

Datos hiperespectrales como indicador para la mineralización de oro en Sunrise Dam Gold Mine usando probabilidades condicionales

Matías Paineacán^{1*}, June Hill², Angus McFarlane², Carsten Laukamp², Julián Ortiz³

¹Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Av. Tupper 2069, Santiago, Chile

²Australian Resources Research Centre, CSIRO, 26 Dick Perry Avenue, Perth, Australia

³Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Av. Tupper 2007, Santiago, Chile

* email: matias.paineapan@gmail.com

Resumen. En este trabajo se presenta una técnica de determinación de zonas favorables para la mineralización de oro. El caso de estudio corresponde a Sunrise Dam Gold Mine, depósito aurífero de clase mundial ubicado en Australia Occidental que presenta un marcado efecto pepita. Tras los recientes resultados aplicando probabilidades condicionales sobre la geoquímica de dicho yacimiento, se utiliza esta vez información hiperespectral, junto al registro geológico de sondajes, para el cálculo de dichas zonas. Junto con esto se comparan además tanto el método de Bayes, como su variante Naïve Bayes, con el fin de lidiar con la maldición de la dimensión y así lograr menores tiempos de cálculo.

Palabras Claves: Efecto Pepita, Probabilidades Condicionales, Datos Hiperespectrales.

1 Introducción

En la industria del oro, la particular baja continuidad espacial de su ley, fenómeno conocido como el efecto pepita, es uno de los principales problemas que enfrenta su estimación.

Resultados alentadores usando probabilidades condicionales para el cálculo de zonas favorables de mineralización han sido obtenidos en el yacimiento Sunrise Dam Gold Mine. En estos estudios, han sido usados como indicadores, registros geoquímicos relativos a elementos de mayor continuidad espacial que el oro (Hill et al., 2014a).

La técnica empleada busca dar un peso a la experiencia adquirida de un determinado yacimiento, utilizando el método de Bayes para el cálculo de zonas favorables para la mineralización de oro. Sin embargo, el adicionar variables a la técnica con el fin de generar modelos de mayor precisión provoca el efecto conocido como la maldición de las dimensiones, con lo que los tiempos de cálculo aumentan considerablemente. Ante esta situación, se indaga en la variante conocida como el método Naïve Bayes, el que soslaya dicha dificultad, pero requiere que los indicadores utilizados sean independientes entre sí.

Por otro lado, el estudio de la información hiperespectral ha resultado de gran interés para la industria del oro (Jenkins, A. 2014), por lo que el presente estudio desarrolla la

posibilidad de utilizar valores tanto de longitud de onda, como el índice de abundancia a la hora del cálculo de las zonas de mineralización favorables, categorizándolas, con el fin de condensar el gran volumen de información disponible.

Consecuentemente las zonas favorables buscan como fin último el complementar la toma de decisiones y el entendimiento del cuerpo mineralizado.

1.1 Geología regional

En el estado de Australia Occidental, a unos 220 km al NE de Kalgoorlie, se encuentra Sunrise Dam Gold Mine (SDGM), un depósito de oro de clase mundial que presenta un marcado efecto pepita (Fig. 1).



Figura 1. Ubicación Sunrise Dam Gold Mine.

El cuerpo mineralizado presenta una roca caja en el complejo estructural del cinturón de rocas verdes del arcaico. El depósito, actualmente propiedad de AngloGold Ashanti, produjo al 30 de junio del 2010, un exceso de 7.2 millones de onzas (Moz) de oro, con recursos por 23.3 millones de toneladas con una ley de 2.9 gramos por tonelada de Au.

La operación en Sunrise Dam consistió en una operación a cielo abierto que comenzó en 1997 y cesó el 2013 y una

operación subterránea activa desde el 2013. SDGM es el depósito más grande en la zona tectónica de Laverton al este de la provincia de Goldfield y el segundo más grande en el Cratón Yilgarn de Australia Occidental.

