



# Madurez geológica: el efecto de los descubrimientos en la exploración temprana

---

DE 03/2021

## Resumen ejecutivo

La capacidad de un país para atraer inversión minera depende principalmente de dos factores: el contexto institucional y el potencial geológico. En particular, la discusión sobre el nivel de madurez geológica de un país resulta clave para definir las políticas óptimas para promover el desarrollo minero. En este sentido, el objetivo principal de este estudio es cuantificar el nivel de madurez geológica. Esto se realiza analizando el efecto que tiene cada nuevo descubrimiento de cobre u oro en las actividades de exploración temprana o grassroots.

El modelo teórico que se presenta muestra que el nivel de madurez geológica depende del efecto neto entre dos externalidades asociadas al proceso de exploración minera; un efecto positivo que se da por la información geológica con cada descubrimiento y un efecto negativo que proviene por el agotamiento o disminución de las oportunidades de exploración. En caso de que los efectos de información dominen, cada descubrimiento tendrá un efecto positivo en la inversión de exploración. Por otro lado, un signo negativo indicará que se está en presencia de una mayor madurez geológica.

Utilizando datos de descubrimientos de cobre y oro y los presupuestos de exploración temprana respectivos, los resultados indican que cada descubrimiento de cobre tiene un efecto no distinto de cero en los presupuestos de exploración temprana, por lo cual las externalidades de información y de agotamiento se encuentran balanceadas. Por otro lado, cada nuevo descubrimiento de oro tiene un efecto positivo y significativo, lo cual indica que las externalidades de información aún dominan sobre el agotamiento de oportunidades de exploración.

Finalmente, se analiza el efecto para cada commodity por período, tipo de empresa y por zona geográfica. Para el caso del cobre, el efecto neto no aparece como distinto de cero a través del tiempo, en cambio, en el caso del oro se aprecia una tendencia a la baja. En el análisis por tipo de empresa, el efecto de agotamiento sería menos marcado en las empresas mayor que en las junior, tanto para el cobre como para el oro. El análisis geográfico en el caso del cobre indica que la zona Asia-Pacífico se encuentra significativamente más madura que el resto. No obstante, el análisis del oro no indica que alguna zona se encuentra en un mayor nivel de madurez. En ambos casos, la zona latinoamericana presenta un balance entre ambos efectos.



## Executive Summary

Mining investment and competitiveness of a country depend mostly on two variables: the institutional framework and the geological potential. Particularly, the geological maturity of a country is a key factor to define policies for mining development. In this sense, the main goal of this report is to quantify the degree of geological maturity. This is done by analyzing the effect that a mineral discovery has on grassroots or early-stage exploration activity, focusing on gold and copper data.

In a theoretical sense, the degree of geological maturity is modelled as a combination of two externalities related to the mineral exploration process: a positive effect due to information spillovers arising from the discovery of each deposit, and a negative effect arising from the depletion or decrease of exploration opportunities for a given commodity. If information spillovers dominate, each discovery will have a positive effect on exploration investment. On the other hand, a negative sign will suggest a higher degree of geological maturity.

Results suggest that each additional copper discovery has a effect that is not different than zero on early-stage exploration budgets, signaling that information spillovers and depletion effects are balanced. On the other hand, each additional gold discovery has a positive and significant effect, suggesting that information spillovers still dominate over the depletion of exploration opportunities.

Lastly, an analysis by time period, company type and geographical region is presented. For copper, the net effect appears not statistically different than zero over time; however, gold results show a slight decline trend during the period of analysis. In terms of company type, both copper and gold results indicate that junior companies would be closer to depletion effects than major companies. The analysis by geographical region shows that the Asia-Pacific region appears more mature than the rest of the world. Nevertheless, gold results by region do not show that a particular region is in the more mature region in terms of geological potential. It is worth highlight that the Latin American regions appears as balanced in terms of the net effect between information spillovers and depletion effect for both, copper and gold.



## Contenidos

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modelo teórico</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Datos</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Discusión</b>	<b>12</b>
5.1	Análisis por período . . . . .	12
5.2	Análisis por tipo de empresa . . . . .	15
5.3	Análisis por zona geográfica . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>Referencias</b>	<b>23</b>



# 1 Introducción

El desarrollo sustentable de los recursos naturales de un país o región depende en gran medida de la capacidad de tener, crear y mantener condiciones que promuevan el atractivo de invertir y desarrollar proyectos mineros desde las etapas más tempranas de exploración. La capacidad de un país para atraer inversión minera depende principalmente de dos factores: el contexto institucional (o clima de inversión) y el potencial geológico (Tilton & Guzman, 2016, cap. 6). Si bien existen mediciones periódicas de ambas variables en base a encuestas de percepción (Fraser Institute, 2020), los análisis sobre el comportamiento real de la inversión minera han sido más acotados. Por ejemplo, COCHILCO (2013a,b, 2015) propone distintas metodologías para rankear países en base a indicadores que se agrupan en torno a las dos grandes variables mencionadas.

En términos cuantitativos, Otto et al. (2006) propone analizar la competitividad de un país en base a los cambios que puedan ocurrir en la inversión de exploración temprana o grassroots, basado en la mayor capacidad reactiva de esta etapa de la inversión lo cual permite cuantificar efectos en el corto plazo. Esta hipótesis ha sido utilizada para diferenciar el efecto de distintas variables ligadas al potencial geológico y al contexto institucional (Jara et al., 2008; Khindanova, 2011, 2015; Jara, 2017), pero se han enfocado en el análisis comparativo estático, mostrando que ambos conceptos pueden influenciar la inversión de exploración minera grassroots. Si bien Jara et al. (2020) estudia la relación de variables en varios años con el objetivo de definir un límite en el cual el contexto institucional baja su relevancia para la competitividad, el enfoque es estático en cada período.

