

ESTUDIO DE CASO: EXPLORACIÓN EN SISTEMA GRANDE DE VETAS AURÍFERAS DE BAJA SULFURACIÓN – INVESTIGACIONES DESARROLLADAS EN EL PROYECTO MINERO ANTAPITE, HUANCVELICA, PERÚ

CASE STUDY: EXPLORATION OF A LARGE LOW SULFIDATION AURIFEROUS VEIN SYSTEM – FIELD INVESTIGATIONS CARRIED OUT AT THE ANTAPITE MINING PROJECT, HUANCVELICA, PERU

ALBERTO LOBO-GUERRERO SANZ

Geólogo, M.Sc., Min.Ex., Ph.D., Vice-Presidente Operaciones, LOGEMIN S.A., ageo@logemin.com;ageo@iname.com

Bogotá, Junio, 2008

RESUMEN:

Este documento describe algunos resultados de las investigaciones desarrolladas en un sistema de vetas auríferas peruano. Presenta principios básicos que pueden ser aplicados independientemente o en conjunto para evaluar sistemas de vetas con mineralización.

Una discordancia angular entre dos cuerpos piroclásticos separa las partes mineralizadas y no-mineralizadas en las vetas. El artículo resalta la importancia de evaluar las vetas auríferas como un sistema, y no separadamente. Las características estructurales de los sistemas de vetas son predecibles. Identificar las zonas de mayor extensión dentro de los sistemas ayuda a enfocar labores de exploración.

Los perfiles de potencial espontáneo sirven para estudiar en detalle la geometría en superficie de los sistemas, y ayudan en la exploración de las zonas más ricas de las vetas. Se prueba que los perfiles de potencial espontáneo son útiles para explorar sistemas de vetas que no presentan expresión superficial clara, en ambiente seco (árido, hiper-árido) de alta montaña andina.

PALABRAS CLAVE: Antapite, exploración geofísica, exploración minera, geología estructural, oro, Perú, potencial espontáneo, rocas volcánicas, sistemas de vetas, vetas.

ABSTRACT:

This document describes results of field investigations carried out on a Peruvian gold vein system. It presents basic principles that may be applied together or on their own to evaluate mineralized vein systems.

An angular unconformity between two pyroclastic bodies also separates mineralized and non-mineralized parts in the veins. The paper shows the relevance of treating veins as a system, and not on their own. Structural characteristics of vein systems are predictable. Identification of extensional zones within the systems serves to focus exploration work.

Spontaneous potential profiles may be used to study detailed surface geometry of the vein systems, and help to explore the richest zones of the veins. The paper proves that spontaneous potential profiles are useful to explore systems that do not have clear surface expression, in dry (arid to hyper-arid) environments of the high Andean mountains.

KEYWORDS: Antapite, gold, geophysical exploration, mineral exploration, Peru, spontaneous potential, structural geology, vein system, veins, volcanic rocks.

1. INTRODUCCIÓN

La Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. es una empresa peruana. Cotiza en las bolsas de Nueva York y Lima. Durante el 2001, contrató con el suscrito investigaciones para evaluar el Proyecto Minero Antapite y ofrecer sugerencias de exploración [3, 4]. El objetivo era incrementar reservas de mineral de oro y plata en la operación minera.

Este documento resume algunos resultados de las investigaciones desarrolladas, especialmente en los campos de estratigrafía de rocas volcánicas, geología estructural y exploración geofísica por medio de perfiles de potencial espontáneo (S.P.). Está dirigido principalmente a estudiantes de geología. Presenta los principios básicos de cada campo, que pueden ser aplicados independientemente o en conjunto para evaluar sistemas de vetas con mineralización.

El Distrito minero Antapite se ubica en la parte meridional de Provincia de Huaytará, Departamento de Huancavelica, Perú. Cubre las cabecezas de ríos Ica y Grande, entre 3000 y 4500 metros de elevación sobre nivel del mar. Al proyecto se llega por 307 km de carretera pavimentada (Panamericana Lima-Ica), luego 130 km carretera destapada entre Ica y el campamento de la mina. No se conoce de ninguna actividad minera anterior a 1994. El proyecto fue descubierto por geólogos de la Compañía Minera Buenaventura S.A.A. En 1995 se iniciaron labores de exploración y túneles. Para el momento del estudio, a mediados del 2001, la mina contaba con numerosos túneles y una planta metalúrgica recién inaugurada. En 2008 la mina ha continuado expandiendo sus actividades en las vetas aquí descritas y en sistemas de vetas vecinos. Continúa siendo operada por la misma empresa.

La sumatoria de reservas más recursos disponibles en la mina, para el 2001 era de 1'000,000 toneladas, con ancho promedio las vetas equivalente a 1.5 m y 17.5 gAu/ton de tenor promedio. La producción registrada hasta el 2006 fue de 163,187 toneladas. Se produjeron 3.232 toneladas de oro por año. El costo de producción promedio fue de US\$246/oz. El tenor promedio fue de 18.75gAu/ton.

