mínimo n° de muestras	2	1	2	2	1
Máximo n° de muestras	16	8	16	16	16

Tabla 18: Plan de estimación para el Caso 2 en los polígonos CO₃ Bajo.

	1ª corrida	2ª corrida	3ª corrida	4ª corrida	5ª corrida
Plan de Kriging Medio	VII	VIII	VI	IX	X
Tipo de Búsqueda	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes
Máximo de muestras por octante	2	2	2	2	2
Mínimo de octantes con información	2	1	2	2	1
Orientación búsqueda	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W
Radio de Búsqueda [m]	5 / 5 / 5	5 / 5 / 5	30 / 30 / 7.5	60 / 60 / 15	480 / 480 / 40
Mínimo n° de muestras	2	1	2	2	1
Máximo n° de muestras	16	8	16	16	16

Tabla 19: Plan de estimación para el Caso 2 en los polígonos CO₃ Medio.

	1ª corrida	2ª corrida	3ª corrida	4ª corrida	5ª corrida
Plan de Kriging Alto	VII	VIII	VI	IX	X
Tipo de Búsqueda	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes
Máximo de muestras por octante	2	2	2	2	2
Mínimo de octantes con información	2	1	2	2	1
Orientación búsqueda	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W
Radio de Búsqueda [m]	5 / 5 / 5	5 / 5 / 5	12.5 / 12.5 / 7.5	25 / 25 / 15	150 / 150 / 35
Mínimo n° de muestras	2	1	2	2	1
Máximo n° de muestras	16	8	16	16	16

Tabla 20: Plan de estimación para el Caso 2 en los polígonos CO₃ Alto.

- Plan Caso 3 (considera como espacio de estimación el modelo geológico de cobre 2006, sin diferenciar poblaciones)

	1ª corrida	2ª corrida	3ª corrida	4ª corrida	5ª corrida
Plan de Kriging TOTAL	VII	VIII	VI	IX	X
Tipo de Búsqueda	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes
Máximo de muestras por octante	2	2	2	2	2
Mínimo de octantes con información	2	1	2	2	1
Orientación búsqueda	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W
Radio de Búsqueda [m]	5 / 5 / 5	5 / 5 / 5	22.5 / 40 / 7.5	45 / 80 / 15	225 / 400 / 45
Mínimo n° de muestras	2	1	2	2	1
Máximo n° de muestras	16	8	16	16	16

Tabla 21: Plan de estimación para el Caso 3.

- Plan Caso 4 (considera como espacio de estimación el modelo geológico de carbonatos)

	1ª corrida	2ª corrida	3ª corrida	4ª corrida	5ª corrida
Plan de Inverso de la Distancia al Cuadrado TOTAL	VII	VIII	VI	IX	XX
Tipo de Búsqueda	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes	Octantes
Máximo de muestras por octante	2	2	2	2	2
Mínimo de octantes con información	2	1	2	2	1
Orientación búsqueda	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W	N28°W
Radio de Búsqueda [m]	5 / 5 / 5	5 / 5 / 5	22.5 / 40 / 7.5	45 / 80 / 15	144 / 240 / 30
Mínimo n° de muestras	2	1	2	2	1
Máximo n° de muestras	16	8	16	16	16

Tabla 22: Plan de estimación para el Caso 4.

IV.3.5.4. Resultados de las estimaciones de recursos

Los resultados de las estimaciones se presentan en las tablas a continuación:

- Resultados de estimación Caso 1 (considera como espacio de estimación el modelo geológico de carbonatos, sin diferenciar poblaciones, estimado por kriging ordinario)

Corrida	Bloques Totales	Bloques Estimados		Media Bloques [%]	No Estimados	
					< Muestras	< Octantes
1.7	306,397	101	0.03%	3.604	306,265	31
1.8	306,397	5,461	2%	4.244	300,835	-
1.6	306,397	88,112	29%	4.222	190,409	22,314
1.9	306,397	170,674	56%	4.138	24,171	17,878
1.10	306,397	42,049	14%	4.088	-	-
		306,397	100%			

Tabla 23: Resultados de estimación para el Caso 1.

- Resultados de estimación Caso 2 (considera como espacio de estimación el modelo geológico de carbonatos y diferencia las poblaciones Bajo-Medio-Alto, estimado por kriging ordinario)

LOW					No Estimados	
Corrida	Bloques Totales	Bloques Estimados		Media Bloques [%]	< Muestras	< Octantes
1.7	140,990	38	0.03%	1.923	140,937	15
1.8	140,990	2,317	2%	2.248	138,635	-
1.6	140,990	9,304	7%	2.226	126,741	2,590
1.9	140,990	93,723	66%	2.194	26,026	9,582
1.10	140,990	35,608	25%	2.254	-	-
		140,990	100%			

MEDIUM					No Estimados	
Corrida	Bloques Totales	Bloques Estimados		Media Bloques [%]	< Muestras	< Octantes
1.7	124,748	29	0.02%	4.495	124,710	9
1.8	124,748	1,987	2%	4.564	122,732	-
1.6	124,748	18,539	15%	4.609	96,345	7,848
1.9	124,748	67,656	54%	4.563	25,052	11,485
1.10	124,748	36,537	29%	4.515	-	-
		124,748	100%			

HIGH					No Estimados	
Corrida	Bloques Totales	Bloques Estimados		Media Bloques [%]	< Muestras	< Octantes
1.7	65,311	8	0.01%	7.800	65,300	3
1.8	65,311	1,159	2%	7.693	64,144	-
1.6	65,311	1,528	2%	7.907	61,855	761
1.9	65,311	10,398	16%	7.866	47,014	5,204
1.10	65,311	52,218	80%	7.689	-	-
		65,311	100%			

Tabla 24: Resultados de estimación para el Caso 2.

- Resultados estimación Caso 3 (considera como espacio de estimación el modelo geológico de cobre 2006, sin diferenciar poblaciones, estimado por kriging ordinario)

Corrida	Bloques Totales	Bloques Estimados		Media Bloques [%]	No Estimados	
					< Muestras	< Octantes
1.7	175,442	35	0.02%	3.652	175,391	16
1.8	175,442	3,460	2%	4.296	171,947	-
1.6	175,442	46,057	26%	4.333	114,708	11,182
1.9	175,442	97,753	56%	4.192	19,070	9,067
1.10	175,442	28,137	16%	4.045	-	-
		175,442	100%			

Tabla 25: Resultados de estimación para el Caso 3.

- Resultados estimación Caso 4 (considera como espacio de estimación el modelo geológico de carbonatos, estimado por inverso a la distancia)

Corrida	Bloques Totales	Bloques Estimados		Media Bloques [%]	No Estimados	
					< Muestras	< Octantes
1.7	306,397	101	0.03%	3.639	306,265	31
1.8	306,397	5,461	2%	4.244	300,835	-
1.6	306,397	88,112	29%	4.224	190,409	22,314
1.9	306,397	170,674	56%	4.133	24,171	17,878
1.10	306,397	42,049	14%	4.052	-	-
		306,397	100%			

Tabla 26: Resultados de estimación para el Caso 4.

IV.3.5.5. Validación de las estimaciones

Una vez que se obtienen los resultados, las estimaciones realizadas deben ser validadas. Para esto existen tres métodos: estadístico, gráfico o por derivas (tendencias). En los siguientes puntos presentaremos y discutiremos estos tres tipos de validaciones.

IV.3.5.5.1 Validación estadística

Al observar las estadísticas básicas de cada caso, podemos observar que las medias son bastante cercanas a la media de los compósitos (Tabla 27). Tal como lo mencionamos anteriormente para la validación cruzada, esto nos indica que las distintas estimaciones no presentan sesgo global. El caso 3 se presenta a parte, ya que al considerar un espacio de estimación menor (modelo geológico de cobre) utiliza una menor cantidad de datos al momento de realizar la estimación.

La distribución de leyes de los bloques obtenidos a partir de los distintos casos de estimación debe ser similar a la distribución de leyes de los compósitos (Figura 23), que presenta una distribución aproximadamente log-normal. En la figura 29, se observa que esto se cumple bastante bien para los casos 1 y 4, que consideran como espacio de estimación el modelo geológico de carbonatos y que no diferencian poblaciones de CO₃ Bajo-Medio-Alto.

El caso 3, que considera como espacio de estimación el modelo geológico de cobre, también presenta una tendencia similar aún cuando la distribución está más achatada, presentando frecuencias máximas menores. Esto se debe básicamente a que en este caso se realizó la estimación en un espacio menor y por lo tanto se generó una menor cantidad de bloques.

El caso 2 presenta una distribución absolutamente distinta a la de los compósitos. Se tienen tres distribuciones consecutivas con tendencia aproximadamente log-normal, una para cada rango definido. Esto se debe a que se realizó una separación artificial de los cuerpos por rangos de ley. Por lo tanto se consideraron tres poblaciones cuando en realidad existe una sola, o eventualmente más de una pero no separadas por ley. En consecuencia, la división de poblaciones, al momento de realizar un modelo de bloques, debe considerar factores geológicos. Por ejemplo, en un modelo de cobre puede ser conveniente separar en poblaciones óxidos y sulfuros, pero no por rangos de leyes. Esto no impide que en el modelo geológico se puedan considerar poblaciones por rangos de leyes, tales como óxido alto, óxido marginal, sulfuro alto, etc.

		CASO 1	CASO 2	CASO 4
Estadísticas	Compósitos en Modelo	Bloques	Bloques	Bloques
Nº Datos	1,772	306,397	306,397	306,397
Mínimo [%]	0.14	0.14	0.14	0.14
Máximo [%]	18.45	18.45	18.45	18.45
Media [%]	4.23	4.16	4.16	4.15
σ [%]	2.44	1.76	2.15	1.85
σ^2 [% ²]	5.96	3.1	4.61	3.42
CV	0.58	0.42	0.52	0.45

		CASO 3
Estadísticas	Compósitos en Modelo	Bloques
Nº Datos	1,175	175,442
Mínimo [%]	0.14	0.14
Máximo [%]	14.02	14.02
Media [%]	4.29	4.21
σ [%]	2.36	1.61
σ^2 [% ²]	5.57	2.58
CV	0.55	0.38

Tabla 27: Estadísticas básicas de los compósitos y de las distintas estimaciones realizadas.

En la tabla 28 se presentan los tonelajes totales obtenidos para cada caso. También se presentan los tonelajes sobre las leyes definidas como límites de poblaciones. El caso 3 presenta

tonelajes considerablemente menores, ya que, tal como hemos mencionado anteriormente, consideró un espacio menor para la estimación. Los valores obtenidos para el caso 1 y 4 son bastante similares, tanto en tonelaje como en leyes de CO₃. El caso 2, si bien tiene los mismos valores totales que estos dos casos, presenta leyes de CO₃ más altas tanto en los bloques con leyes >=3.5% como en los bloques con leyes >=6%. En cuanto a los tonelajes presenta un valor menor en aproximadamente 7% para leyes >=3.5%, y un valor mayor en aproximadamente 35% para leyes >=6%.

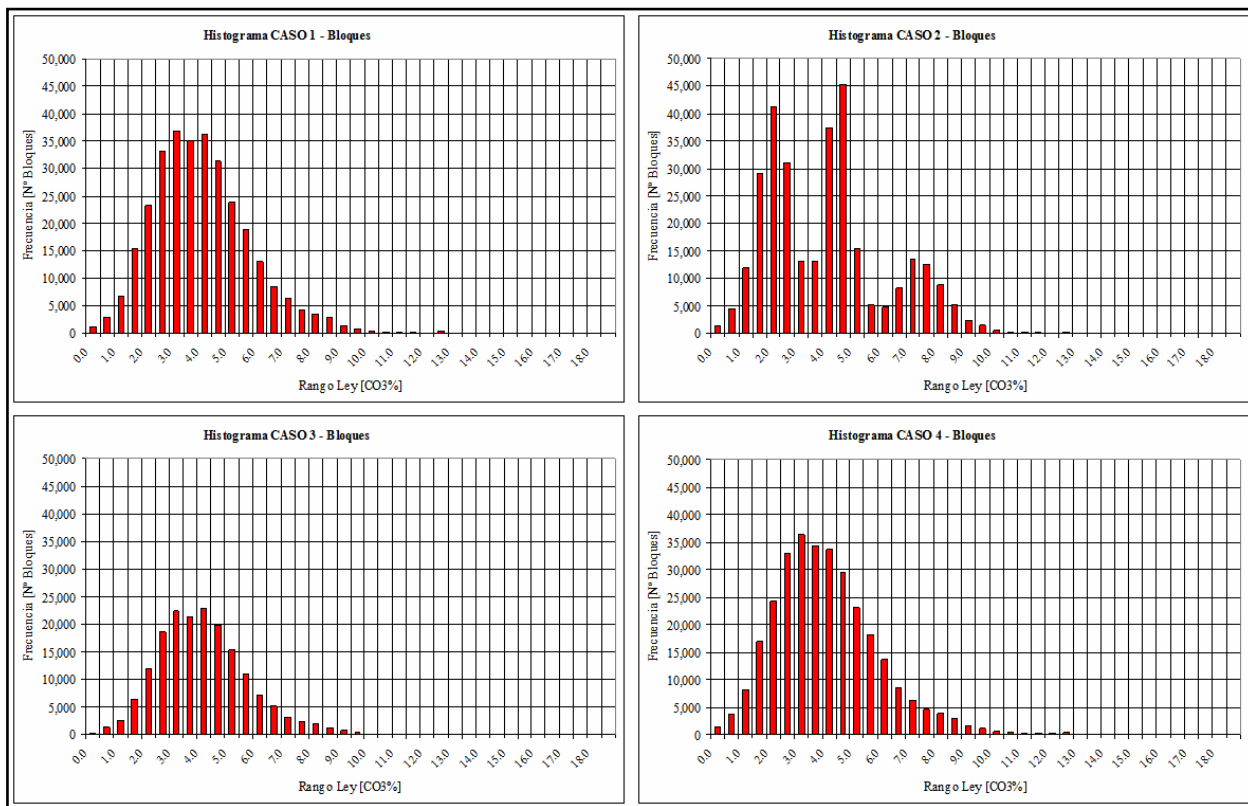


Figura: 29: Histogramas de los bloques estimados para cada caso de estimación.

Bloques	CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
Ley de Corte CO ₃ [%]	Tonelaje [kt]	Ley CO ₃ [%]	Tonelaje [kt]	Ley CO ₃ [%]	Tonelaje [kt]	Ley CO ₃ [%]	Tonelaje [kt]	Ley CO ₃ [%]
>=6.0	12,395	7.3	17,410	7.8	6,287	7.2	13,179	7.4
>=3.5	55,372	5.2	51,661	5.7	31,254	5.1	54,214	5.3
Total	90,423	4.2	90,423	4.2	48,960	4.2	90,423	4.2

Tabla 28: Tonelajes y leyes de CO₃ para cada caso.

En las curvas Tonelaje-Ley de la figura 30 se observa que la tendencia de los casos 1 y 4 es prácticamente la misma. En el caso 2, la curva presenta dos singularidades, con tonelajes similares para distintas leyes, en las vecindades de los límites de las poblaciones. El caso 3, tal como era de esperar, presenta valores menores.

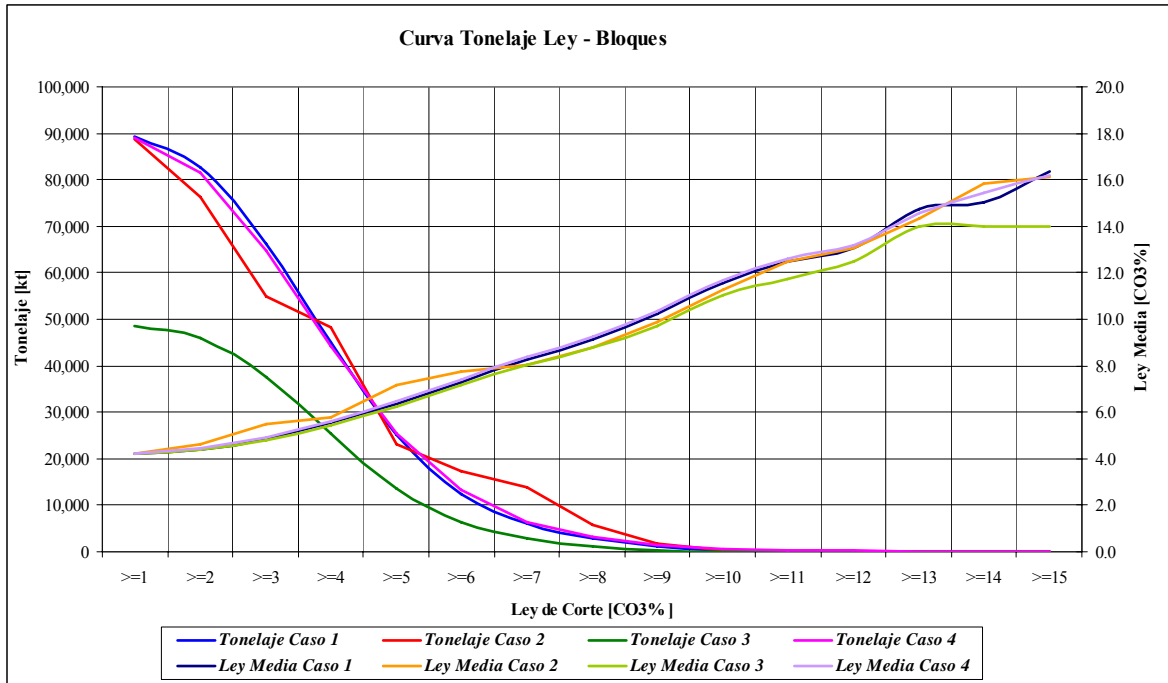


Figura 30: Curvas Tonelaje-Ley para los distintos casos de estimación.

IV.3.5.5.2 Validación gráfica

La validación gráfica puede ser controlada tanto en secciones como en plantas, en las cuales se van comparando los valores de los compósitos con los de los bloques estimados, y lógicamente se espera que sean similares. En este caso, la validación se hizo a través de secciones y los resultados son consistentes para los 4 casos. En la figura 31 se presenta la sección 233NW a modo de ejemplo. La totalidad de las secciones están incluidas en el anexo C.

IV.3.5.5.3 Validación por derivas

Las derivas corresponden a gráficos de variación de la ley en el espacio. Se realizaron para cada caso, derivas en 3 direcciones, Norte-Sur, Oeste-Este y en la vertical. Las tendencias de

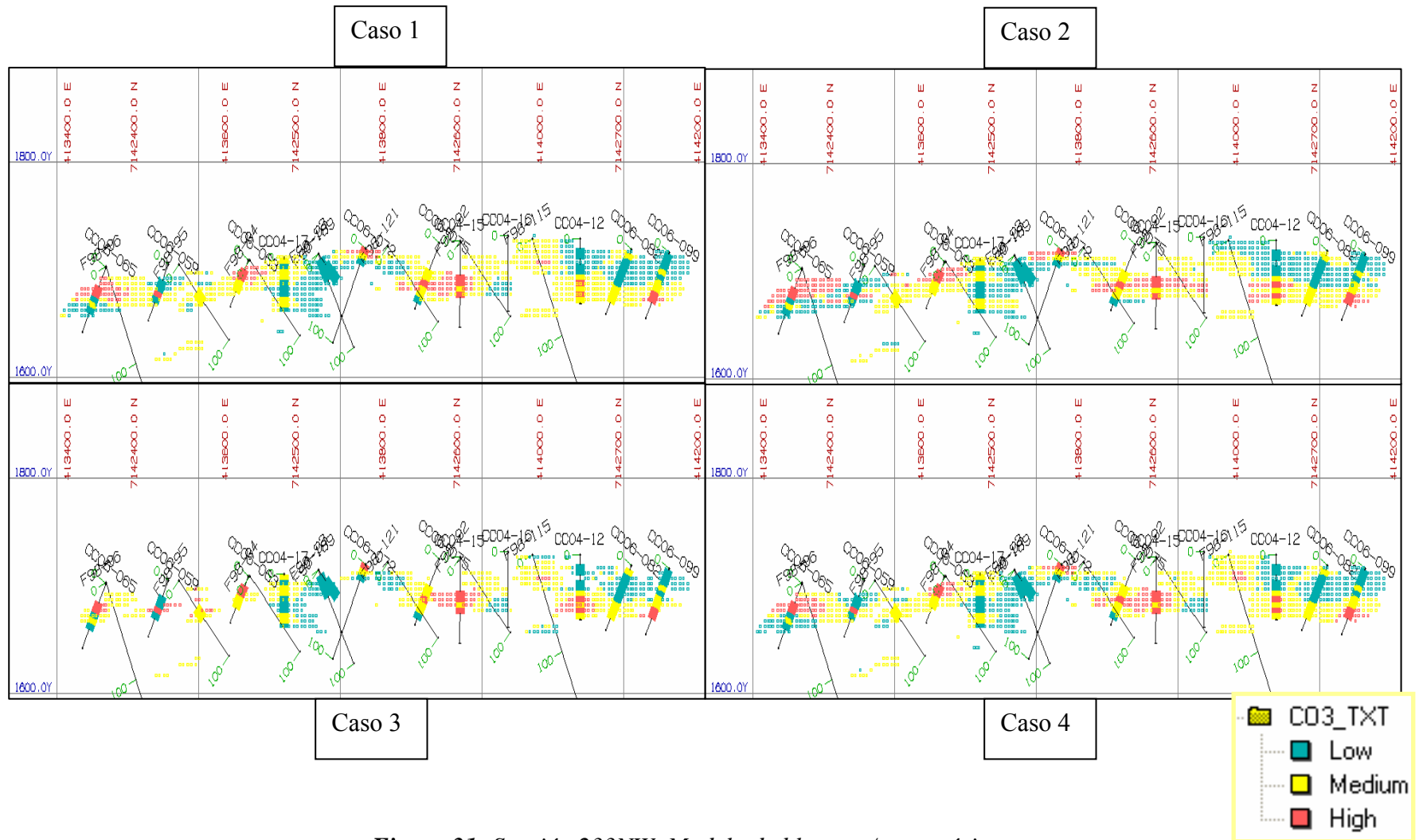


Figura 31: Sección 233NW, Modelo de bloque v/s compósitos.

ley de los compósitos y de los bloques deben ser similares en el espacio para ser válidas. En las figuras 32 a y b se presentan las derivas de los 4 casos. Para los casos 1, 2 y 3, las derivas de los bloques estimados son bastante similares a la de los compósitos, con una tendencia levemente más suave. Coincidentemente para cada caso, las mayores discrepancias en las derivas se observan en las de dirección norte, posiblemente por una cantidad muy baja de muestras al momento de realizar la estimación. El caso 4 (Inverso a la distancia) generalmente presenta una tendencia muy similar a la de los compósitos. Sin embargo, la deriva en dirección este presenta una tendencia diametralmente opuesta en el extremo oeste. Esto también se debe a una cantidad de muestras muy bajas para realizar la estimación. Además, estos puntos representan los márgenes occidentales del depósito, y el método del inverso a la distancia funciona muy bien como interpolador pero es bastante errático como extrapolador. De todas formas, el método de kriging también presenta este defecto, y posiblemente la diferencia en las tendencias se deba principalmente a un bajo número de muestras.

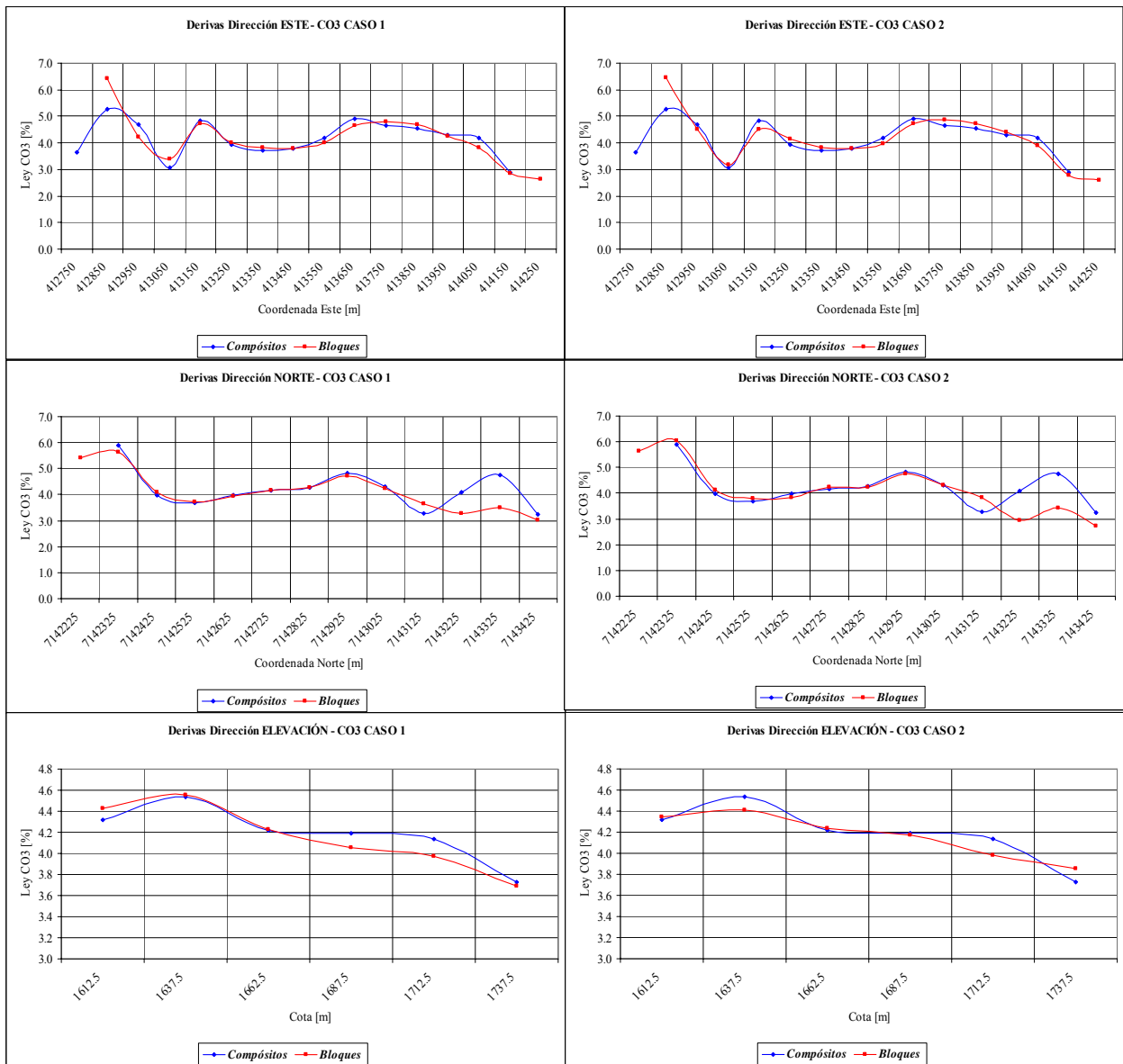


Figura 32 a: Derivas de los bloques estimados vs derivas de los compósitos (Casos 1 y 2).

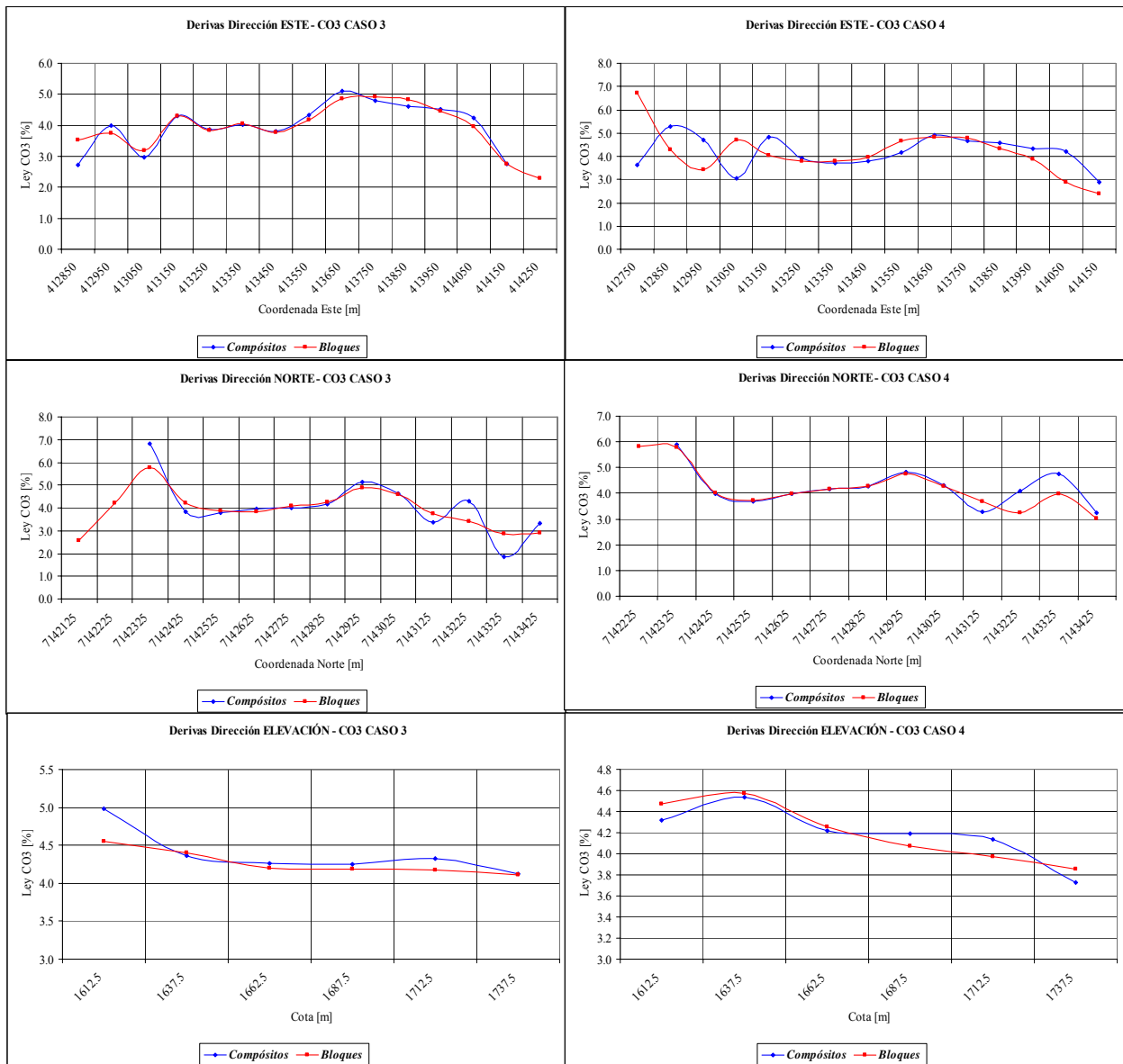


Figura 32 b: Derivas de los bloques estimados vs derivas de los compósitos (Casos 3 y 4).

IV.4. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN

Durante el año 2007 se realizó una campaña de sondajes en el depósito de cobre Frankenstein. En total se perforaron 28915 m, correspondientes a 349 sondajes de aire reverso. Los análisis químicos de las muestras fueron obtenidos con posterioridad a la realización del modelo geológico de carbonatos presentado en este trabajo, y por lo tanto no fueron incluidos. Sin embargo fueron utilizados para realizar una estimación de carbonatos utilizando el método del inverso a la distancia, sin restricción en el espacio, que llamaremos “Modelo 2007”. Debido a que esta estimación presenta una densidad de datos bastante mayor (6416 compósitos de CO₃) a la que se tenía cuando se realizaron las estimaciones de los cuatro casos presentados en el punto IV.3., consideramos este caso como la “norma” o “referencia” para ser comparada con los casos estudiados en este informe.

Mencionamos que esta estimación se realizó sin restricción de espacio, por lo tanto el número de bloques estimados es significativamente mayor al número de bloques estimados en los distintos casos antes presentados. Sin embargo, para estudiar las similitudes o diferencias de los distintos casos con la estimación “norma” se compararon los bloques estimados dentro de los espacios comunes. Para los casos 1, 2 y 4 se compararon los bloques estimados dentro del espacio del modelo geológico de carbonatos, mientras que para el caso 3 se compararon los bloques estimados dentro del espacio del modelo geológico de cobre 2006.

IV.4.1. Comparación estadística

En las tabla 29 y 30, podemos observar que las estadísticas básicas de los 4 casos estudiados son bastante similares a las del caso que considera los datos del 2007. Esto es cierto para todos los parámetros excepto en el valor máximo, cuyo valor es significativamente mayor para la nueva estimación (47.15 vs 18.45 y 14.02 % CO₃). A pesar de esto el valor de la media es un poco menor en este último caso.

Bloques	2007	Caso 1	Caso 2	Caso 4
Nº Bloques	306,397	306,397	306,397	306,397
Mín [%]	0.16	0.14	0.14	0.14
Máx [%]	47.15	18.45	18.45	18.45
Media [%]	4.08	4.16	4.16	4.15
σ [%]	1.77	1.76	2.15	1.85
σ^2 [% ²]	3.15	3.10	4.61	3.42
CV	0.44	0.42	0.52	0.45

Tabla 29: Estadísticas básicas de los casos 1, 2 y 4 en relación a la estimación 2007.

Bloques	2007	Caso 3
Nº Bloques	175,373	175,373
Mín [%]	0.21	0.14
Máx [%]	47.15	14.02
Media [%]	4.14	4.21
σ [%]	1.77	1.61
σ^2 [% ²]	3.13	2.58
CV	0.43	0.38

Tabla 30: Estadísticas básicas del caso 3 en relación a la estimación 2007.

En cuanto a la distribución de leyes de los bloques estimados a partir de cada caso, podemos observar que para los casos 1 y 4, esta se aproxima satisfactoriamente a la distribución obtenida a partir del Modelo 2007, siguiendo una tendencia aproximadamente log-normal (Figura 33). Para el caso 2, tal como se discutió en el punto IV.3.5.5.1, se tienen tres distribuciones consecutivas con tendencia aproximada log-normal, debido a la separación arbitraria en

poblaciones, y por lo tanto la distribución de este caso no se asemeja en nada a la del Modelo 2007. El caso 3, al igual que los casos 1 y 4 presenta una distribución aproximada log-normal, con frecuencias máximas y tendencias similares a las que se observan para el Modelo 2007 (Figura 34).

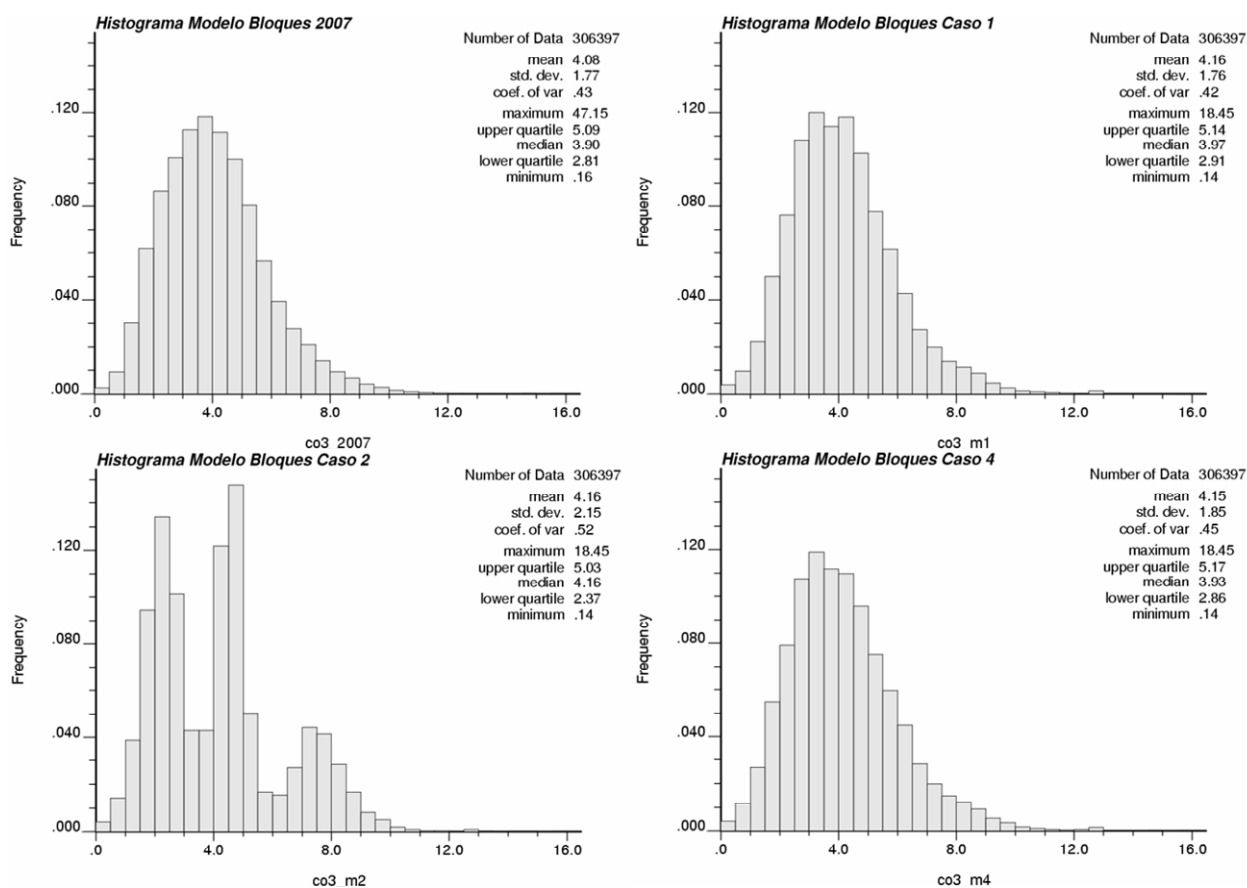


Figura 33: Histogramas de los bloques estimados en el espacio del modelo geológico de carbonatos, para los casos 1, 2, 4 y Modelo 2007.

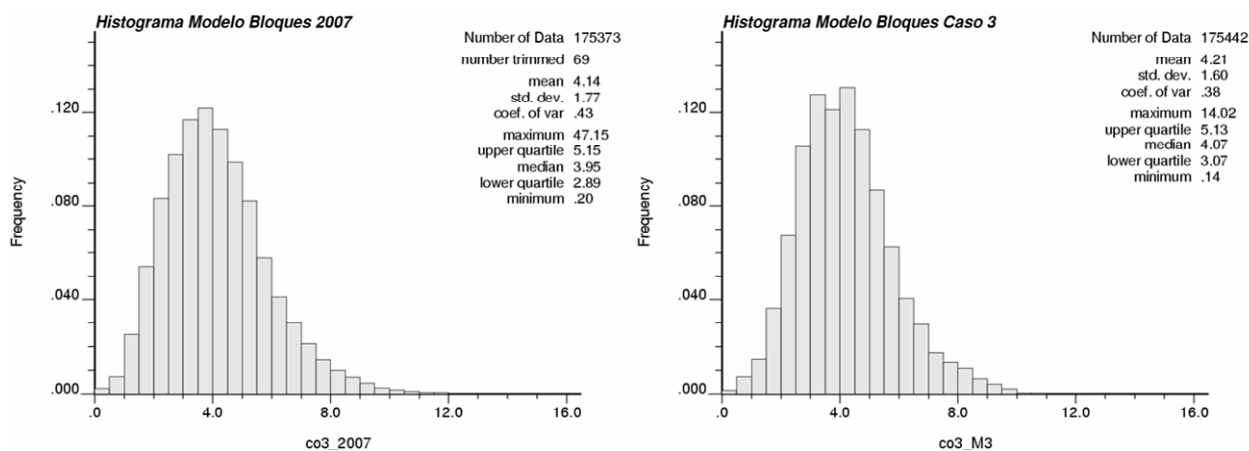


Figura 34: Histogramas de los bloques estimados en el espacio del modelo geológico de cobre 2006, para el caso 3 y Modelo 2007.

IV.4.2. Comparación por derivas

Respecto a las derivas, podemos observar en la figura 35 que las de los casos 1 y 4 son las más similares a las del Modelo 2007, excepto en los bordes donde los métodos de estimación presentan mayores errores al extrapolar con pocos datos. A su vez, el caso 3 presenta las derivas que más se alejan de las del Modelo 2007. Es interesante destacar como cada uno de estos criterios es complementario con los demás. Si nuestro único punto de comparación fuesen las derivas, podríamos concluir que el caso 2 se acerca bastante al Modelo 2007. Sin embargo, ya vimos que en relación a los histogramas, tal semejanza no existe. Además podemos ver que las derivas del Modelo 2007 son más irregulares. Esto se debe que al tener un número de datos mucho mayor al momento de estimar no se suaviza tanto como en los demás casos.

IV.4.3. Comparación bloque a bloque

En la figura 36 se presentan los gráficos de dispersión de cada uno de los 4 casos en relación al Modelo 2007. Esto corresponde a la comparación bloque a bloque, de los valores estimados en cada caso con el valor estimado en el Modelo 2007. Resulta evidente la fuerte dispersión existente para cada caso. Sin lugar a dudas que el caso 2 presenta la mayor nube de puntos y una línea de tendencia que se aleja considerablemente de la recta $y = x$. Al igual que en los otros criterios de comparación, los casos 1 y 4 se asemejan bastante entre sí, y aunque presentan una dispersión evidente con el Modelo 2007, sus resultados son bastante más satisfactorios que para el caso 2. A diferencia de la comparación por derivas, el caso 3 es el que presenta una menor dispersión en relación al modelo 2007.

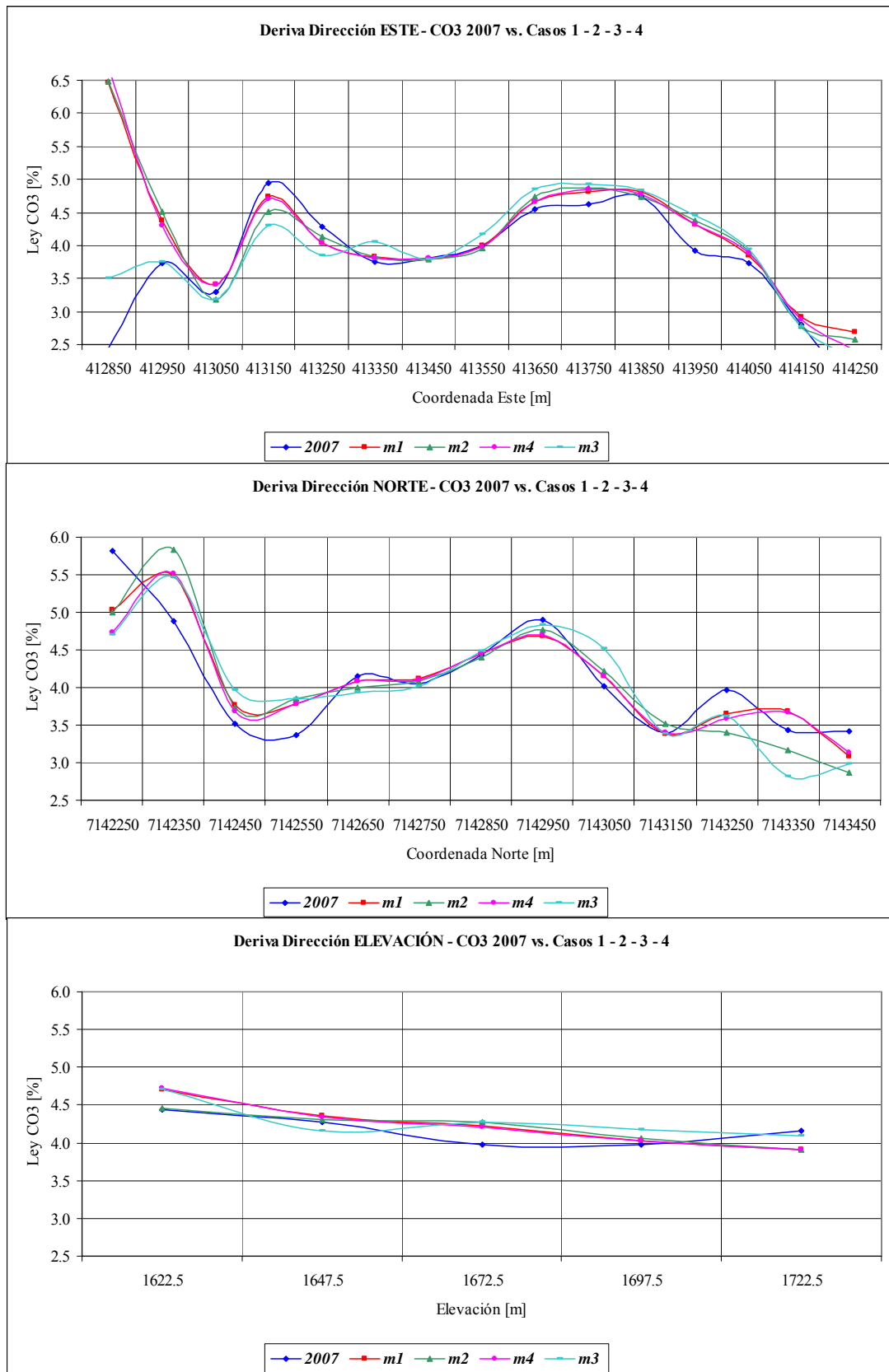


Figura 35: Derivas de los casos 1, 2, 3 y 4, y del Modelo 2007 en las distintas direcciones.

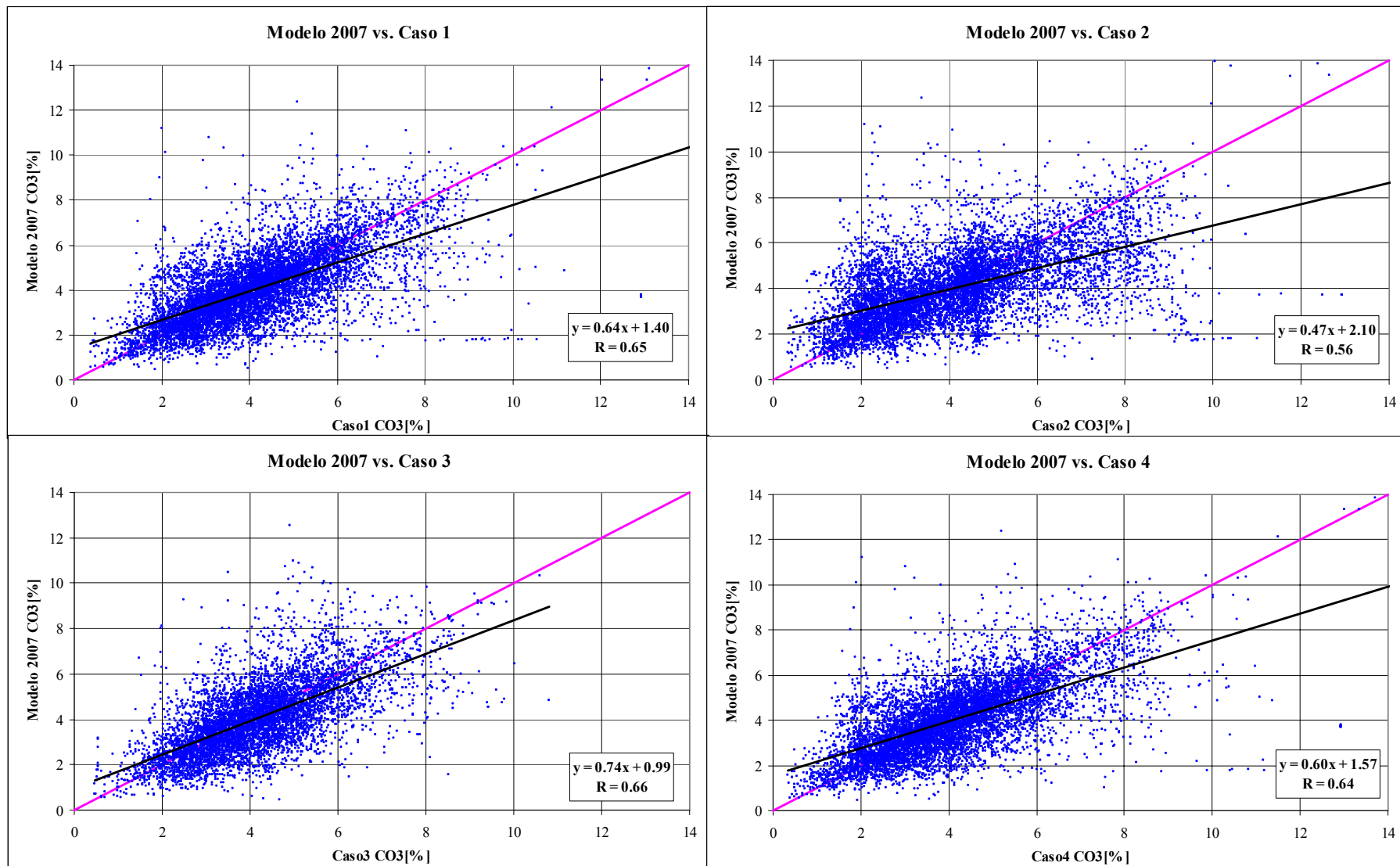


Figura 36: Gráficos de dispersión para los distintos casos en relación al Modelo 2007.

V. CONSUMO DE ÁCIDO Y CONTENIDOS DE CARBONATOS

V.1. INTRODUCCIÓN

Durante los procesos de lixiviación en pilas existen distintas variables que inciden en el consumo de ácido. Por un lado existen factores técnicos, tales como la concentración del ácido o la altura de la pila, y por otro lado existen factores mineralógicos. Dentro de estos últimos, sin duda que la presencia de calcita, y de carbonatos en general, es la que produce un mayor impacto en el consumo de ácido. Sin embargo, también existen otros factores mineralógicos, que comúnmente no son considerados o estudiados, y que, aunque secundario, juegan un rol que puede llegar a ser importante en el consumo de ácido.

Jansen y Taylor (2003) realizaron un estudio general acerca de los efectos de la mineralogía de ganga en el consumo de ácido, durante la lixiviación de pilas. Allí señalan, entre otras cosas, que:

- Las limonitas consumen ácido por rotura de sus enlaces liberando iones férricos a la solución ácida (*e.g.* rotura de la goetita).
- Los silicatos consumen ácido por rotura de enlaces liberando un rango amplio de iones a la solución ácida (*e.g.* K Feldespato, Na Feldespato, Ca Plagioclasa y Biotita se descomponen en ácido orto-silíceo, H_4SiO_4 , y en distintos cationes metálicos tales como Na^+ , K^+ , Al^{+3} , Ca^{+2} , Fe^{+2} , Fe^{+3} y Mg^{+2}).
- Minerales de silicato originales pueden consumir ácido formando minerales de silicatos de alteración (*e.g.* alteración de plagioclasa a yeso y pirofilita).
- Minerales de arcillas (montmorillonita principalmente) y óxidos de hierros hidratados pueden consumir ácido por adsorción.

Por otra parte, basándose en pruebas de consumos de ácido realizadas por Compañía Minera Centenario Copper en 269 muestras de Frankenstein, tanto de sondajes como de desmontes, se llegó a la siguiente relación lineal entre consumo de ácido y contenido de carbonatos:

$$\text{Net AC [kg/t]} = 31.997 + 13.959 * \text{CO}_3[\text{wt\%}].$$

A pesar de lo consistente que aparece esta relación ($r^2=0.896$) se observa una mayor dispersión para valores bajos de CO_3 (Figura 37).

Además se obtuvieron los valores de consumo de ácido y los contenidos de carbonatos de 12 muestras de rechazos de columnas. Estos rechazos se graficaron con el resto de las muestras antes mencionadas (Figura 38). Se pueden observar algunas diferencias considerables entre los valores de consumo de ácido neto, obtenidos a partir de las pruebas y de los valores estimados en relación a los contenidos de CO_3 (ver también Tabla 31). La mayoría de estas muestras presentan valores de consumo de ácido reales mayores a los estimados (están sobre la línea de tendencia). Así, si incluimos estos datos, la nueva relación lineal que se obtiene entre consumo de ácido y contenido de carbonatos está dada por (Figura 39):

$$\text{Net AC [Kg/t]} = 34.79 + 13.977 * \text{CO}_3[\text{wt\%}].$$

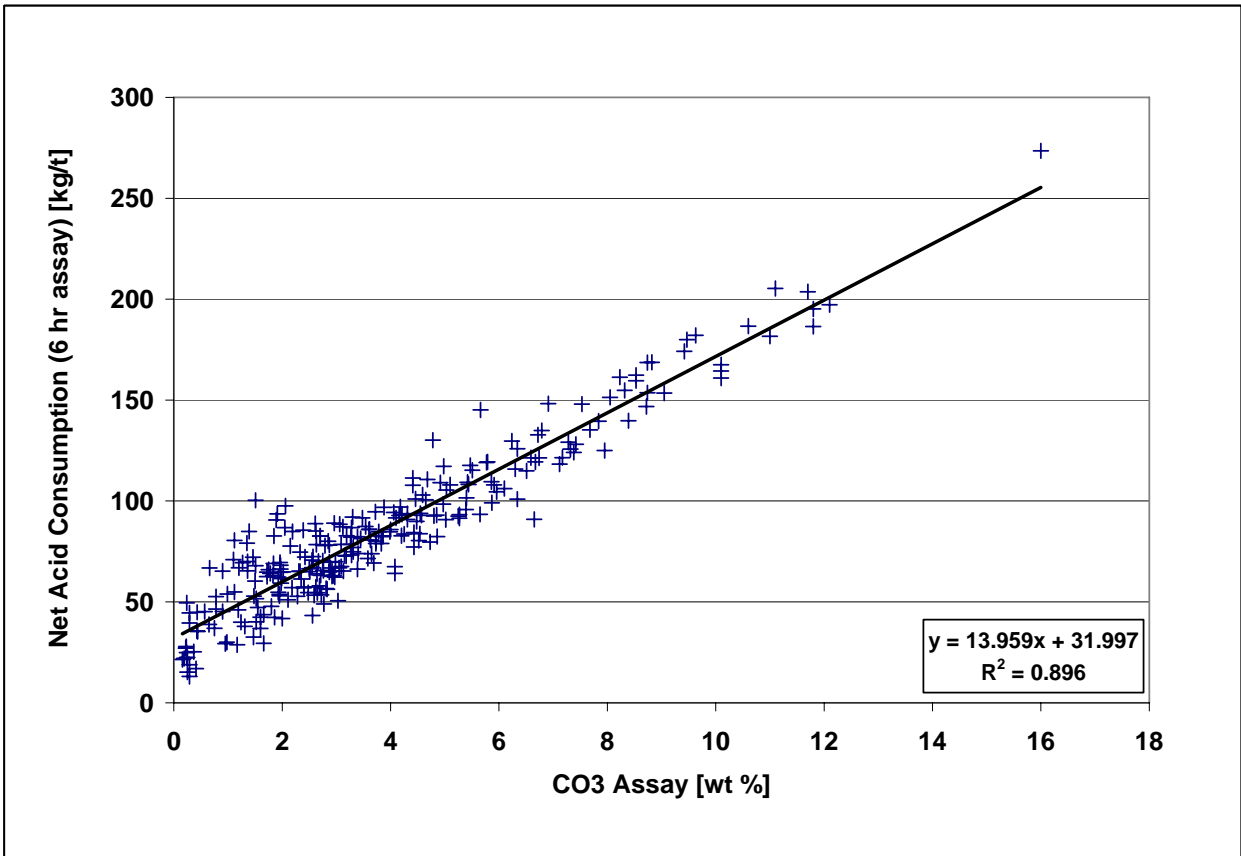


Figura 37: *Correlación entre Consumo de ácido y Carbonatos (muestras antiguas).*

Muestra	Tipo de Muestra	Procedencia	CuT (%)	CuS (%)	Solubilidad	CO3 (%)	Consumo de ácido después de 6 hrs.			Diferencia entre consumo de ácido medido y estimado (Kg/Ton)
							Bruto (Kg/Ton)	Neto (Kg/Ton)	Neto Estimado (Kg/Ton, por contenido de CO3)	
M-1	Oxido	Pique Santa Isabel, Área La Plata, 25m de profundidad.	1.36	1.31	0.96	2.14	89.00	68.83	61.87	6.96
M-2	Oxido	Pique Santa Isabel, Área La Plata, 25m de profundidad.	1.51	1.46	0.97	2.87	97.00	74.52	72.06	2.46
M-3	Sulfuro	Pique El Toro, 115 m de profundidad.	4.97	0.33	0.07	3.85	111.00	105.92	85.74	20.18
M-4	Sulfuro	Pique El Toro, 115 m de profundidad.	1.33	0.11	0.08	4.13	116.00	114.31	89.65	24.66
M-5	Mixto	Pique 3, SE de Franke, 80 m de profundidad.	4.31	1.42	0.33	1.09	73.00	51.13	47.21	3.92
M-6	Mixto	Pique 3, SE de Franke, 80 m de profundidad.	4.34	1.43	0.33	1.08	91.00	68.98	47.07	21.91
M-7	Mixto	SE de Franke, 80 m de profundidad.	4.58	3.60	0.79	1.72	116.00	60.56	56.01	4.55
M-8	Oxido	Pique El Flaco, Área central de Franke, 25 m de profundidad.	3.76	3.46	0.92	2.44	101.00	47.72	66.06	-18.34
M-9	Oxido	Pique El Flaco, Área central de Franke, 25 m de profundidad.	1.13	1.00	0.88	2.02	89.00	73.60	60.19	13.41
M-10	Oxido	Pique Las Animas, 25 m de profundidad.	3.14	2.98	0.95	3.08	113.00	67.11	74.99	-7.88
M-11	Oxido	Pique Las Animas, 25 m de profundidad.	0.63	0.51	0.81	5.81	146.00	138.15	113.10	25.05
Carga 11	Oxido	Pique 4, Área central de Franke, 6-7 m de profundidad.	0.97	0.79	0.81	2.00	97.70	85.53	59.92	25.62

Tabla 31: Información de las muestras.

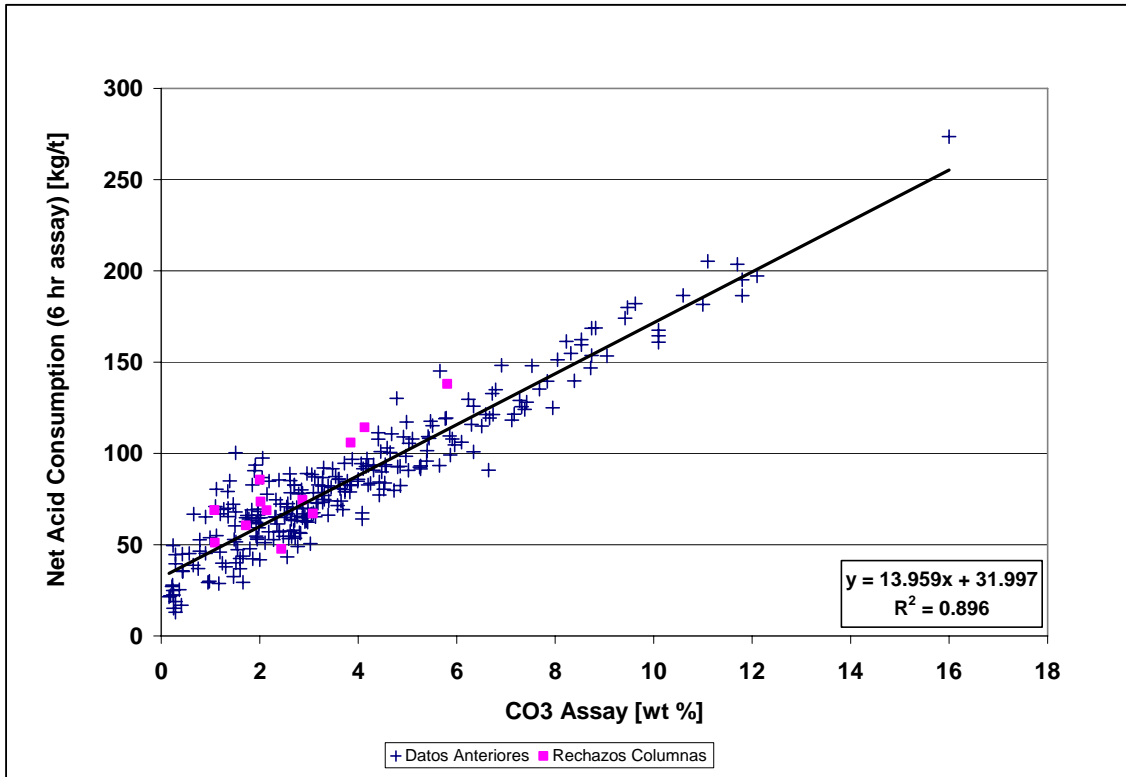


Figura 38: Correlación entre Consumo de ácido y Carbonatos (muestras antiguas vs columnas).

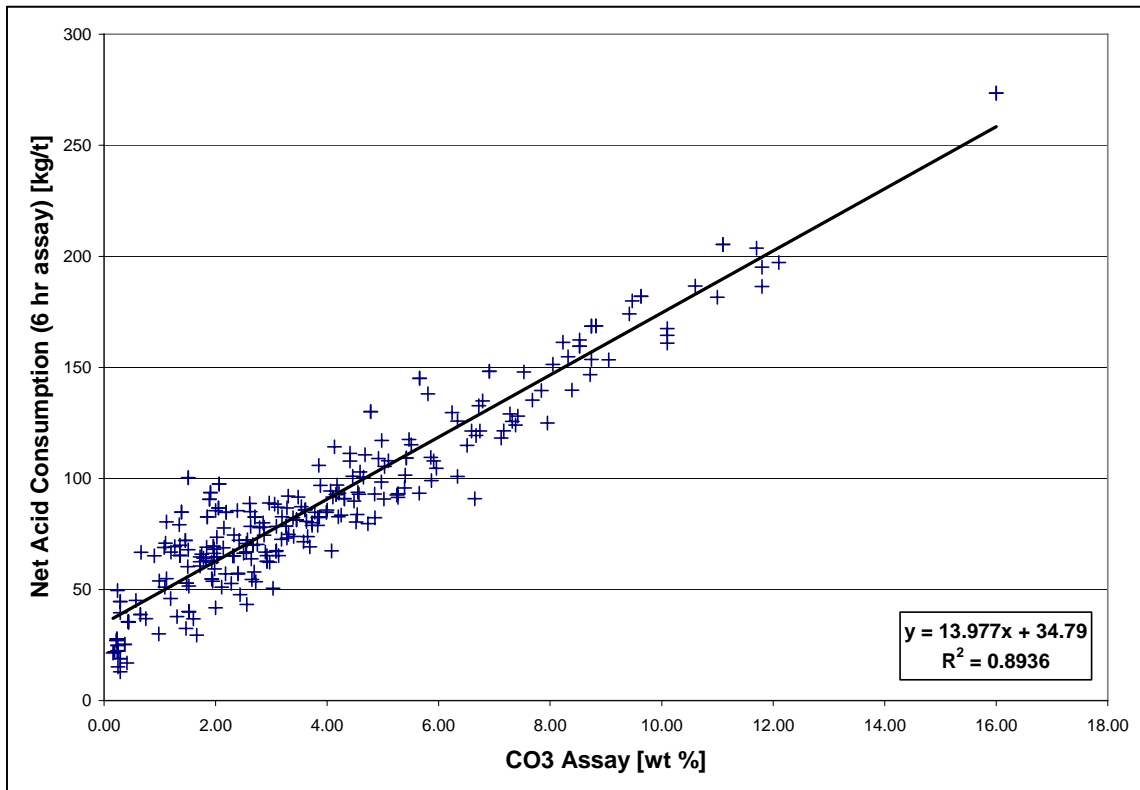


Figura 39: Correlación entre Consumo de ácido y Carbonatos (totalidad de muestras).

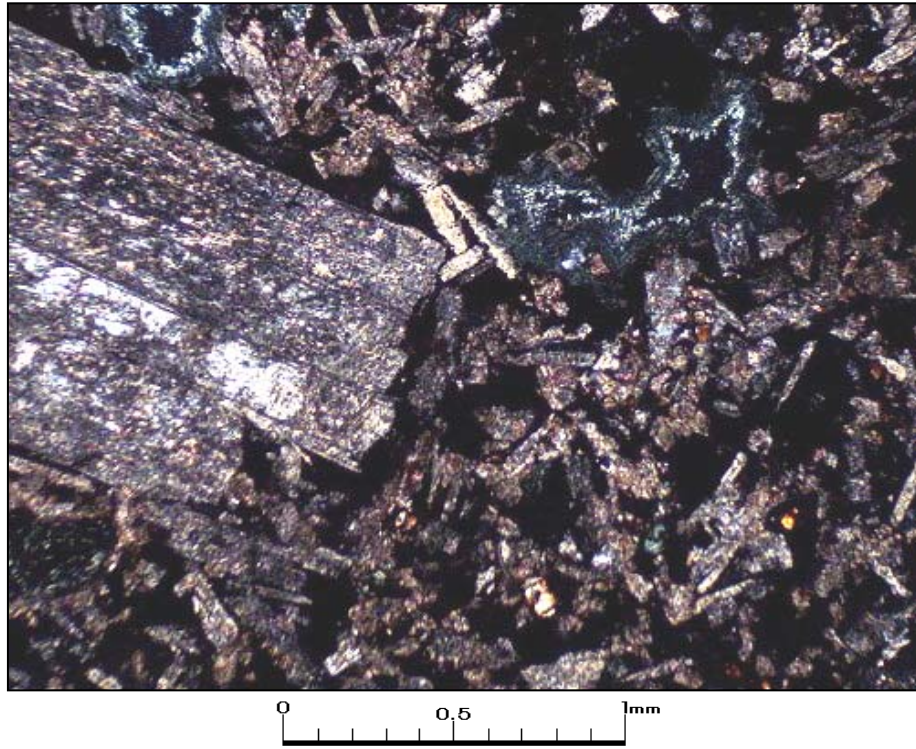
Con estos antecedentes, se realizó un análisis mineralógico de los 12 rechazos de columnas con el objetivo de determinar los orígenes de la dispersión observada en estos gráficos.

Para determinar características comunes en relación al consumo de ácido, agruparemos estas 12 muestras en 4 conjuntos:

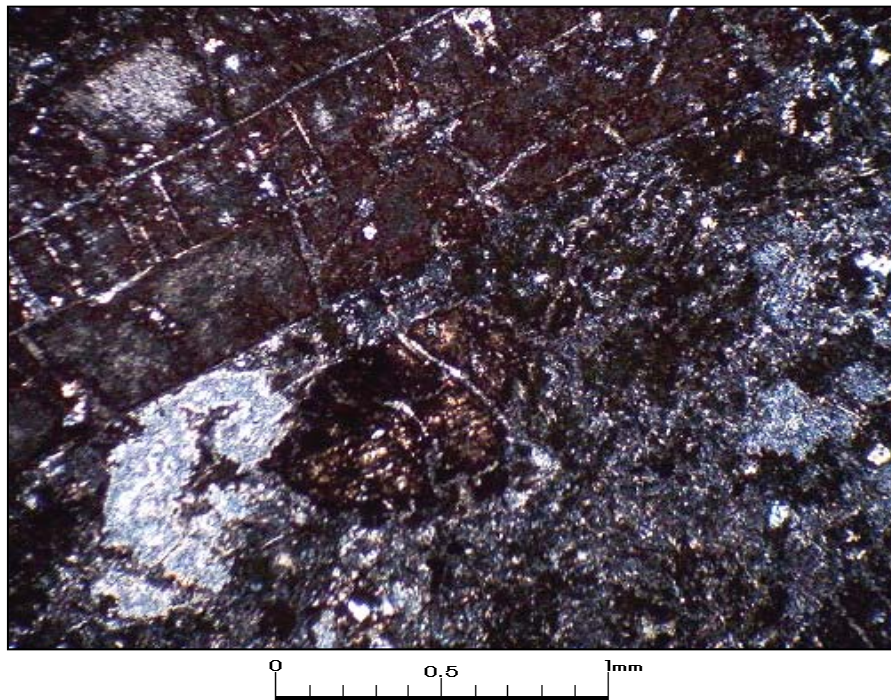
- Las muestras M-5 y M-8 que son las que consumen menos ácido
- Las muestras M-1, M-6, M-7 y M-10 con un consumo de ácido intermedio (alto en lo absoluto, término en relación a las otras muestras)
- Las muestras M-2, M-9 y Carga 11 con un consumo de ácido alto.
- Las muestras M-3, M-4 y M-11 que presentan los mayores consumos de ácido.

V.2. Análisis de descripciones petrográficas y mineralógicas

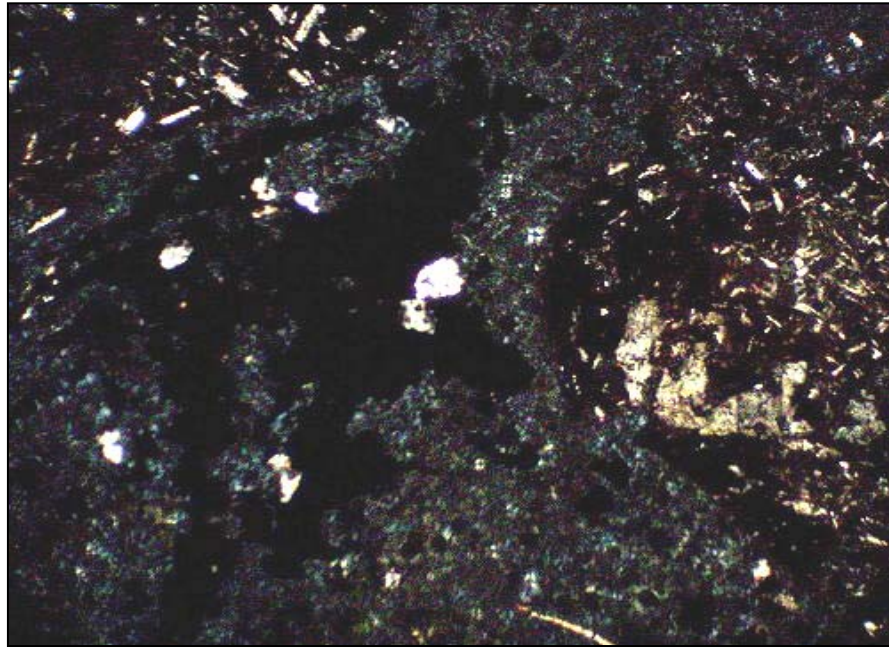
En general no fue posible determinar características comunes entre las distintas muestras que puedan evidenciar el porque de los valores de consumo de ácido, más allá de sus contenidos de carbonatos. De las 12 muestras descritas (Anexo D), 7 corresponden a andesitas porfídicas, con presencia de amígdalas en algunos casos (Microfotografía 1), 4 a tobas de cristales cineríticas (Microfotografía 2) y la restante corresponde a una brecha de clorita-hematita (Microfotografía 3). Respecto a la mineralización de cobre (Anexo D), las muestras provenientes de zonas de óxido presentan básicamente crisocola y malaquita (Microfotografía 4), menor wad y eventualmente brochantita, atacamita así como remanentes de sulfuros (Microfotografía 5); las de mixto presentan calcosina, malaquita y menor crisocola (Microfotografía 6); mientras que las de sulfuro presentan calcosina comúnmente intercrecida con digenita y con trazas de bornita, covelina y calcopirita (Microfotografía 7). Cabe destacar también que la muestra M-11 presenta trazas de oro en laminillas y la muestra M-8 presenta plata nativa.



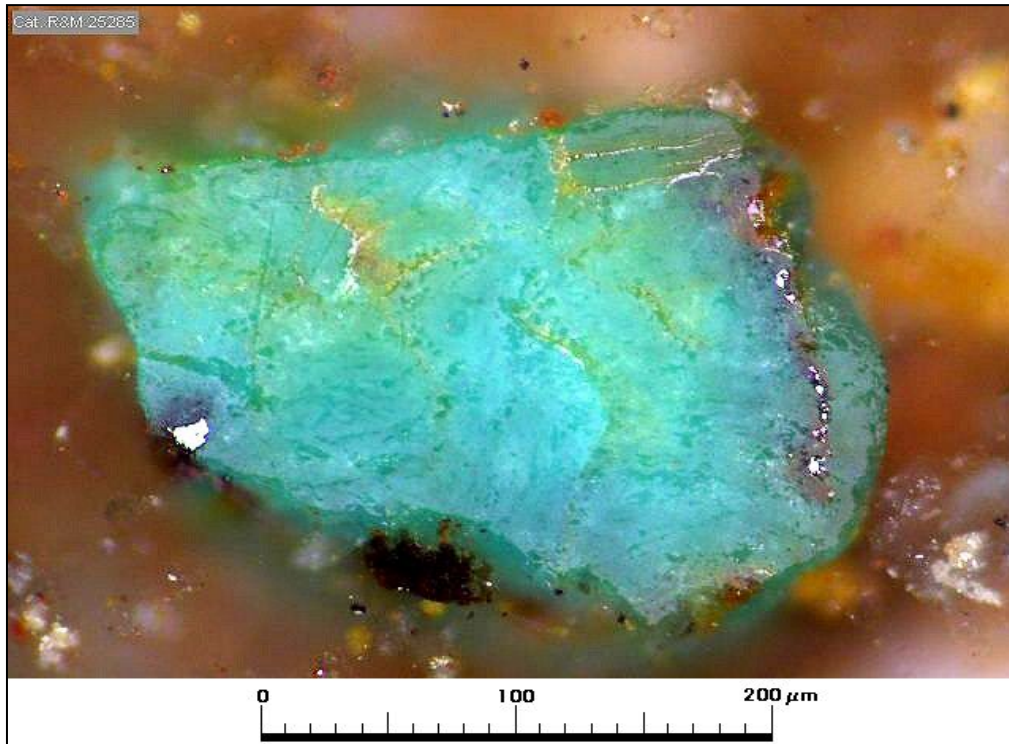
Microfotografía 1: *Andesita porfídica amigdaloidal con masa fundamental intergranular (muestra M-3, Aumento 5X10, Nícoles cruzados).*



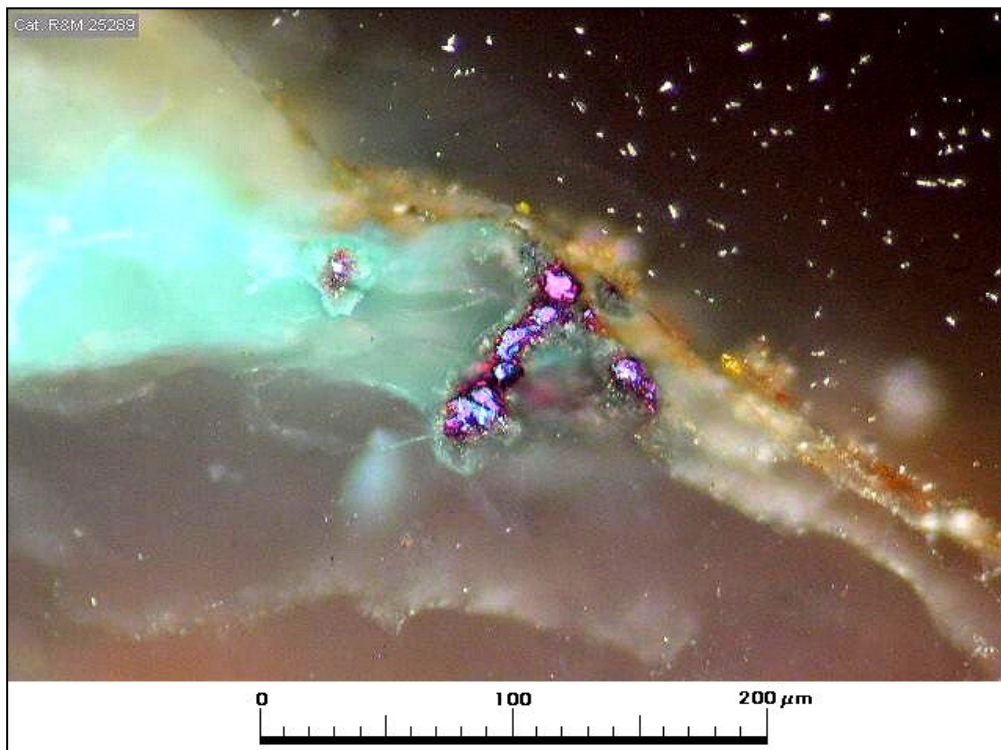
Microfotografía 2: *Toba de cristales con fragmentos de plagioclasa en matriz cinerítica parcialmente argilizada (muestra M-8, Aumento 5X10, Nícoles cruzados).*



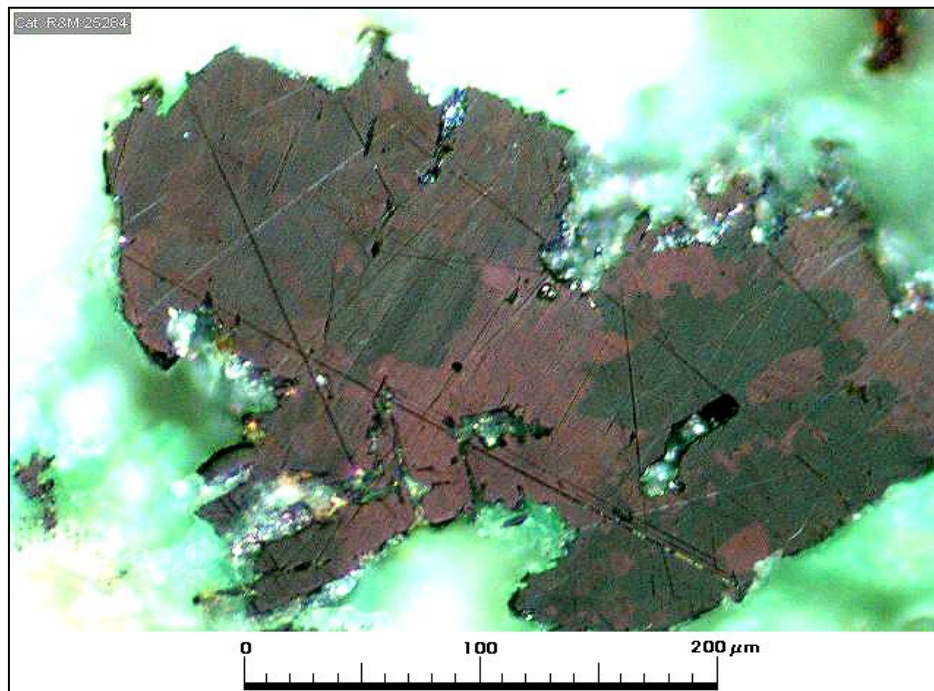
Microfotografía 3: Brecha con fragmentos de andesita en matriz de clorita y opacos (muestra M-6, Aumento 5X10, Nicoles cruzados).



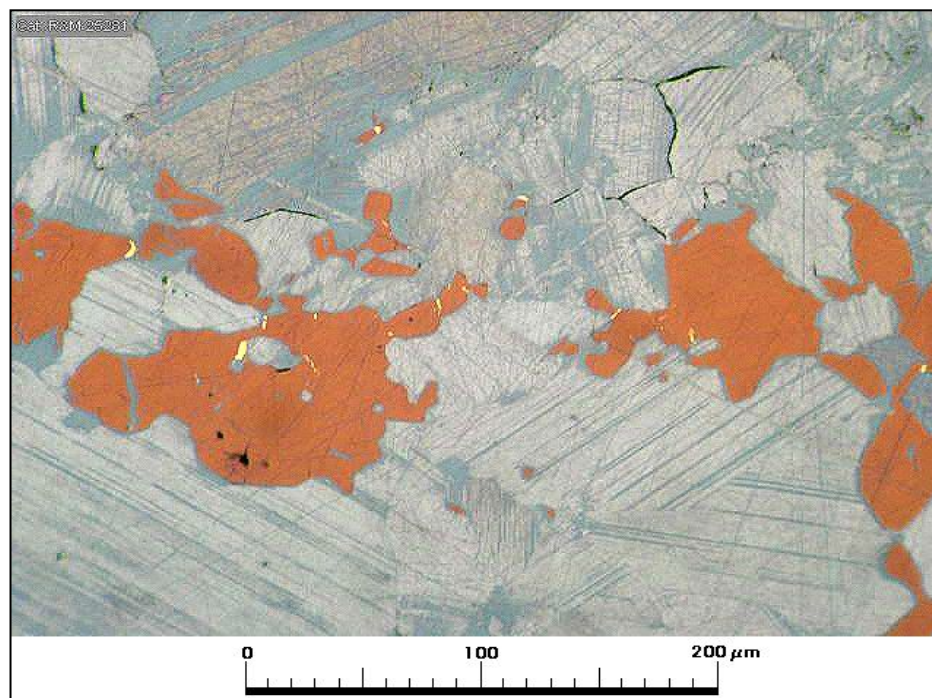
Microfotografía 4: grano de crisocola y malaquita con remanentes de hematita especular (Muestra M-8, Aumento 32X10, Nicoles paralelos).



Microfotografía 5: vetilla de cuarzo con crisocola y remanentes de covelina (Muestra Carga 11, Aumento 32X10, Nicoles paralelos).



Microfotografía 6: grano anhedral de calcosina relleno vesícula junto con ganga impregnada con malaquita (muestra M-7, Aumento 32X10, Nicoles cruzados).



Microfotografía 7: asociación mineralógica hipógena formada por bornita con escasas exsoluciones de calcopirita y por un complejo entrecrecimiento lamelar entre calcosina y digenita (muestra M-4, Aumento 32X10; Nicoles paralelos).

A continuación se presentan las características petrográficas y mineralógicas de las distintas muestras, agrupadas según las categorías mencionadas en el punto anterior.

V.2.1. Muestras con bajo consumo de ácido (M-5 y M-8)

Estas dos muestras tienen consumos netos de ácidos, después de 6 horas, que van de aproximadamente 48 a 51 Kg/Ton. No presentan características petrográficas comunes evidentes. Mientras la muestra M-5 corresponde a una andesita amigdaloidal porfídica con masa fundamental intergranular, la muestra M-8 ha sido descrita como una toba de cristales volcanoclástica, con matriz cinerítica parcialmente alterada a montmorillonita (Anexo D).

En cuanto a las especies que consumen ácido, en la muestra M-5 se identificaron feldespatos ricos en Ca (An_{35}) y cloritas, mientras que en la muestra M-8 se identificaron Feldespatos con Ca alto a moderado (An_{28}), abundante montmorillonita (20% de la muestra) y presencia de calcita, principal consumidor de ácido.

V.2.2. Muestras con consumo de ácido intermedio (M-1, M-6, M-7, M-10)

Estas muestras presentan valores de consumo de ácido que varían de 60 a 70 kg/Ton. Litológicamente, han sido clasificadas como:

- M-1: Andesita porfídica con, masa fundamental intergranular. Presenta una fuerte alteración a sericita y leucóxeno.
- M-6: Brecha de clorita-hematita

- M-7: Andesita porfídica con masa fundamental microlítica afieltrada, parcialmente brechizada.
- M-10: Toba de cristales, con matriz cinerítica, parcialmente hematitizada.

En cuanto a los minerales que consumen ácido se resumen como:

- M-1: abundante montmorillonita.
- M-6: entre 15 y 20% de la muestra corresponde a clorita.
- M-7: presencia de clorita, montmorillonita y calcita, que en conjunto representan cerca del 10% de la muestra.
- M-10: calcita y montmorillonita (aproximadamente 10% de la muestra).

V.2.3. Muestras con consumo de ácido alto (M-2, M-9, Carga 11)

Estas muestras presentan valores de consumo de ácido neto que varían de aproximadamente 75 a 85 kg/Ton. Corresponden a:

- M-2: andesita porfídica con masa fundamental intergranular, con fuerte alteración a sericita y con impregnaciones de hematina.
- M-9: toba de cristales, con matriz cinerítica, fuertemente hematitizada.
- Carga 11: toba fina de cristales, con matriz cinerítica parcialmente hematitizada y argilizada.

La mineralogía consumidora de ácido descrita en estas muestras corresponde a:

- M-2: impregnación de carbonatos y alteración a motmorillonita
- M-9: calcita y montmorillonita escasa
- Carga 11: escasa calcita, arcillas abundantes en la matriz (posiblemente montmorillonita, pero el tamaño es muy fino).

V.2.4. Muestras con consumo de ácido muy alto (M-3, M-4, M-11)

Estas muestras corresponden a las que presentan consumos de ácido superiores a los 100 kg/Ton. En este caso, las tres corresponden a andesitas porfídicas con masa fundamental intergranular. Las dos primeras son amigdaloidales mientras que M-11 presenta los minerales máficos alterados a biotita y clorita.

En cuanto a los minerales consumidores de ácido, las 3 muestras presentan carbonatos (de 1 a 5 %) y clorita. La muestra M-3 además presenta cerca de un 15% de limonita mientras que M-11 presenta montmorillonita (2%) y biotita (1%).

V.2.5. Muestras con consumo de ácido neto menor al estimado

Las muestras M-8 y M-10 presentan consumos de ácido neto reales menores a los estimados en relación a sus contenidos de CO₃. En el caso de la muestra M-8 la diferencia es

significativa ya que su consumo real es de 47.72 kg/Ton, mientras que el consumo estimado en relación a su contenido de CO₃ (2.44%) es de 66.06 kg/Ton. Esto resulta particularmente llamativo por el hecho de tener 2% de carbonatos y 20% de montmorillonita. En el caso de la muestra M-10 la diferencia no es tan significativa (real 67.11 kg/Ton vs estimado 74.99) y en este caso también presenta calcita (6%) y montmorillonita (4%).

V.2.6. Muestras con consumo de ácido neto mayor al estimado

De los 12 rechazos de columna, 10 presentan valores de consumo de ácido neto mayores a los valores estimados a partir de los contenidos de CO₃. En algunos caso estas diferencias son menores (M-1, M-2, M-5 y M-7, ver Tabla 31), pero en el resto de las muestras (M-3, M-4, M-6, M-9, M-11 y Carga 11), las diferencias de consumo de ácido son de hasta 25 kg/Ton. Excepto la muestra M-6, el resto corresponden a muestras que anteriormente fueron agrupadas en las categorías de consumo de ácido alto y muy alto. M-6 no presenta ni calcita ni montmorillonita, pero si un alto porcentaje de clorita que podría estar explicando este mayor consumo de ácido. En el resto de las muestras es común la presencia de calcita y de montmorillonita, con contenidos muy variables (de 1 a 5% para la calcita y de 1 a 20 (?) % para la montmorillonita).

V.2.7. Consumo estequiométrico versus consumo real

En la tabla 32 se presentan 3 valores de consumo de ácido para cada muestra, uno estequiométrico, uno real y uno estimado. El consumo de ácido real es el consumo neto que se obtiene directamente de las pruebas de laboratorio después de 6 horas. El estimado es el valor que se esperaría obtener en relación a la regresión lineal obtenida a partir de los gráficos consumo de ácido vs contenido de CO₃. Finalmente el consumo de ácido estequiométrico hace referencia al consumo que se le puede atribuir a los carbonatos según la reacción:



Muestra	CO ₃ %	Consumo Neto H ₂ SO ₄ (Kg/Ton)			Est/Real*100	Est/Estimado*100
		Estequiométrico	Real	Estimado		
M-1	2.14	34.95	68.83	61.87	50.78	56.49
M-2	2.87	46.88	74.52	72.06	62.90	65.05
M-3	3.85	62.88	105.92	85.74	59.37	73.34
M-4	4.13	67.46	114.31	89.65	59.01	75.24
M-5	1.09	17.80	51.13	47.21	34.82	37.71
M-6	1.08	17.64	68.98	47.07	25.57	37.48
M-7	1.72	28.09	60.56	56.01	46.39	50.16
M-8	2.44	39.85	47.72	66.06	83.51	60.33
M-9	2.02	32.99	73.6	60.19	44.83	54.82
M-10	3.08	50.31	67.11	74.99	74.96	67.08
M-11	5.81	94.90	138.15	113.1	68.69	83.91
Carga 11	2.00	32.67	85.53	59.92	38.19	54.52
Promedio					54.09	59.68

Tabla 32: Consumo de ácido total vs consumo de ácido estequiométrico.

Considerando los pesos atómicos de los distintos elementos involucrados en esta reacción, y viendo las razones entre consumo de ácido estequiométrico y los otros tipos de consumo mencionados podemos señalar que en promedio, el CO_3 es responsable del consumo de aproximadamente 50% del total de ácido. Además existen importantes diferencias entre las distintas muestras. Mientras que para la muestra M-8 el carbonato consume más de 80 % del ácido total, para la muestra M-6, el carbonato tan solo consume 25 % del ácido total.

VI. CONCLUSIONES

Respecto al modelo geológico de carbonatos, se pudo observar que la distribución de estos no está directamente asociada a la mineralización de cobre, ni en cuanto al tipo de mena, ni en cuanto a las leyes de cobre. Sin embargo, coinciden en estar controladas principalmente por las estructuras descritas en el área. A pesar de la gran variabilidad que presentan los carbonatos tanto en la horizontal como en la vertical, se observa una mayor continuidad de los cuerpos en las direcciones NW-NNW.

Para realizar la estimación de carbonatos se definieron 4 casos (Tabla 3, p.52). El caso 2 fue el único que consideró diferenciación de poblaciones. Esto condujo a varios problemas. En cuanto a la variografía, cada población quedó representada por un número de muestras muy bajo. Así los variogramas presentaron un efecto pepa muy alto, o simplemente tendieron al efecto pepa puro, situación en la que no son válidos, ya que no existe una relación entre variación de las muestras y distancia. Para los casos 1 y 3, al no diferenciar poblaciones, la situación de los variogramas mejoró bastante, pero aún así el número de muestras resultó ser bajo para determinar con certeza el efecto pepa, o la meseta y alcance en la vertical, por ejemplo. Mientras más variable sea el yacimiento, más muestras son necesarias para realizar su estimación.

En cuanto a los resultados de las distintas estimaciones, se pudo observar que ninguna de ellas presentó sesgo global en relación a los compósitos (la media de los bloques estimados para cada caso es muy cercana a la media de las muestras, Tabla 27, p.81). Ahora bien, respecto a la distribución de leyes de los bloques, la cual debe ser similar a la de los compósitos, se vio que para el caso 2 esta no se asemeja en nada a la de los compósitos. Este error se produce porque la diferenciación de poblaciones fue arbitraria y por lo tanto generó un sesgo condicional al momento de realizar la estimación, tal como se observa en la figura 29 (p.82). Se observa una situación similar en el gráfico tonelaje-ley, donde la curva del caso 2 presenta dos singularidades en las vecindades de los límites de las poblaciones (Figura 30, p.83).

En términos generales, los casos 1 y 4 fueron los que entregaron los resultados más satisfactorios en relación a los compósitos, y los mayores problemas se debieron a una densidad muy baja de datos. En relación al Modelo 2007, la situación es bastante similar. Mientras los casos 2 y 3 presentan discrepancias evidentes con este modelo (respecto a las distribuciones de leyes y a las derivas, Figura 33, p.90 y Figura 35, p.92), los casos 1 y 4 son los más similares, aún cuando presentan ciertas diferencias, principalmente por el número menor de muestras con que se realizaron estas estimaciones (1855 vs 6416 compósitos de CO₃).

Las ventajas de una estimación por Kriging frente a una por inverso a la distancia son las siguientes:

- Es un estimador insesgado.
- Minimiza el error
- Extrapola mejor.
- Estima mejor con pocos datos.

Sin embargo, existen elementos para inclinarnos a elegir el método de inverso a la distancia como el mejor para estimar los carbonatos en este depósito. De partida, el método de kriging suaviza las tendencias de variación. Además ya mencionamos que el efecto pepa es muy alto, por lo que el kriging se hace más parecido al inverso a la distancia. Por último, los carbonatos no son el elemento económico en este depósito; para realizar una estimación por kriging es necesario previamente realizar un modelo geológico que involucra recursos humanos y económicos. Los

resultados de las dos estimaciones son tan similares que no se justifica invertir tiempo en realizar este modelo geológico, más aún cuando ahora se cuenta con una densidad de datos suficientemente alta como para realizar una estimación por inverso a la distancia y cuando el efecto pepa es tan alto como aquí.