Los trabajos previos han ilustrado a grandes rasgos que ambas variables, potencial geológico y el contexto institucional, afectan la exploración minera y consecuentemente la competitividad de un país. Sin embargo, los efectos de cambios en el nivel de madurez geológica sobre la inversión han sido menos estudiados que los efectos de variables institucionales. El principal desafío consiste en aislar eventos relacionados al potencial geológico que afecten la inversión y que, a su vez, den cuenta el nivel de madurez geológica existente. La literatura sobre recursos no renovables ha reconocido que existen dos efectos contrapuestos relacionados a los descubrimientos que afectan el potencial geológico y definen la madurez de un distrito minero (Peterson, 1978; Siegel, 1985). En primer lugar, una externalidad positiva (o *spillover*) que se da con el descubrimiento de un nuevo depósito y la divulgación de tal información hacia otros exploradores, debido a la correlación espacial de los minerales. En segundo lugar, un efecto de agotamiento de las oportunidades de exploración, pues cada descubrimiento disminuye las posibilidades de que otros in-



teresados encuentren otros depósitos. Es de esperar que en un distrito menos maduro domine el primer efecto, como ocurre con los denominados *gold rushes* (Lynham, 2017). A medida que un distrito se vuelva más maduro, manteniendo otras variables constantes, cada descubrimiento adicional afectará negativamente la inversión de exploración temprana (Mason, 2014).

En este sentido, el objetivo principal de este estudio es cuantificar el nivel de madurez geológica de un país. Esto se realiza analizando el efecto que tiene cada nuevo descubrimiento de cobre u oro en las actividades de exploración temprana o grassroots, considerando los efectos o externalidades que han sido reconocidas previamente en la literatura. El resto del informe se estructura de la siguiente manera. La sección 2 muestra el modelo teórico y la estrategia de estimación para descubrimientos y exploración grassroots en la determinación del nivel de madurez geológica de un distrito minero. La sección 3 detalla los datos utilizados para la estimación. La sección 4 expone los resultados obtenidos, los cuales son analizados más en profundidad en la sección 5 y finalmente la sección 6 presenta las conclusiones.

## 2 Modelo teórico

La exploración minera involucra dos efectos contrapuestos que definen el grado de madurez geológica. En primer lugar, las externalidades positivas que ocurren al liberar información geológica que dan señales del atractivo para invertir a otras firmas. Por ejemplo, durante un *gold rush* (fiebre de oro), un descubrimiento inicial indica el potencial geológico de una zona, atrayendo mineros en búsqueda de oportunidades, efecto que se ve acrecentado por derechos de propiedad incompletos (Libecap, 1990). En segundo lugar, una externalidad negativa por el agotamiento de oportunidades de exploración ha medida que una región se vuelve más geológicamente madura. En este caso, la externalidad negativa existe cuando hay más de una firma realizando decisiones de exploración (Peterson, 1978). La literatura previa ha modelado el efecto total y agregado de estas dos externalidades utilizando funciones cuadráticas (Uhler, 1976; Mason, 1989; Siegel, 1985). En etapas tempranas, las externalidades positivas de información deberían dominar sobre las externalidades negativas de agotamiento, lo cual se reversa en las regiones más maduras.

Para el presente estudio, se utiliza el enfoque de formas funcionales cuadráticas para modelar las decisiones de exploración dinámicas. Por simplicidad, se considera un modelo donde dos firmas ( $i$  y  $j$ ) deciden cuando explorar ( $e_t$ ) en dos períodos (0 y 1), con el objetivo de descubrir depósitos de tamaño fijo  $q$  de un stock inicial  $R_0$ . Se asume que



en la región donde se toma la decisión de exploración otras variables institucionales se mantienen fijas. De esta manera, la decisión de exploración está dada por las utilidades esperadas indicadas en la Ecuación 1.

$$\begin{aligned} \max_{e_{i,0}, e_{i,1}} \quad & p(e_{i,0}, R_0) \cdot V(q) - c(e_{i,0}) + \delta E(\Pi(e_{i,1})) \\ \text{sujeto a} \quad & R_1 = \begin{cases} R_0 & \text{Si no hubo descubrimientos (s=0)} \\ R_0 - q & \text{Si } i \text{ o } j \text{ realizó un descubrimiento (s=1)} \\ R_0 - 2q & \text{Si } i \text{ y } j \text{ realizaron un descubrimiento (s=2)} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

Dónde  $p(e_{i,0}, R_0)$  representa la probabilidad de encontrar un depósito basado en un esfuerzo  $e_i$  y un stock remanente de  $R_0$ .  $V(q)$  representa el valor de venta que tendría un depósito de tamaño  $q$  bajo las condiciones de venta existentes. Los costos de exploración están dados por  $c(e_{i,0})$  y la tasa de descuento de las utilidades futuras de cada estado  $s$  está representada por  $\delta$ . Las utilidades esperadas del periodo 1 dependen de la probabilidad de descubrimiento según lo que se indica en la Ecuación 2.

$$\sum_s [p(e_{i,1}, R_s) \cdot V(q) - c(e_{i,1})] \cdot \text{Prob}(Y = s) \quad (2)$$