El yacimiento presenta zonas de bonanza, con doscientos o trescientos gramos de oro por tonelada. En algunas porciones más ricas, el contenido aurífero supera los dos mil gramos de oro por tonelada. Dichas zonas de bonanza generalmente están asociadas con arcilla negra en las vetas, y con escaso cuarzo.

La geología general del distrito Antapite está conformada por rocas volcánicas que cortan sedimentos y plutones Mesozóicos. Hay varios grandes sistemas de vetas con mineralización hidrotermal de baja sulfuración. Este artículo describe sólo uno de ellos. Los sistemas de vetas están alojados en piroclastos y rocas volcánicas del Eoceno a Oligoceno, con un espesor mayor a 1000 m. Las intrusiones y vetas están controladas por fracturas principales de carácter regional.

En parte la mineralización aurífera se asocia con cuarzo, adularia, sericita y pirita. Se observa una relación Au:Ag de entre 1:1 a 1:2. La mineralización presenta una débil alteración hidrotermal, restringida a corta distancia de las vetas. En general, se presenta un halo de cuarzo-sericita con adularia de menos de un metro de ancho. El oro se halla en una etapa tardía de las vetas de cuarzo, como oro nativo o eléctrum, y en las zonas más ricas está asociado a arcillas con sulfuros y/o a cuarzo.

2. FORMACIONES MACHUCANCHA Y MAMAHUANGA Y SU RELACIÓN CON MINERALIZACIÓN EN EL SISTEMA DE VETAS ZORRO ROJO

La litología es semejante en las Formaciones MachucanCHA y Mamahuanga. Ambas unidades son piroclásticas, y presentan numerosas variaciones faciales. La única diferencia importante es la presencia de epidota en la Fm. Mamahuanga. Dicho mineral, que muestra un color verde pistacho característico, está presente en clastos de diversos tamaños, y no como alteración posterior al emplazamiento del material piroclástico. Se observaron evidencias de campo de una discordancia paraconforme entre las dos unidades (Figura 1). Entre las dos hubo erosión, y se encuentran algunos depósitos de oleada piroclástica.

Tanto el contenido de epidota en la unidad superior, como el color verde de su matriz tuvieron origen antes de la depositación. Observaciones detalladas indican que la epidota solo aparece en clastos de material fuertemente epidotizado. La siguiente es la mejor alternativa para la posible historia geológica de la zona: 1) El edificio volcánico Mamahuanga fue sometido a intensa alteración propilítica – allí se formó la epidota. 2) Una violenta explosión hidrotermal fracturó el macizo y envió todo el material del edificio volcánico por los aires. Ese material compuesto por bloques, bombas, lapilli y ceniza fue transportado para conformar depósitos de caída y de oleada piroclástica. 3) Los depósitos piroclásticos con abundante epidota se consolidaron para conformar la Formación Mamahuanga (Figura 1).

En el campo se aprecia que la Fm. Mamahuanga fosiliza la porción mineralizada de la Veta Zorro Rojo. Hay eventos de reactivación en la veta, posteriores a la mineralización aurífera (Figura 1). En estos se depositó cuarzo a lo largo del mismo alineamiento de la veta, pero alojados en piroclastos de la Fm. Mamahuanga. Las manifestaciones superficiales de la Veta Zorro Rojo en esa unidad, no están relacionadas con la mineralización aurífera de la misma veta en profundidad. Esto se ilustra de manera simplificada en la Figura 1.

Por las razones descritas, la discordancia entre las formaciones MachucanCHA y Mamahuanga tiene importantes implicaciones económicas para exploración en vetas del distrito minero de Antapite. Algunas vetas alojadas en la Fm. Mamahuanga no presentan cantidades económicas de oro. Puede que debajo de la discordancia, en la Fm. MachucanCHA o en rocas que infrayacen dicha unidad, las mismas vetas muestren contenidos más atractivos de metales preciosos (Figuras 1 y 2).

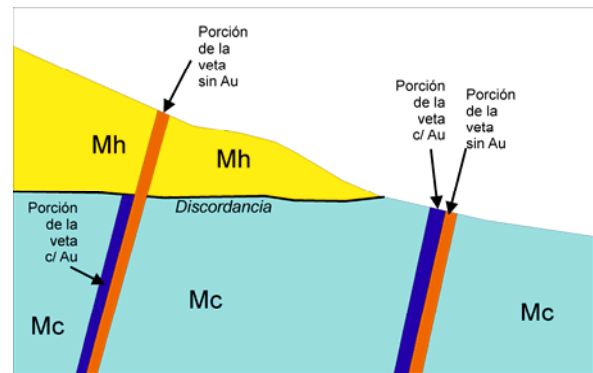


Figura 1. Esquema que ilustra la relación entre las Formaciones MachucanCHA (Mc) y Mamahuanga (Mh), así como la composición generalizada de las vetas en la región de Antapite, Huancavelica. Se aprecia una discordancia angular entre las dos unidades. Las vetas se componen de dos partes: Una temprana, con mineralización aurífera, aquí ilustrada en color azul. Otra tardía, con mucho menos oro, ilustrada en color naranja. El período erosivo entre las Formaciones MachucanCHA y Mamahuanga, se presentó luego del evento de mineralización de las vetas. Encima se depositó la Formación Mamahuanga, y luego se presentó el segundo evento de emplazamiento de cuarzo sin oro en las vetas.