La mayor parte de la zona tectónica de Laverton ha experimentado un metamorfismo de grado bajo a medio de esquistos verdes en el neoarcaico, con un metamorfismo de alto grado alrededor de plutones de granito (Chen and Wyche, 2001). La roca caja tiene una secuencia metasedimentaria superior dominada por esquistos ricos en hierro y BIF, alojados en una secuencia de baja potencia de rocas metavolcánicas y volcanoclásticas, la mayoría de ellas andesitas pero incluyendo micro-granitos máficos porfíricos, denominados dolly porphyry (Blenkinsop et al., 2007) y granito en profundidad, previo al metamorfismo regional y la mineralización.

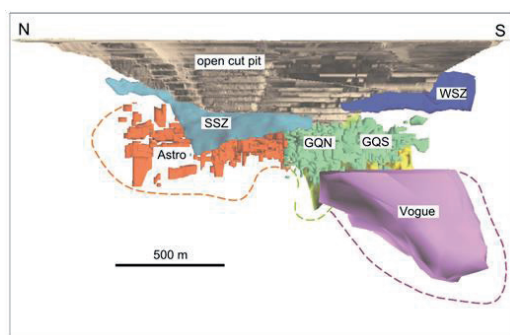


Figura 2. Sectores en Sunrise Dam Gold Mine

La veta GQN en SDGM es un cuerpo mineralizado de alta complejidad, con aproximadamente 400 m, los que se proyectan otros 400 m en profundidad y 200 m de espesor (Fig. 2).

Dicho cuerpo presenta una fuerte variación estructural en cortas distancias. La variabilidad en la ley es extrema con virtualmente ninguna continuidad exhibida en envolventes económicas. Es desde este cuerpo que provienen la mayor parte de los datos estudiados.

1.2 Datos hiperespectrales

Al medir la respuesta de una onda electromagnética que es emitida en contra de una muestra del sondaje, se obtiene la información hiperespectral.

En el presente caso se utiliza la máquina HyLogger junto al espectro de luz visible para la detección de grupos de minerales, registrando mediciones cada 2 cm de sondaje.

A través del software TSG (The Spectral Geologist), se procesan tanto la longitud de onda como el indicador de abundancia. Este último considerado un indicador no lineal de la presencia de un mineral, el cual usualmente se calibra para entregar el porcentaje real de mineral, cosa que no fue necesaria para este experimento, debido a la categorización de la información.

1.3 Probabilidades condicionales

Debido al efecto pepita, puede ocurrir que al aplicar un análisis químico a una fracción de un sondaje no se registre oro, a pesar de que exista presencia de éste en los alrededores, generando una subestimación del mineral y viceversa.

Al aplicar probabilidades condicionales se busca estimar la probabilidad de que exista mineralización de oro, dadas ciertas condiciones. En este caso se consideran datos hiperespectrales así como geológicos, obteniendo de este modo zonas favorables de mineralización.

Además se busca contrastar los resultados utilizando el teorema de Bayes y su variante Naïve Bayes (Fig. 3), a fin de ver si este último es una alternativa de cálculo, debido a sus ventajas al considerar independencia entre variables.

$$\text{Sea } \alpha = \frac{p(\text{Au} \geq v)}{p(G_i, MB_j, C_k)}$$

Para calcular $p(\text{Au} \geq v | G_i, MB_j, C_k)$:

$$\text{Bayes } p(G_i, MB_j, C_k | \text{Au} \geq v) * \alpha$$

$$\text{Naïve Bayes } p(G_i | \text{Au} \geq v) * p(MB_j | \text{Au} \geq v) * p(C_k | \text{Au} \geq v) * \alpha$$

Figura 3. Probabilidades condicionales; G representa la categoría geológica, MB las micas blancas, C las cloritas y v corresponde al umbral de ley considerado.

2 Categorización

Primeramente se registró información hiperespectral de dos grupos de minerales: Micas Blancas y Cloritas, esto acorde a la relación la cual sugiere que: existe un aumento en el contenido de micas blancas debido a la alteración sericitica asociada a la mineralización de oro, lo que contrasta con una disminución de contenido de clorita asociado a la mineralización de oro, para luego categorizarla según la ley de oro presente. De esta forma se generaron 3 categorías por cada grupo de mineral (Fig. 4 y 5). Además se agruparon los tipos de roca registrada (Tabla 1), acorde a la relación de la misma con la mineralización de oro (Dominy et al., 2003).