La solución depende de la forma funcional de la probabilidad de descubrimientos. Por simplicidad, se asumen costos marginales de exploración constantes ( $c(e_{i,0}) = w \cdot e_i$ ) y probabilidades dadas por  $p(e_i, R) = f(e_i) \cdot g(R) = \sqrt{e_i} \cdot (aR - bR^2)$ , dónde  $a, b > 0$ . Esta forma funcional combina un retorno decreciente del esfuerzo exploratorio y una relación cuadrática sobre los recursos remanentes como ha sido propuesta en estudios anteriores. De este modo, la decisión óptima de exploración para cada estado  $s$  en el período 1 está dada por la Ecuación 3.

$$e_{i,1,s}^* = \frac{V(q)^2 g(R_s)^2}{4w^2} \quad (3)$$

Reemplazando el valor anterior en la función de utilidad para cada estado  $s$  se obtienen las utilidades esperadas para el período 1 ( $E(\Pi_1)$ ), así como se indica en la Ecuación 4.

$$E(\Pi_1) = (1-p_{0,i})(1-p_{0,j}) \cdot \Pi_{1,s=0} + [p_{0,i}(1-p_{0,j}) + (1-p_{0,i})p_{0,j}] \cdot \Pi_{1,s=1} + p_{0,i}p_{0,j} \cdot \Pi_{1,s=2} \quad (4)$$

Si se descarta la probabilidad de que ambas firmas encuentren un depósito en el mismo período<sup>1</sup>, entonces  $p_i \cdot p_j \sim 0$  y el problema de optimización queda definido por 5.

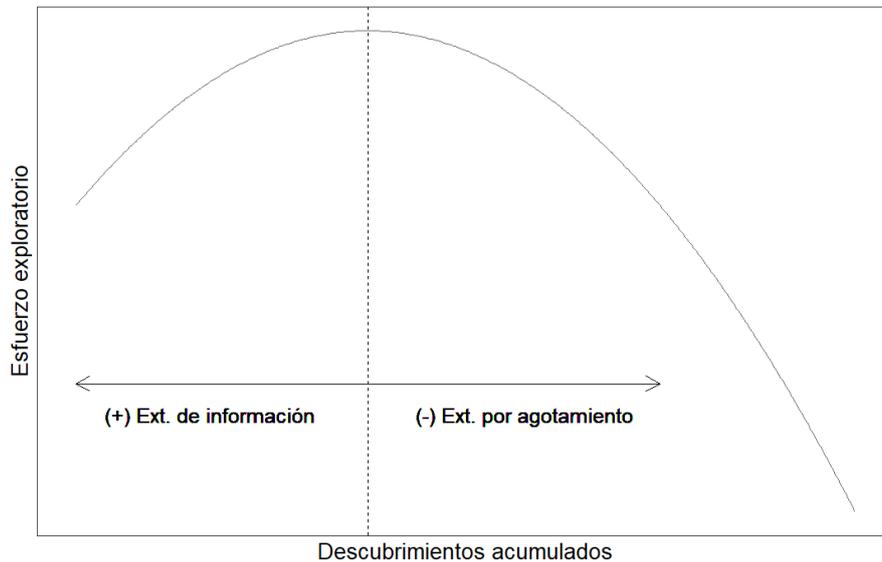
<sup>1</sup>El supuesto se basa en la observación empírica de que la probabilidad de encontrar un depósito está en el orden de 1:10.000 (Sturla et al., 2018)

$$\max_{e_{i,0}} p_{i,0} \cdot V(q) - we_{i,0} + \delta \left[ \Pi_{1,s=0} + (p_{i,0} + p_{j,0})(\Pi_{1,s=1} - \Pi_{1,s=0}) \right] \quad (5)$$

La Ecuación 5 presenta el balance intertemporal entre utilidades en el período 0 y el diferencial en utilidades si ocurre un descubrimiento en el siguiente período. A su vez, este efecto de descubrimiento puede ser positivo o negativo dependiendo del nivel de madurez geológica y de la externalidad que domine (información + o agotamiento -). La decisión de exploración óptima está finalmente definida en la Ecuación 6.

$$e_{i,0}^* = \frac{g(R_0)^2}{4w^2} \left[ V(q) + \delta(\Pi_{1,s=1} - \Pi_{1,s=0}) \right] \quad (6)$$

La relación indicada en la Ecuación 6 entre la decisión de exploración y los descubrimientos (o stock remanente de depósitos) se aprecia gráficamente en la Figura 1.



**Figura 1:** Relación teórica entre el esfuerzo de exploración y los descubrimientos acumulados. A la izquierda de la línea punteada, las externalidades de información dominan sobre los efectos de agotamiento, ilustrando una etapa temprana. A la derecha de la línea punteada, los efectos de agotamiento dominan a medida que la región se vuelve más geológicamente madura.

Como se ilustra en la Figura 1, cada nuevo descubrimiento tiene un efecto marginal cuyo signo cambia según la madurez geológica. En las etapas tempranas, las externalidades positivas que se dan por la divulgación de información geológica dominarán sobre el agotamiento de las oportunidades de exploración. De este modo, el esfuerzo crecerá hasta el punto en que la información de cada depósito adicional no logre compensar los efectos de menor disponibilidad y la región se mueva a una zona de mayor madurez geológica. Vale la pena destacar que el modelo asume que otras variables institucionales se mantienen fijas, pero que cambios en ellas podrían desplazar la curva, cambiando la capacidad de la posición competitiva de la región.