Figure 1. Cartoon to illustrate relationships between MachucanCHA (Mc) and Mamahuanga (Mh) Formations, as well as the generalized composition of the veins in the Antapite region, Huancavelica. An angular unconformity exists between the two units. Veins are made of two main parts: The early phase, containing gold mineralization, is shown here in blue. The late phase, bearing much less gold, shown in orange. Erosion between the MachucanCHA and Mamahuanga Formations took place after the mineralizing event of the veins. The Mamahuanga Formation was deposited, and that was then followed by the second stage of gold-less quartz deposition in the veins.

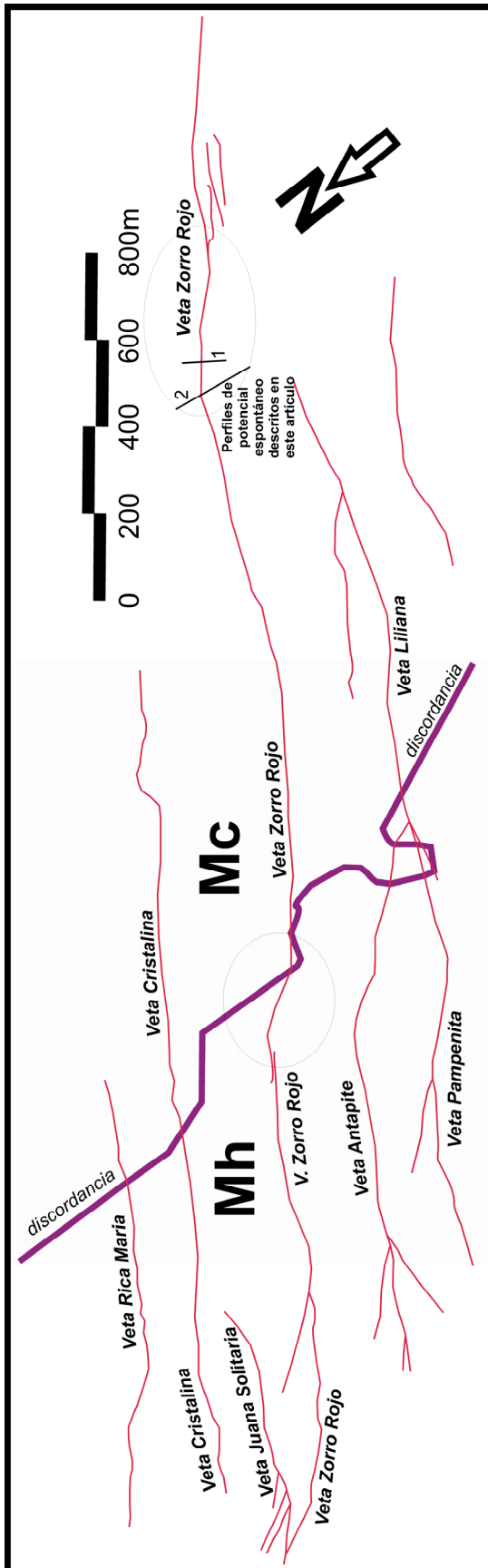


Figura 2. Mapa simplificado de las principales vetas del sistema de vetas auríferas, Mina Antapite, Huancavelica, Perú [3,4]. Nótese las similitudes con la Figura 3. El sistema de vetas tiene 3600 metros de largo y 1000 metros de ancho. En morado se indica la posición de la discordancia entre las formaciones Machucancha y Mamahuanga. Hay dos óvalos dibujados sobre la Veta Zorro Rojo. Allí se encuentran las zonas más ricas de la mina. Están ubicadas precisamente en duplexas de cizalla. Son quiebres de la estructura, donde se presentó mayor extensión. La zona occidental se encuentra por debajo de la discordancia. En la figura se aprecian otras duplexas de cizalla, pero al momento de hacer la investigación, éstas no habían sido exploradas en detalle. El sistema de vetas debe tratarse como un todo, y no cada veta de manera independiente. Faltan numerosas vetas del sistema que no afloran, y que fueron descubiertas después.

Figure 2. Simplified map of the main veins in the gold-bearing vein system of the Antapite Mine, in Huancavelica, Peru [4]. Note similarity with Figure 3. The vein system is 3600 meters long and 1000 meters wide. The purple line depicts the unconformity between the Machucancha and Mamahuanga Formations. Two ovals drawn over the Zorro Rojo Vein indicate the mine's richest zones. These are located precisely on strike-slip duplexes. They are the breaks on the fault, where a larger amount of extension took place. The western portion of the fault system lies under the unconformity. The figure shows other strike-slip duplexes, but these had not been explored in detail at the time of field investigation. Vein systems must be treated as a whole, and not each vein independently. Numerous veins of the system are missing; they don't outcrop and were discovered later.