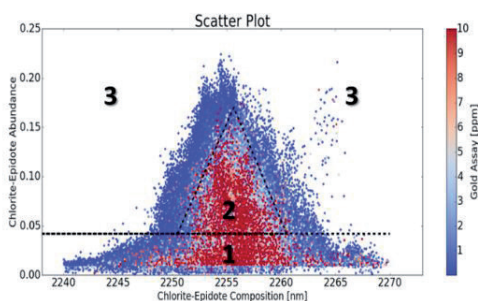


Figura 4. Datos hiperespectrales del grupo de las cloritas.

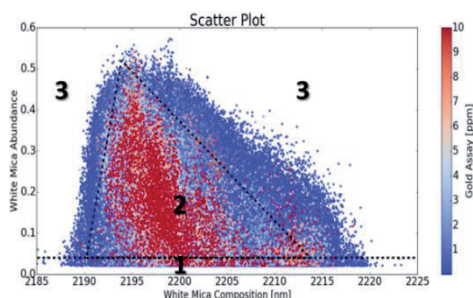


Figura 5. Datos hiperespectrales del grupo de las micas blancas.

Tabla 1. Registros categorizados por tipos de roca.

Grupos	I	II
Tipo de roca	Esquisto	Intermedia
	Sedimentaria	
Grupos	III	IV
Tipo de roca	Vetas	Máfica
	Félsicas	Ultramáficas

3 Resultados

Sobre la información categorizada, se aplican las dos variantes para el cálculo de la probabilidad condicional, considerando como umbral de mineralización (v) una concentración de 1 ppm (Hill et al., 2014b).

Para una mejor visualización de los datos, se grafican las zonas obtenidas sobre los sondajes (Fig. 6), en el siguiente caso se toma el sondaje más sólido, el que se colorea según la probabilidad: azul para el 20% menor, amarillo para el siguiente 40% y rojo para el 40% superior, junto a ambos modelos se grafica la ley de oro obtenida, la que se colorea con una escala análoga para la ley: azul < 0.01 ppm, amarillo entre 0.01 - 0.1 ppm y rojo > 0.1 ppm.

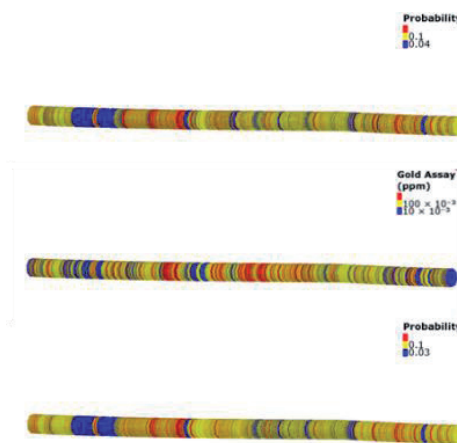


Figura 6. Comparación de resultados, modelo usando Bayes (sondaje superior), ley de oro a partir de análisis químico (sondaje de al medio) y modelo usando Naive Bayes (sondaje inferior).

Finalmente para una comparación más general se utiliza CUSUM, técnica que registra errores acumulados en torno a una media de probabilidades y permite distinguir zonas de mineralización favorables, delimitadas por cambios de pendientes (Fig. 7).

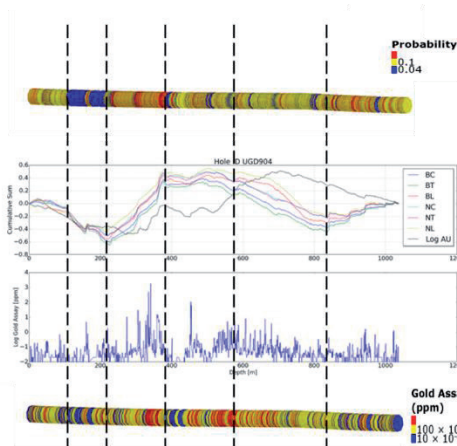


Figura 7. Comparación entre modelo (sondaje superior) y la ley de oro análisis químico (sondaje inferior).