La relación teórica previamente graficada sugiere que cada descubrimiento adicional, condicional a las variables institucionales, puede usarse para revelar el nivel de madurez de una región. En términos econométricos, la Ecuación 7 relaciona el logaritmo de la inversión de exploración ( $e_{i,j,t}$ ) de cada firma  $i$  en el país  $j$  en el año  $t$  como una función del número de descubrimientos ( $D_{j,t}$ ) que ocurren en el país el mismo año. A su vez, otras variables de control ( $\mathbf{X}_{i,j,t}$ ) incluyen medidas de calidad institucional u otros efectos fijos por tipo de empresa o del país.

$$\log(e_{i,j,t}) = \delta \cdot D_{j,t} + \mathbf{X}_{i,j,t} \cdot \beta + \varepsilon_{i,j,t} \quad (7)$$

En este caso, el signo de  $\delta$  recoge el efecto neto entre las externalidades de información y de agotamiento de oportunidades de exploración. Un signo positivo puede ser interpretado como un indicador de que las externalidades positivas por la información geológica dominan en la región que se analiza. Por otro lado, un signo negativo sugeriría que la zona se está percibiendo como más madura para inversionistas y menos atractiva por su potencial geológico.

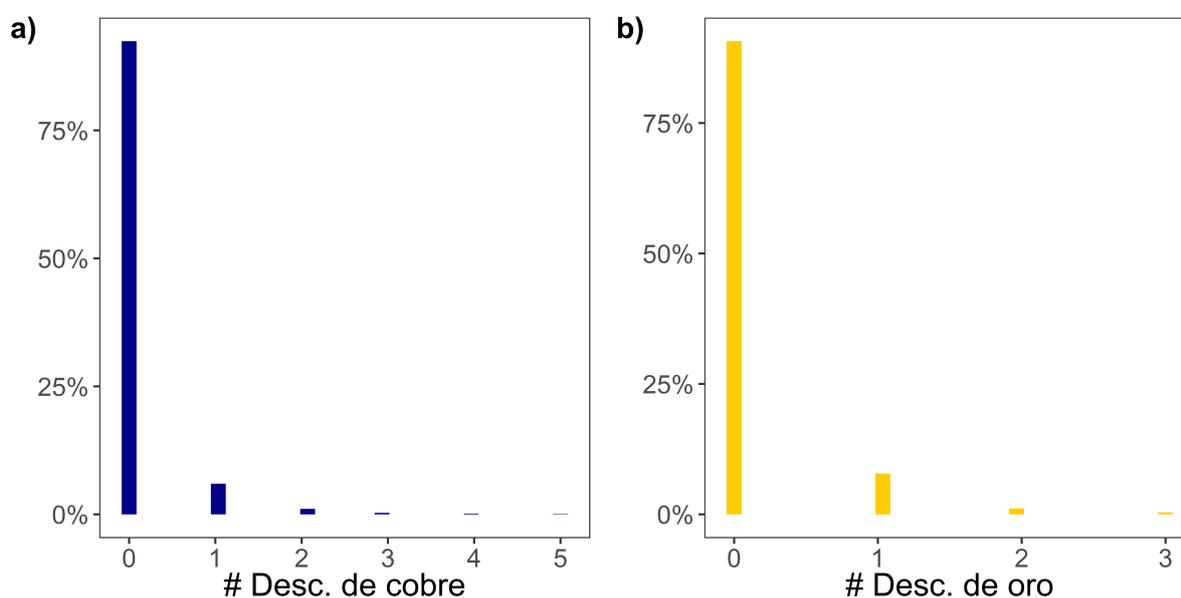
### 3 Datos

El análisis se basa en tres fuentes de información. Primero, los principales descubrimientos de cobre y oro provienen de la base de datos de S&P Global Market Intelligence (2019b, 2020). Segundo, la información de exploración grassroots para cobre y oro se obtienen desde los documentos S&P Global Corporate Exploration Strategies 2019a. Tercero, la calidad institucional es medida a través del indicador de Estado de Derecho, uno de los Indicadores Globales de Gobernanza (WGI en inglés) desarrollados por el Banco Mundial (2019). Teniendo en cuenta que en general los indicadores de gobernanza están altamente correlacionados, se optó por utilizar el Estado de Derecho como medida general. Además, la variable es ampliamente aceptada como medida de calidad institucional de un país en estudios de desarrollo económico (Acemoglu et al., 2001). El período de estudio está limitado por las distintas bases de datos entre 1997 a 2018.

La definición de la ocurrencia de un descubrimiento requiere ser detallado debido a que no existe una definición standard. Para los casos de cobre y oro analizados, el año de descubrimiento se refiere al año en que un sondeo tiene contacto con el cuerpo mineralizado. En particular, la base de datos de cobre considera descubrimientos que contengan al menos 500 kton en reservas, recursos y producción pasada según corresponda (S&P Global Market Intelligence, 2019b). Para el caso del oro, un descubrimiento significativo está definido como aquel que contenga al menos 2 millones de onzas en recursos medidos

e indicados, o al menos 1 millón de onzas en reservas (S&P Global Market Intelligence, 2020).

La distribución de descubrimientos en cada país y año se presenta en las Figuras 2 a) y b), respectivamente. En el caso del cobre, los descubrimientos en los países analizados no superan los cinco en un año particular. En la mayor parte de los casos, los descubrimientos en un año toman un valor de cero. Los descubrimientos de oro siguen un patrón similar, con un gran porcentaje de años con cero descubrimientos y un caso máximo de tres descubrimientos en un mismo país en un mismo año.