Los resultados del estudio petrográfico y mineralógico para determinar las razones de la dispersión en la correlación consumo de ácido-contenido de CO_3 fueron bastante decepcionantes. De todas formas podemos mencionar que los factores mineralógicos que inciden en el consumo de ácido son extremadamente complejos y numerosos. Para llevar un estudio acabado sería necesario determinar con exactitud las especies involucradas y realizar un conteo mineralógico preciso. Sin embargo estos procesos son largos y con costos elevados y aún así con un cierto nivel de incertidumbre. Además requerirían luego un estudio de la distribución de cada uno de estos elementos en el depósito, y ya mencionamos que la relación empírica consumo de ácido-contenido de carbonatos aparece lo suficientemente consistente, con un r^2 de 0.896, por lo que se considera como satisfactoria para estimar un consumo de ácido aproximado.

VII. REFERENCIAS

- Arabasz, W., 1971. Geological and geophysical studies of the Atacama fault zone in northern Chile. *Ph. D. Thesis, Cal. Inst. Techn.*, 264 p., Pasadena.
- Arancibia, G., 2004. Mid-Cretaceous crustal shortening: evidence from a regional-scale ductile shear zone in the Coastal Range of central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 17, p. 209-226.
- Bahlburg, H., Breitzkreuz, C. y Zeil, W., 1987. Paleozoic basin development in northern Chile (21°-27° S). *Geologische Rundschau*, Vol. 76, N° 2, p. 633-646.
- Basso, M., 2004. Carta Baquedano, Región de Antofagasta. *Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)*, Serie Geología Básica, 1:100.000, N° 82, 26 p.
- Beckel, J., 2000. El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile. *Serie Desarrollo Productivo n° 79, Proyecto CEPAL/CIID CAN/99/S47, Una estrategia de desarrollo de clusters (conglomerados) basados en los recursos naturales: el caso de la minería, Santiago de Chile, en prensa.*
- Bell, C.M., 1982. The Lower Paleozoic metasedimentary basement of the Coastal Range of Chile between 25°30' and 27°S. *Revista Geológica de Chile*, N° 17, p. 21-29.
- Berg, K. y Baumann, A., 1985. Plutonic and metasedimentary rocks from the Coastal range of northern Chile. Rb-Sr and U-Pb isotope systematics. *Earth and Planetary Sciences Letters*, Vol. 75, p. 101-115.
- Berg, K., Breitzkreuz, C., Damm, K.-W., Pichowiak, S. y Zeil, W., 1983. The North-Chilean Coast Range- an example for the development of an active continental margin. *Geologische Rundschau*, Vol. 72, p. 715-731.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectonostatigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *En: Moreno, T., Gibbons, W. (eds) The Geology of Chile. The Geological Society, London*, p. 21-114.
- Chong, G., 1973. Reconocimiento geológico del área Catalina, Sierra de Varas y estratigrafía del Jurásico del Profeta, Provincia de Antofagasta. *Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago*, 248 p.
- Chong, G., 1977. Contribution to the knowledge of the Domeyko Range in the Andes of northern Chile. *Geologische Rundschau*, Vol. 66, p. 374-404.
- Dreisinger, D., 2006. Copper leaching from primary sulfides: Options for biological and chemical extraction of copper. *Hydrometallurgy, Volume 83, Issues 1-4, Pages 10-20.*

Emparan, C. y Pineda, G., 2000. Área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo. *Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Santiago, Chile, Mapas Geológicos N° 18, escala 1:100.000.*

Emparan, C y Pineda, G., 2005. Geología del Área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. *Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Santiago, Chile, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, escala 1:100.000, N° 96, 68 p.*

Ferraris, F. y Di Biase, F. 1978. Hoja de Antofagasta, Región de Antofagasta. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, N° 30.*

García, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. *In Simposium sobre el Geosinclinal Andino 1962, Sociedad Geológica de Chile, 138 p.*

GEOVECTRA, 2005. Geologic Resources & Reserves of the Frankenstein – San Guillermo Deposits Antofagasta Region – Chile. *Internal Report.*

Godoy, E. y Lara, L., 1998. Hojas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Santiago, Chile, 1:100.000, N° 5-6.*

Godoy, E. y Lara, L., 1999. Hoja Puerto Flamenco, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Santiago, Chile, 1:100.000, N° 15.*

Gonzalez, F., Walker, C. 1979. Geología de la hoja Altamira. *Instituto de Investigaciones Geológicas (Inédito), 47 p.*

Habashi, F., 2005. A short history of hydrometallurgy. *Hydrometallurgy, Volume 79, Issues 1-2, Pages 15-22*

Harrington, H.H., 1961. Geology of parts of Antofagasta and Atacama Provinces of Northern Chile. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Vo. 45, p. 168-197.*

Hervé, M., 1987a. Movimiento normal de la falla Paposo, Zona de Falla de Atacama, en el Mioceno, Chile. *Revista Geológica de Chile, Vol. 31, p. 31–36.*

Hervé, M., 1987b. Movimiento sinistral en el Cretácico Inferior de la Zona de Falla de Atacama al norte de Paposo (24°S), Chile. *Revista Geológica de Chile, Vol. 31, p. 37-42.*

Jansen, M. y Taylor, A., 2003. Overview of Gangue Mineralogy Issues in Oxide Copper Heap Leaching. *International Project Development Services Pty Ltd, Australia, 18 p.*

Marinovic, N., Smoje, I., Maksaev, V., Hervé, M. y Mpodozis, C., 1995. Hoja Aguas Blancas, Región de Antofagasta. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Carta Geológica, 1:250.000, N° 70, 150 p.*

Mc Clave, M. A., 1998. Memorando on Mineralization and Structure, Centenario Deposit, *Internal Company Report, 5p, 1 mapa.*

- Mercado, M., 1977. Geología de la Cordillera de la Costa entre Chañaral y Caldera, Región de Atacama. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 73 p.
- Mercado, M., 1978. Avance geológico de las Hojas Chañaral y Potrerillos, Región de Atacama. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Mapas Geología preliminar de Chile*, N° 2, 24p.
- Mercado, M., 1980. Geología del área Pan de Azúcar, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Carta Geológica de Chile*, 1:100.000, N° 37, 30 p.
- Mortimer, C., 1973. The Cenozoic History of the Southern Atacama Desert, Chile. *Journal Geological Society, London*, Vol. 129, p. 505-526.
- Naranjo, J.A., 1978. Geología de la zona interior de la Cordillera de la Costa entre los 26°00' y los 26°20', Región de Atacama. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile*, N° 34, 46 p.
- Naranjo, J.A., 1987. Interpretación de la actividad cenozoica superior a lo largo de la Zona de Falla de Atacama, norte de Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 31, p. 43– 55.
- Naranjo, J.A. y Puig, A., 1984. Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Calama. *Carta Geológica de Chile*, No. 62-63. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, escala 1:250.000.
- Oliveros, V., 2005. Étude géochronologique des unités jurassiques et Crétacé Inférieur du Nord du Chili (18°30'-24°S, 60°30'-70°30'W): Origine, mise en place, altération, métamorphisme et minéralisations associées. *Thesis, Université de Nice-Sophia Antipolis y Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago*, 305 p.
- Rogers, G. y Hawkesworth, J., 1989. A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the Mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 91, p. 271-285.
- SAMSA, 2004, Centenario Oxide Copper Project. Centenario and San Guillermo update June, 2004. Region II, Chile, *Internal Report*, 52 p., 41 planos.
- Saint Amand, P. y Allen, C.R., 1960. Strike-slip faulting in northern Chile. *Bulletin, Geological Society of America*, Vol. 71, p. 8965.
- Smith, R.G., 1988. Geology of the North Half of the Altamira Quadrangle and Centenario, III Region. *Centenario Copper Internal Report*.
- Suárez, M. y Bell, M., 1992. Triassic rift-related sedimentary basins in northern Chile (24°-29°S). *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 6, p. 109-121.
- Suárez, M., Naranjo, J.A. y Puig, A., 1982. Volcanismo Liásico Inferior en la región de Antofagasta meridional: piroclastitas en la Formación Pan de Azúcar e implicancias paleogeográficas. *Revista Geológica de Chile*, N° 17, p. 83-90.

Thiele, R. and Pincheira, M., 1987. Tectónica transpresiva y movimiento de desgarre en el segmento sur de la Falla de Atacama, Chile. *Revista Geológica de Chile*, N° 31, p. 77-94.




Ulriksen, C., 1979. Regional geology, geochronology and metallogeny of the Coastal Cordillera of Chile between 25°30' and 26°00' south. *Master Science Thesis, Dalhousie University*, 221 p., Canada.

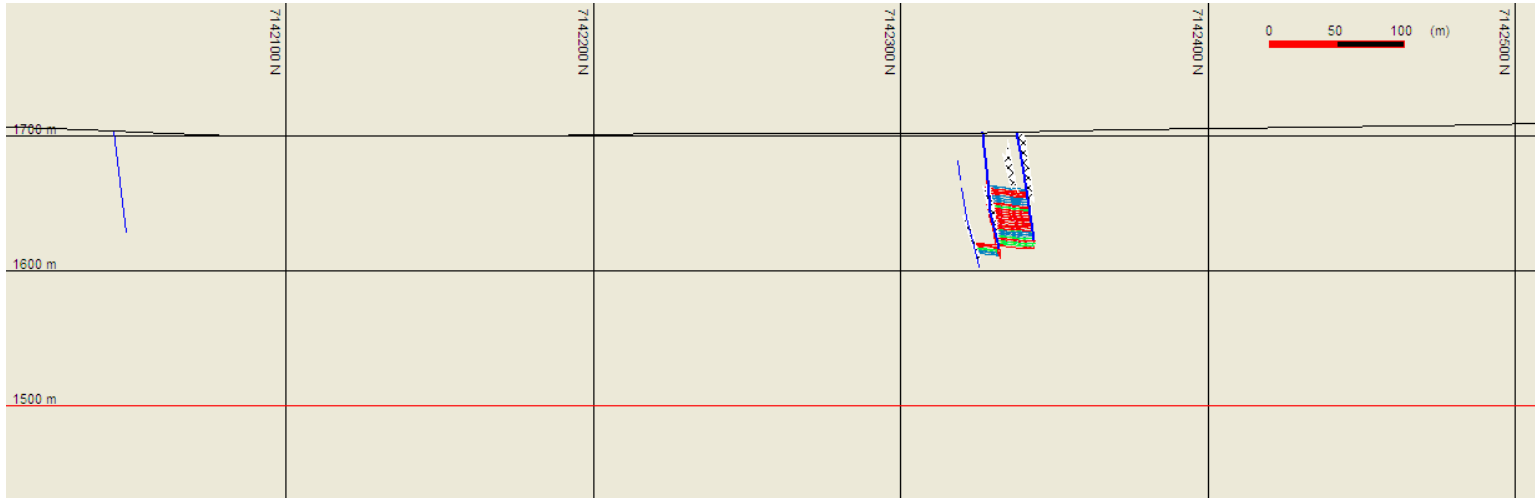
ANEXO A

MODELO GEOLÓGICO DE CARBONATOS

SECCIONES

Leyenda

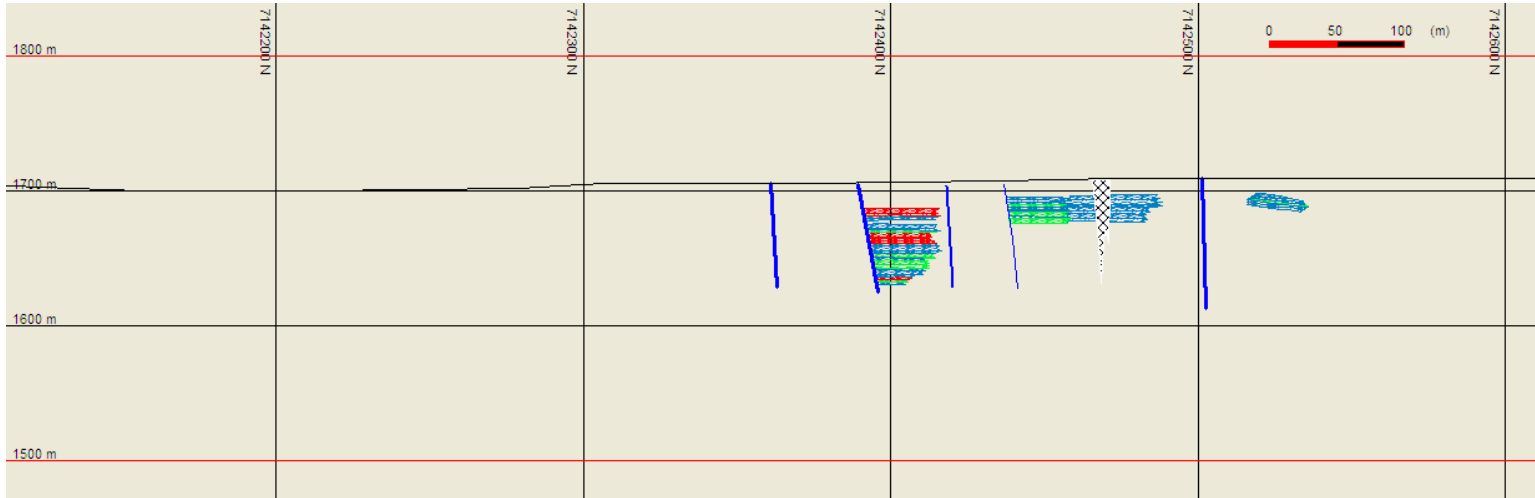
-  Alto >6%
-  Medio >3.5%
-  Bajo =<3.5%



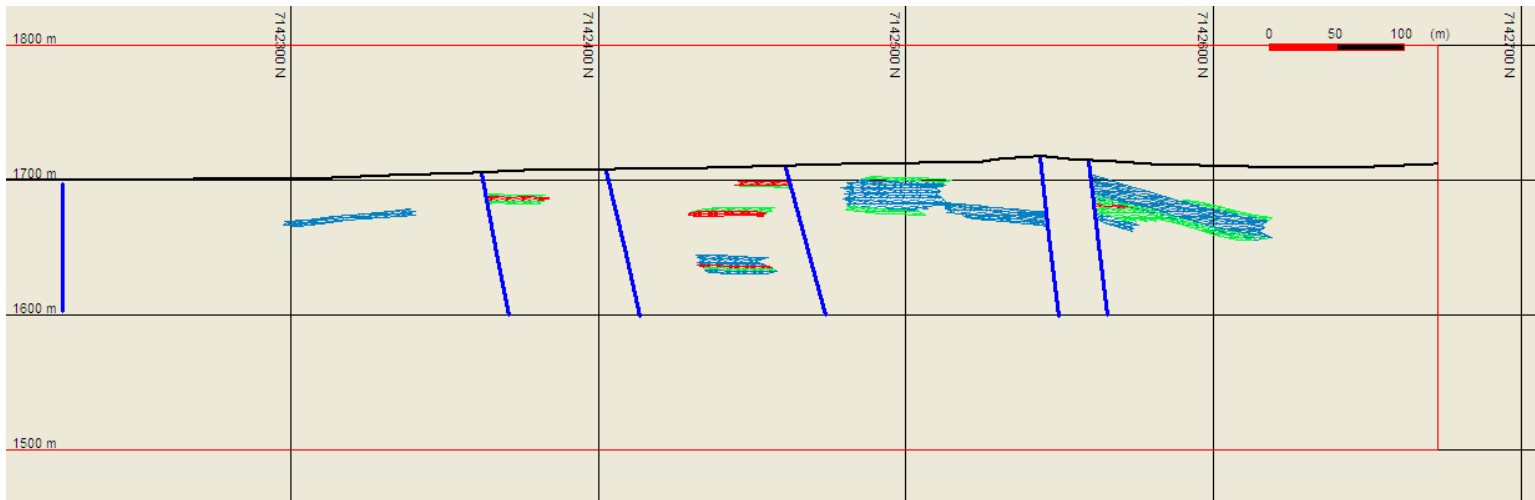
Sección -50NW



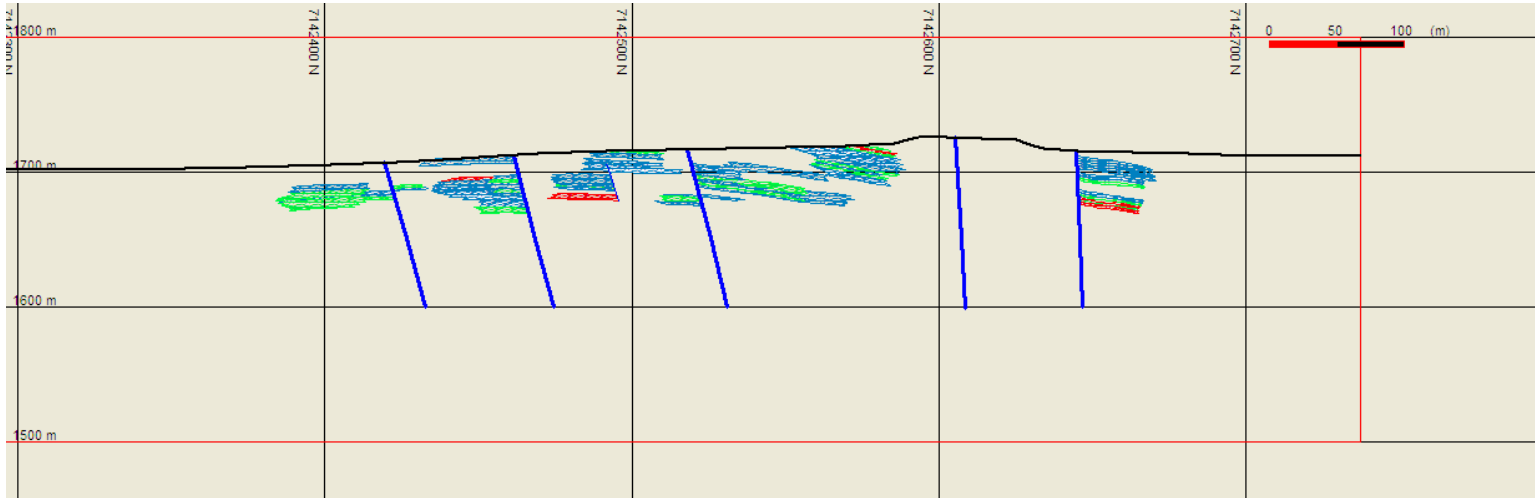
Sección 00NW



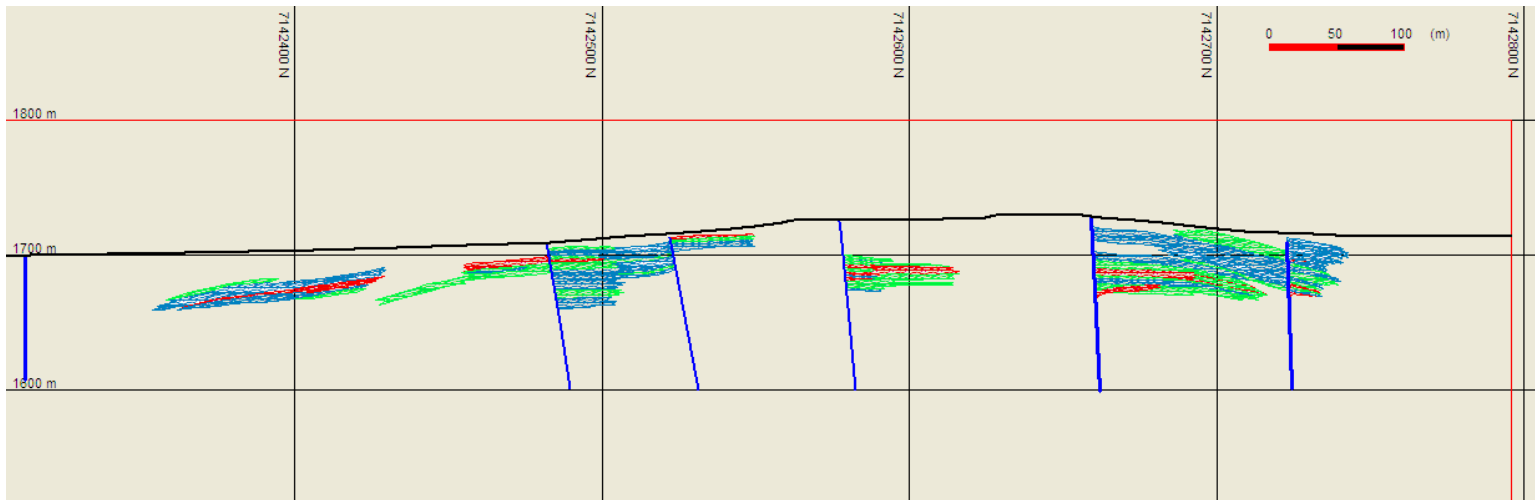
Sección 50NW



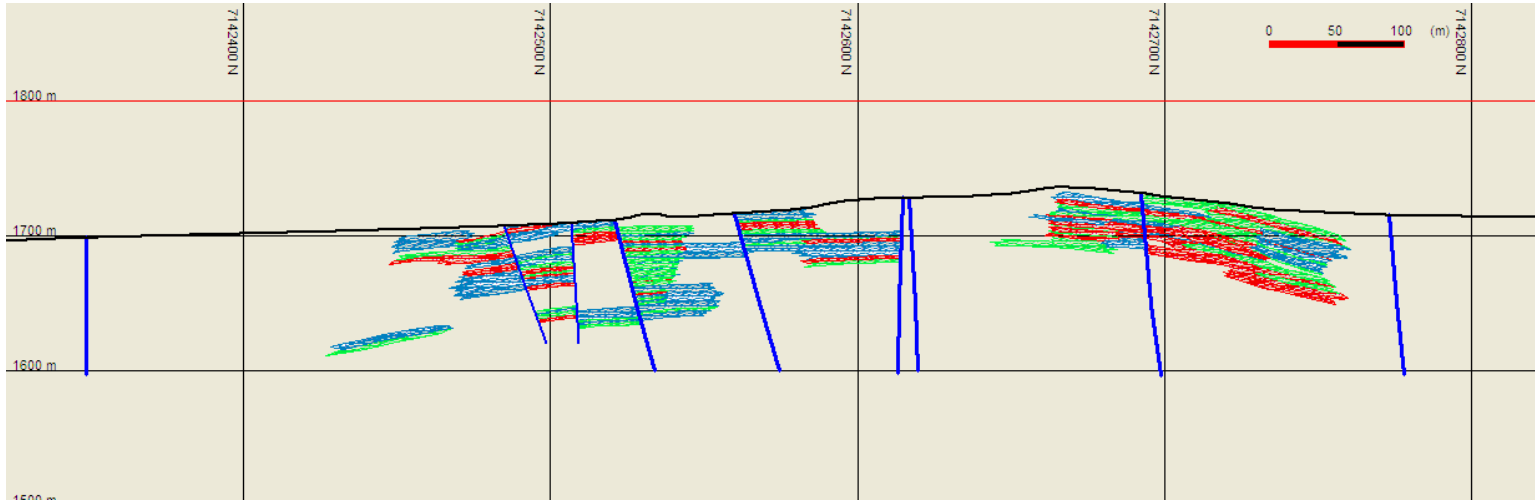
Sección 100NW



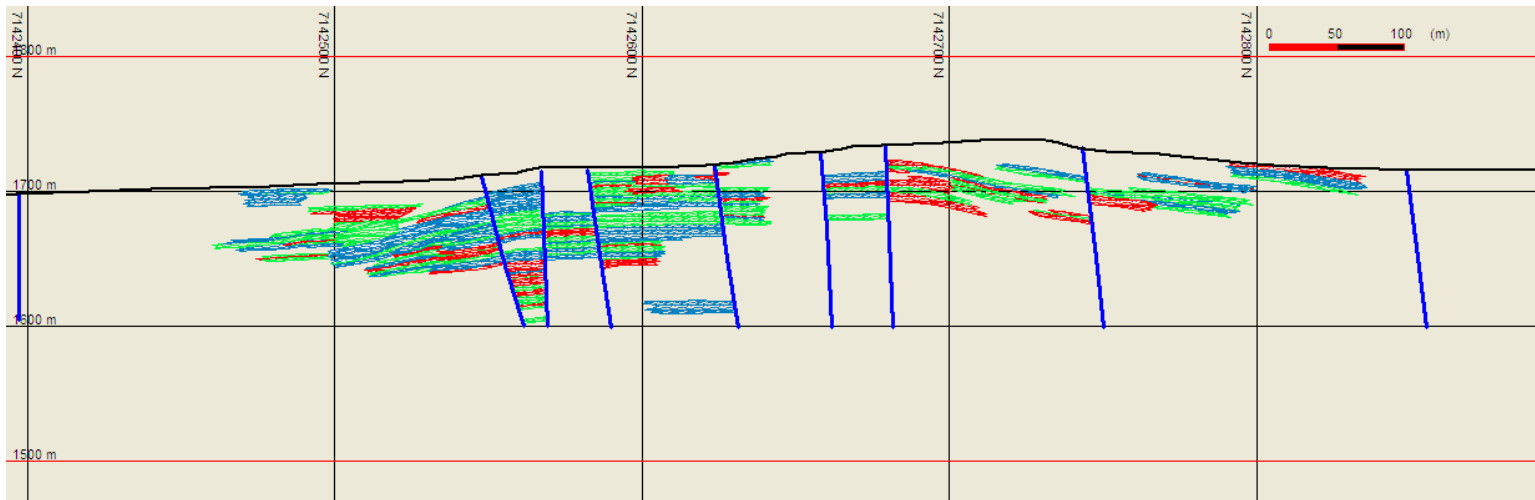
Sección 167NW



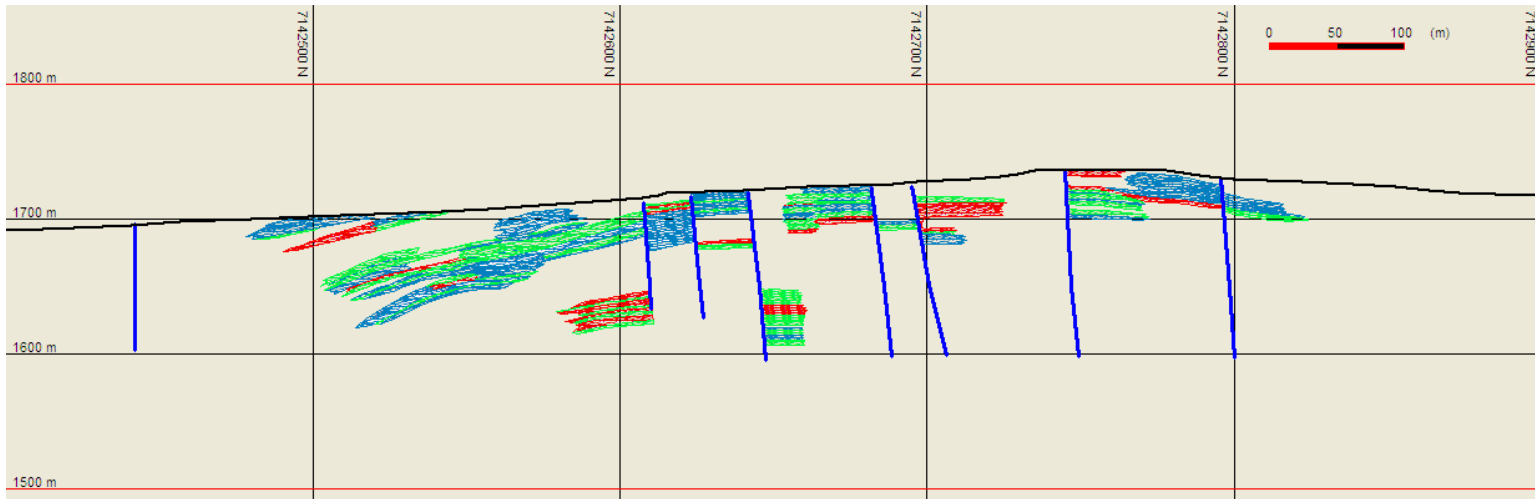
Sección 233NW



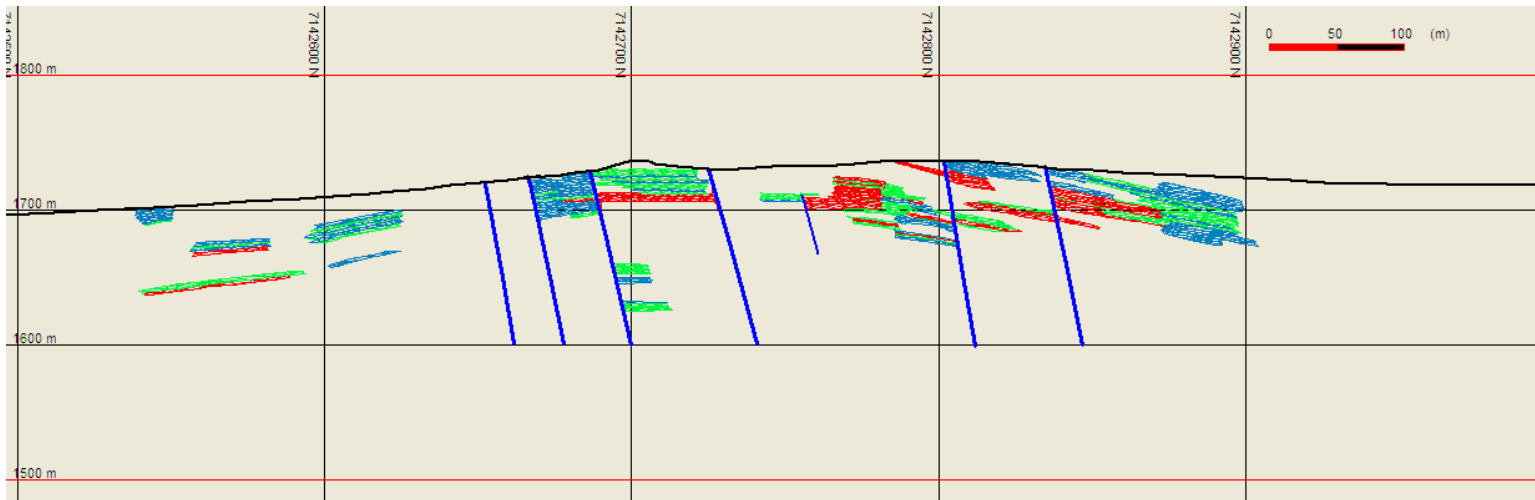
Sección 280NW



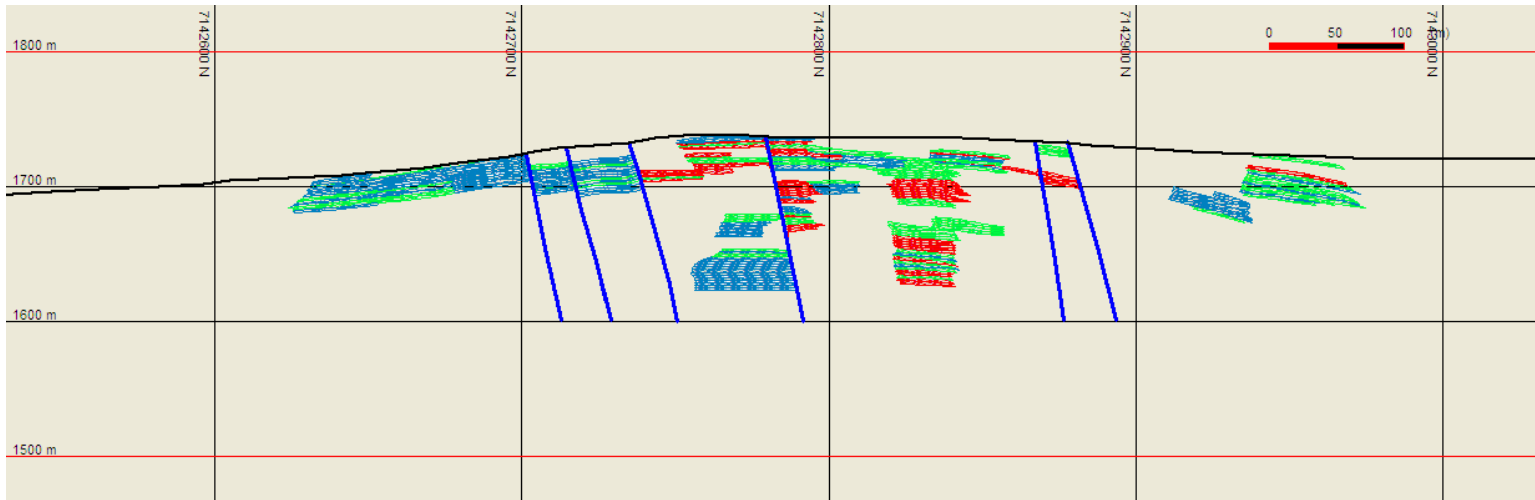
Sección 348NW



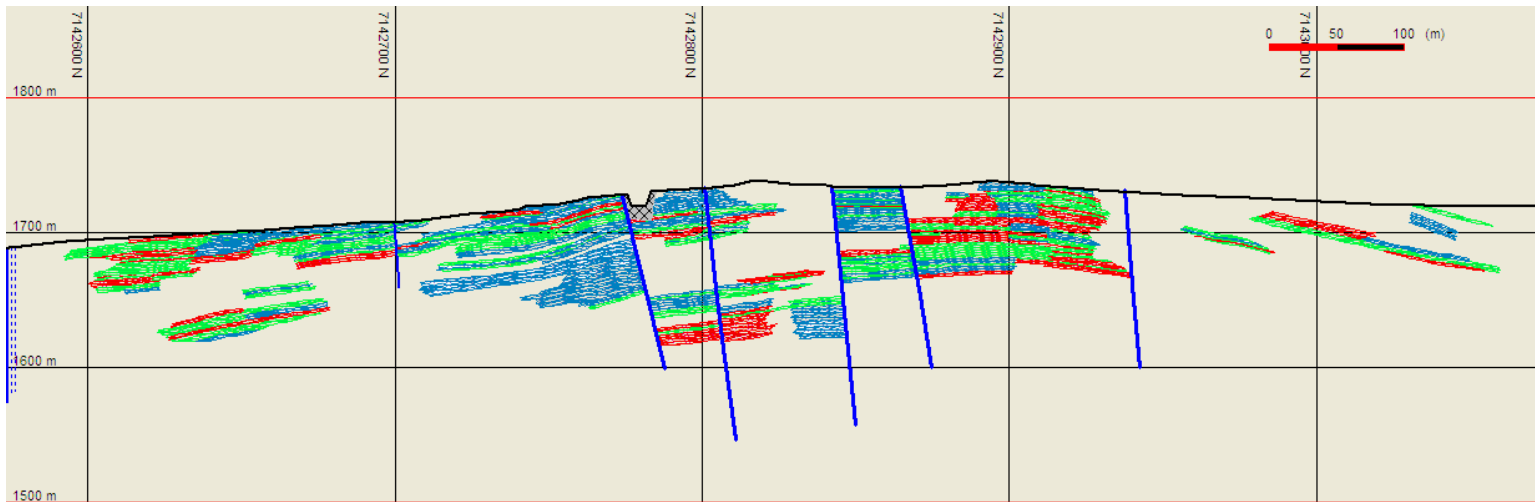
Sección 414NW



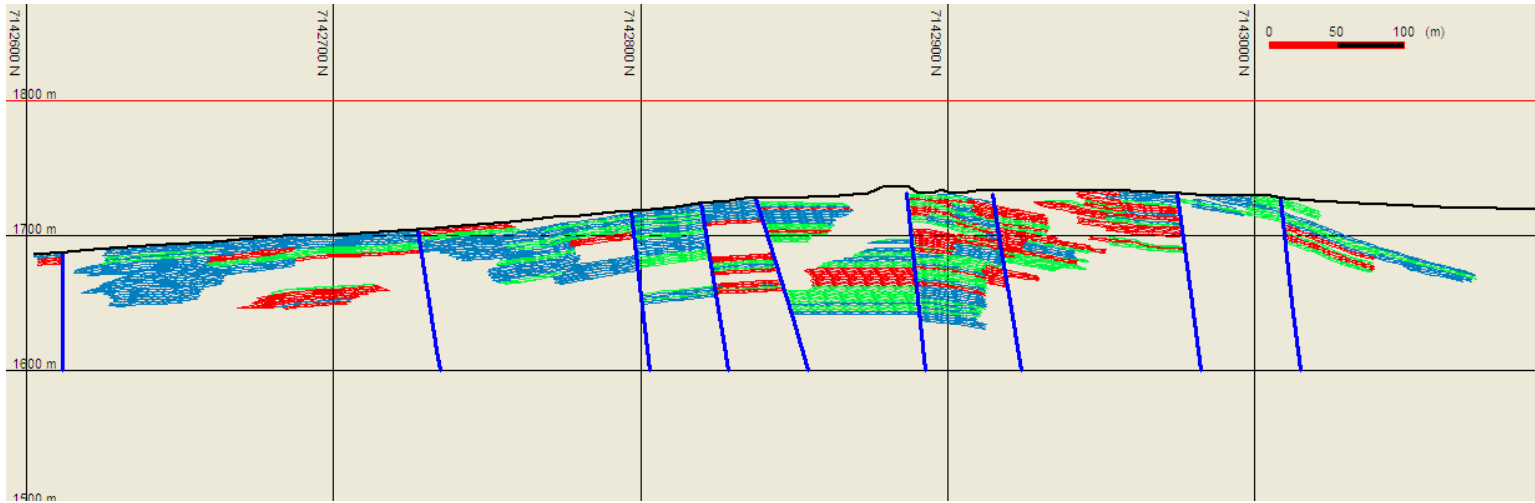
Sección 469WN



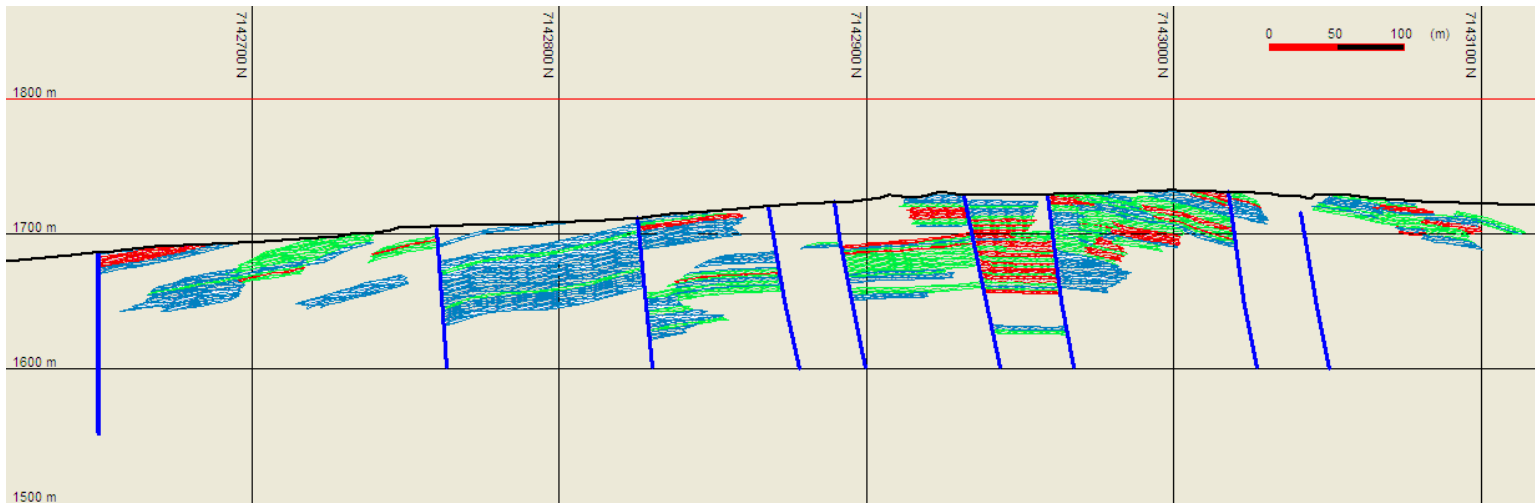
Sección 527NW



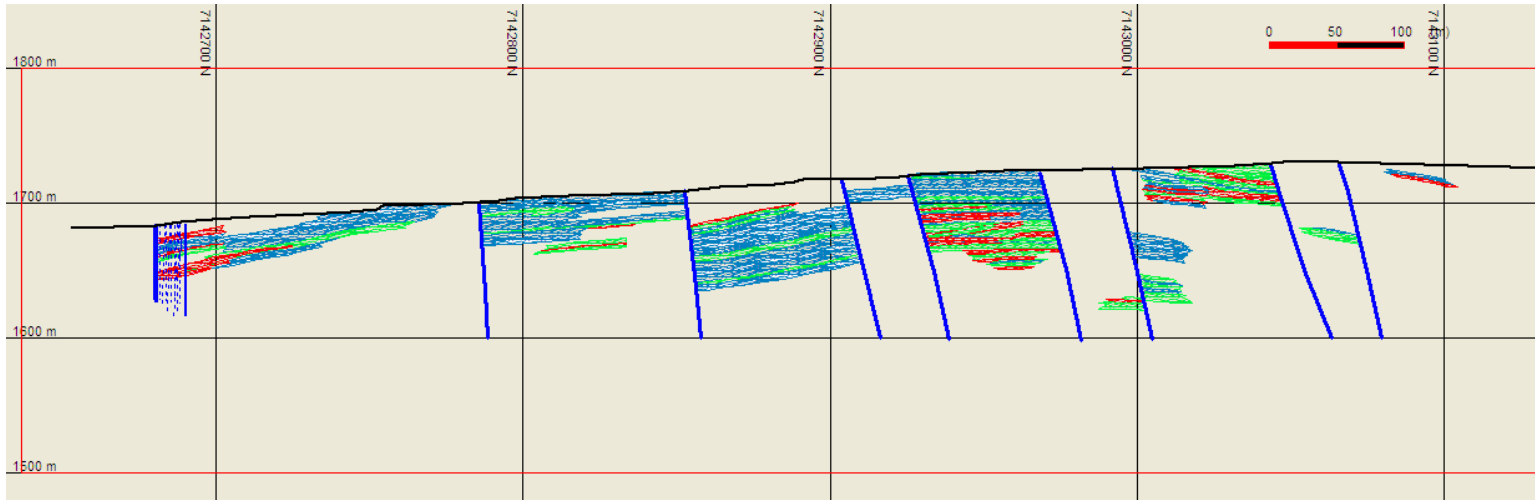
Sección 594NW



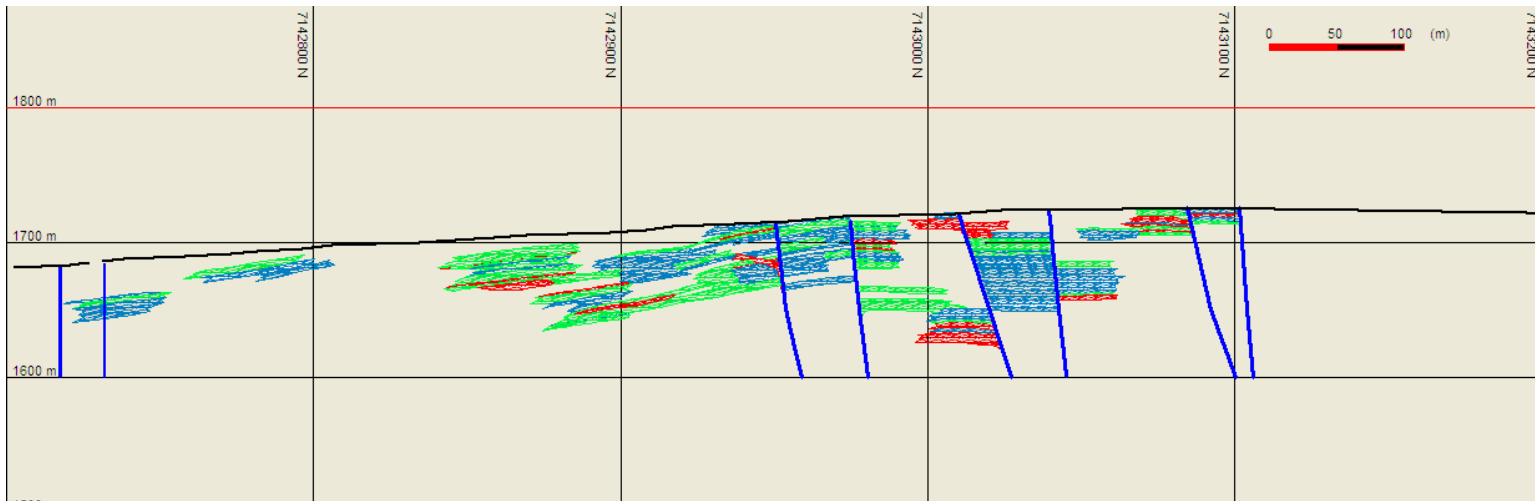
Sección 644NW



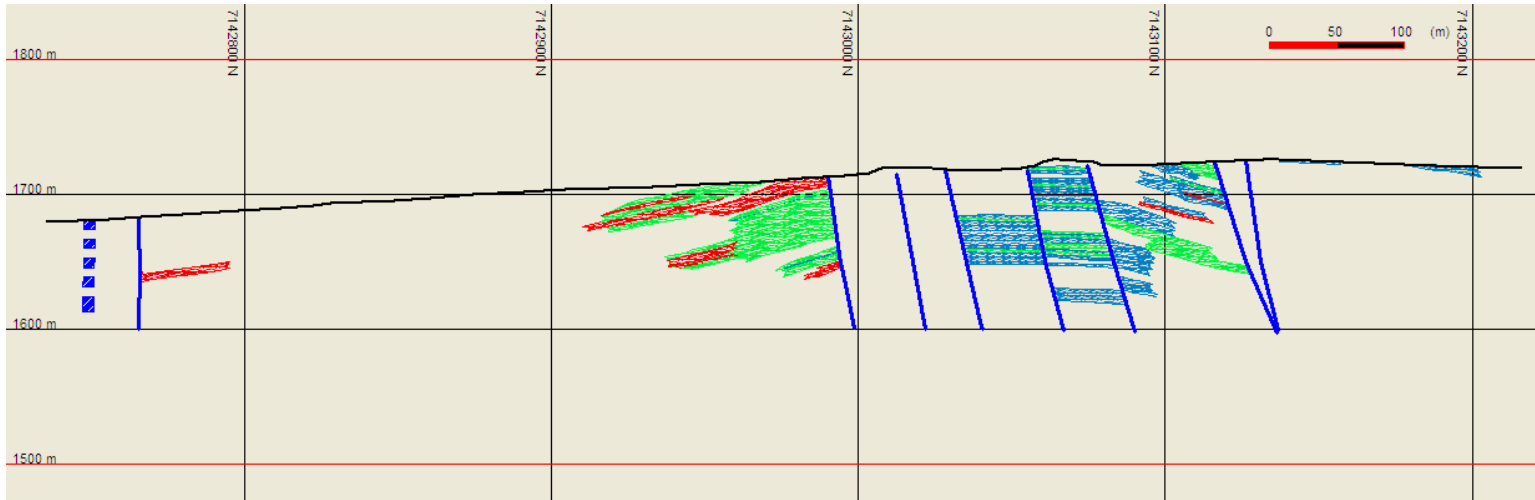
Sección 698NW



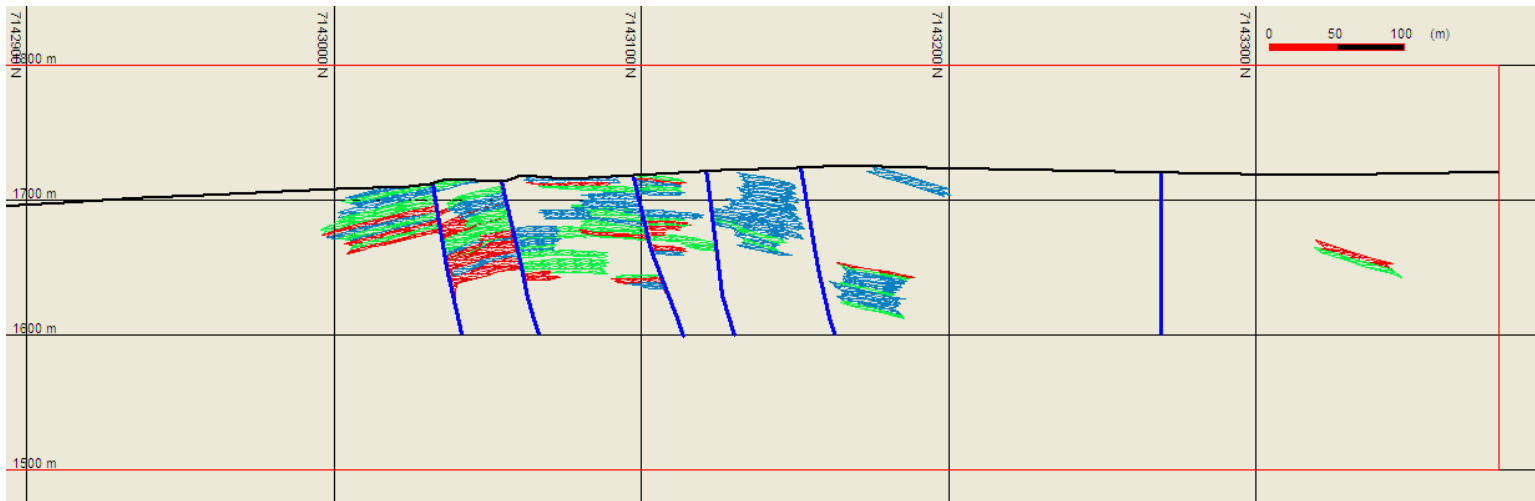
Sección 741NW



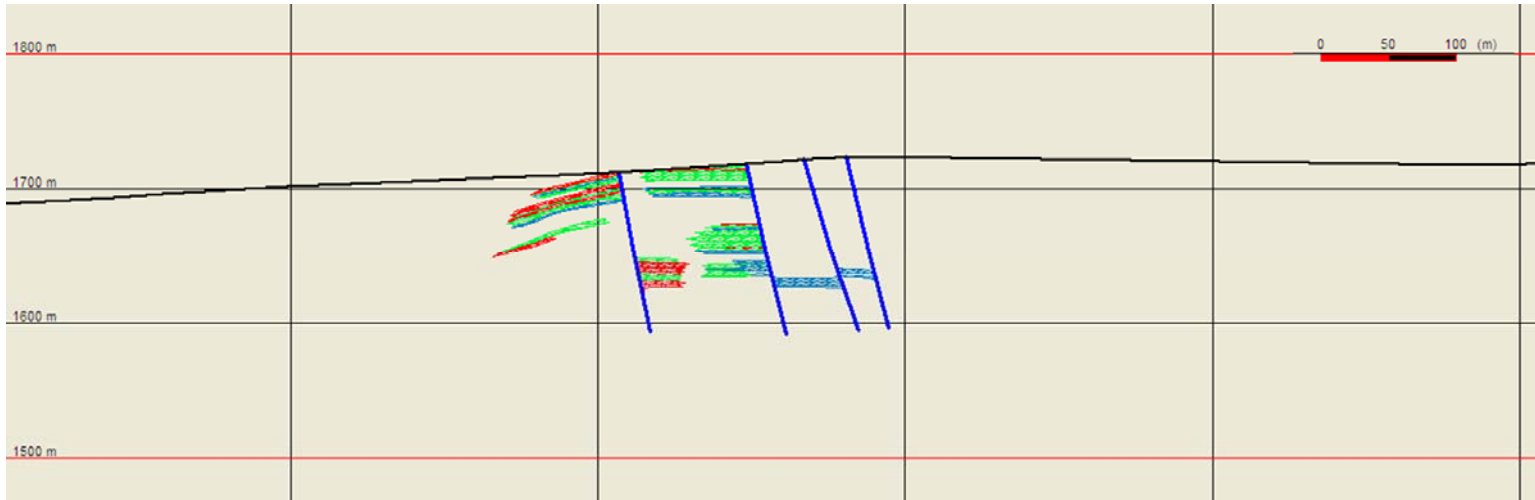
Sección 790NW



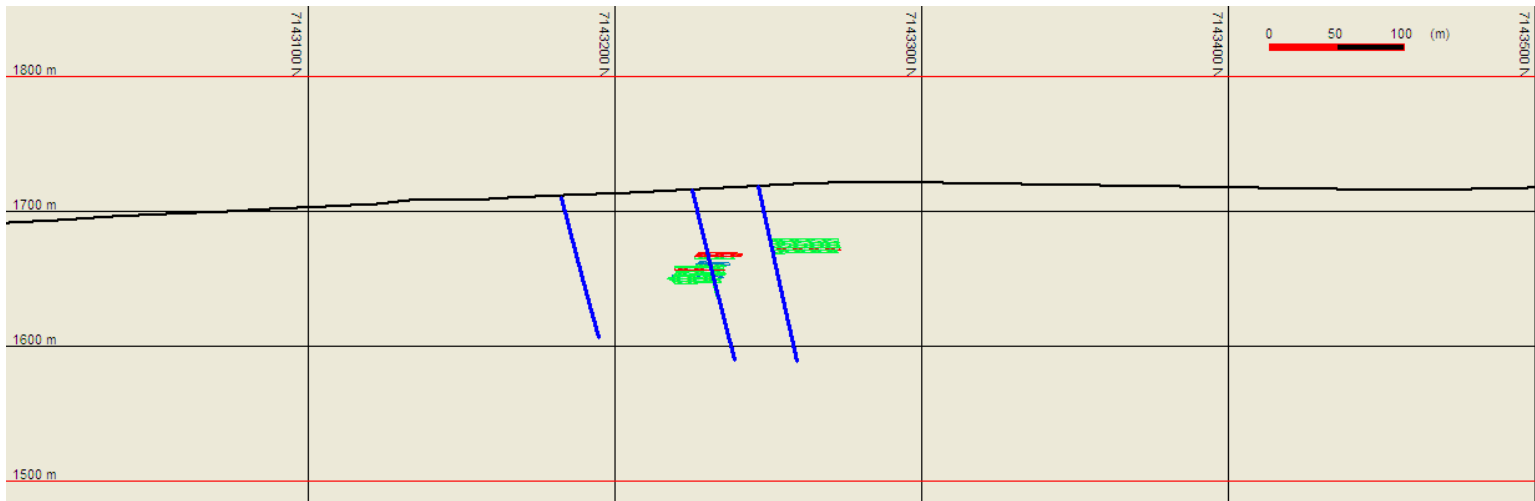
Sección 835NW



Sección 883NW



Sección 939NW



Sección 1025NW

ANEXO B


MODELO DILUIDO DE CARBONATOS

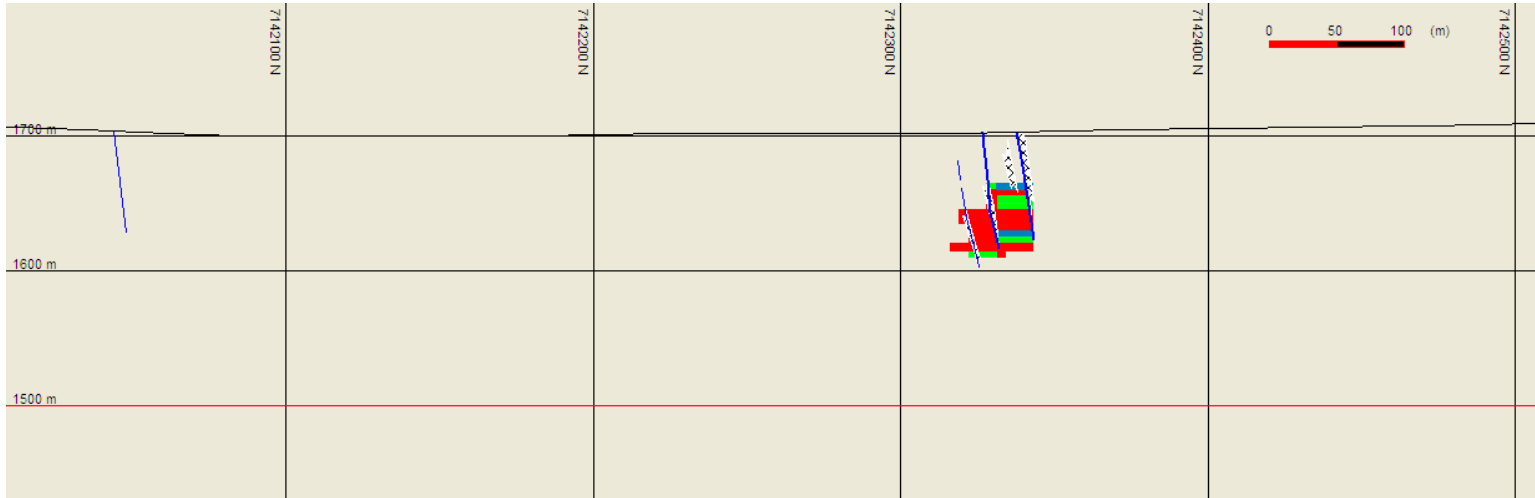
SECCIONES

Y

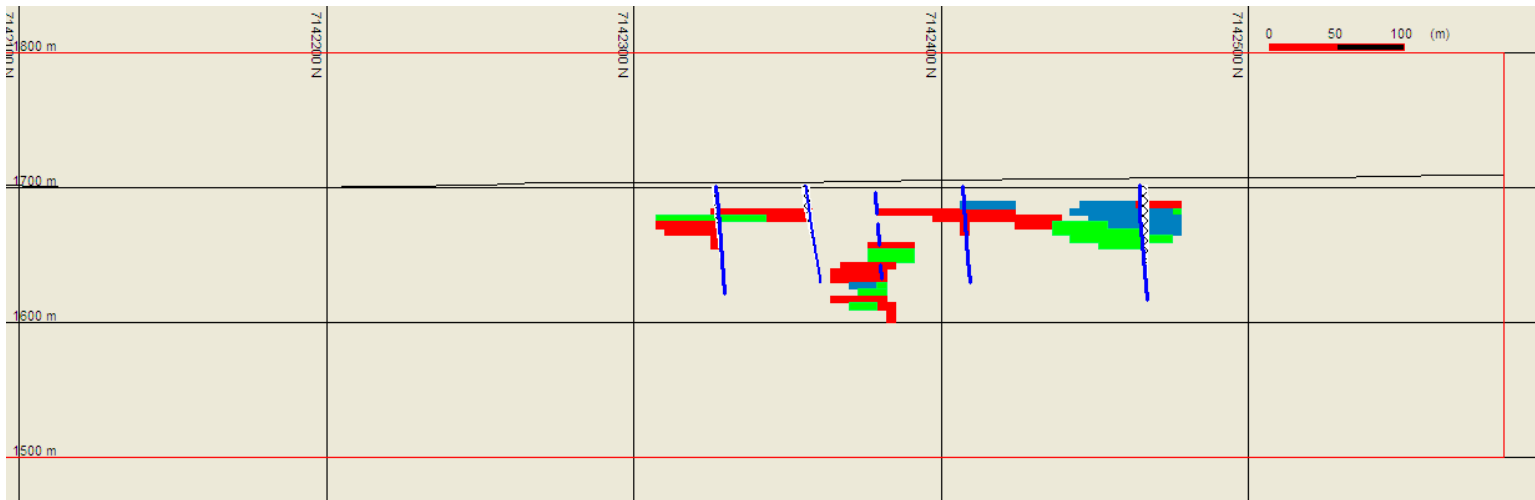
PLANTAS

Leyenda

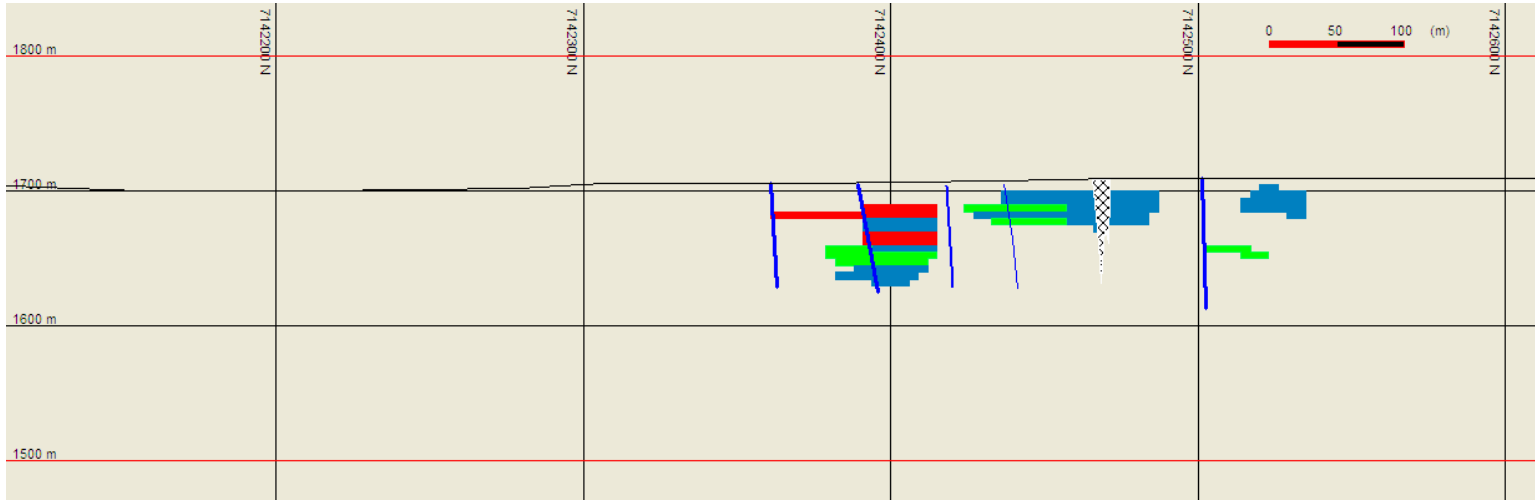
-  Alto >6%
-  Medio >3.5%
-  Bajo =<3.5%