3. AMBIENTE ESTRUCTURAL, REGIÓN DE VETA ZORRO ROJO Y OTRAS VETAS

La Figura 2 muestra un mapa simplificado del principal sistema de vetas del proyecto Antapite. Allí se aprecia la geometría que se ve en superficie para las vetas con mayor contenido de cuarzo, que afloran como crestos, "costurones" o "cicatrices". Estas estructuras son claramente observables por su resistencia a la erosión que contrasta con aquella de la roca encajante. El mapa de la Figura 2 fue preparado por el personal de la mina, y reinterpretado con las observaciones de campo del autor [3,4].

Nótese la correspondencia tan buena que hay entre los modelos teóricos de sistemas de vetas y lo observado en el principal sistema de vetas de Antapite (Figuras 2 y 3). Todo el sistema de vetas tiene un origen común, y debe explorarse conjuntamente.

Al buscar los elipsoides de esfuerzos (Figura 3) que coinciden con fracturas y fallas cartografiadas, se encontraron muchos sistemas de cizalla. Las zonas más ricas de los sistemas de vetas en la región de Antapite eran duplexas de cizalla (óvalos en la Figura 2).

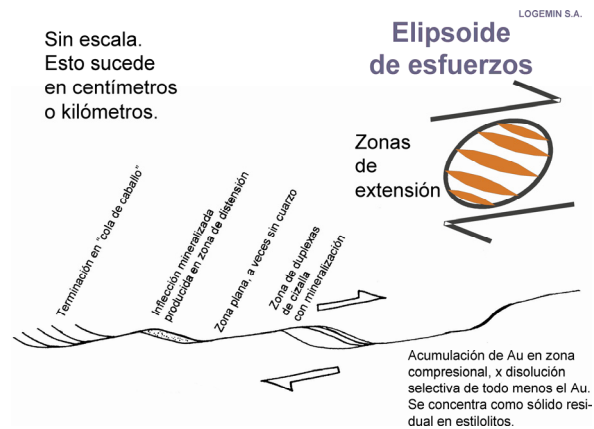


Figura 3. Manera en que se presenta mineralización en un sistema de vetas producido por cizalla. Donde la veta sufre flexiones, se pueden presentar ambientes favorables para la mineralización. Se forman duplexas de cizalla, como muestra la porción central de la figura. Eso corresponde a las zonas de mayor distensión del elipsoide de esfuerzos, ilustrado en el recuadro. En líneas generales, las zonas con mayor extensión dentro de un sistema de vetas tienden a ser las más ricas. Estas presentan vetas de mayor espesor, y mayor contenido de metales económicos.

Figure 3. Way in which mineralization occurs in a vein system produced by shear. Favorable environments for mineralization occur where the vein shows inflections. Shear zone duplexes form, as shown in the central part of the figure. That reflects zones of greater extension within the strain ellipsoid, that is shown in the upper right. In general terms, zones with greater extension within a vein system tend to be richer. These show veins of greater width, and higher content of economic metals.

Como sucede en la mayoría de los sistemas de vetas en el mundo, si se explora en las fracturas que corresponden con zonas de mayor extensión, se encuentran vetas mucho más ricas, más gruesas, y/o mayor número de vetas mineralizadas por metro cuadrado.

4. MEDIDAS S.P. PARA EXPLORACIÓN DE VETAS, REGIÓN DE ANTAPITE

Bajo tierra se aprecian numerosas vetillas delgadas de arcilla, sin cuarzo, que contienen oro. La mayor parte de los panisos (zonas de arcilla en una veta) de la Veta Zorro Rojo y sus estructuras satélite contienen algo de pirita y otros sulfuros. Buena parte de las rocas encajantes tienen alteración hidrotermal con algo de pirita diseminada, a corta distancia de las vetas mismas. Es difícil seguir en superficie algunas de esas vetas de arcilla con sulfuros y metales preciosos. Como no forman crestones, son difíciles de seguir y muestrear por medio de trincheras.

Otra observación importante tiene que ver con las condiciones climáticas del proyecto Antapite. La región es sumamente seca durante el año. El mes de julio no tiene lluvia alguna. Hay escasa vegetación de gramíneas y espinosas. El suelo no se encuentra muy húmedo aún en las zonas más vegetadas.

Una parte de los sulfuros presentes en las estructuras del subsuelo (en vetas, cuerpos o diseminaciones) se oxidan naturalmente y producen corrientes medibles. Esto sucede especialmente con la pirita, calcopirita, arsenopirita y bornita, entre otros minerales. Sin embargo, algunos sulfuros como esfalerita y galena no se oxidan tan rápidamente en las condiciones cercanas a la superficie. Colocando electrodos en el suelo, se puede medir el potencial generado por oxidación natural de los sulfuros [1, 2, 5, 6, y 7]. La Figura 4 ilustra una manera de colocar los electrodos para medir perfiles. Es preciso emplear electrodos no-polarizables [1, 3, y 4] debido a que las corrientes producidas por un electrodo metálico (varilla de acero, cobre o aluminio) enterrado en el suelo son mayores que los valores naturales a medir. Ver mayores detalles sobre el método en [1, 2, 3, 5, 6, y 7].