Tras una serie de pruebas utilizando pequeñas variaciones de las categorías seleccionadas, queda en evidencia un sondaje que presenta un resultado distinto al general de sondajes, el que al ser comparado con su categoría geológica da cuenta que corresponde a una diferente mineralización de oro (Fig. 8).

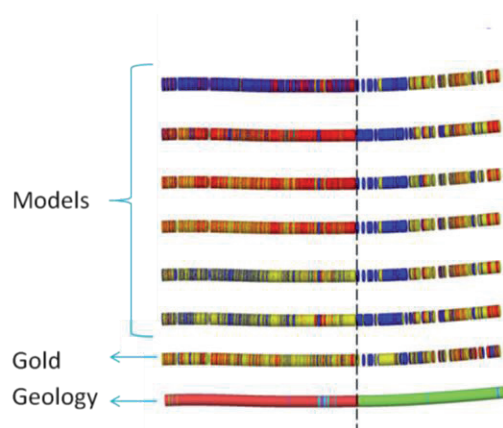


Figura 8. Diferencia notoria entre modelos, izquierda de la línea punteada, debido a la categoría geológica III (Rocas félsicas y vetas), representada por el color rojo en el sondaje inferior. Los 6 modelos mostrados corresponden a variaciones probadas.

4 Conclusiones

El uso de la información hiperespectral entrega resultados que podrían complementar la información ya disponible para la estimación de oro bajo el efecto pepita. Es necesario aún reconciliar dichos resultados a fin de ver cuánto mejora la clasificación de la mineralización y otras consecuencias que esto genere.

En relación al método de probabilidades condicionales a elegir, para este caso parece no existir una diferencia significativa entre los métodos utilizados, por lo que podría optarse por el método de Naïve Bayes por sobre el de Bayes y así en un futuro tener la opción de agregar información de nuevas categorías al modelo, con el fin de generar uno más detallado.

Finalmente y al igual que cualquier estudio geoestadístico, es necesario distinguir entre distintas fuentes de mineralización antes de generar los modelos.

Agradecimientos

El presente estudio ha sido posible gracias al apoyo del ARRC de CSIRO, a CSIRO Chile y al AMTC.

Referencias

BLINKINSOP, T., BAKER, T., MCLELLAN, J., CLEVERLEY, J., NUGUS, M., 2007. Sunrise Dam Gold Mine, Project G15, Final Report. Predictive Mineral Discovery Cooperative Research Centre, Australia.

CHEN, S.F., WYCHE, S., 2001. Archaean granite-greenstones of the central Yilgarn Craton, Western Australia, a field guide. Geol. Surv. West. Aust. Rec. 14.

DOMINY, S.C., JOHANSEN, G.F., 2004. Reducing grade uncertainty in high-nugget effect gold veins-application of geological and geochemical proxies. PACRIM 2004 Congress, 19–22 September 2004, Adelaide, SA, Australia.

HILL, E.J., OLIVER, CLEVERLEY, J.S., NUGUS, M.J., CARSWELL, J., CLARK, F., 2014b. Characterisation and 3D modelling of a nuggety, vein-hosted gold ore body, Sunrise Dam, Western Australia. *Journal of Structural Geology*, 67, 222-234.

HILL, E.J., OLIVER, N.H.S., FISHER, L., CLEVERLEY, J.S., NUGUS, M.J., 2014a. Using geochemical proxies to model nuggety gold deposits: An example from Sunrise Dam, Western Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 145, 12-24.

JENKINS, A., 2014. Mapping alteration and delineating ore shoots with Hyperspectral Core Imaging at the Sunrise Dam Gold Deposit. The Sunrise Dam HCI project, Australian Institute of Geoscientists, Australia