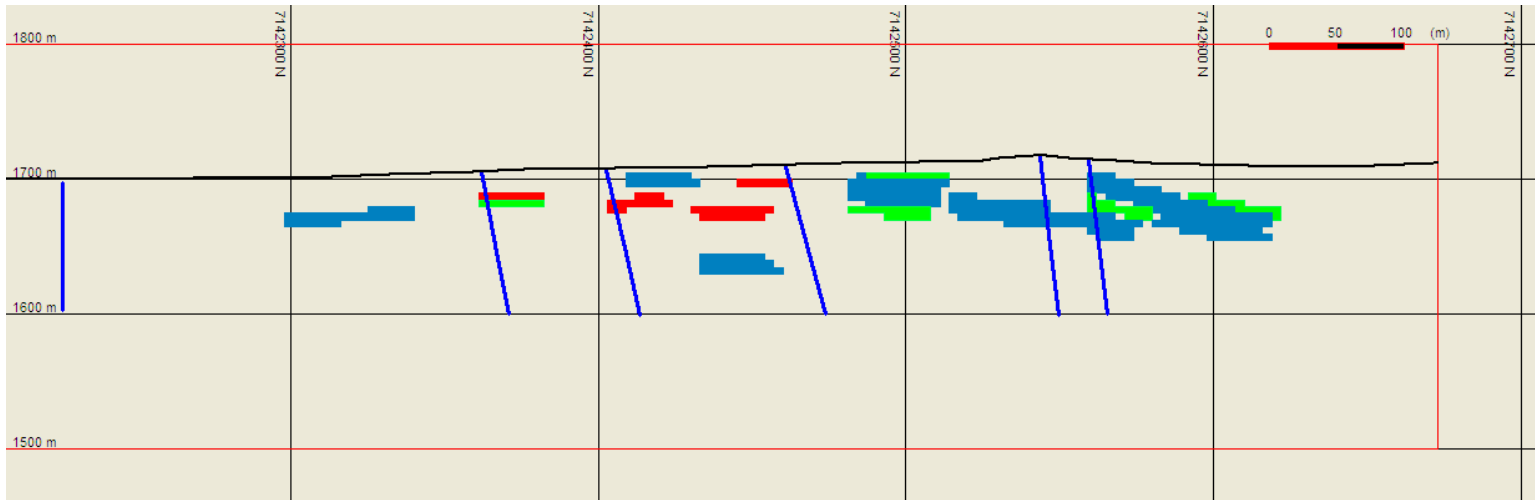
Sección -50NW



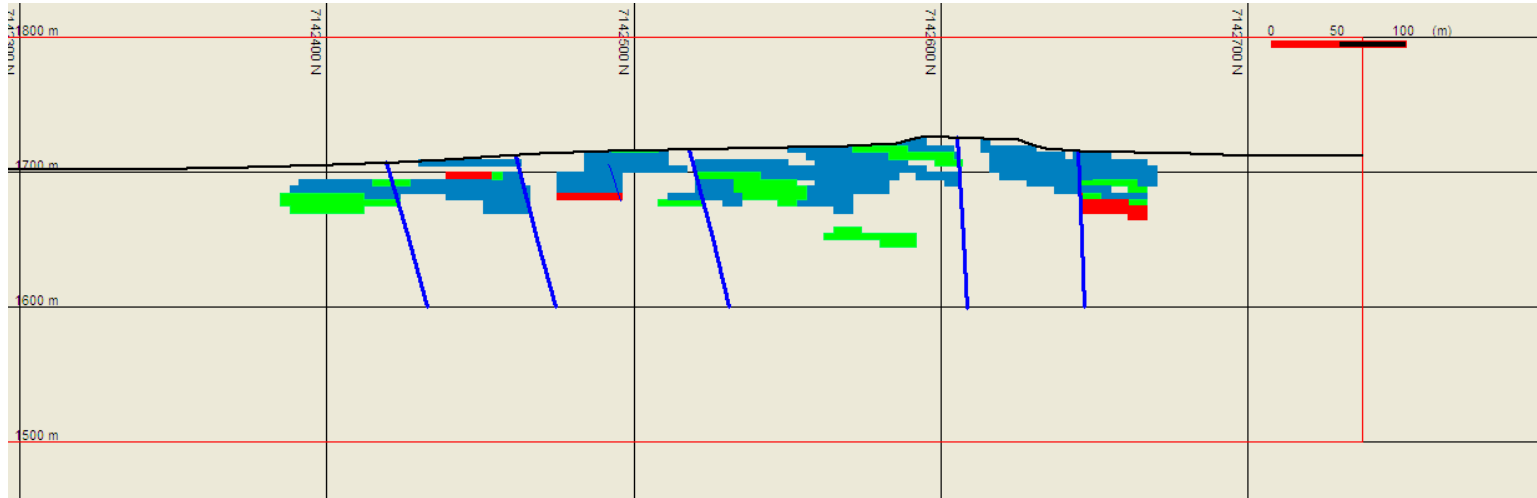
Sección 00NW



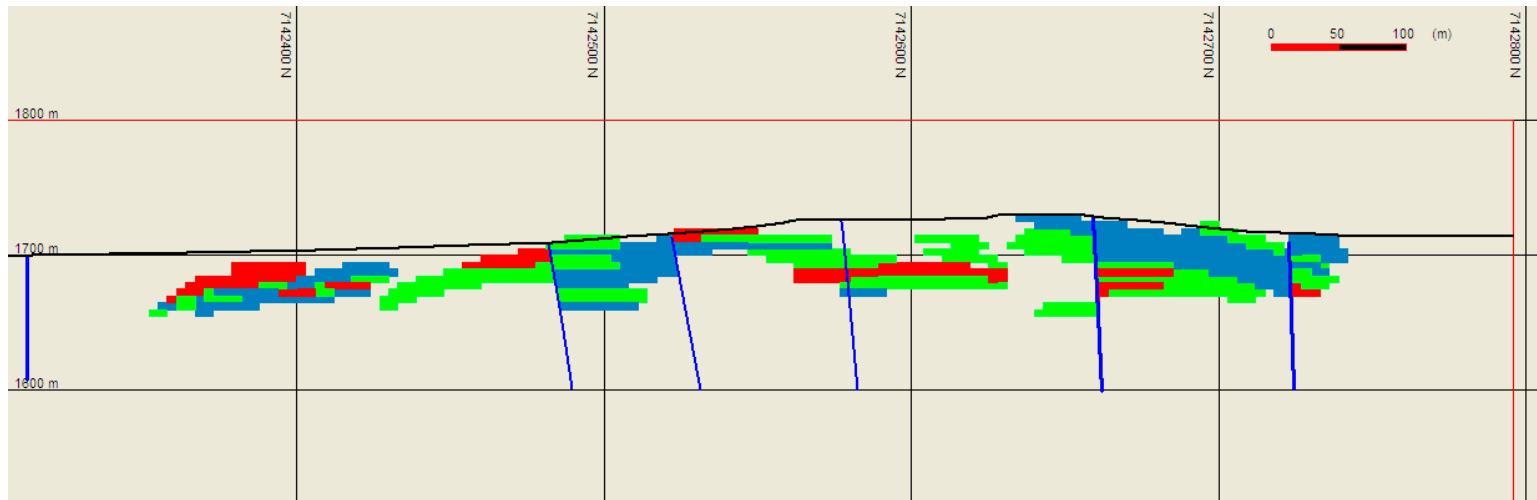
Sección 50NW



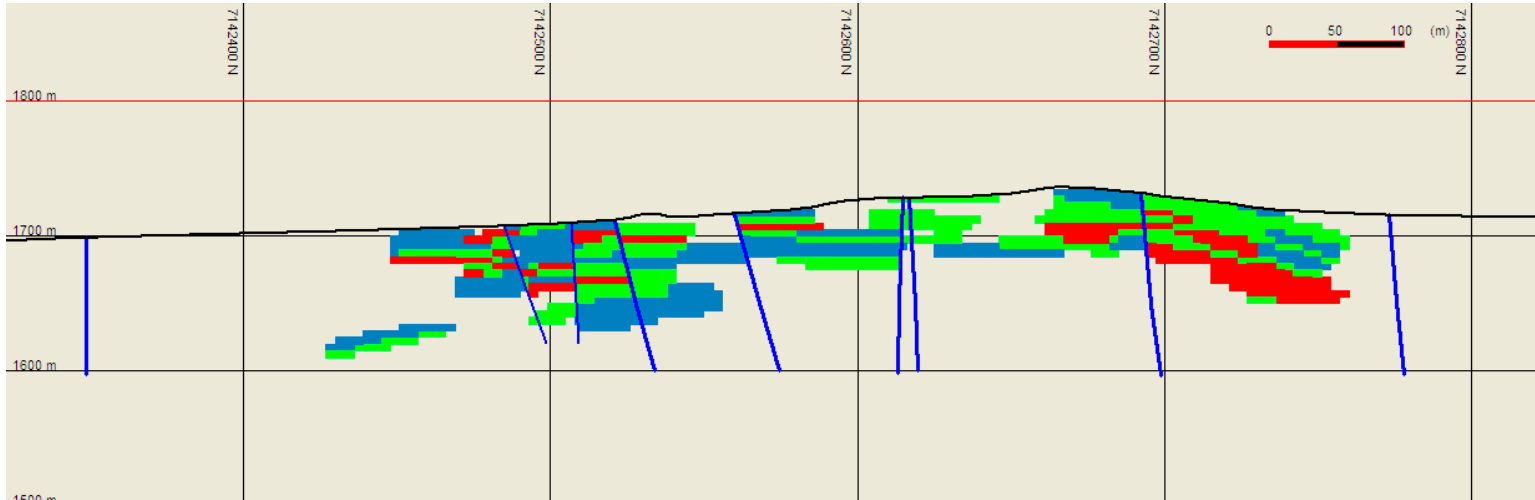
Sección 100NW



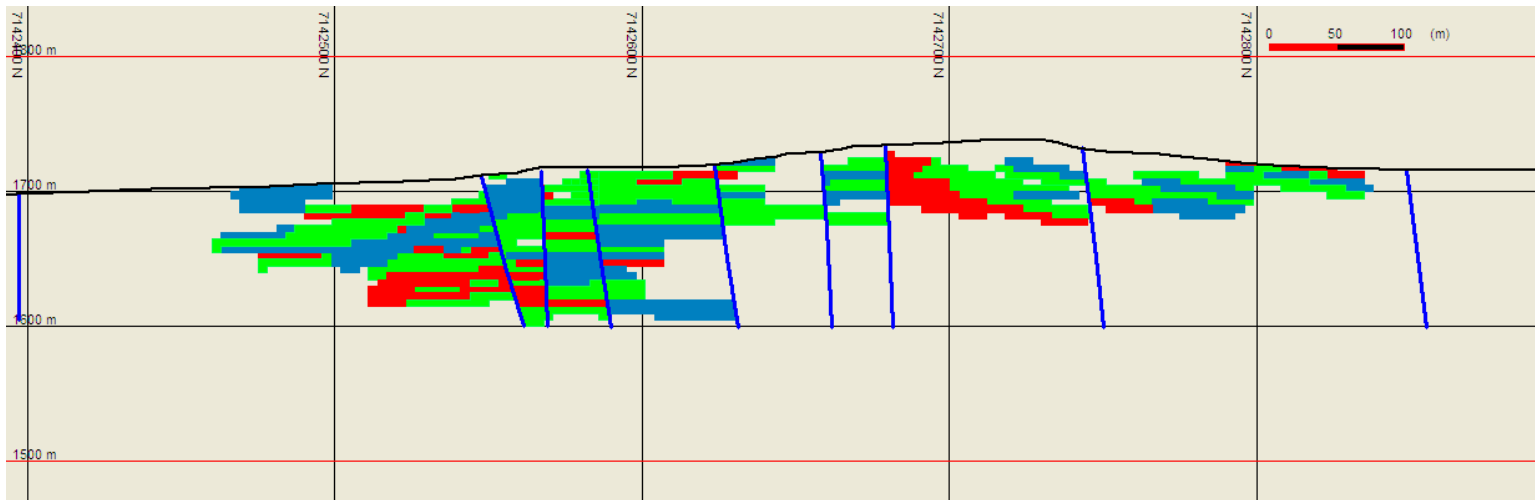
Sección 167NW



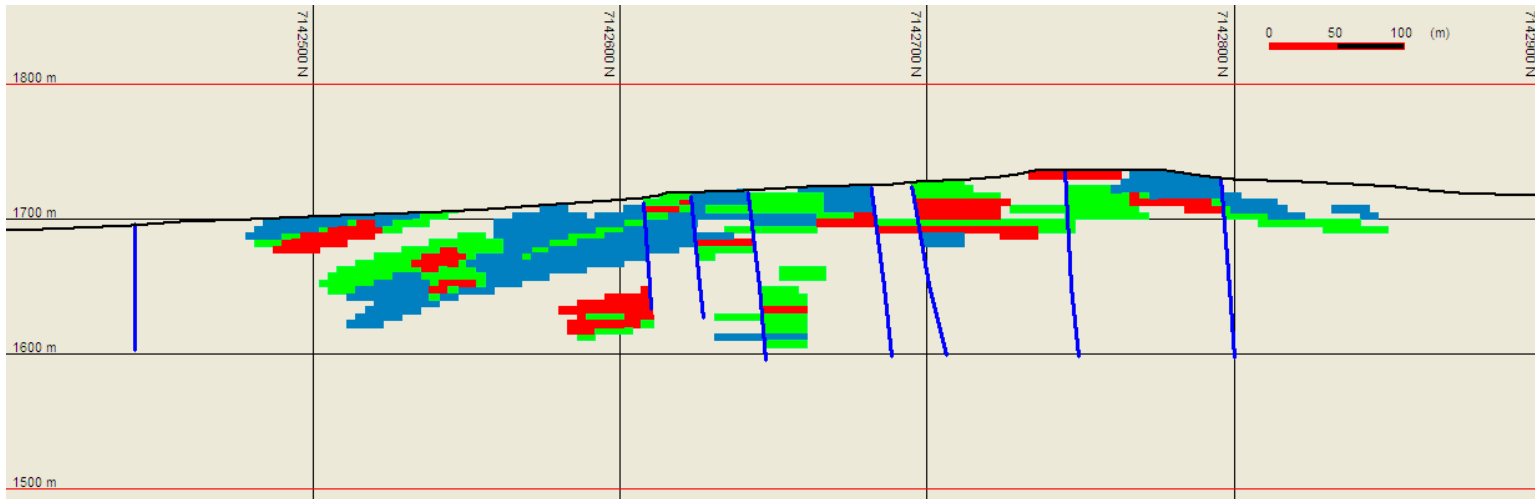
Sección 233NW



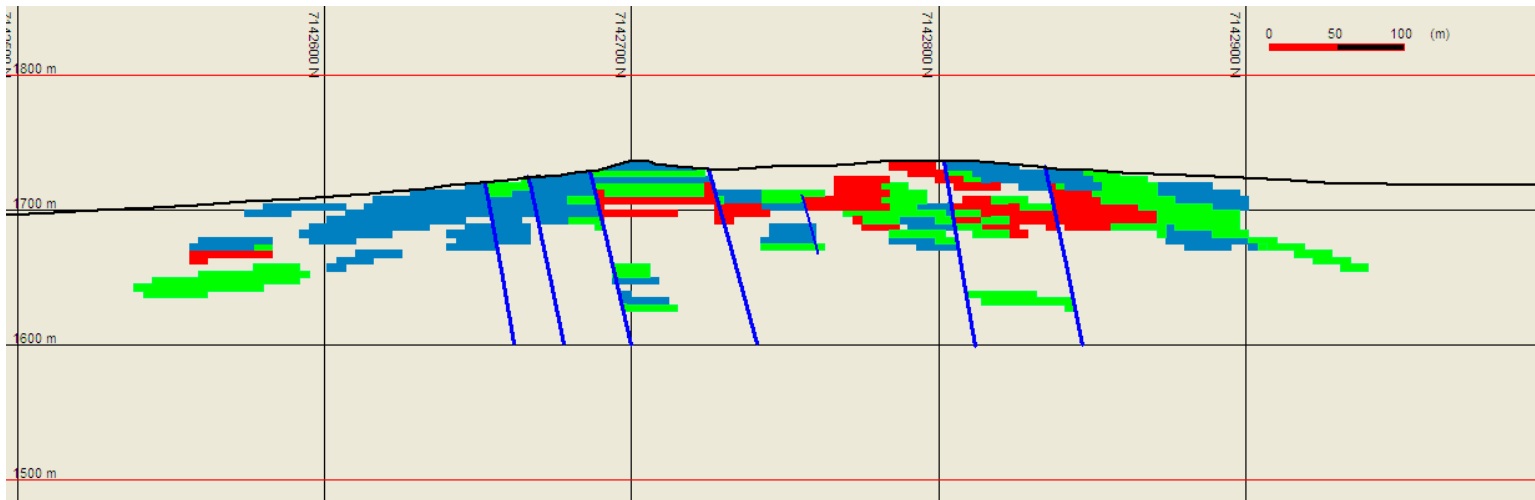
Sección 280NW



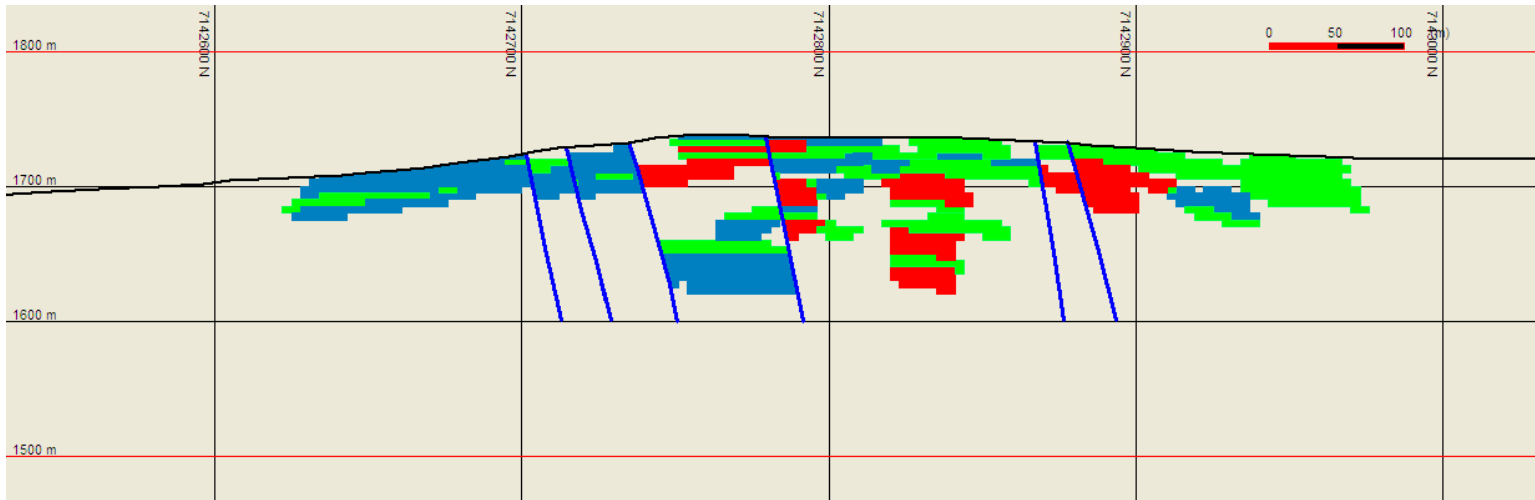
Sección 348NW



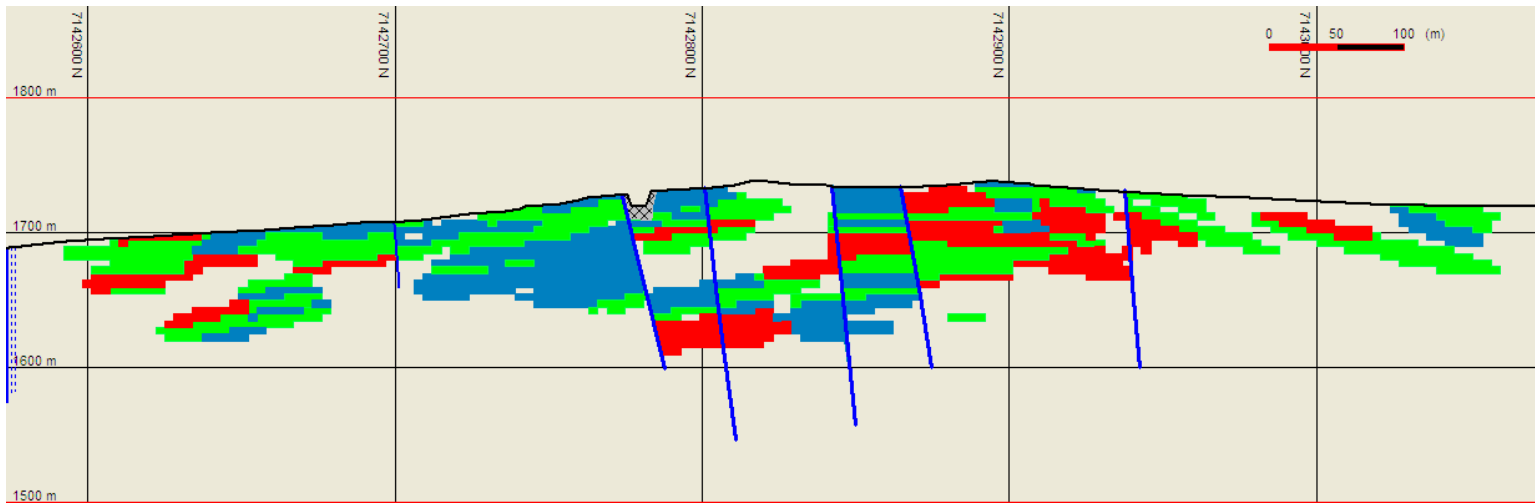
Sección 414NW



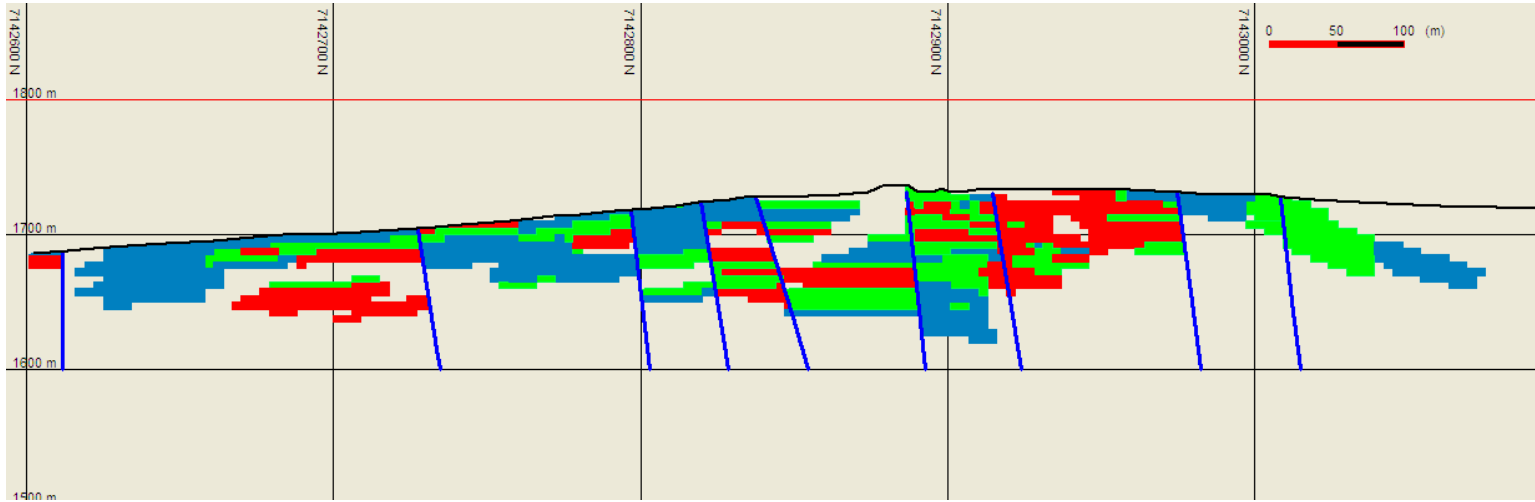
Sección 469NW



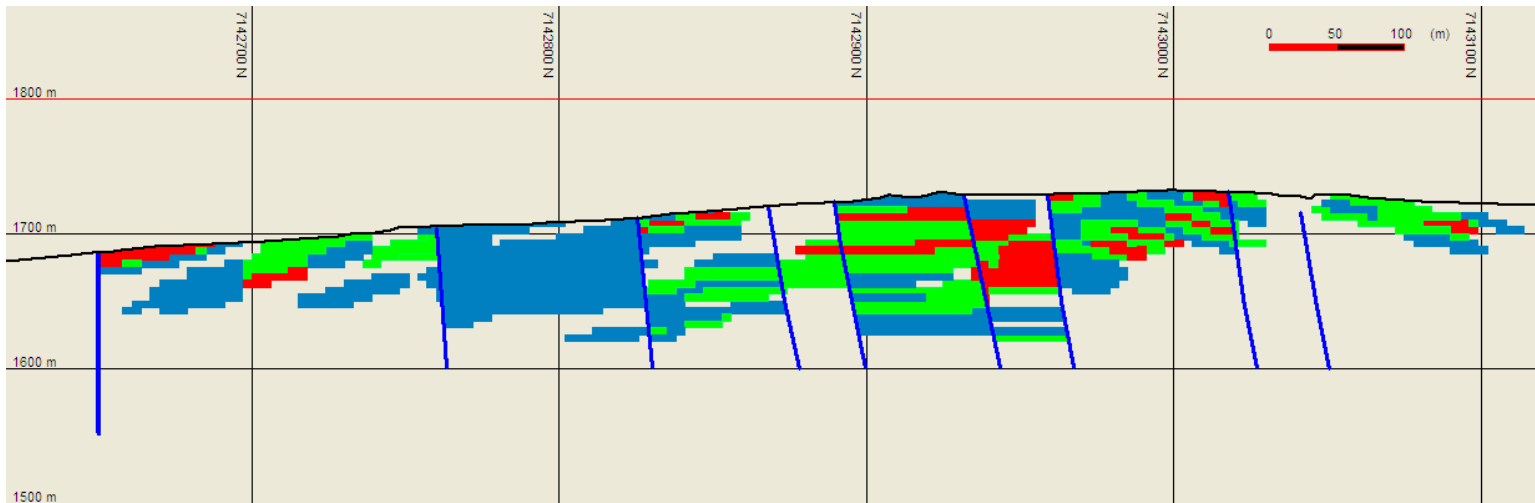
Sección 527NW



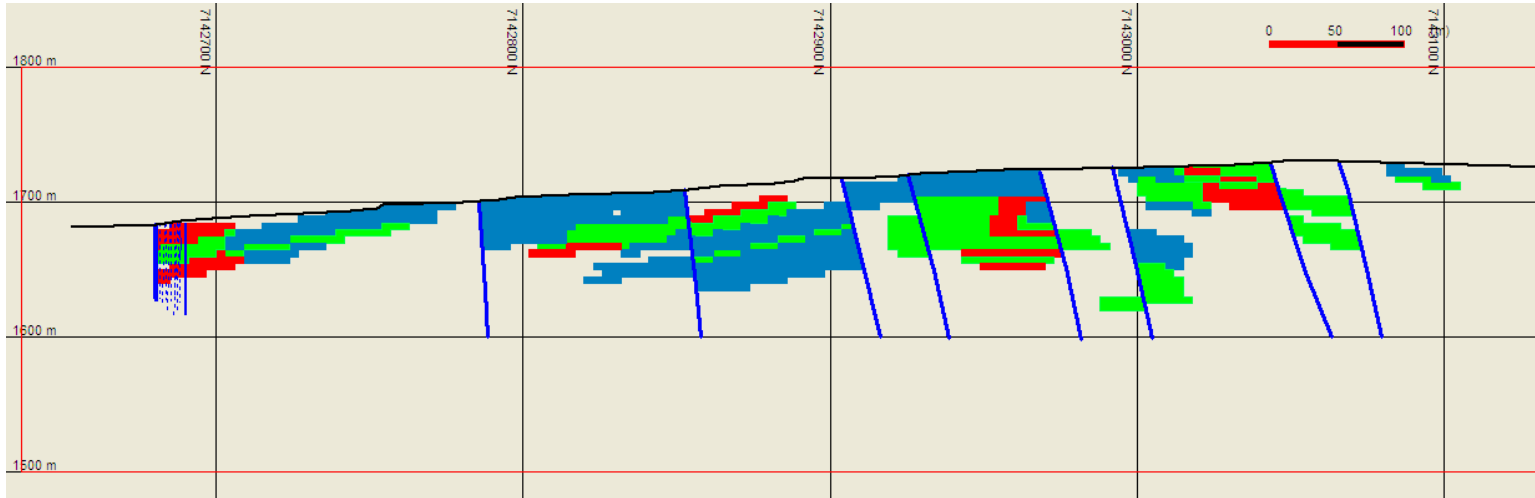
Sección 594NW



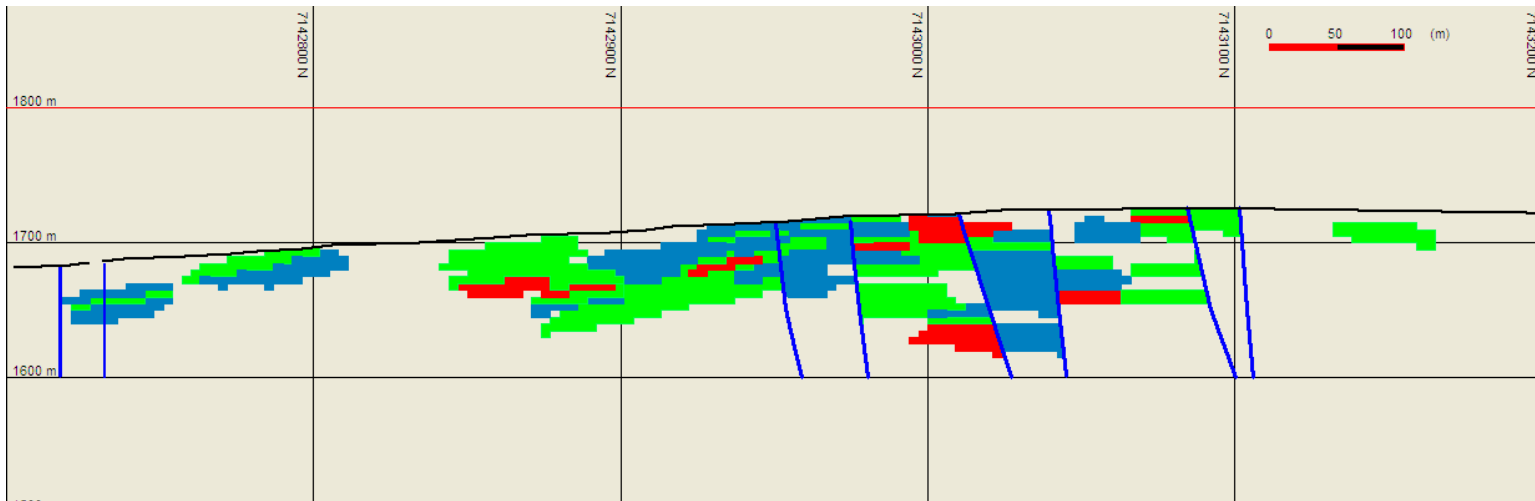
Sección 644NW



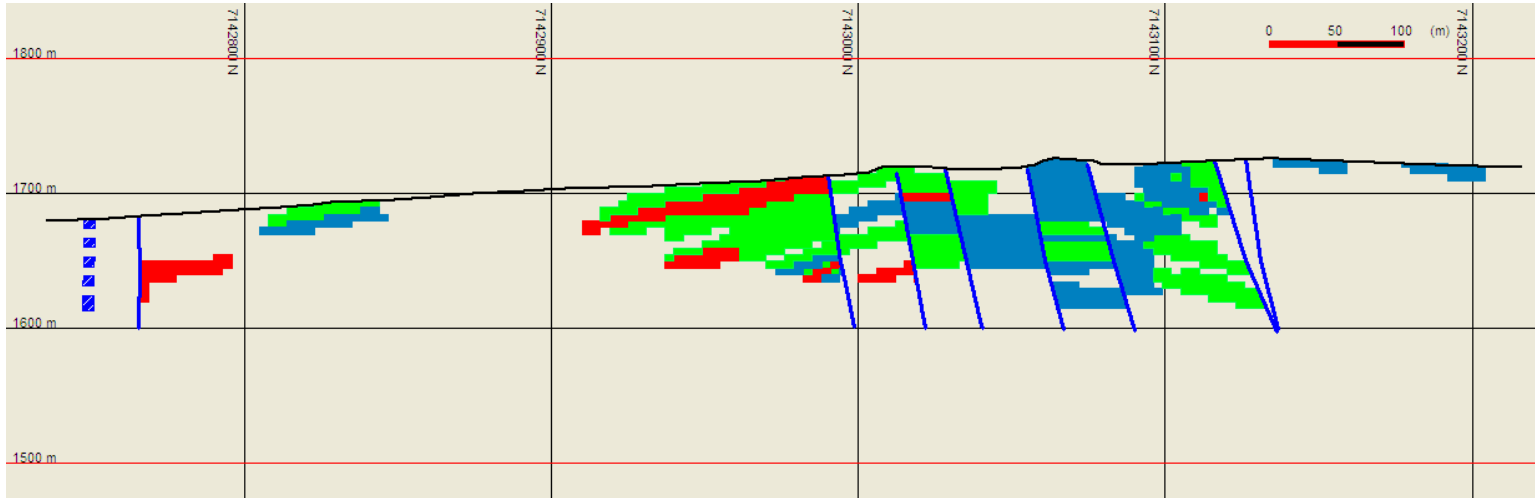
Sección 698NW



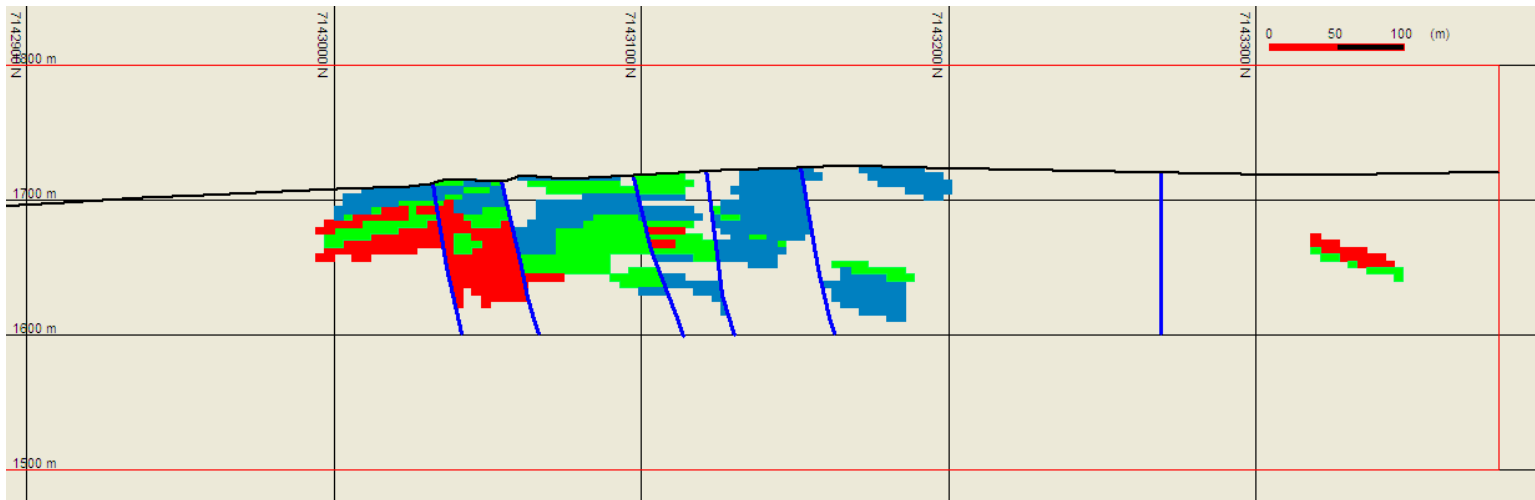
Sección 741NW



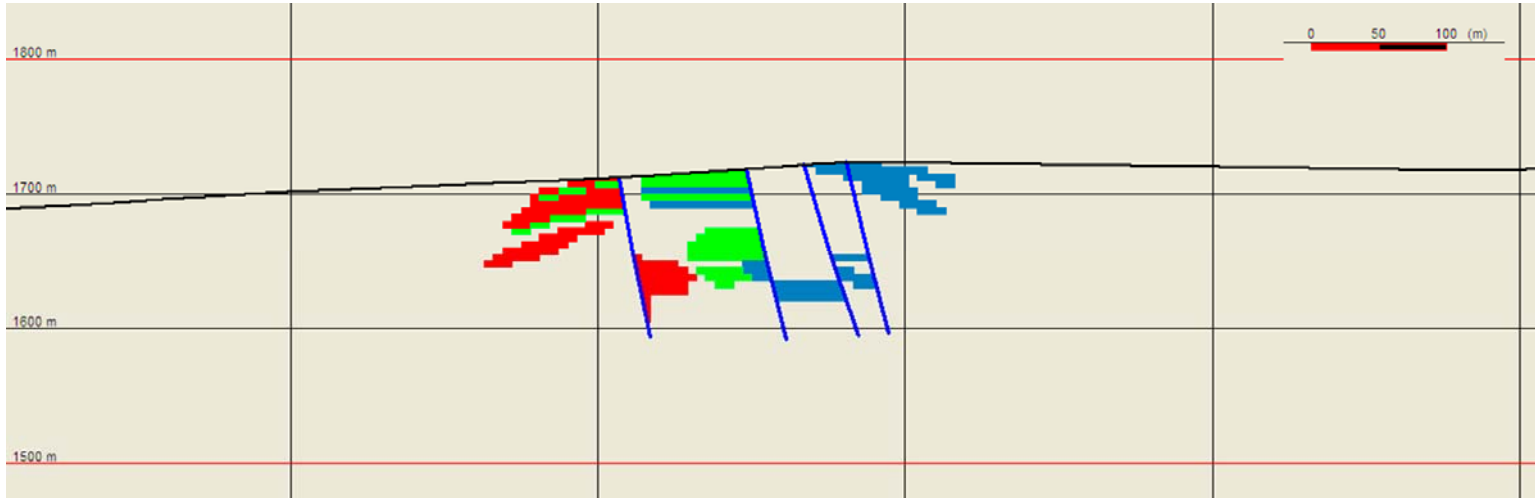
Sección 790NW



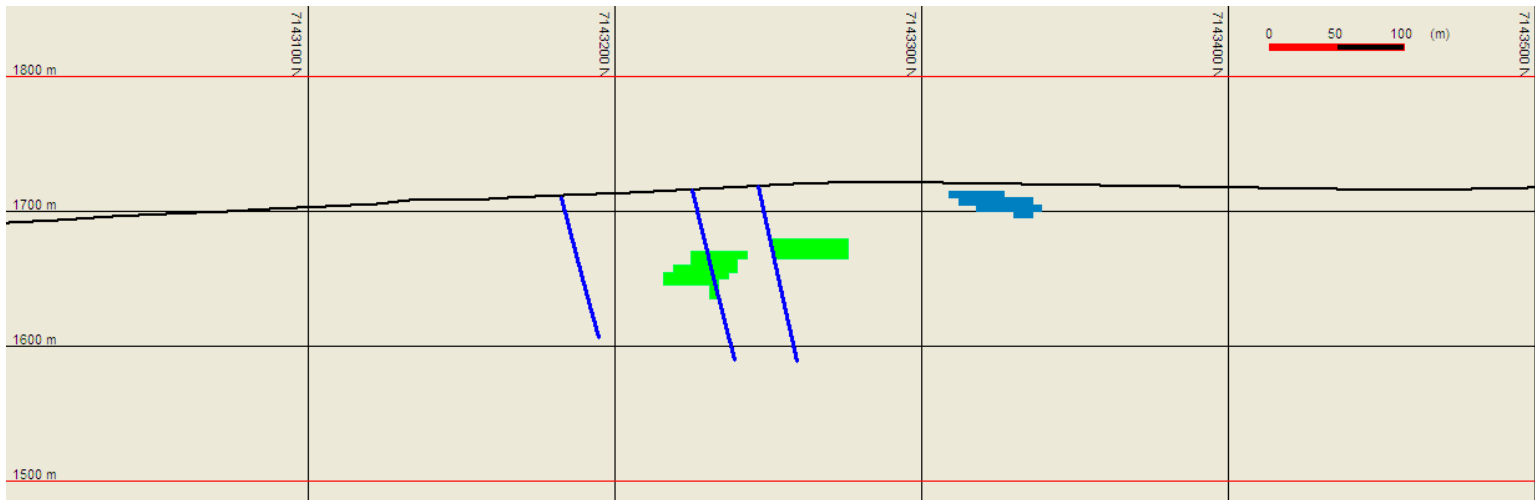
Sección 835NW



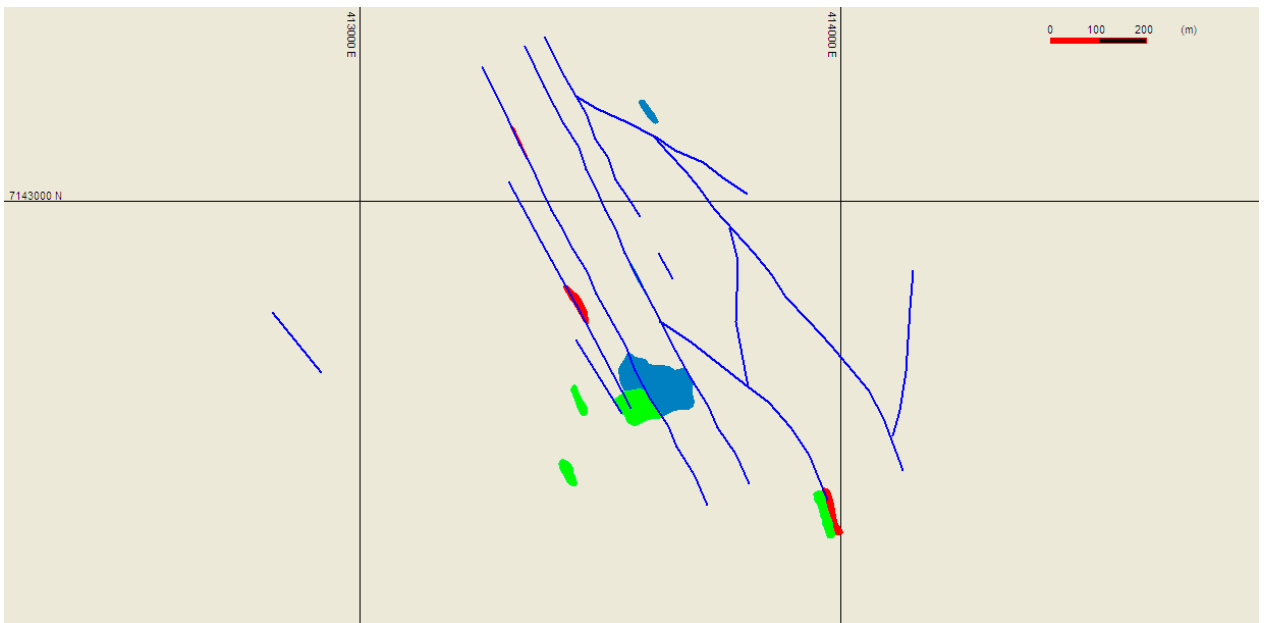
Sección 883NW



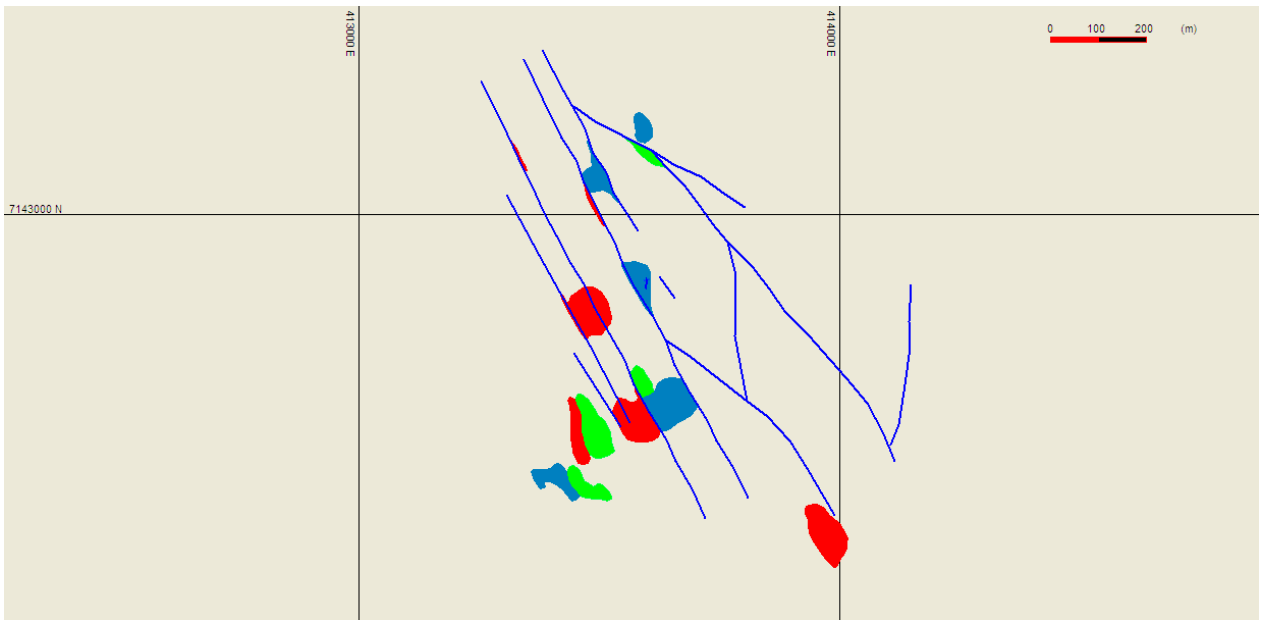
Sección 939NW



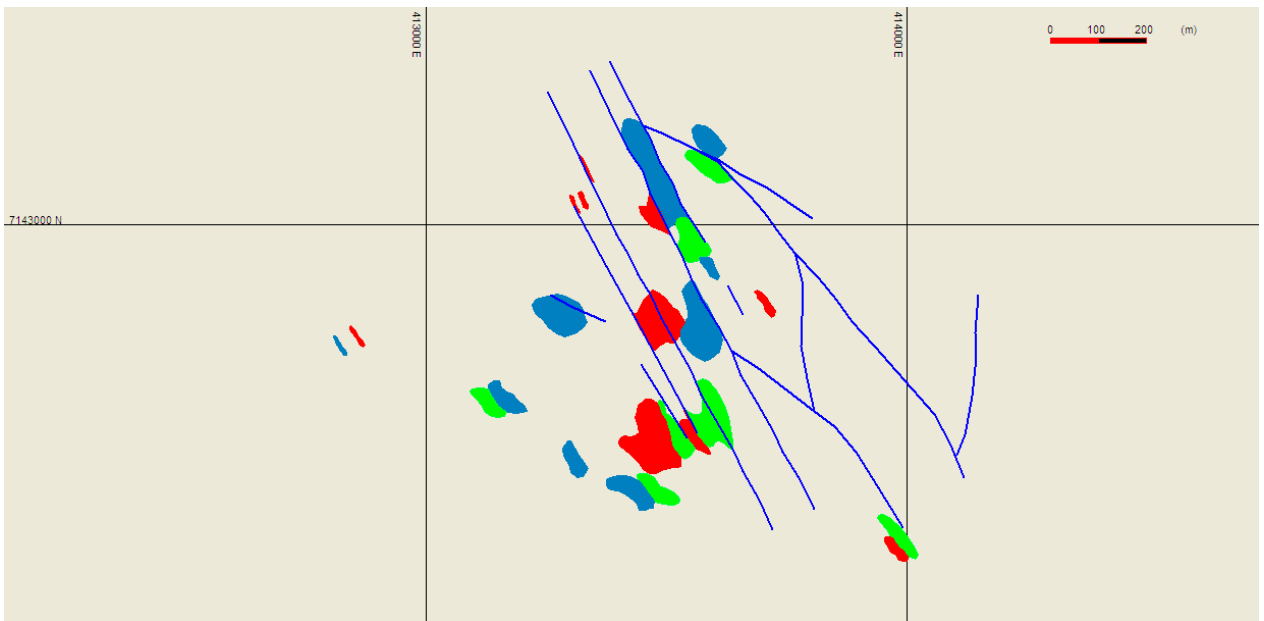
Sección 1025NW



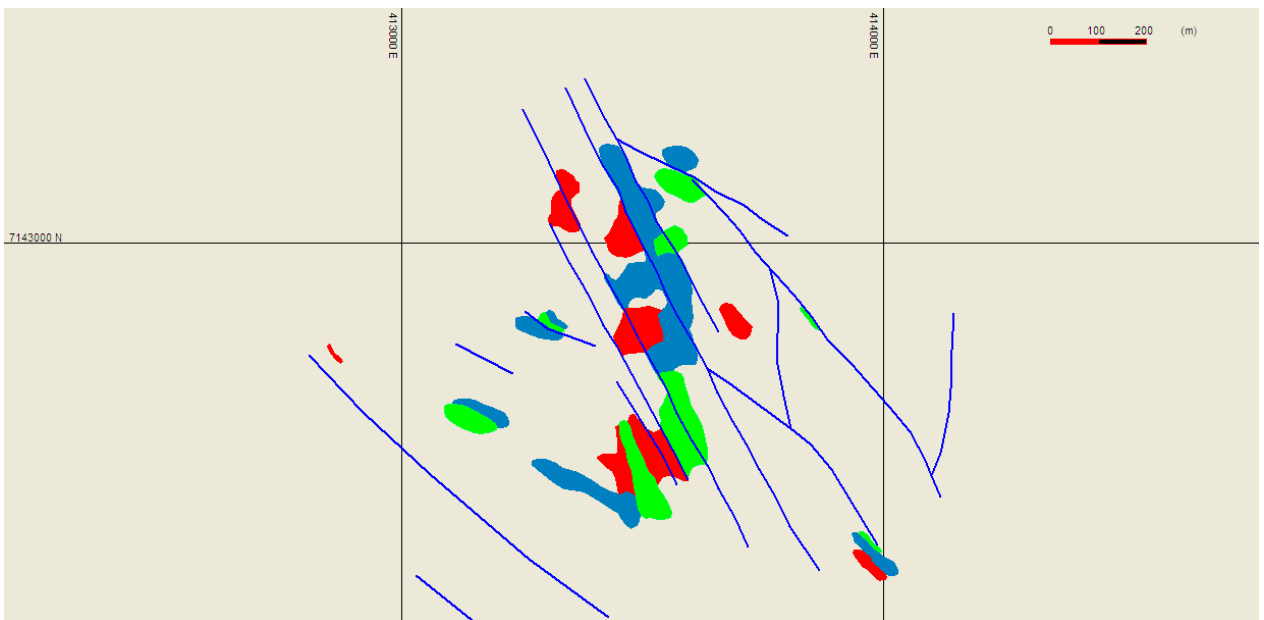
Planta 1610



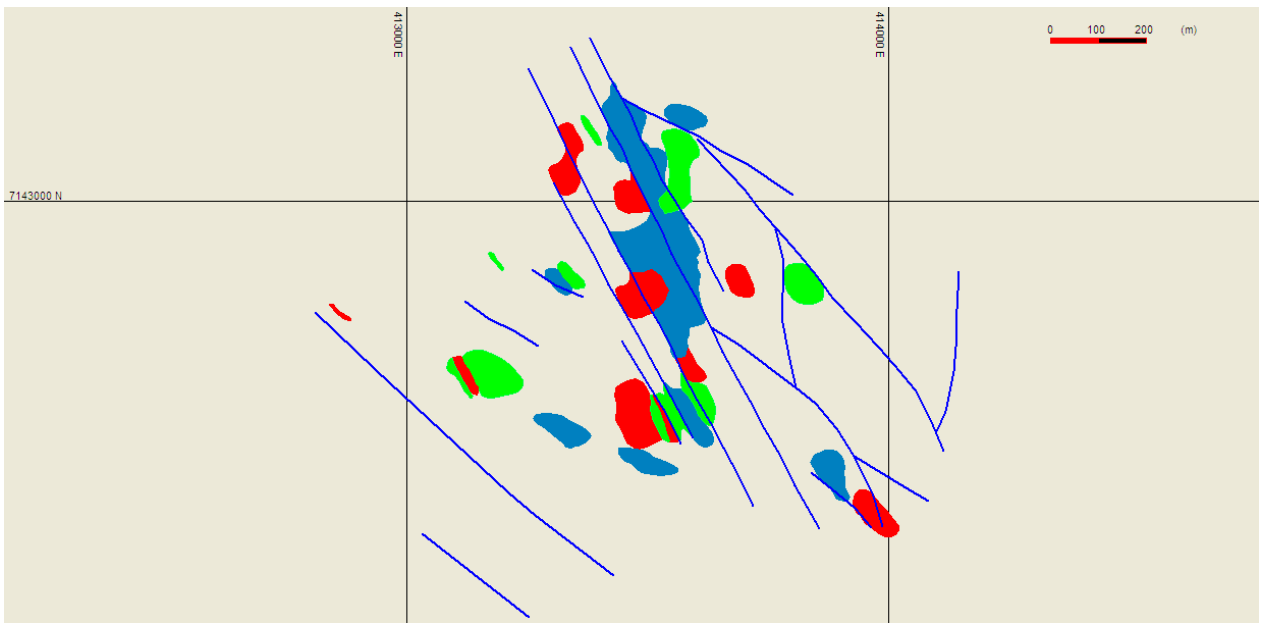
Planta 1615



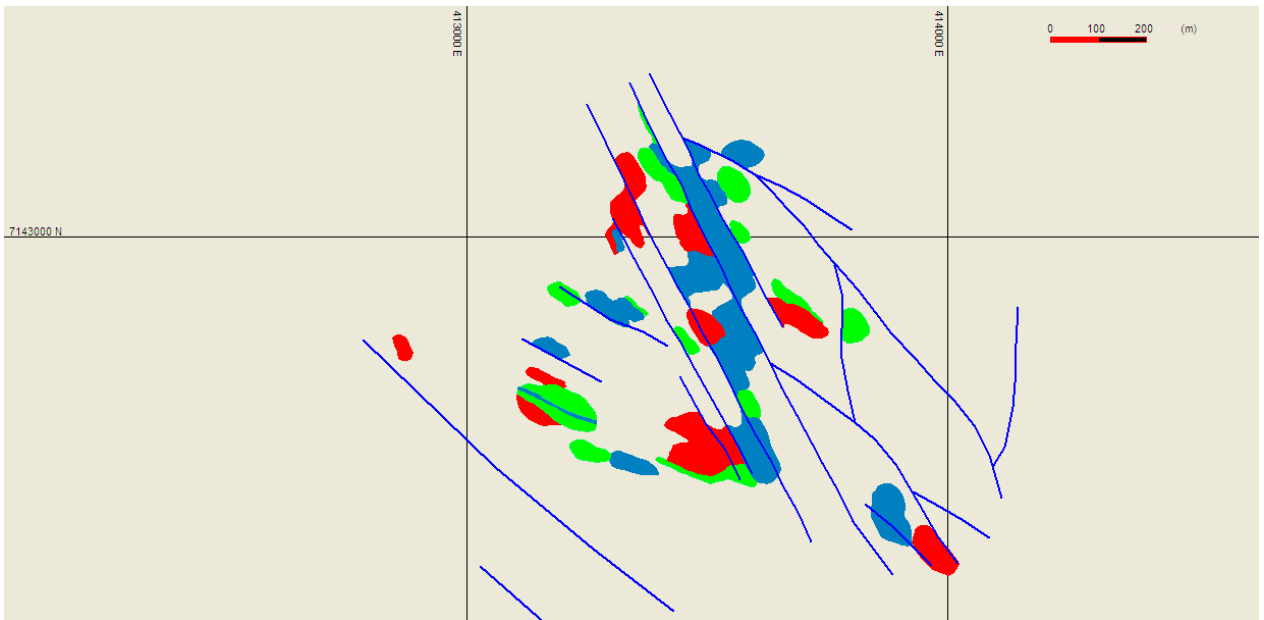
Planta 1620



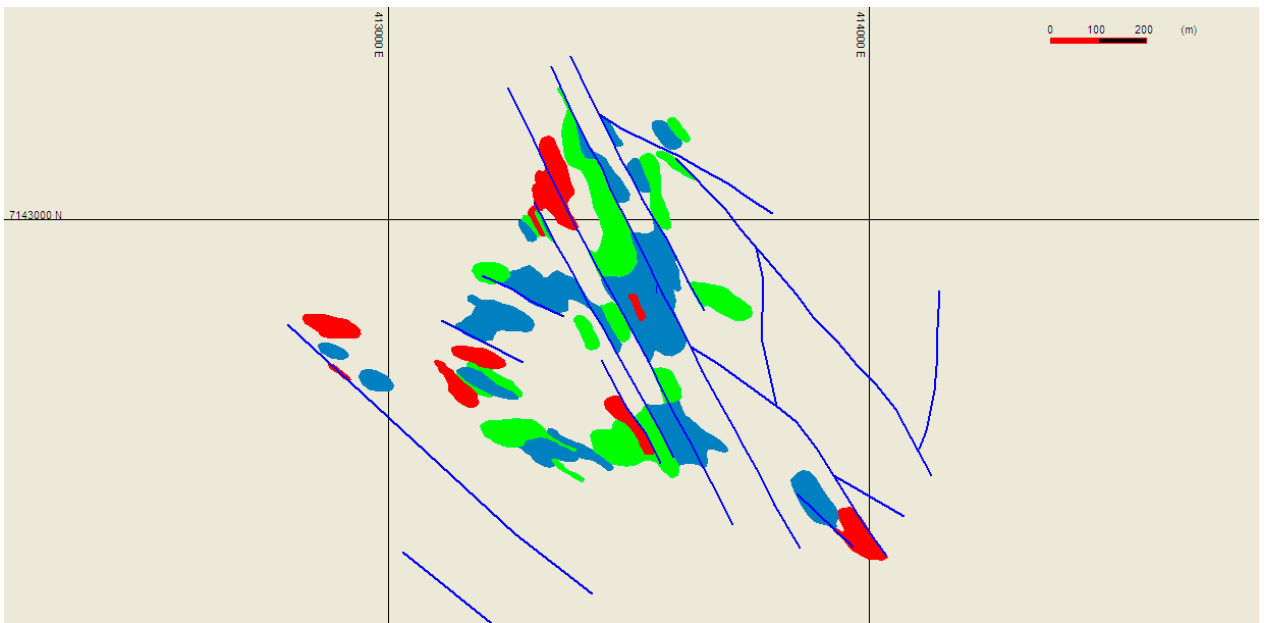
Planta 1625



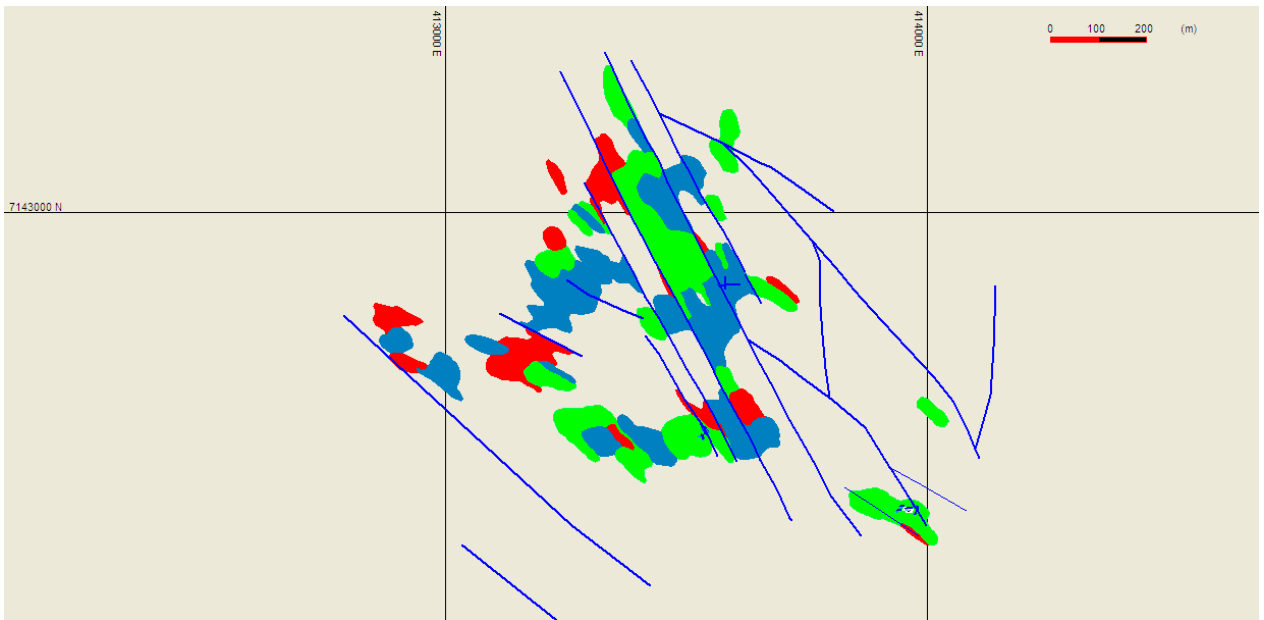
Planta 1630



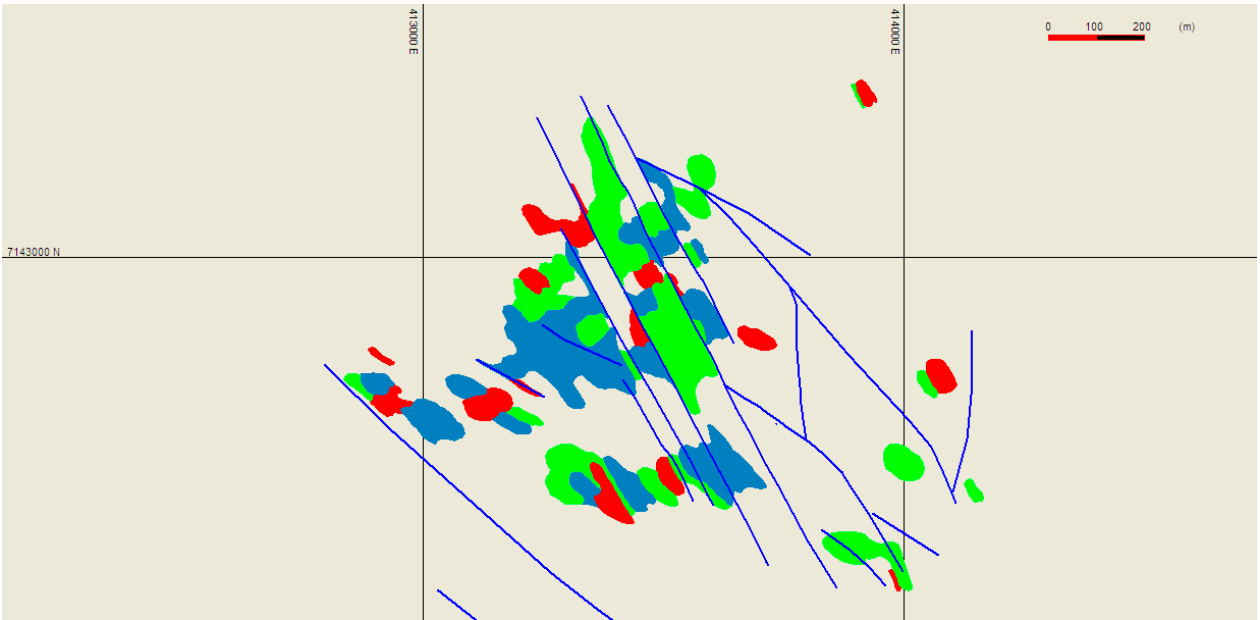
Planta 1635



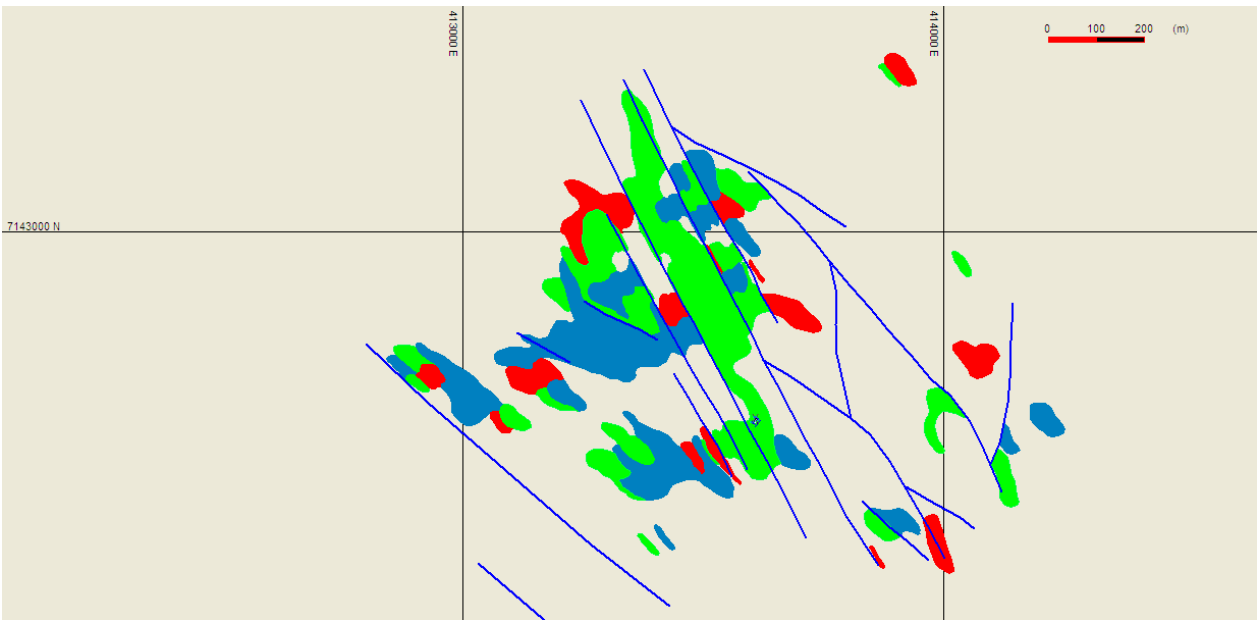
Planta 1640



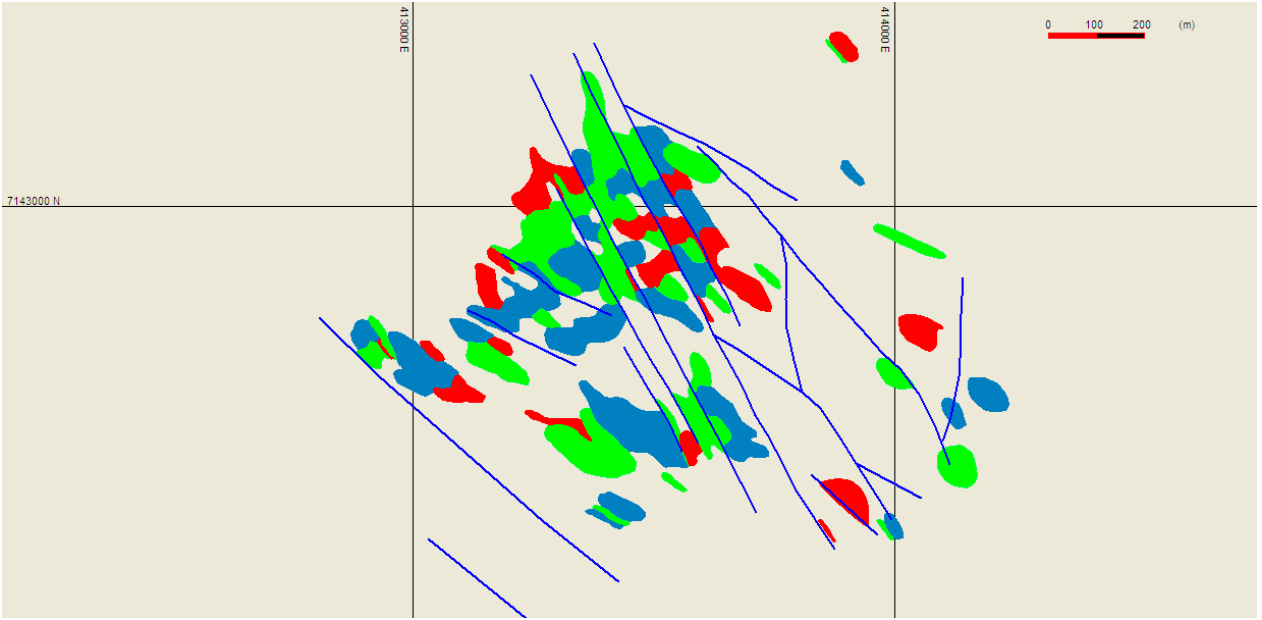
Planta 1645



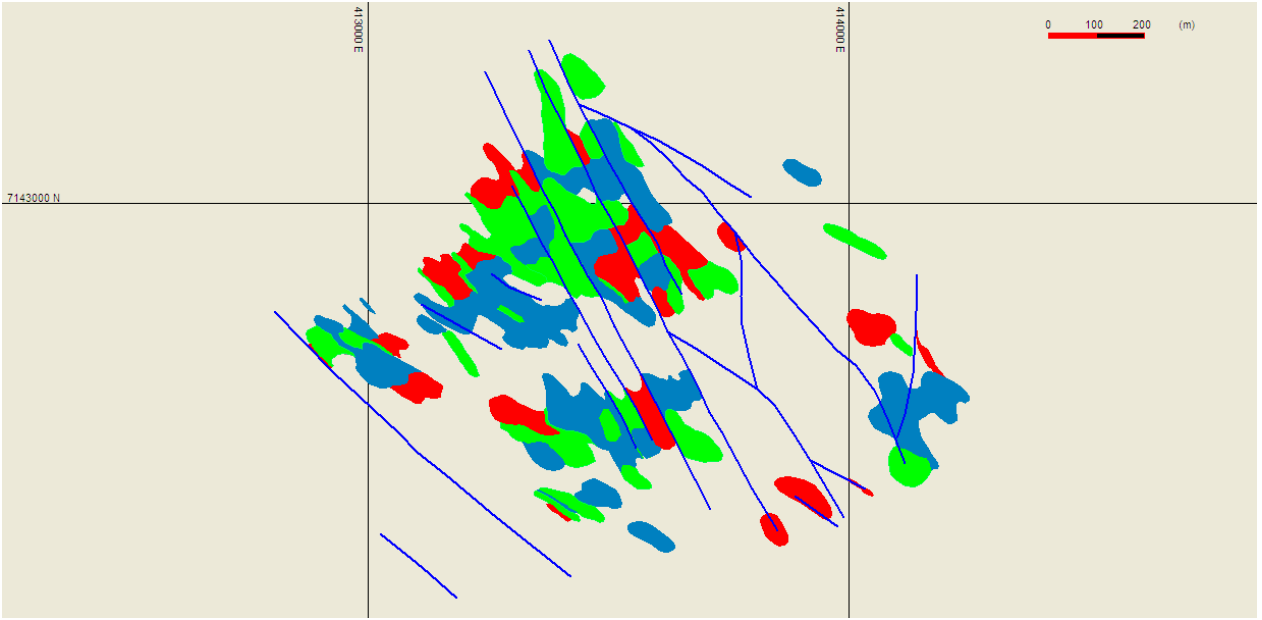
Planta 1650



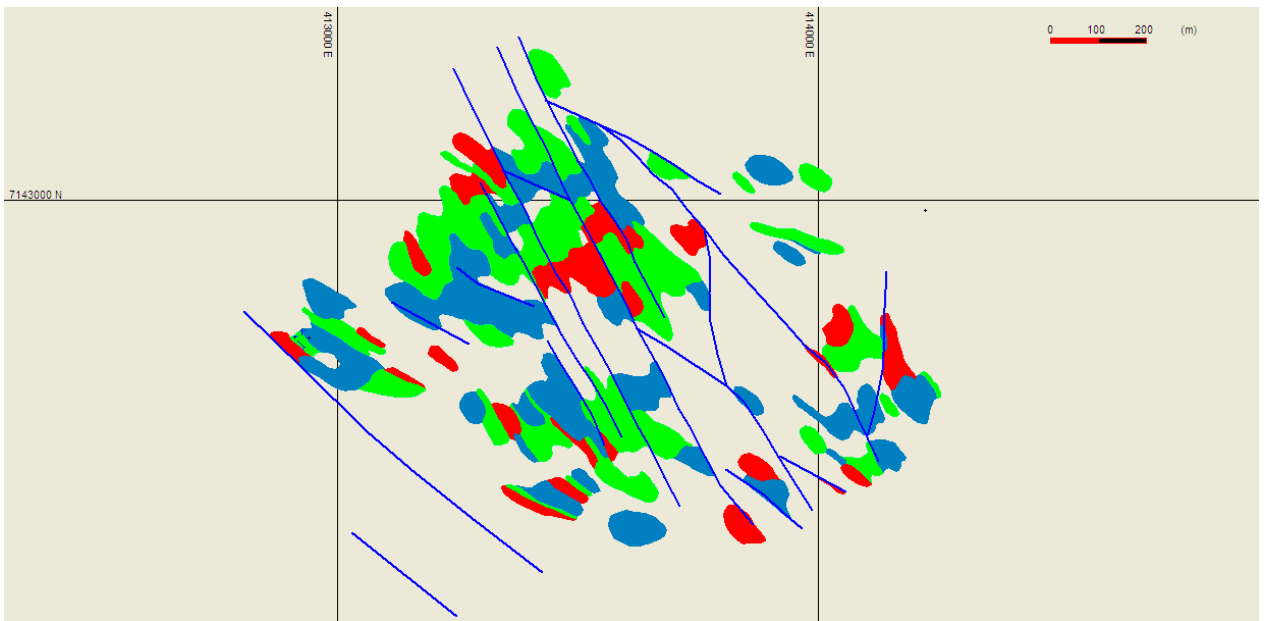
Planta 1655



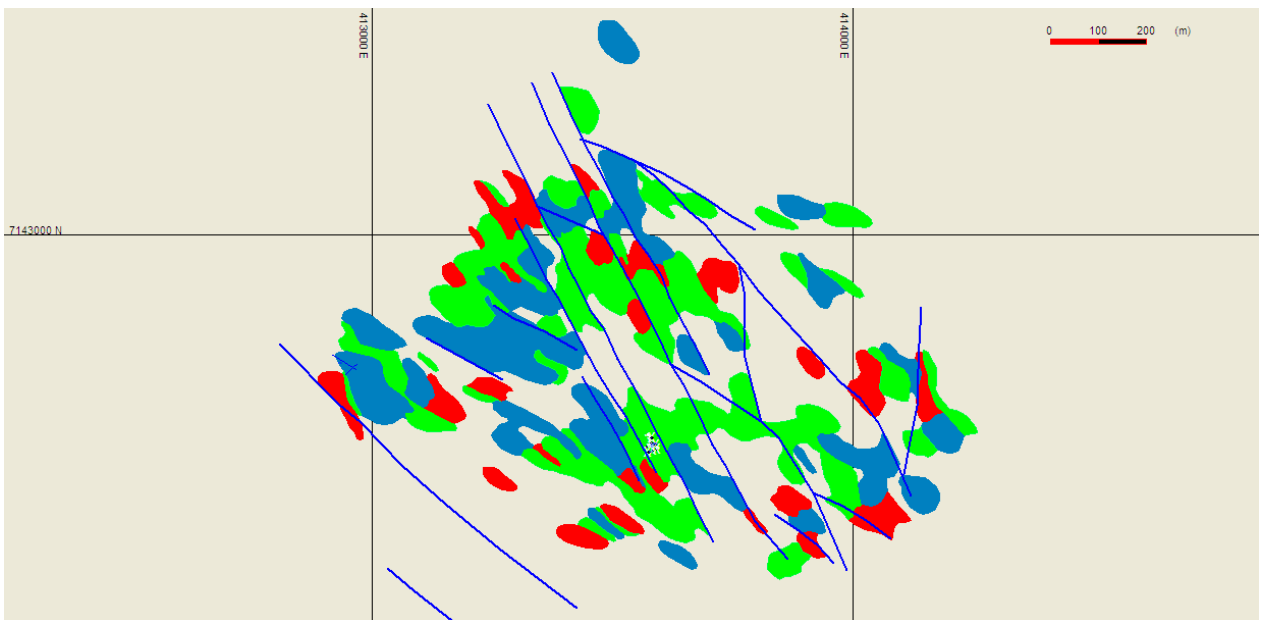
Planta 1660



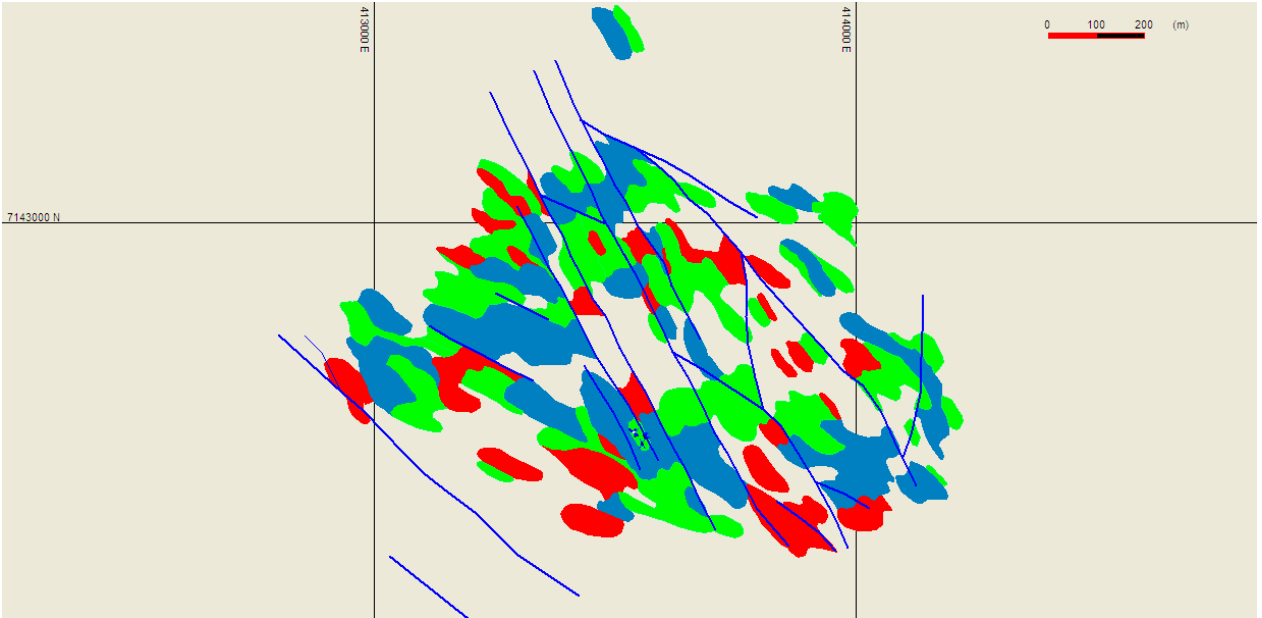
Planta 1665



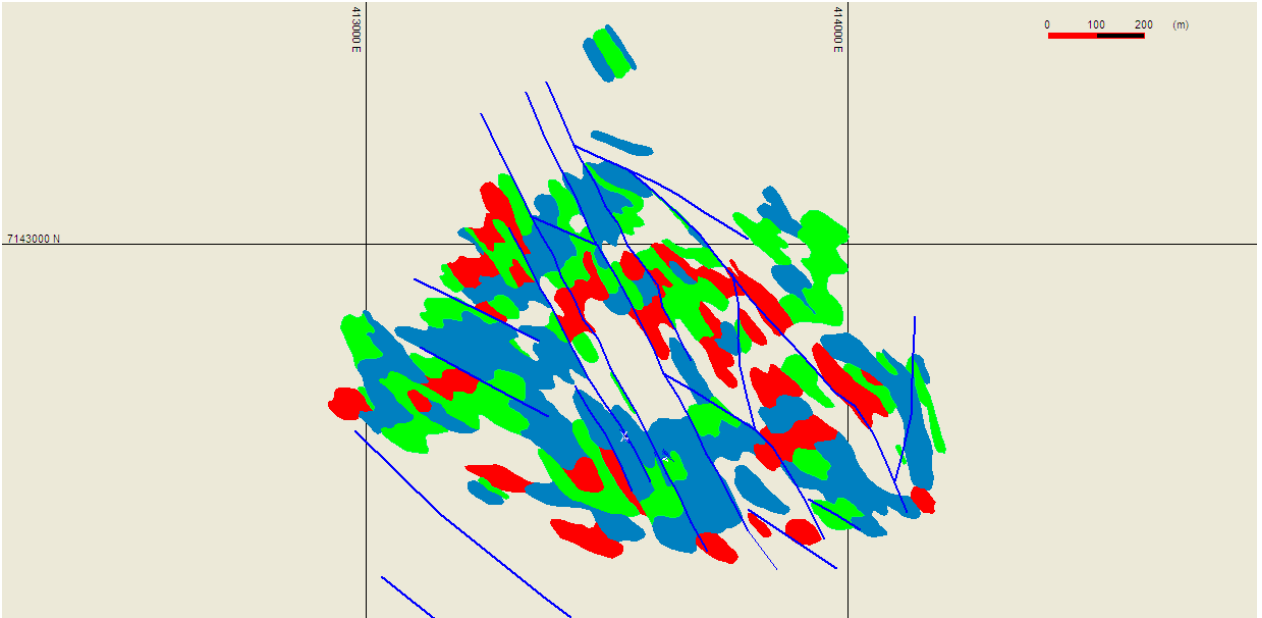
Planta 1670



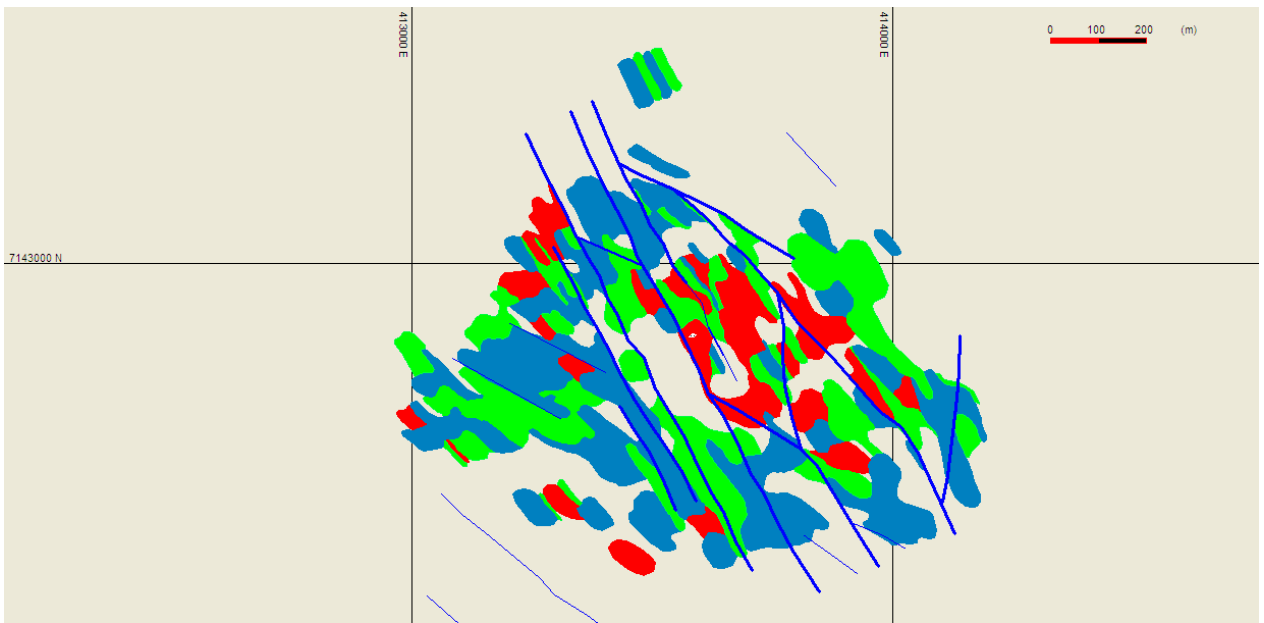
Planta 1675



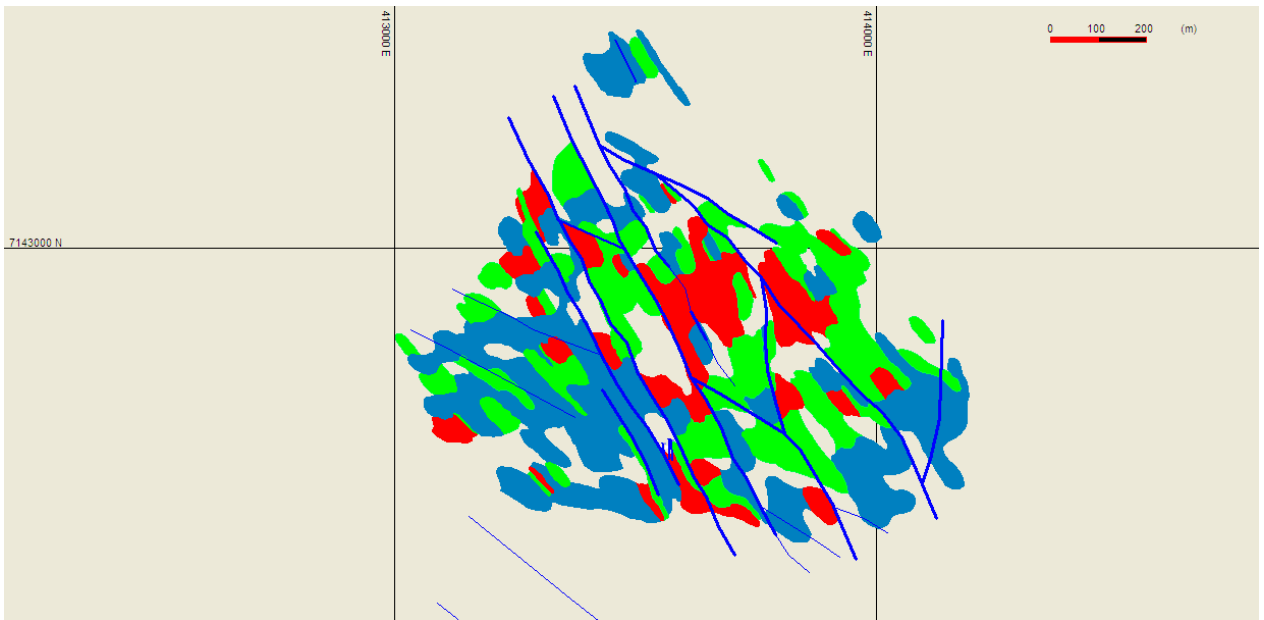
Planta 1680



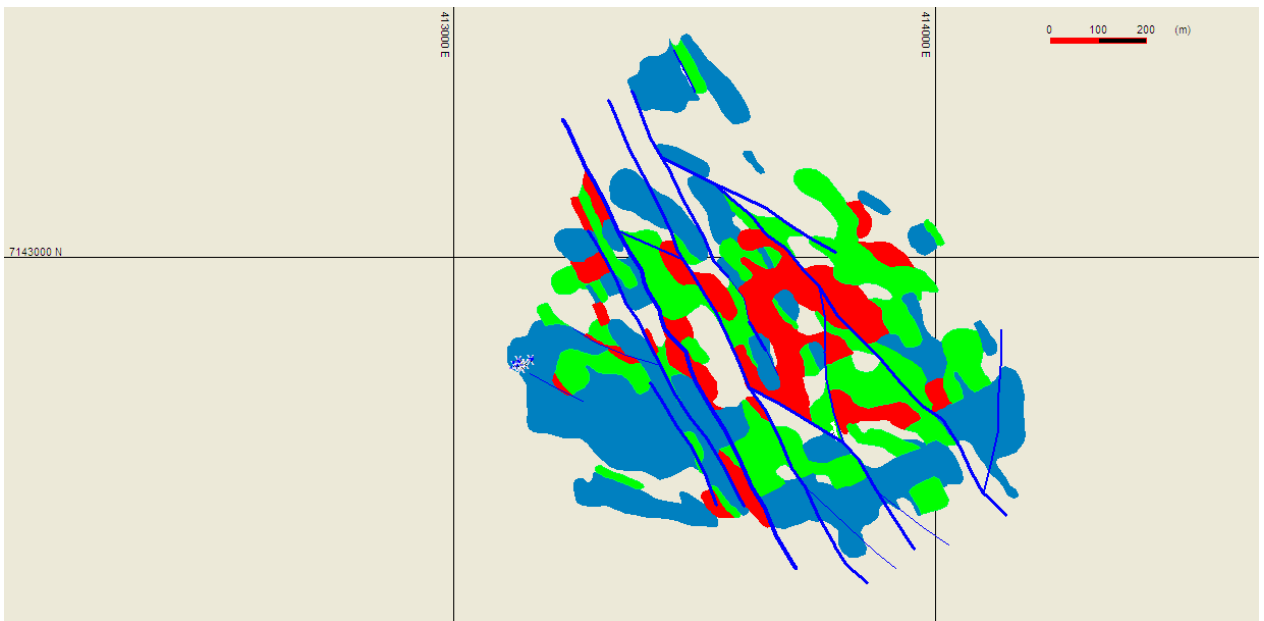
Planta 1685



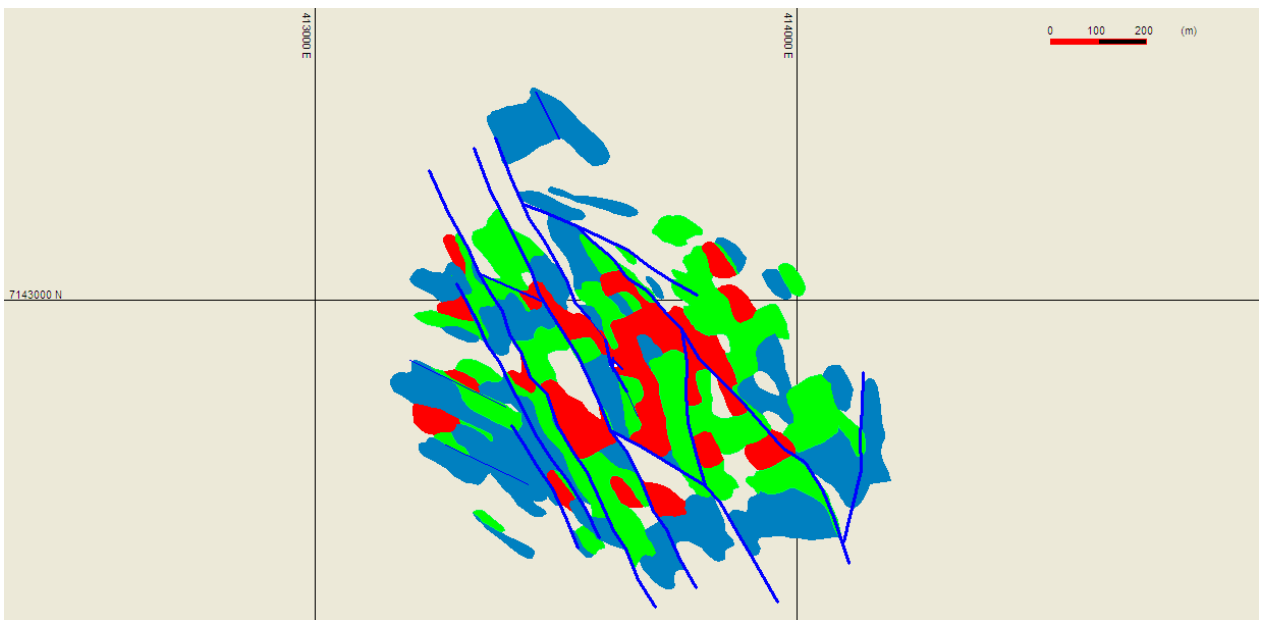
Planta 1690



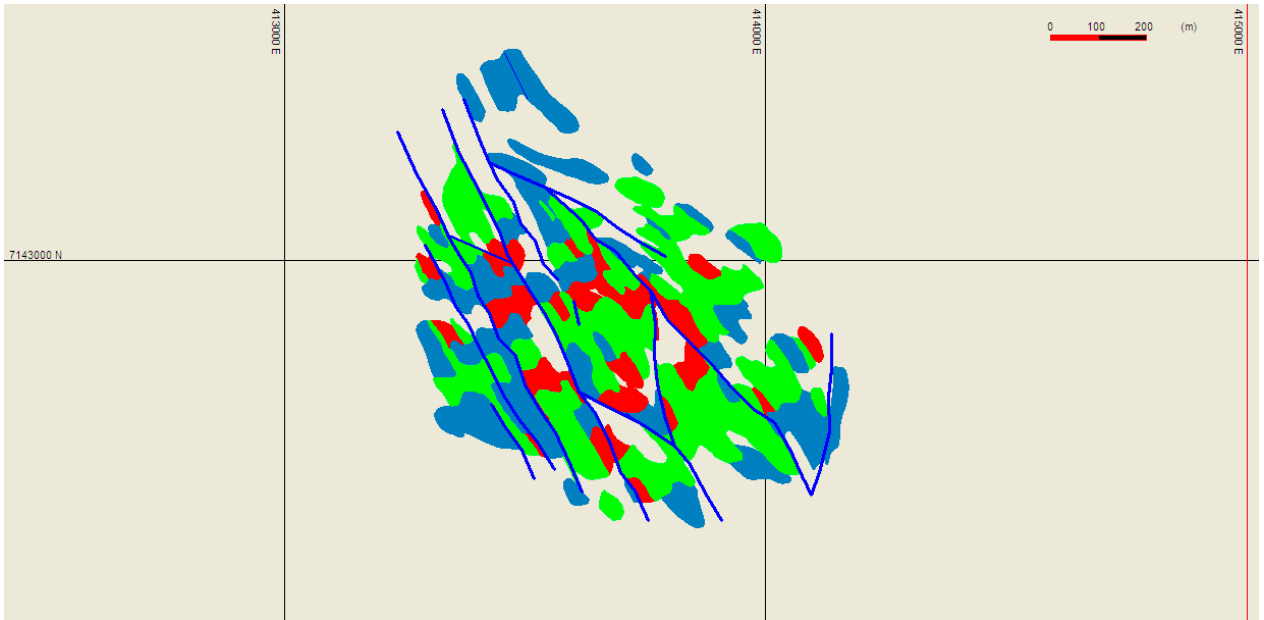
Planta 1695



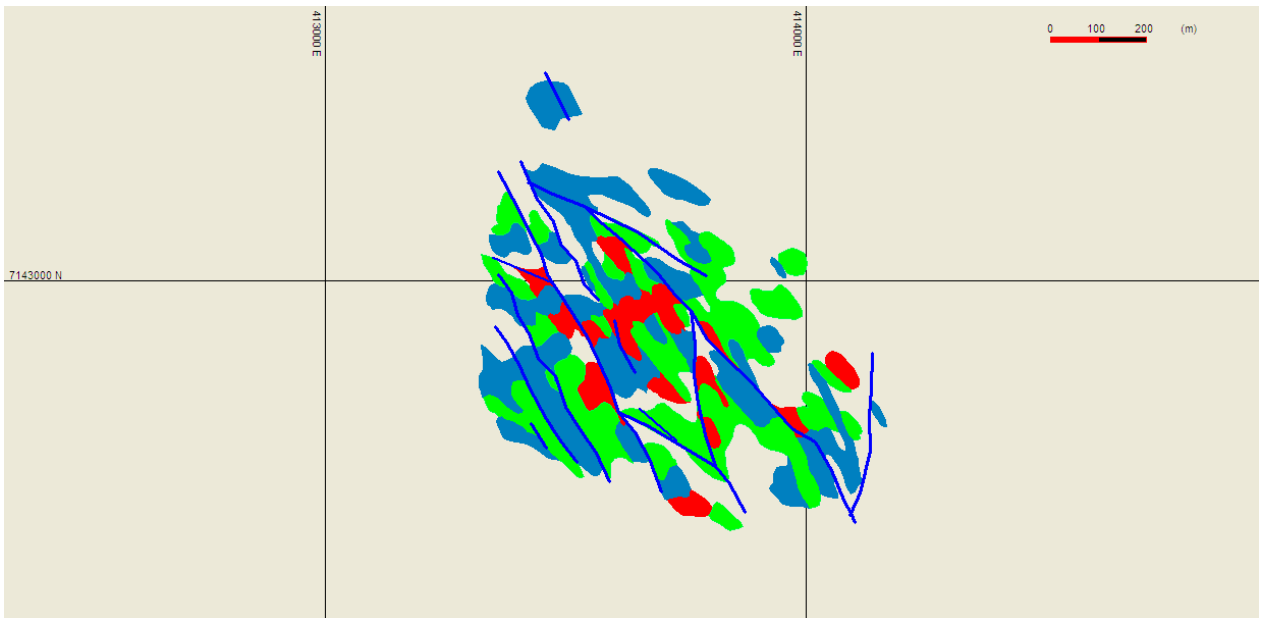
Planta 1700



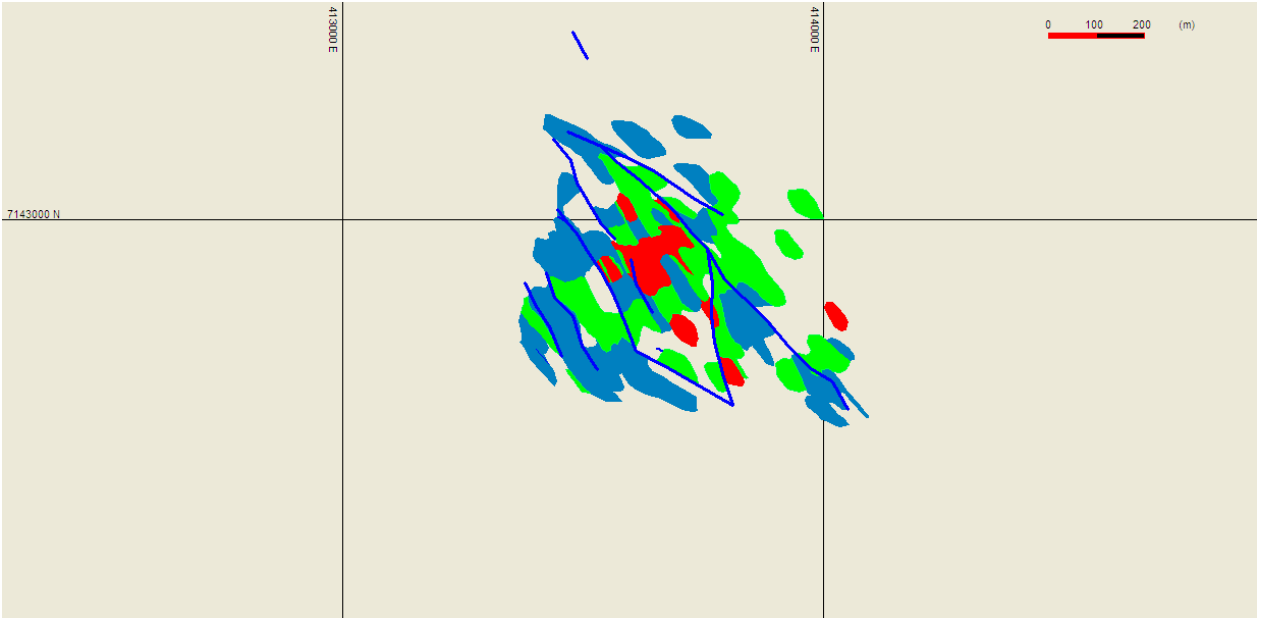
Planta 1705



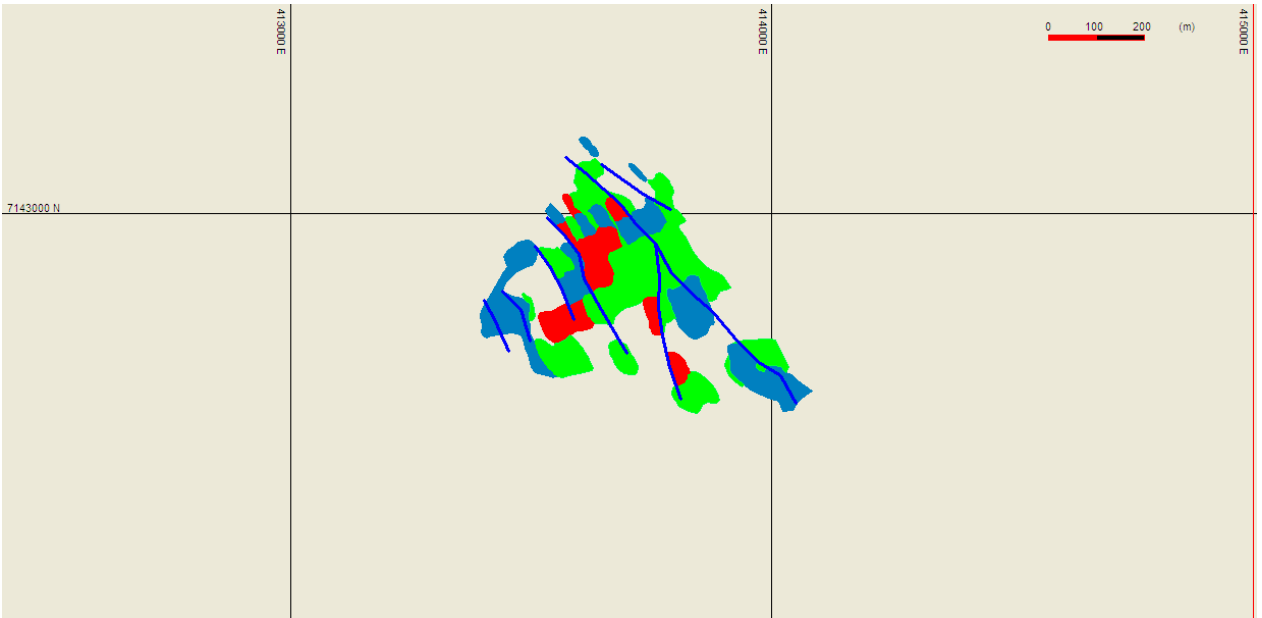
Planta 1710



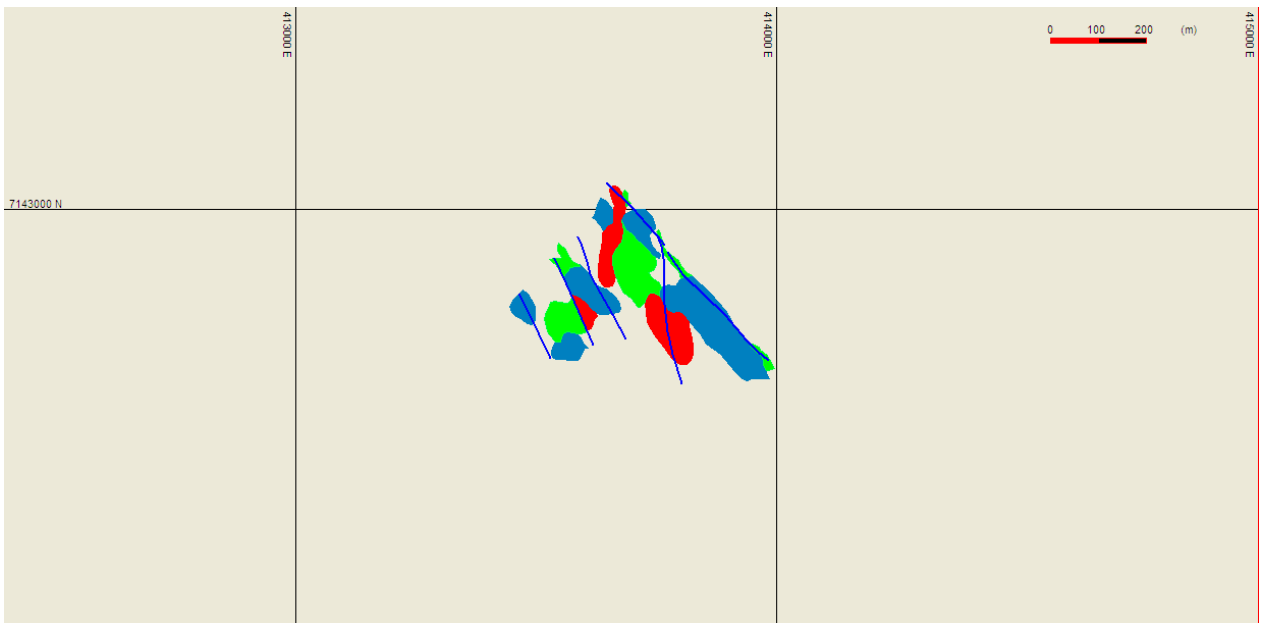
Planta 1715



Planta 1720



Planta 1725



Planta 1730

ANEXO C




MODELO DE BLOQUES DE CARBONATOS

SECCIONES

Y

PLANTAS

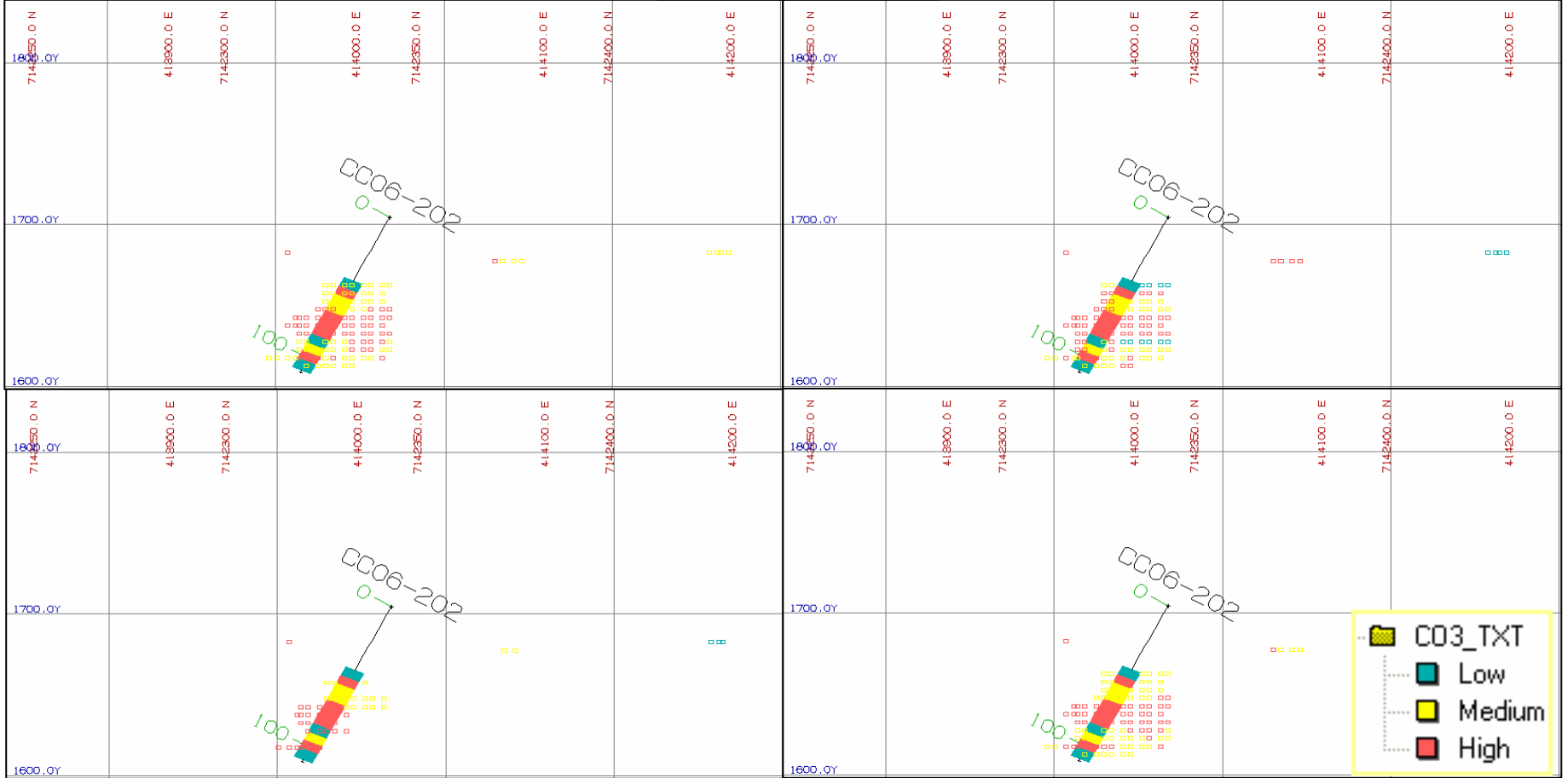
Leyenda

-  Alto >6%
-  Medio >3.5%
-  Bajo =<3.5%

Caso 1

-0050 NW

Caso 2



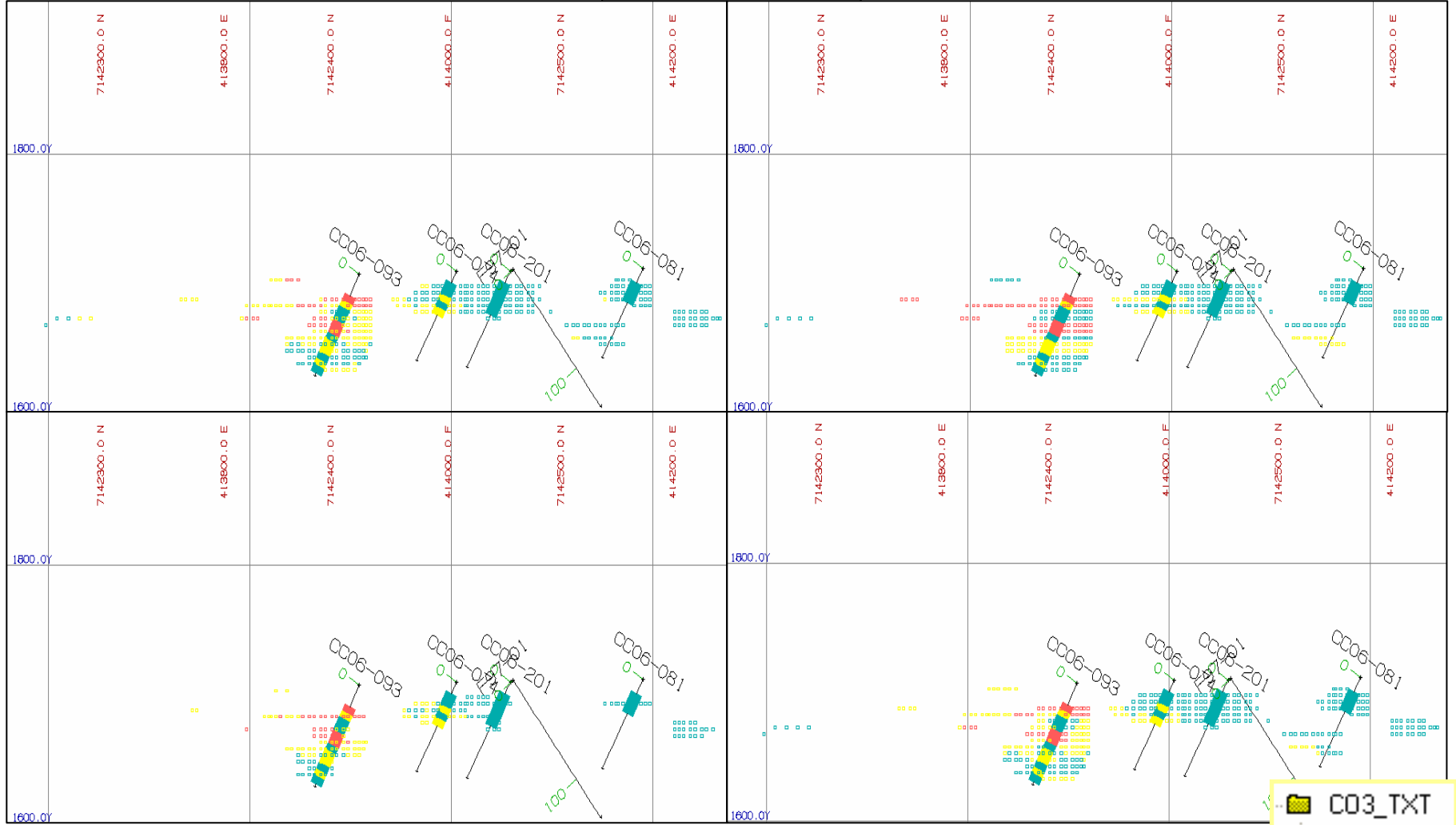
Caso 3

Caso 4

Caso 1

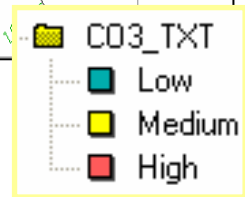
0050 NW

Caso 2



Caso 3

Caso 4



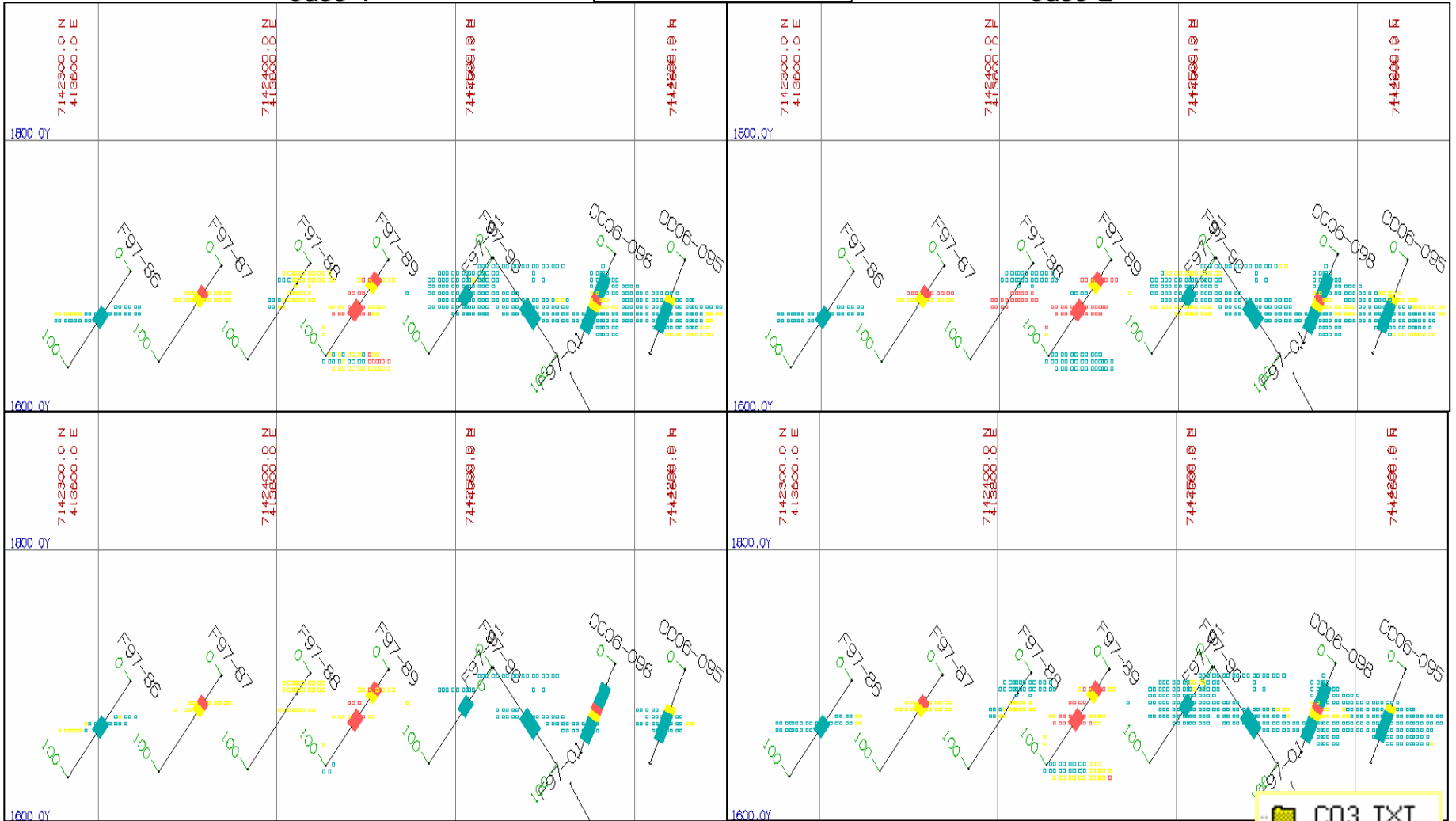
0100 NW

Caso 1

Caso 2

Caso 3

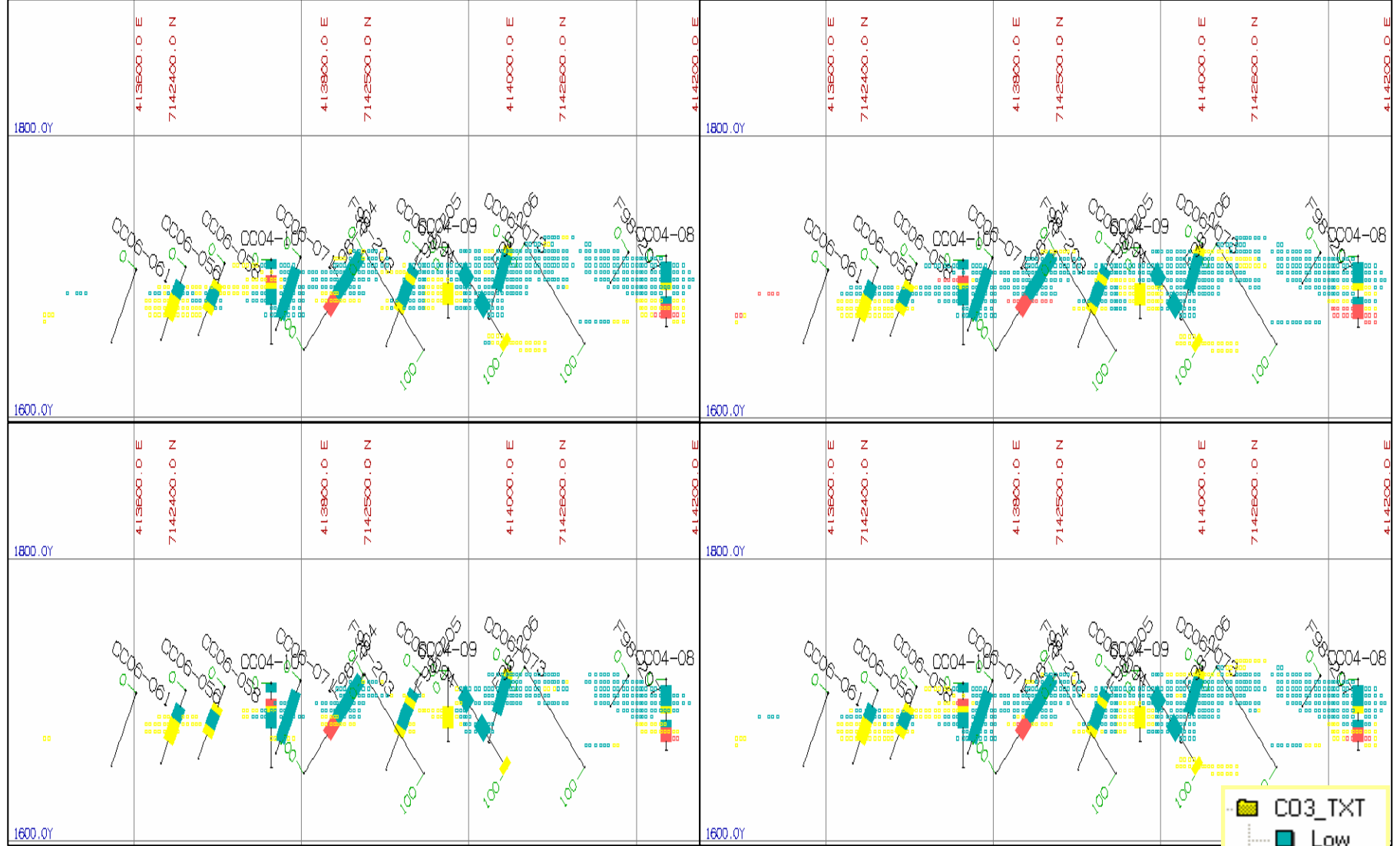
Caso 4



Caso 1

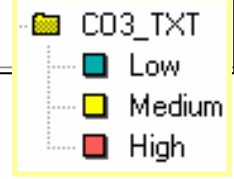
0167 NW

Caso 2



Caso 3

Caso 4



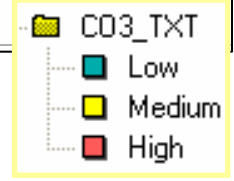
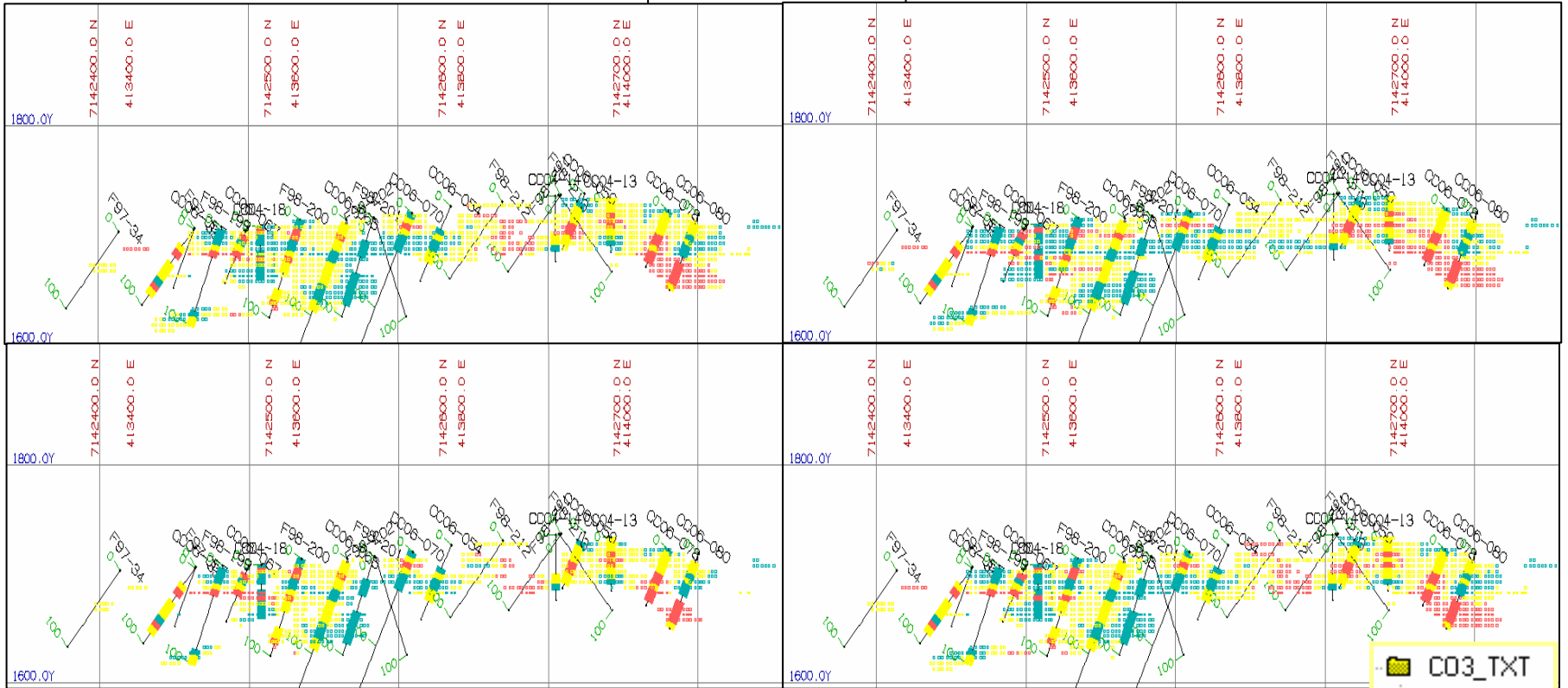
Caso 1