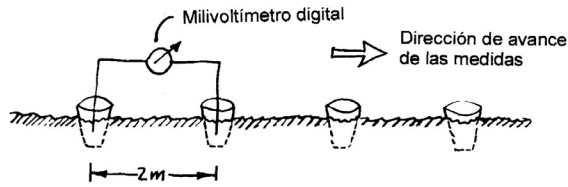


Figura 4. Una manera de colocar los electrodos no polarizables en el suelo, para medir perfiles de potencial espontáneo. El aparato de medida se coloca entre dos electrodos (primero y segundo de la figura), y luego del tiempo de estabilización, se mide el voltaje. Enseguida se conecta el aparato entre los electrodos segundo y tercero, para continuar midiendo. Para ahorrar tiempo de conexión es aconsejable pasar el cable del primer electrodo al tercero, dejando el del segundo electrodo en su lugar. En el siguiente desplazamiento se moverá el cable del segundo electrodo hasta el cuarto electrodo. Así se procede hasta completar el perfil. Debe experimentarse para definir el espaciado ideal entre electrodos, para explorar el tipo de yacimiento que se busca. Menor espaciado va a registrar mayor detalle, pero tomará más tiempo.

Figure 4. One of the ways to place non-polarizable electrodes on the ground, to measure spontaneous potential profiles. The measuring device is placed between two electrodes (first and second on Figure 1), and then, after the time of stabilization, voltage is recorded. The device is next connected between the second and third electrodes, to proceed with measurements. To save connection time, it is advisable to move the cable from the first electrode to the third, leaving the second electrode in its place. The cable connected to the second electrode should be next moved to the the fourth electrode. That method should be used until completion of the profile. Ideal electrode spacing should be established after testing, in order to detect the target sought. A profile with shorter spacing will provide greater detail, but will take more time.

Durante el trabajo de campo en la región de Antapite, el suscrito tuvo que improvisar aparatos para medir perfiles de potencial espontáneo [3, 4]. Los problemas logísticos impidieron que pudiera conseguir aparatos geofísicos más sofisticados.

Todo el equipo se obtuvo en la mina: Los electrodos eran crisoles crudos de cerámica porosa; se pidieron prestados un multímetro y cables a los electricistas; el sulfato de cobre se consiguió en el laboratorio químico de de la mina [4].

Con el fin de conocer la respuesta de los perfiles de potencial espontáneo en las condiciones particulares del proyecto Antapite, fue preciso ensayar muchas cosas. Debido a la sequedad del suelo, se hicieron numerosos experimentos para adecuar la técnica: medir con diversos espaciamientos de electrodos (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, y 3.0 m), medir en seco, humedeciendo alrededor de electrodos, intercambiando electrodos, manteniendo electrodos fijos, etc.. Más adelante se probaron electrodos en diferentes terrenos y pendientes; luego en varios tipos de suelos, vegetación y rocas. Todos los resultados de los experimentos se estudiaron en detalle, para optimizar la manera de medir los perfiles de potencial espontáneo y detectar las vetas mineralizadas en las condiciones del yacimiento y de clima reinante.

El primer perfil se orientó perpendicular a la Veta Zorro Rojo, entre dos trincheras, y cerca de una chimenea. Era una zona bien conocida. La Figura 5 ilustra la situación de campo. Se espaciaron estaciones cada dos pasos, se alineó y niveló con brújula para obtener un perfil topográfico. Más adelante, se midió precisamente la distancia entre estaciones, usando brújula y decámetro. Los datos principales se muestran en la Tabla 1.

El perfil resultante se muestra en las Figuras 5 y 7. Allí se aprecia la anomalía de corriente producida por la Veta Zorro Rojo. Se muestra también la ubicación de la trinchera. A unos treinta metros de distancia se halló una nueva veta con sulfuros, que era completamente desconocida. Las características eléctricas de la nueva veta eran similares a las de la primera. Sin embargo, el contenido de cuarzo en la nueva veta era muy bajo, y esta no presentaba una anomalía geomorfológica fácil de identificar. *A posteriori* se observó que el perfil topográfico presentaba un pequeño quiebre (Figura 5). Pero no mostraba un crestón de cuarzo como la otra veta.

Para comprobar los resultados del primer perfil de potencial espontáneo, se programó un segundo perfil, en la ubicación indicada en la Figura 6.