**Figura 2:** Histogramas para descubrimientos de cobre y oro, 1997-2018. Cada observación representa el número de descubrimientos en un país en un año particular.

La distribución geográfica de los descubrimientos se ilustra en la Tabla 1. La mayor parte de los descubrimientos de cobre han ocurrido en América Latina, representando cerca del 51% del total ocurrido en el período 1997-2018. La región es seguida por la zona Asia-Pacífico, con un 24% del total de descubrimientos. Los descubrimientos en el caso del oro se encuentran menos concentrados, donde el mayor porcentaje (38 %) han ocurrido en África, seguido de América Latina (27%).

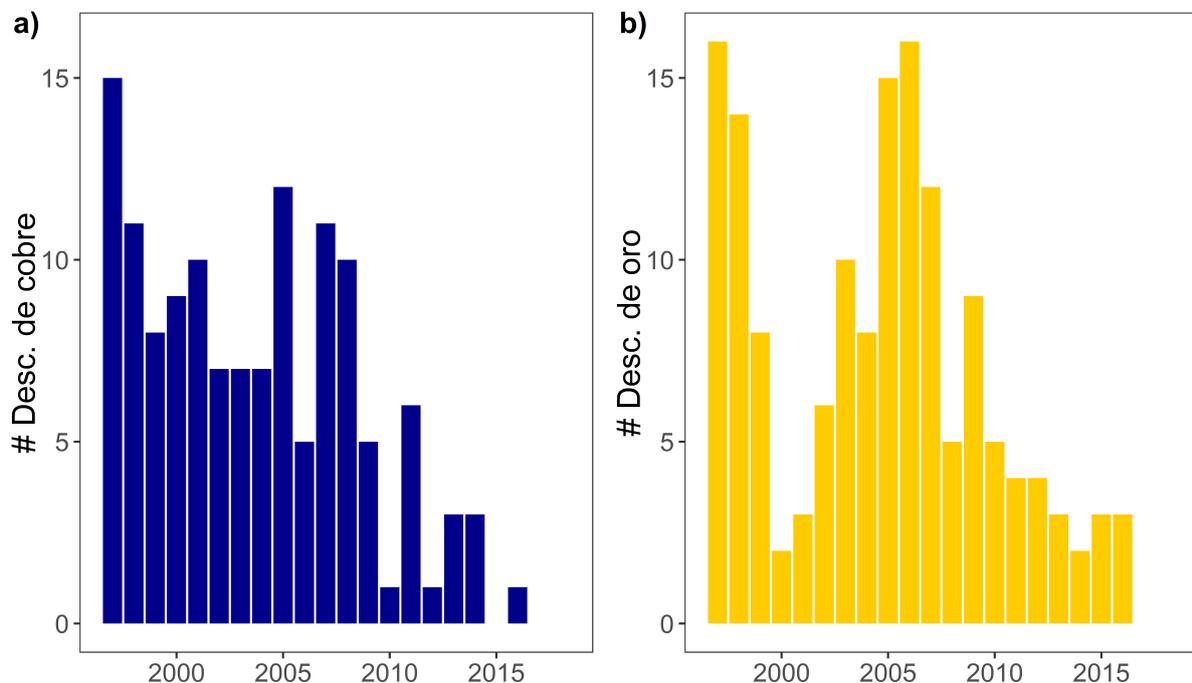
Las Figuras 3 a) y b) ilustran cómo el número de descubrimientos de cobre y oro han mostrando una tendencia decreciente a través del tiempo. En el caso del cobre, el número promedio de descubrimientos ha disminuido desde 9,3 descubrimientos por año en el período 1997-2004 a 7,1 descubrimientos entre 2005-2011 y 1,1 descubrimientos por año en el promedio de los años 2012-2018. Vale la pena destacar que la base de datos no

**Tabla 1:** Descubrimientos de cobre y oro por región, 1997-2018.

Región	Descubrimientos de cobre	Descubrimientos de oro
América Latina y el Caribe	67	40
Asia-Pacífico	32	20
África	14	41
Europa	11	21
Canadá-EEUU	7	23
Medio Oriente	1	2
Total	132	147

**Fuente:** S&P Global Market Intelligence (2020; 2019b).

registra descubrimientos significativos (bajo los criterios previamente mencionados) en los años 2015, 2016, 2017 y 2018. Los descubrimientos de oro no siguen el mismo patrón que los de cobre, pues el número promedio de descubrimientos por año durante el período 2005-2011 (9,4) fue ligeramente superior al del período 1997-2004 (8,4 descubrimientos por año). No obstante, sólo se registraron 2,1 descubrimientos por año entre 2012-2018, lo que incluye dos años (2017 y 2018) sin descubrimientos significativos. Cabe destacar que dado el retraso en reportes para los años más recientes, es posible que un número de descubrimientos aún no hayan sido registrados.