O280 NW

Caso 2

Caso 3

Caso 4



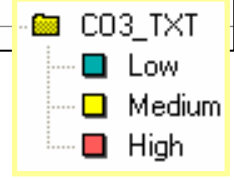
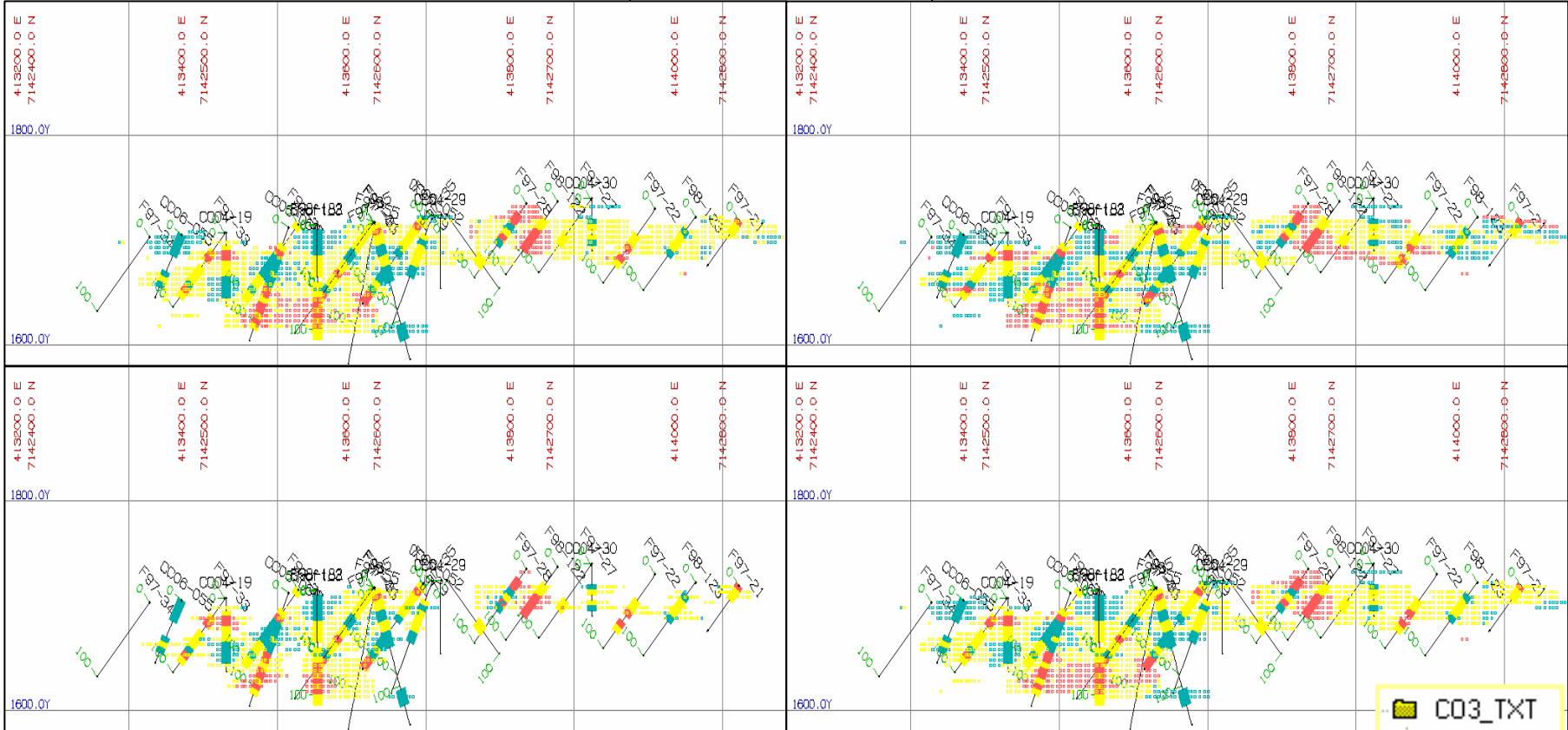
Caso 1

0348 NW

Caso 2

Caso 3

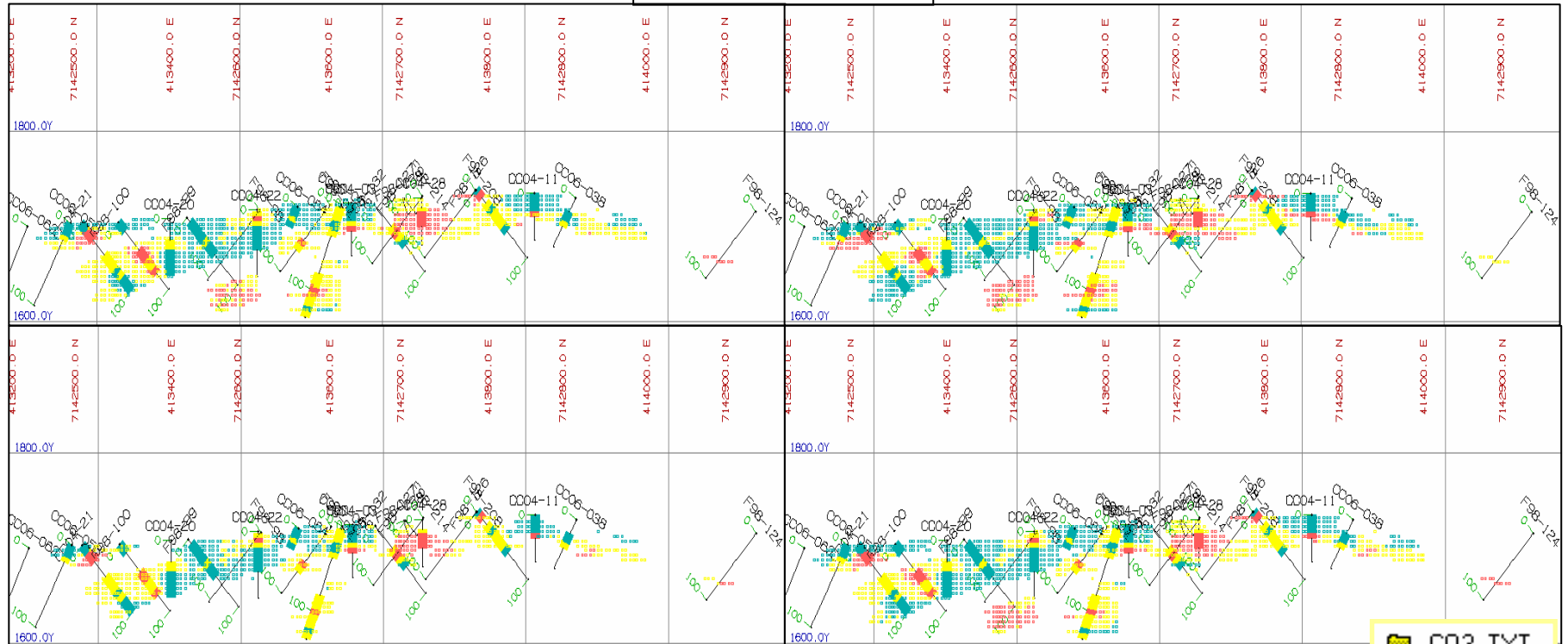
Caso 4



Caso 1

0414 NW

Caso 2



Caso 3

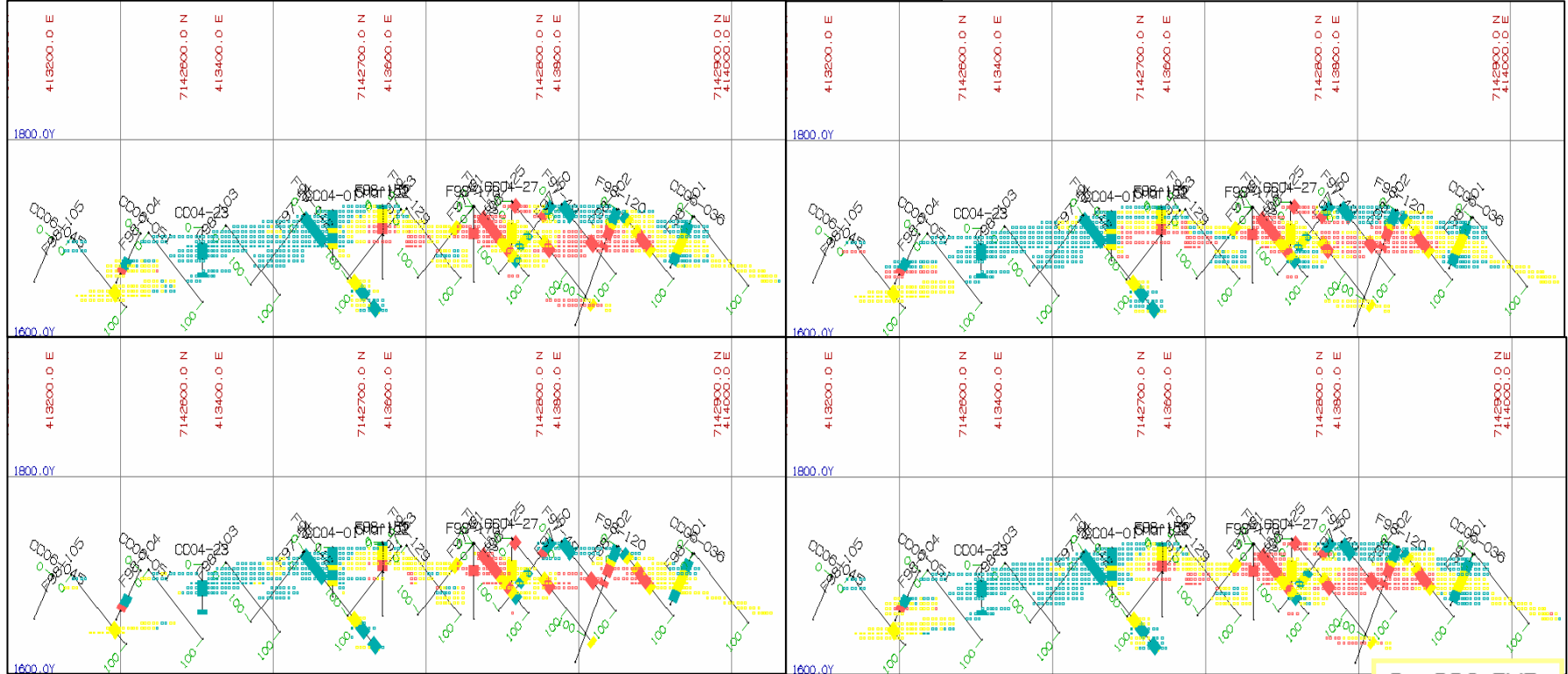
Caso 4



Caso 1

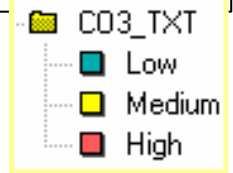
0469 NW

Caso 2



Caso 3

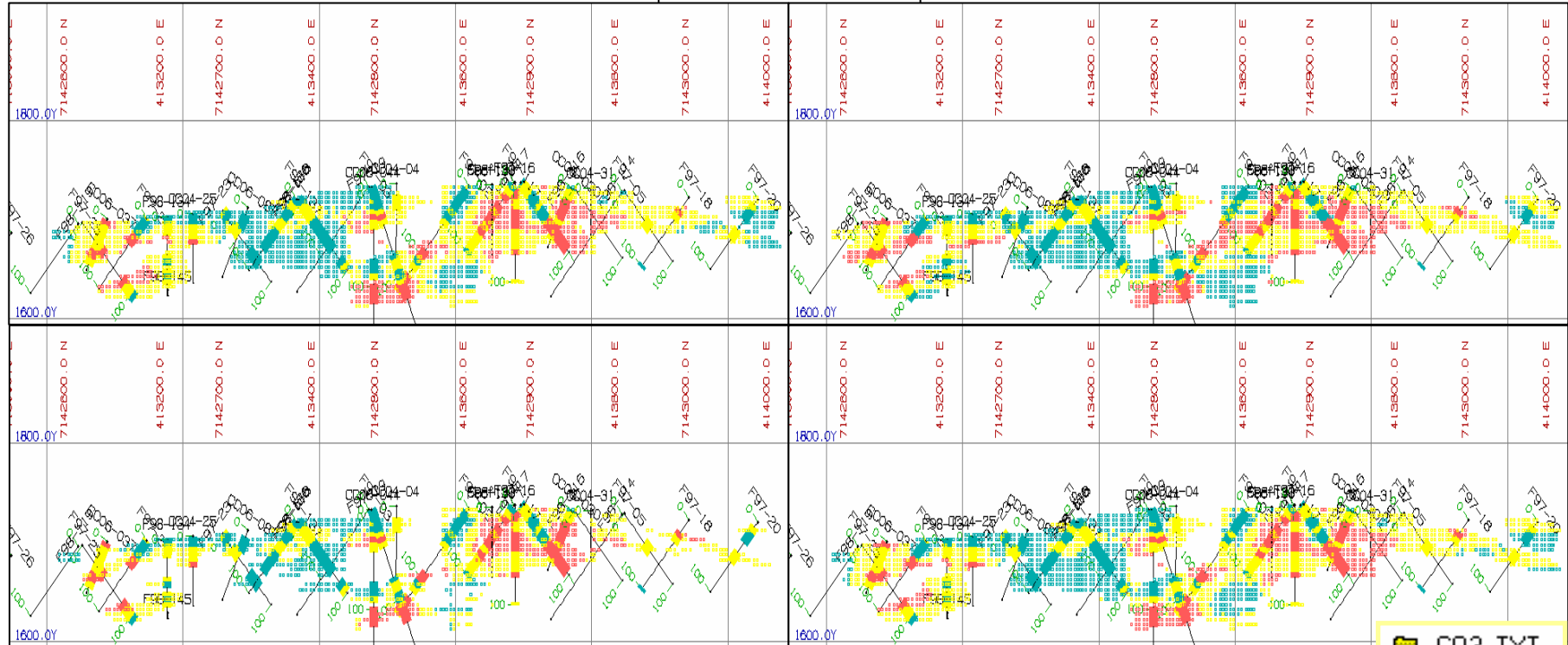
Caso 4



Caso 1

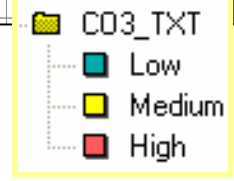
0594 NW

Caso 2



Caso 3

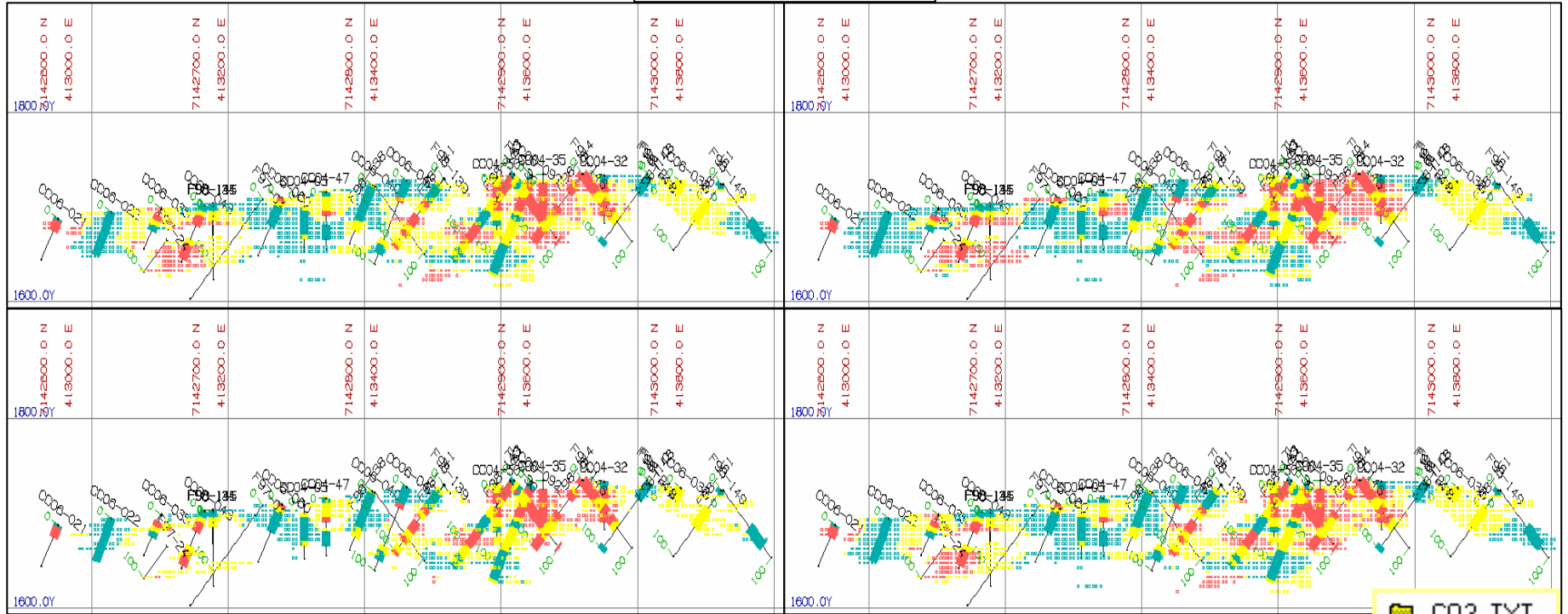
Caso 4



Caso 1

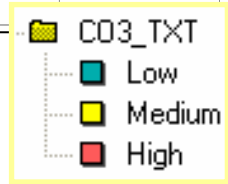
0644 NW

Caso 2



Caso 3

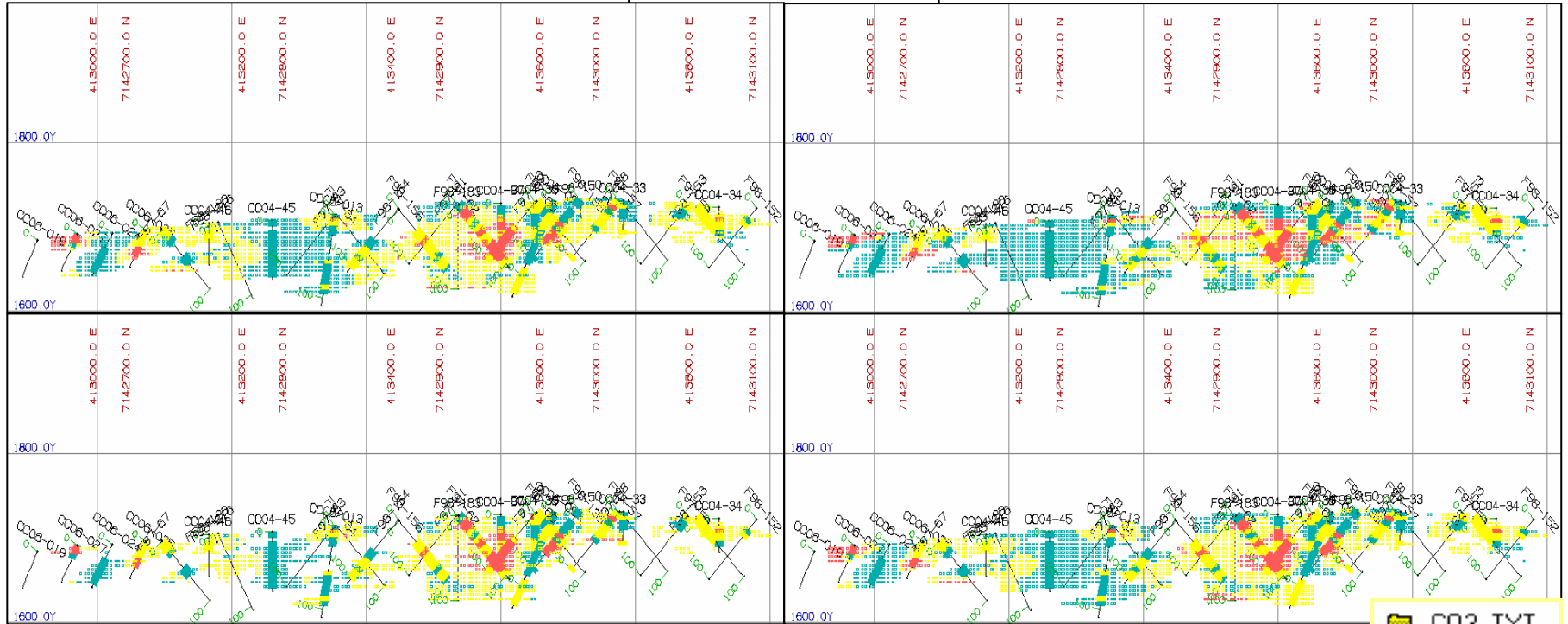
Caso 4



Caso 1

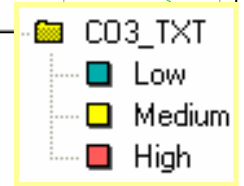
0698 NW

Caso 2



Caso 3

Caso 4



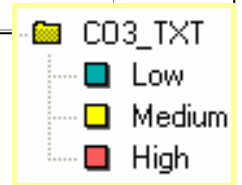
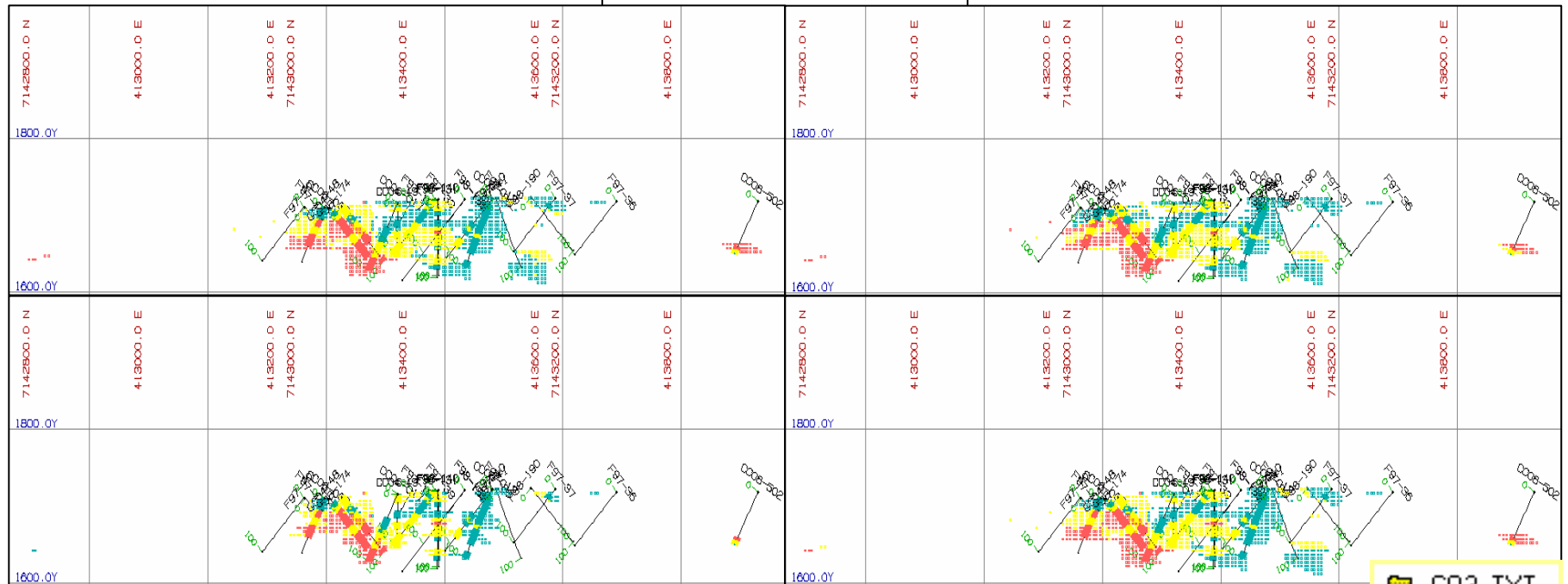
Caso 1

0883 NW

Caso 2

Caso 3

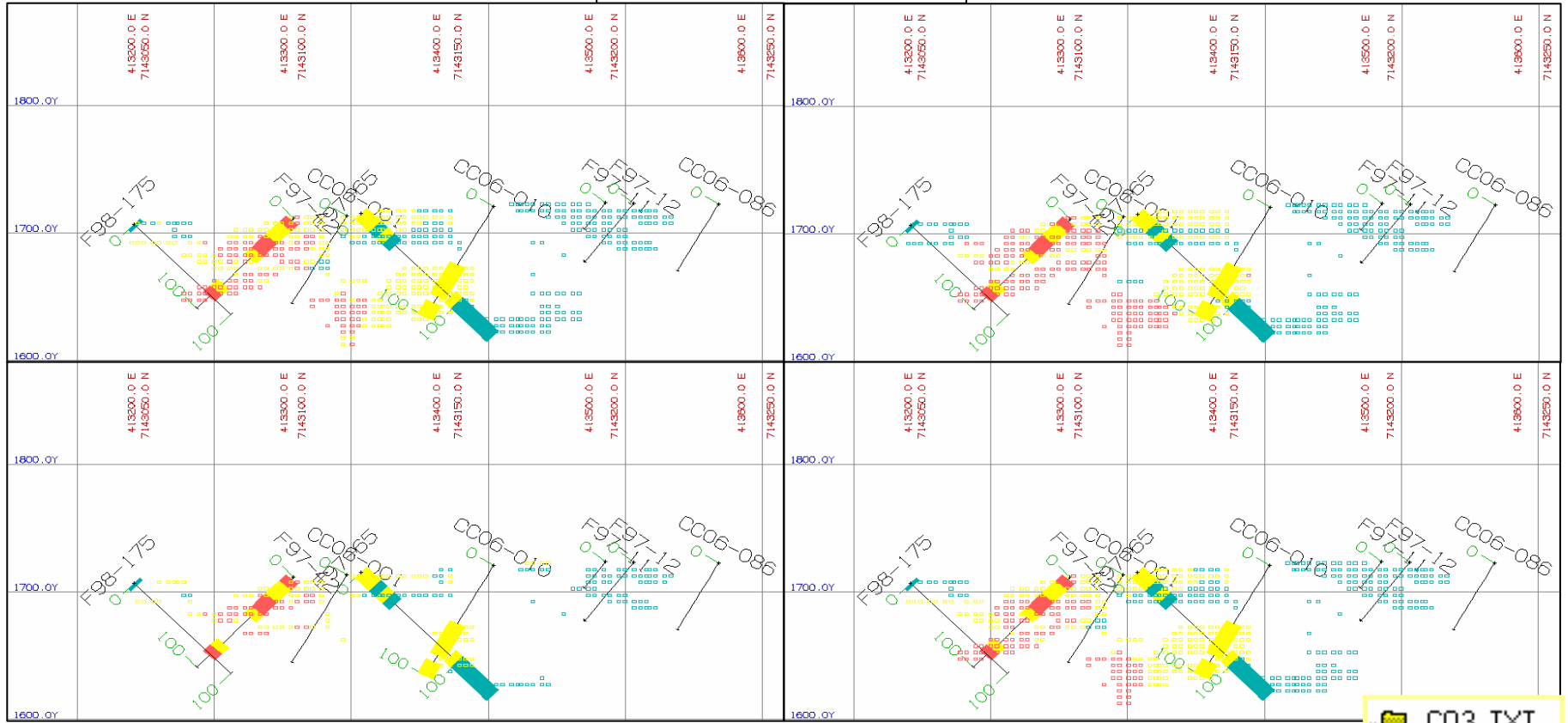
Caso 4



Caso 1

0939 NW

Caso 2



Caso 3

Caso 4



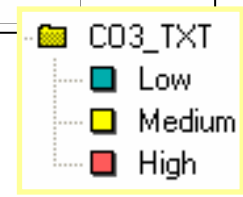
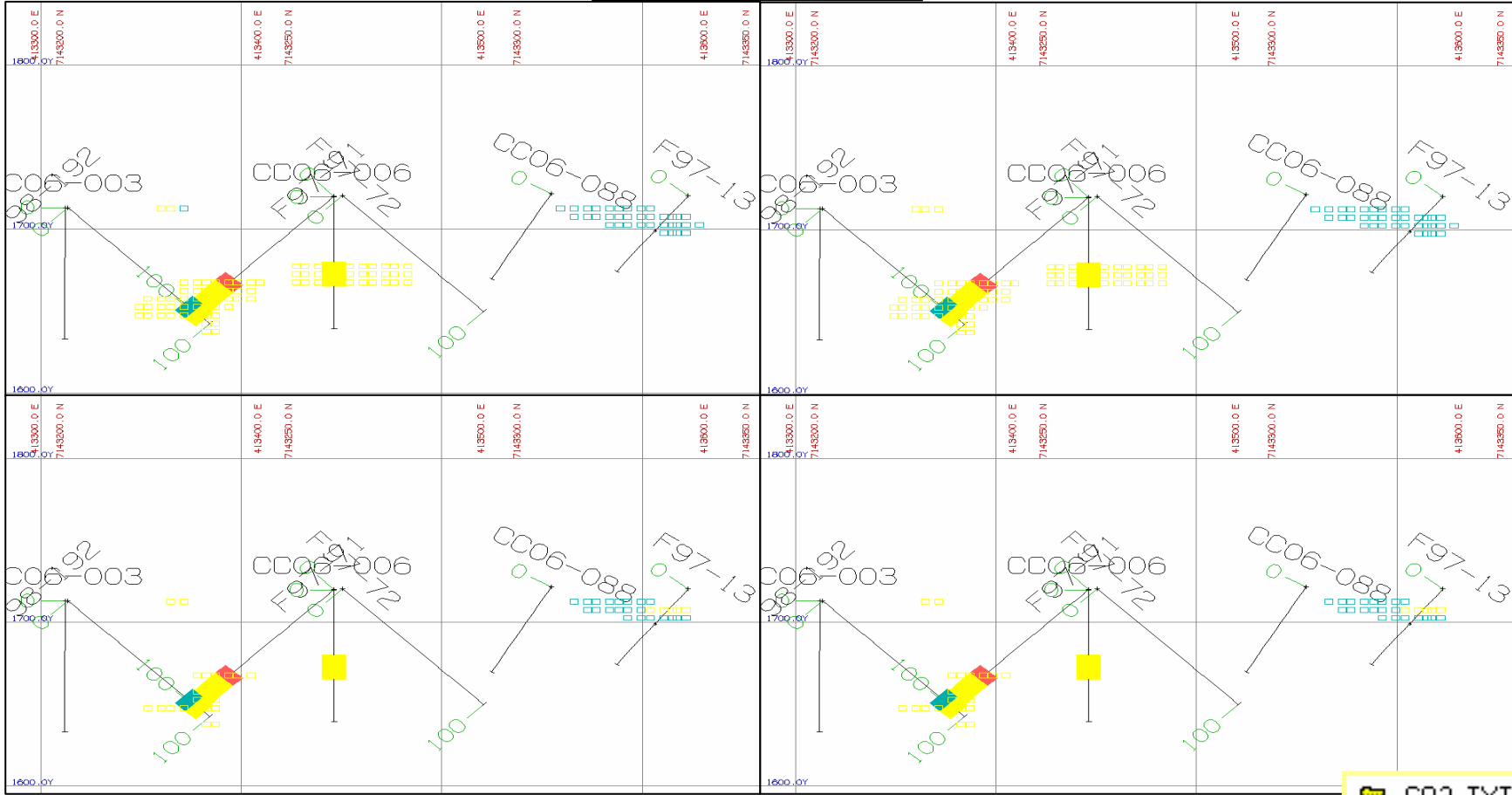
Caso 1