En el segundo perfil se halló nuevamente la veta conocida, y también se verificó la presencia de la

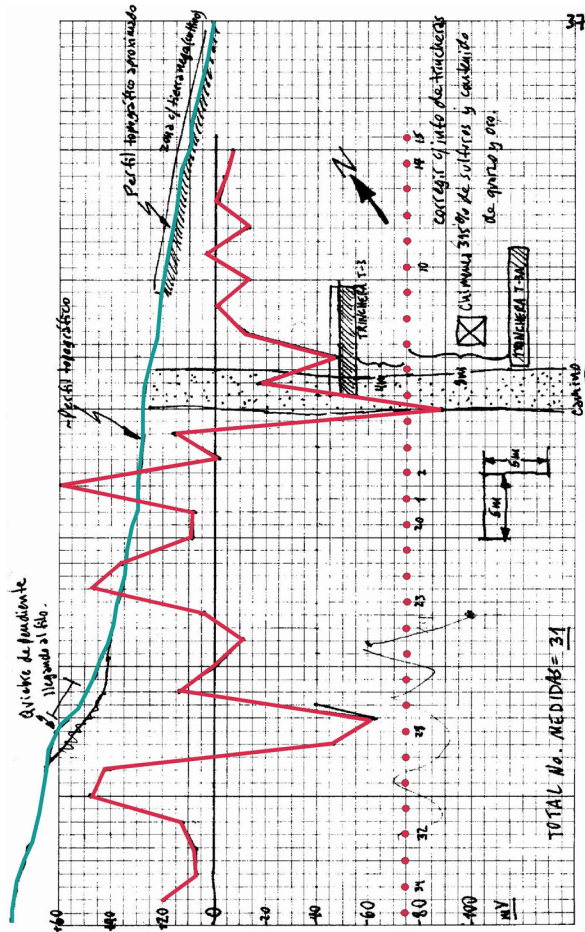


Figura 5. Notas de campo que registran el avance del Perfil de potencial espontáneo No. 1. Los puntos rojos indican las estaciones donde se enterraron los electrodos. Nótese la ubicación de dos trincheras y una chimenea de la mina. El camino que corre sobre la veta, se marcó con punteado. El perfil se orientó de manera perpendicular a la veta conocida. La topografía se indicó con la línea azul. La línea roja se usó para dibujar los valores de potencial en el terreno.

Figure 5. Portion of field notes showing how Profile 1 was recorded. Red points show field location of electrodes. Note location of two trenches and a mine vertical ventilation tunnel. A road runs parallel to the vein, and is marked with dots. The profile was located along a perpendicular line to the known vein. Topography is shown by the blue line. The red line was used to plot potential values in the field.

segunda veta. La separación entre las dos vetas era igual (aproximadamente 34 metros). Como dato curioso, se indica que en la explotación subterránea ocasionalmente se perforaba a lado y lado de la Veta Zorro Rojo con un taladro de una

Tabla 1. Porción de medidas de potencial espontáneo a lo largo del Perfil 1. Ver también las Figuras 5 y 7 donde se grafica el Perfil 1. La segunda columna “Distancia hasta” indica el punto de inicio de la estación. “medio”, el punto donde se grafica la medida. La columna “valor” es la corriente medida directamente en el terreno. La columna “suma” es la sumatoria progresiva de cada uno de los voltajes medidos. Se usa como herramienta de interpretación (Ver Figura 7). La última columna registra la altura arbitraria, teniendo como cero a la primera estación. Ver anomalía entre estaciones 7-8 y 8-9.

Table 1. Portion of spontaneous potential measurements along Profile 1. See also Figures 5 and 7, that show Profile 1. The second column “Distancia hasta” indicates the location of the station. “medio”, shows the point where the measurement is plotted. The “valor” column lists field current measurements. The “suma” column is the progressive summatory of each measured voltage. It is used as a tool for interpretation (See Figure 7). The last column registers arbitrary elevation, starting on the first station. Note anomaly between stations 7-8 and 8-9.

No.	Distancia (m)		Voltaje (mV)		Cota (m)
	hasta	Medio	Valor	suma	
1	0.00	0.00	n.d.	n.d.	0.00
2	2.14	1.07	18.58	18.58	-0.59
3	4.73	3.44	7.00	25.58	-1.20
4	7.22	5.98	7.70	33.28	-1.68
5	9.56	8.39	10.30	43.58	-2.10
6	11.72	10.64	47.25	90.83	-2.63
7	14.09	12.90	40.50	131.33	-3.64
8	16.20	15.14	-45.50	85.83	-4.55
9	18.66	17.43	-62.50	23.33	-5.33
10	21.31	19.99	14.00	37.33	-6.04
11	23.86	22.58	-1.80	35.53	-7.03
12	26.53	25.20	-10.20	25.33	-7.61
13	29.06	27.80	4.60	29.93	-8.40
14	31.61	30.33	45.80	75.73	-8.88
15	34.39	33.00	35.00	110.73	-9.60
16	36.49	35.44	8.70	119.43	-10.07

pulgada, para explorar por otras vetas. Dichas perforaciones tenían 25 metros de largo, y nunca identificaron la nueva veta que se descubrió con los perfiles de potencial espontáneo.

Durante el trabajo de campo se entrenaron 2 operarios para medir perfiles S.P., y se construyó equipo para 3 comisiones completas. También se escribió un manual de uso para explorar en la zona con perfiles de potencial espontáneo.