**Figura 3:** Cantidad de descubrimientos significativos de cobre (izquierda) y oro (derecha), 1997-2018.

## 4 Resultados

El modelo teórico presentado en la sección 2 da cuenta de que el nivel de madurez geológica depende del efecto neto entre dos externalidades asociadas al proceso de exploración minera. En primer lugar un efecto positivo que se da en la liberación de información geológica con cada descubrimiento, aumentando la probabilidad de encontrar otro depósito en zonas cercanas. En segundo lugar, un efecto negativo que proviene por el agotamiento o disminución de las oportunidades de exploración (ya sea por stock de recurso mineral o superficie disponible), lo cual afecta a todas las empresas interesadas en explorar en un distrito. Siendo la exploración un evento aleatorio condicional a la inversión pasada y a las características del país, los inversionistas reaccionarán frente a la nueva información. En el caso de que los efectos de información dominen, cada descubrimiento tendrá un efecto positivo en la inversión de exploración (atrae más inversión), mientras que un signo negativo indicará que se está en presencia de una mayor madurez geológica (disminuye inversión). Lo anterior corresponde al fundamento para analizar la madurez geológica y la competitividad utilizando los descubrimientos en un análisis multivariable.

El análisis de los descubrimientos para cobre y oro considera que los descubrimientos pueden tener cierto rezago desde su descubrimiento hasta que la decisión de exploración cambia. En particular, las distintas especificaciones consideran el efecto agregado por descubrimientos que hayan ocurrido hasta dos años antes de la fecha del presupuesto de exploración temprana informado ( $Cu + Cu1 + Cu2$ ). El efecto de los descubrimientos se ve reflejado por el coeficiente  $\delta$ , indicando el efecto marginal de cada descubrimiento adicional de ese tipo de commodity. Los resultados de las regresiones de cobre y oro se indican en la Tabla 2 y Tabla 3.

Para el caso del cobre, la Tabla 2 indica que el efecto agregado de los descubrimientos tiene un valor no distinto de cero. En todas las especificaciones se controla por el índice de Estado de Derecho, que controla por la calidad institucionalidad de un país. Junto con esto, se controla en todas las especificaciones por el tipo de empresa, es decir, si ésta es junior o mayor.

En una primera aproximación, el coeficiente  $\delta$  en la columna (1) muestra un signo positivo y significativo al 5%. Sin embargo, los presupuestos de exploración están altamente determinados por variables de variación anual, principalmente los precios de los commodities. Por ello, se agregan efectos fijos por año con el fin de controlar por cambios en los precios y otras tendencias. En esta especificación se tiene que cada nuevo descu-

**Tabla 2:** Efecto de descubrimientos de cobre en los presupuestos de exploración temprana o grassroots de cobre

	Log presupuesto de exploración			
	(1)	(2)	(3)	(4)
$\delta$ (Cu+Cu1+Cu2)	0,230** (0,110)	0,336*** (0,113)	0,224** (0,091)	0,012 (0,035)
N obs	10.168	10.168	10.168	10.168
R <sup>2</sup>	0,372	0,390	0,391	0,421
Índice de Estado de Derecho	Si	Si	Si	Si
FE tipo empresa	Si	Si	Si	Si
FE año	No	Si	Si	Si
FE región	No	No	Si	No
FE país	No	No	No	Si

Nota: Los resultados indican la estimación del efecto sobre los nuevos descubrimientos de cobre en los presupuestos de exploración temprana de cobre. Cada columna muestra una especificación distinta. La columna (1) controla por variables de calidad institucional y por el tipo de empresa. La columna (2) incluye efectos fijo por año para controlar por cambios en los precios y otras tendencias comunes. La columna (3) agrega efectos fijos a nivel regional y la columna (4) aumenta el detalle con efectos fijos a nivel país. Los errores estándar son robustos y clústeres a nivel de país.

\*p<0,1; \*\*p<0,05; \*\*\*p<0,01

brimiento tendría un efecto positivo en el presupuesto de exploración.

Las columnas (3) y (4), incluyen controles adicionales por la región geográfica en la que se realiza la exploración y un control adicional más específico controlando por el país. En estos casos, el parámetro disminuye en su magnitud y finalmente pierde significancia en la columna (4). Específicamente, se puede observar que agregar el efecto fijo de país tiene un fuerte impacto tanto en la magnitud como en la significancia de la variable de interés, lo que refleja la importancia que tienen las condiciones propias de cada país para explicar el presupuesto de exploración. Esto a su vez puede deberse a la concentración de descubrimientos y/o por la heterogeneidad del efecto entre los distintos países.

Finalmente, los resultados para el cobre muestran que un nuevo descubrimiento tendría un efecto levemente positivo de un 1,2% sobre el presupuesto de exploración promedio global. Sin embargo, este efecto no es estadísticamente significativo, es decir, no se podría descartar que sea igual a cero. Una interpretación práctica de este valor es que el efecto total neto entre las externalidades de información y agotamiento para el cobre (en la especificación más conservadora), no se está en una etapa de agotamiento, más bien existe un balance entre ambas externalidades. De este modo, no hay evidencia de que los efectos de agotamiento han superado a los efectos de información.

La tabla 3 muestra los resultados para el oro, donde al igual que para el cobre, se considera el Estado de Derecho y el tipo de empresa como controles en todas las especificaciones. Las distintas columnas evidencian que un nuevo descubrimiento tendría un efecto positivo y significativo sobre el presupuesto de exploración, llegando a un 11,7% según la estimación más conservadora que incluye efectos fijos por país (columna (4)). Dado lo anterior, se infiere que, para el caso del oro, dominarían los efectos de información por sobre el efecto de agotamiento. Vale la pena destacar que, al incluir controles adicionales para variables temporales y geográficas, el parámetro varía su magnitud, pero mantiene el nivel de significancia.