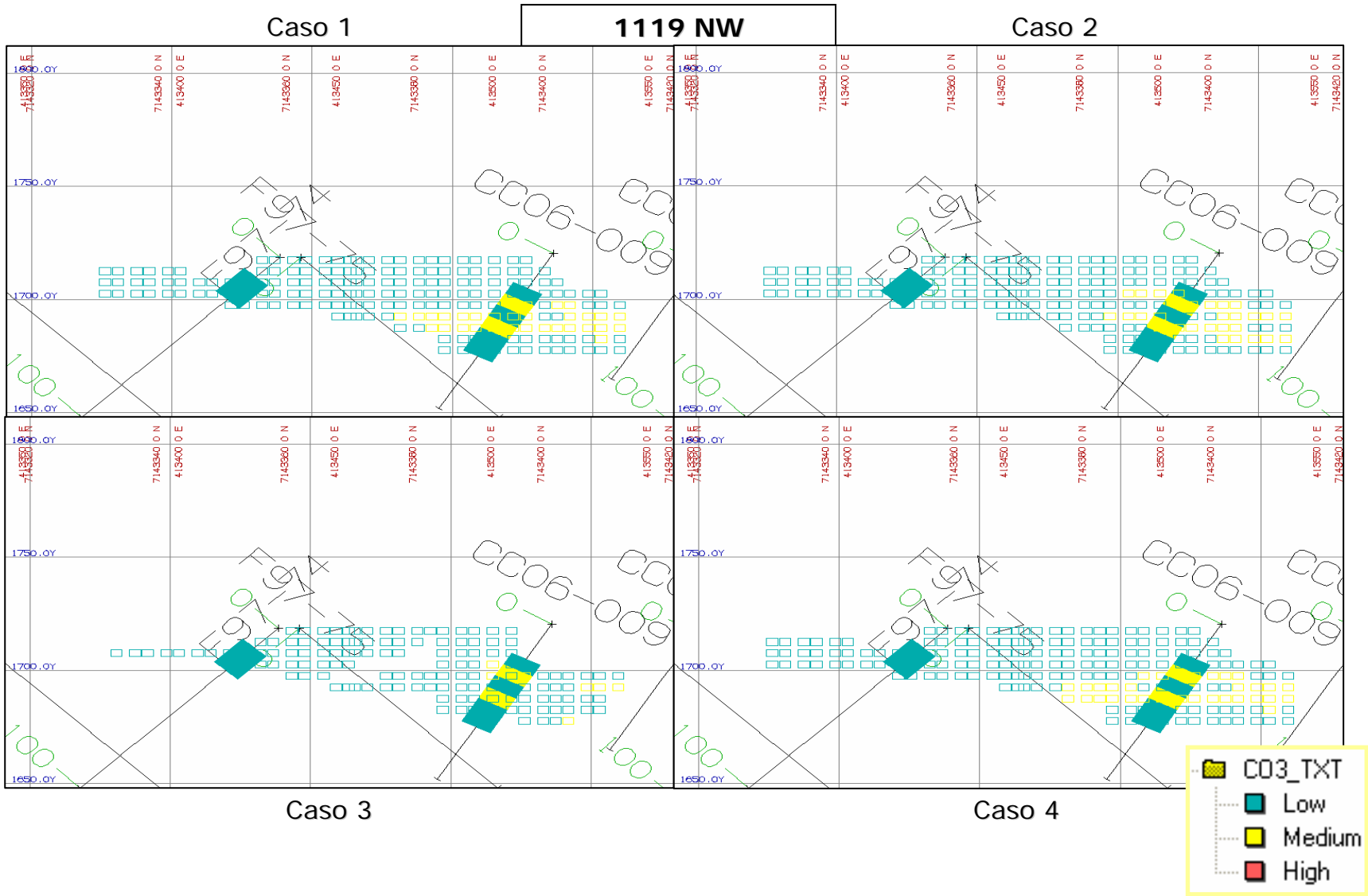
1025 NW

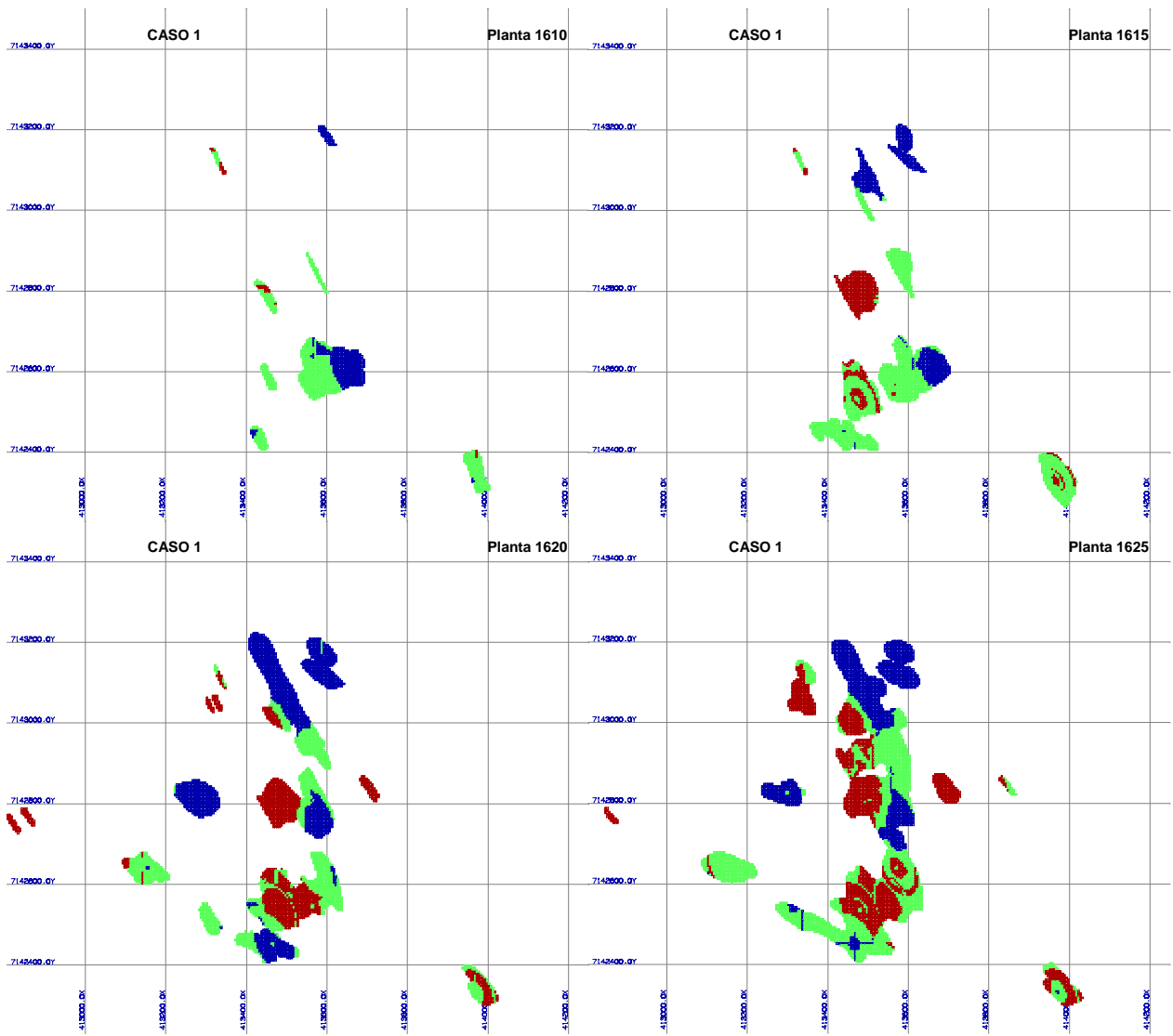
Caso 2

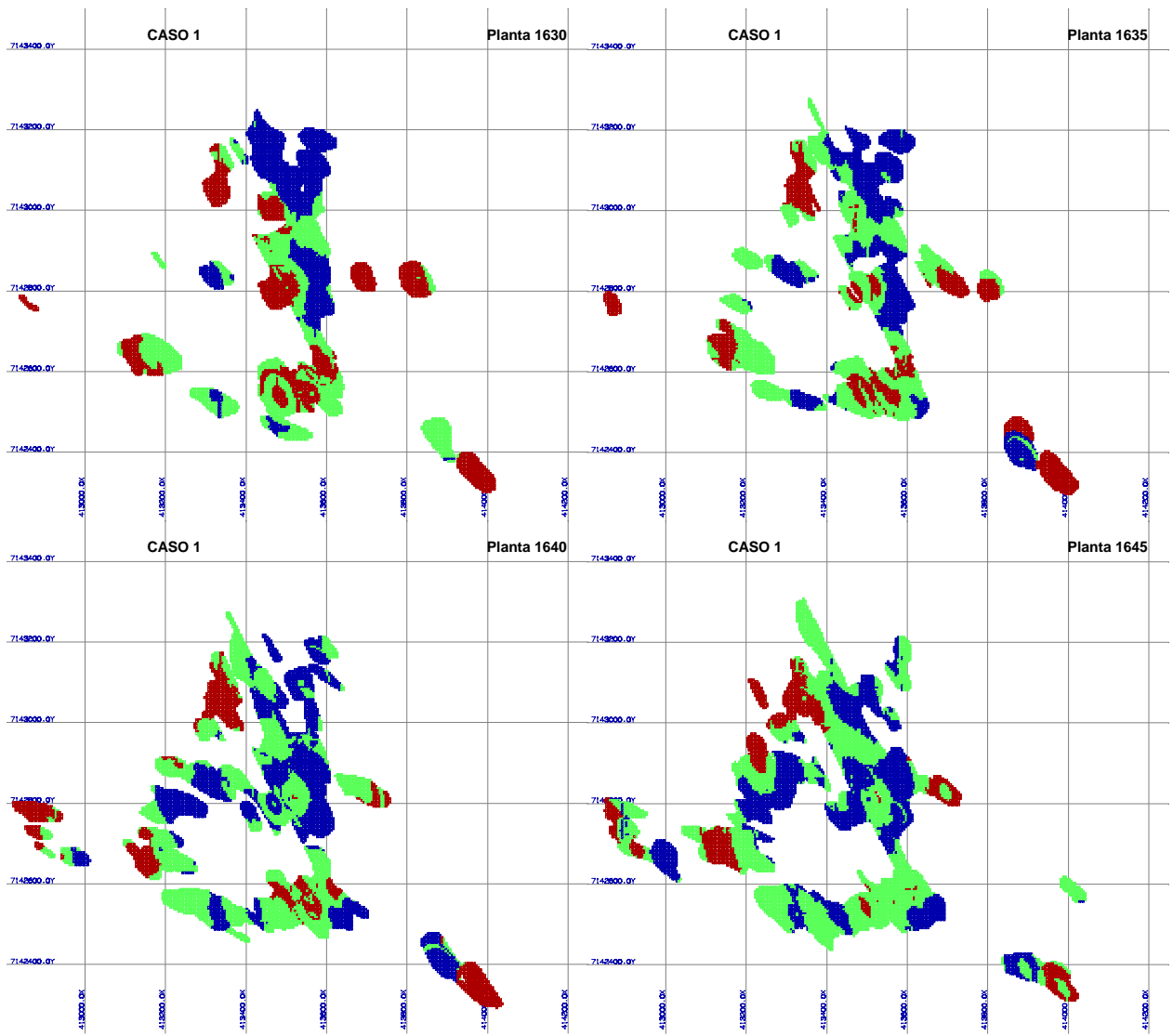
Caso 3

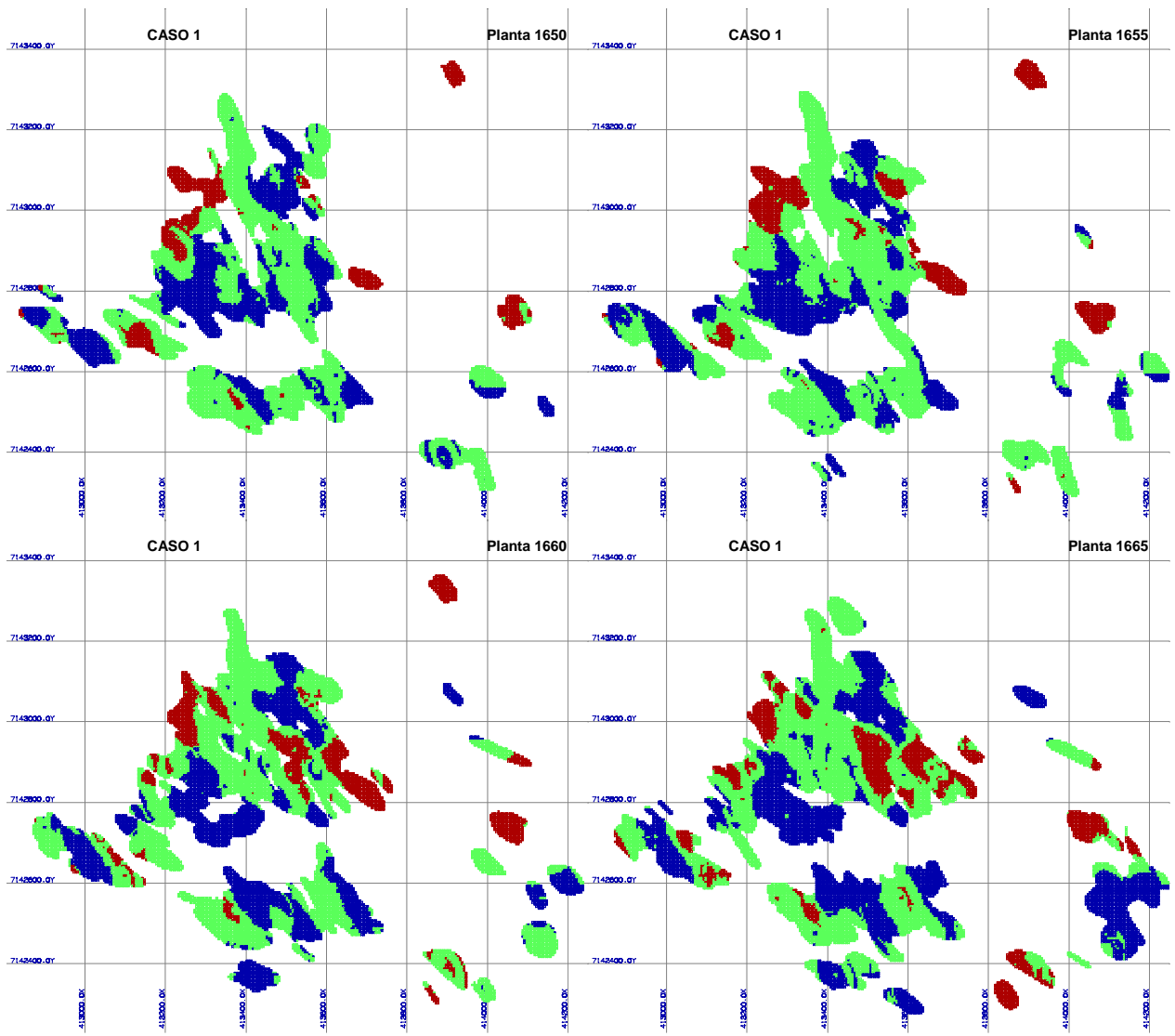
Caso 4

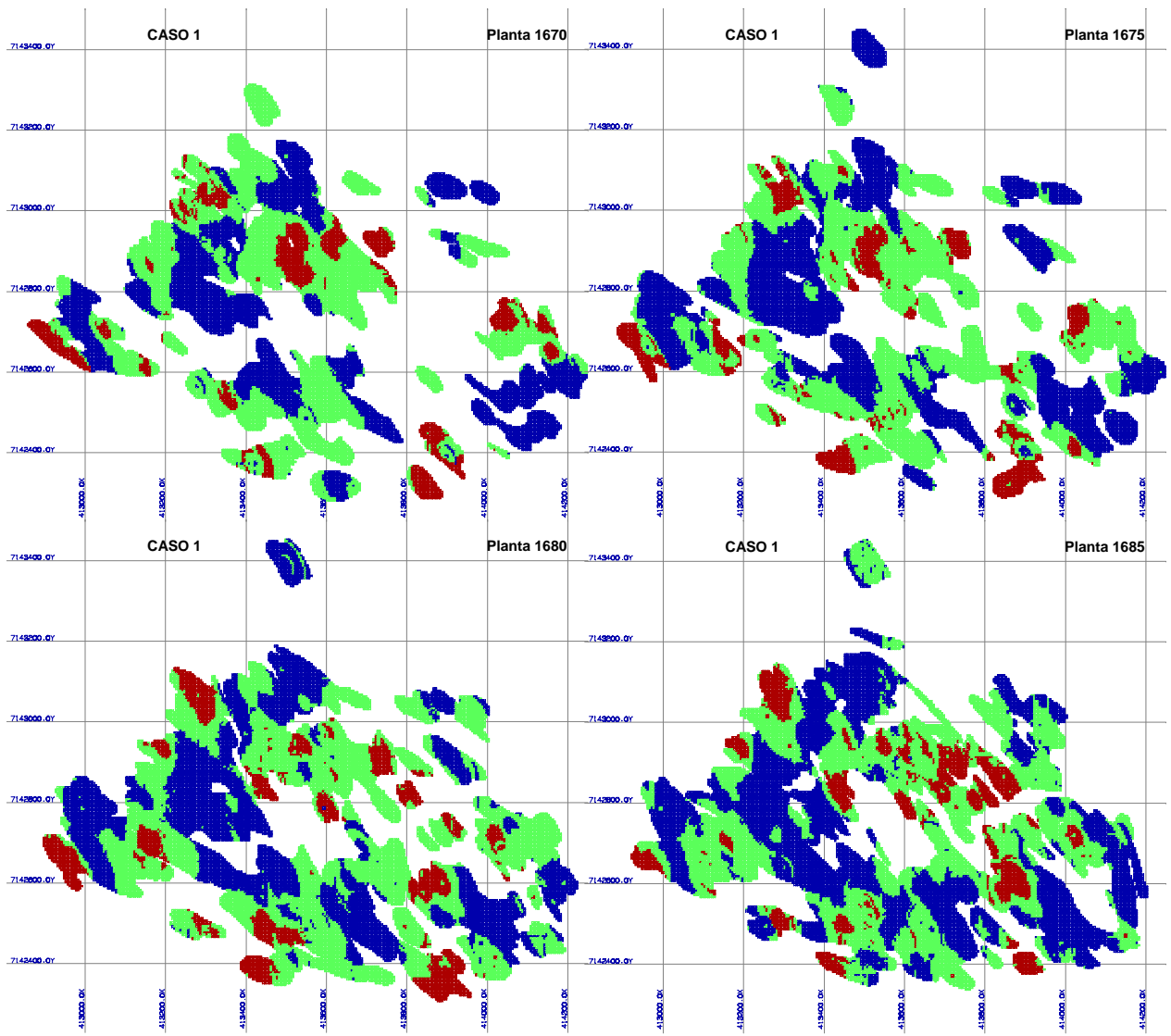


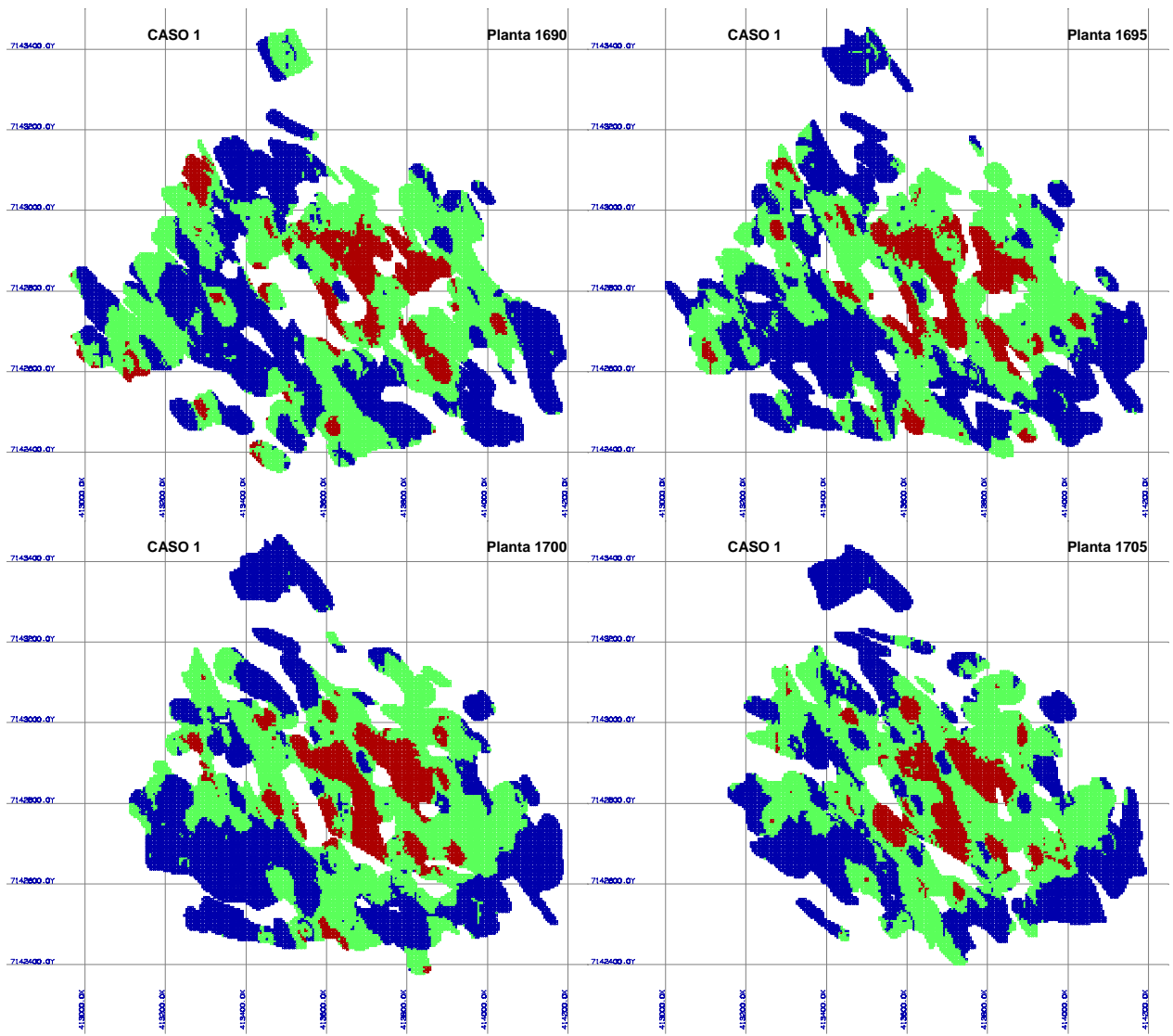


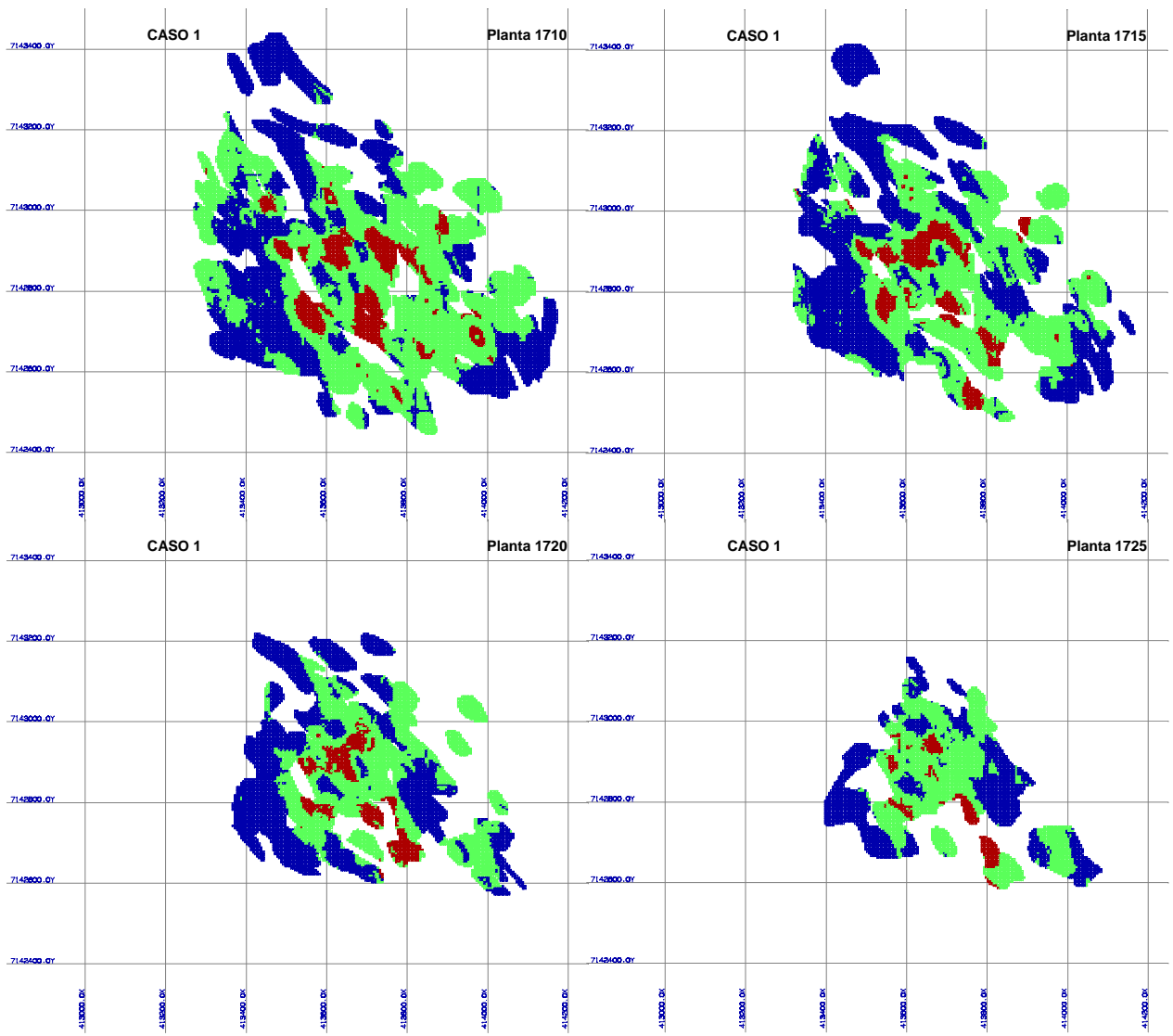


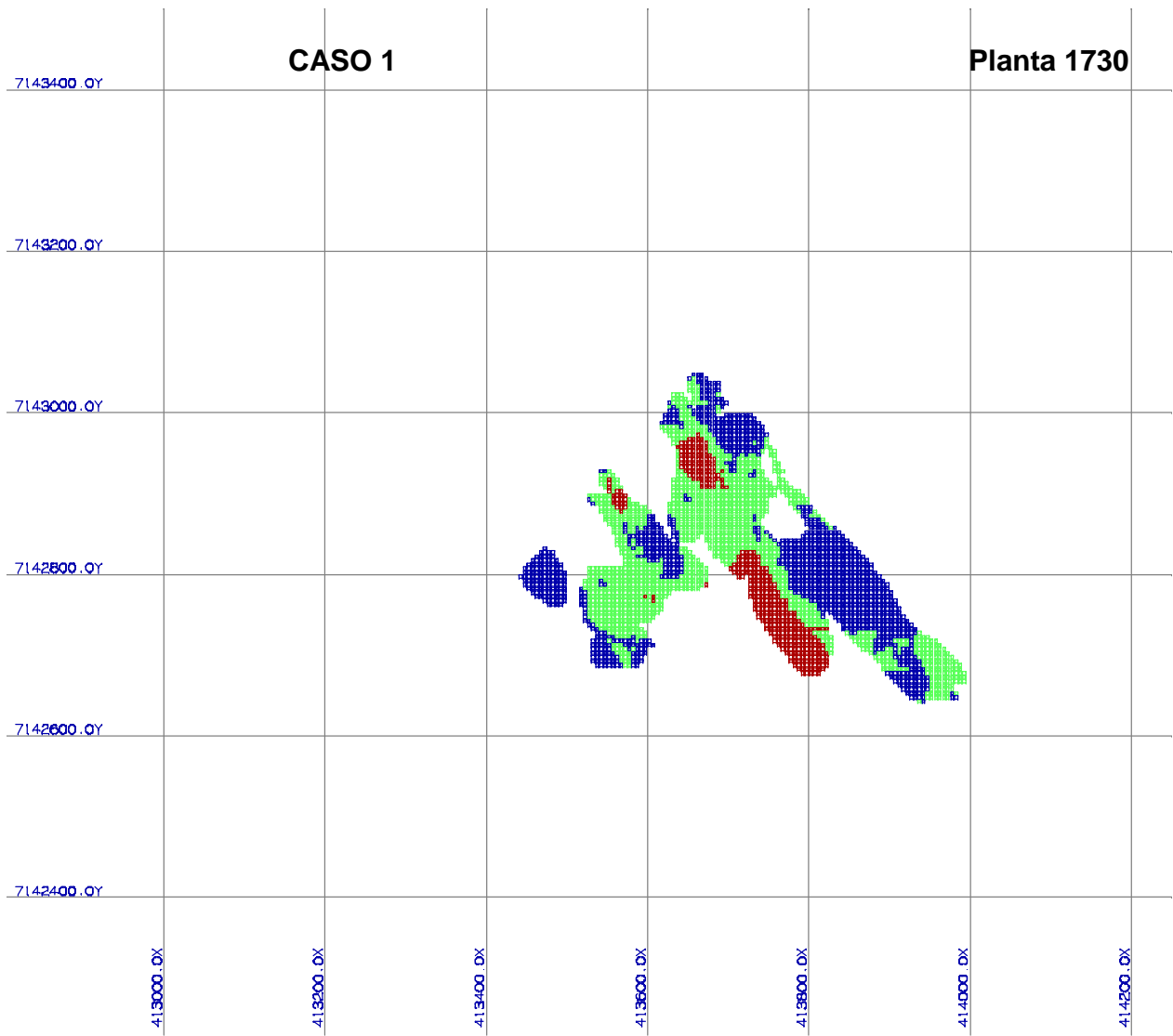


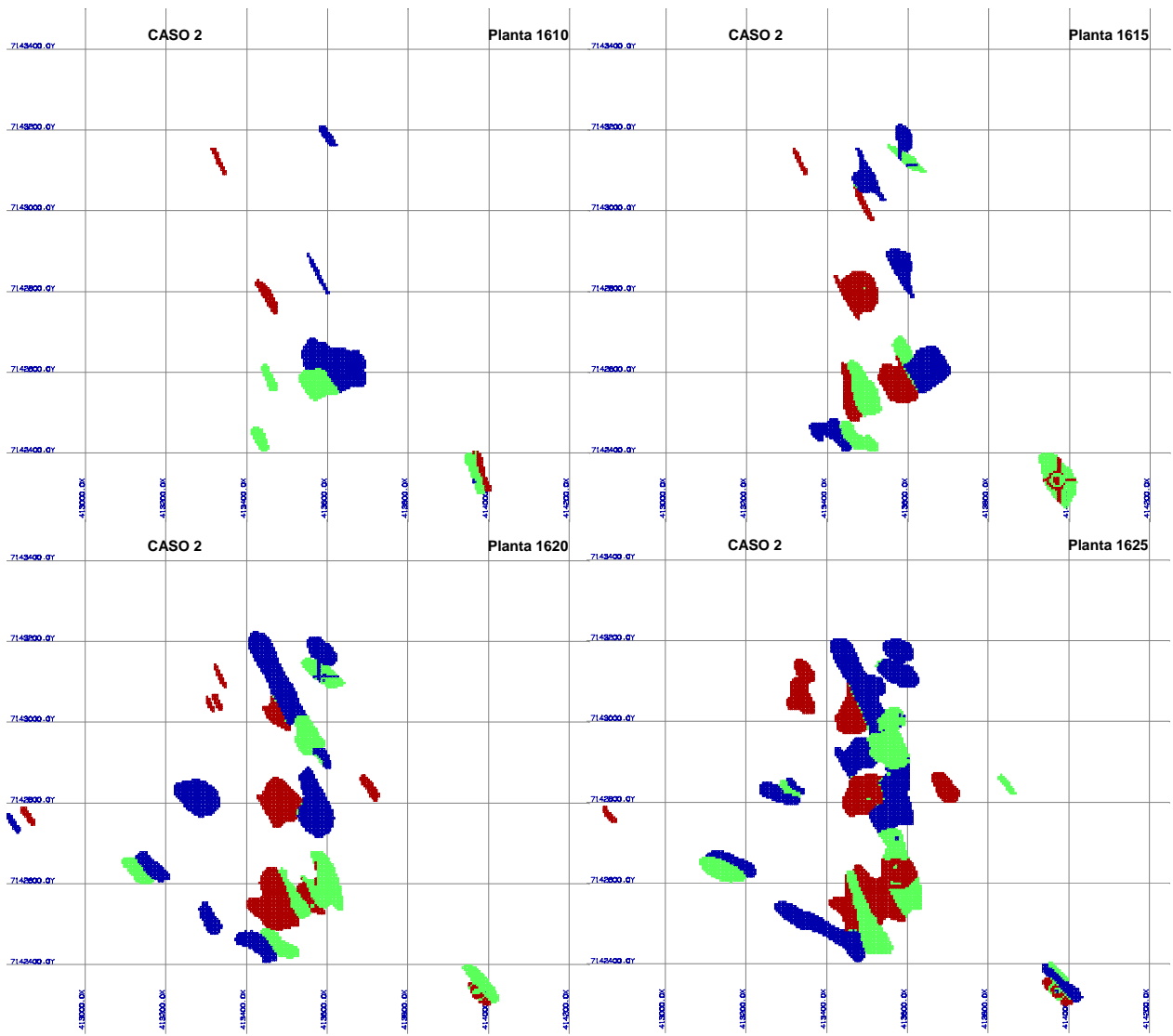


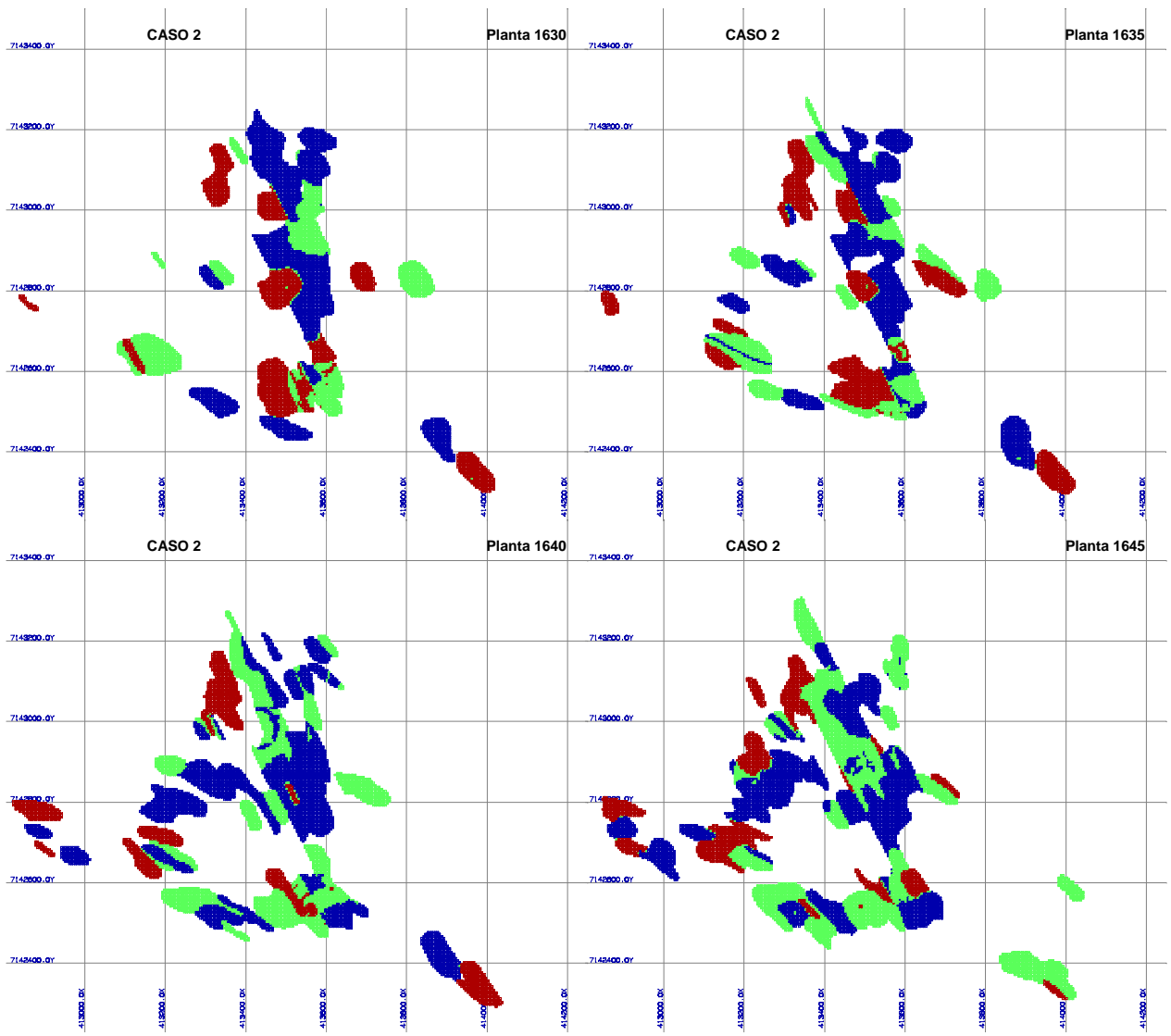


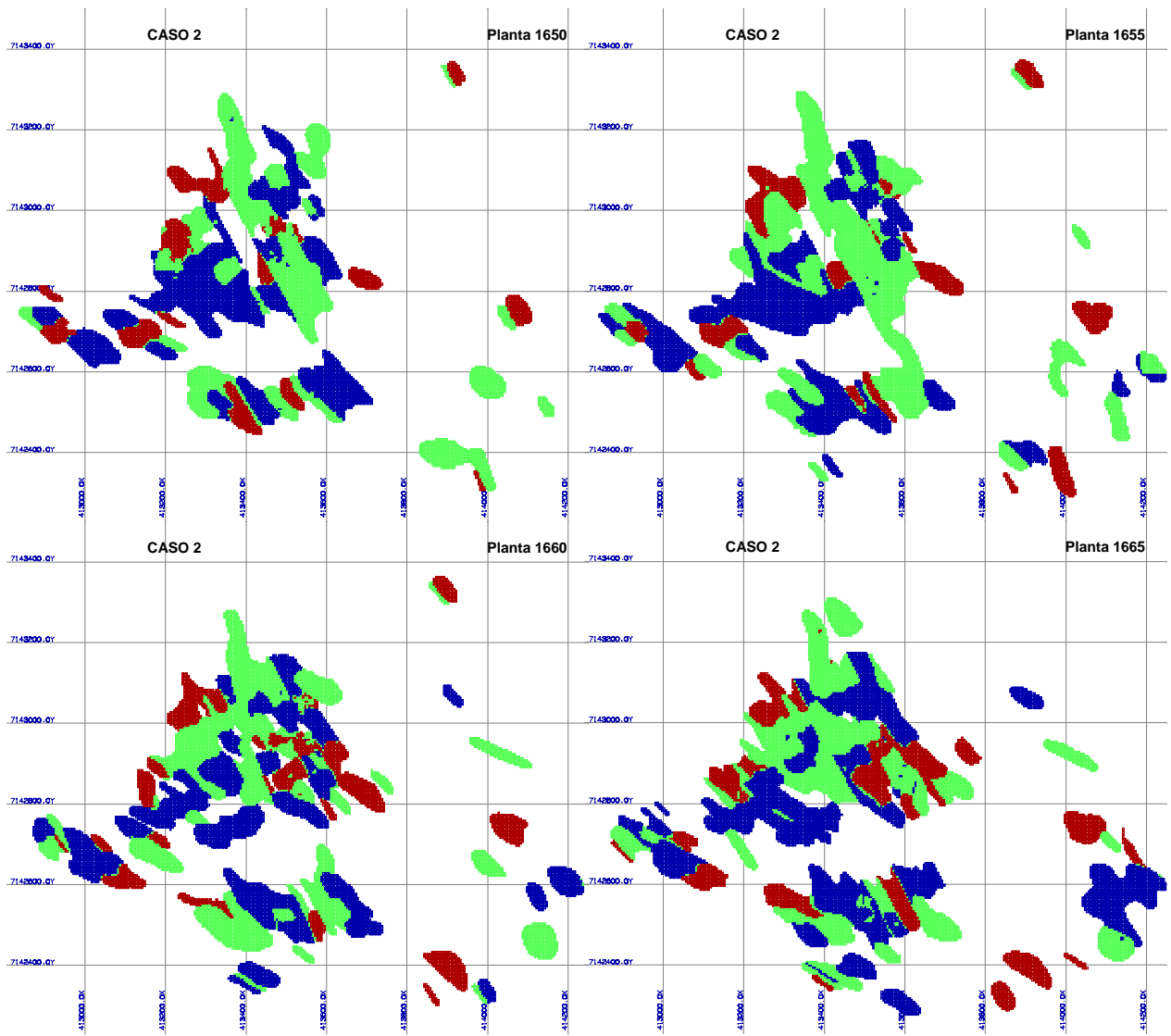


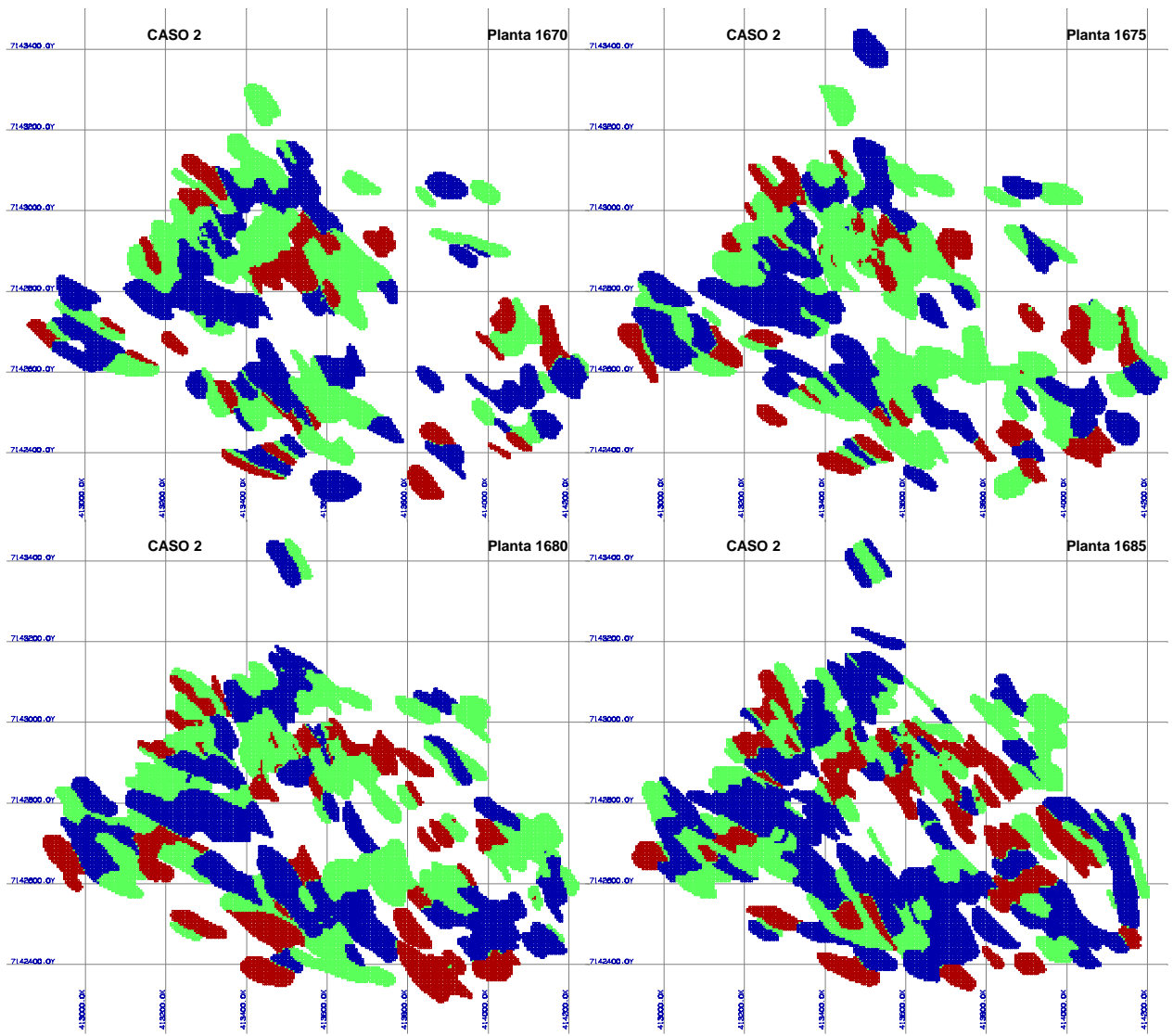


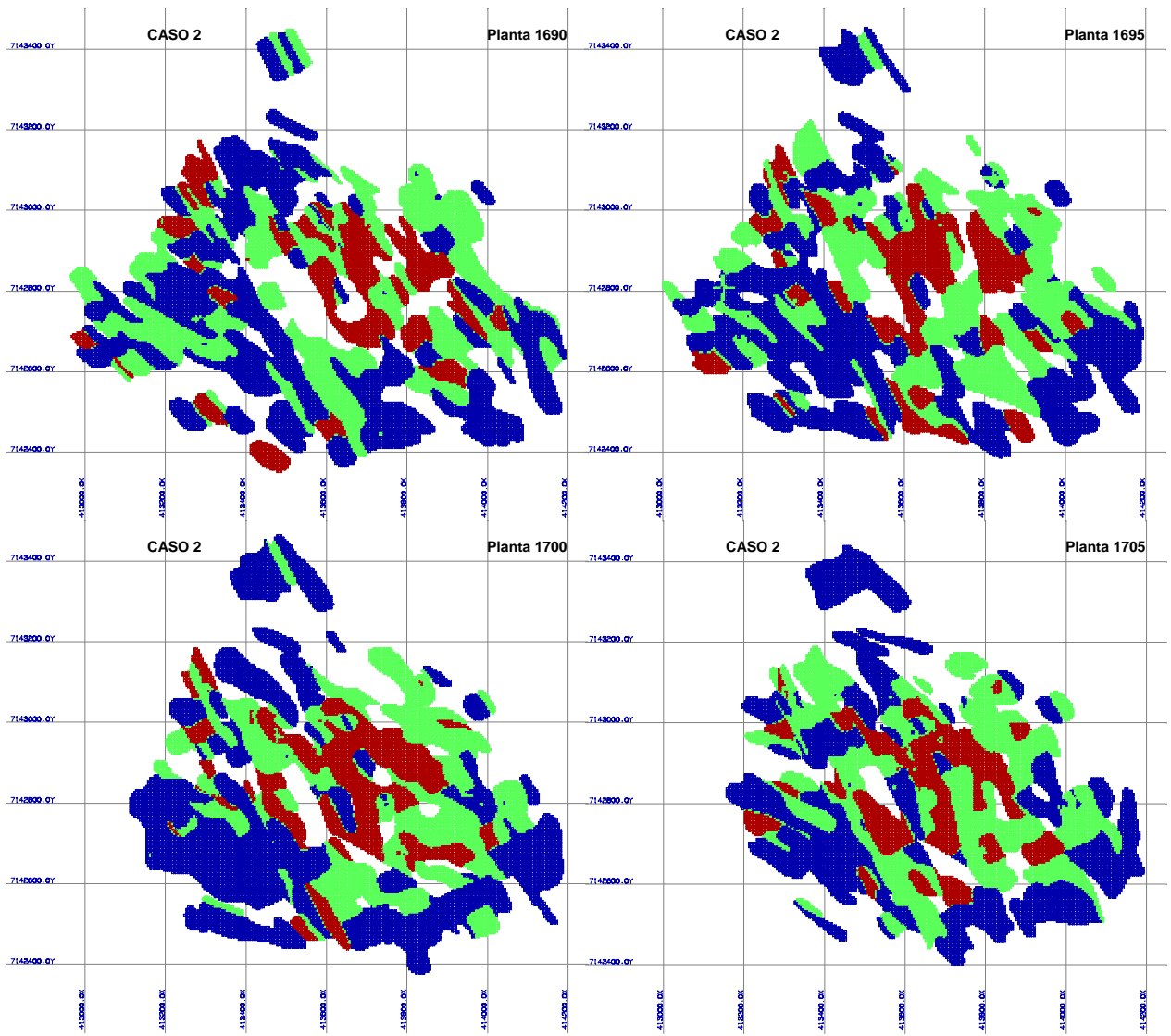


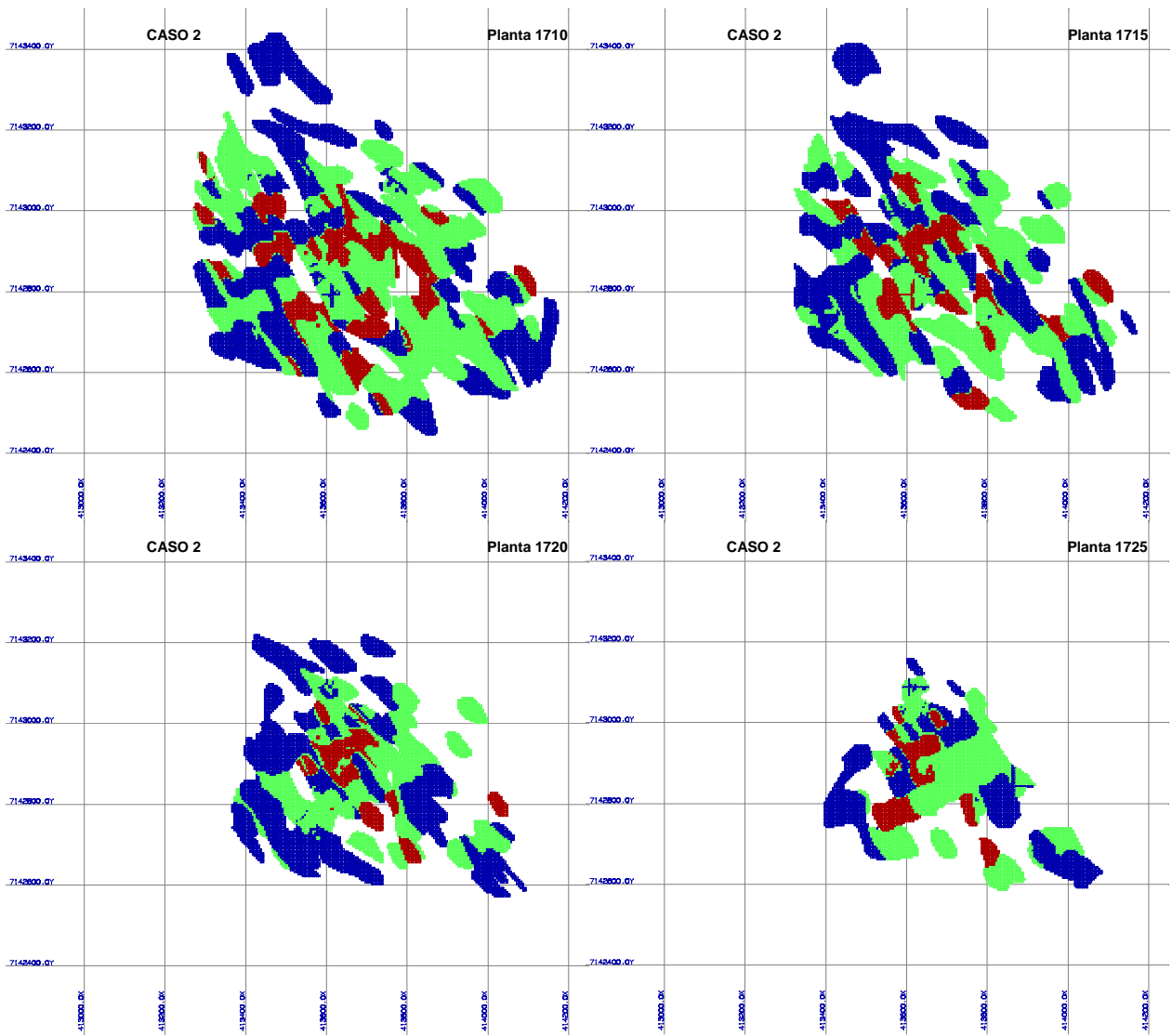


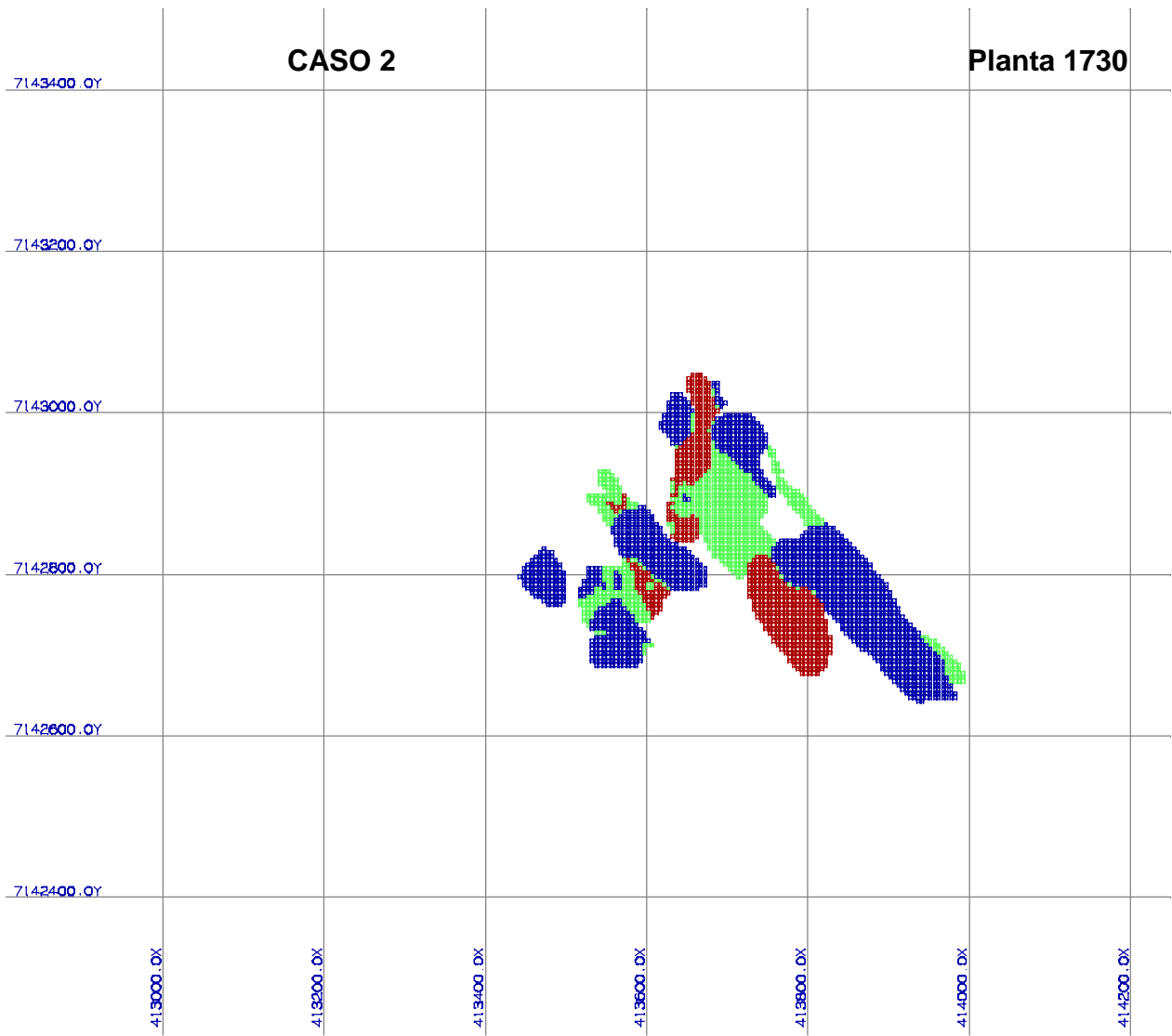


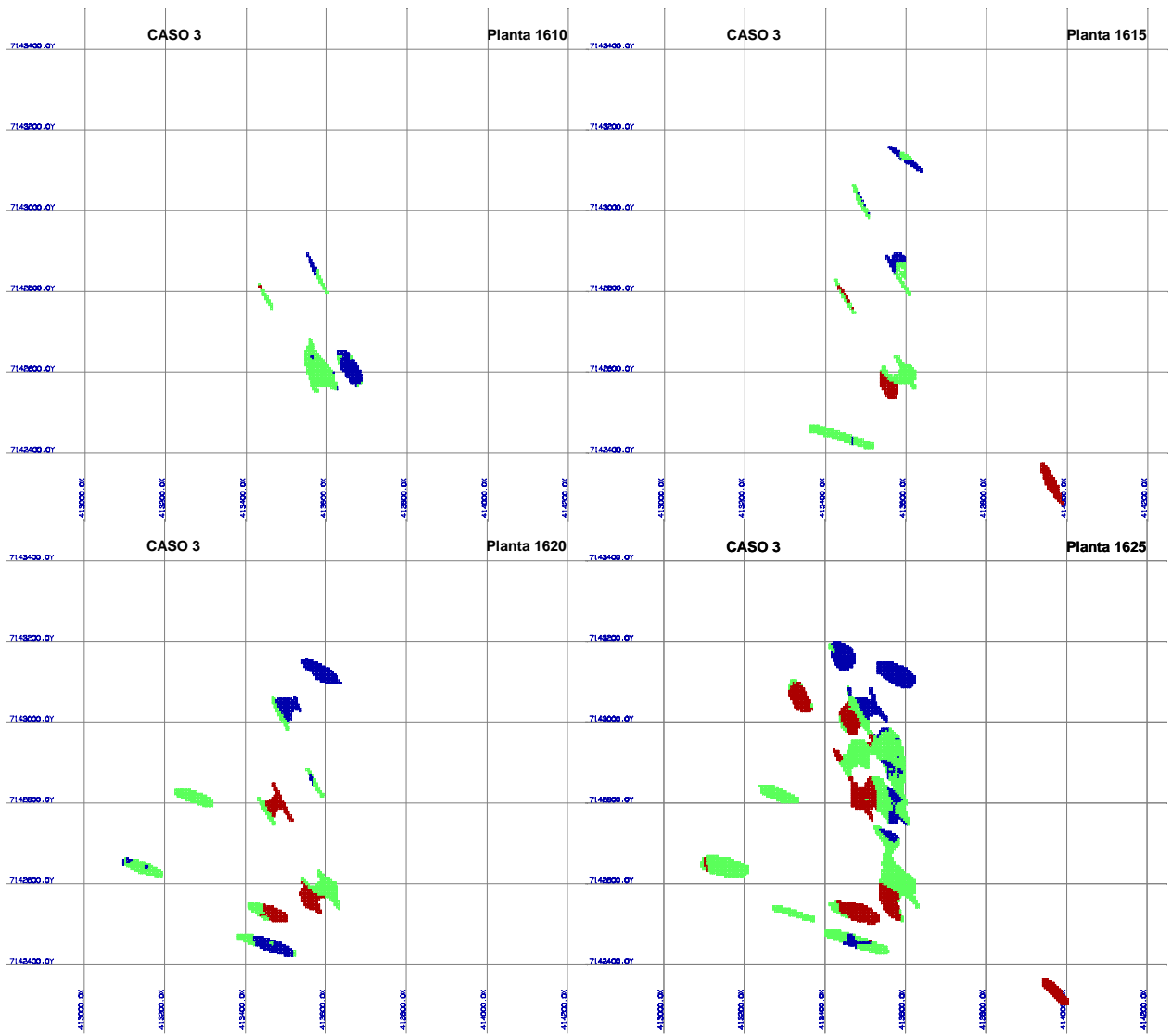


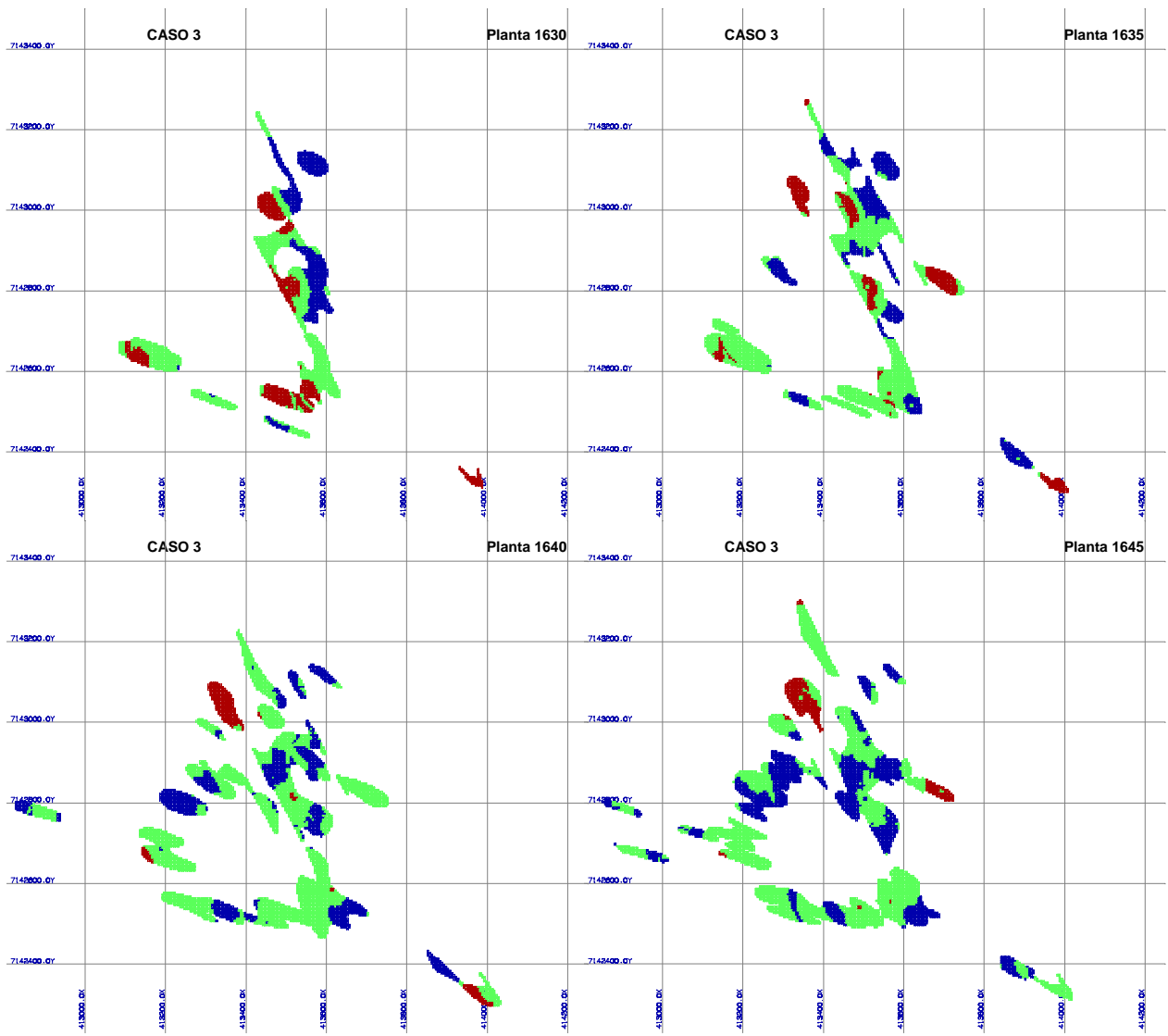


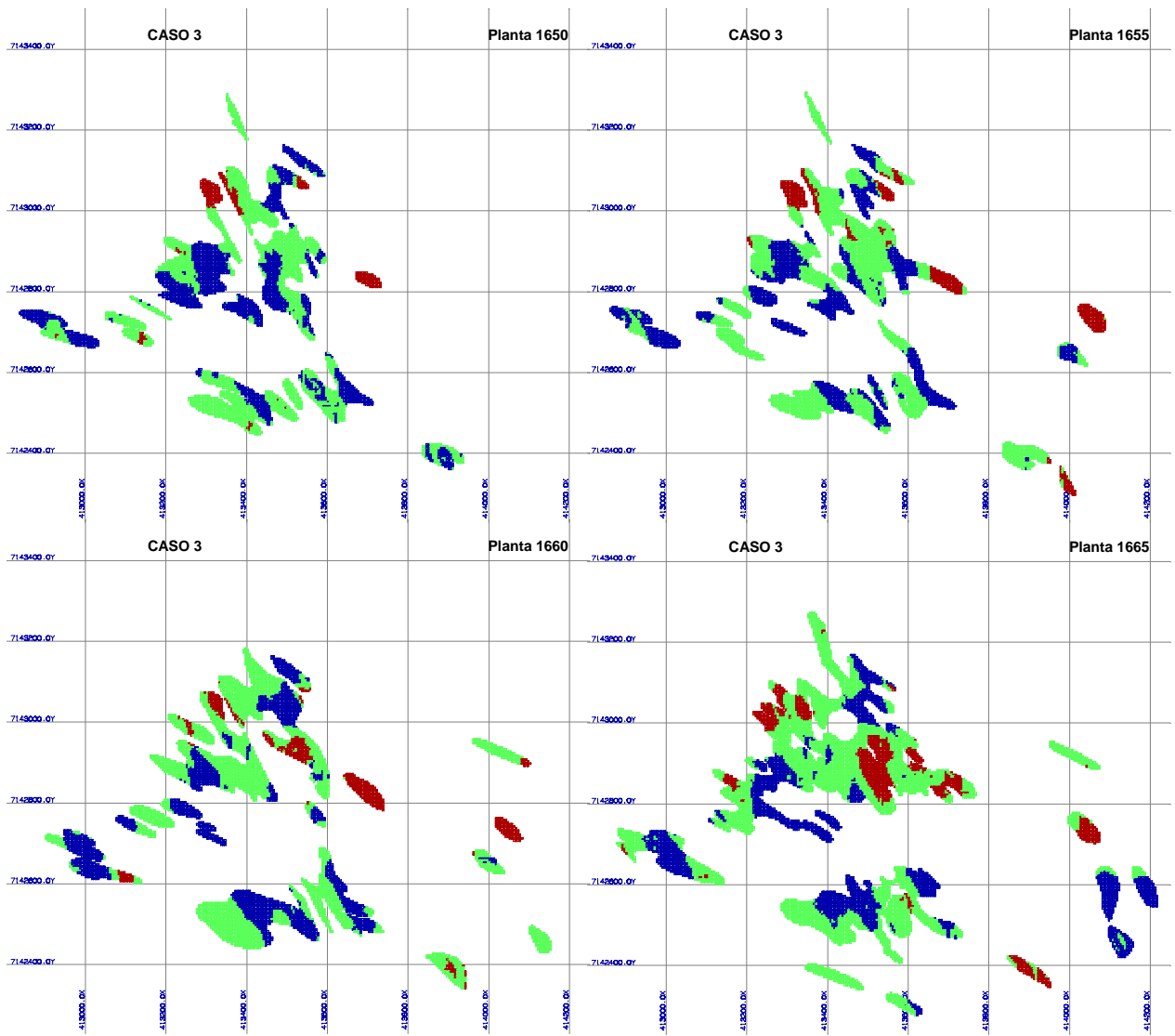


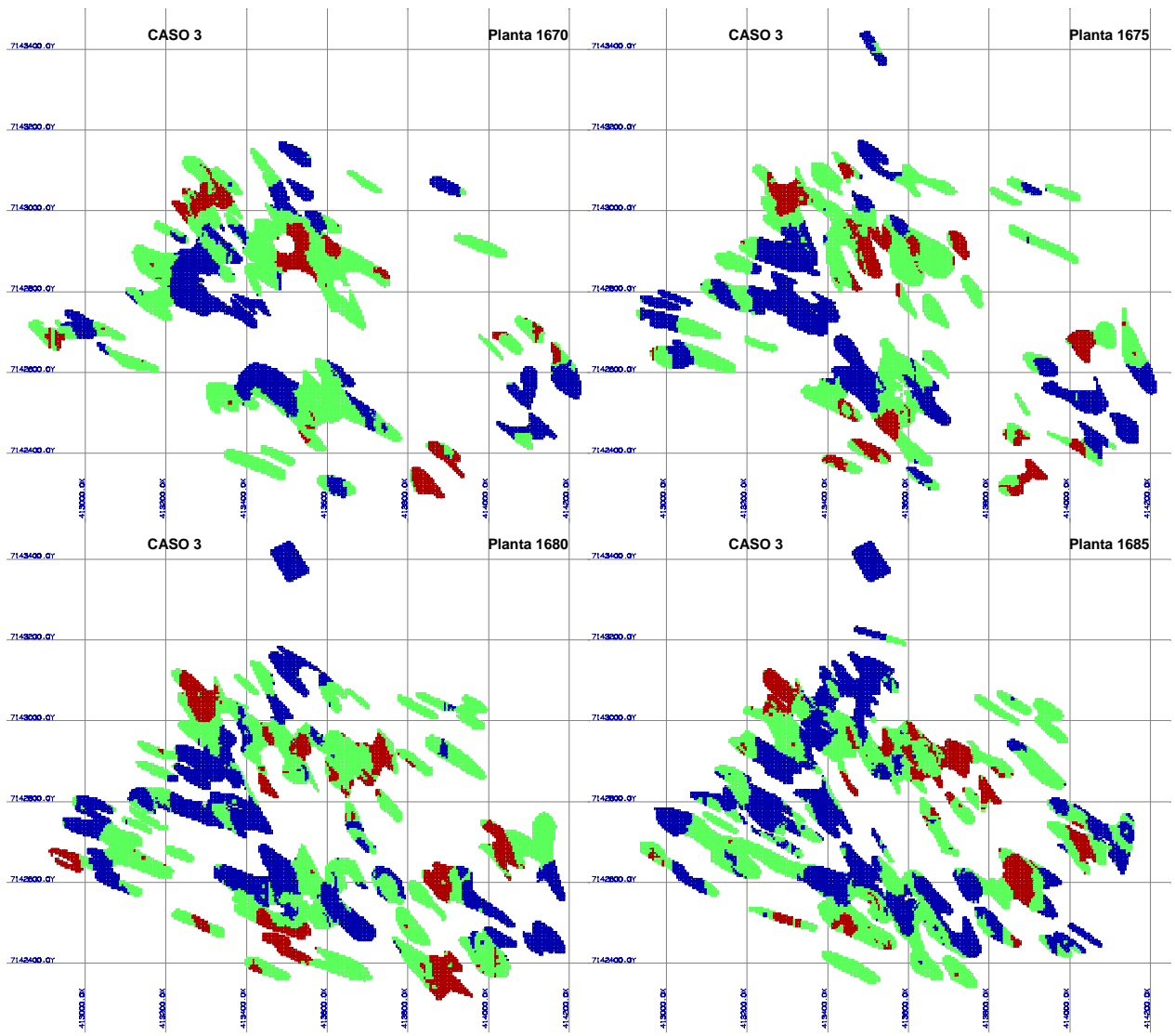


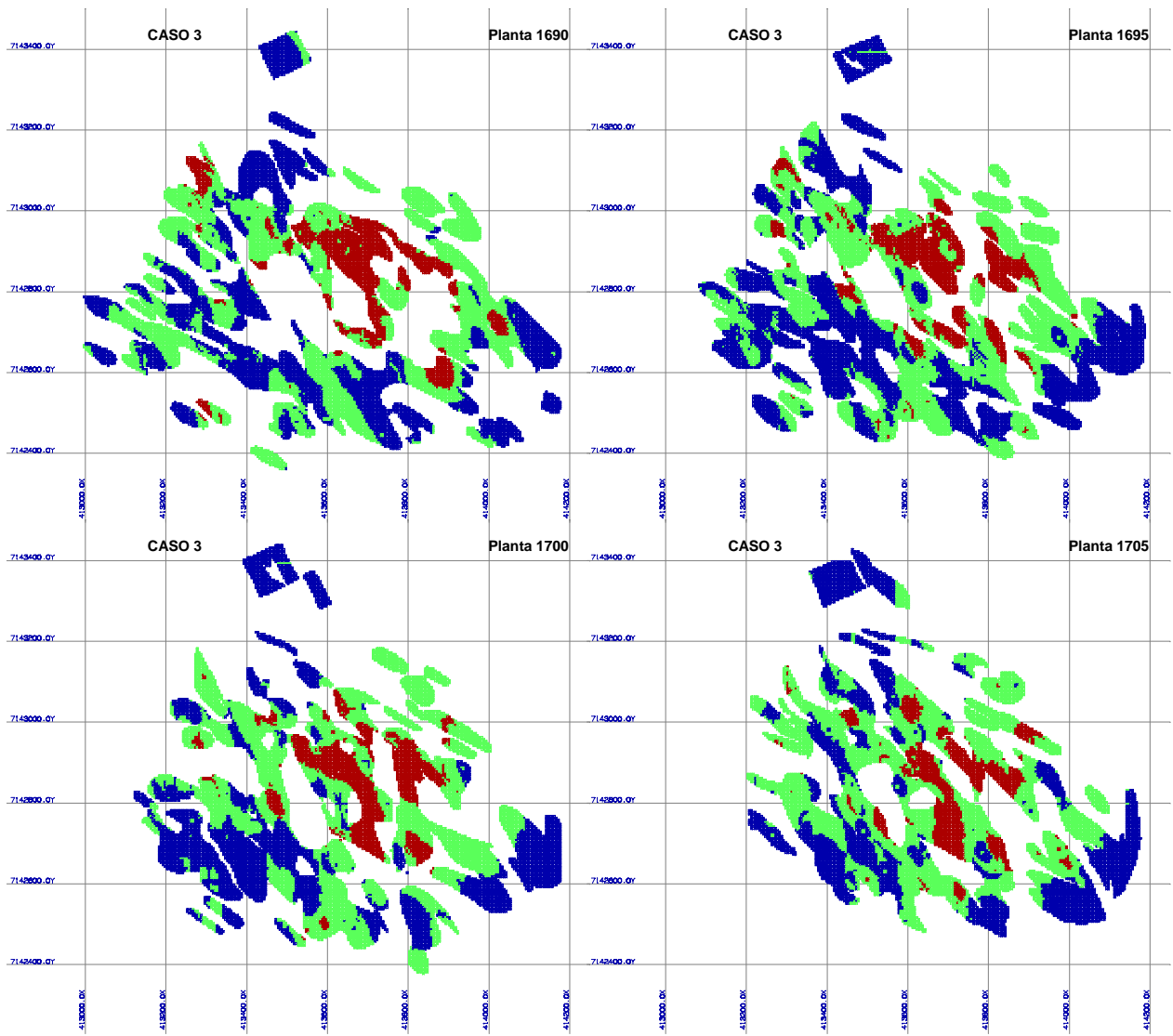


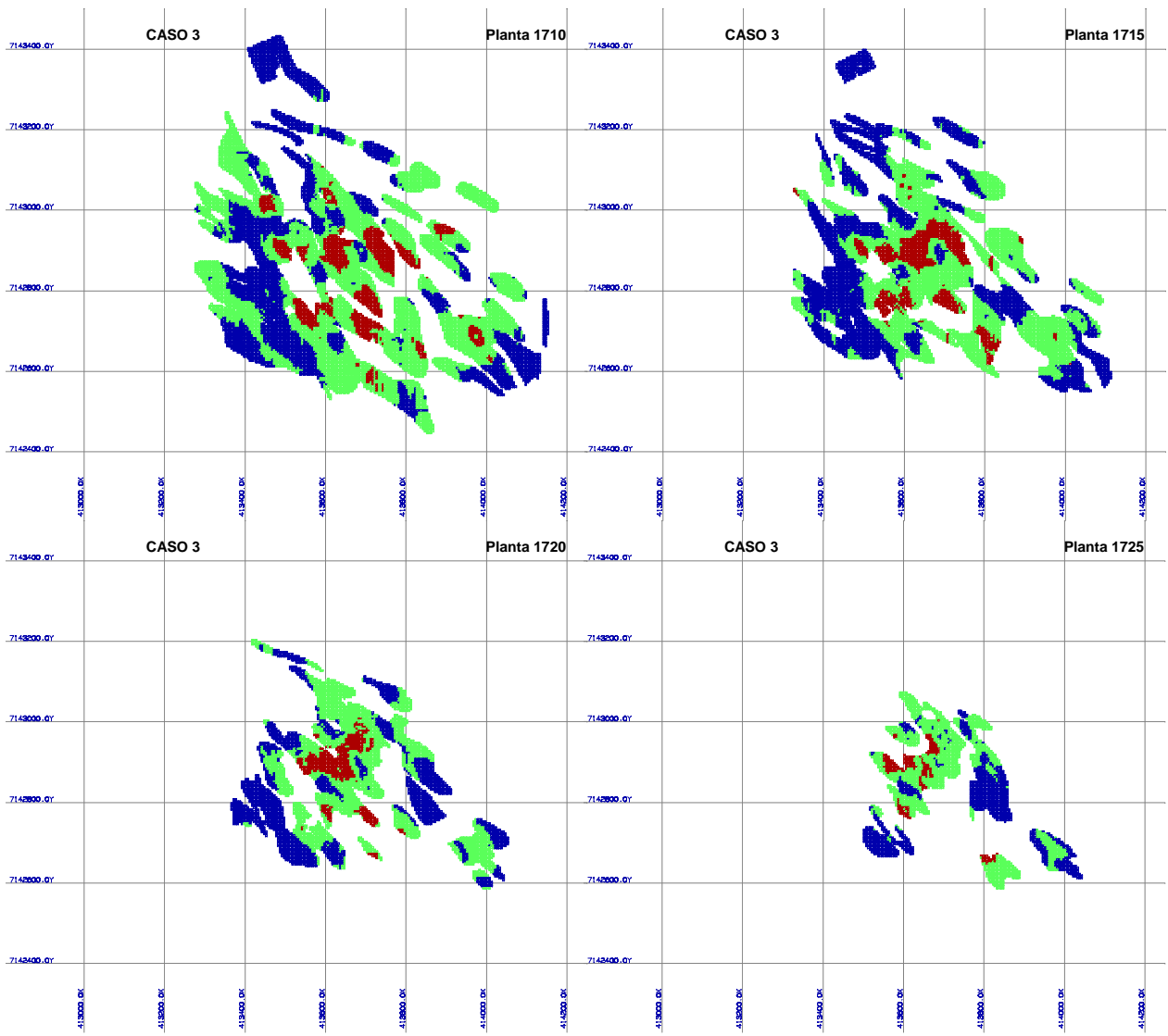


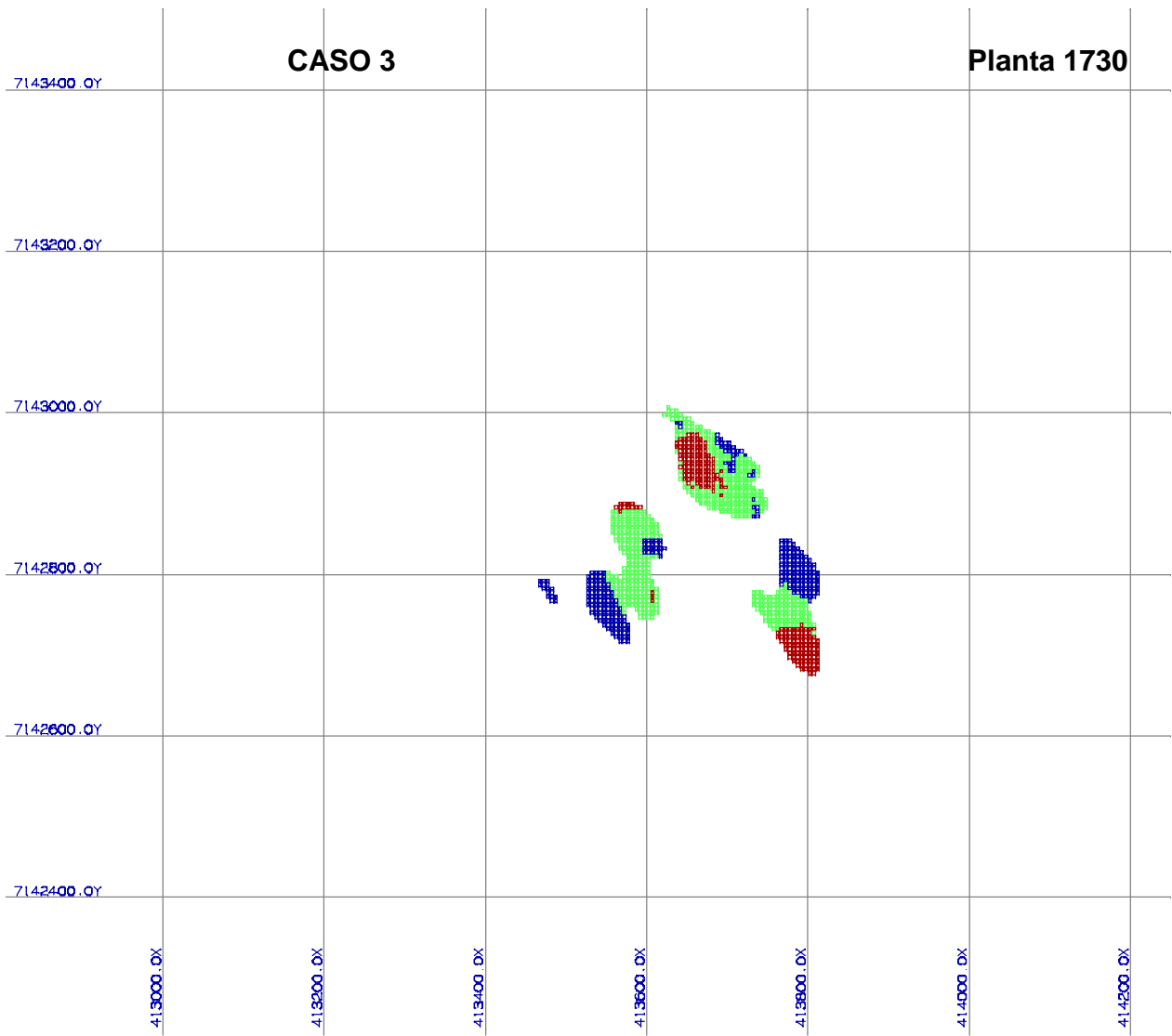


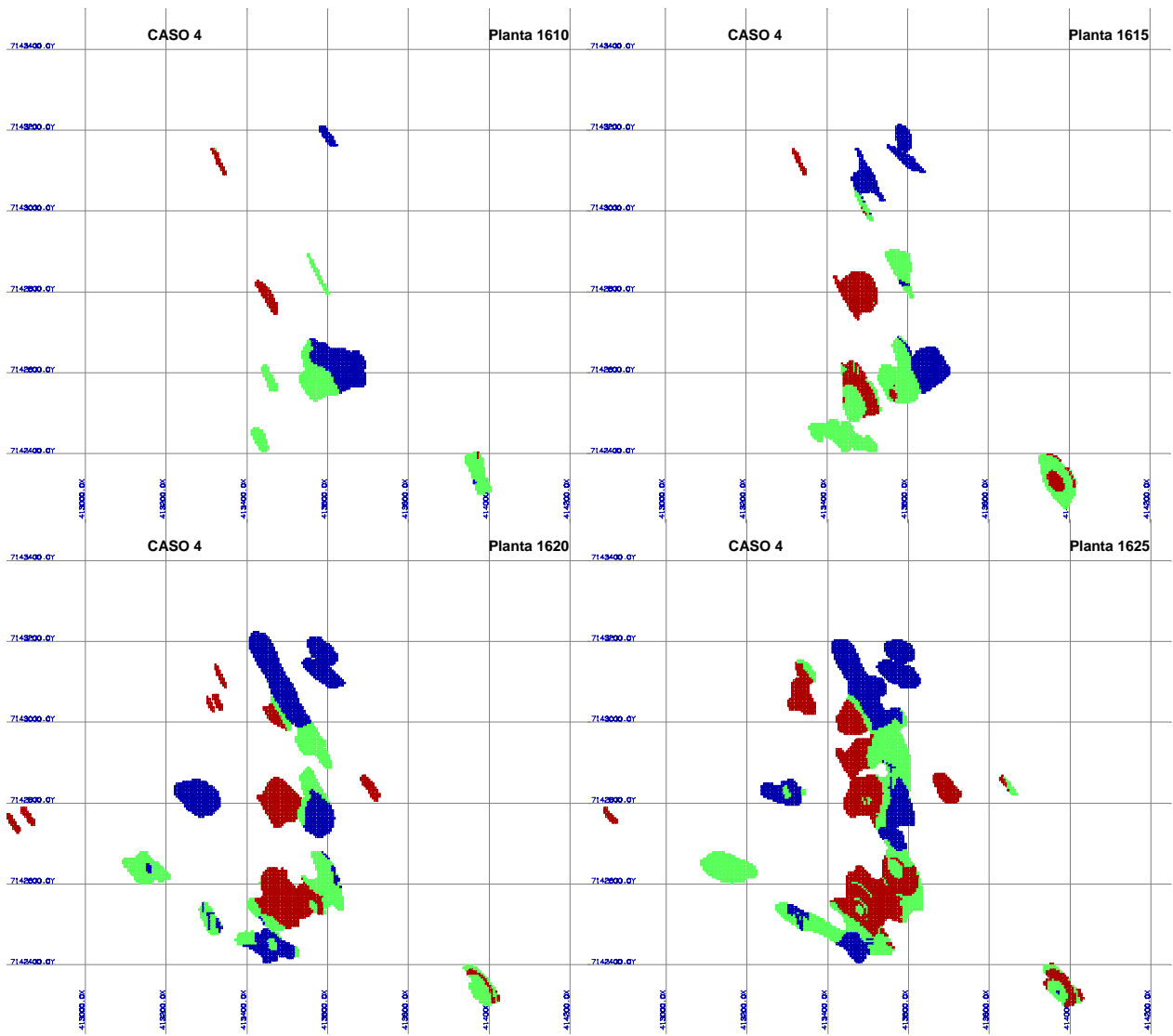


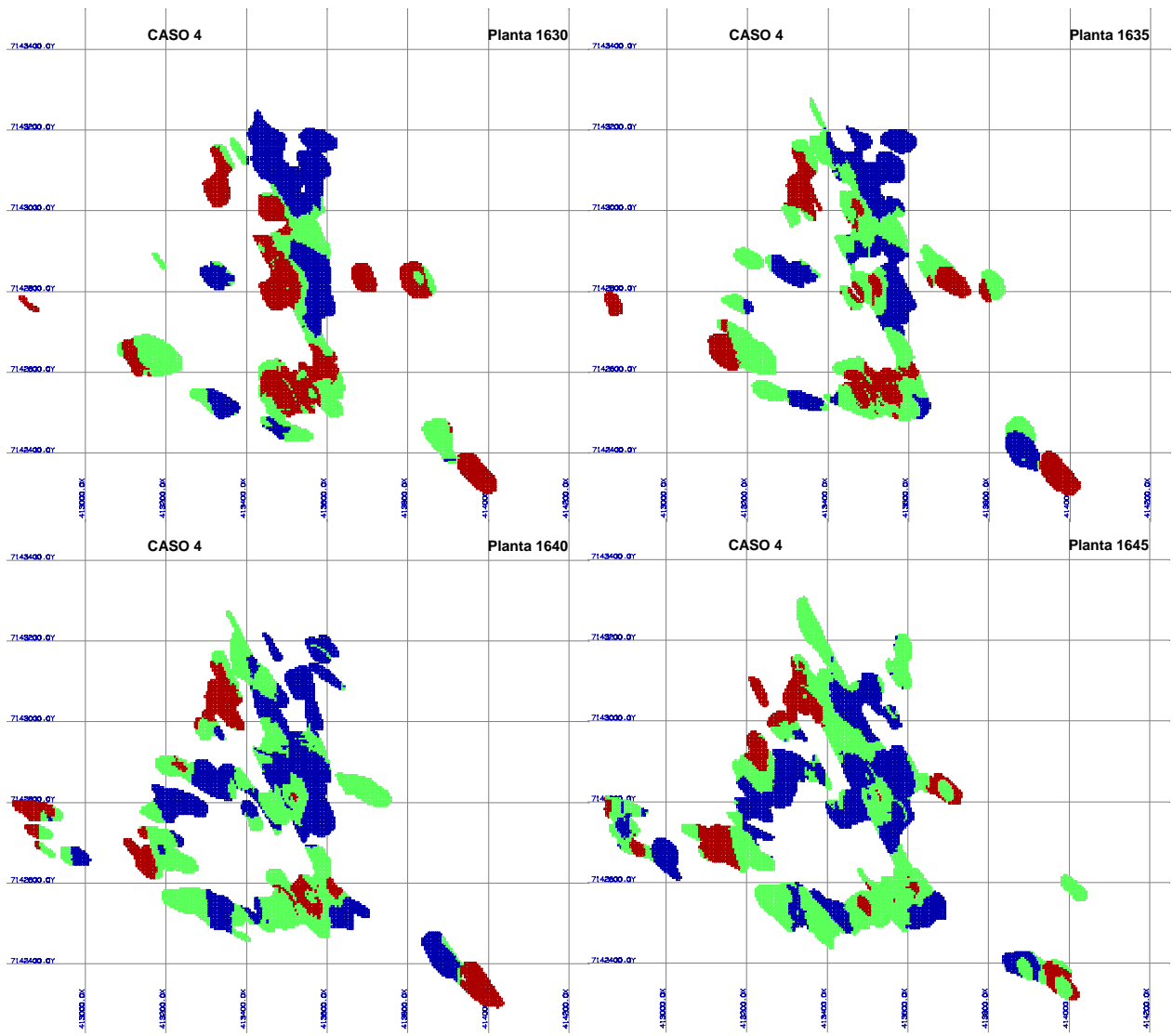


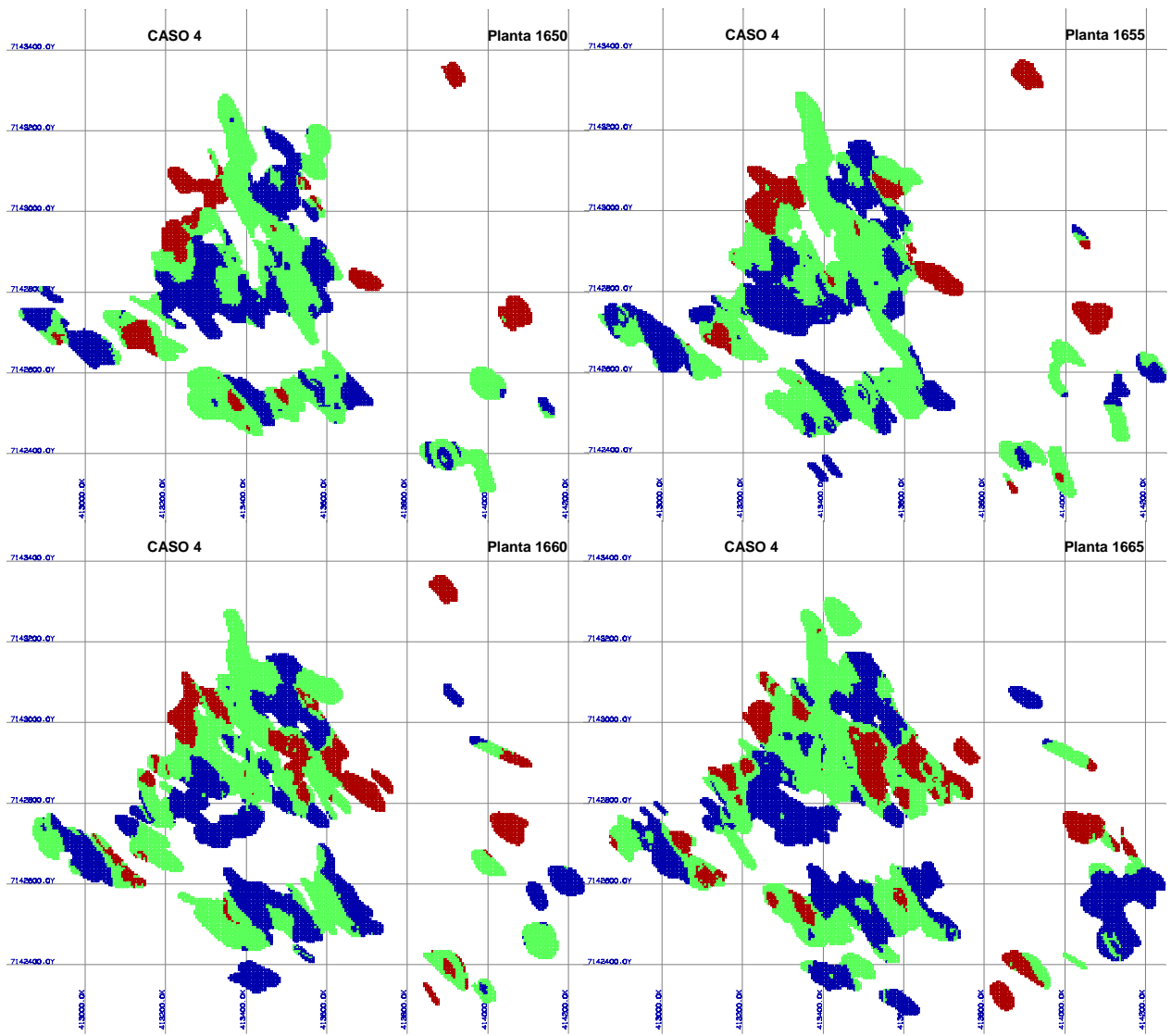


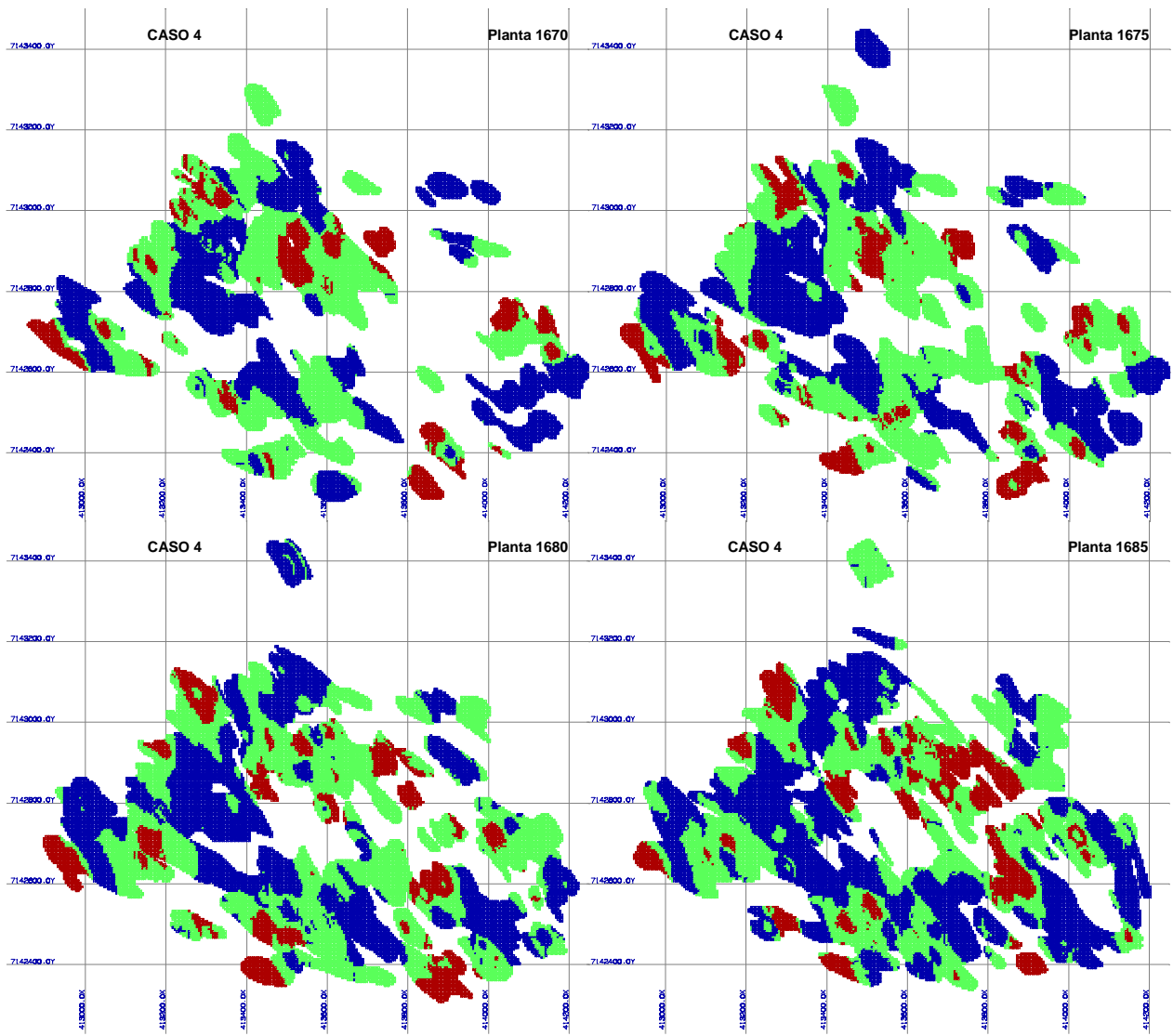


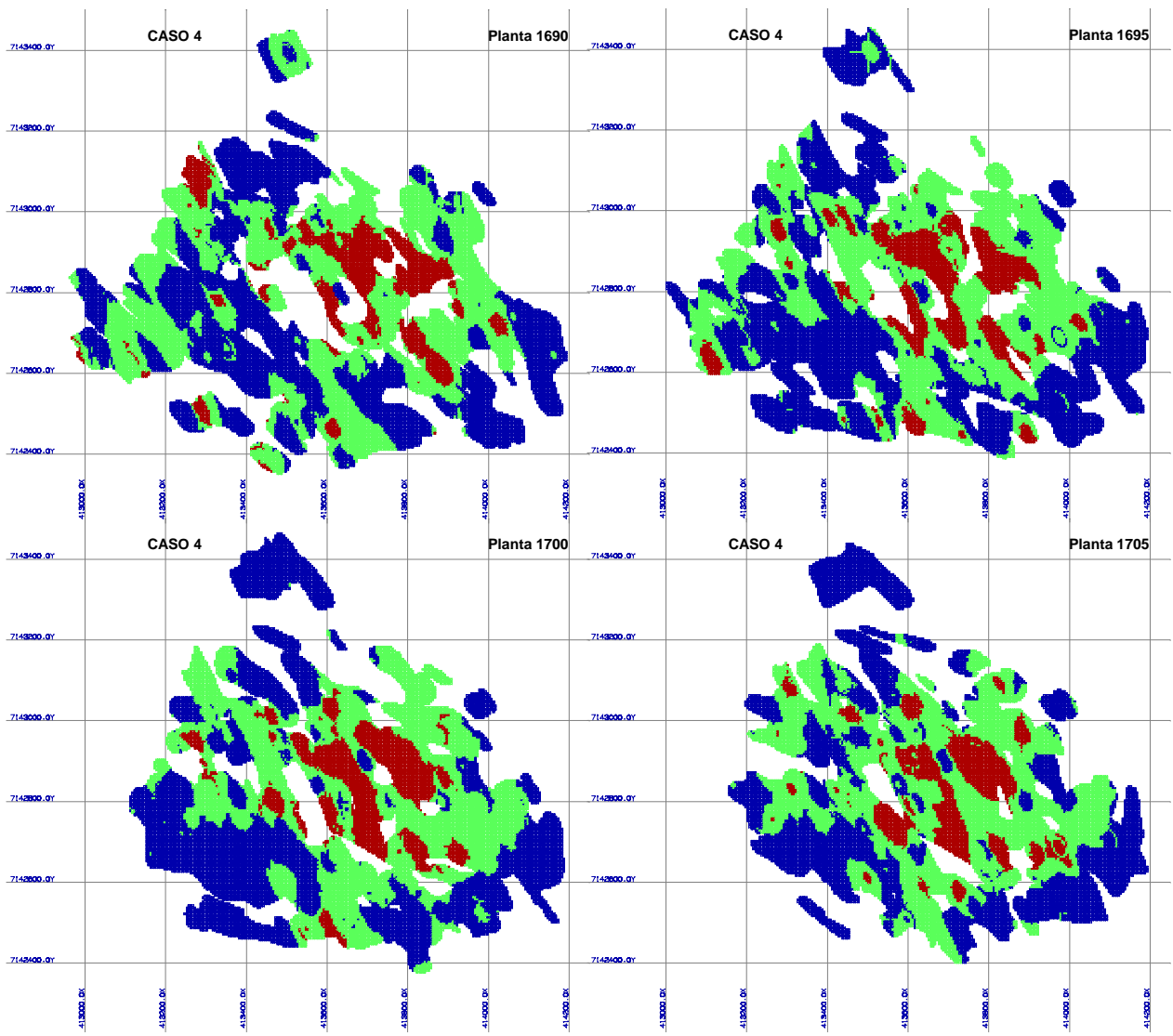


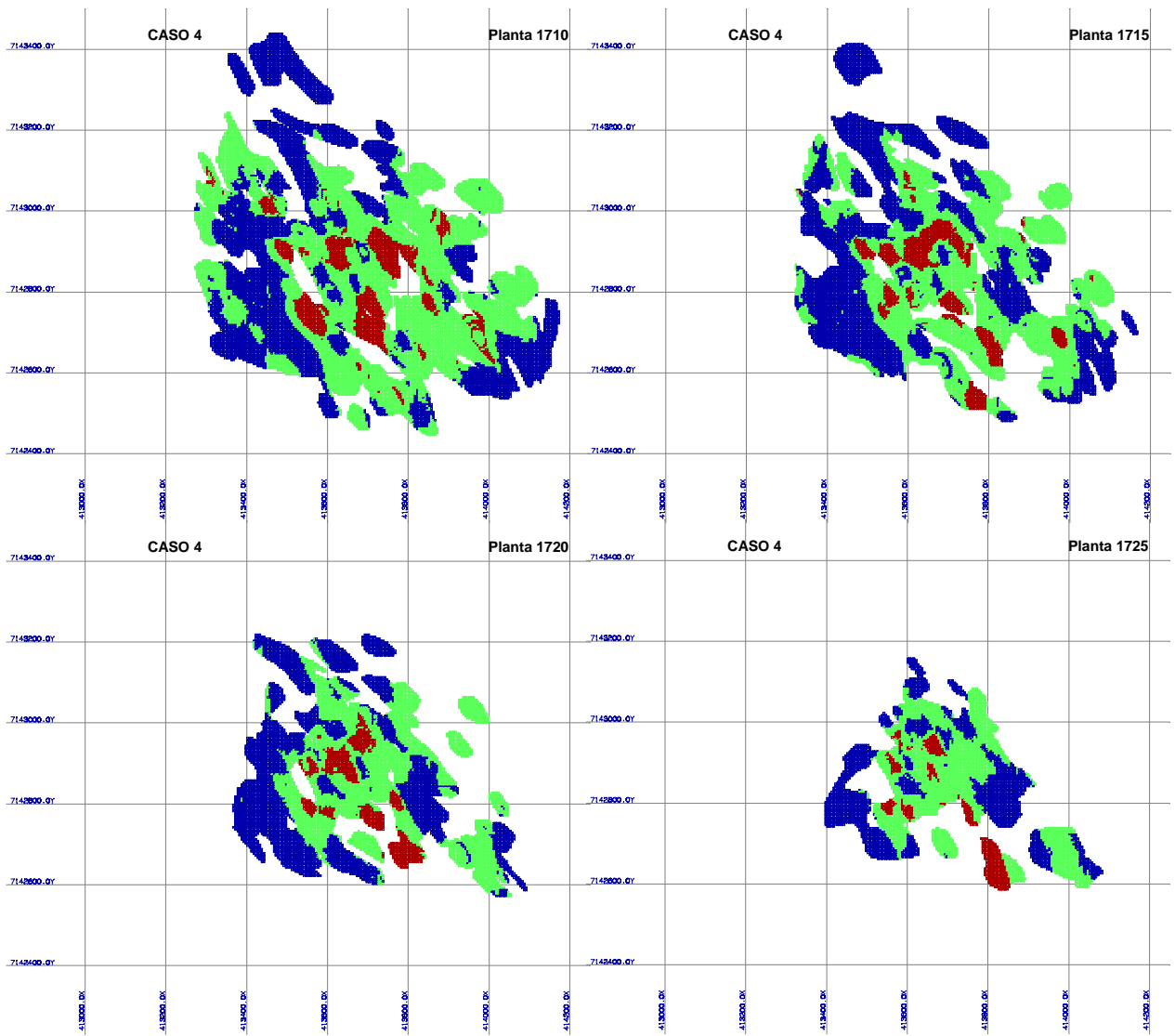


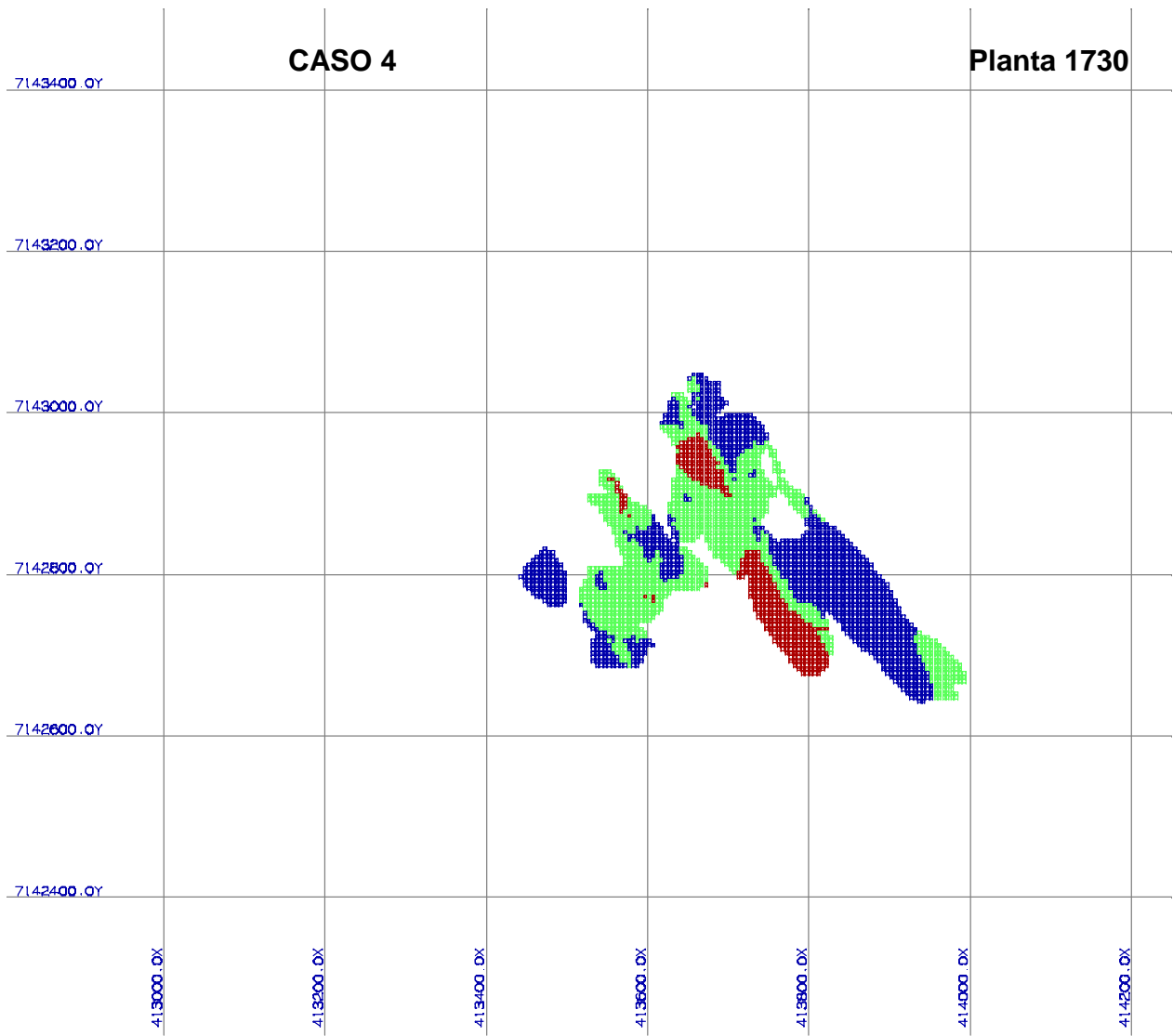


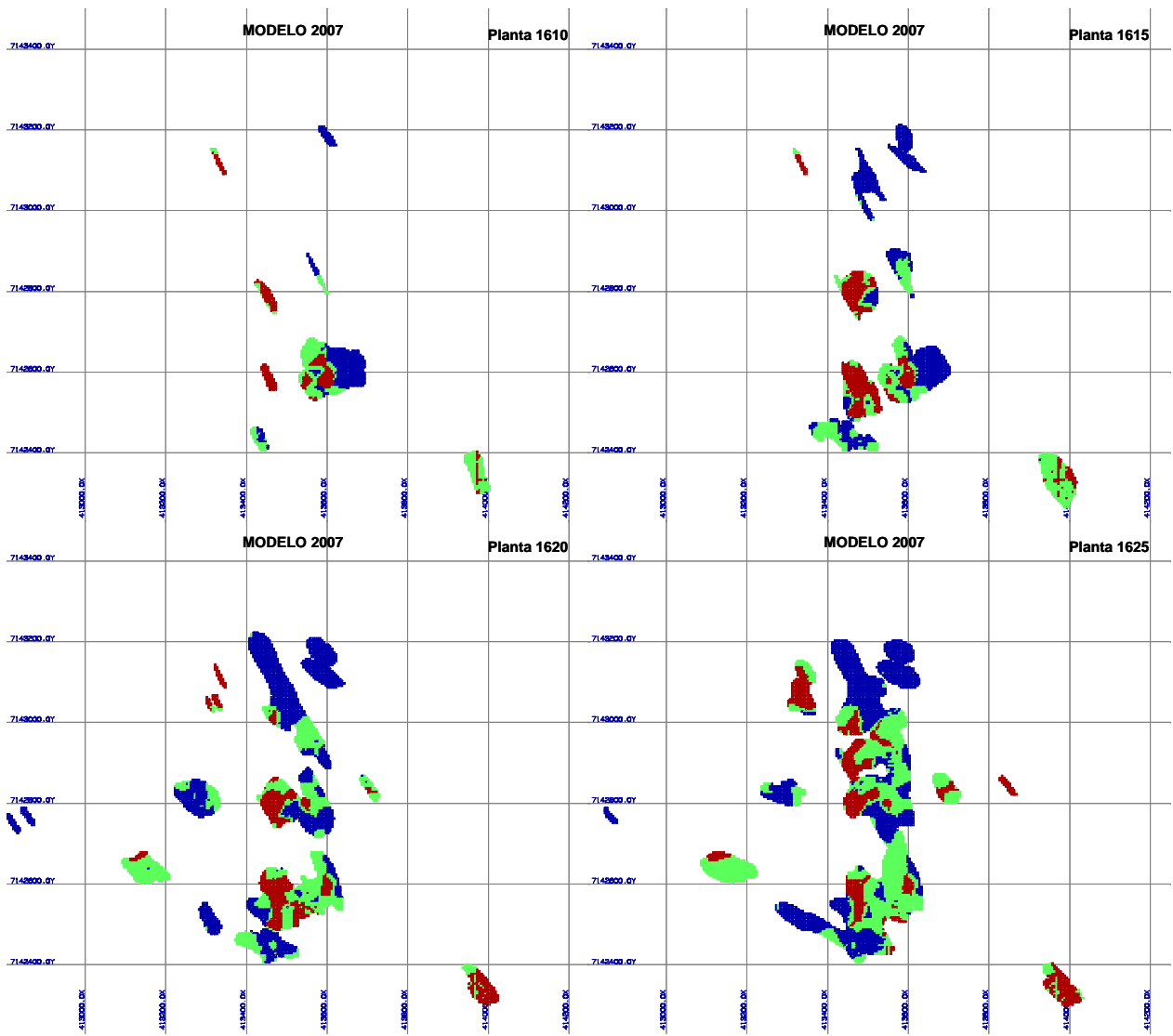


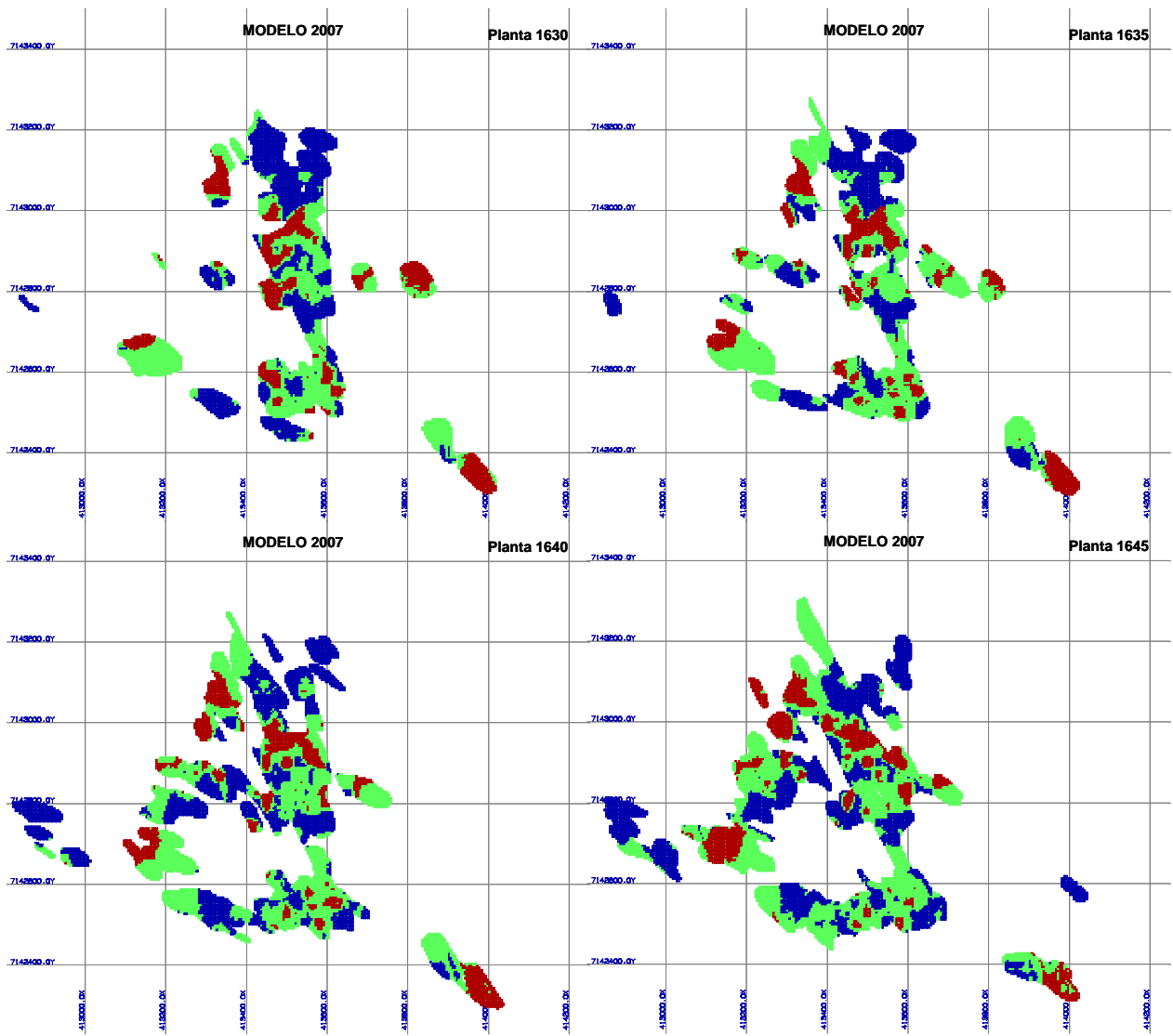


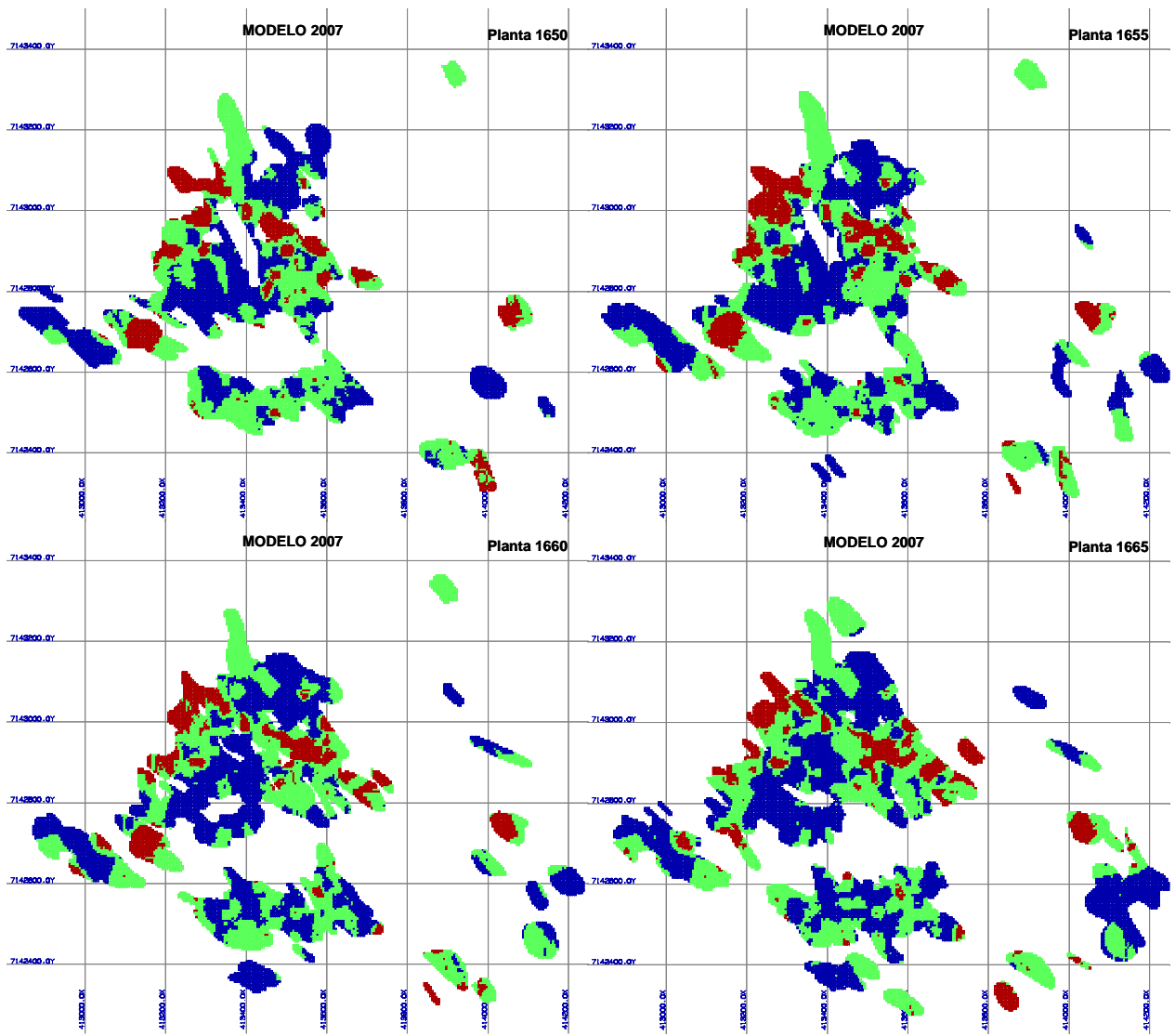


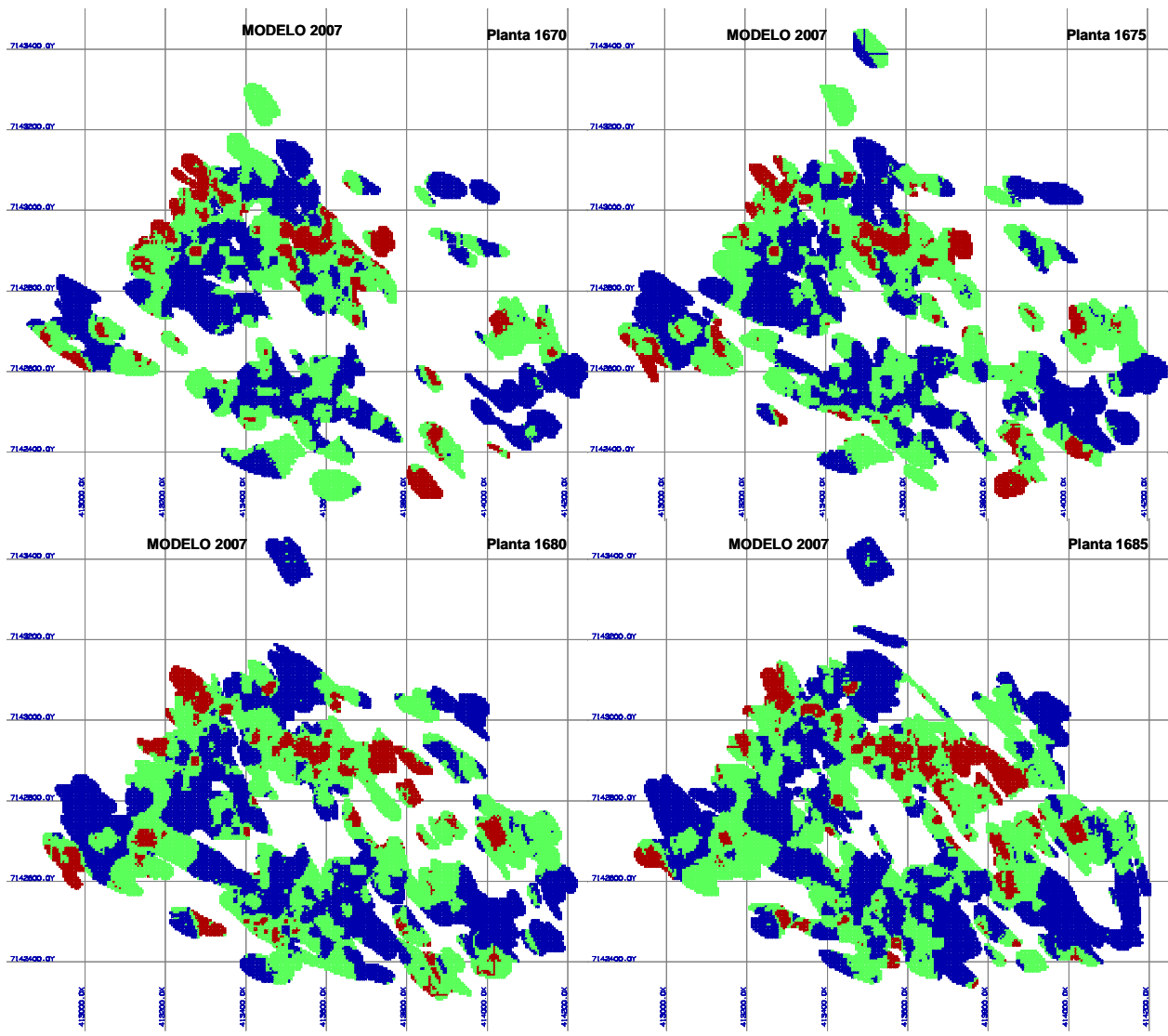


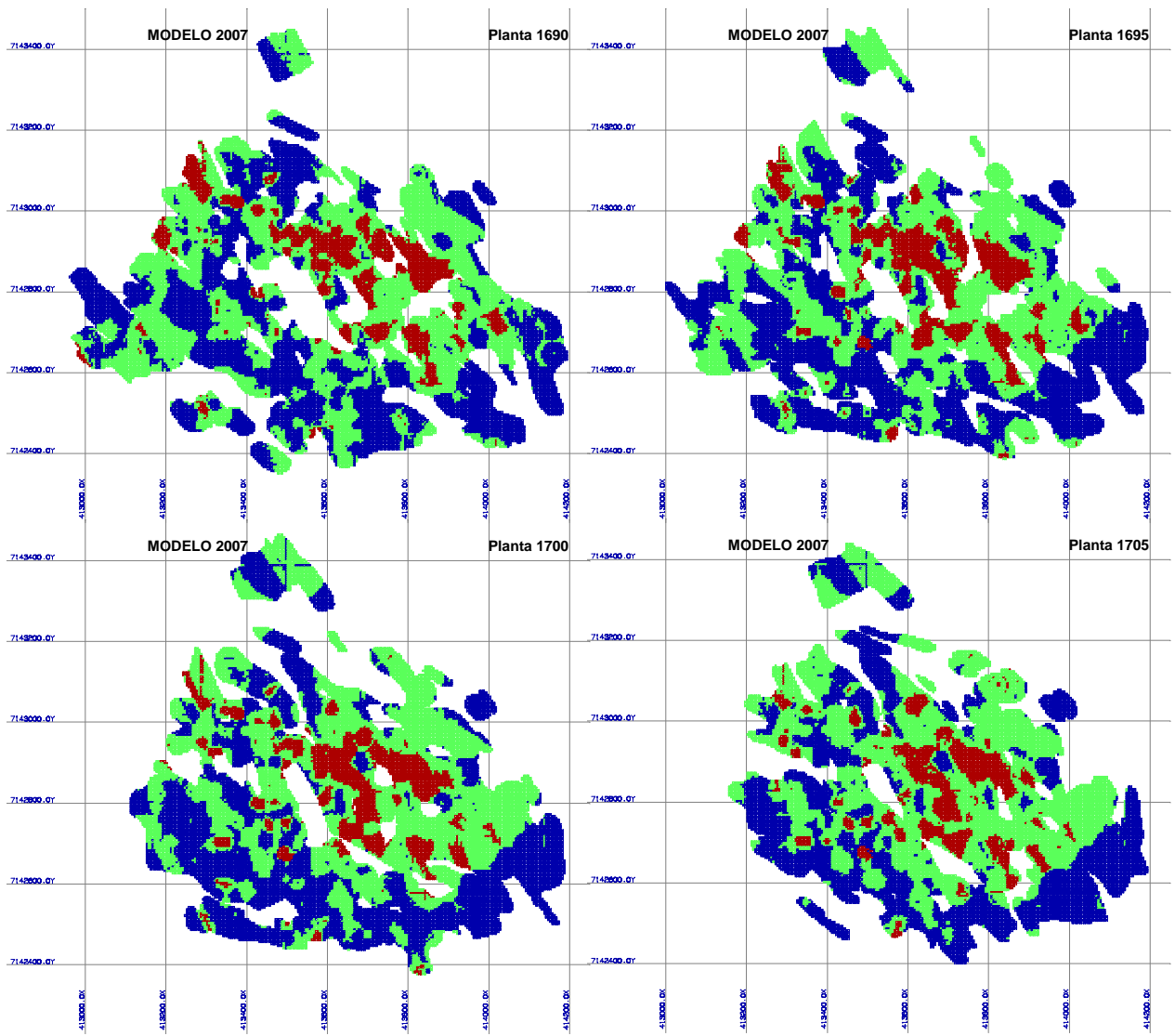


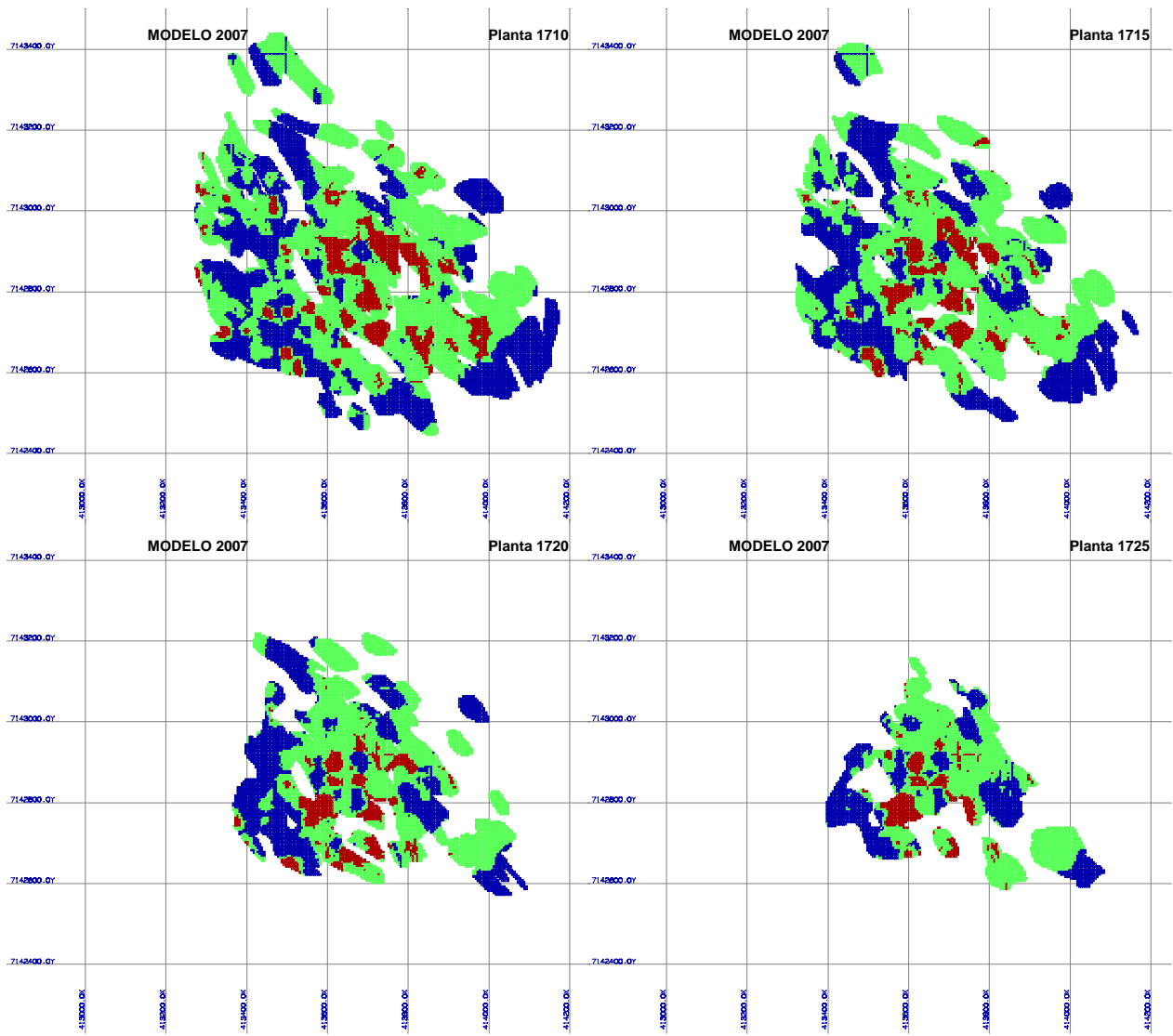


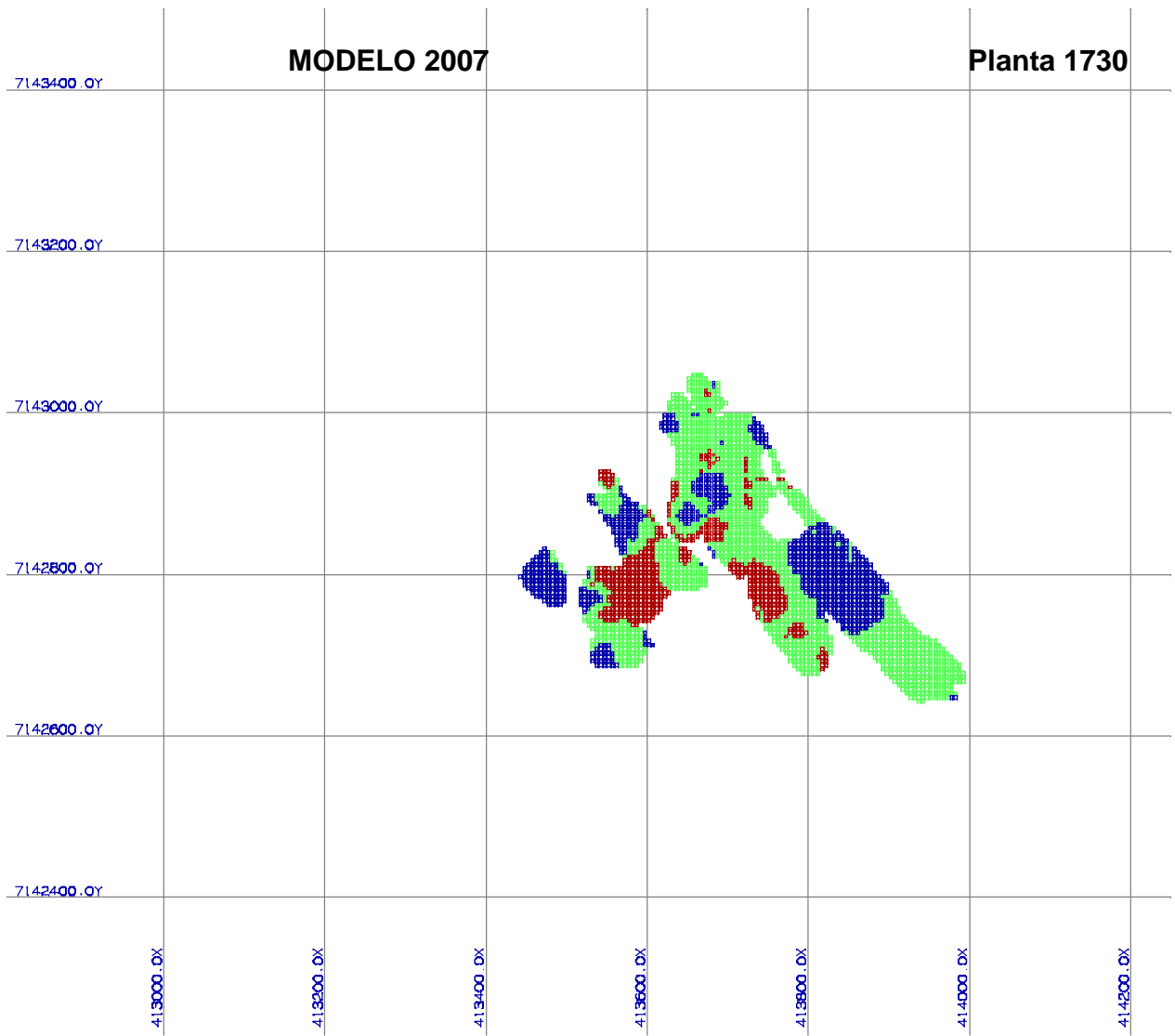












ANEXO D

DESCRIPCIONES

PETROGRÁFICAS

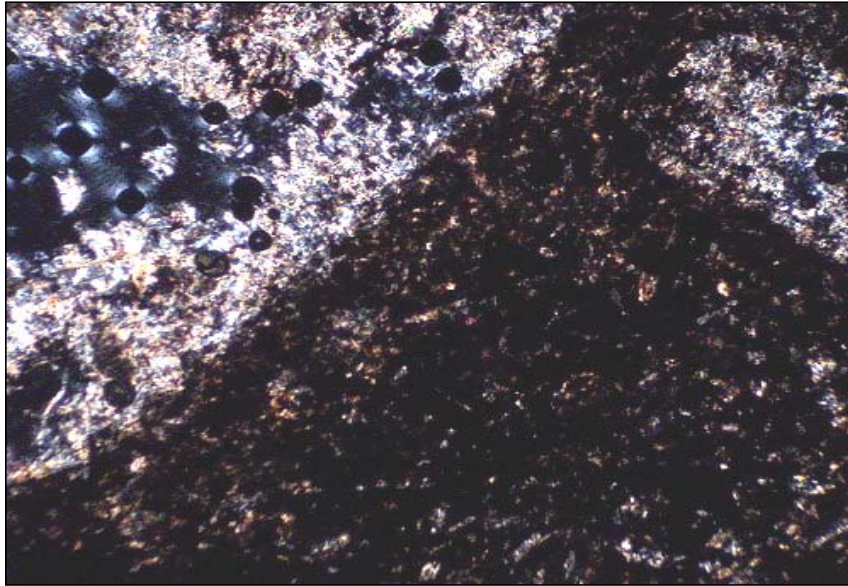
Y

MINERALÓGICAS

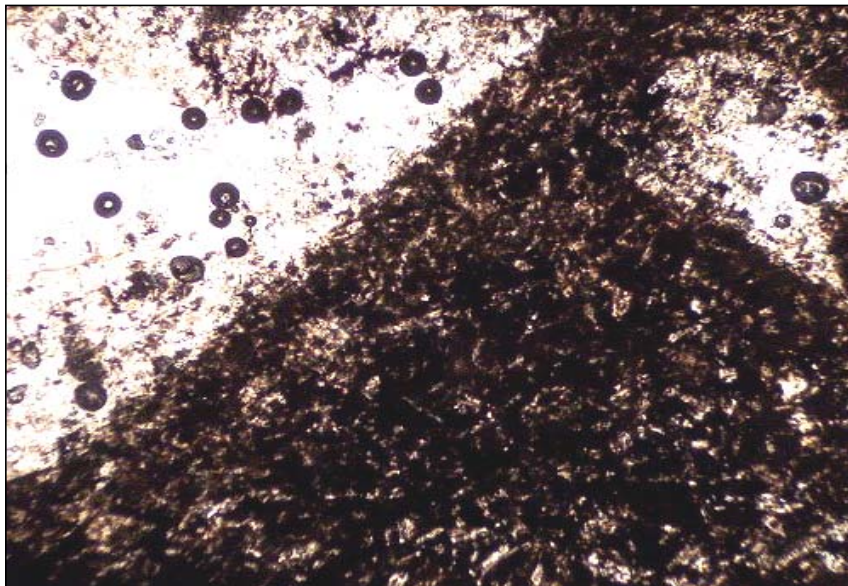
ESTUDIO PETROGRAFICO

	Nº Muestra	M-1			
Procedencia	Coord. Norte		Coord. Este	Elevación (m)	
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein					
Solicitado por					Fecha
Geol. Miguel Montes, Geovectra S. A.					27-08-2007
Clasificación petrográfica	Andesita con fuerte alteración a sericita y leucoxeno				
Textura					%Fcx: 25 %MF: 75
Porfídica, con masa fundamental intergranular.					
Observaciones megascópicas/microscópicas					
Roca de textura porfídica, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 5,5 mm, alterada fuertemente a sericita y montmorillonita, en una masa fundamental intergranular, compuesta por microlitos de plagioclasa con tamaño medio de 0,2 mm, sin orientación preferente y con fuerte alteración a sericita, presentando abundante leucoxeno en forma intersticial e impregnado en los microlitos. Uno de los fragmentos de roca presentes corresponde a una toba cinerítica fina, con fragmentos angulosos de líticos andesíticos y de cristales de cuarzo, pequeños, con matriz cinerítica fina con fuerte alteración a sericita y montmorillonita. Se observan abundantes vetillas y agregados con óxidos de cobre.					
Minerales consumidores de ácido					
Tanto los fragmentos de andesita como los de toba poseen gran cantidad de montmorillonita, que es un gran consumidor de ácido (alta adsorción).					

Microfotografía (aspecto general)



Muestra M-1: aspecto de andesita con fenocristales de plagioclasa alterada a sericita en masa fundamental intergranular. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-1: id anterior. Se advierte impregnación abundante de hematita y leucoxeno en la masa fundamental. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.

Fenocristales: % 20

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	20	intensa sericita y montmorillonita	crisales subhedrales de hasta 5,5 mm, intensamente alterada, con maclas polisintéticas borradas por la alteración por lo que no es posible estimar la composición de los cristales (método Michel Lévy).

Masa Fundamental: 60

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	31	fuerte sericita	crisales subhedrales con tamaño medio de 0,2 mm, sin orientación preferente.
leucoxeno	25	-	presente en forma intersticial entre microlitos de plagioclasa e impregnado en éstos.
opacos	4		

Notas complementarias

Los porcentajes expresados corresponden a la cantidad dentro de la muestra analizada. Estos porcentajes, en terminos relativos, presentan una variación que otorga un 25% de fenocristales y 75% de masa fundamental para los trozos de andesita.

Trozo de toba: % 20

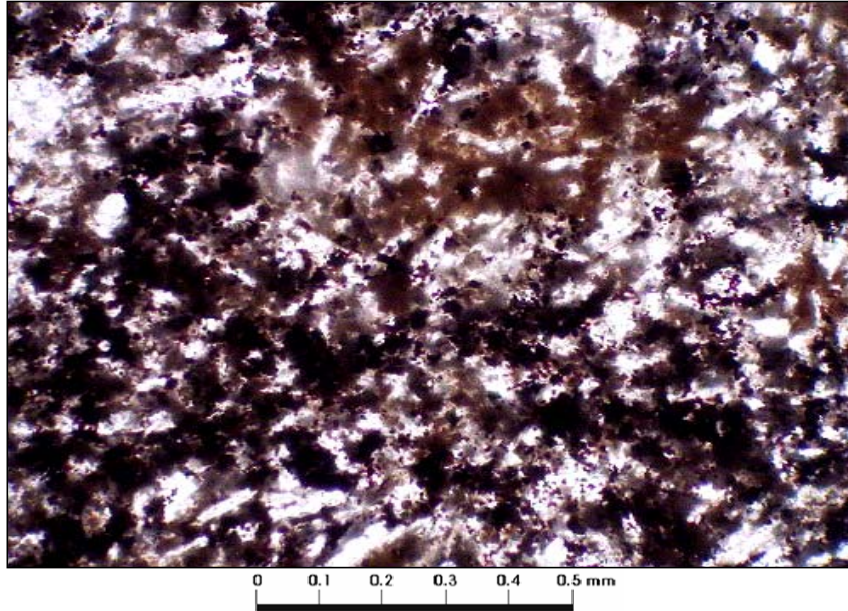
Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
toba	20	moderada a fuerte sericita y montmorillonita	trozo de roca correspondiente a toba cinerítica con fragmentos andesíticos de aspecto similar a la andesita descrita más ampliamente. Éstos fragmentos son angulosos y no superan los 2 mm. Fragmentos de crisales de cuarzo, muy pequeños y angulosos de hasta 0,3 mm. La matriz es cinerítica muy fina (85% del fragmento) con parcial a fuerte alteración a sericita y montmorillonita.

Minerales Alteración (secundarios)

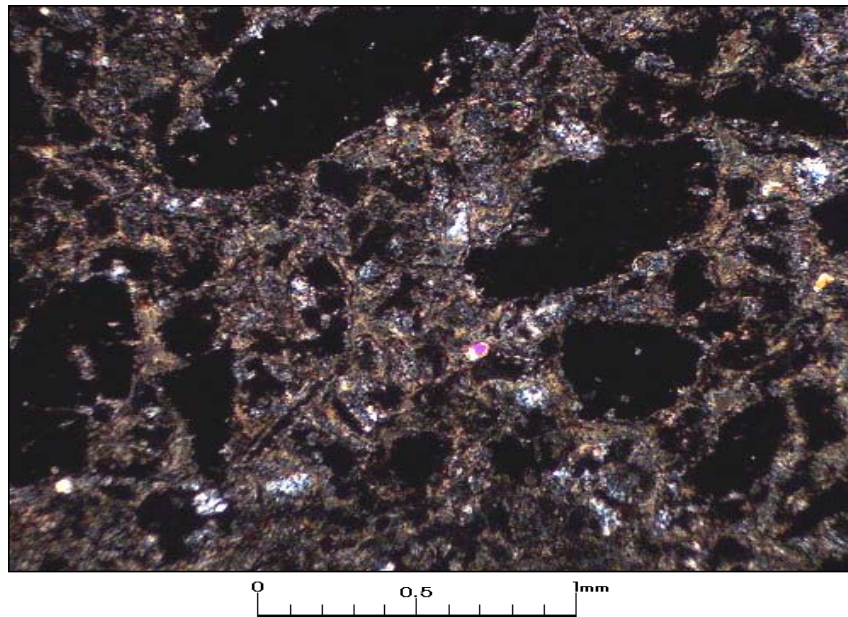
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
sericita	35	alterando fuertemente a crisales de plagioclasa, tanto fenocristales como microlitos en andesita y toba.
montmorillonita	15	alterando a crisales de plagioclasa en andesita y toba.
leucoxeno	25	presente en forma intersticial entre microlitos de plagioclasa en masa fundamental de andesita.

Minerales Opacos

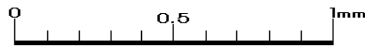
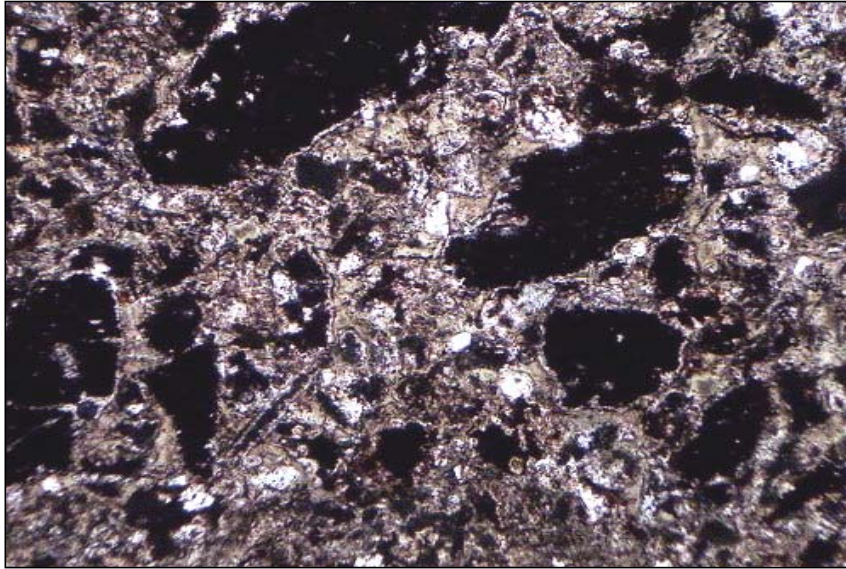
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
hematita	5	impregnada principalmente en la masa fundamental de andesita.
óxidos de Cu (?)	2	en agregados y vetillas finas, presente en andesita y toba.



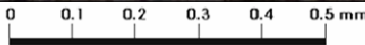
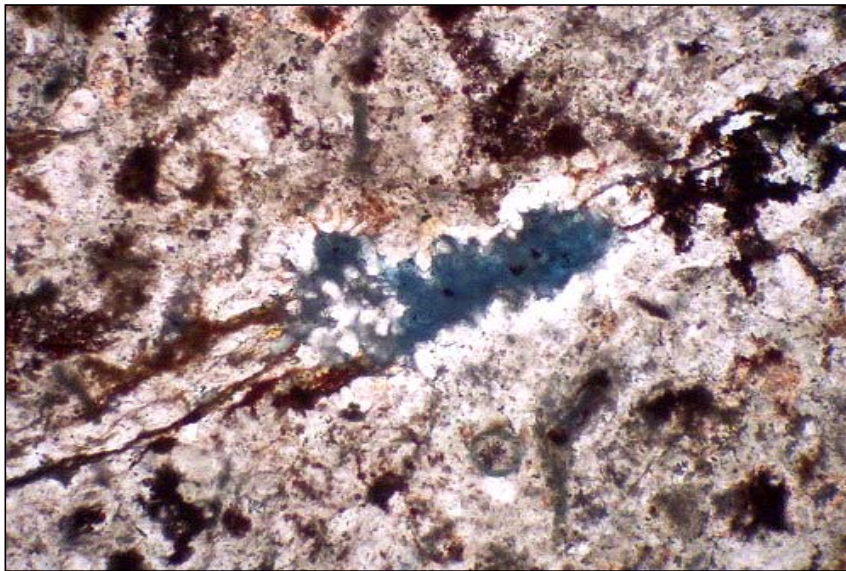
Muestra M-1: detalle de masa fundamental con impregnación de hematita y leucosiderita. Aum.: 10X10; Nic. Paralelos.



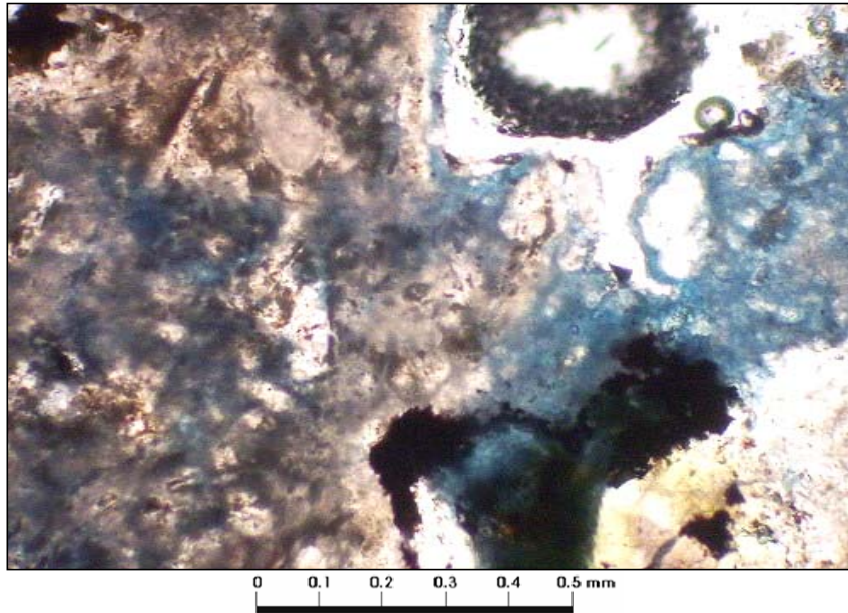
Muestra M-1: parte de trozo de toba con fragmentos de líticos andesíticos y escasos cristales muy finos de cuarzo. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-1: id anterior. Se advierte impregnación de opacos y leucoxeno en fragmentos andesíticos. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.