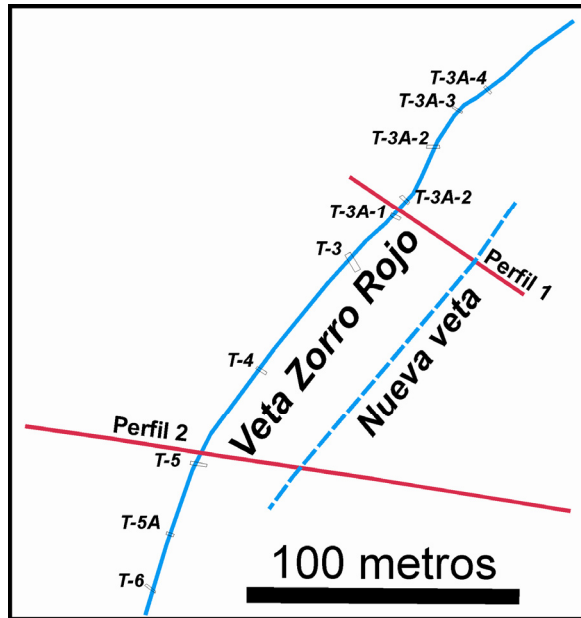


Figura 6. Mapa simplificado con ubicación de Perfiles de potencial espontáneo 1 y 2. Estos se ubicaron de manera perpendicular a la Veta Zorro Rojo. Comparar con la Figura 5. Los pequeños rectángulos son trincheras excavadas para muestrear la veta. El Perfil 1 se ubica entre dos trincheras, mientras que el Perfil 2 está al lado de otra trinchera. La veta descubierta, que se halla a 34 metros de distancia de la veta conocida, se ilustra con una línea azul discontinua.

Figure 6. Simplified map that shows location of spontaneous potential Profiles 1 and 2 (red lines). These were located at a high angle from Zorro Rojo Vein (blue line). Compare with Figure 5. Small rectangles show trenches excavated to sample the vein. Profile 1 was located between two trenches, whereas Profile 2 lies beside another trench. The newly discovered vein lies 34 meters away from the known vein, and is shown by the broken blue line.

Por falta de espacio, acá no se van a presentar mayores detalles del proceso de exploración con perfiles de potencial espontáneo. Sin embargo, el método geofísico resultó exitoso.

Esto sirve de ejemplo para indicar que con herramientas sencillas se pueden lograr resultados de exploración muy significativos. Lo más importante es la interpretación, y usar las herramientas con sentido geológico. Es necesario buscar intersectar las estructuras potenciales al mayor ángulo posible. Así la interpretación resulta más sen-

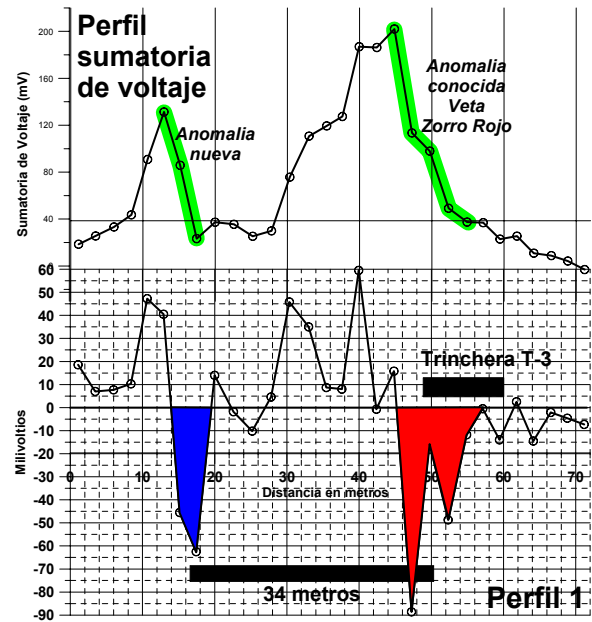


Figura 7. Perfil típico de potencial espontáneo (Perfil 1). Se grafica distancia en metros contra potencial medido en milivoltios positivos o negativos. En este caso, se usó espaciamiento de electrodos cada dos pasos (aproximadamente 2 metros), a lo largo de la línea del perfil. En rojo se marcó la veta ya conocida, y en azul la veta nueva, que no se conocía antes de la investigación, y que está a 34 metros de distancia de la primera. La parte superior de la figura muestra el perfil sumatorio de potencial, que se usa para interpretación. La pendiente negativa (marcada en verde) indica zonas anómalas.

Figure 7. Typical spontaneous potential profile (Profile 1). Electric potential in positive or negative millivolts is graphed against distance in meters. In this case, the profile was measured along a straight line, using two-step spacing between electrodes (approximately equal to 2 meters). Red marks the known vein; blue. the new vein. The new vein was unknown before this investigation, and is located 34 meters away from the first. The upper portion of the figure shows the summatory profile, used for interpretation. The negative slope (highlighted in green) indicates anomalies.

cilla. Sobre la aplicación eficiente de los perfiles de potencial espontáneo, véase [2].

Se probó que el método sirve para explorar sistemas de vetas que no presentan expresión superficial clara, en ambiente seco (árido, hiper-árido) de alta montaña andina.

Usando los perfiles de potencial espontáneo para obtener un modelo estructural detallado de los sistemas de vetas, se puede explorar grandes superficies rápida y eficientemente.