**Tabla 3:** Efecto de descubrimientos de oro en los presupuestos de exploración temprana o grassroots de oro

	Log presupuesto de exploración			
	(1)	(2)	(3)	(4)
$\delta$ (Au+Au1+Au2)	0,182** (0,073)	0,164*** (0,060)	0,175*** (0,060)	0,117*** (0,043)
N obs	20.628	20.628	20.628	20.628
R <sup>2</sup>	0,272	0,297	0,297	0,316
Índice de Estado de Derecho	Si	Si	Si	Si
FE tipo empresa	Si	Si	Si	Si
FE año	No	Si	Si	Si
FE región	No	No	Si	No
FE país	No	No	No	Si

Nota: Los resultados indican la estimación del efecto sobre los nuevos descubrimientos de oro en los presupuestos de exploración temprana de oro. Cada columna muestra una especificación distinta. La columna (1) controla por variables de calidad institucional y por el tipo de empresa. La columna (2) incluye efectos fijo por año para controlar por cambios en los precios y otras tendencias comunes. La columna (3) agrega efectos fijos a nivel regional y la columna (4) aumenta el detalle con efectos fijos a nivel país. Los errores estándar son robustos y clústeres a nivel de país.

\*p<0,1; \*\*p<0,05; \*\*\*p<0,01

## 5 Discusión

En la siguiente sección se analizan los resultados anteriores, en particular se analizan las diferencias en la estimación del parámetro de interés a través del tiempo, por el tipo de empresa y por la ubicación geográfica.

### 5.1 Análisis por período

Según el modelo teórico, es esperable que cada nuevo descubrimiento genere un efecto marginal distinto y decreciente a medida que disminuya el stock de oportunidades de exploración. Esta relación cóncava indicaría que el coeficiente estimado iría disminuyendo en un período suficiente.

La Tabla 4 divide el efecto neto para el cobre entre externalidades de información y agotamiento en tres períodos<sup>2</sup>: 1997 a 2004, 2005 a 2011 y 2011 a 2018. De manera general, se aprecia un comportamiento más bien convexo en las tres primeras especificaciones, donde el coeficiente aumenta en el tiempo, lo que indicaría que los efectos de información van al alza. No obstante, si bien se mantiene la tendencia al alza en magnitud, no es estadísticamente significativa en la cuarta especificación, la cual es más conservadora al incluir los efectos fijos por país. De esta manera, se puede decir que, de manera conservadora, los efectos de agotamiento no han superado a los efectos de información para el caso del cobre en el período analizado.

El mismo análisis anterior se realiza para el caso del oro y se muestra en la Tabla 5. En este caso, no queda claro si el coeficiente muestra una consistente tendencia a la baja a través del tiempo. Si bien se exhibe una caída desde el primer al segundo período en las especificaciones 2, 3 y 4, los mismos modelos también indican una leve alza durante el último período. Sin embargo, la significancia estadística es más baja lo cual también se relaciona al menor número de descubrimientos ocurridos en los periodos más recientes.

---

<sup>2</sup>Se divide el periodo de estudio en tres períodos de igual longitud temporal, pues tres periodos permite apreciar si existe alguna tendencia no lineal en el coeficiente a través del tiempo.

**Tabla 4:** Efecto de descubrimientos de cobre en los presupuestos de exploración temprana o grassroots de cobre por período

	Log presupuesto de exploración			
	(1)	(2)	(3)	(4)
$\delta \cdot I_{1997-2004}$	0,126 (0,102)	0,256** (0,111)	0,167* (0,101)	0,011 (0,041)
$\delta \cdot I_{2005-2011}$	0,325*** (0,083)	0,378*** (0,071)	0,292*** (0,069)	0,030 (0,083)
$\delta \cdot I_{2011-2018}$	1,260*** (0,282)	0,990*** (0,321)	0,737*** (0,209)	0,031 (0,154)
N obs	10.168	10.168	10.168	10.168
R <sup>2</sup>	0,372	0,390	0,391	0,421
Índice de Estado de Derecho	Si	Si	Si	Si
FE tipo empresa	Si	Si	Si	Si
FE año	No	Si	Si	Si
FE región	No	No	Si	No
FE país	No	No	No	Si

Nota: Los resultados indican la estimación del efecto sobre los nuevos descubrimientos de cobre en los presupuestos de exploración temprana de cobre. Cada columna muestra una especificación distinta. La columna (1) controla por variables de calidad institucional y por el tipo de empresa. La columna (2) incluye efectos fijo por año para controlar por cambios en los precios y otras tendencias comunes. La columna (3) agrega efectos fijos a nivel regional y la columna (4) aumenta el detalle con efectos fijos a nivel país. Los errores estándar son robustos y clústeres a nivel de país.

\*p<0,1; \*\*p<0,05; \*\*\*p<0,01

**Tabla 5:** Efecto de descubrimientos de oro en los presupuestos de exploración temprana o grassroots de oro por período

	Log presupuesto de exploración			
	(1)	(2)	(3)	(4)
$\delta \cdot I_{1997-2004}$	0,138 (0,099)	0,205** (0,088)	0,211** (0,087)	0,171** (0,079)
$\delta \cdot I_{2004-2011}$	0,238*** (0,064)	0,127** (0,051)	0,142*** (0,053)	0,057 (0,041)
$\delta \cdot I_{2011-2018}$	0,349* (0,188)	0,139 (0,190)	0,155 (0,189)	0,120 (0,137)
N obs	20.628	20.628	20.628	20.628
R <sup>2</sup>	0,272	0,297	0,297	0,316
Índice de Estado de Derecho	Si	Si	Si	Si
FE tipo empresa	Si	Si	Si	Si
FE año	No	Si	Si	Si
FE región	No	No	Si	No
FE país	No	No	No	Si

Nota: Los resultados indican la estimación del efecto sobre los nuevos descubrimientos de oro en los presupuestos de exploración temprana de oro. Cada columna muestra una especificación distinta. La columna (1) controla por variables de calidad institucional y por el tipo de empresa. La columna (2) incluye efectos fijo por año para controlar por cambios en los precios y otras tendencias comunes. La columna (3) agrega efectos fijos a nivel regional y la columna (4) aumenta el detalle con efectos fijos a nivel país. Los errores estándar son robustos y clústeres a nivel de país.