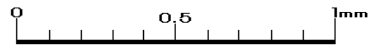
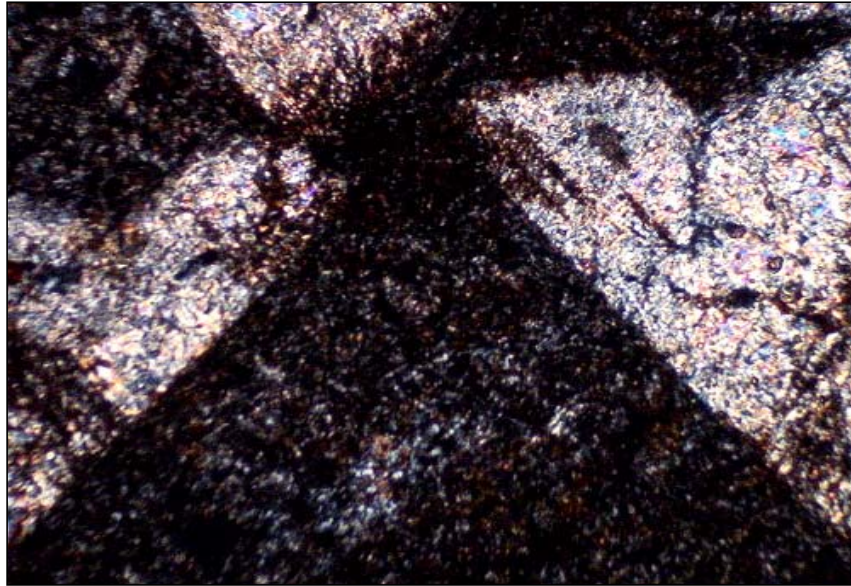
Muestra M-1: microvenilla con óxido de Cu en trozo de toba. Aum.: 10X10; Nic. Paralelos.



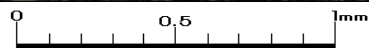
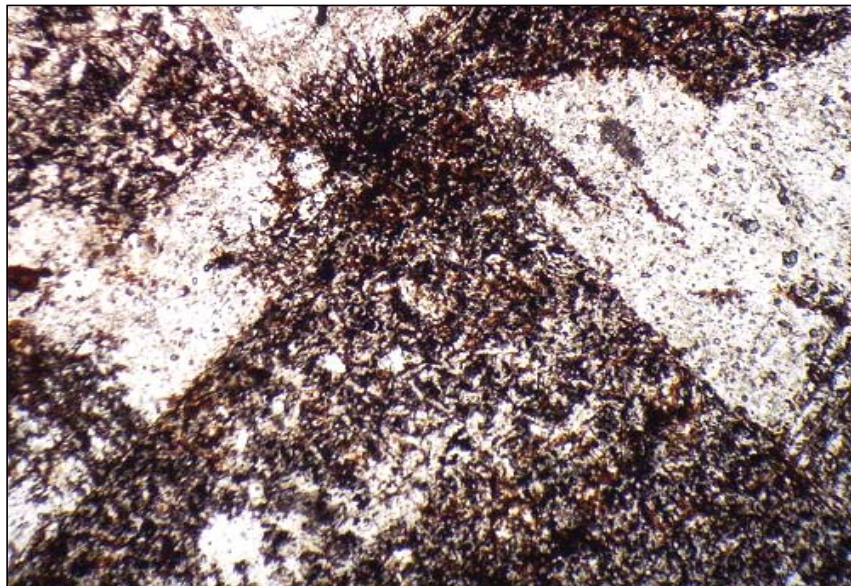
Muestra M-1: agregado de óxido de Cu en trozo de andesita. Aum.: 10X10; Nic. Paralelos.

Nº Muestra		M-2	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Clasificación petrográfica	Andesita con fuerte alteración a sericita e impregnación de hematita fina		
Textura			%Fcx: 20 %MF: 80
Porfídica, con masa fundamental intergranular			
Observaciones megascópicas/microscópicas			
Roca de textura porfídica, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 4 mm, alterada fuertemente a sericita y localmente con impregnación de hematita y calcita muy finas, en una masa fundamental intergranular, compuesta por microlitos de plagioclasa con tamaño medio de 0,2 mm, sin orientación preferente, alterada fuertemente a sericita y localmente con reemplazo de calcita escasa, presentando abundante hematita impregnada en microlitos y en forma intersticial entre ellos. Se advierten algunos trozos de roca correspondientes a toba cinerítica. Se observan agregados y microvenillas con óxidos de Cu presentes en trozos de toba.			
Minerales consumidores de ácido			
Los trozos con andesita presentan impregnación de carbonatos mientras que los de toba muestran alteración a montmorillonita que poseen una alta adsorción de ácido.			

Microfotografía (aspecto general)



Muestra M-2: aspecto de andesita con fenocristales de plagioclasa alterada a sericita en masa fundamental intergranular. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-2: id anterior. Se advierte impregnación abundante de hematita en la masa fundamental. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.

Fenocristales: % 12

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	12	intensa sericita y localmente calcita muy fina	crisales subhedrales de hasta 4 mm, intensamente alterada, con maclas polisintéticas borradas por la alteración por lo que no es posible estimar la composición de los cristales. La alteración corresponde principalmente a sericita mostrando algunos cristales con impregnación de hematita y carbonatos en cristales muy finos.

Masa Fundamental: 48

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	38	moderada a fuerte sericita y carbonatos en forma local	crisales subhedrales con tamaño medio de 0,2 mm, sin orientación preferente.
limonitas	7		

Trozo de toba: % 40

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
toba	40	moderada a fuerte sericita y montmorillonita	trozos de roca correspondientes a toba cinerítica con fragmentos andesíticos de hasta 6 mm, fuertemente alterados a montmorillonita y sericita, fragmentos de crisales de cuarzo y feldespatos sericitizados en matriz cinerítica fina, con desarrollo de vetillas y agregados de cuarzo y localmente abundantes óxidos de Cu.

Minerales Alteración (secundarios)

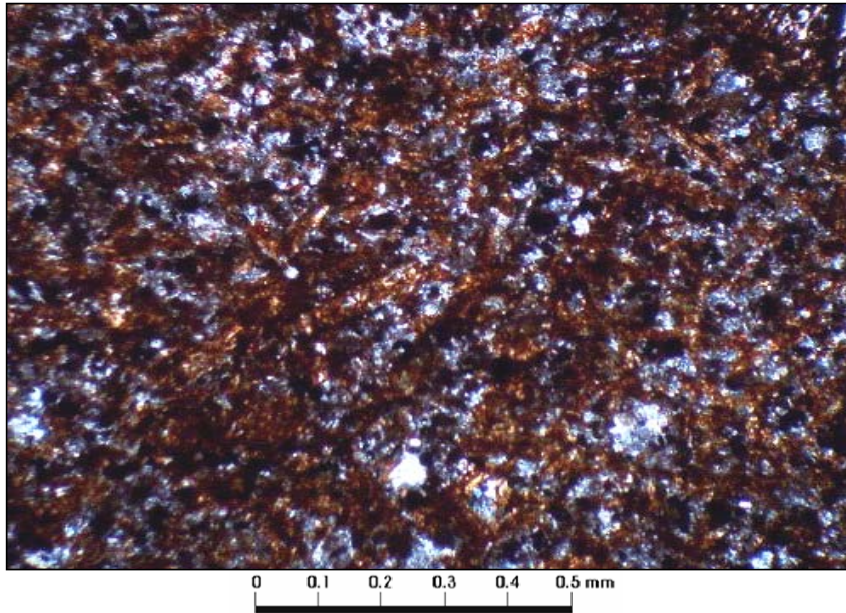
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
sericita	35	alterando fuertemente a crisales de plagioclasa, tanto fenocristales como microlitos en andesita y toba.
montmorillonita	25	alterando a crisales de plagioclasa en andesita y toba y a matriz cinerítica en toba.
carbonatos	6	impregnada en fenocristales y masa fundamental de trozos de andesita. Se presentan impregnados por limonitas.

Minerales Opacos

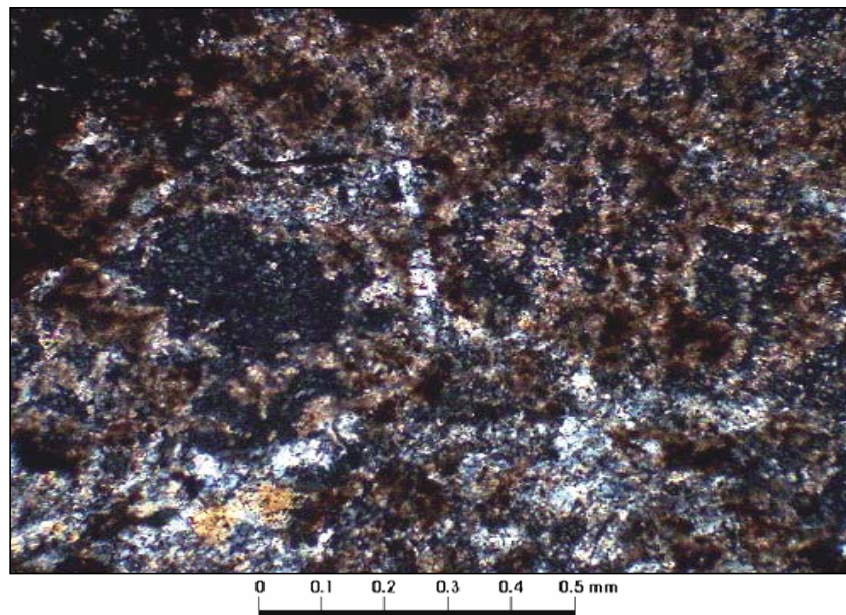
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
limonitas	8	diseminados en fragmentos de andesita y toba.
óxidos de Cu	3	en agregados y microvenillas presente en trozos de toba.

Estructuras

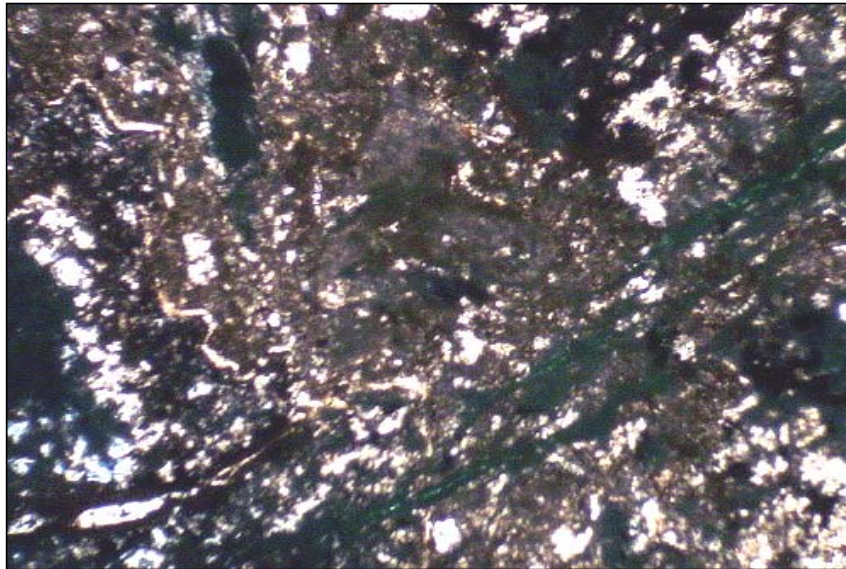
Vetillas / Agregados	Espesor/Tamaño	Características/Modo de ocurrencia
vetillas de cuarzo-CuOx (?)	<1,5 mm	entrecortadas, con formas irregulares y sinuosas.



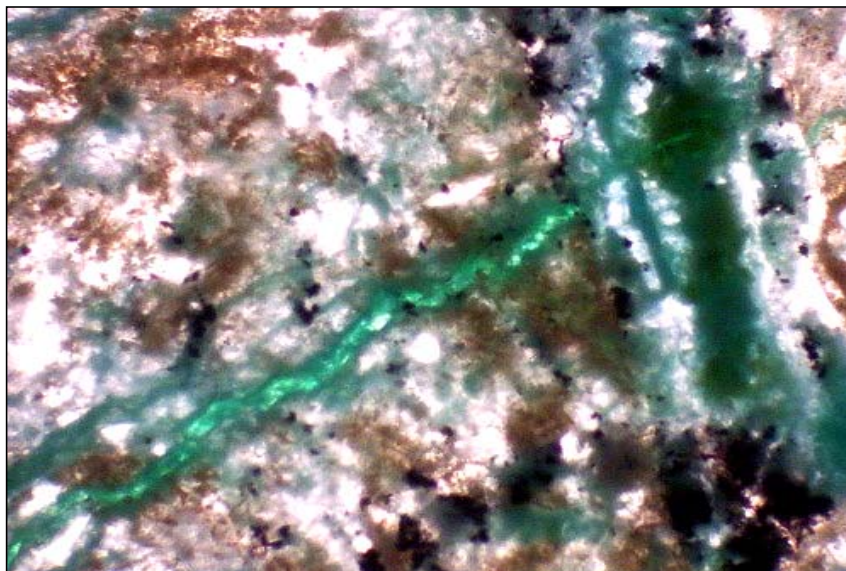
Muestra M-2: detalle de masa fundamental con impregnación de abundantes limonitas. Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-2: detalle de fenocristal de plagioclasa con impregnación de carbonatos. Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.



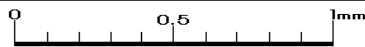
Muestra M-2: trozo de toba cortado por vetillas de óxidos de Cu. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.



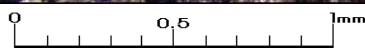
Muestra M-2: microvenillas con óxido de Cu en trozo de toba. Aum.: 10X10; Nic. Paralelos.

Nº Muestra		M-3	
Procedencia		Coord. Norte	Coord. Este
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Clasificación petrográfica	Andesita amigdaloidal		
Textura			%Fcx: 25 %MF: 75
Porfídica, con masa fundamental intergranular			
Observaciones megascópicas/microscópicas			
Roca de textura porfídica, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 5 mm, alterada moderadamente a sericita, en una masa fundamental intergranular, compuesta por microlitos de plagioclasa con tamaño medio de 0,35 mm, sin orientación preferente, alterada parcialmente a sericita, con abundante hematita en forma intersticial. La roca presenta amígdalas rellenas con clorita. Localmente se observa impregnación de escasos granos finos de calcita. Se observan algunos planos de cizalle deformando, fracturando y localmente desplazando a cristales.			
Minerales consumidores de ácido			
La muestra posee feldspatos con un considerable contenido de Ca (An_{38}), por lo que el aporte en la adsorción de ácidos puede ser importante. Se observa 1% de carbonatos y alteración a clorita como buenos consumidores.			

Microfotografía (aspecto general)



Muestra M-3: aspecto de la roca con fenocristales de plagioclasa en masa fundamental intergranular. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-3: id anterior. Se advierte amígdala rellena con clorita. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.

Fenocristales: % 25

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	25	moderada sericita	crisales subhedrales de hasta 5 mm, de composición andesina (An ₃₀).

Masa Fundamental: 75

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	55	leve a moderada sericita	crisales subhedrales con tamaño medio de 0,35 mm, sin orientación preferente.
clorita	7	-	en forma intersticial entre microlitos de plagioclasa y rellenando amígdalas.
limonitas	13		

Minerales Alteración (secundarios)

Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
sericita	15	alterando parcialmente a crisales de plagioclasa, tanto a fenocristales como a microlitos.
carbonatos	1	impregnada en forma local en la roca, en fenocristales de plagioclasa, microlitos y entre éstos.
clorita	7	rellenando amígdalas y en forma intersticial entre microlitos de plagioclasa.

Minerales Opacos

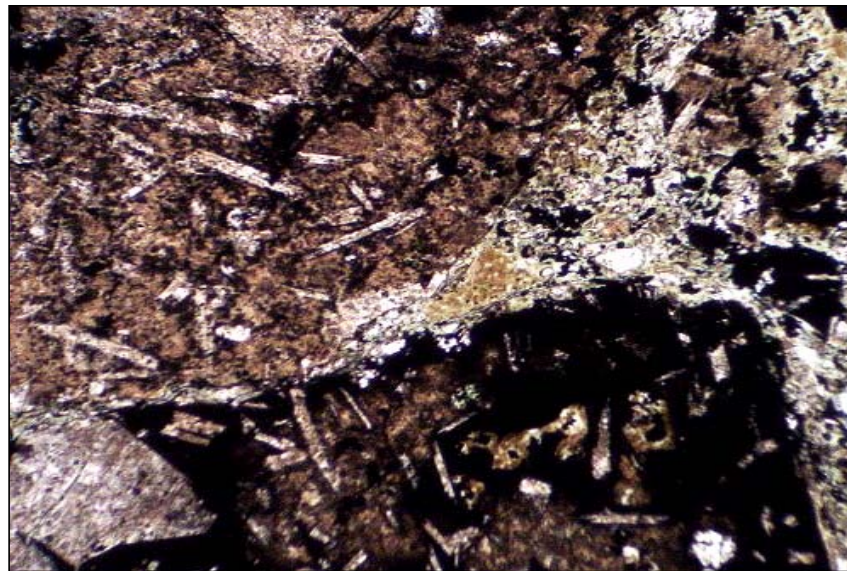
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
limonitas	13	diseminada en la masa fundamental, localmente muy abundante.
magnetita	1	crisales subhedrales asociados a limonitas.

Estructuras

Vetillas / Agregados	Espesor/Tamaño	Características/Modo de ocurrencia
cizallamiento y leve brechización	-	la roca se encuentra cortada en forma local por planos de cizalle y con leve brechización con matriz de clorita.



Muestra M-3: parte de la roca afectada por cizallamiento, con cristales de plagioclasa deformados y fracturados. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



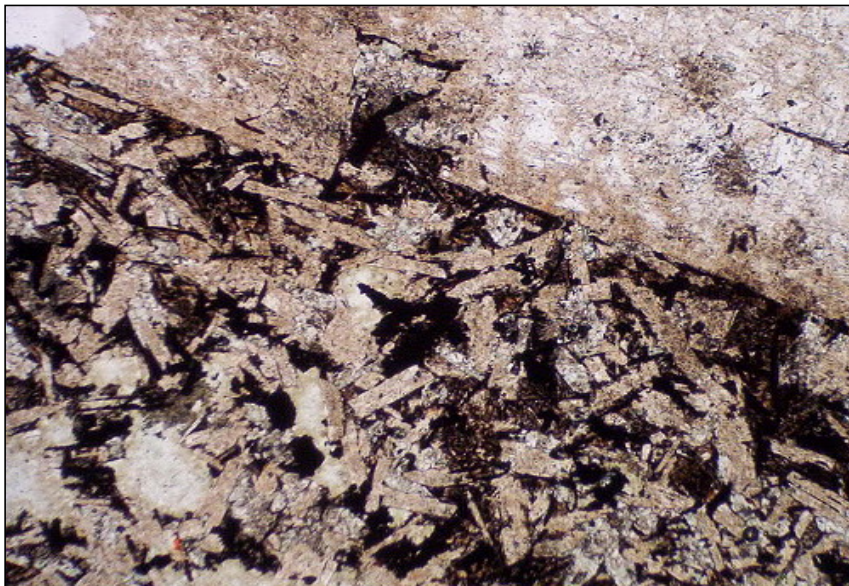
Muestra M-3: aspecto brechoso que presenta la roca en forma local. La matriz es de clorita. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.

Nº Muestra		M-4	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Clasificación petrográfica	Andesita amigdaloidal		
Textura			%Fcx: 20 %MF: 80
Porfídica, con masa fundamental intergranular			
Observaciones megascópicas/microscópicas			
Roca de textura porfídica, color gris oscuro, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 5,5 mm, alterada leve a moderadamente a sericita, en una masa fundamental intergranular, compuesta por microlitos de plagioclasa con tamaño medio de 0,3 mm, alterada levemente a sericita y con incipiente albitización, sin orientación preferente, con presencia de clorita y hematita en forma intersticial. La roca presenta impregnación de calcita localmente abundante, presente escasamente en fenocristales de plagioclasa y en mayor medida en la masa fundamental, como cristales muy finos en forma diseminada. Se observan amígdalas rellenas con calcita y clorita, localmente interconectadas. Los minerales opacos presentes corresponden a hematita abundante y magnetita en forma diseminada.			
Minerales consumidores de ácido			
La muestra posee feldespatos con considerable contenido de Ca (An_{40}), por lo que el aporte en la adsorción de ácidos sería importante. Se observa 5% de carbonatos y 5% de clorita que, en éste caso, son los mayores consumidores.			

Microfotografía (aspecto general)



Muestra M-4: aspecto de la roca con fenocristales de plagioclasa parcialmente sericitizada en masa fundamental intergranular. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-4: id anterior. Se advierte impregnación de hematita en la masa fundamental. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.

Fenocristales: % 20

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	20	leve a moderada sericita	crisales subhedrales de hasta 5,5 mm, de composición andesina (An ₄₀). Localmente presenta impregnación escasa de calcita.

Masa Fundamental: 80

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	60	leve sericita y albita	crisales subhedrales con tamaño medio de 0,3 mm, sin orientación preferente.
clorita-calcita	10	-	en forma intersticial entre microlitos de plagioclasa y rellenando amígdalas.
limonitas	10		

Minerales Accesorios

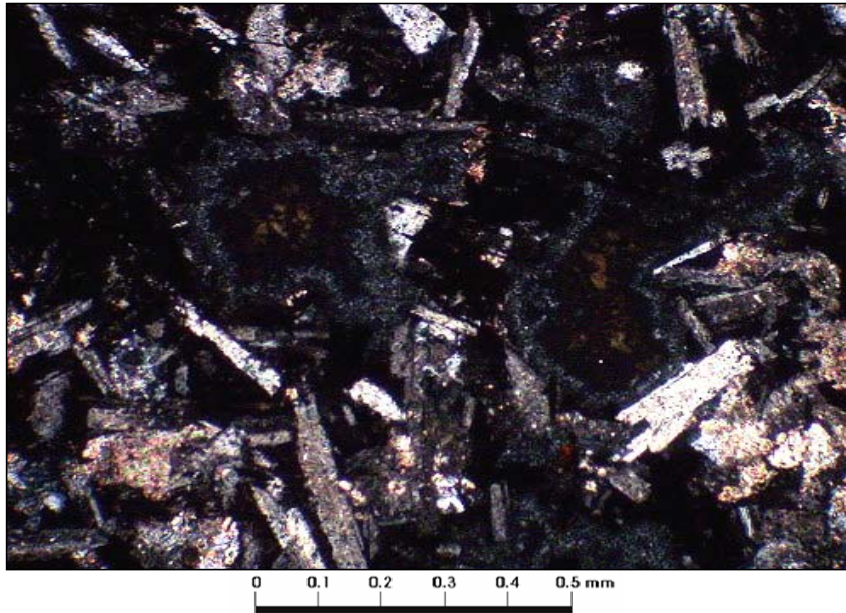
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
rutilo	tr	escasos granos sub a anhedrales de hasta 70 µm en forma diseminada en la masa fundamental.

Minerales Alteración (secundarios)

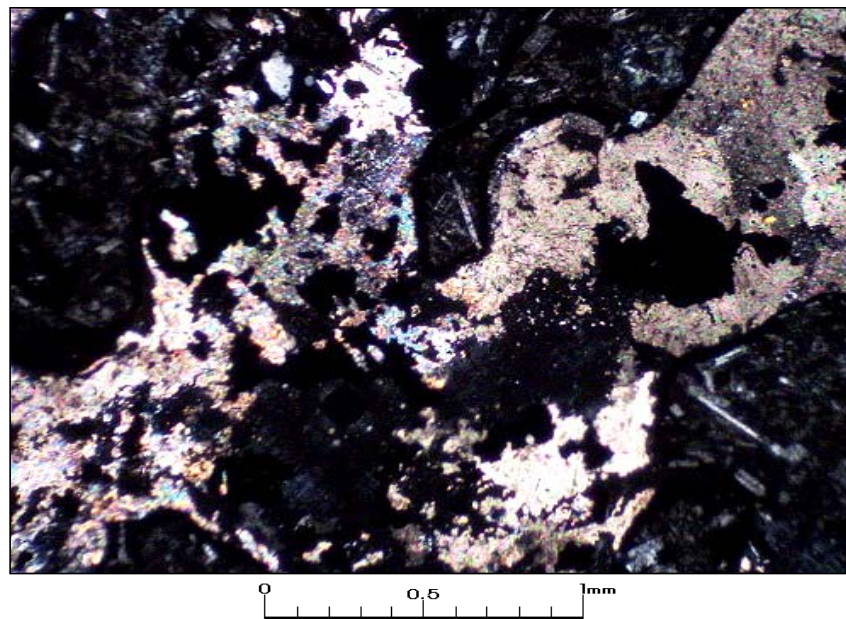
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
sericita	6	alterando parcialmente especialmente a fenocristales de plagioclasa y en forma incipiente a microlitos.
albita	?	reemplazando levemente a microlitos de plagioclasa.
calcita	5	impregnada escasamente en fenocristales de plagioclasa, en microlitos, entre éstos y rellenando amígdalas.
clorita	5	rellenando amígdalas y en forma intersticial entre microlitos de plagioclasa.

Minerales Opacos

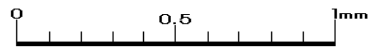
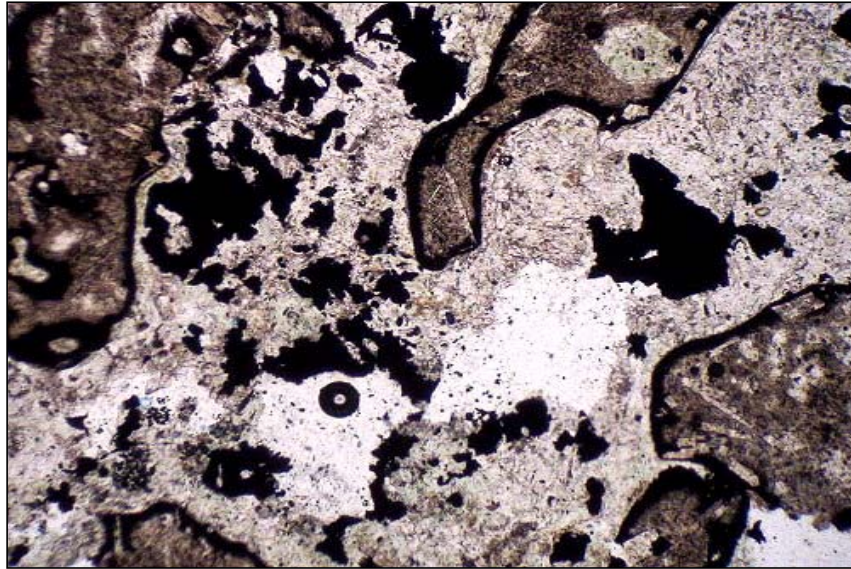
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
limonitas	10	presente en forma intersticial entre microlitos de plagioclasa y en bordes de amígdalas. Corresponde a hematita.
magnetita	1	crisales subhedrales asociados a limonitas.



Muestra M-4: detalle de la masa fundamental con presencia de pequeñas amígdalas rellenas con clorita. Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.



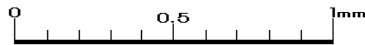
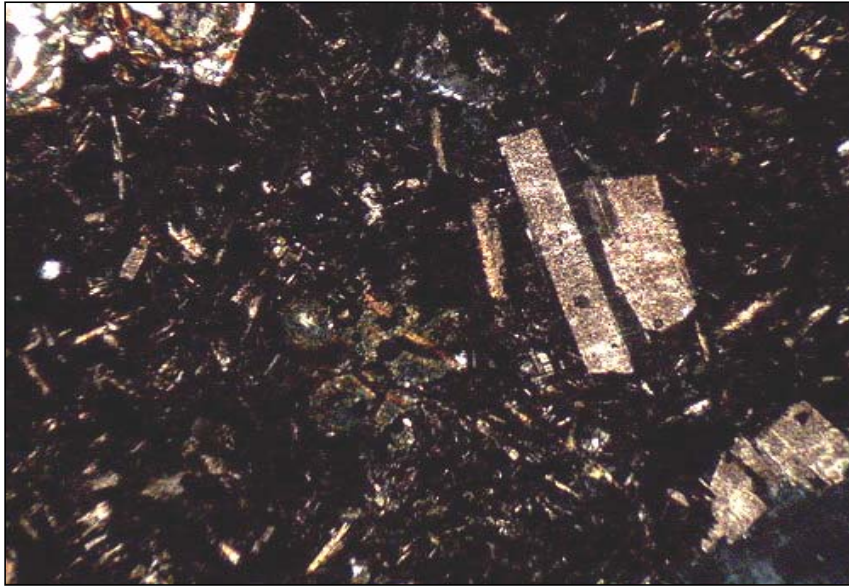
Muestra M-4: amígdalas interconectadas con relleno de calcita. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



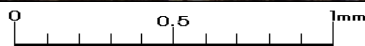
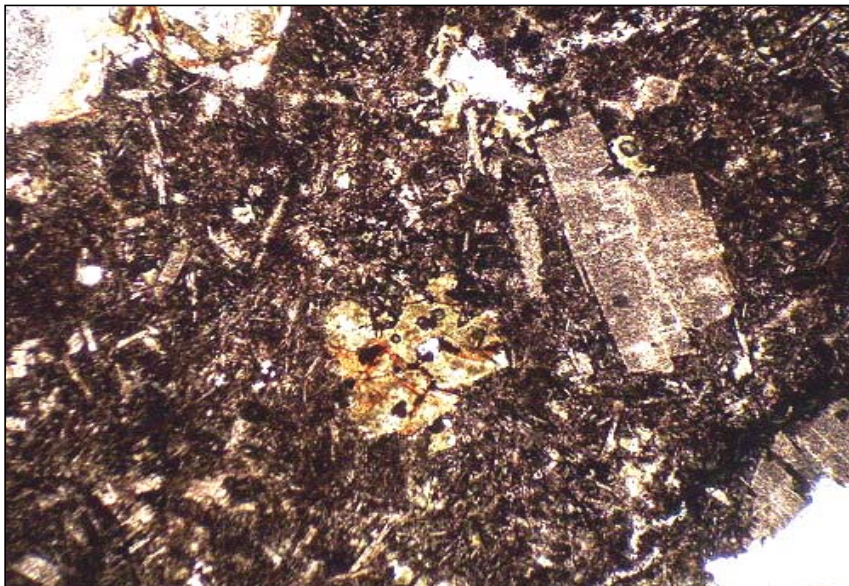
Muestra M-4: id anterior. Se advierte hematita en bordes de amígdalas. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.

Nº Muestra		M-5	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Clasificación petrográfica	Andesita amigdaloidal		
Textura			%Fcx: 20 %MF: 80
Porfídica, con masa fundamental intergranular			
Observaciones megascópicas/microscópicas			
Roca de textura porfídica, color gris intermedio, localmente rojizo por impregnación de abundante hematita fina y verdoso por presencia de cloritas, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 3 mm, parcial a fuertemente descalcificada y seudomorfos de máficos alterados a clorita, en una masa fundamental intergranular, compuesta por microlitos de plagioclasa con tamaño medio de 0,1 mm, sin orientación preferente, con presencia de clorita y hematita en forma intersticial, localmente abundante. Se observan amígdalas rellenas con ceolita y clorita, localmente con presencia de agregados muy finos de óxidos de Cu. Los minerales opacos presentes corresponden a hematita abundante y magnetita en menor medida.			
Minerales consumidores de ácido			
La muestra posee feldespatos con considerable contenido de Ca (An_{35}), por lo que el aporte en la adsorción de ácidos sería importante. Se observa abundante clorita que radica en un alto consumo de ácido.			

Microfotografía (aspecto general)



Muestra M-5: aspecto de la roca con fenocristales de plagioclasa en masa fundamental intergranular. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-5: id anterior. Se advierte impregnación de hematita fina en la masa fundamental. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.

Fenocristales: % 20

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	18	-	crisales subhedrales de hasta 3 mm, de composición andesina (An ₃₅). Con parcial descalcificación que otorga un aspecto turbio a los crisales.
máficos	2	intensa clorita	crisales sub a euhedrales de hasta 1 mm, correspondiente a pseudomorfos de hornblenda y/o piroxeno.

Masa Fundamental: 80

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	64	-	crisales subhedrales con tamaño medio de 0,1 mm, sin orientación preferente.
clorita	4	-	en forma intersticial entre microlitos de plagioclasa.
opacos	12		

Minerales Accesorios

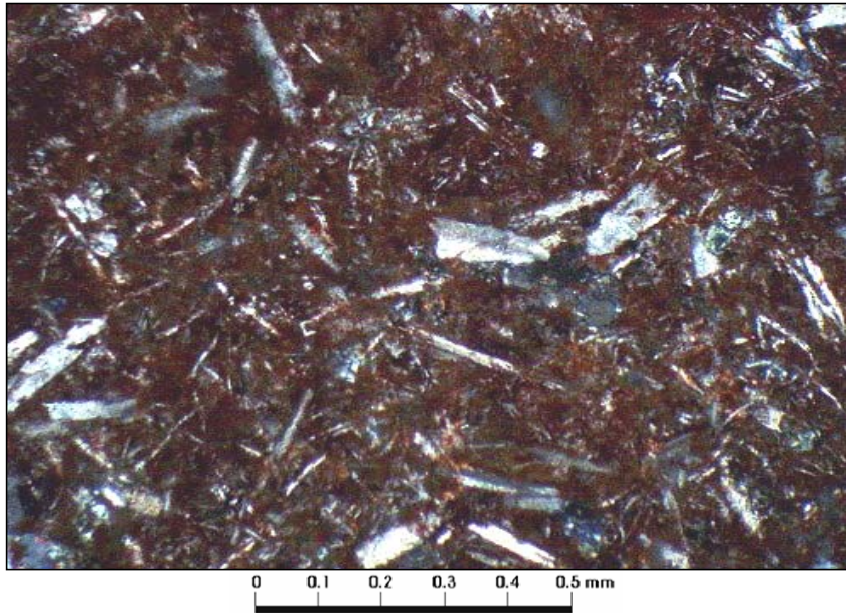
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
rutilo	<1	escasos granos sub a anhedrales de hasta 0,1 mm, en forma diseminada en la masa fundamental.

Minerales Alteración (secundarios)

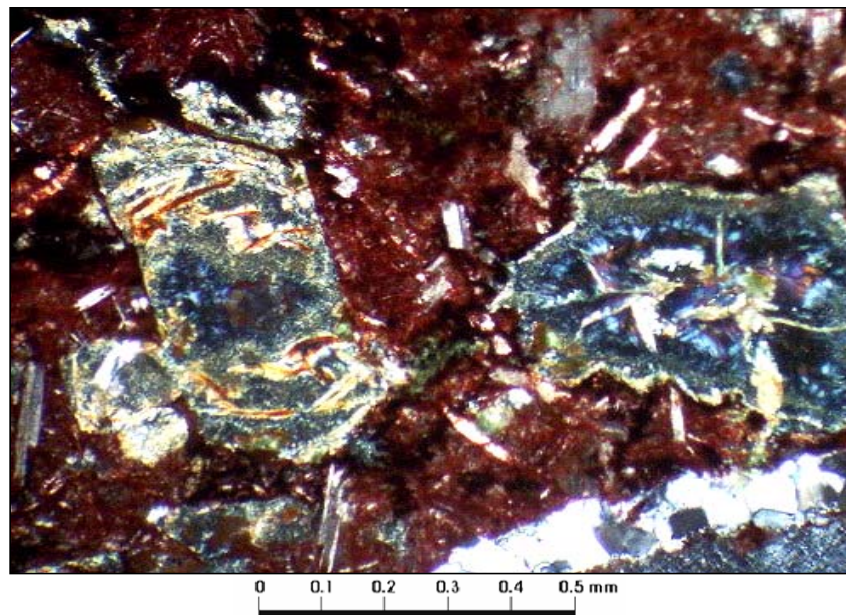
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
albita	?	reemplazando levemente a microlitos de plagioclasa.
clorita	7	alterando a fenocristales de máficos, presente entre microlitos de plagioclasa en la masa fundamental y localmente en amígdalas.
ceolita	2	rellenando amígdalas de hasta 8 mm.

Minerales Opacos

Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
hematita	9	en forma diseminada, principalmente en la masa fundamental, localmente abundante.
magnetita	3	diseminada en crisales sub a anhedrales de hasta 0,8 mm.



Muestra M-5: detalle de la masa fundamental con impregnación de abundante hematita fina. Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.



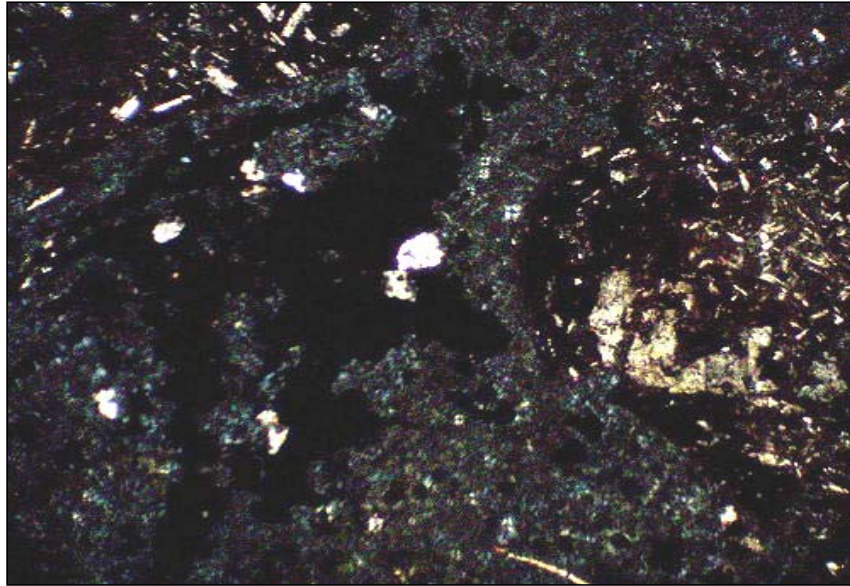
Muestra M-5: parte de la masa fundamental con seudomorfo de máfico cloritizado (izquierda) y amígdala rellena con clorita. Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.



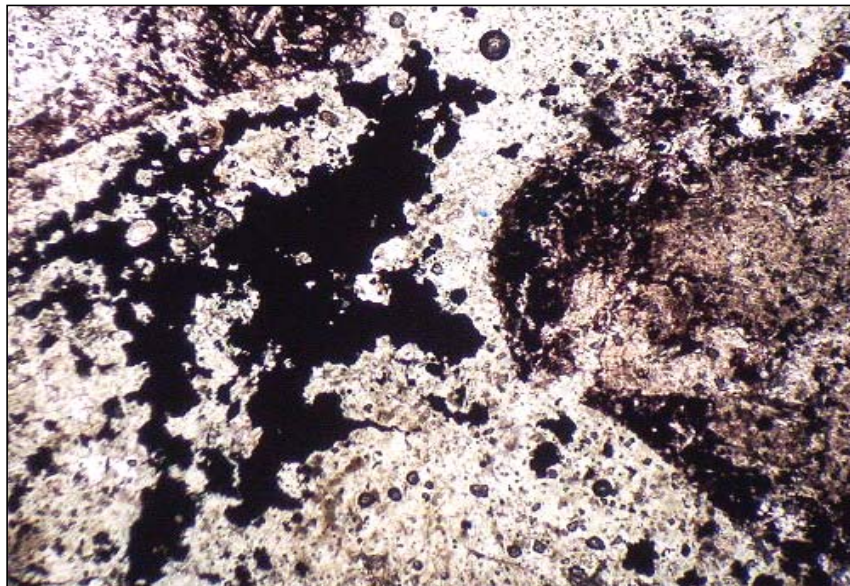
Muestra M-5: parte de amígdala rellena con ceolita en cristales aciculares. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.

Nº Muestra		M-6	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Clasificación petrográfica	Brecha de clorita-hematita		
Textura	%Frg: 25		%Mx: 75
Fragmental, con matriz de clorita y hematita			
Observaciones megascópicas/microscópicas			
Roca de textura fragmental, color gris intermedio con matriz oscura, presentando sectores verdosos por presencia de CuOx, compuesta por fragmentos de andesita amigdaloidal, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 4 mm, en masa fundamental intergranular, compuesta por finos microlitos de plagioclasa con escasa clorita intersticial e impregnación de hematita fina. La matriz de brecha está compuesta por clorita y localmente abundante hematita en densos agregados. Un trozo del "chancado" se encuentra fuertemente cizallado, con presencia de cristales de plagioclasa fuertemente deformada, fracturada y localmente triturada. Los minerales opacos presentes corresponden a hematita en fragmentos y matriz, localmente abundante y presencia en forma local de magnetita. Se observan escasos cristales de óx de Cu diseminada en forma local.			
Minerales consumidores de ácido			
La muestra posee feldespatos con considerable contenido de Ca (An ₄₃), por lo que el aporte en la adsorción de ácidos sería importante. Se observa abundante clorita (18% en toda la muestra) que radica en un alto consumo de ácido.			

Microfotografía (aspecto general)



Muestra M-6: aspecto de la roca con fragmentos andesíticos y matriz de clorita y opacos. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-6: id anterior. Se advierte desarrollo de agregados de opacos (magnetita) en parte de la matriz. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.

Fragmentos: % 75

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
andesita	75	clorita escasa en la masa fundamental	fragmentos angulosos compuestos por fenocristales de plagioclasa (15%) de hasta 4,5 mm, parcial a fuertemente descalcificada, de composición andesina (An ₂₃), en masa fundamental intergranular compuesta por microlitos de plagioclasa (48%) con tamaño medio de 0,1 mm, sin orientación preferente, con clorita (5%) en forma intersticial e impregnación localmente abundante de hematita (7%) fina. Presenta amígdalas rellenas con clorita.

Matriz: % 25

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
clorita	18	-	agregados finos.
cuarzo	2	-	agregados localmente ondulados.
opacos	5	-	correspondiente a hematita y escasa magnetita localmente en agregados densos.

Minerales Alteración (secundarios)

Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
clorita	23	presente en fragmentos de andesita, especialmente en la masa fundamental y como parte de la matriz.

Minerales Opacos

Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
hematita	12	presente en fragmentos, como impregnación de cristales muy finos localmente abundantes y como parte de la matriz.
magnetita	2	diseminada en algunos fragmentos de andesita.

Estructuras

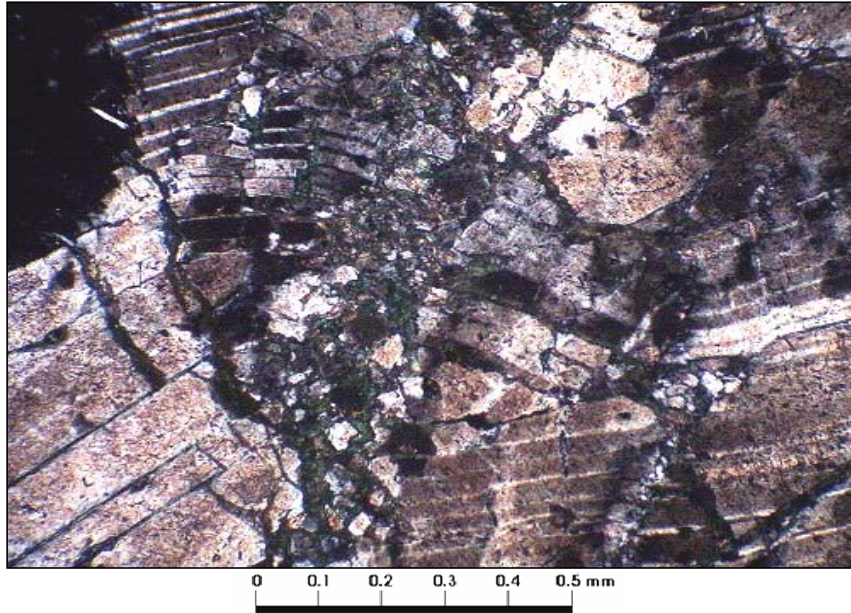
Vetillas / Agregados	Espesor/Tamaño	Características/Modo de ocurrencia
trozo de andesita cizallada	-	corresponde a un trozo de andesita que presenta cristales de plagioclasa intensamente deformados y localmente fracturados y triturados.



Muestra M-6: fragmento andesítico con amígdala rellena con clorita. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-6: trozo de roca fuertemente cizallada. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-6: detalle de la fotografía anterior. Se aprecia deformación, fracturamiento y trituramiento de cristales de plagioclasa. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.

Nº Muestra		M-7	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			

Clasificación petrográfica Andesita parcialmente brechizada

Textura Porfídica, con masa fundamental microlítica afieltrada %Fcx: 18 %MF: 82

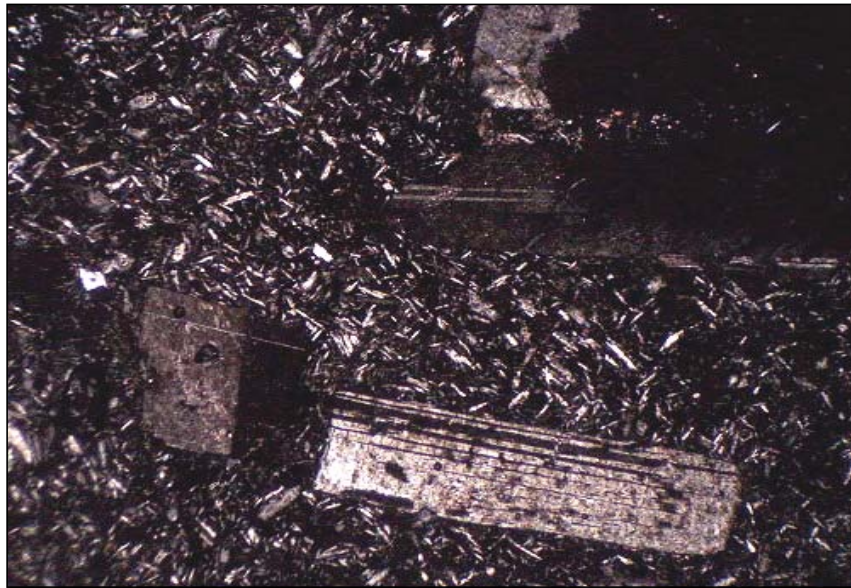
Observaciones megascópicas/microscópicas

Roca de textura porfídica, color gris intermedio, localmente con tonalidades verdosas por presencia de clorita, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 4 mm, parcial a fuertemente descalcificada y con incipiente reemplazo de calcita, muy escasos pseudomorfos de máficos alterados a clorita y masa fundamental microlítica afieltrada, compuesta por microlitos de plagioclasa con tamaño medio de 0,1 mm, sin orientación preferente, con presencia de escasa clorita en forma intersticial. La roca presenta amígdalas rellenas con cuarzo, ceolita y localmente pequeños granos de calcita. Se aprecia brechización en forma local, con matriz de cuarzo. La roca se encuentra cortada por vetillas de calcita y localmente con leve cizallamiento. Los minerales opacos presentes corresponden a hematita y magnetita en forma diseminada. Se observan óxidos de Cu en microvenillas y matriz de parte brechosa. Uno de los trozos de roca corresponde a toba fina de cristales, parcialmente alterada a montmorillonita.

Minerales consumidores de ácido

La muestra posee feldespatos con moderado a alto contenido de Ca (An_{32}), por lo que el aporte en la adsorción de ácidos sería importante. Se observa clorita, carbonatos y montmorillonita que son importantes consumidores de ácidos. Estos minerales representan un 10% de la muestra. Los cristales de malaquita influyen mínimamente en éste sentido.

Microfotografía (aspecto general)



Muestra M-7: aspecto de la roca con fenocristales de plagioclasa en masa fundamental microlítica afieltrada. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.

Fenocristales: % 18

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	17	incipiente calcita	crisotales subhedrales de hasta 4 mm, de composición andesina (An ₃₂). Presenta parcial descalcificación que otorga un aspecto turbio a los cristales.
máficos	1	intensa clorita	escasos cristales subhedrales de hasta 1 mm, correspondiente posiblemente a hornblenda y/o piroxeno.

Masa Fundamental: 82

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	72	-	microlitos con tamaño medio de 0,1 mm, sin orientación preferente.
clorita	4	-	en forma intersticial entre microlitos de plagioclasa.
amígdalas	2	-	reellenas con cuarzo, ceolita y escasa calcita en forma local.
opacos	4	-	

Minerales Accesorios

Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
rutilo	tr	escasos granos sub a anhedrales de hasta 0,1 mm, en forma diseminada en la masa fundamental.

Minerales Alteración (secundarios)

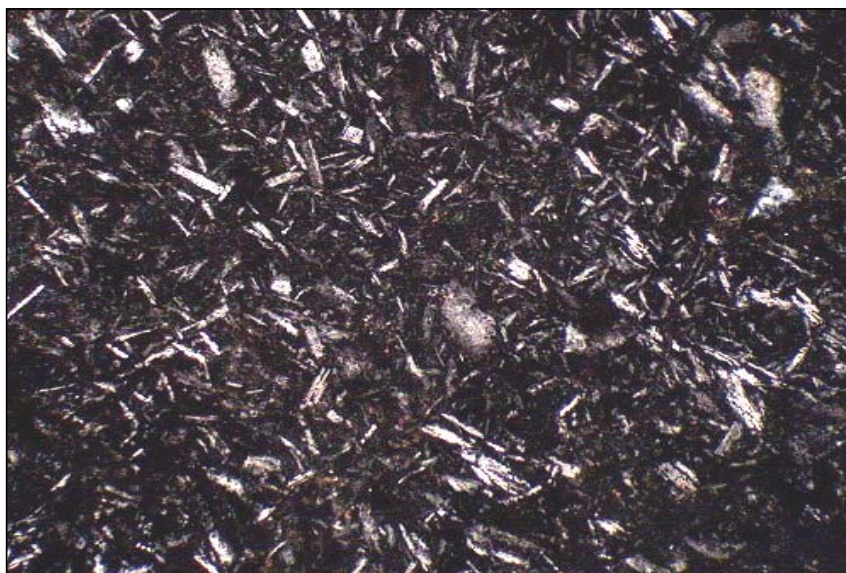
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
clorita	6	presente entre microlitos de plagioclasa y relleno amígdalas.
calcita	2	impregnada escasamente en la roca y presente en vetillas, parcialmente limonitizada.
cuarzo-ceolita	4	relleno amígdalas.
montmorillonita	2	alterando parcialmente a trozo de toba.

Minerales Opacos

Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
hematita	3	diseminada principalmente en la masa fundamental.
magnetita	1	diseminada en cristales sub a anhedrales de hasta 0,4 mm.
óx de Cu	<1	en vetillas y agregados en forma local. Corresponde a malaquita y posible crisocola escasa.

Estructuras

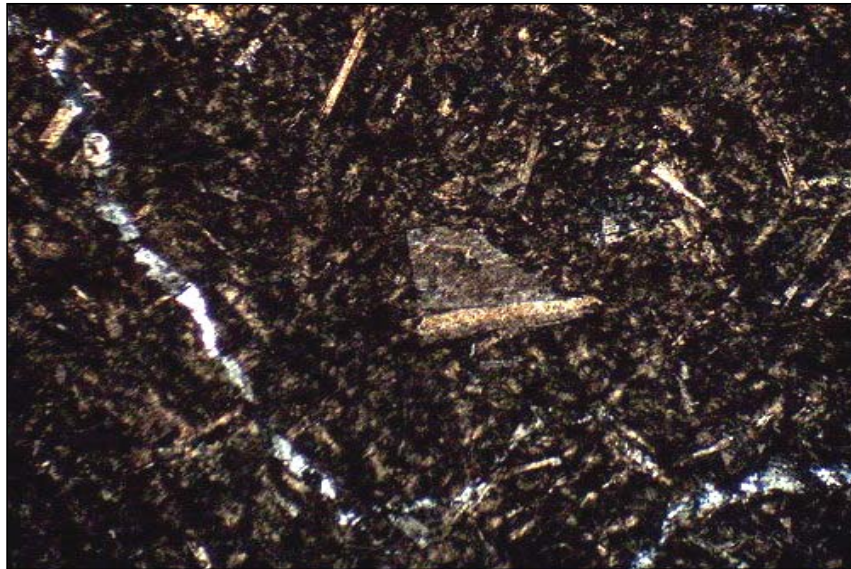
Vetillas / Agregados	Espesor/Tmño	Características/Modo de ocurrencia
brechización y vetillas	-	algunos trozos presentan parcial brechización con relleno de cuarzo y CuOx. Se observan escasas vetillas rellenas con calcita impregnada con limonitas finas.
trozo de toba	-	uno de los trozos del chancado corresponde a una toba cinerítica con escasos fragmentos angulosos de cristales de plagioclasa en matriz alterada parcialmente a montmorillonita, cortada por vetillas de cuarzo con óxidos de Cu.



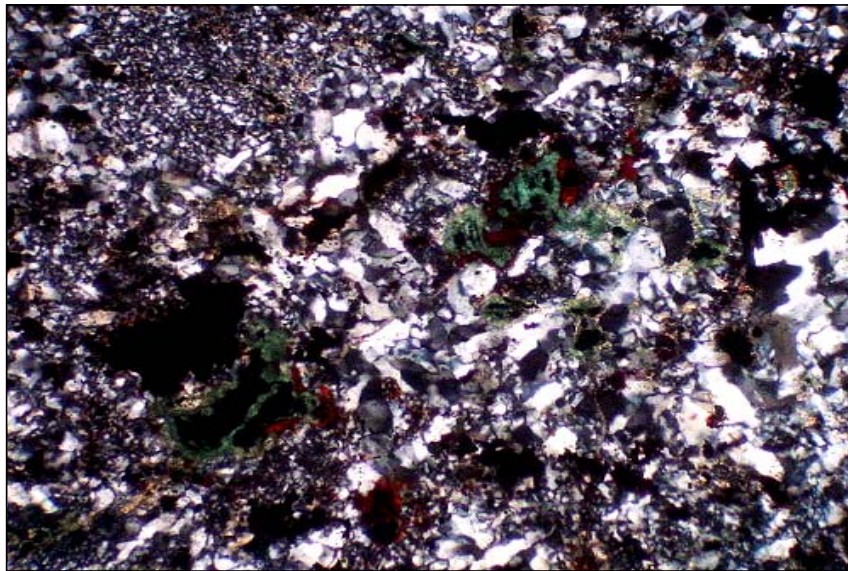
Muestra M-7: detalle de la masa fundamental. Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.



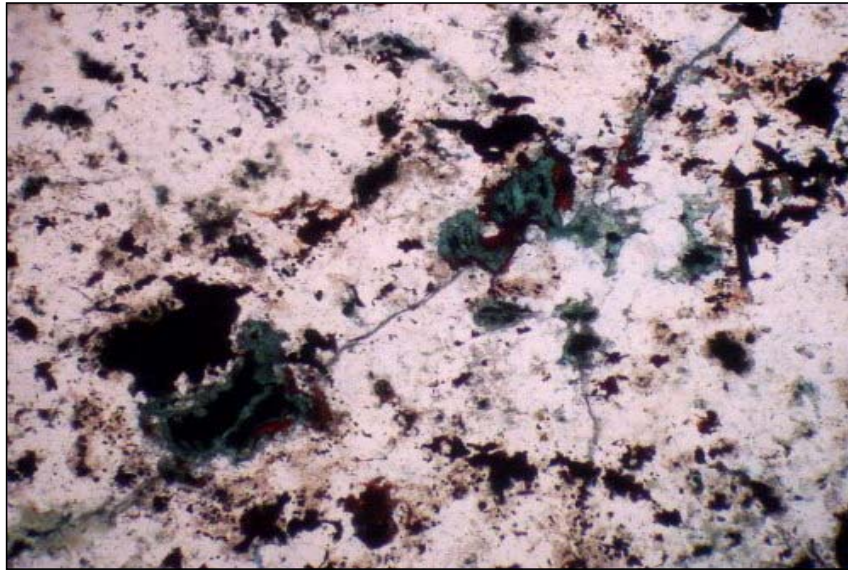
Muestra M-7: amigdala con relleno de cuarzo y escasa calcita, que se encuentra impregnada además impregnada en la roca. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-7: trozo de roca correspondiente a toba cinerítica de cristales. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-7: trozo brechizado, con matriz con cuarzo, limonitas y óxidos de Cu (malaquita). Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.

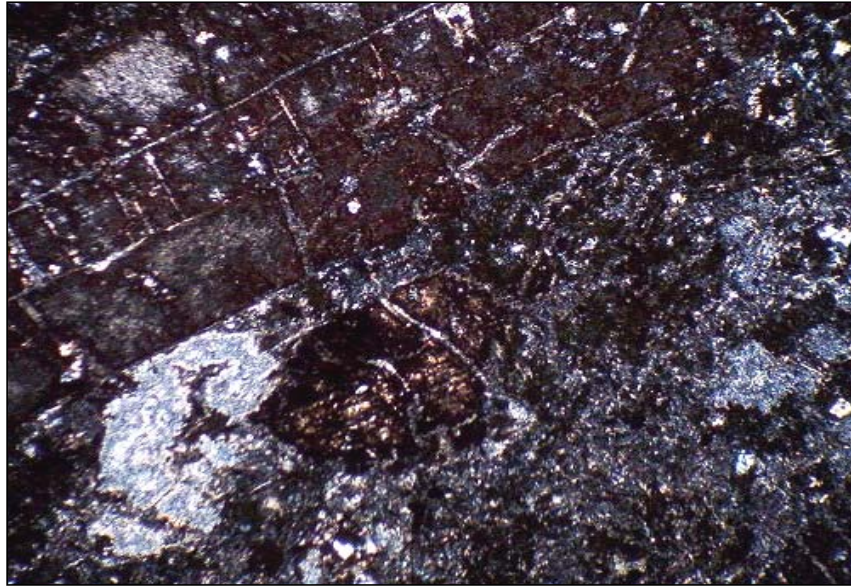


0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 mm

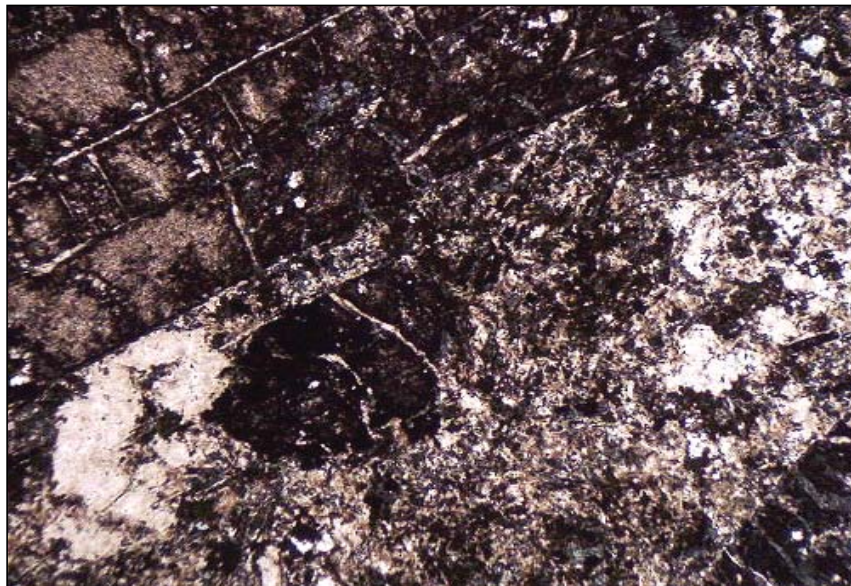
Muestra M-7: id anterior. Se advierte color rojizo de limonitas. Aum.: 10X10; Nic. Paralelos.

Nº Muestra		M-8	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Clasificación petrográfica	Toba de cristales		
Textura			%Frg: 10 %Mx: 90
Volcanoclástica, con matriz cinerítica parcialmente alterada a montmorillonita			
Observaciones megascópicas/microscópicas			
Roca de textura volcánoclastica, color pardo rojizo con sectores verdosos por desarrollo de minerales de cobre, compuesta por fragmentos de cristales de plagioclasa de hasta 6 mm, alterada parcialmente a montmorillonita y con impregnación de hematita fina en matriz cinerítica fina, alterada parcialmente a montmorillonita. Algunos fragmentos presentan impregnación de abundante hematita y se encuentra cortada por gruesas vetillas y agregados de cuarzo, limonitas y baritina, con presencia de chalcantita (?) y crisocola localmente abundantes.			
Minerales consumidores de ácido			
La muestra posee feldspatos con moderado a alto contenido de Ca (An ₂₈), por lo que el aporte en la absorción de ácidos sería importante. Se observa abundante montmorillonita (20% en toda la muestra) y algo de calcita que poseen una alta adsorción.			

Microfotografía (aspecto general)



Muestra M-8: aspecto de la roca con fragmentos de cristales de plagioclasa en matriz cinerítica parcialmente argilizada. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-8: id anterior. Se advierte aspecto turbio por presencia de abundantes arcillas. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.

Fragmentos: % 10

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	10	leve a moderada montmorillonita e impregnación de limonitas	fragmentos de cristales que localmente llegan a 6 mm, en cristales parcialmente descalcificados de composición andesina (Ar ₂₃).

Matriz:% 90

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
ceniza	82	moderada montmorillonita y leve sericita. Uno de los trozos de roca presenta impregnación de calcita fina.	la matriz se encuentra parcialmente alterada y con impregnación localmente abundante de hematita, mostrando "fantasmas" de shards.
opacos	8		

Minerales Alteración (secundarios)

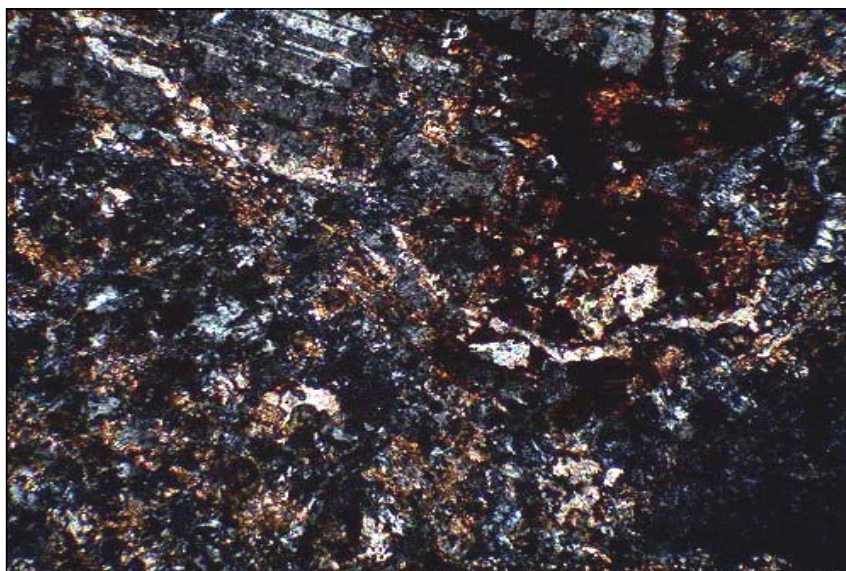
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
montmorillonita	20	alterando parcialmente a fragmentos y matriz.
sericita	2	alterando parcialmente a la matriz.
cuarzo	1	presente en vetillas y agregados.
baritina	2	presente en vetillas y agregados.
calcita	2	presente en la matriz en uno de los trozos de la muestra.

Minerales Opacos

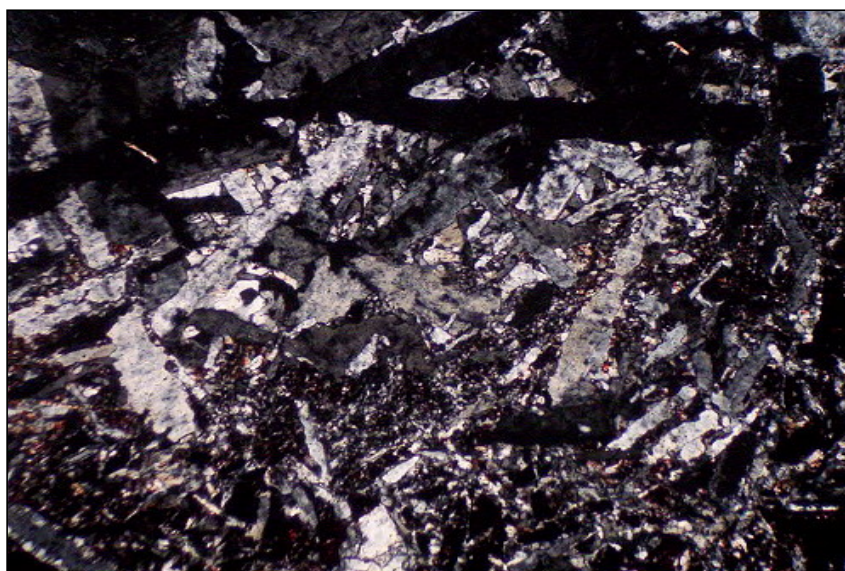
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
limonitas	12	correspondiente especialmente a hematita impregnada en la matriz de la roca y hematita-goethita presente en vetillas y agregados
minerales de Cu	2	presente en vetillas y agregados. Corresponden a crisocola y chalcantita (?).

Estructuras

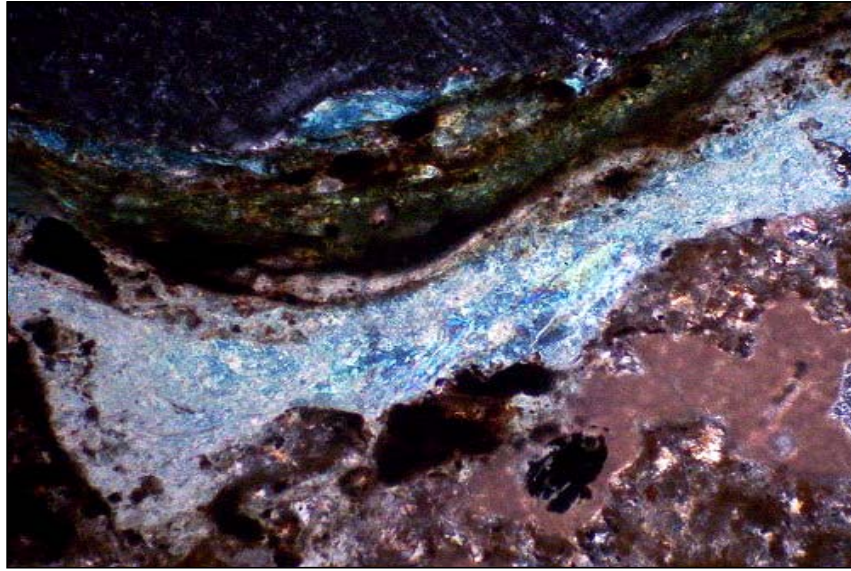
Vetillas / Agregados	Espesor/Tmño	Características/Modo de ocurrencia
vetillas y agregados	<6 mm	rellenas con cuarzo, baritina y localmente minerales de cobre y limonitas.



Muestra M-8: detalle de la matriz en trozo con impregnación de limonitas y calcita. Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-8: agregado de cristales de baritina. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.

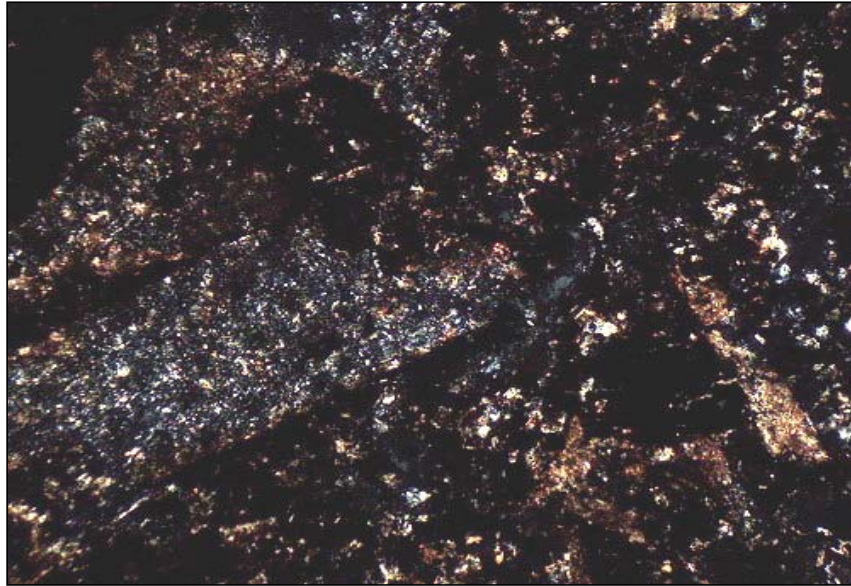


0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 mm

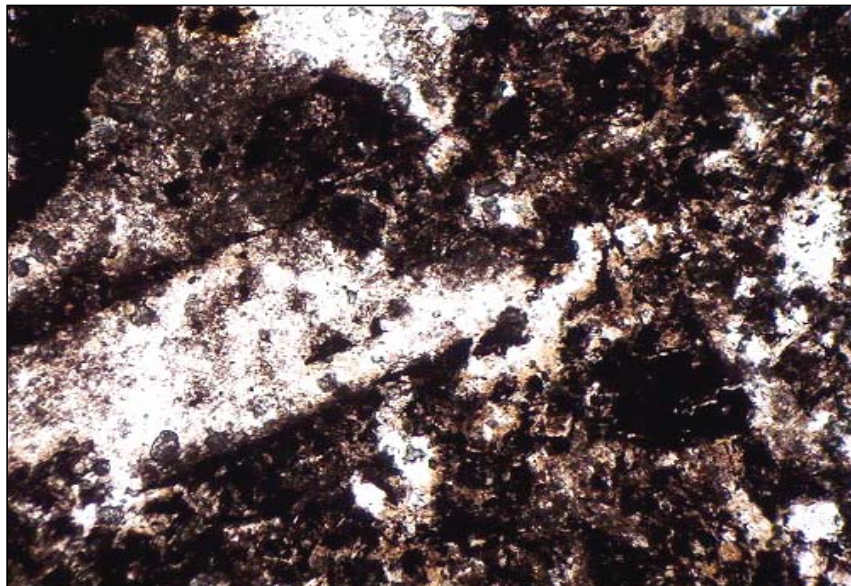
Muestra M-8: vetillas con crisocola y chalcantita (?). Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.

Nº Muestra		M-9	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Clasificación petrográfica	Toba de cristales con fuerte hematización		
Textura			%Frg: 15 %Mx: 85
Volcanoclástica, con matriz cinerítica fuertemente hematizada			
Observaciones megascópicas/microscópicas			
Roca de textura volcánoclástica, color pardo rojizo (en el blank aparece un trozo de color verde que no aparece en el corte transparente; sólo se advierte una mínima parte de éste con abundante sericita, correspondiente aparentemente a parte de una toba cinerítica), compuesta por fragmentos de cristales de plagioclasa de hasta 3,5 mm, alterada fuertemente a hematita, localmente con sericita, montmorillonita y calcita. La matriz es cinerítica alterada intensamente a hematita, sericita y localmente con impregnación de calcita, mostrando pequeños agregados con ceolita y minerales de Cu. Se observa un fragmento posiblemente lítico completamente hematizado. Uno de los trozos presentes está compuesto por un agregado de cuarzo granular con cristales gruesos de baritina.			
Minerales consumidores de ácido			
Los minerales de calcita y montmorillonita, que no se presentan en una cantidad importante, son los mayores consumidores de ácido en ésta muestra.			

Microfotografía (aspecto general)



Muestra M-9: aspecto de la roca con fragmentos de cristales localmente calcitizados en matriz cinerítica hematitizada. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-9: id anterior. Se advierte impregnación de abundante hematita en fragmentos y matriz. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.

Fragmentos: % 15

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	12	fuerte hematita, localmente sericita, montmorillonita y calcita	crisotilo subhedrales y fragmentales de hasta 3,5 mm, con maclas polisintéticas borradas por la fuerte alteración, por lo que no es posible estimar la composición de los cristales.
líticos	3	intensa hematita, leve sericita y calcita	fragmentos de hasta 4,5 mm, con textura obliterada por la intensa impregnación de limonitas.

Matriz: % 85

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
ceniza	85	fuerte hematita, escasa sericita, calcita e impregnación de ceolita	la matriz es cinerítica, intensamente alterada principalmente a hematita fina, con presencia de pequeños agregados de ceolita, sericita y calcita fina en forma local.

Minerales Alteración (secundarios)

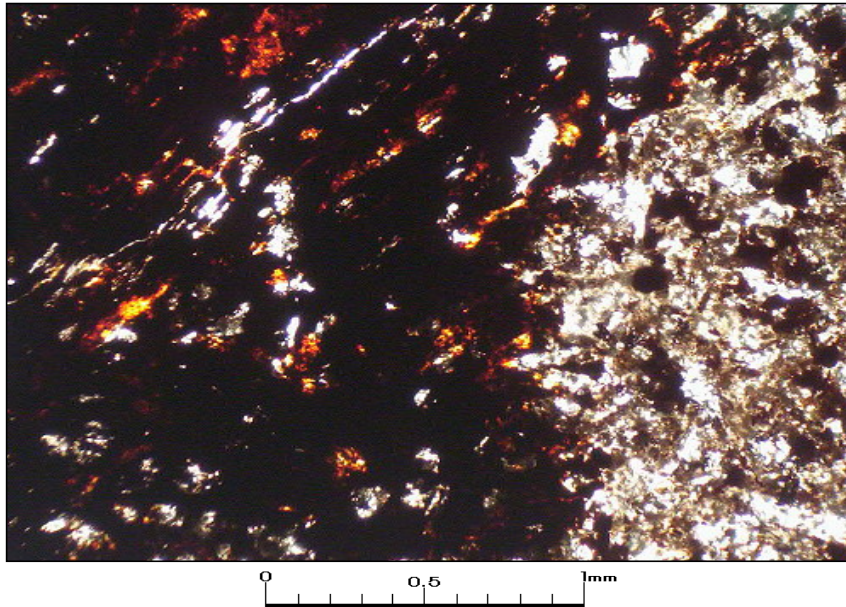
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
hematita	75	alterando fuertemente a fragmentos y matriz.
sericita	2	presente localmente en pequeños agregados en fragmentos y matriz.
calcita	3	impregnada en algunos trozos de roca, como agregados y pequeños granos diseminados, con tamaños de hasta 0,1 mm, presente además en microvenillas.
montmorillonita	1	alterando localmente a fragmentos de cristales de plagioclasa.
ceolita	1	pequeños agregados dispersos en algunos trozos de roca.

Minerales Opacos

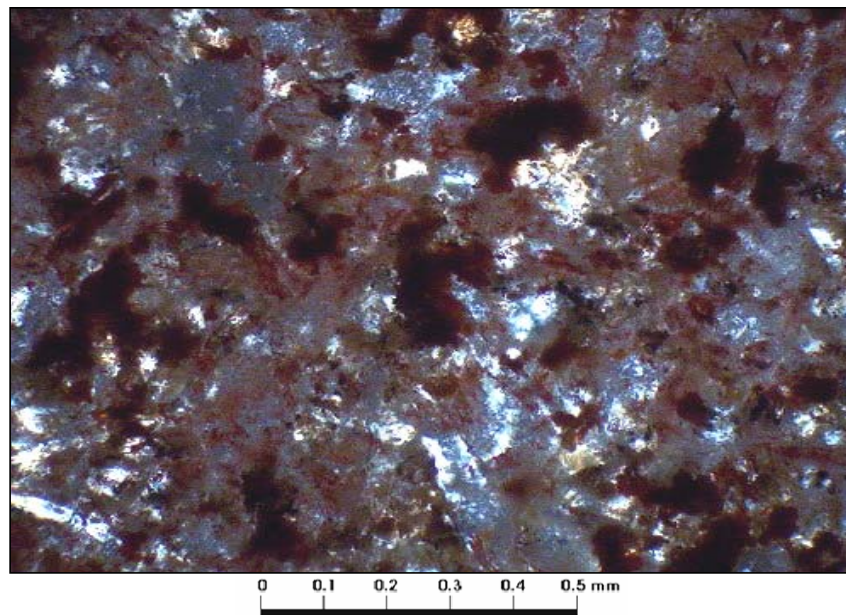
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
limonitas	75	alterando fuertemente a fragmentos y matriz.
minerales de Cu	1	pequeños agregados muy finos. Resulta muy difícil de identificar a través de la observación en microscopio, sin embargo, aparentemente parte de éstos corresponden a crisocola.

Estructuras

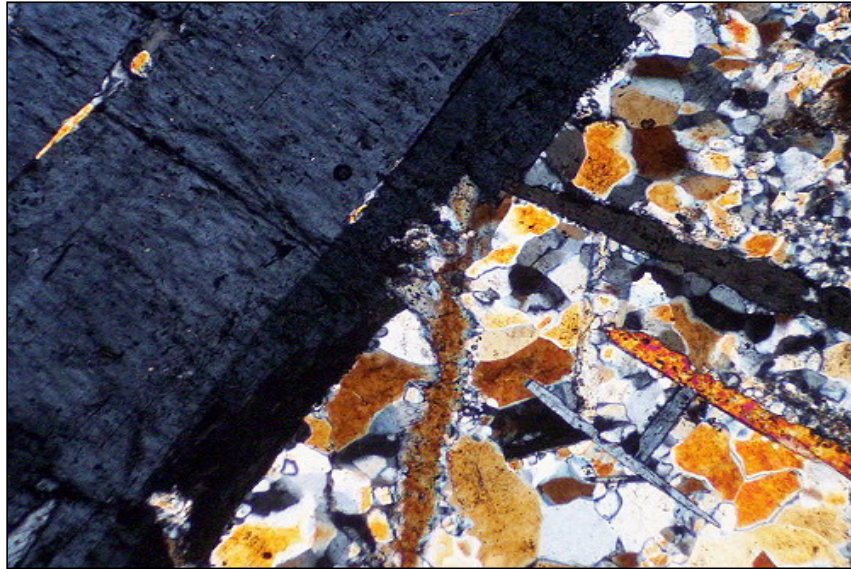
Vetillas / Agregados	Espesor/Tamaño	Características/Modo de ocurrencia
agregados de cuarzo-baritina	-	uno de los trozos de roca se encuentra conformado por un agregado de cuarzo granular fino, con tamaño medio de 0,3 mm, cortado por gruesos cristales de baritina que llega a 9 mm.



Muestra M-9: parte de posible lítico intensamente hematizado (izquierda) y parte de la matriz. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.



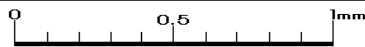
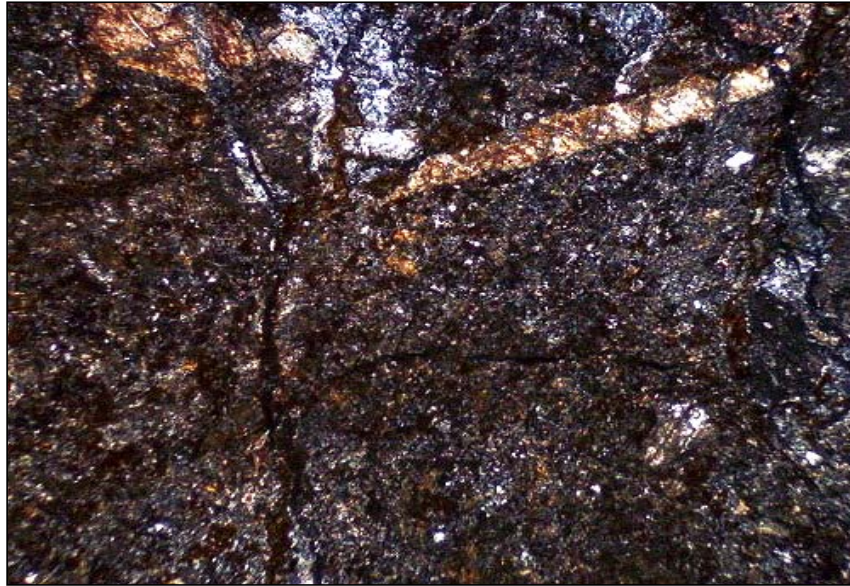
Muestra M-9: detalle de la matriz con presencia de impregnación de hematita fina. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



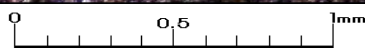
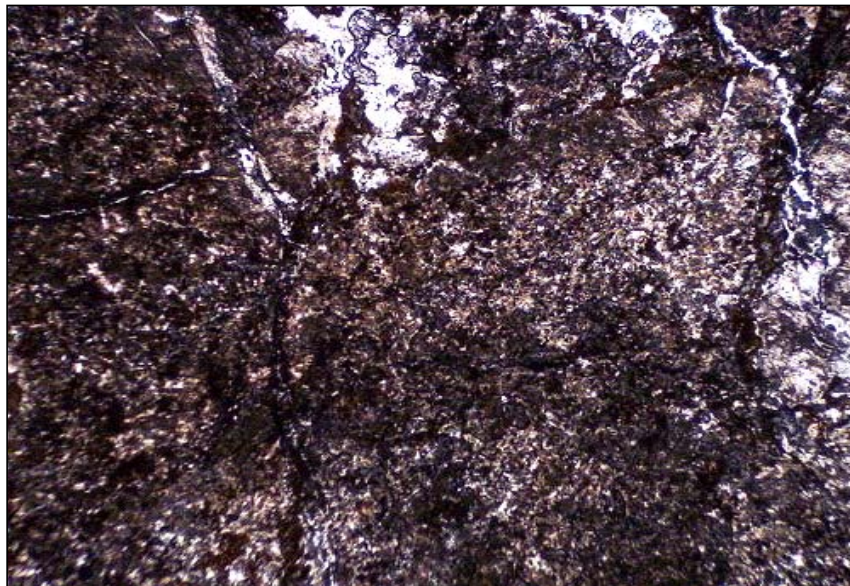
Muestra M-9: trozo de roca con cuarzo granular y cristales de baritina. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.

Nº Muestra		M-10	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Clasificación petrográfica	Toba de cristales con parcial impregnación de hematita		
Textura			%Frg: 10 %Mx: 90
Volcanoclástica, con matriz cinerítica parcialmente hematitizada			
Observaciones megascópicas/microscópicas			
Roca de textura volcanoclástica, color café localmente rojizo, compuesta por fragmentos de cristales de plagioclasa, reemplazada parcial a fuertemente por hematita y montmorillonita, escasa sericita y con impregnación en forma local de calcita. La matriz es cinerítica fina, con impregnación de abundante hematita fina, localmente con escasa sericita, calcita y montmorillonita. Se advierte leve brechización (por la escala, no se advierte si se trata de un stockwork con cuarzo muy fino, minerales de cobre y arcillas finas). Uno de los trozos de roca está conformado por un agregado muy fino de cuarzo secundario hidrotermal. Se observan vetillas y agregados de crisocola y chalcantita (?).			
Minerales consumidores de ácido			
Existe una importante cantidad de calcita y montmorillonita (10% en total en la muestra) que son grandes consumidores de ácido.			

Microfotografía (aspecto general)



Muestra M-10: aspecto de la roca con fragmentos de plagioclasa en matriz cinerítica fina. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-10: id anterior. Se advierte leve aspecto brechoso. Aum.: 5X10; Nic. Paralelos.

Fragmentos: % 10

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	10	moderada a fuerte hematita, localmente calcita fina, sericita y montmorillonita.	cristales subhedrales y fragmentos de hasta 2,5 mm, con maclas polisintéticas borradas por la alteración, por lo que no es posible estimar la composición de éstos.
biotita	<1	intensa muscovita	cristales subhedrales de hasta 0,7 mm, intensamente reemplazados por sericita muscovítica.

Matriz:% 90

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
cinerítica	90	parcial a fuerte hematita fina, localmente sericita, montmorillonita, calcita y cuarzo fino.	la matriz se encuentra fuertemente alterada, con presencia en forma local de pequeñas vesículas rellenas con cuarzo fino y calcita.

Minerales Alteración (secundarios)

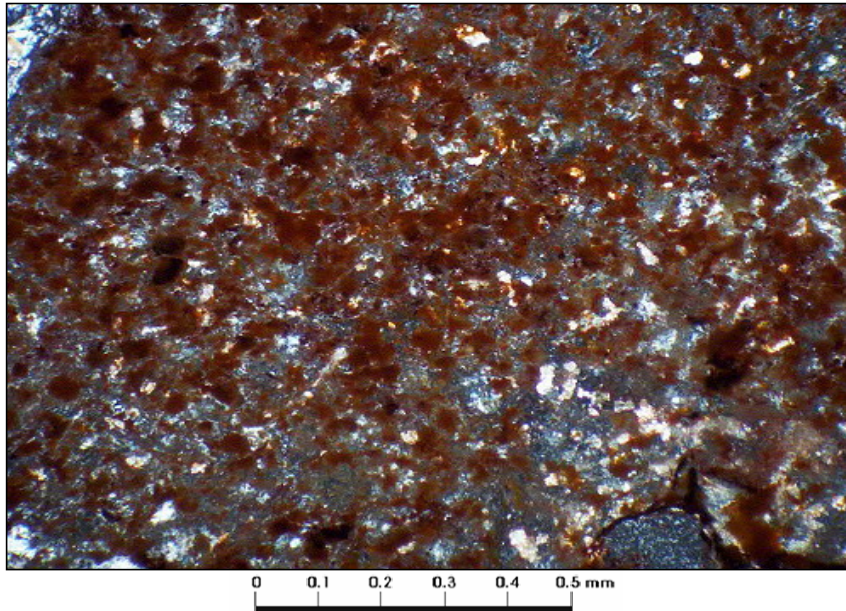
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
calcita	6	desarrollada en pequeños granos impregnados en feldespatos y matriz, así como en microvenillas. Se advierte en escasos trozos de roca.
sericita	3	alterando levemente a feldespatos, como sericita muscovítica alterando a biotita y en pequeños agregados y microvenillas.
montmorillonita	4	reemplazando parcialmente a feldespatos y presente en la matriz.
cuarzo	16	escasos granos infiltrados localmente en la toba. Uno de los trozos de roca corresponde a cuarzo hidrotermal fino, granular. El trozo representa aprox. 15% de la muestra.

Minerales Opacos

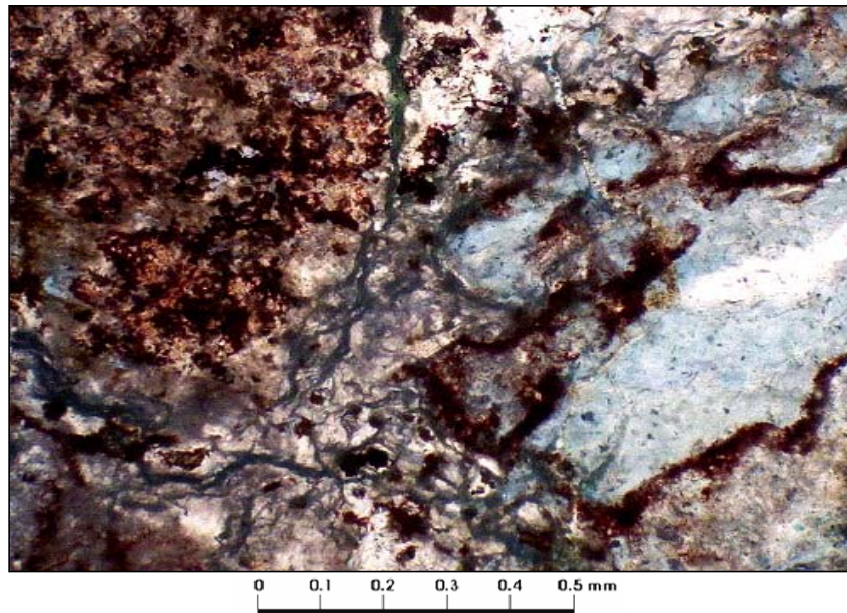
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
hematita	7	diseminada en la matriz, localmente abundante.
minerales de Cu	1	presente en agregados y microvenillas. Corresponde a crisocola y chalcantita (?).

Estructuras

Vetillas / Agregados	Espesor/Tamaño	Características/Modo de ocurrencia
agregado de cuarzo hidrotermal	-	corresponde a un trozo de roca compuesto por cuarzo hidrotermal muy fino, granular, con tamaño medio de 0,1 mm.

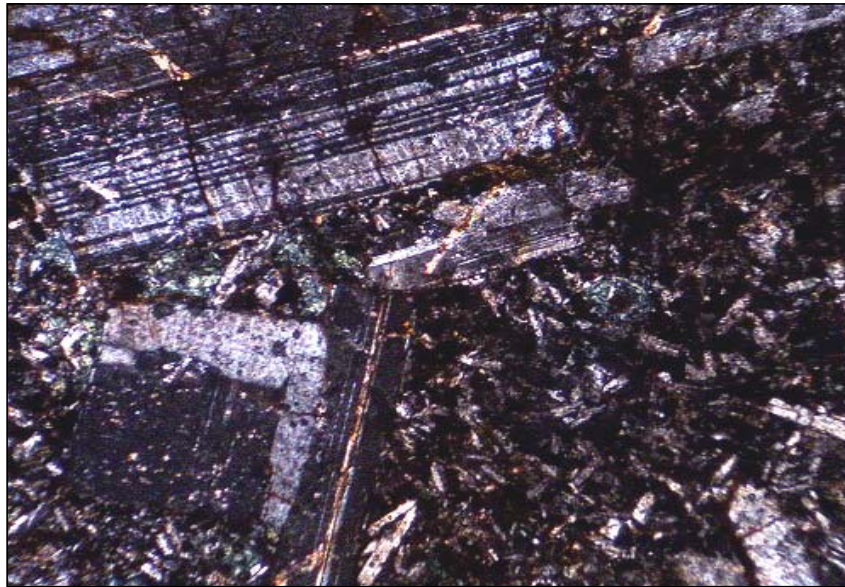


Muestra M-10: detalle de parte de la roca con presencia de impregnación de abundante hematita fina. Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-10: agregado con crisocola (verde pálido) y microvenillas con chalcantita (?). Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.

Nº Muestra		M-11	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Clasificación petrográfica	Andesita con máficos alterados a biotita y clorita		
Textura			%Fcx: 20 %MF: 80
Porfídica, con masa fundamental intergranular			
Observaciones megascópicas/microscópicas			
Roca de textura porfídica, color gris intermedio, localmente con tonalidades verdes y rojizas, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 9 mm, parcial a fuertemente descalcificada y con impregnación de escasa calcita, con seudomorfos de máficos alterados a biotita y clorita con impregnación de limonitas muy finas. La masa fundamental es intergranular, compuesta por microlitos de plagioclasa con tamaño medio de 0,2 mm, con clorita intersticial, impregnación de calcita muy fina y diseminación de hematita y magnetita localmente abundante. Uno de los trozos de roca presentes corresponde a una arenita muy fina con matriz fuertemente hematitizada.			
Minerales consumidores de ácido			
La muestra posee escasos cristales de montmorillonita y carbonatos que son grandes consumidores de ácido. Estos minerales aparecen en los trozos de andesita, donde además se observa clorita que posee una fuerte adsorción de ácidos.			
Microfotografía (aspecto general)			



Muestra M-11: aspecto de la roca con fenocristales de plagioclasa en masa fundamental intergranular. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.

Fenocristales: % 17

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	15	incipiente calcita	crisotales subhedrales de hasta 9 mm, de composición andesina (An ₃₅). Presenta parcial a fuerte descalcificación que otorga un aspecto turbio a los cristales.
máficos	2	fuerte clorita y biotita	crisotales subhedrales de hasta 1 mm, correspondiente posiblemente a hornblenda y/o piroxeno.

Masa Fundamental: 68

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
plagioclasa	56	impregnación de escasa calcita muy fina	microlitos con tamaño medio de 0,2 mm, sin orientación preferente.
clorita	5	-	en forma intersticial entre microlitos de plagioclasa.
opacos	7		

Trozo de arenita: % 15

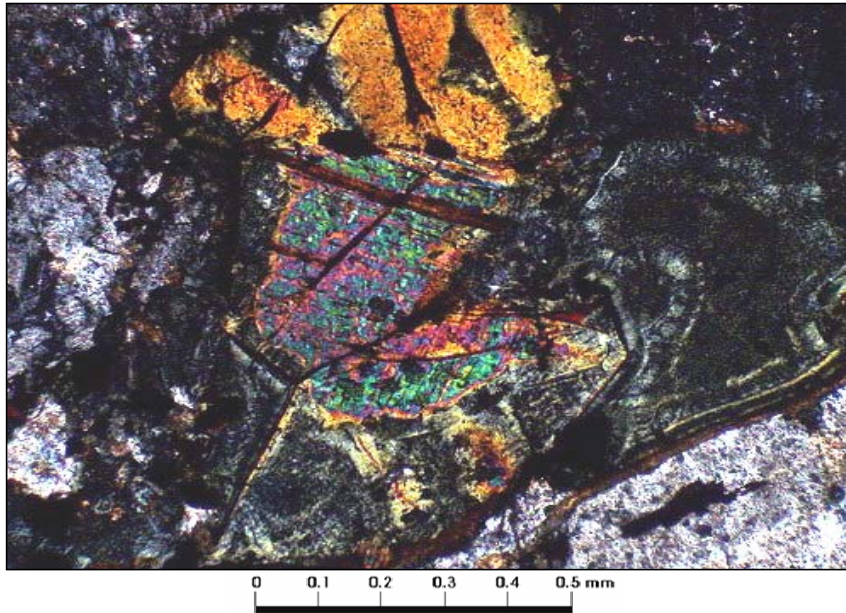
Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
arenita muy fina	15	matriz hematitizada	corresponde a un trozo de arenita muy fina a limolita compuesta por fragmentos de cristales de cuarzo y feldspatos (5%) con tamaño medio de 50 µm, fuertemente angulosos, con matriz compuesta por arcillas (4%) y hematita (6%). Posiblemente éstos fragmentos son de origen epiclástico.