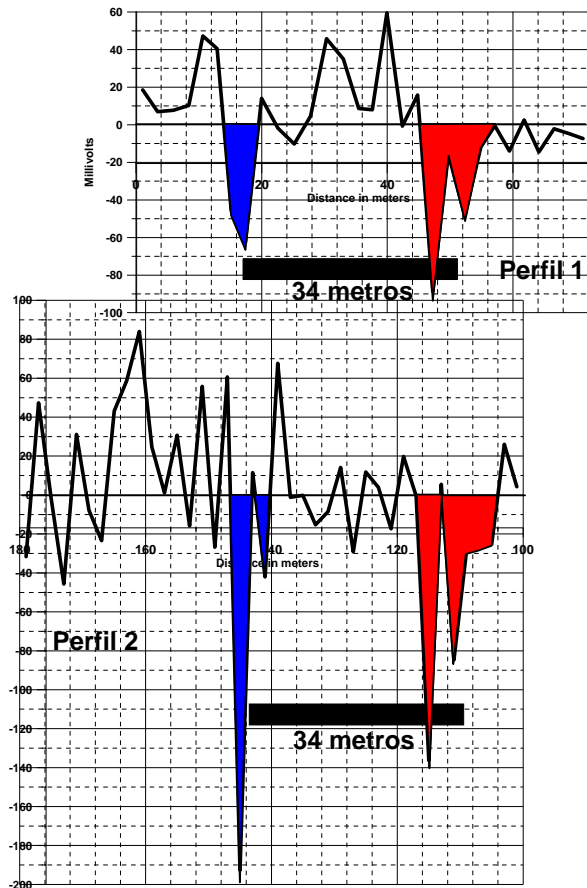


Figura 8. Comparación de los Perfiles de potencial espontáneo 1 y 2. En rojo se ilustran las anomalías de la veta conocida, y en azul las vetas descubiertas. En ambos casos, las vetas tienen espaciamento promedio de 34 metros. Los perfiles se ubicaron de manera perpendicular al rumbo de la veta conocida, y están separados más de 125 metros (Figura 6). Solamente se marcan como anomalías los valores de potencial negativo pronunciados. El Perfil 2 presenta anomalías de voltaje superiores a las registradas en el Perfil 1.

Figure 8. Comparison of Spontaneous Potential Profiles 1 and 2. Red highlights anomalies produced by the known vein, and blue the newly-discovered veins. In both cases, the veins are spaced approximately 34 meters. Profiles were located perpendicular to the known vein, and are separated 125 meters (Figure 6). Only pronounced negative potential values were marked as anomalous. Profile 2 shows stronger anomalies than Profile 1.

5. CONCLUSIONES

1. Es importante ubicar precisamente dónde está el oro. Se ahorra mucho dinero de exploración al saberlo. 2. Las vetas ocurren en sistemas que es necesario identificar. Esos sistemas tienen geometría y zonación particulares. 3. Los sistemas de vetas tienden a ser más ricos en zonas de extensión. Establecer el elipsoide de deformación enfoca la exploración en zonas con mayor potencial de mineralización. 4. La exploración con perfiles de potencial espontáneo es un método probado, sencillo, accesible y fácil de interpretar. 5. Estas técnicas tienen gran aplicación en Colombia.

NOTA: La exploración con perfiles de potencial espontáneo produce mejores resultados en suelos húmedos tropicales.

REFERENCIAS

- [1] EVE, A.S. & KEYS, M.A., "Electrical methods and spontaneous potential", in Applied Geophysics in the Search for Minerals. Cambridge: Cambridge University Press, 1929. 53-82.
- [2] LOBO-GUERRERO S., A. Application of spontaneous potential profiles for exploration of gold-rich epithermal low sulphidation veins in a humid region. Johannesburg: South African Geophysical Association Congress, 2003, y Geoscience Africa-2004, Geological Society of South Africa, 2004. (presentación y documento en <http://www.logemin.com/eng/e1.htm>, documento 9.)
- [3] LOBO-GUERRERO S., ALBERTO. Investigaciones desarrolladas durante la visita al proyecto minero Antapite, Sur de Huancavelica, Perú. Lima: Informe de consultoría presentado a la, Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., agosto 17, 2001. 66 p + 50 p anexos + 10 planos.
- [4] LOBO-GUERRERO S., ALBERTO. Investigaciones desarrolladas en el proyecto minero Antapite, Huancavelica, Perú. Bogotá: LOGEMIN S.A., Presentación en PowerPoint y documento, 2008. (en

<http://www.logemin.com/eng/e1.htm>, documento 26.)

[5] MILSON, J., Field geophysics, Geological Society of London Handbook. Milton Keynes: Open University Press, 1989. 182p.

[6] PARASNIS, D., "Electrical methods", in Principles of Applied Geophysics, 5th ed. London: Chapman & Hall, 1997. 104-121.

[7] REYNOLDS, J.M., Spontaneous (Self) Potentials in An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Toronto: John Wiley & Sons, 1997. 491-521.