Minerales Alteración (secundarios)

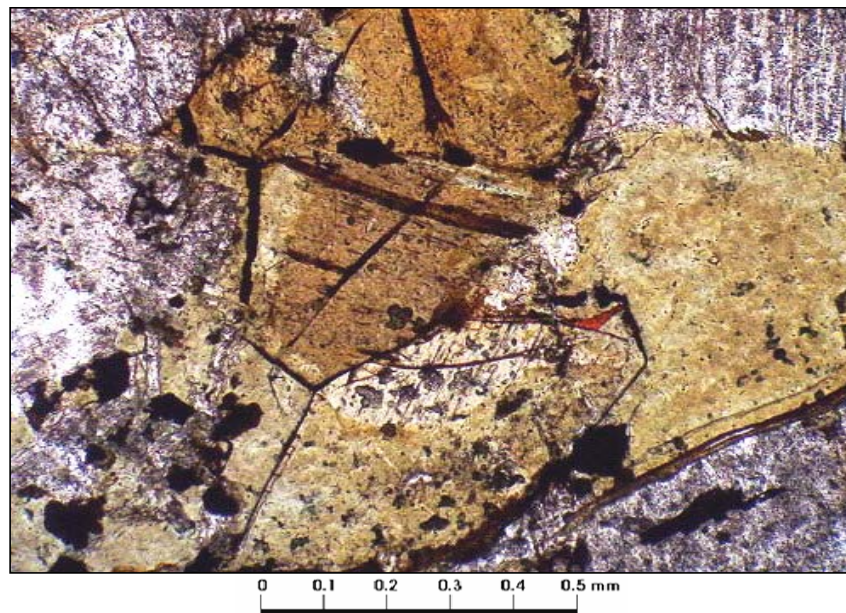
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
calcita	2	impregnada en fenocristales y masa fundamental, como granos muy finos con tamaño medio de 30 µm.
clorita	6	reemplazando parcialmente a fenocristales de máficos y presente en forma intersticial entre microlitos de plagioclasa.
biotita	1	reemplazando parcialmente a fenocristales de máficos.
arcillas	4	como parte de la matriz en trozo de arenita.
montmorillonita	2	alterando parcialmente a cristales de plagioclasa principalmente en la masa fundamental.

Minerales Opacos

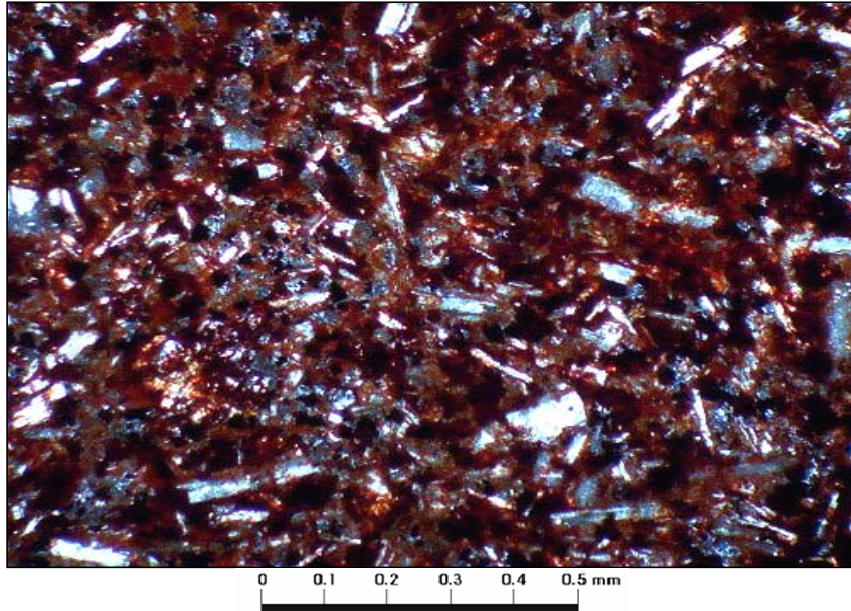
Mineral	%	Características/Modo de ocurrencia
hematita	13	diseminada en masa fundamental de andesita y matriz en arenita, localmente abundante.
magnetita	1	diseminada en cristales sub a anhedrales de hasta 0,4 mm.
minerales de Cu	tr	escasos granos diseminados en fragmento de arenita, correspondiente a crisocola.



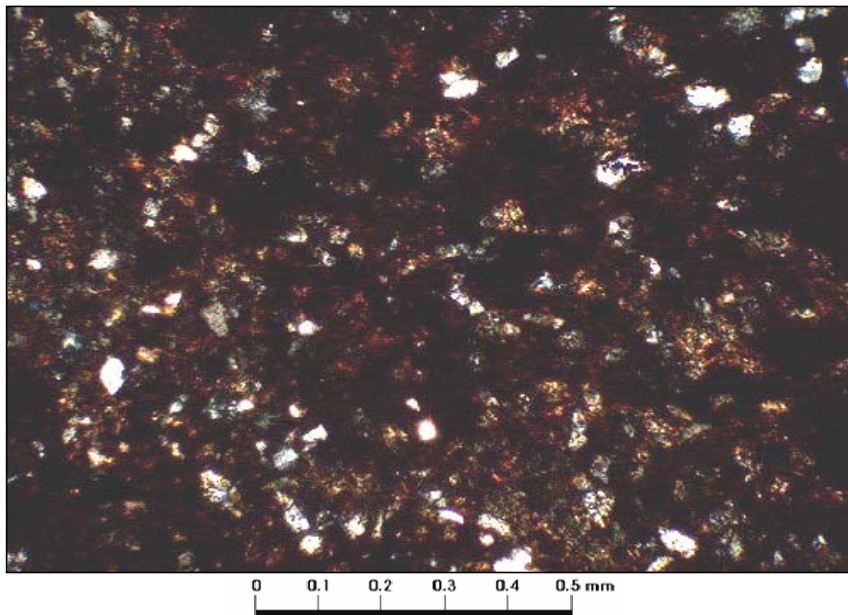
Muestra M-11: agregados de cristales de máficos alterados a biotita y clorita. Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-11: id anterior. Se advierten formas que podrían corresponder a hornblenda o piroxeno. Aum.: 10X10; Nic. Paralelos.

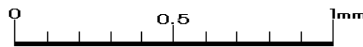
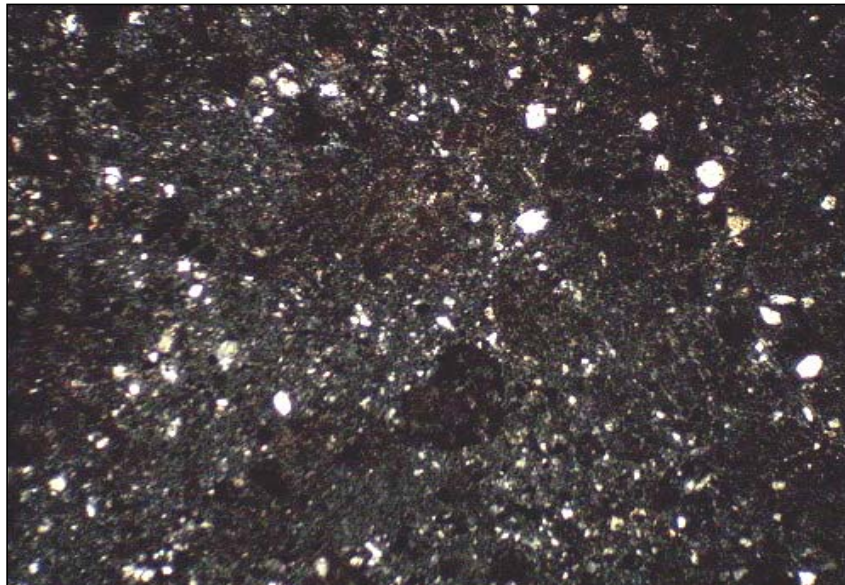


Muestra M-11: detalle de la masa fundamental en sector con abundante hematita. Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.



Muestra M-11: aspecto de arenita muy fina-limolita. Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.

Nº Muestra		Carga 11	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Clasificación petrográfica	Toba fina de cristales		
Textura	%Frg:	10	%Mx: 90
Volcanoclástica, con matriz cinerítica parcialmente hematitizada y argilizada			
Observaciones megascópicas/microscópicas			
Roca de textura volcánoclastica, color marrón, compuesta por fragmentos muy finos de cristales de cuarzo, muy angulosos y fragmentos de cristales de plagioclasa con impregnación de hematita y muy escasa calcita; muy escasos fragmentos líticos fuertemente limonitizados, con textura original obliterada por la fuerte alteración. La matriz es cinerítica muy fina, con desarrollo de arcillas muy finas e impregnación de hematita localmente abundante. Aproximadamente la mitad de los trozos de roca se encuentran conformados por cuarzo hidrotermal, calcedonia, agregados de limonitas, escasos granos de óxidos de Cu y cristales de baritina.			
Minerales consumidores de ácido			
La muestra presenta escasos cristales de carbonatos como grandes consumidores de ácido. Las arcillas presentes en la matriz cinerítica pudieran poseer montmorillonita, sin embargo, debido a lo fino de los granos, no es posible precisar.			
Microfotografía (aspecto general)			



Muestra Carga 11: aspecto de la roca con fragmentos finos de cristales en masa matriz cinerítica fina. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.

Fragmentos: % 5

Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
cuarzo	3	-	fragmentos angulosos con tamaño medio de 70 µm.
plagioclasa	1	impregnación de hematita y escasa calcita	fragmentos de hasta 0,6 mm, con maclas polisintéticas obliteradas por la alteración, por lo que no es posible estimar la composición de los cristales.
plagioclasa	1	reemplazo por hematita y escasa calcita	fragmentos de hasta 3 mm, con textura original obliterada por la alteración.

Matriz: % 45

Mineral	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
cinerítica	45	hematita fina y arcillas	la matriz se encuentra fuertemente alterada, con presencia de "fantasmas" de shards.

Alteración HT: % 50

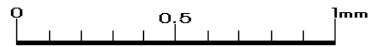
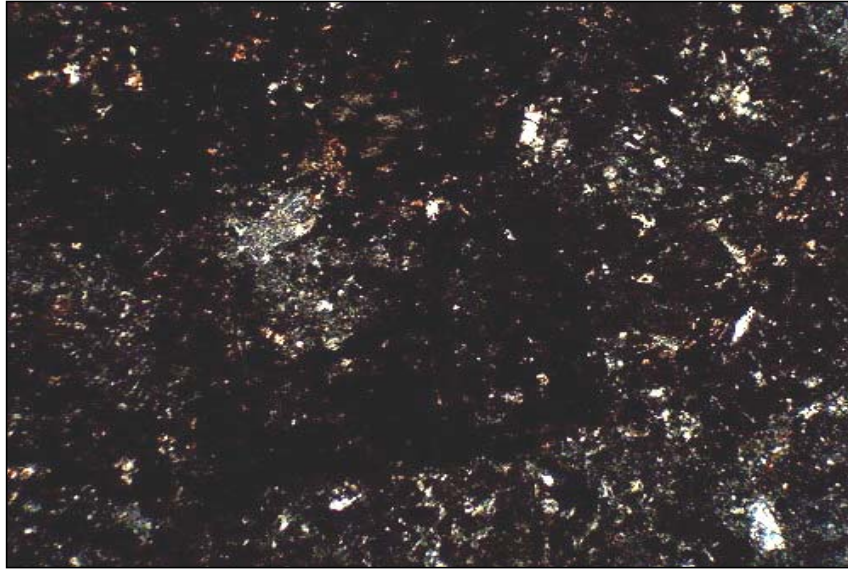
Mineral/roca	%	Alteración	Características especiales/ Modo de ocurrencia
agregado hidrotermal	50	-	corresponde a agregados de cristales de cuarzo granular, calcedonia, agregados de limonitas y escasa baritina y crisocola-chalcantita.

Minerales Alteración (secundarios)

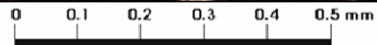
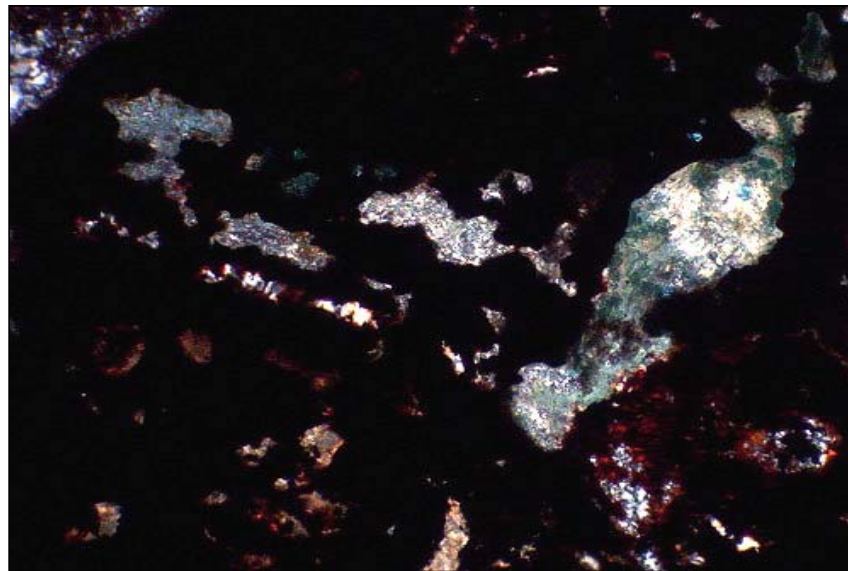
Mineral	%	Alteración	Características/Modo de ocurrencia
calcita	1	impregnada en fragmentos de cristales de plagioclasa y en matriz cinerítica, como cristales muy finos inferiores a 30 µm.	
arcillas	20	alterando parcialmente a la matriz cinerítica.	
cuarzo-calcedonia	30	agregados densos presentes en trozos con alteración HT. El cuarzo granular presenta tamaño medio de 70 µm.	

Minerales Opacos

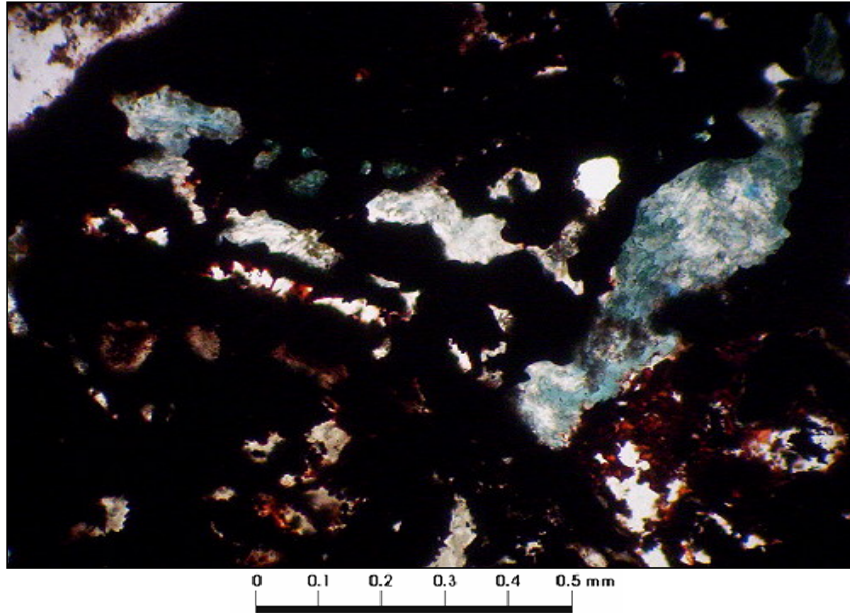
Mineral	%	Alteración	Características/Modo de ocurrencia
hematita	25	presente en la matriz de toba, impregnada en fragmentos de cristales de plagioclasa y de líticos. En agregados de trozos con agregados hidrotermales.	
minerales de Cu	<1	presente en agregados y microvenillas. Corresponde a crisocola y chalcantita (?).	



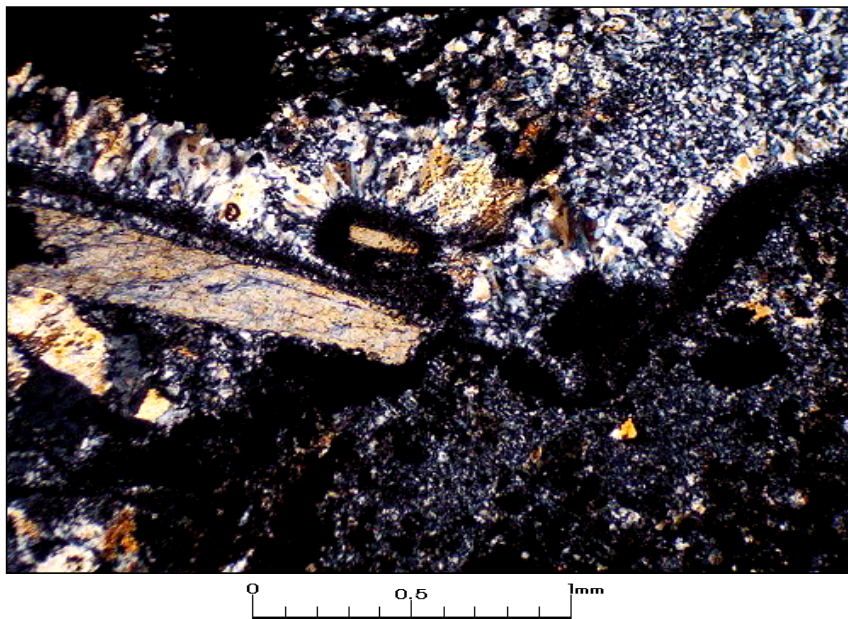
Muestra Carga 11: parte de fragmento lítico con fuerte reemplazo por hematita. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.



Muestra Carga 11: parte de fragmento con alteración HT, con presencia de limonitas y agregados de crisocola y chalcantita (?). Aum.: 10X10; Nic. Cruzados.



Muestra Carga 11: id anterior. Se advierte color celeste azulino de cristales de chalcantita (?). Aum.: 10X10; Nic. Paralelos.



Muestra Carga 11: agregado hidrotermal de cuarzo-calcedonia con presencia de baritina. Aum.: 5X10; Nic. Cruzados.

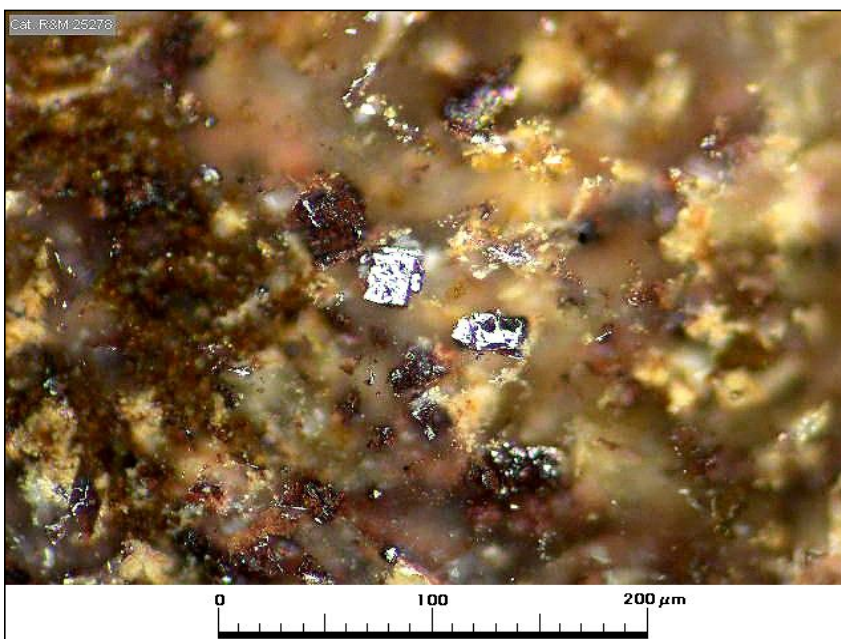
ESTUDIO MINERALES OPACOS

Nº Muestra	M-1	Coord. Norte	Coord. Este	Elevacion (m)
Procedencia				
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein				

Observaciones megascópicas/ microscópicas

La muestra corresponde a una andesita intensamente alterada a sericita y minerales de arcilla (montmorillonita y caolinita), oxidada/ lixiviada, en la cual los minerales opacos de cobre han desaparecido debido a los procesos suégenos permaneciendo como indicaciones de su presencia escasos granitos de calcopirita preservada como sulfuro relicto (encapsulada en cuarzo) y especies oxidadas de cobre, relativamente abundantes, constituidas por crisocola y malaquita. Las especies opacas identificadas consisten en hematita en granos anhedrales/ subhedrales y en impregnaciones pulverulentas de grano muy fino que tiñen la roca de un intenso color rojo. Otras especies presentes corresponden a minerales secundarios de manganeso designados como psilomelano, una especie informal cuya denominación no tiene otro propósito que designar un mineral de Mn generalmente duro y de grano muy fino; otros agregados de color pardo oscuro corresponden a wad, un compuesto manganesífero no cristalino de composición variable.

Microfotografía (aspecto general)



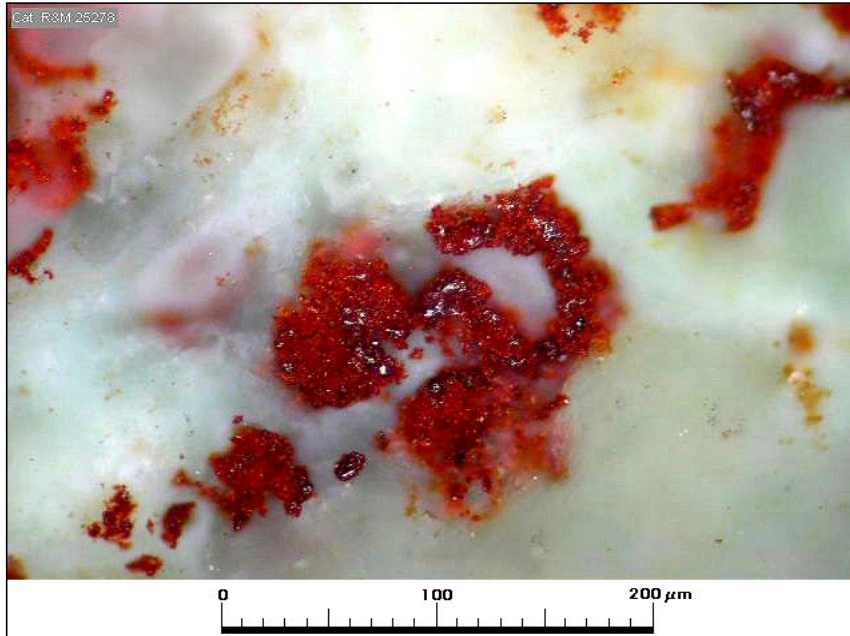
Muestra M-1: cristalitas anhedrales/ subhedrales de hematita de unos 30 µm diseminados en andesita alterada. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

Observaciones microscópicas

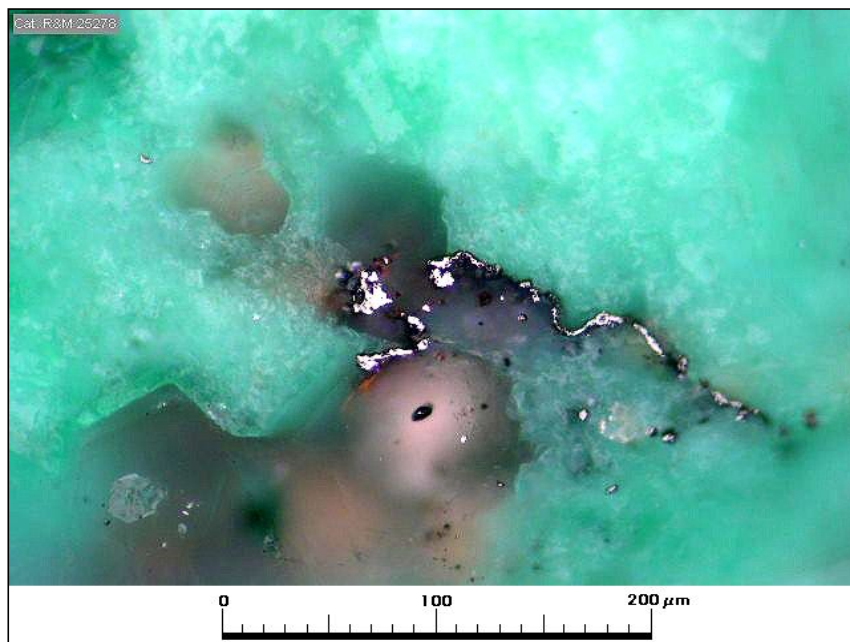
Componentes minerales

Mineral	%	Alteración/ Naturaleza	Características/ Modo de Ocurrencia
hematita	1,5	en parte residuo de alteración de sulfuros primarios	granos anhedrales con típicos reflejos internos rojos; tamaños variables entre 0,015-0,045 mm. Hematita también ocurre como agregados pulverulentos de grano muy fino impregnando la roca.
psilomelano*	1	compuesto oxidado de Mn de identidad indeterminada	ocurre en agregados irregulares de grano fino asociado con ganga de cuarzo; los agregados de psilomelano tienen hasta 0,6 mm.
wad	<0,5		ocurre como agregados de color pardo oscuro
calcopirita	tr	preservada solo como sulfuro relicto	pequeños granos anhedrales de tamaño menor que 10 µm
crisocola	2	mineral secundario formado por oxidación/ lixiviación de sulfuros de cobre	en agregados irregulares de hasta 2,5 mm
malaquita	1?		se la observó en agregados de cristales alargados de hasta 0,4 mm asociada a crisocola.

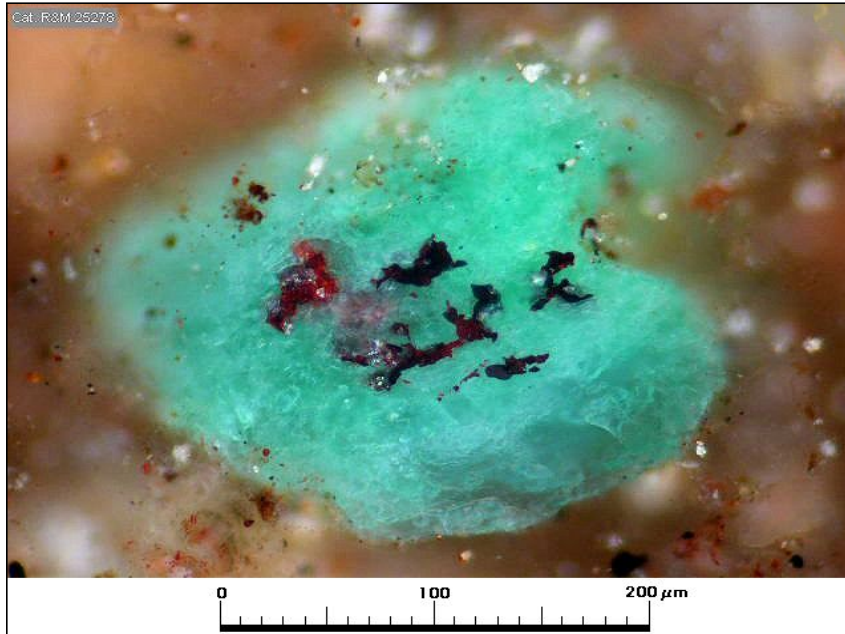
(*) En el sentido de mineral de Mn de consistencia dura y de identidad no totalmente determinada (Dana's New Mineralogy, R. Gaines et al., 8th Ed.



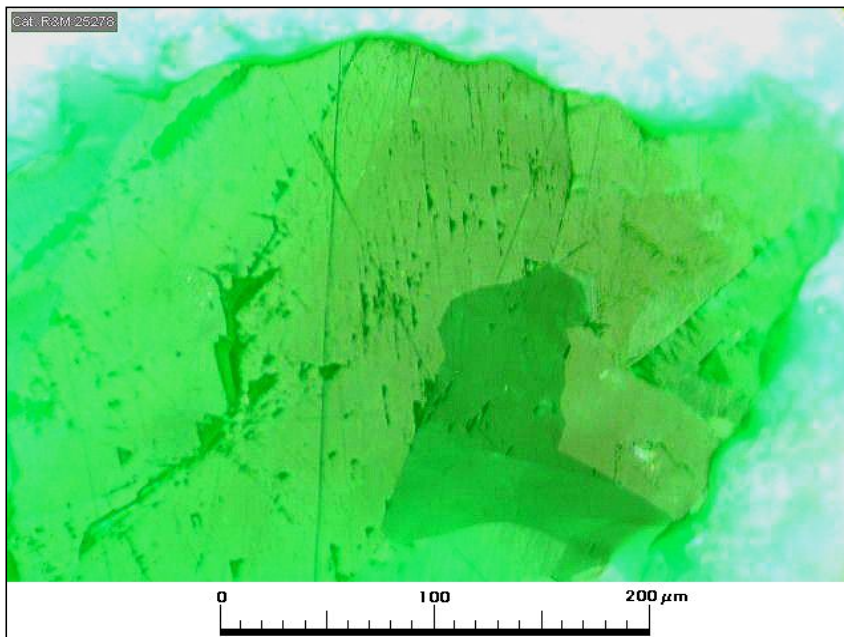
Muestra M-1: hematita granular fina y pulverulenta impregnando irregularmente a andesita intensamente caolinizada. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



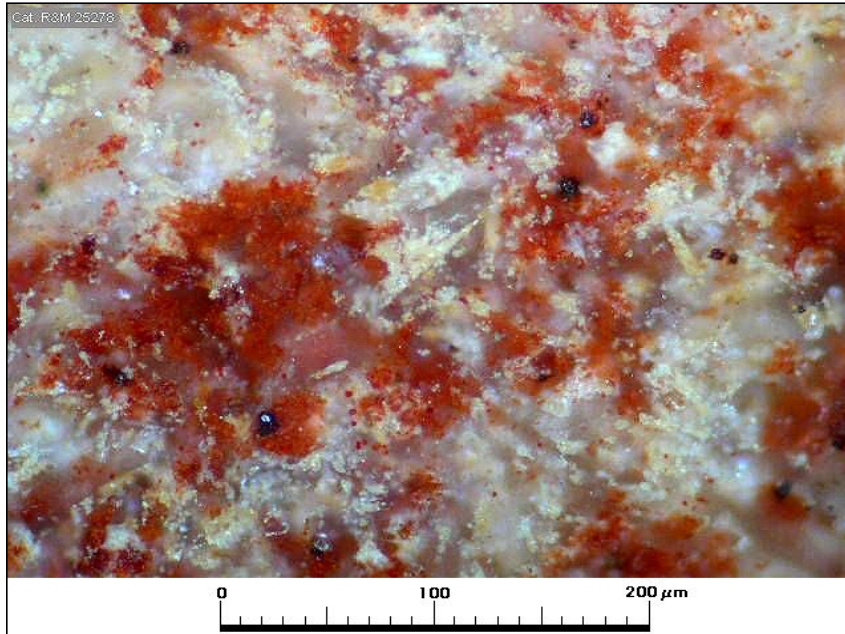
Muestra M-1: hematita en agregados de formas irregulares contenida en un agregado de crisocola. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



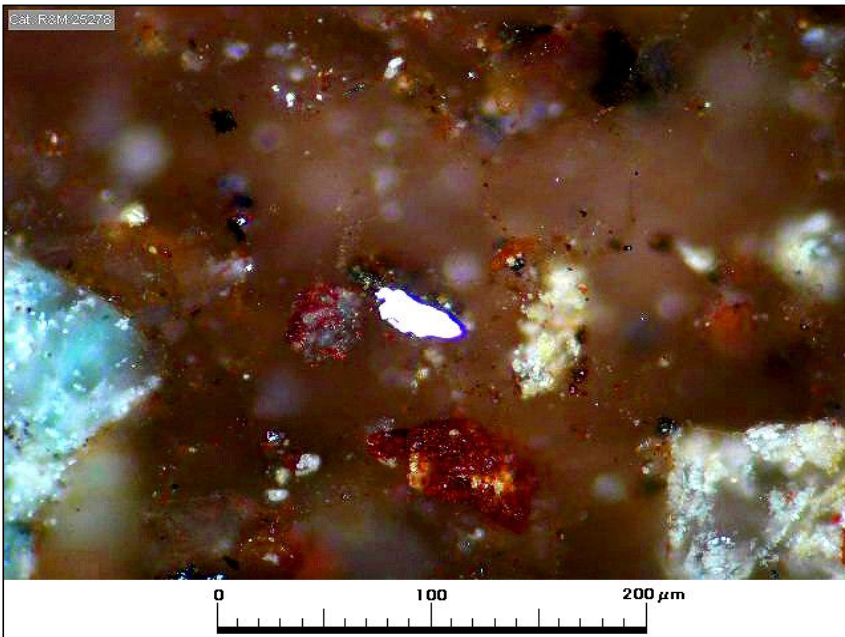
Muestra M-1: granos anhedrales de hematita en crisocola; los reflejos internos rojos se hacen evientes bajo nicoles cruzados. Aum.: 32x10; Nic. cruzados.



Muestra M-1: agregado de cristales de malaquita de hasta 0,4 mm junto a crisocola. Aum.: 32x10; Nic cruzados.



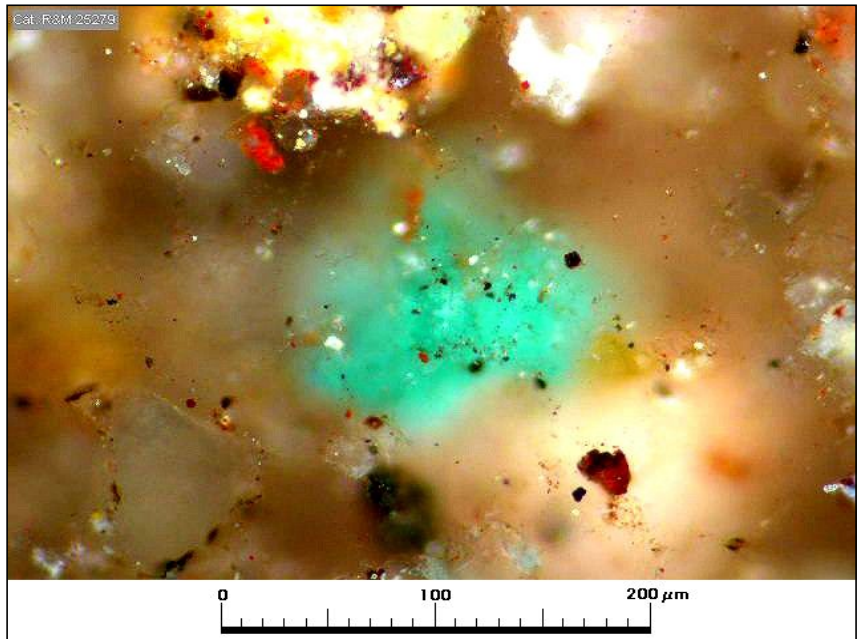
Muestra M-1: hematita pulverulenta de grano muy fino impregnando andesita cuyos componentes ferromagnesias aparecen intensamente reemplazados por leucoxeno. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-1: granito anhedral de calcopirita de 40 μm preservado como sulfuro relicto (encapsulado en cuarzo). Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

Nº Muestra		M-2	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Observaciones megascópicas/ microscópicas			
<p>La muestra corresponde a una andesita porfídica descolorada por alteración sericitica o teñida de color rojizo debido a intensa impregnación por hematita pulverulenta muy fina. Los minerales opacos consisten en hematita diseminada o reemplazando a minerales ferromagnesianos alterados; también se identificó psilomelano, un mineral de manganeso de grano fino y de consistencia dura cuya naturaleza no está totalmente determinada. La mineralización de cobre consiste principalmente en impregnaciones de crisocola en agregados irregulares o rellenando microfracturas. Algunas microfracturas contienen un mineral oxidado de cobre de color verde más oscuro que parece corresponder a brochantita.</p>			

Microfotografía (aspecto general)



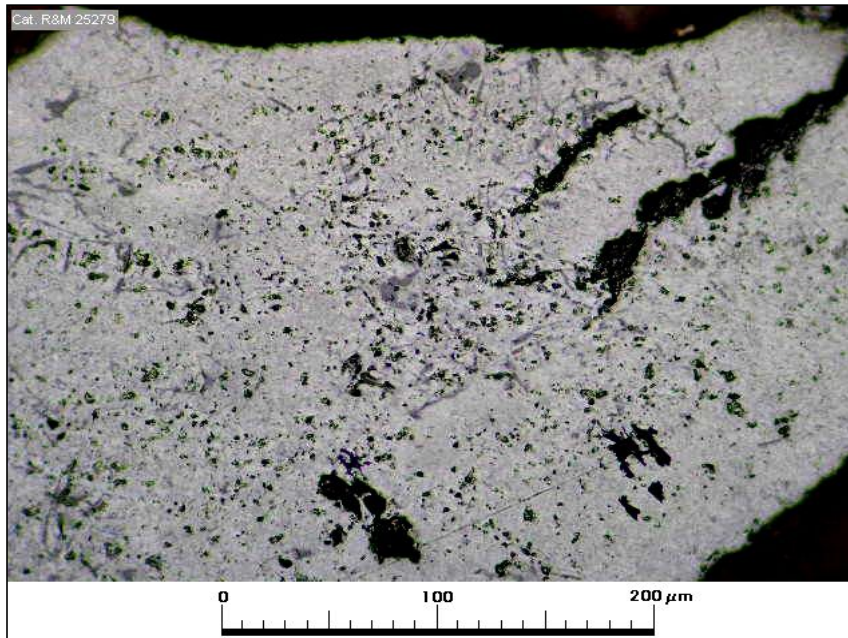
Muestra M-2: Impregnación de crisocola de grano fino junto a diseminación fina de hematita. Aum.: 32x10; Nic. cruzados.

Observaciones microscópicas

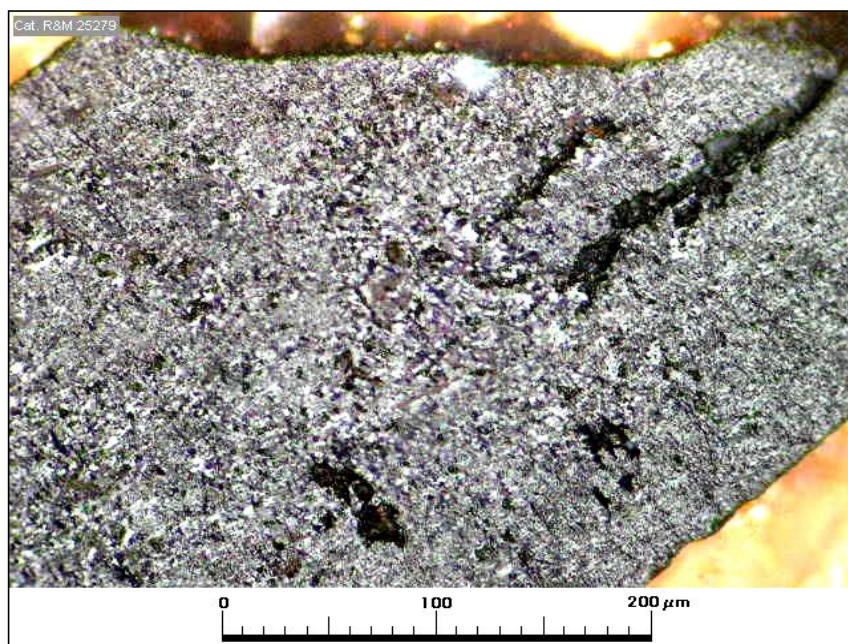
Componentes minerales

Mineral	%	Alteración	Características/ Modo de Ocurrencia
hematita	1.5	puede corresponder en parte a residuo de sulfuros alterados	agregados de grano fino (ca. 15 μm) junto a material pulverulento de color rojo que impregna a la roca alterada (limonitas hematíticas). Aparece también impregnando ferromagnesianos alterados.
psilomelano*	<1	compuesto oxidado de Mn de identidad indeterminada	partículas de 0,55 μm formadas por un agregado de grano muy fino (2-12 μm) de un compuesto manganesífero secundario. Microestructura coloforme visible en algunos granos.
wad	tr		ocurre como agregados de color pardo oscuro asociados a psilomelano
calcopirita	tr	remanentes de mineralización primaria	granitos de tamaño menor que 10 μm conservados como sulfuros relictos.
crisocola	2	formada a partir de la oxidación/lixiviación de minerales sulfurados de cobre	agregados de grano fino relleno de microvenillas e impregnaciones de formas irregulares de hasta unos 4 μm . Aparece solo en algunos de los fragmentos que constituyen la muestra. Escasas microvenillas con posible brochantita.

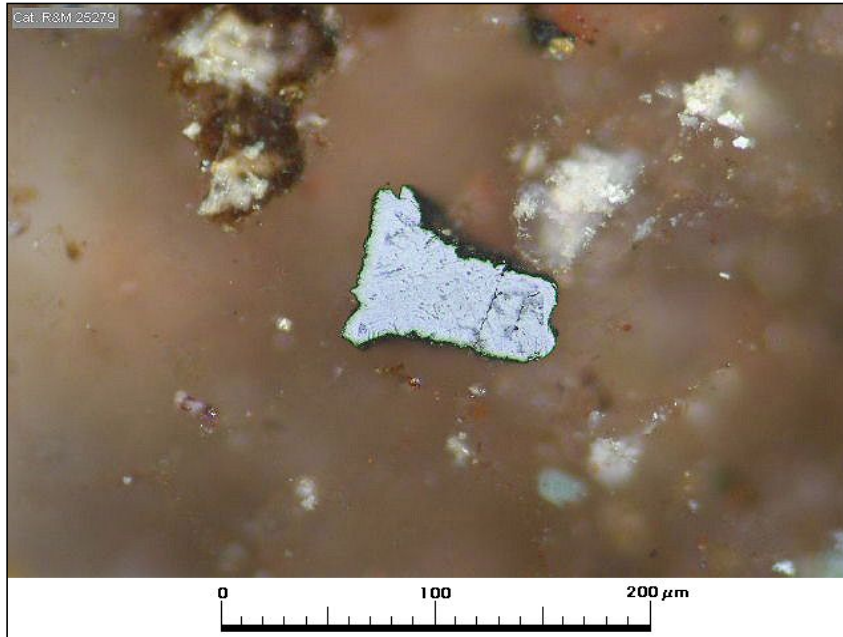
(*) En el sentido de mineral de Mn de consistencia dura y de identidad no totalmente determinada (Dana's New Mineralogy, R. Gaines et al., 8th Ed.



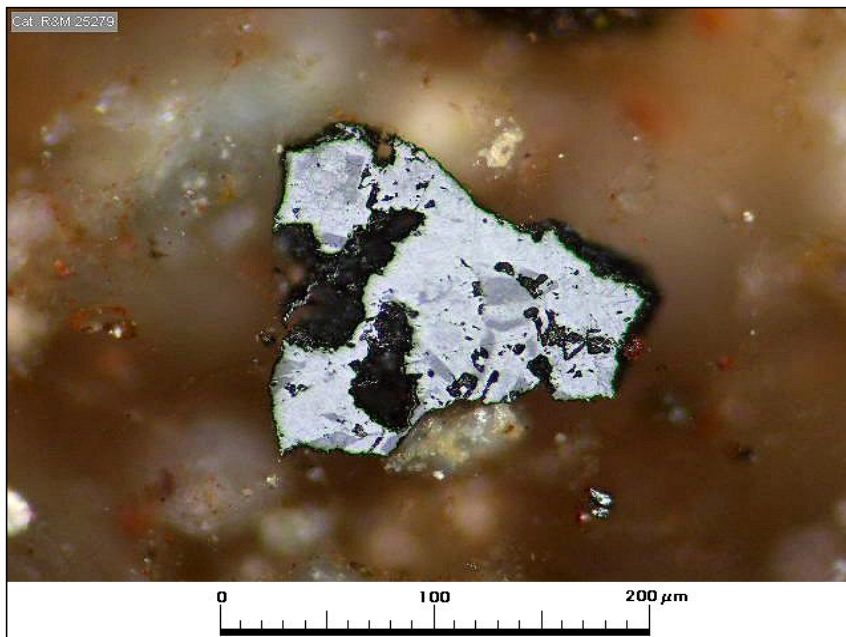
Muestra M-2: grano de psilomelano (mineral de Mn de consistencia dura y de grano fino con pleocroismo moderado y anisotropía fuerte). Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



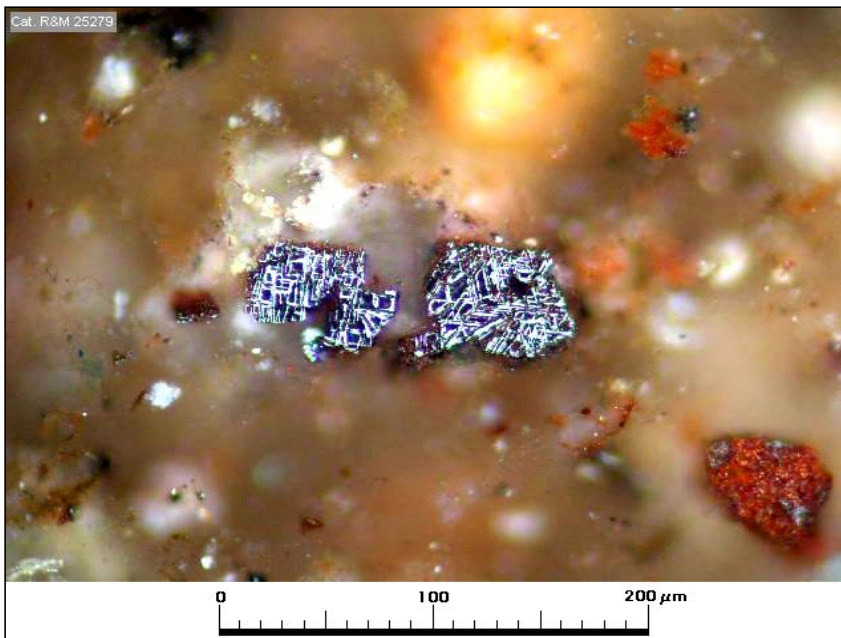
Muestra M-2: misma microfotografía anterior tomada bajo nicoles cruzados, lo que permite apreciar mejor su estructura granular fina. Aum.: 32x10; Nic. cruzados.



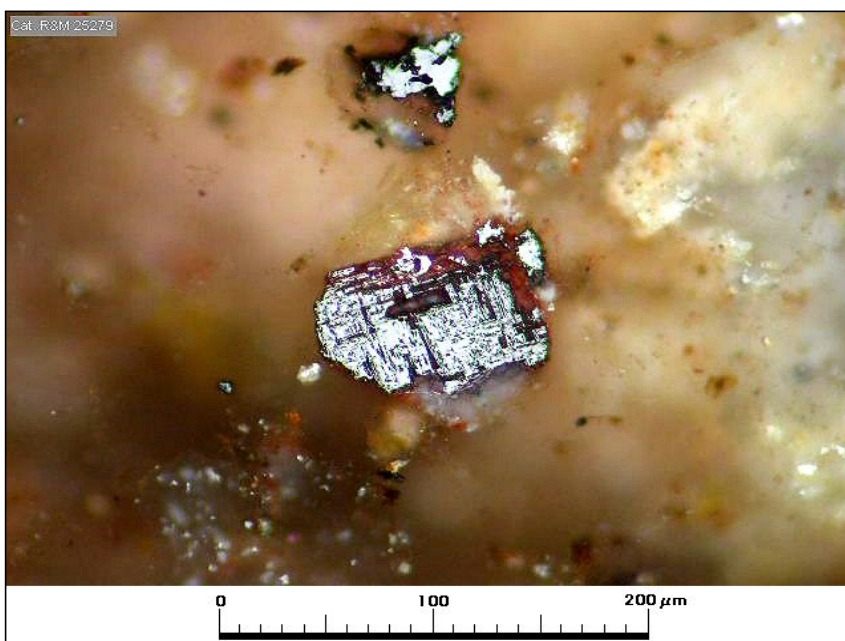
Muestra M-2: pequeño grano de psilomelano en que se puede apreciar una microestructura colofrme. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-2: grano característico de psilomelano. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-2: hematita con estructura lamelar (probablemente reemplazando a un mineral ferromagnesiano o magnetita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



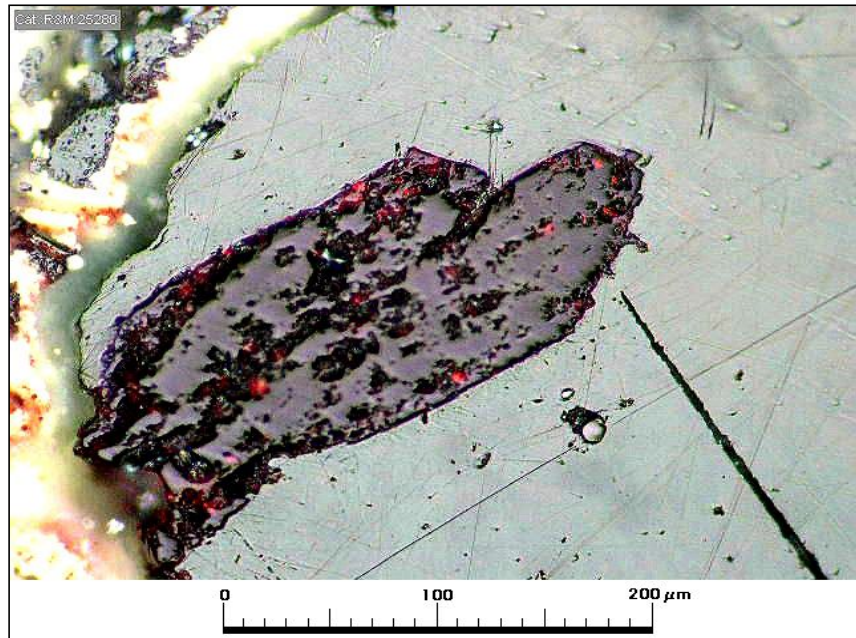
Muestra M-2: hematita reemplazando a un mineral ferromagnesiano. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

	Nº Muestra	M-3		
Procedencia	Coord. Norte		Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein				

Observaciones megascópicas/ microscópicas

La muestra está formada por trozos de andesita con textura porfídica bien desarrollada, con vesículas entre 1-2,5 mm y con brechizaciones locales. La mineralización es hipógena y consiste principalmente en calcosina y hematita especular con cantidades muy reducidas de digenita, covelina y bornita. La mineralización aparece relleno de las vesículas, formando parte de la matriz de las rocas brechizadas y en parte diseminada en la masa fundamental de la andesita. La muestra está libre de efectos supérgenos y no contiene minerales oxidados de cobre.

Microfotografía (aspecto general)

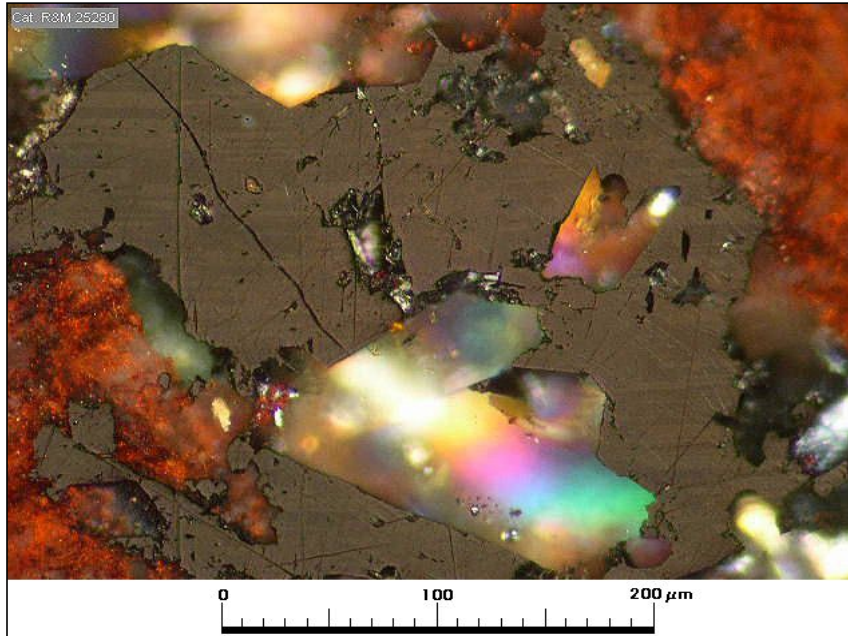


Muestra M-3: la microfotografía muestra una asociación típica de calcosina (blanca, anisótropa) junto a un cristal de hematita especular el cual muestra algunos puntos con reflejos internos rojos. La calcosina esta formada por un grano monocristalino con algunas estructuras internas (maclas) apenas visibles en condiciones de observación bajo nicoles cruzados. Ambos minerales se encuentran relleno de una vesícula. Aum.: 32x10; Nic. semicruzados.

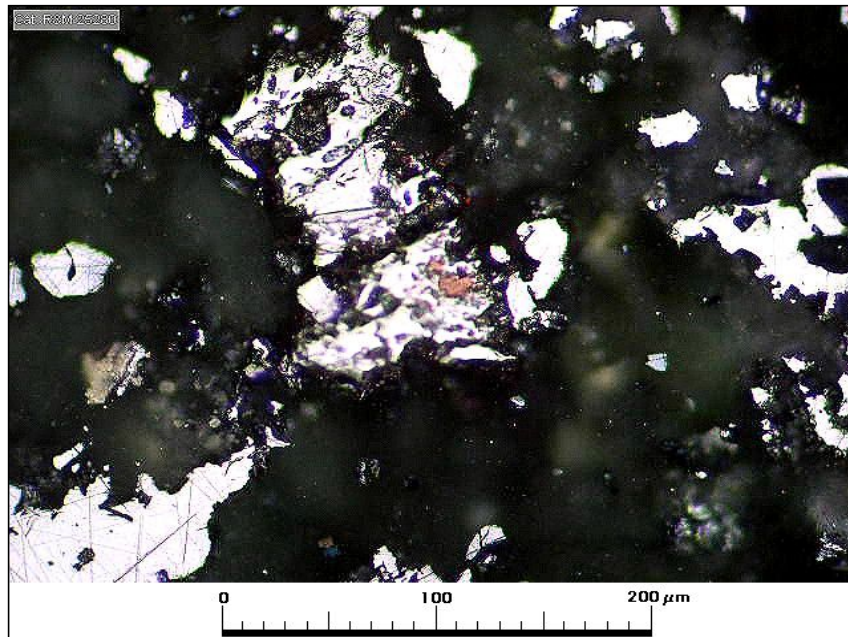
Observaciones microscópicas

Componentes minerales

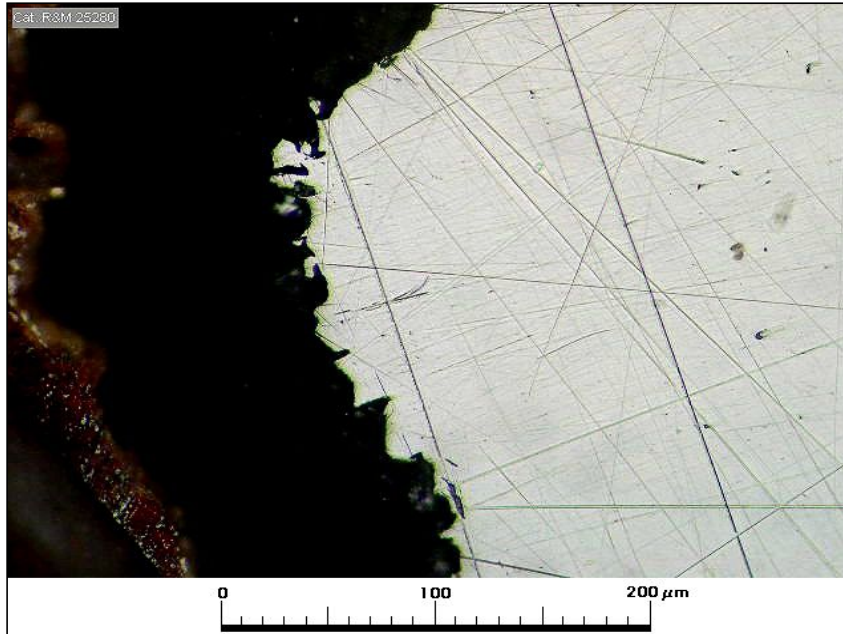
Mineral	%	Alteración	Características/ Modo de Ocurrencia
calcosina	8	sin alteración	ocurre en granos anhedrales de 0,015- 1 mm, de cristalización gruesa; localmente entrecrecida con digenita o calcosina azul isótropa. Muestra una anisotropía extremadamente débil. Como la mayor parte de los granos son monocristalinos es todavía más difícil distinguir la anisotropía. También entrecrecida con especularita. Junto con hematita especular rellenan vesículas en la andesita.
digenita (calcosina azul)	tr	sin alteración	aparece en granos anhedrales de formas muy irregulares y también formando entrecrecimientos lamelares con calcosina.
covelina	tr	sin alteración	en cristalitas hojosos de 5 µm entrecrecida con digenita y en cristalitas pequeños aislados.
bornita	tr	sin alteración	inclusiones de hasta 15 µm en hematita especular; la cantidad de bornita es ínfima pero su presencia indica que constituye parte de la paragénesis.
hematita	6	sin alteración	abundante como hematita especular en cristales de hasta 0,8 mm de típicas formas alargadas (secciones de plaquitas hexagonales); se encuentra entrecrecida con abundante calcosina blanca. También se presenta como agregados muy finos que tiñen de color roja la masa fundamental de la andesita.



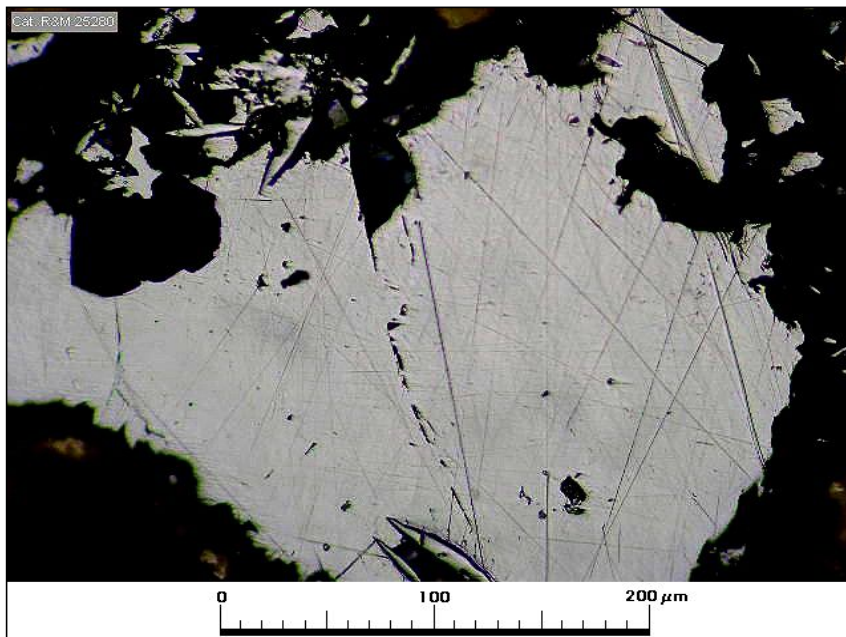
Muestra M-3: la microfotografía muestra un grano monocristalino de calcosina (blanca, anisótropa) bajo nicoles semicruzados; se puede observar un conjunto de maclas en dirección horizontal apenas perceptibles debido a que la anisotropía de dicha especie es muy débil. El color rojizo de la masa fundamental de la andesita se debe a una impregnación por hematita muy fina. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-3: la microfotografía muestra un agregado de granos anhedrales de especularita, uno de los cuales contiene una inclusión de bornita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-3: grano grueso de calcosina relleno una vesícula junto con clorita (material que aparece negro en contacto con calcosina). Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



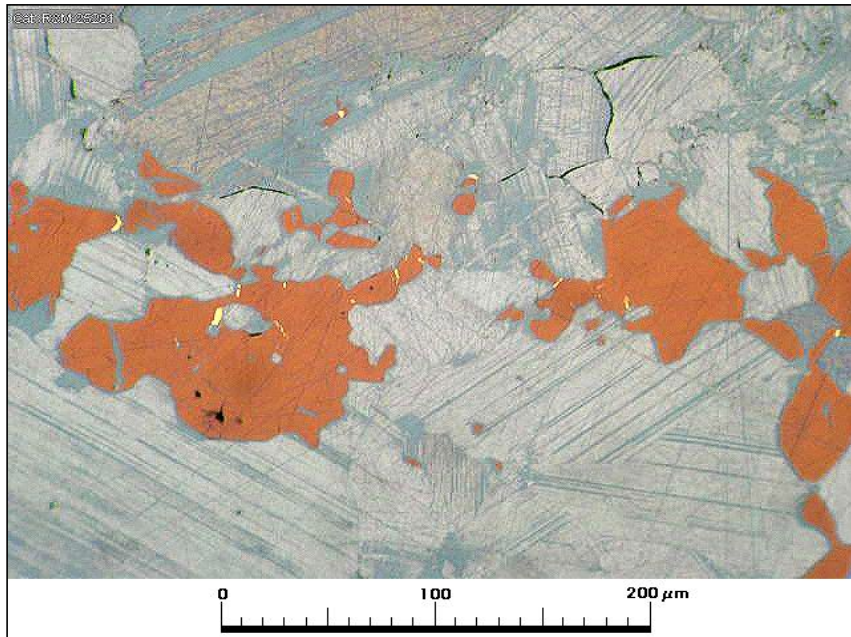
Muestra M-3: la microfotografía muestra otra vesícula con relleno de calcosina y clorita (en contacto con la calcosina). Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

Nº Muestra		M-4	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			

Observaciones megascópicas/ microscópicas

Andesita amigdaloidal de textura porfídica, color gris oscuro, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 5,5 mm, alterada moderadamente a sericita, en una masa fundamental intergranular, compuesta por microlitos de plagioclasa alterada levemente a sericita y con incipiente albitización junto a clorita y hematita en forma intersticial. La roca presenta impregnación de calcita localmente abundante en fenocristales de plagioclasa y en mayor medida en la masa fundamental, como cristales muy finos en forma diseminada. Se observan vesículas de 0,3-5 mm con relleno de calcita y clorita, localmente interconectadas. Los minerales opacos presentes corresponden a una asociación hipógena de especularita, calcosina (blanca anisótropa), digenita (calcosina azul isotropa, $Cu_{1,80}S$), con cantidades menores de bornita, covelina y trazas de calcopirita. La roca no presenta signos de oxidación/ lixiviación y no contiene minerales oxidados de cobre, limonitas ni minerales oxidados de manganeso.

Microfotografía (aspecto general)



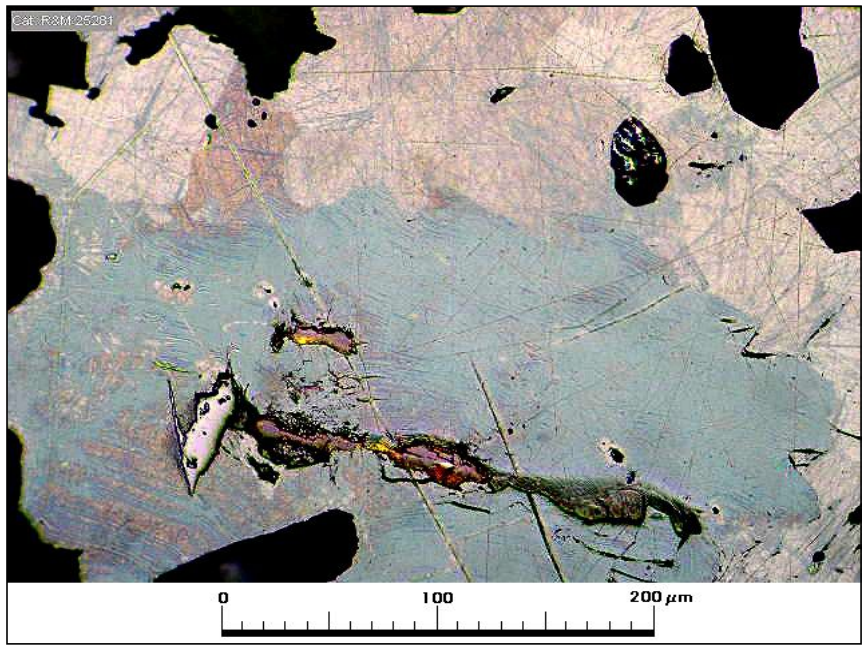
Muestra M-4: la microfotografía muestra la típica asociación mineralógica hipógena que normalmente constituye el relleno de vesículas en la andesita que la contiene. Está formada por bornita con escasas exsoluciones de calcopirita y por un complejo entrecrecimiento lamelar entre calcosina y digenita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

Observaciones microscópicas

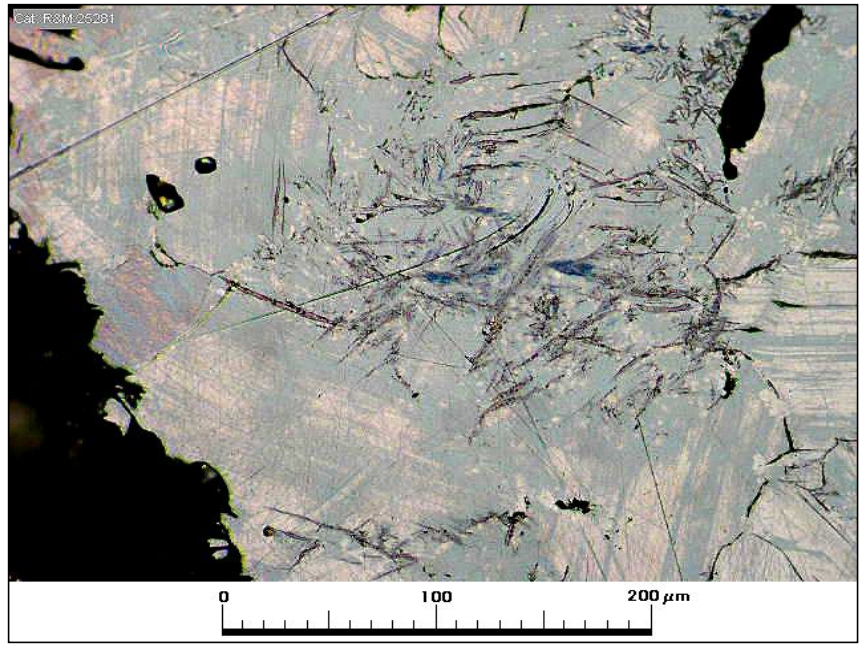
Componentes minerales

Mineral	%	Alteración	Características/ Modo de Ocurrencia
calcosina	3	sin alteración	ocurre junto a digenita y especularita, además de calcita y clorita, relleno de vesículas de hasta 3,5 mm (aunque probablemente hay mayores). En menor proporción aparece diseminada junto con especularita. Forma complejos entrecrecimientos lamelares con digenita.
digenita	2	sin alteración	constituye otra de las fases importantes del sistema Cu-S. Se la reconoce por su color azulado y carácter óptico isotrópico; forma granos aislados pero normalmente aparece entrecrecida con calcosina blanca anisótropa..
covelina	tr	sin alteración	aparece en pequeña cantidad normalmente asociada con digenita
bornita	<0,5	sin alteración	corresponde a un sulfuro primario relativamente escaso. Se presenta formando granos mixtos con calcosina y digenita. Contiene escasos cristallitos de calcopirita formados probablemente por exsolución.
calcopirita	tr	sin alteración	se presenta como inclusiones fusiformes en bornita y corresponde a exsoluciones posteriores a la formación de la bornita.
hematita especular	6	sin alteración	es una especie mineralógica abundante y que invariablemente aparece entrecrecida con calcosina/ digenita: se presenta en cristales de secciones alargadas (secciones de plaquitas hexagonales) y diseminada en la masa fundamental de la andesita. También aparece como finas diseminaciones impregnando y tiñendo de rojo la masa fundamental de la andesita. Algunos de los fragmentos de andesita muestran una leve susceptibilidad magnética (imán) pero no se observó magnetita en ellos; se presume una cantidad reducida de magnetita asociada a hematita a nivel submicroscópico.

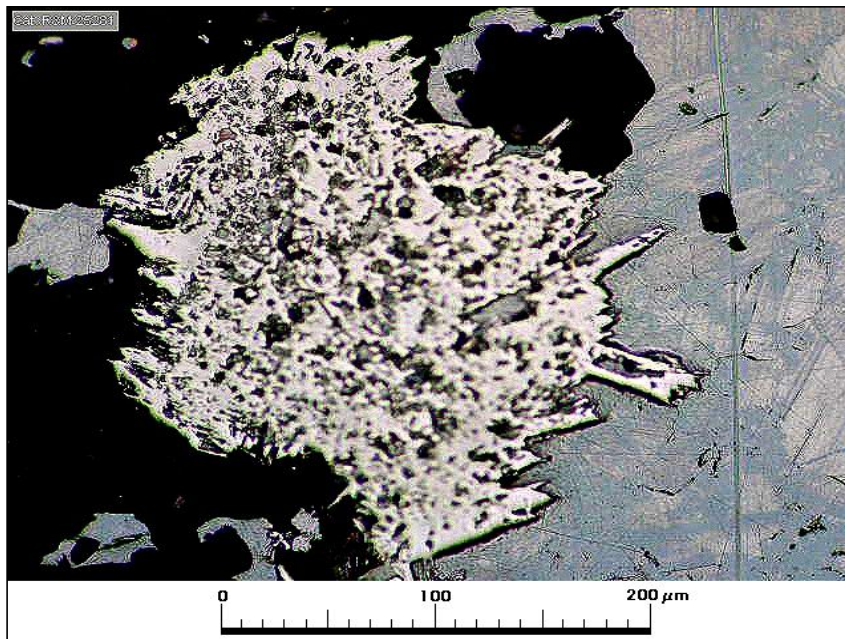
Selección de microfotografías



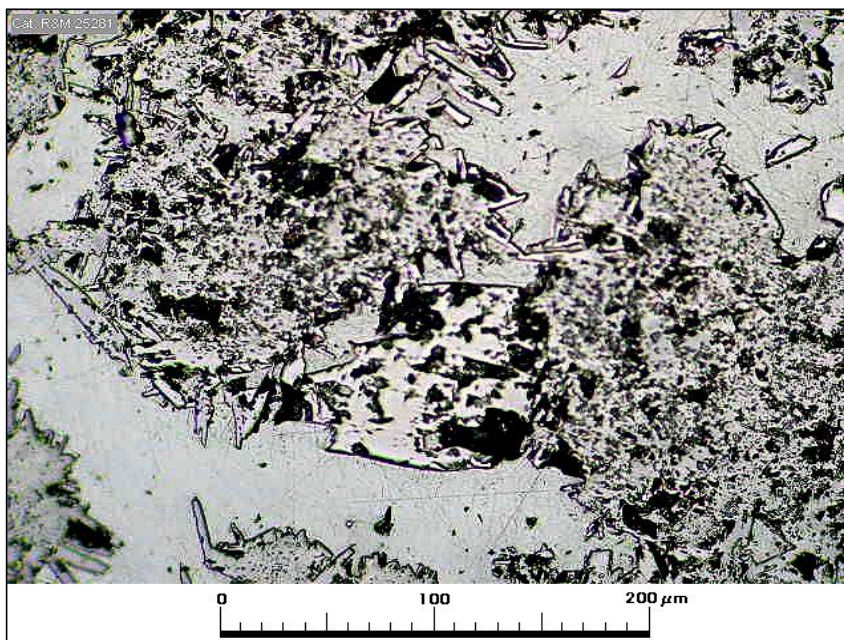
Muestra M-4: granos anhedrales de digenita (en color azul claro) y calcosina blanca anisótropa con la cual forma entrecrecimientos lamelares; en la microfotografía se observa un pequeño cristalito de especularita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



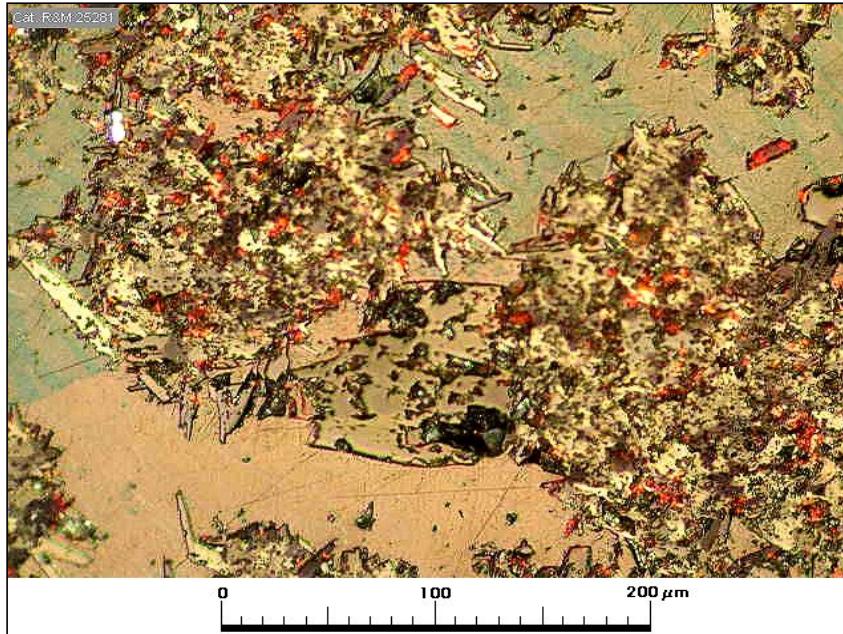
Muestra M-4: la microfotografía muestra un agregado formado por un entrecrecimiento lamelar de calcosina (blanca, anisótropa) y digenita (azul claro, isótropa). Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



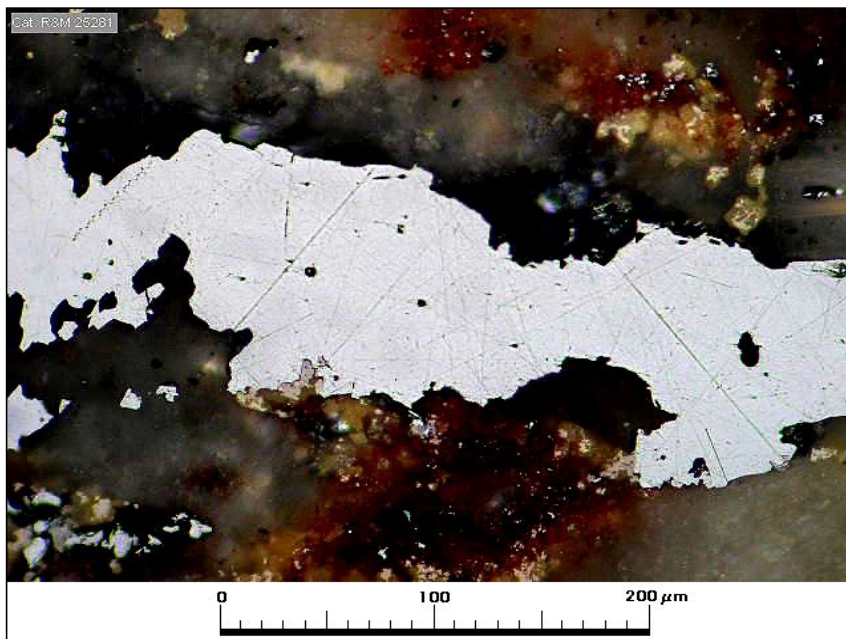
Muestra M-4: asociación característica entre hematita especular t calcosina/ digenita; ambos minerales rellenan una cavidad vesicular y el color negro corresponde a clorita, también relleno la vesícula. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-4: entrecrecimiento entre especularita y calcosina; ambos minerales aparecen reemplazando sectores de la masa fundamental de la andesita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-4: esta microfotografía corresponde a la misma anterior pero bajo nicoles cruzados. Se puede observar los reflejos internos rojos de la hematita y los débiles colores de anisotropía de la calcosina blanca anisótropa. Aum.: 32x10; Nic. semicruzados.



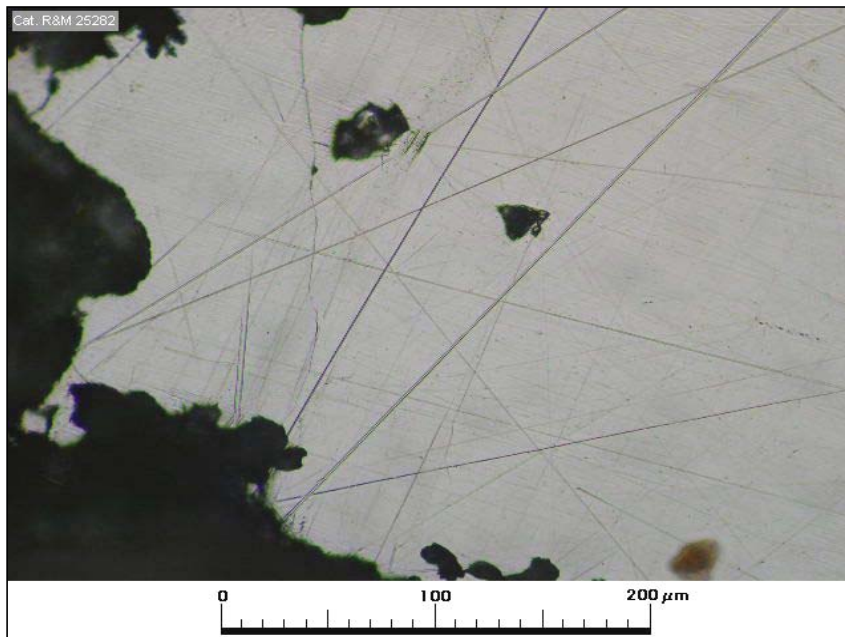
Muestra M-4: agregado característico de calcosina en andesita con abundante diseminación roja fina de hematita en su masa fundamental. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

	Nº Muestra	M-5		
Procedencia	Coord. Norte		Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein				

Observaciones megascópicas/ microscópicas

Andesita amigdaloidal de textura porfídica, color gris intermedio, localmente rojizo por impregnación de abundante hematita fina y verdoso por presencia de cloritas, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 3 mm, parcial a fuertemente descalcificada y pseudomorfos de máficos alterados a clorita, en una masa fundamental intergranular, compuesta por microlitos de plagioclasa con tamaño medio de 0,1 mm, sin orientación preferente, con presencia de clorita y hematita en forma intersticial, localmente abundante. Se observan amígdalas rellenas con ceolita y clorita, localmente con presencia de agregados muy finos de óxidos de Cu. Los minerales opacos presentes corresponden a hematita y calcosina hipógenas que rellenan vesículas junto con clorita y calcita; también ocurren diseminadas y en microvetillas. En fragmentos de andesita oxidados/ lixiviados la calcosina está reemplazada por malaquita y en menor proporción por crisocola.

Microfotografía (aspecto general)



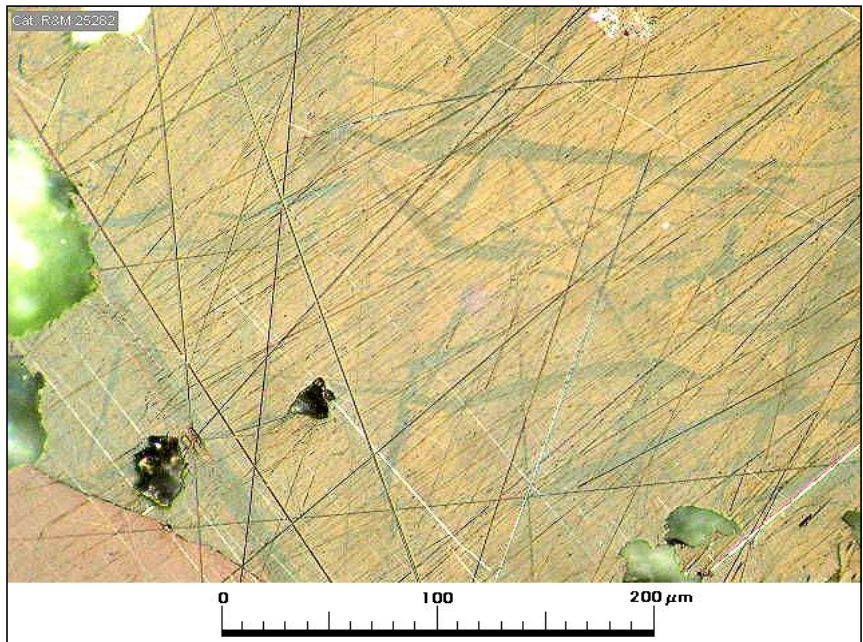
Muestra M-5: la microfotografía muestra un cristal anhedral monocristalino de calcosina hipógena relleno de una vesícula en andesita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

Observaciones microscópicas

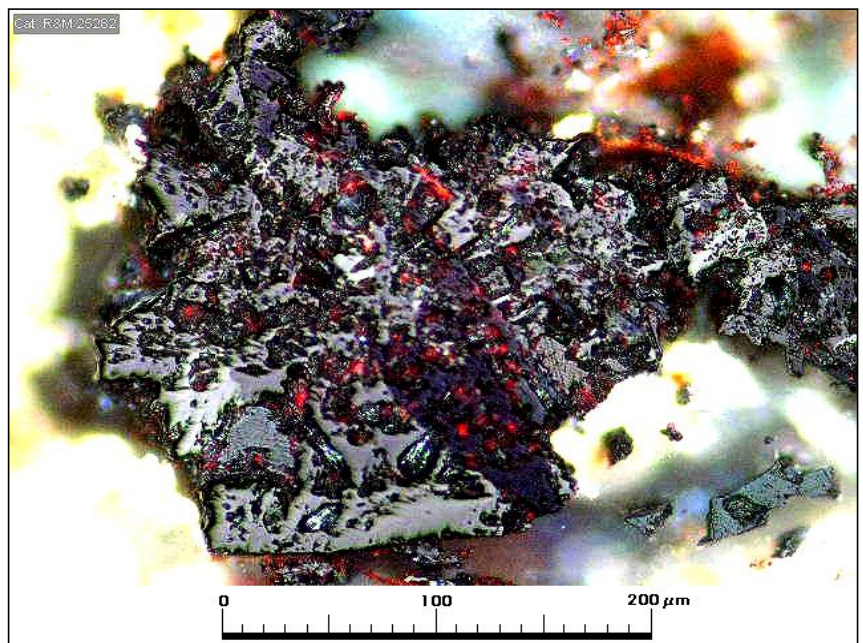
Componentes minerales

Mineral	%	Alteración	Características/ Modo de Ocurrencia
calcosina	3	reemplazo por malaquita en fragmentos de andesita oxidados/ lixiviados; escasa crisocola.	se presenta rellenando escasas vesículas (de unos 0,6 mm) junto con clorita y calcita (en fragmentos oxidados/ lixiviados es reemplazada por malaquita; también ocurre en la matriz de clorita de andesita brechizada y en diseminaciones y relleno de microfracturas.
hematita	1	sin alteración	ocurre principalmente en fragmentos de rocas oxidadas/ lixiviadas junto con malaquita y limonitas; se presenta en cristalitas anhedrales/ subhedrales de 10-30 µm. También ocurre como impregnaciones muy finas que tiñen de rojo la masa fundamental de la andesita. Algunos de los fragmentos de andesita muestran una leve susceptibilidad magnética (imán) pero no se observó magnetita en ellos; se presume una cantidad reducida de magnetita asociada a hematita a nivel submicroscópico.
malaquita	2	producto secundario	ocurre como relleno de vesículas junto con calcita; en algunas de las amígdalas se identificó una pequeña cantidad de crisocola asociada a la malaquita.
crisocola	tr	producto secundario	rellenando microfracturas en fragmentos de roca oxidada/ lixiviada y en menor proporción asociada a la malaquita en vesículas.
limonitas	<0,5	residuo de oxidación de sulfuros	ocurre de preferencia asociada a la malaquita en pequeñas cantidades como tinciones en la ganga carbonatada.

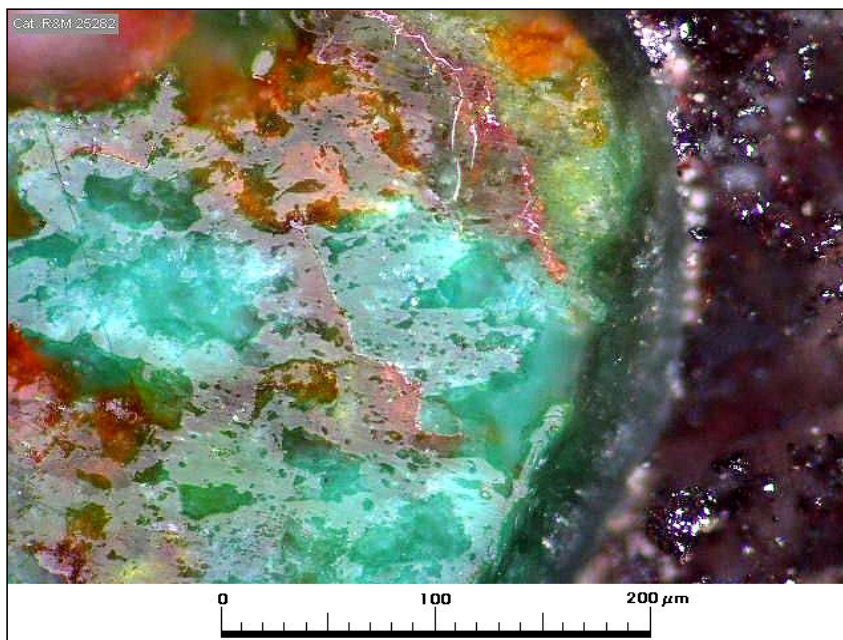
Selección de microfotografías



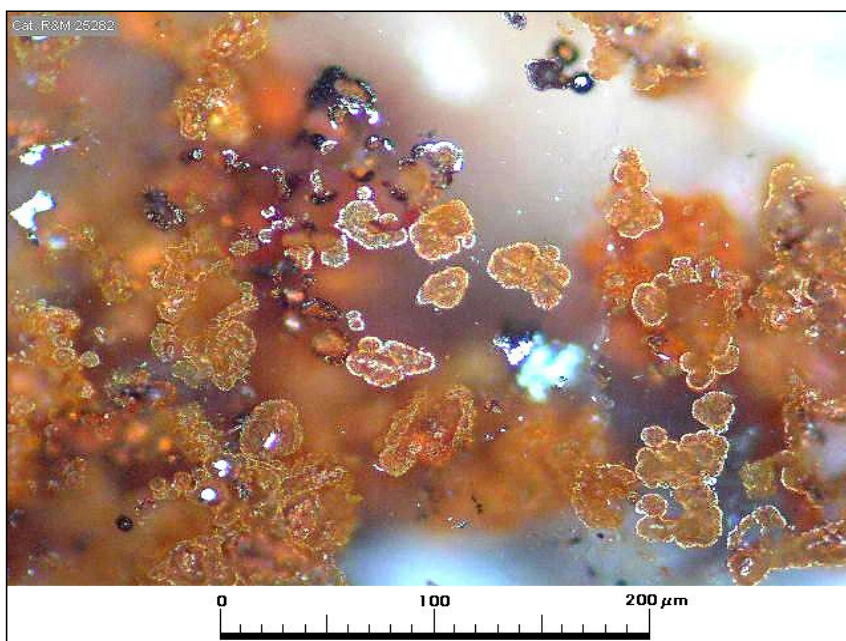
Muestra M-5: microfotografía de un grano de calcosina bajo nicoles semicruzados en que se muestra el carácter monocristalino del grano y la presencia de maclas fusiformes evidenciadas por la débil anisotropía de la calcosina. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-5: grano anhedral de hematita en fragmento de andesita no lixiviado. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-5: la microfotografía muestra una amígdala cuyo contenido original de calcosina y hematita ha sido alterado a malaquita y limonitas. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-5: la microfotografía muestra un fragmento de andesita oxidado/ lixiviado con calcosina en proceso avanzado de alteración a limonitas. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

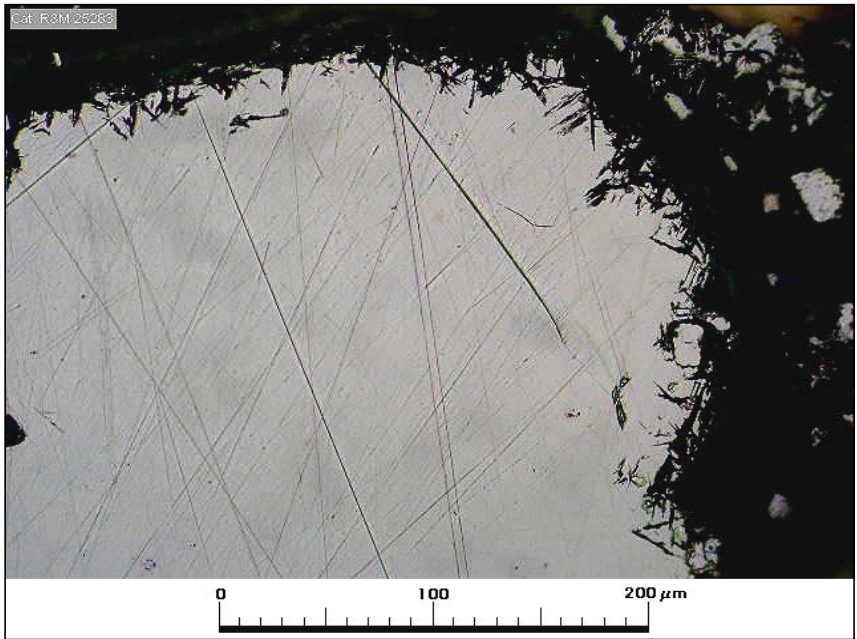
Nº Muestra M-6

Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			

Observaciones megascópicas/ microscópicas

La muestra está formada por fragmentos de andesita en parte amigdaloidal, algunos fragmentados y otros de color verdoso debido al reemplazo de sulfuros primarios por minerales oxidados de cobre. La textura es porfídica con fenocristales de plagioclasa de hasta 4 mm, en masa fundamental compuesta por microlitos de plagioclasa con escasa clorita intersticial e impregnación de hematita fina. La matriz de los fragmentos brechizados está compuesta por clorita y localmente por abundante hematita. Los minerales opacos presentes corresponden a calcosina y hematita hipógenas que rellenan vesículas escasas de hasta 0,8 mm y también se encuentran diseminadas en la masa fundamental y en la matriz de las andesita brechizada donde suelen constituir agregados bastante gruesos (alrededor de 1 cm). En los fragmentos oxidados/ lixiviados la calcosina está reemplazada por malaquita.

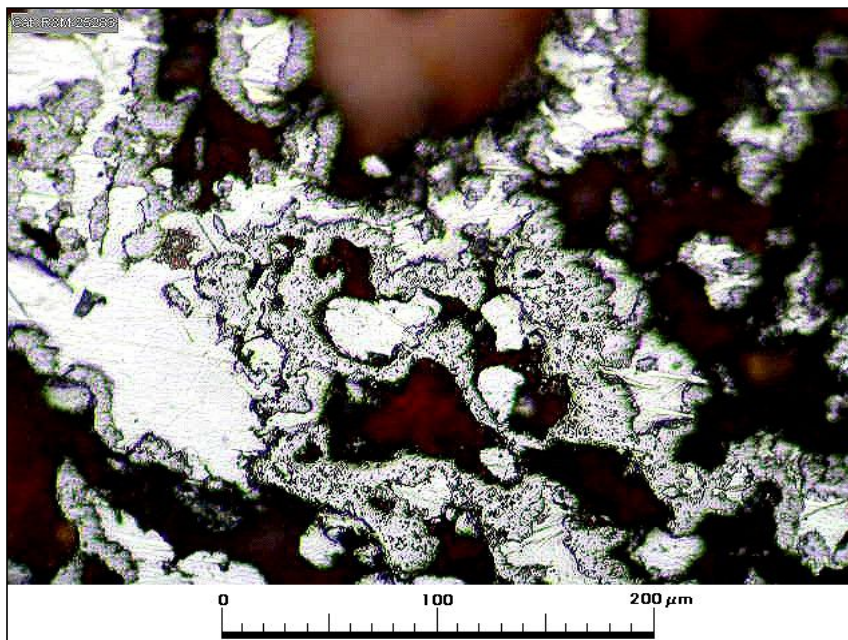
Microfotografía (aspecto general)



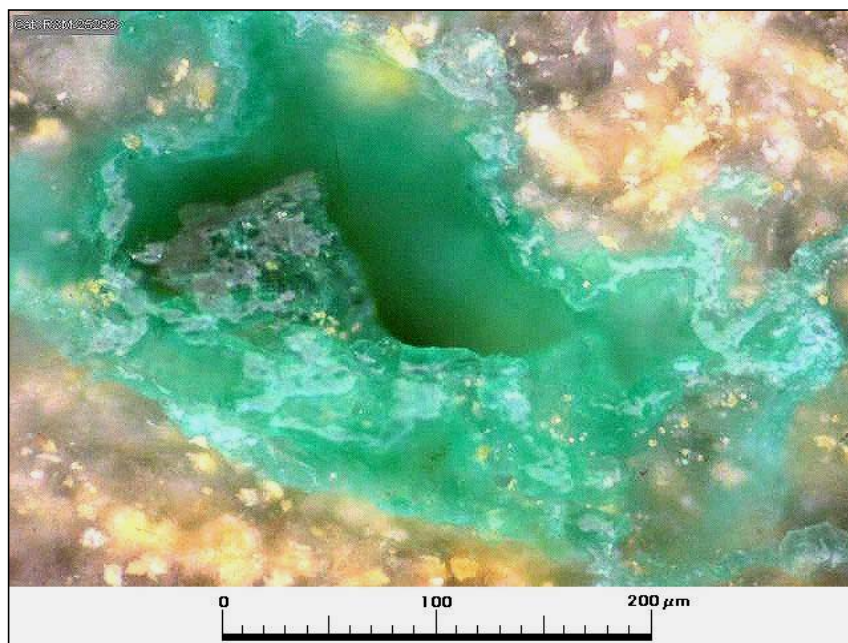
Muestra M-6: La microfotografía muestra un grano monocristalino de calcosina hipógena que rellena junto a clorita y calcita una vesícula en andesita; el material que aparece negro en contacto con calcosina es clorita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

Observaciones microscópicas

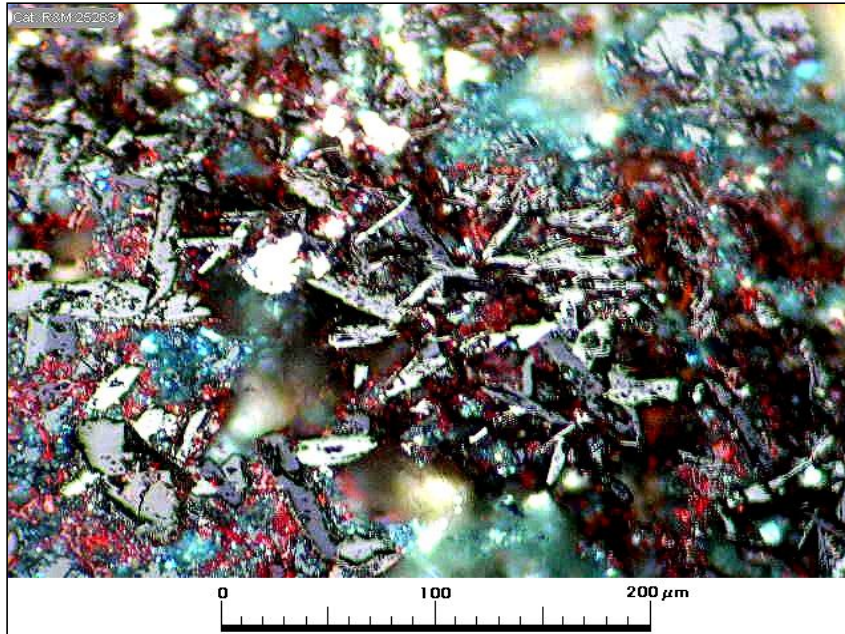
Componentes minerales			
Mineral	%	Alteración	Características/ Modo de Ocurrencia
calcosina	5	fragmentos de andesita oxidados lixiviviados contienen abundante malaquita que se formó a partir de la calcosina hipógena.	ocurre relleno de escasas vesículas de hasta 0,8 mm junto a escasa hematita, clorita y calcita. Forma agregados de hasta 0,4 mm monocristalinos y de formación hipógena junto a especularita.
hematita especular	2	sin alteración	corresponde a mineralización primaria que rellena vesículas e impregna la masa fundamental de andesita. Algunos trozos de andesita ejercen un efecto de atracción sobre el imán, sin embargo en ellos solamente se observó hematita especular; se presume la presencia de magnetita ultrafina como inclusiones en hematita (?).
malaquita	2	mineral secundario.	se observa como reemplazo de calcosina primaria en fragmentos de andesita oxidados/ lixiviviados.



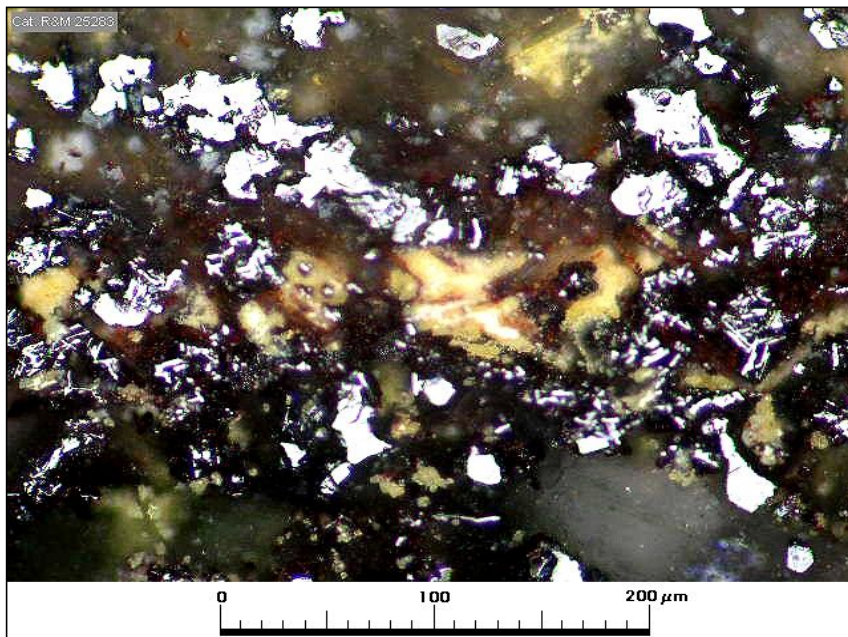
Muestra M-6: la microfotografía corresponde a un fragmento de andesita con muy abundante mineralización de calcosina y hematita especular hipógenas. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-6: malaquita resultante del reemplazo de sulfuros de cobre hipógenos en fragmentos de andesita oxidada/ lixiviada. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-6: andesita intensamente reemplazada por hematita especular junto a agregados de clorita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



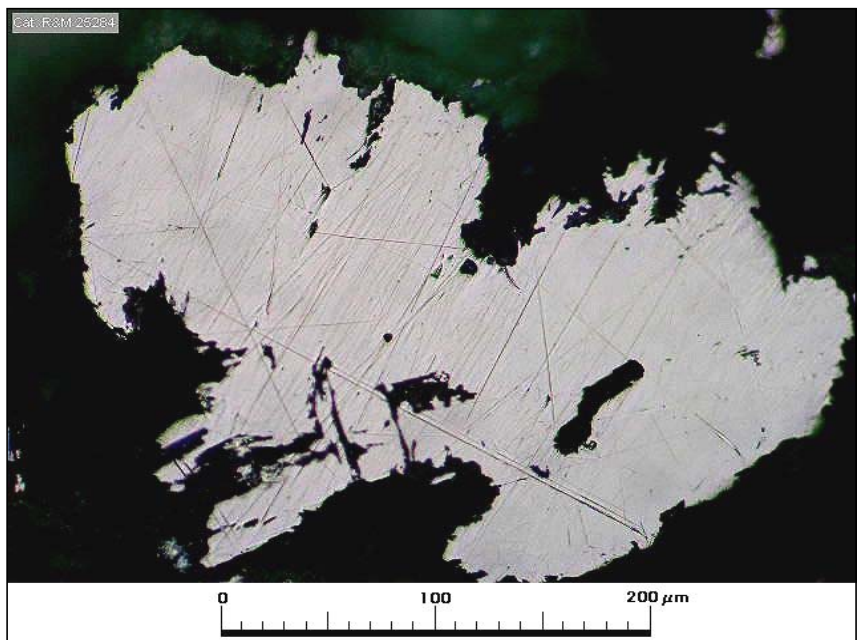
Muestra M-6: andesita con abundante calcosina diseminada junto a hematita; ambos minerales corresponden a mineralización hipógena. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

Nº Muestra		M-7	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			

Observaciones megascópicas/ microscópicas

Andesita parcialmente brechizada de textura porfídica, color gris intermedio, localmente con tonalidades verdosas por presencia de clorita, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 4 mm, parcial a fuertemente descalcificada y con incipiente reemplazo de calcita, muy escasos pseudomorfos de máficos alterados a clorita y masa fundamental microlítica afieltrada, compuesta por microlitos de plagioclasa con tamaño medio de 0,1 mm, sin orientación preferente, con presencia de escasa clorita en forma intersticial. La roca presenta amígdalas rellenas con cuarzo, ceolita y localmente pequeños granos de calcita. Se aprecia brechización en forma local, con matriz de cuarzo. La roca se encuentra cortada por vetillas de calcita y localmente con leve cizallamiento. Los minerales opacos presentes corresponden a hematita y calcosina relleno de escasas vesículas de hasta 0,8 mm, impregnando la matriz de cuarzo-clorita t también como diseminación en la masa fundamental. En los fragmentos de andesita oxidada/ lixiviada se observó malaquita relleno de vesículas.

Microfotografía (aspecto general)

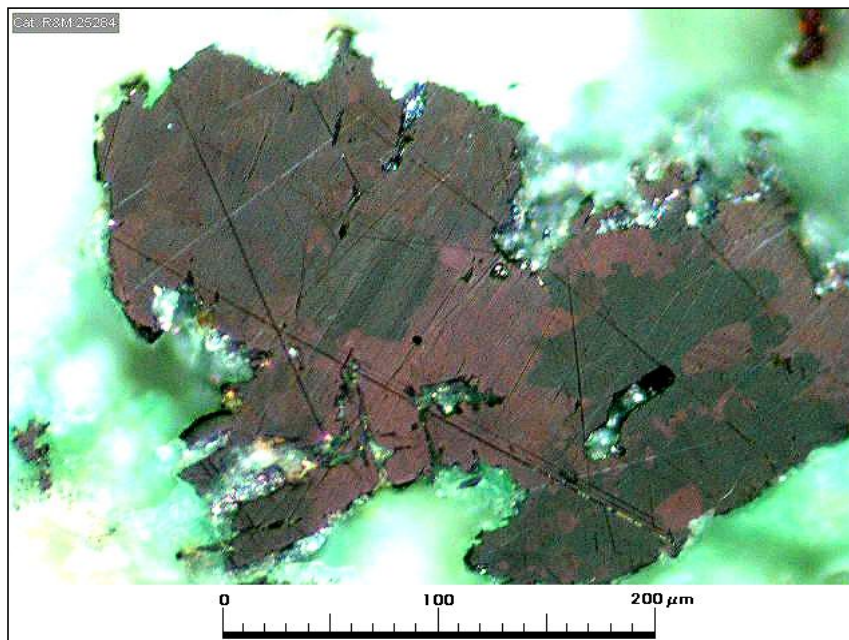


Muestra M-7: grano anhedral de calcosina primaria relleno de vesícula de 0,6 mm junto con ganga impregnada en malaquita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

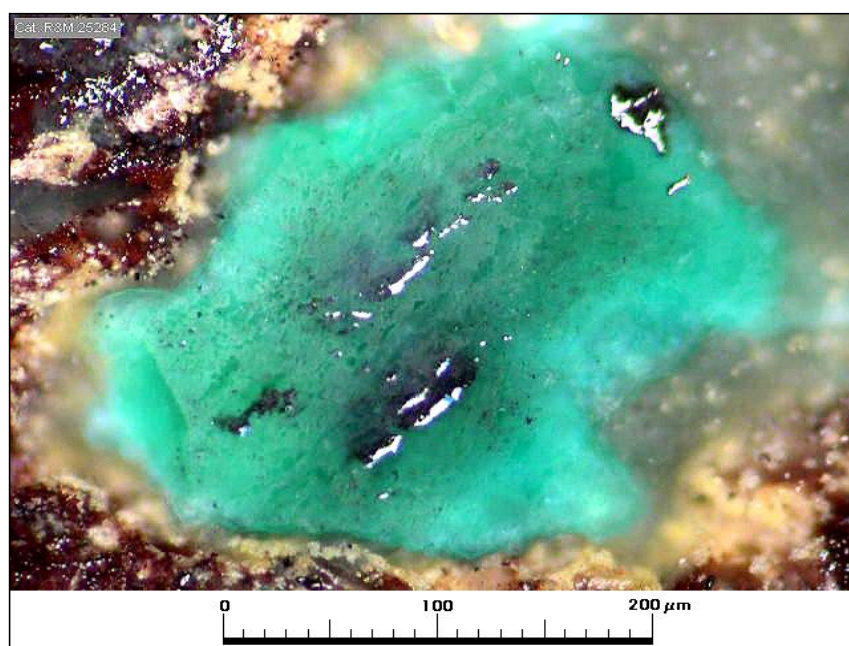
Observaciones microscópicas

Componentes minerales

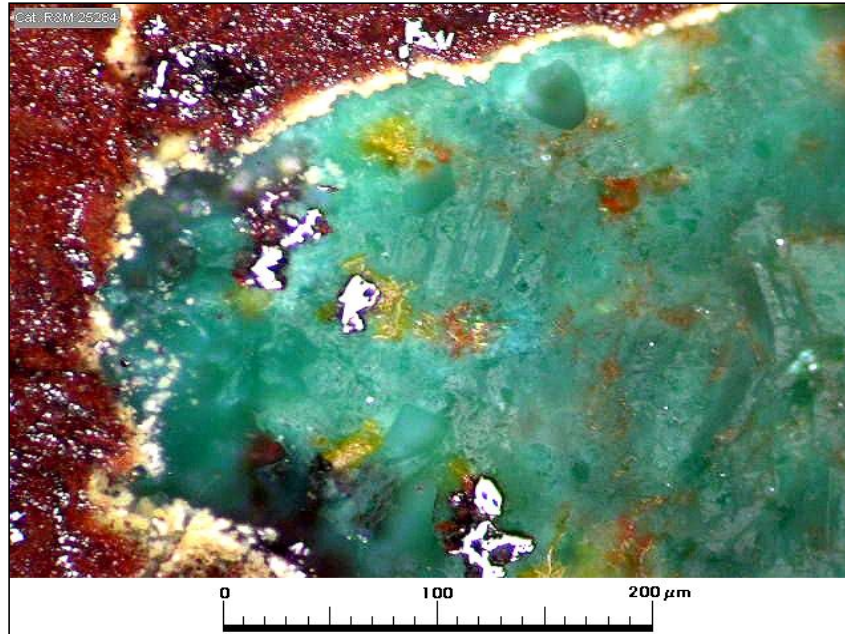
Mineral	%	Alteración	Características/ Modo de Ocurrencia
calcosina	2	en fragmentos de andesitas oxidados/ lixiviados la calcosina está reemplazada por malaquita	se la observa como parte del relleno de algunas vesículas junto con escasa hematita especular y otros minerales de ganga; ocurre en agregados de hasta 0,5 mm formados por cristales anhedrales que corresponden a mineralización hipógena. Localmente se observó trazas de digenita, bornita y covelina como inclusiones en calcosina.
hematita	3	sin alteración	ocurre en cristales anhedrales/ subhedrales de 0,015-0,1 mm, algunos de formas alargadas (secciones de plaquitas hexagonales); hematita también aparece como una fina disseminación que tiñe de color rojo la masa fundamental.
malaquita	2	producto de la oxidación/ lixiviación de calcosina hipógena	rellena vesículas de hasta 0,8 mm en las cuales ha reemplazado a calcosina; en algunos agregados se puede observar remanentes de calcosina y covelina.
crisocola	<0,5	producto de la oxidación/ lixiviación de calcosina hipógena	microvenillas rellenan finas microfracturas y clivajes en plagioclasas.



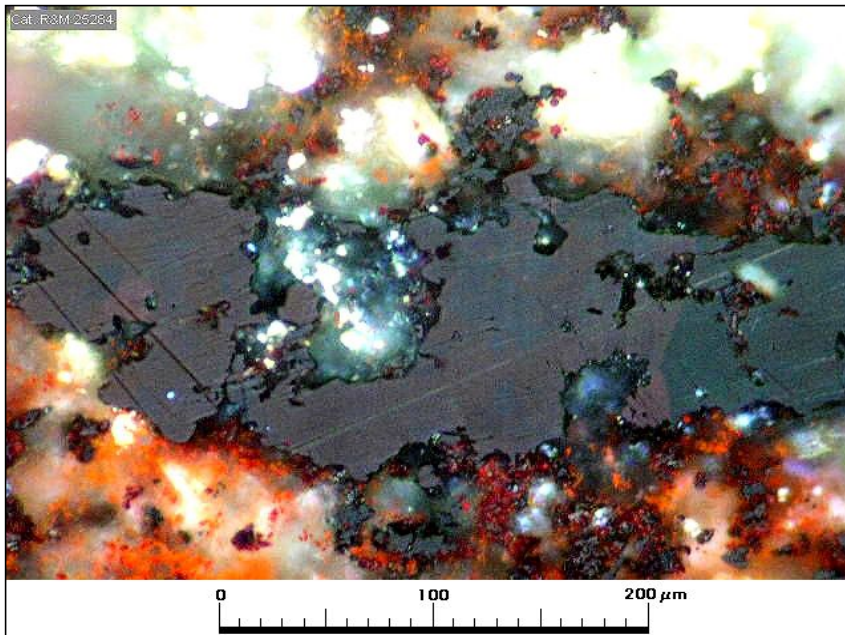
Muestra M-7: misma microfotografía anterior en que se observa la débil anisotropía de la calcosina (los distintos colores se deben a las diferentes orientaciones de los cristales que forman el grano de calcosina hipógena. También se puede observar la ganga impregnada en malaquita. Aum.: 32x10; Nic. cruzados.



Muestra M-7: agregado de malaquita relleno vesícula en un fragmento de andesita oxidada/ lixiviada; la malaquita reemplazó a la calcosina. Se puede observar inclusiones de calcosina y escasa covelina como remanentes del reemplazo. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



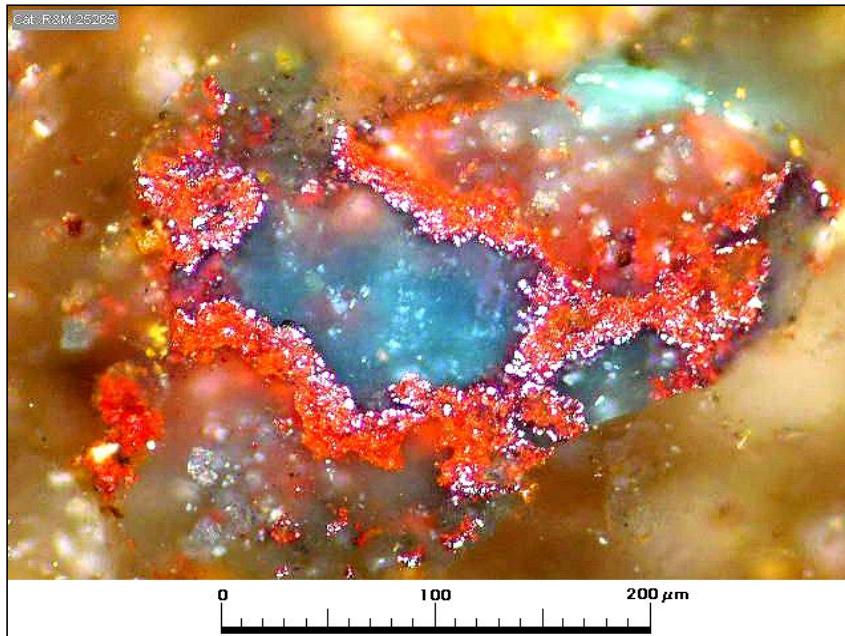
Muestra M-7: esta microfotografía corresponde a otra vesícula con relleno de malaquita; en la malaquita se observan inclusiones de hematita especular no afectada por el proceso de oxidación/ lixiviación (corresponde a la paragénesis hipógena calcosina-especularita; la calcosina fue reemplazada por malaquita). Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-7: la microfotografía muestra un grano de calcosina junto a hematita fina formando parte del cemento en un trozo de andesita brechizada; obsérvese los colores de polarización de la calcosina (débiles pero distinguibles, especialmente en el contacto de cristales con diferemnte orientación) y los abundantes reflejos internos en la hematita. Aum.: 32x10; Nic. cruzados.

Nº Muestra		M-8	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			
Observaciones megascópicas/ microscópicas			
Toba de cristales con textura volcánico-clástica, color pardo rojizo con sectores verdosos por desarrollo de minerales de cobre, compuesta por fragmentos de cristales de plagioclasa de hasta 6 mm, alterada parcialmente a montmorillonita y con impregnación de hematita fina en matriz cinerítica fina, alterada parcialmente a montmorillonita. Algunos fragmentos presentan impregnación de abundante hematita y se encuentra cortada por gruesas vetillas y agregados de cuarzo, limonitas y baritina, con presencia de malaquita, crisocola en parte de color azul asociada a malaquita y brochantita en microvenillas.			

Microfotografía (aspecto general)

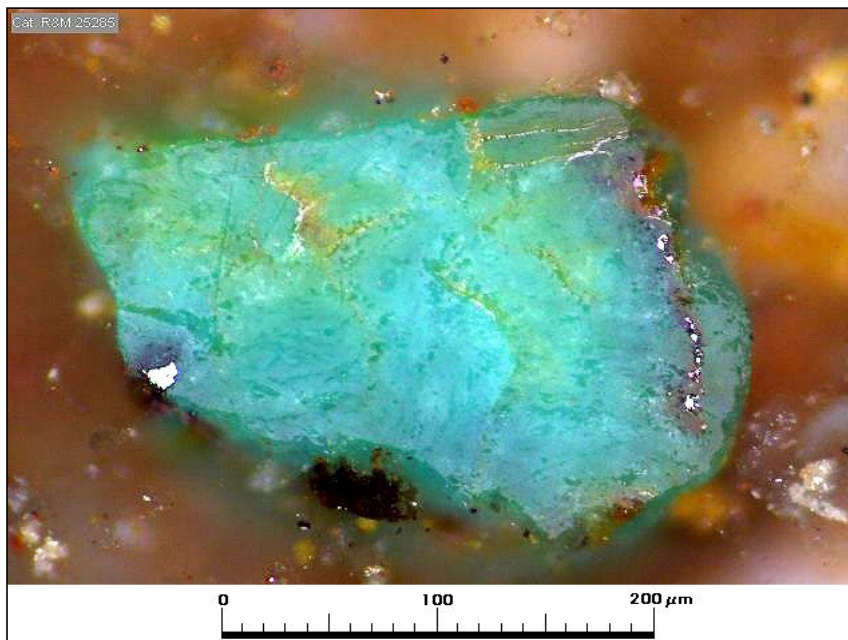


Muestra M-8: la microfotografía muestra un agregado de hematita secundaria de grano fino junto a crisocola formada a partir de la oxidación/lixiviación de la roca. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

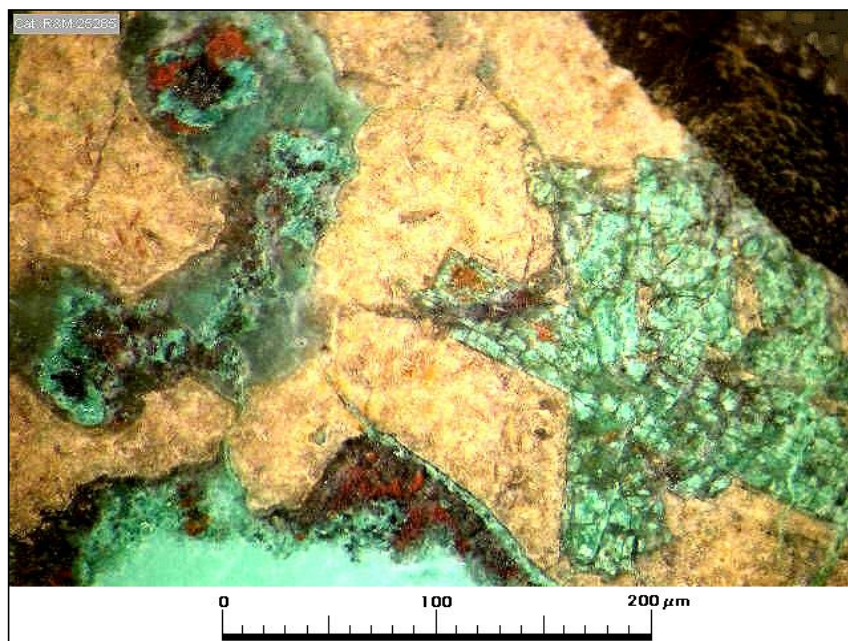
Observaciones microscópicas

Componentes minerales

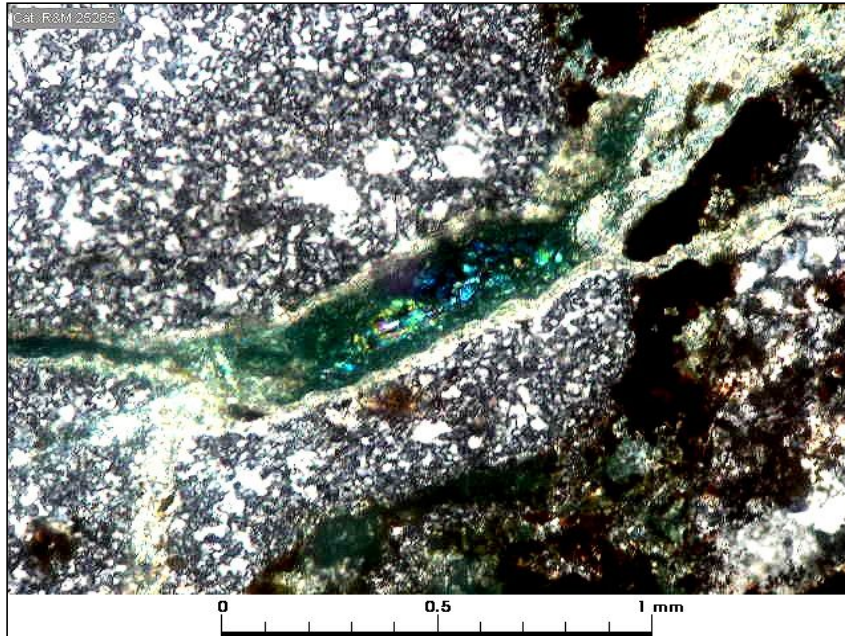
Mineral	%	Alteración	Características/ Modo de Ocurrencia
plata nativa	tr	pequeños granos en cuarzo	se observó 3 pequeñas partículas entre 2-15
hematita	2		reemplaza fenocristales de la toba e impregna de color rojizo fenocristales y sectores de la matriz de la toba.
psilomelano	1,5	mineral secundario de manganeso	agregados de color gris oscuro y tamaños de ca. 0,4 mm; localmente asociada con material pardusco clasificable como wad.
malaquita	2		impregnaciones, agregados irregulares junto a limonitas goethíticas y hematíticas y reemplazo parcial de plagioclasas; asociaciones con crisocola.
crisocola	0,5	minerales oxidados de cobre resultantes de la oxidación/ lixiviación de sulfuros primarios.	se la observó en agregados de grano fino y en microvenillas, color azulado, asociada a malaquita.
brochantita	<0,5		en microvenillas como finos cristalitas de intenso color verde esmeralda; asociada con crisocola azulada en algunas de las microvenillas junto con cuarzo hidrotermal.



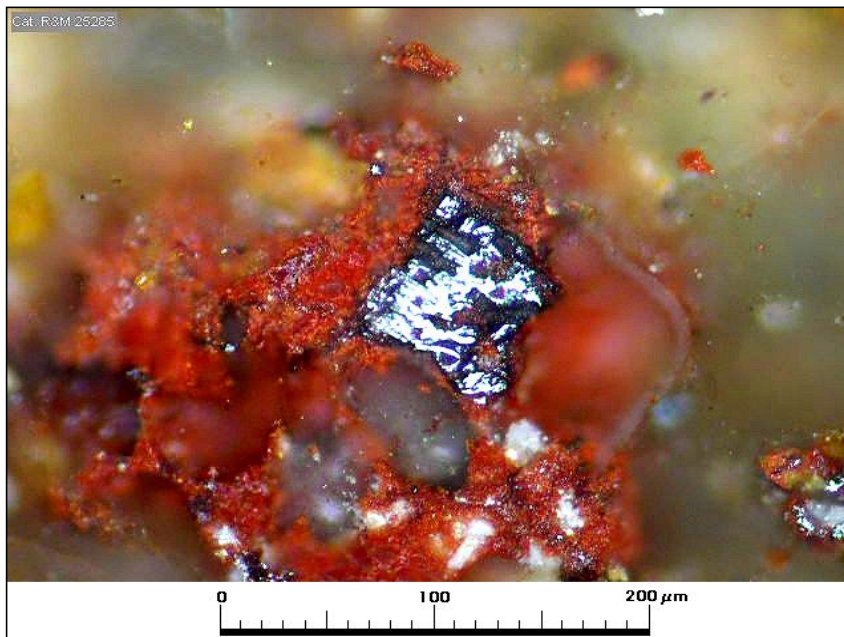
Muestra M-8: grano de crisocola y malaquita con remanentes de hematita especular, formados como resultado de la oxidación/ lixiviación de roca mineralizada con sulfuros primarios de cobre. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-8: esta microfotografía muestra fenocristales en andesita parcialmente reemplazados/ impregnados por malaquita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-8: microvenilla co relleno de brochantita y bordes de crisocola azul en andesita intensamente silicificada. Aum.: 6,3x10; Nic. cruzados.



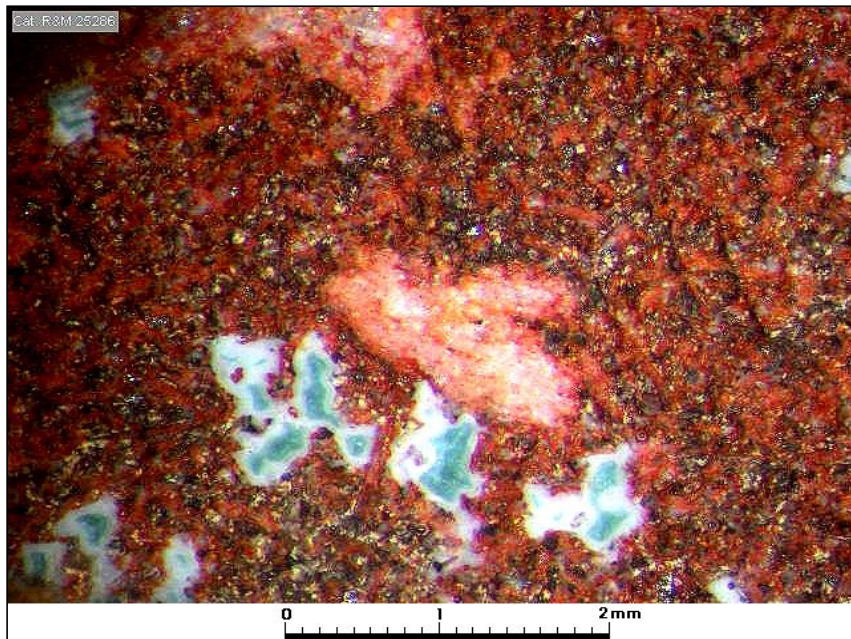
Muestra M-8: hematita reemplazando a fenocristal probablemente de ferromagnesiano junto a abundante hematita fina que tiñe de rojo a la masa fundamental de la andesita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

	Nº Muestra	M-9		
Procedencia	Coord. Norte		Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein				

Observaciones megascópicas/ microscópicas

Andesita de textura porfídica, color pardo rojizo debido a intensa impregnación de hematita roja de grano fino; algunos de los fragmentos que componen la muestra aparecen en color verde debido a impregnación de minerales oxidados de cobre y relleno de vesículas por crisocola y montmorillonita. Los fenocristales corresponden a plagioclasa en cristales tabulares de hasta 3,5 mm, alterada a sericita, montmorillonita, calcita e impregnación hematítica. La masa fundamental está constituida por un agregado de microlitos e plagioclasa alterada intensamente a hematita, sericita y localmente con impregnación de calcita, mostrando pequeños agregados con ceolita y minerales oxidados de cobre. Muchos de los fragmentos de roca se encuentran tan fuertemente hematitizados que su composición y textura está profundamente obliterada y podrían corresponder a toba. Uno de los trozos presentes está compuesto por un agregado de cuarzo granular y calcedónico con cristales gruesos de baritina.

Microfotografía (aspecto general)

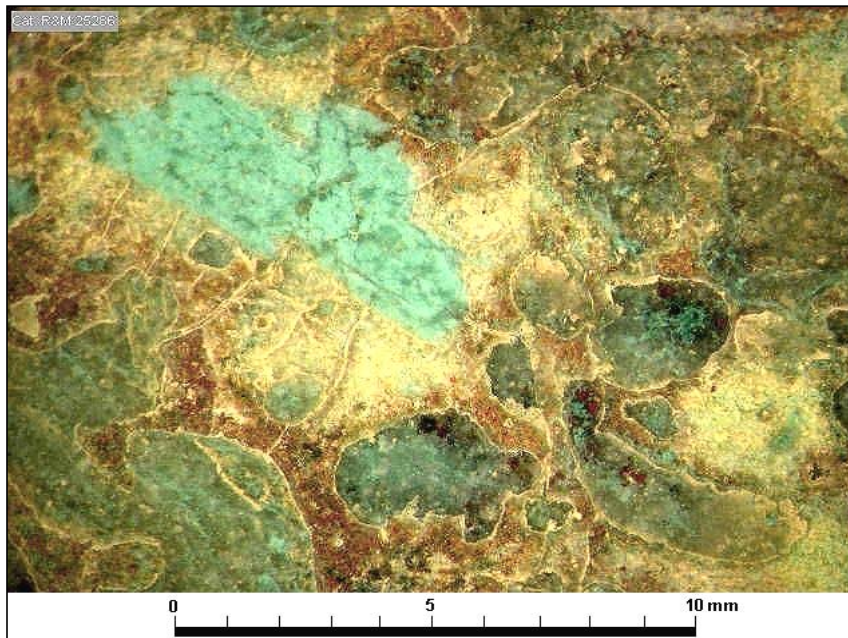


Muestra M-9: andesita con su masa fundamental intensamente impregnada en hematita fina que la tiñe de rojo intenso; se observa además pequeñas vesículas con relleno de crisocola y cuarzo. Aum.: 2,5x10; luz natural.

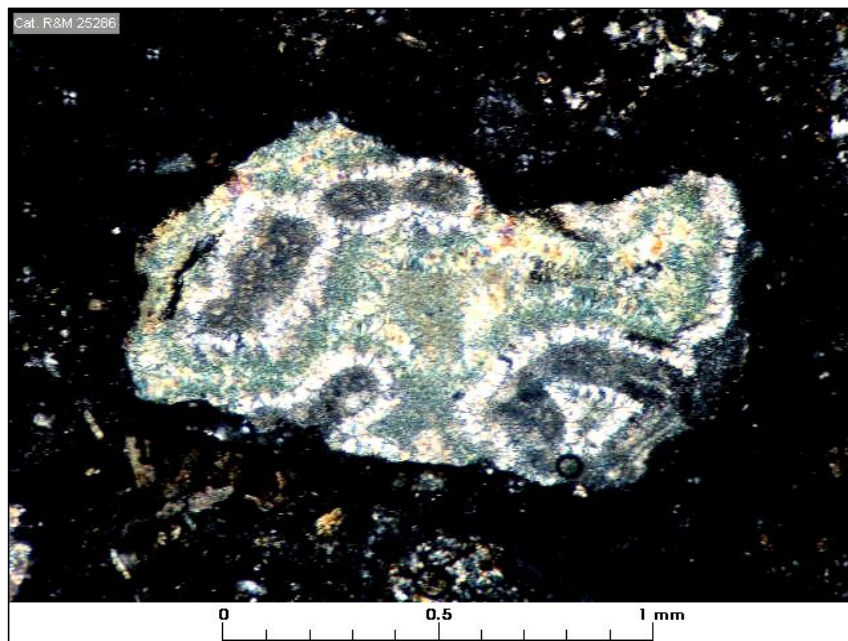
Observaciones microscópicas

Componentes minerales

Mineral	%	Alteración	Características/ Modo de Ocurrencia
hematita	3	reemplaza a magnetita	muy abundante como impregnación de grano muy fino en masa fundamental de andesita y en menor grado en fenocristales; también se la observa en granos
crisocola	1	óxidos secundarios de cobre	rellena poros, vesículas y otros espacios abiertos junto a montmorillonita, cuarzo granular de grano fino y cuarzo calcedónico.
malaquita	0,5	formados a a partir de la oxidación/ lixiviación de sulfuros de cobre.	ocurre en agregados de grano fino reconocibles por su fuerte anisotropía.
brochantita/ atacamita	<1		granos diseminados de hasta 60 µm de color verde esmeralda asociados a agregados de wad que impregnan fenocristales y masa fundamental de amndesita.
wad	<0,5	óxidos de Mn secundarios	impregnaciones locales escasas de óxidos secundarios de Mn de aspecto terroso.
arcilla (mont.) con impregnación limonítica	2		corresponde a material de alteración de minerales ferromagnesianos con tonalidades parduscas y anaranjadas por inción limonítica.

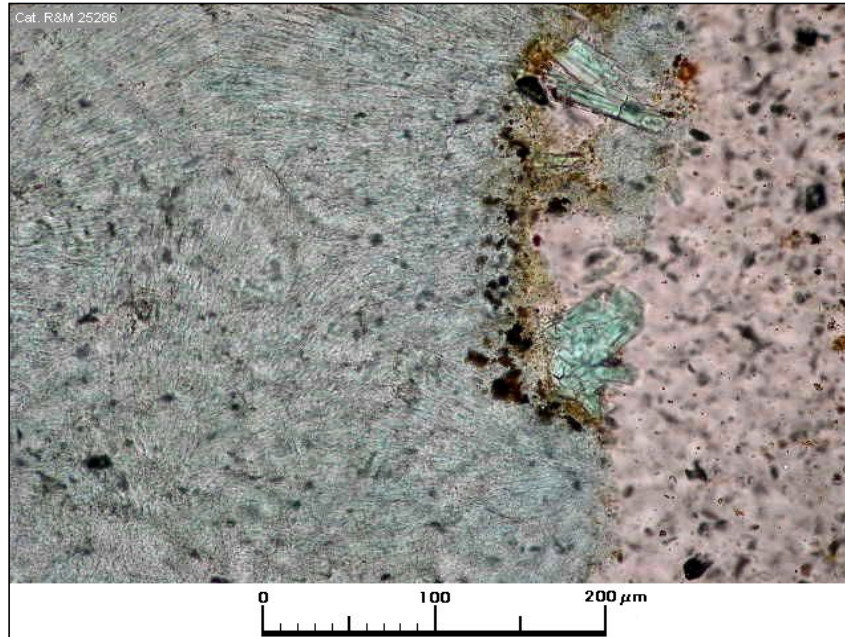


Muestra M-9: andesita amigdaloidal en que las vesículas están rellenas por cuarzo y óxidos verdes de cobre; también aparece un fenocristal de plagioclasa intensamente teñido de verde. Aum.: 1x10; luz natural.

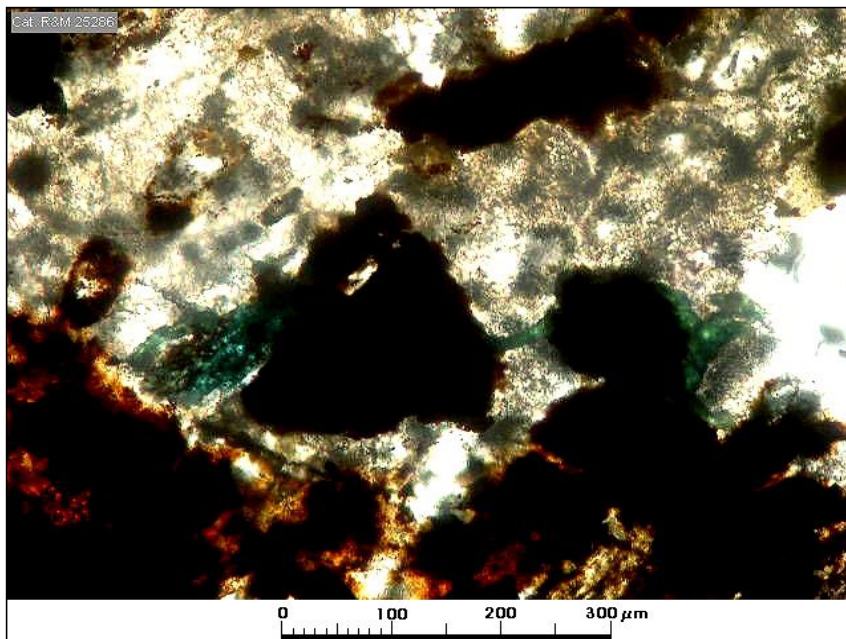


Muestra M-9: agregado de grano fino, en parte color verde de crisocola montmorillonita y cuarzo calcedónico de grano muy fino. Aum.: 6,3x10; Nic. cruzados.

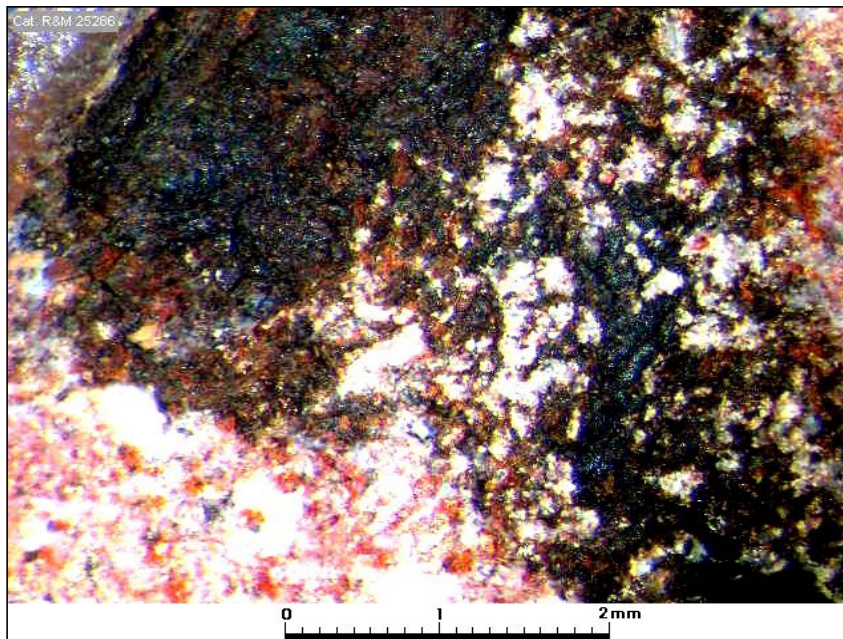
Microfotografías



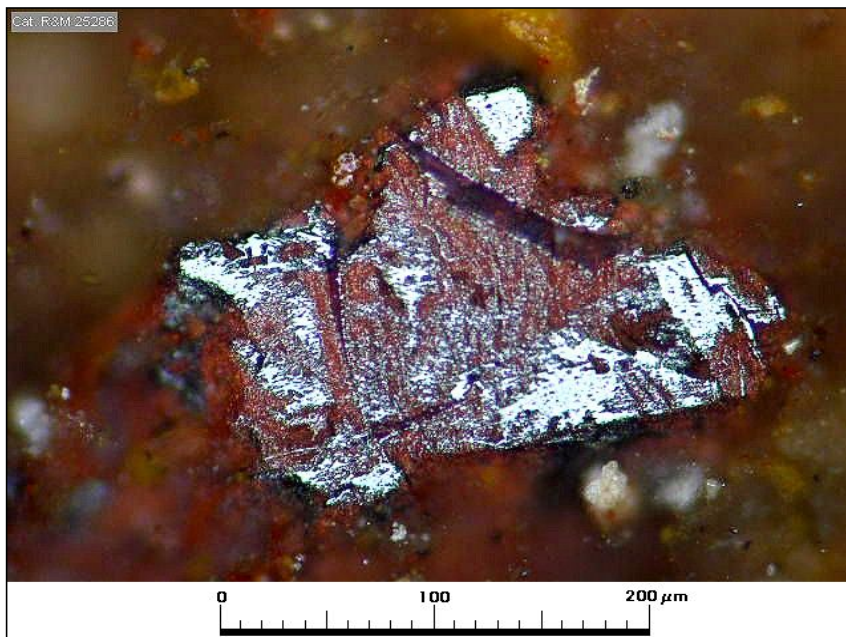
Muestra M-9: el lado izquierdo de la microfotografía corresponde a crisocola de grano fino: los cristallitos prismáticos de color más intenso corresponden a brochantita o atacamita. Aum.: 25x10; Nic. paralelos.



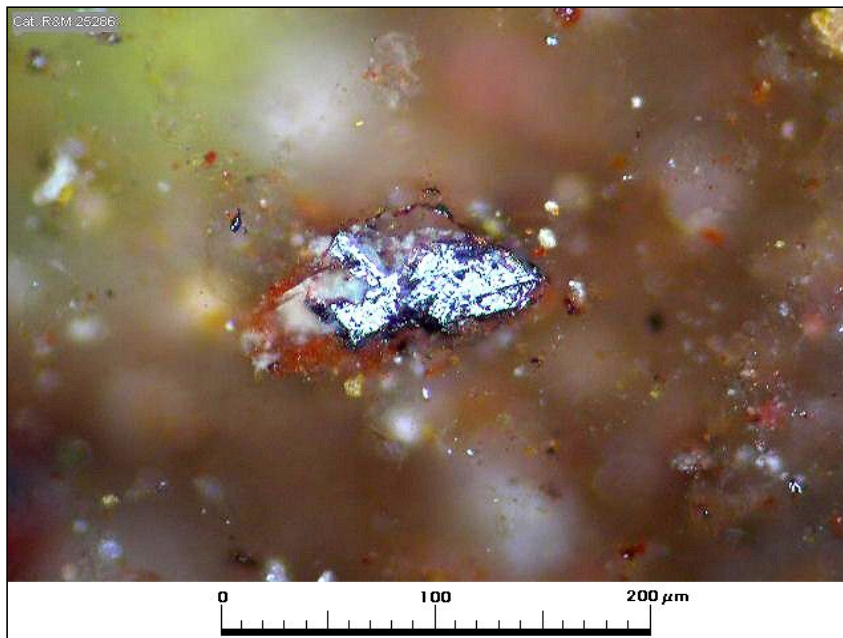
Muestra M-9: granos finos de brochantita/ atacamita diseminados; el material amorfo de color pardusco es wad. Aum.: 16x10; Nic. paralelos.



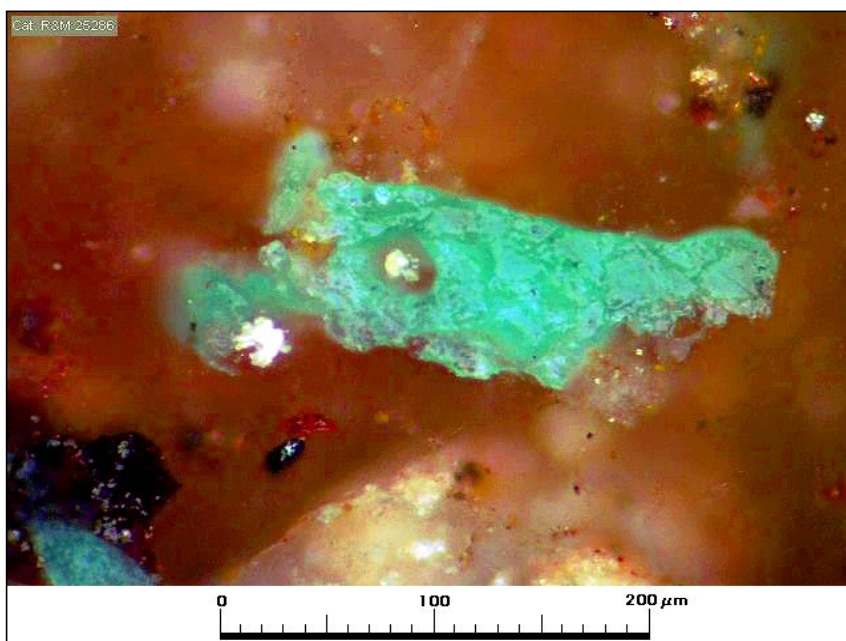
Muestra M-9: wad o material terroso, disgregable, constituido por óxidos de manganeso amorfos. Aum.: 2,5x10; Nic. paralelos.



Muestra M-9: hematita fina formada por alteración de fenocristal de ferromagnesiano. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra M-9: granos seudomorfos subhedrales de hematita (probable reemplazo de magnetita original). Aum.: 2,5x10; Nic. paralelos.



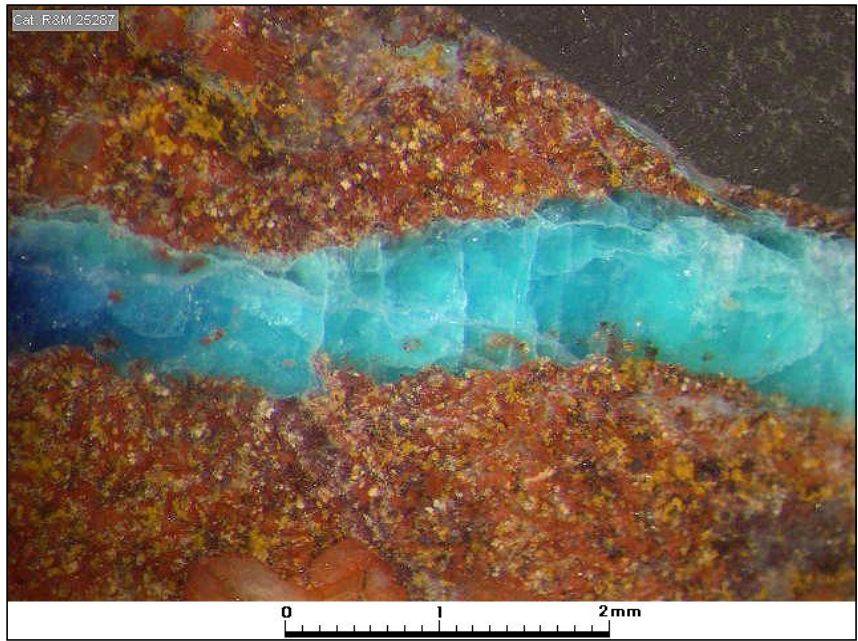
Muestra M-9: grano de malaquita en ganga teñida por limonitas. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

	Nº Muestra	M-10		
Procedencia	Coord. Norte		Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein				

Observaciones megascópicas/ microscópicas

Roca de textura volcánico-lástica, color café localmente rojizo, compuesta por fragmentos de cristales de plagioclasa, reemplazada parcial a fuertemente por hematita y montmorillonita, escasa sericita y con impregnación en forma local de calcita. La matriz es cinerítica fina, con impregnación de abundante hematita fina, localmente con escasa sericita, calcita y montmorillonita. Se advierte leve brechización (por la escala, no se advierte si se trata de un stockwork con cuarzo muy fino, minerales de cobre y arcillas finas). Uno de los trozos de roca está conformado por un agregado muy fino de cuarzo secundario hidrotermal. Se observan vetillas y agregados de crisocola de color celeste y azulada; microvetillas de brochantita/ atacamita (color verde esmeralda oscuro) y agregados locales de malaquita.

Microfotografía (aspecto general)

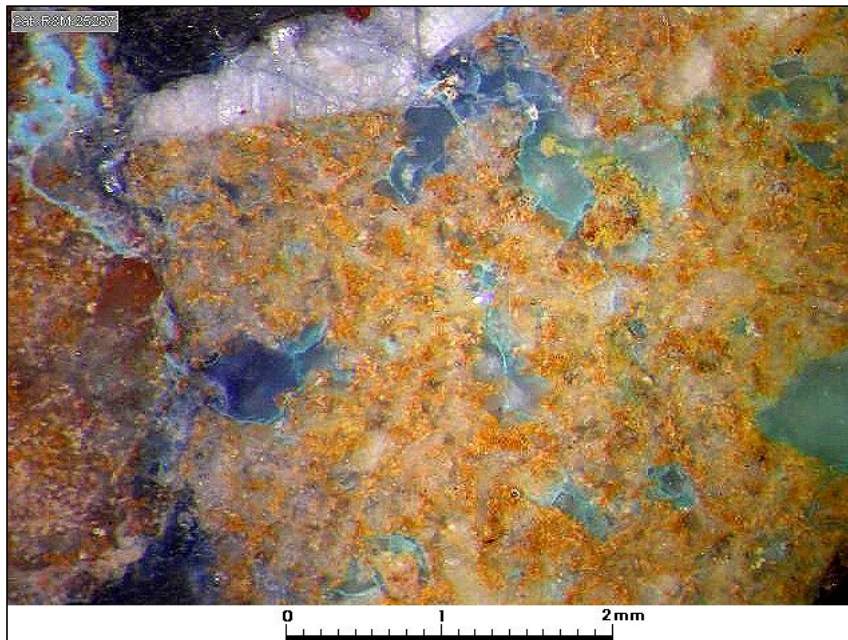


Muestra M-10: vetilla de 1 mm de espesor formada por crisocola celeste y azulada. Aum.: 2,5x10; luz natural.

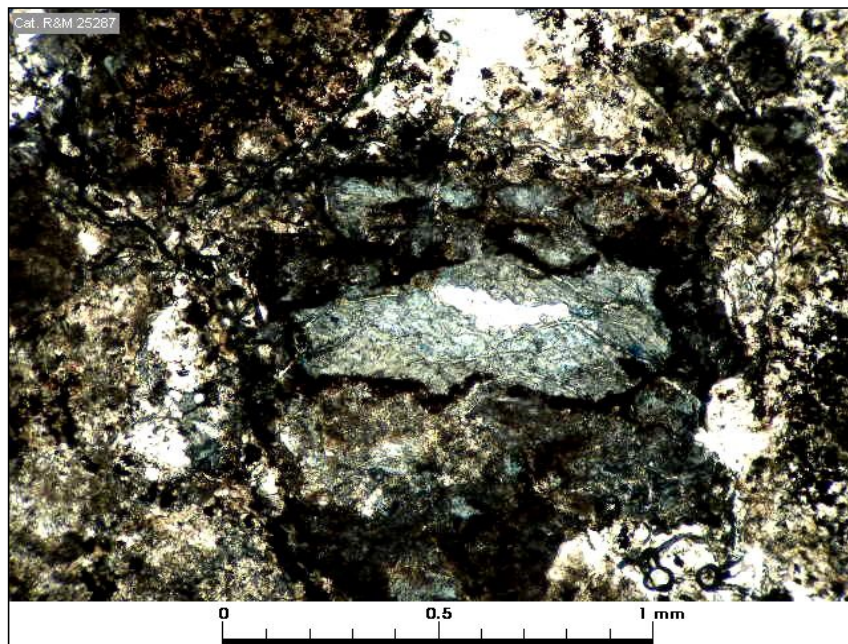
Observaciones microscópicas

Componentes minerales

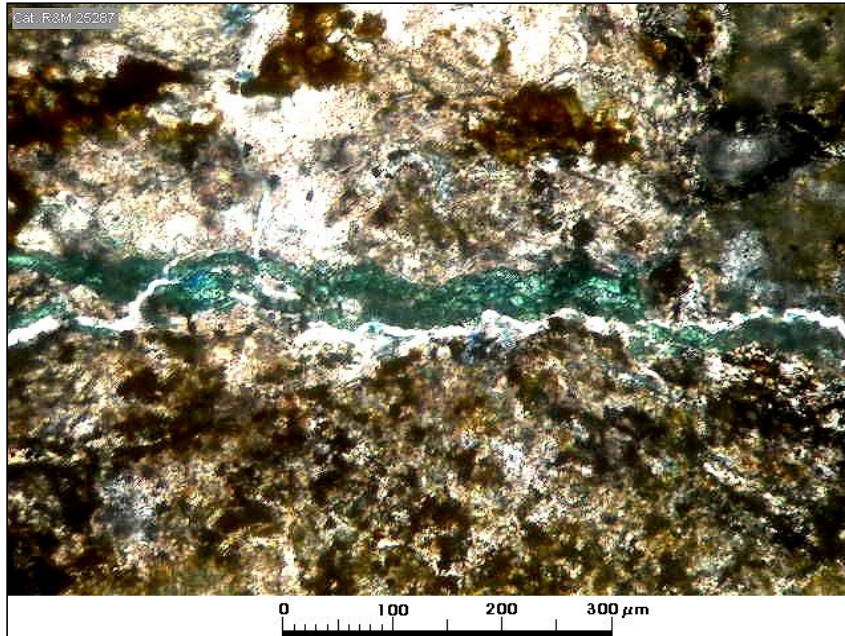
Mineral	%	Alteración	Características/ Modo de Ocurrencia
hematita	3	secundaria por reemplazo de magnetita	agregados y granos pseudomorfos producto dl reemplazo de magnetita; tamaños entre 0,03-0,35 mm; también en agregados rojos pulverulentos impregnando la matriz de la toba.
pirita	tr	sulfuro primario	granitos relictos encapsulados en cuarzo, de menos que 10 µm.
crisocola	2	producto de la oxidación/ lixiviación de sulfuros de cobre	en venillas (hasta 1 mm de espesor) y agregados de color celeste.
brochantita/ atacamita	3		en microvenillas fines (menores que 0,1 mm de espesor; color verde esmeralda oscuro).
malaquita	1,5		en agregados de cristales de anisotropía fuerte y color verde claro característico.
wad		mineral secundario de Mn	agregados irregulares de color pardusco; impregna sectores de la matriz de la toba.
limonitas goethíticas y hematíticas	1,5	hidróxidos secundarios de Fe	agregados anhedrales irregulares de hasta 0,15 mm producto de alteración de minerales ferromagnesianos; localmente entrecrecidas con hematita secundaria.



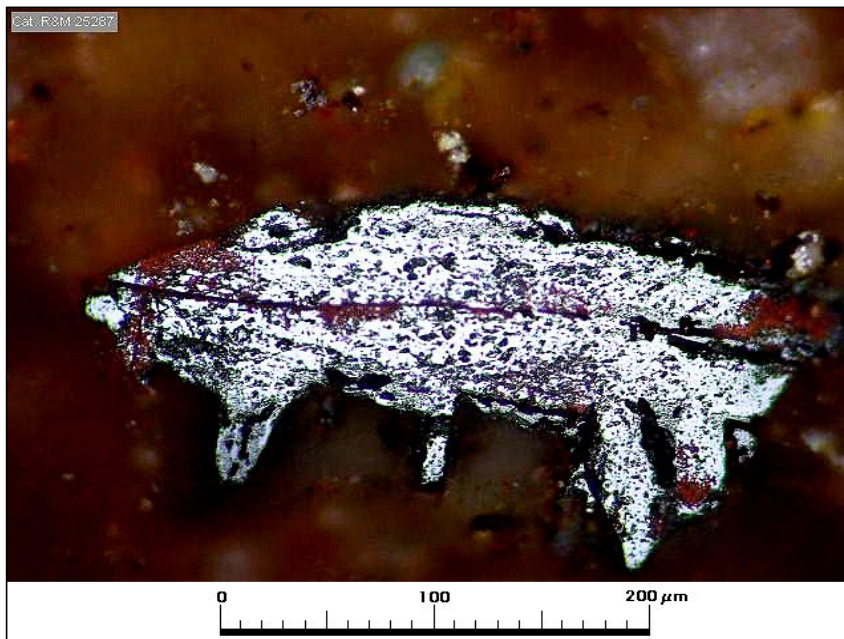
Muestra M-10: agregados de crisocola celeste y azulada impregnando la matriz de la toba. Aum.: 2,5x10; luz natural.



Muestra M-10: agregados de crisocola celeste como impregnación en la matriz de la toba (sección delgada). Aum.: 6,3x10; Nic. paralelos.



Muestra M-10: microvenilla de brochantita/ atacamita de 0,05 mm de espesor (sección delgada). Aum.: 16x10; Nic. paralelos.



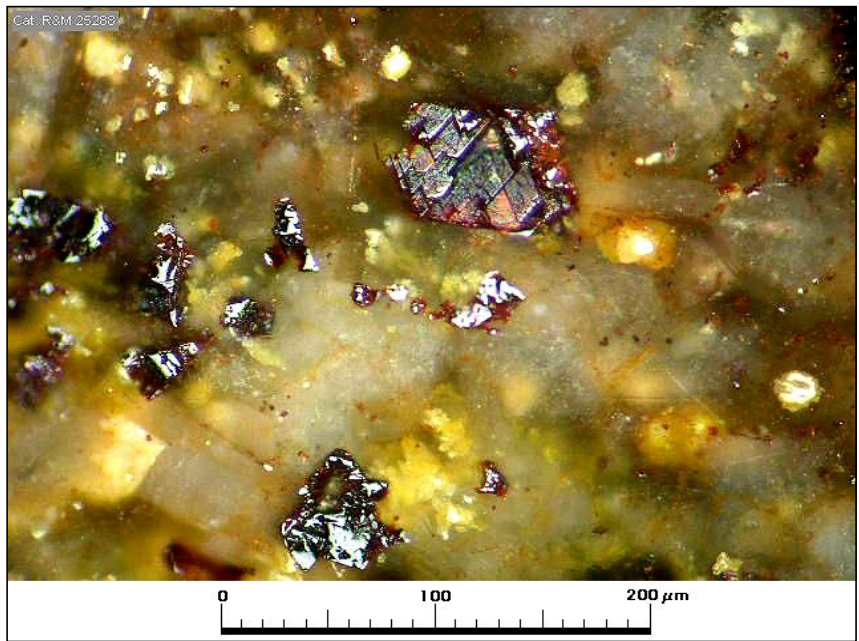
Muestra M-10: agregado de hematita de grano fino impregnando la matriz de la toba a partir de una microfractura. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

	Nº Muestra	M-11		
Procedencia	Coord. Norte		Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein				

Observaciones megascópicas/ microscópicas

Andesita de textura porfídica, color gris pardusco, localmente con tonalidades verdes y rojizas, compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 9 mm, parcial a fuertemente descalcificada y con impregnación de escasa calcita, con pseudomorfos de máficos alterados a biotita y clorita con impregnación de limonitas muy finas. La masa fundamental es intergranular, compuesta por microlitos de plagioclasa con tamaño medio de 0,2 mm, con clorita intersticial, impregnación de calcita muy fina y diseminación de hematita y magnetita localmente abundante. Los distintos fragmentos de andesita que constituyen la muestra ejercen un claro efecto sobre el imán pero al examinar la sección pulida no se encontró magnetita; solamente se observó granitos de hematita pseudomorfa según magnetita (varios tienen formas de octaedros). La susceptibilidad magnética se atribuye a posibles remanentes submicroscópicos de magnetyita en la hematita. Algunos fragmentos contienen débiles impregnaciones de crisocola y microvenillas con brochantita/ malaquita.

Microfotografía (aspecto general)

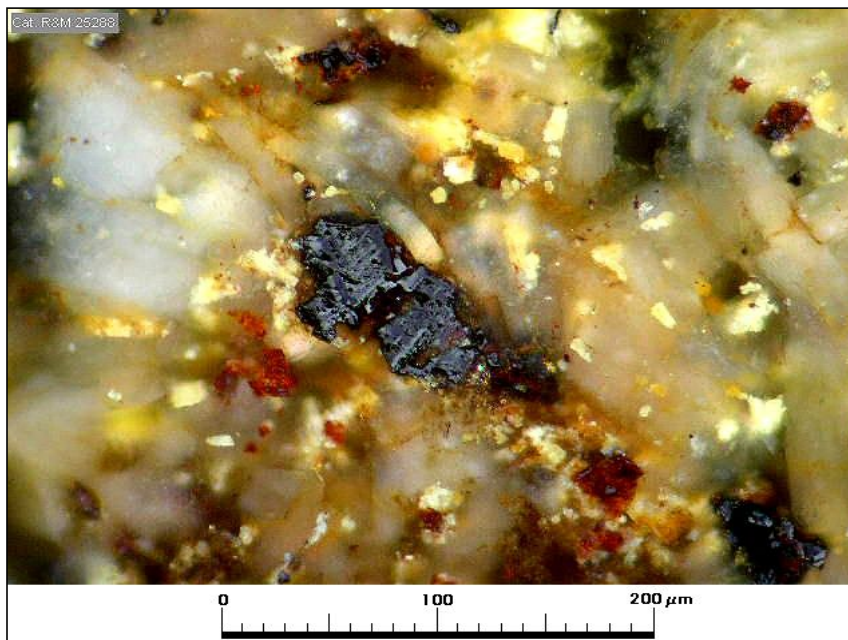


Muestra M-11: granitos de hematita pseudomorfa según magnetita; no se observó remanentes de magnetita pero se presume que la hematita debe contener microinclusiones de magnetita que producen una atracción sobre el imán. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

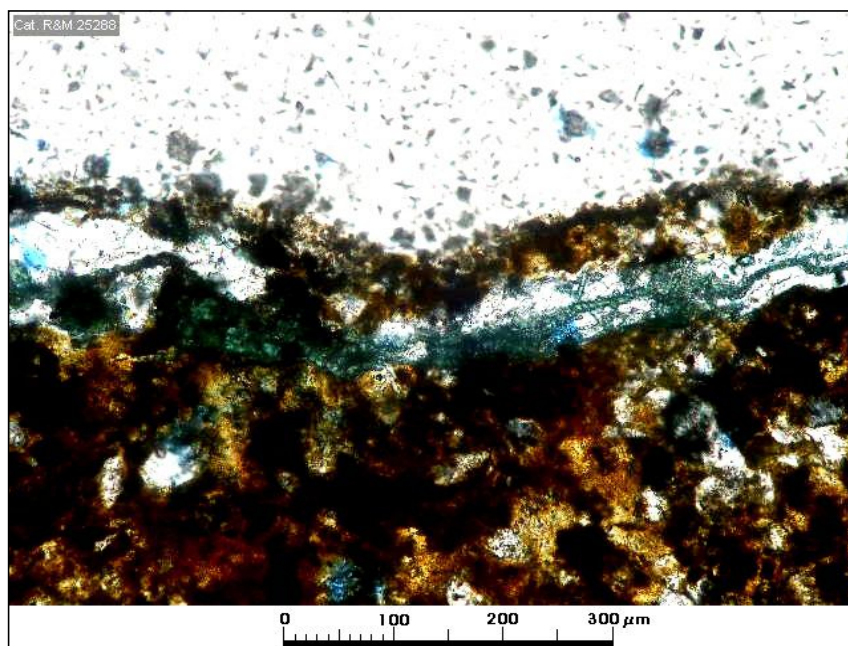
Observaciones microscópicas

Componentes minerales

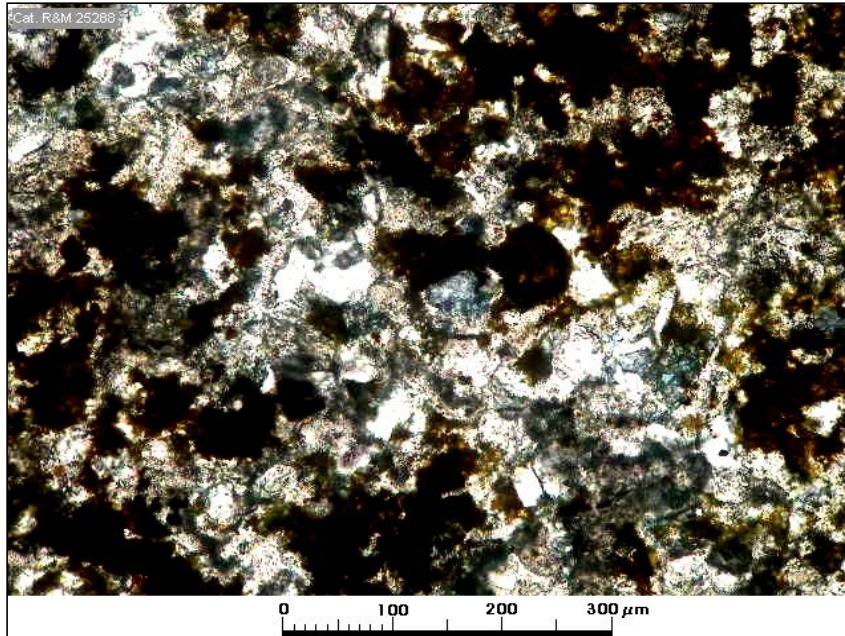
Mineral	%	Alteración	Características/ Modo de Ocurrencia
hemattita	3	reemplaza a magnetita	ocurre diseminada en granos de 0,015-0,12 mm pseudomorfos según magnetita (algunos tienen formas octaédricas); no se observó remanentes de magnetita pero se presume que deben existir microinclusiones a las cuales se debe la débil susceptibilidad magnética que muestra la roca al acercarse un imán.
malaquita/ brochantita	<0,5	formadas a partir de la oxidación/lixiviación de sulfuros primarios e cobre	se la observó en muy escasa cantidad como relleno de microvenillas muy finas (menos de 0,1 mm); el mineral mayoritario es brochantita con algo de malaquita subordinada.
crisocola	<0,5		se la observó como impregnaciones en la masa fundamental de la andesita (granos de ca. 50 μm).
oro	tr		laminilla de oro en microfractura; tiene 90 μm por 2 a 4 μm de espesor.



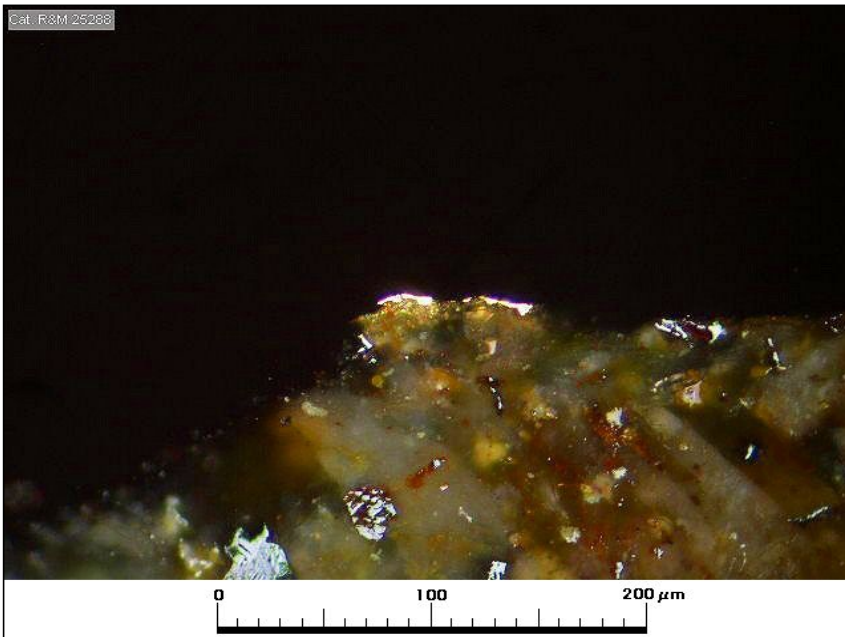
Muestra M-11: otro ejemplo de magnetita seudomorfa según magnetita. Aum.: 32x10; Nic. cruzados.



Muestra M-11: microvenilla con brochantita y posiblemente malaquita. Aum.: 16x10; Nic. paralelos.



Muestra M-11: los granitos de color celeste pálido corresponden a crisocola diseminada. Aum.: 16x10; Nic. paralelos.



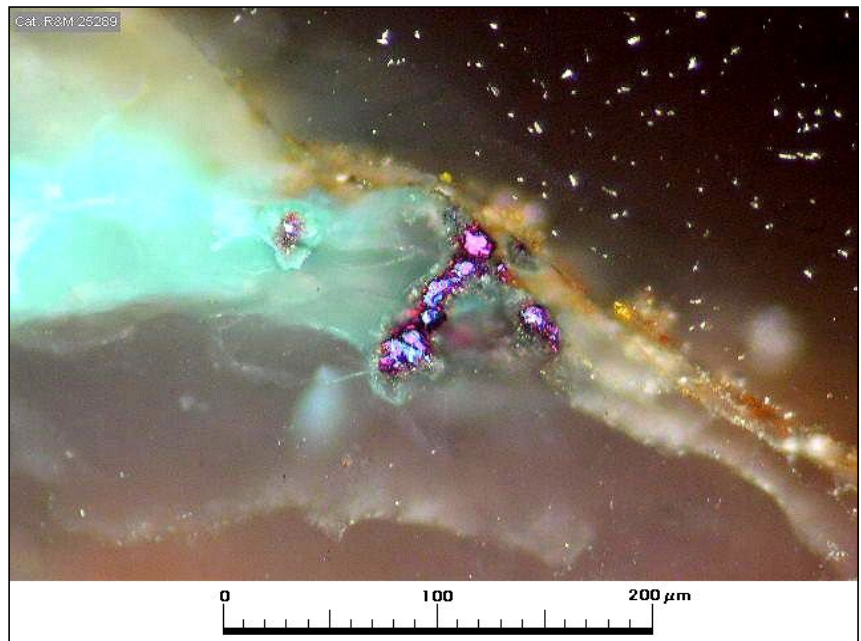
Muestra M-11: laminilla de oro de 90 μm por 2 a 4 μm de espesor en una microfractura. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

Nº Muestra		Carga 11	
Procedencia	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación (m)
Proyecto Altamira, Sector Frankenstein			

Observaciones megascópicas/ microscópicas

Toba de cristales de textura volcánico-clástica, color marrón, compuesta por fragmentos muy finos de cristales de cuarzo, muy angulosos y fragmentos de cristales de plagioclasa con impregnación de hematita y muy escasa calcita; muy escasos fragmentos líticos fuertemente limonitizados, con textura original obliterada por la fuerte alteración. La matriz es cinerítica muy fina, con desarrollo de arcillas muy finas e impregnación de hematita localmente abundante. Varios de los trozos de roca contienen agregados irregulares y vetillas de cuarzo hidrotermal, calcedonia, agregados de limonitas, crisocola y cristales de baritina. Se identificó escasos sulfuros como remanentes de calcopirita y covelina o como granos relictos. La roca corresponde a material oxidado/ lixiviado con limonitas formadas por oxidación/ lixiviación de sulfuros y posiblemente ankerita. También se identificó minerales secundarios de manganeso.

Microfotografía (aspecto general)

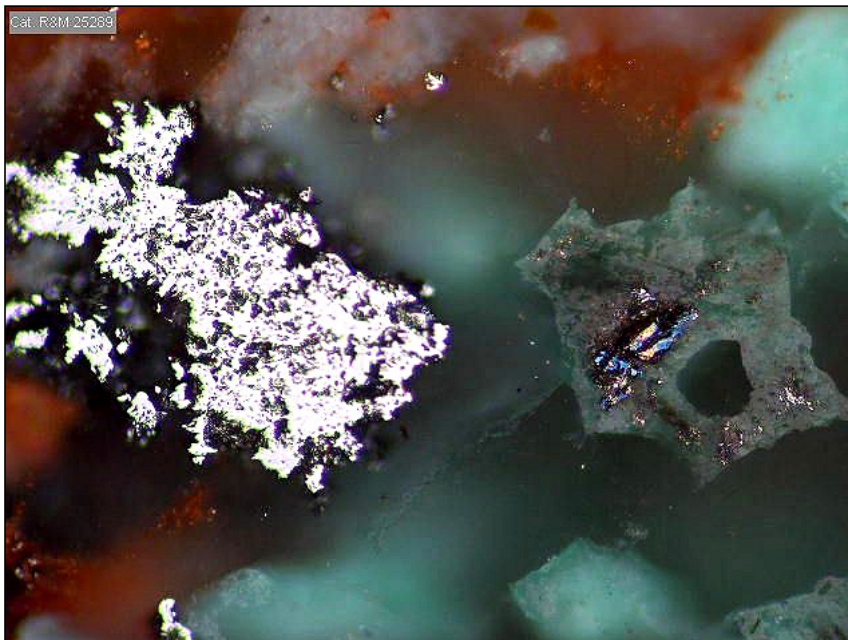


Muestra Carga 11: vetilla de cuarzo con tinciones de malaquita/ crisocola; al centro se puede observar remanentes de covelina. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.

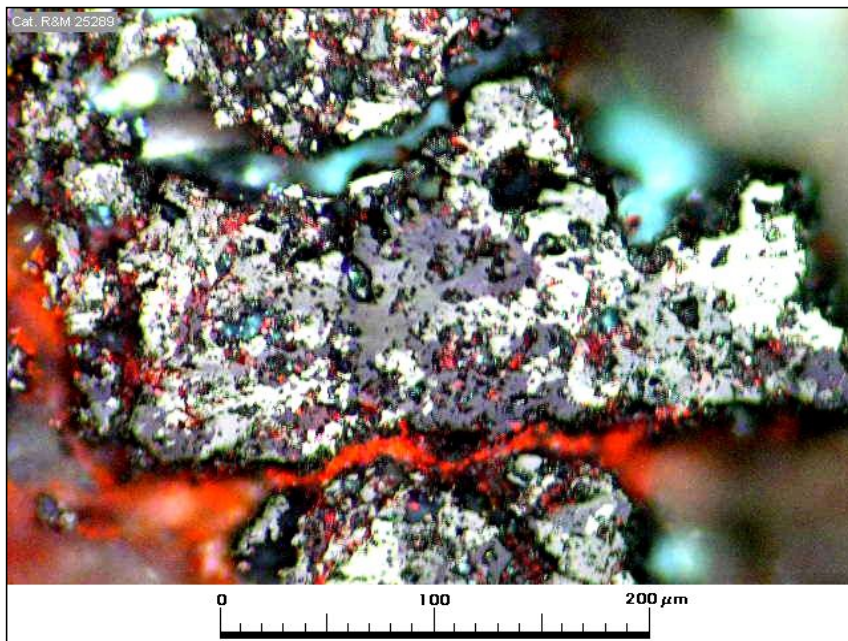
Observaciones microscópicas

Componentes minerales

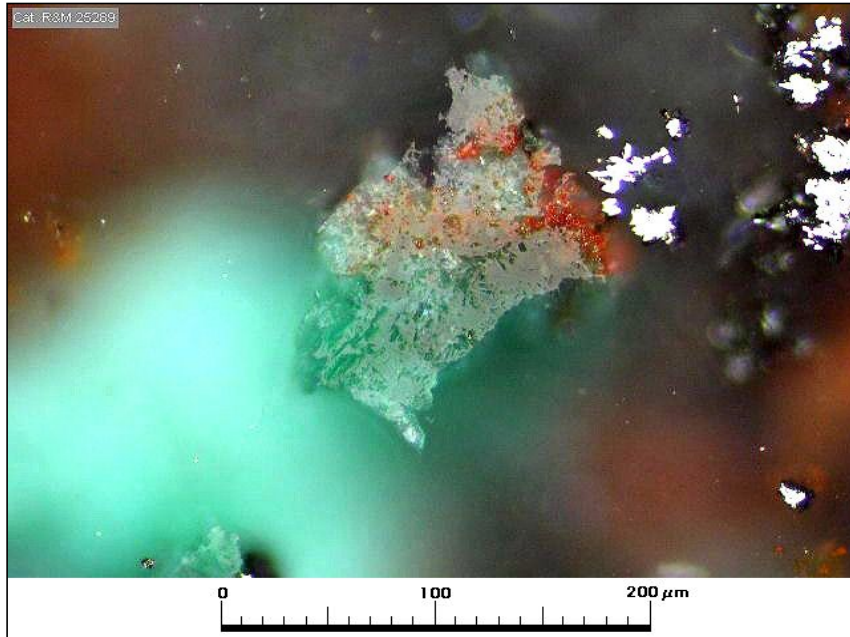
Mineral	%	Alteración	Características/ Modo de Ocurrencia
calcopirita	tr	la mayor parte probablemente se encuentra limonitizada o su oxidación/ lixiviación ha generaldo oxidos verdes secundarios	escasos remanentes de hasta 35 µm en vetillas de cuarzo con hematita y óxidos de cobre. Preservada solamnte como sulfuro relicto.
hematita	1	sin alteración	ocurre en agregados de forma irregular y con estructura interna granular; granos de hasta 0,4 mm.
covelina	tr	remanentes de mineralización primaria	escasos granitos remanentes en vetillas; preservada solamente como sulfuro relicto.
malaquita	0,5	mineral secundario de cobre	ocurren en agregados irregulares en vetillas de cuarzo y limonitas.
crisocola	0,5	mineral secundario de cobre	
limonitas	2	residuo de alterción de sulfuros y posiblemente ankerita	goethita posiblemente fomada a partir de la oxidación de ankerita; también aparece como boxworks o celdeillas residuales según pirita de hasta 50 µm; algunas contienen escasos remanentes de pirita.
psilomelano/ criptomelano/ wad	0,5	mineral secundario de Mn	en vetillas con cuarzo (0,2-0,5 mm espesor), impregnaciones en roca y en fenocristales de plagioclasa



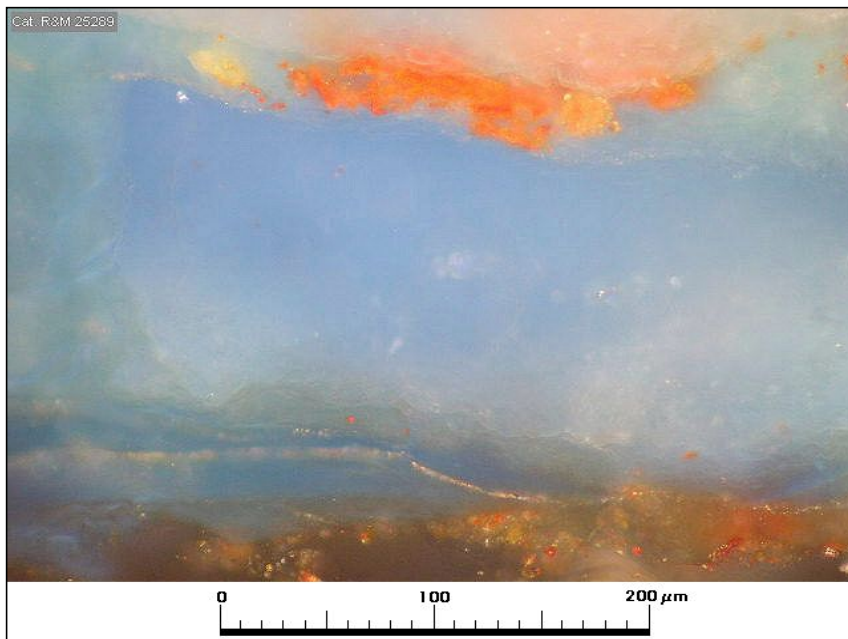
Muestra Carga 11: grano irregular de hematita en material limonítico y ganga teñida por crisocola/ malaquita; el grano de malaquita del lado derecho de la microfotografía contiene remanentes de calcopirita y covelina. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



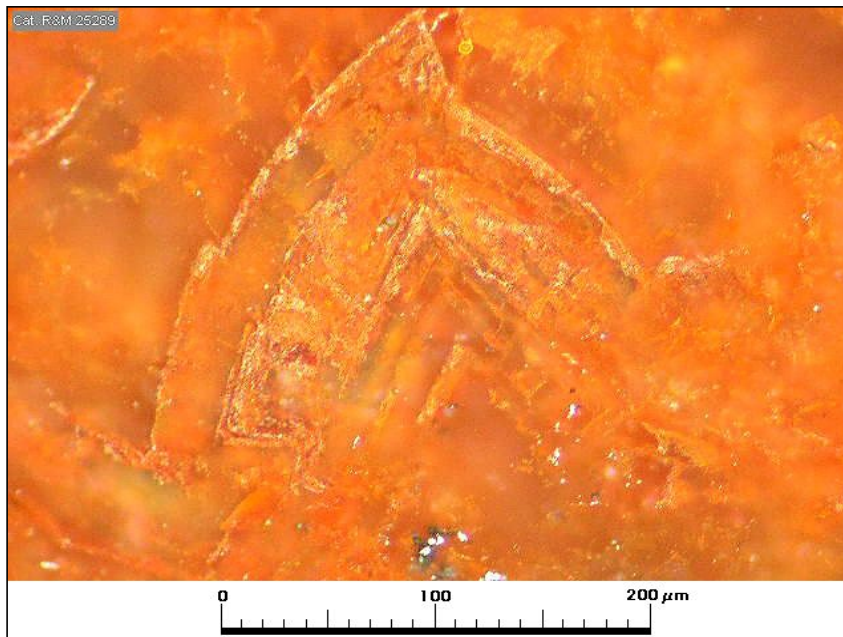
Muestra Carga 11: grano de hematita con estructura interna microgranular; obsérvese los abundantes reflejos internos rojos. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



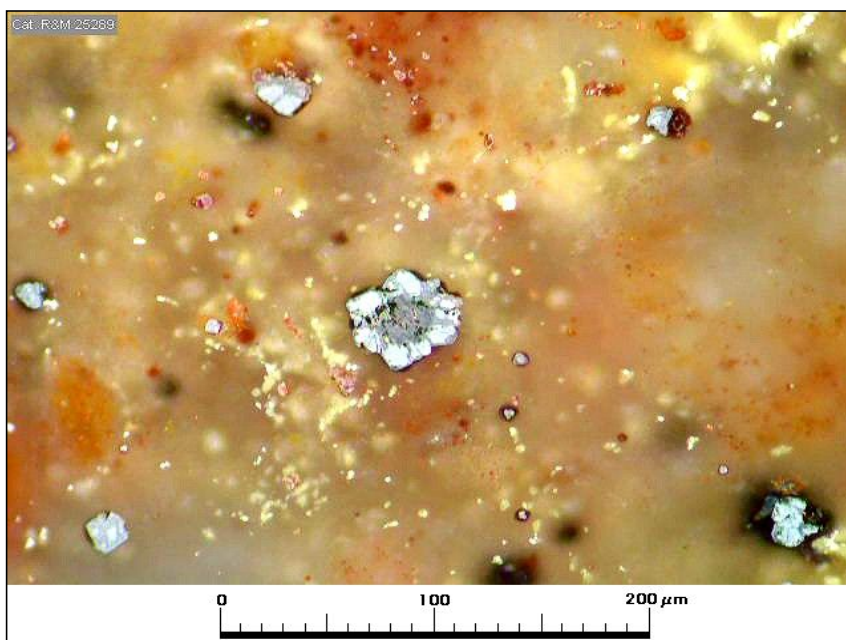
Muestra Carga 11: grano formado por un agregado de cristales de malaquita e impregnación de malaquita en ganga; el mineral blanco es hematita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



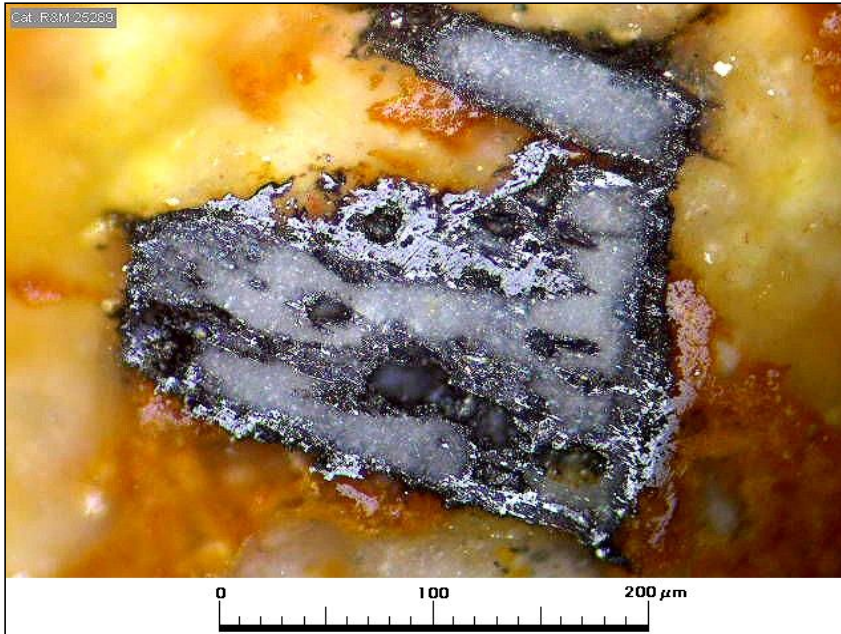
Muestra Carga 11: crisocola azul en vetilla de cuarzo junto a limonitas. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



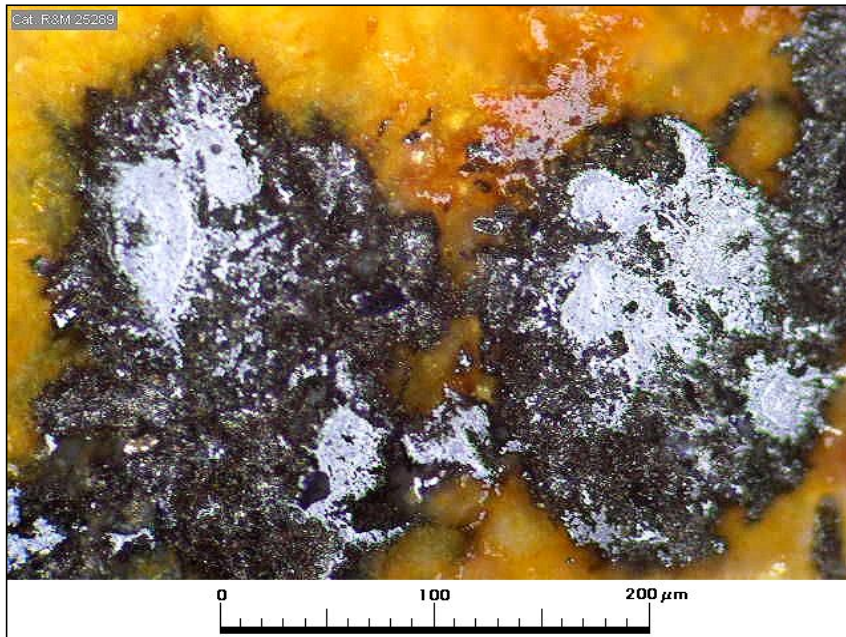
Muestra Carga 11: agregado de limonitas anaranjadas que probablemente corresponden a oxidación de ankerita (a juzgar por las estructuras preservadas). Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra Carga 11: celdillas residuales de goethita resultantes de la oxidación de pirita; algunas celdillas contienen escasos remanentes de pirita. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra Carga 11: psilomelano/ criptomelano en agregados de grano fino reemplazando parcialmente a un fenocristal de plagioclasa; obsérvese las abundantes limonitas en la matriz. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.



Muestra Carga 11: agregado de psilomelano/ criptomelano de grano fino impregnando la matriz de la toba. Aum.: 32x10; Nic. paralelos.