\*p<0,1; \*\*p<0,05; \*\*\*p<0,01

El análisis por período indicaría que el modelo teórico no se ajusta a priori a los datos observados, sin embargo, se debe tener presente que el modelo teórico debe ser entendido como un análisis de muy largo plazo. Actualmente, el período de estudio es cercano a 20 años, podrían aun ser insuficientes para notar cambios de agotamiento en las oportunidades de inversión. Además, para el caso del cobre y en la especificación más conservadora, el coeficiente no ha sido distinto de cero en cada período analizado, lo que podría reforzar el argumento de que se requiere un mayor período de análisis de ese metal. En el caso del oro, el coeficiente muestra una tendencia decreciente en el tiempo, pero no de manera consistente.

## 5.2 Análisis por tipo de empresa

Un análisis adicional consiste en diferenciar el parámetro según el tipo de empresa analizada. En particular, esto permite una mayor comprensión del efecto en los descubrimientos si es que empresas más pequeñas o juniors reaccionan de manera distinta que empresas majors. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 6.

En este caso, los resultados indican que el efecto de agotamiento de oportunidades de inversión podría ser levemente más marcado para las empresas junior. Esto indicaría que cada nuevo descubrimiento afecta de manera heterogénea a las empresas. Por un lado, las empresas junior, al tener menor capacidad financiera podrían ver limitada su capacidad para realizar inversiones tras el agotamiento de los espacios para realizar exploración. Lo anterior parece no sería una limitante para las empresas de mayor tamaño que, en el período analizado, responden de manera positiva a los descubrimientos de cobre y oro (más marcadamente para este último).

## 5.3 Análisis por zona geográfica

Finalmente, se presenta un análisis de las diferencias entre el coeficiente por zona geográfica. En particular se estudian las diferencias en 6 macro regiones (5 para el cobre) del mundo en las cuales ocurren los descubrimientos de cobre y oro, lo que permite indicar zonas de mayor madurez geológica donde el efecto neto reflejado del coeficiente es negativo. Adicionalmente, en los casos donde hay datos de descubrimientos suficientes, se estima el coeficiente por país. La Tabla 7 presenta los resultados principales por región.

Los resultados anteriores dan cuenta de marcadas diferencias en cuánto al potencial geológico y la competitividad minera de las distintas regiones del mundo. En el caso del cobre, África, Medio Oriente y E.E.U.U.-Canadá aparecen con un potencial emergente,



**Tabla 6:** Efecto de descubrimientos en los presupuestos de exploración temprana o grassroots por tipo de empresa

	Log presupuesto de exploración	
	Cu	Au
	(1)	(2)
$\delta \cdot$ Junior	-0,062 (0,067)	0,061 (0,041)
$\delta \cdot$ Major	0,085 (0,066)	0,261* (0,142)
$\delta \cdot$ Otra	0,023 (0,057)	0,306*** (0,117)
N obs	10.168	20.628
R <sup>2</sup>	0,422	0,317
Índice de Estado de Derecho	Si	Si
FE tipo empresa	Si	Si
FE año	Si	Si
FE país	Si	Si

Nota: Los resultados indican la estimación del efecto sobre los nuevos descubrimientos en los presupuestos de exploración temprana de cobre y oro por tipo de empresa. La columna (1) indica los resultados para el caso del cobre y la columna (2) para el oro. Ambos resultados corresponden a la estimación más conservadora, controlando por calidad institucional, tipo de empresa, año y país. Los errores estándar son robustos y clústeres a nivel de país.

\*p<0,1; \*\*p<0,05; \*\*\*p<0,01

**Tabla 7:** Efecto de descubrimientos en los presupuestos de exploración temprana o grassroots por zona geográfica

	Log presupuesto de exploración	
	Cu (1)	Au (2)
$\delta \cdot \text{África}$	0,424*** (0,048)	0,046 (0,171)
$\delta \cdot \text{Asia-Pacífico}$	-0,145* (0,079)	0,301*** (0,046)
$\delta \cdot \text{Europa}$	-0,394 (0,274)	0,443*** (0,101)
$\delta \cdot \text{América Latina y el Caribe}$	-0,024 (0,039)	0,093 (0,060)
$\delta \cdot \text{Medio Oriente}$	1,670*** (0,165)	
$\delta \cdot \text{E.E.U.U. y Canadá}$	0,192*** (0,050)	0,072 (0,028)
N obs	10.168	20.628
R <sup>2</sup>	0,422	0,317
Índice de Estado de Derecho	Si	Si
FE tipo empresa	Si	Si
FE año	Si	Si
FE país	Si	Si

Nota: Los resultados indican la estimación del efecto sobre los nuevos descubrimientos los presupuestos de exploración temprana de cobre y oro por zona geográfica. La columna (1) indica los resultados para el caso del cobre y la columna (2) para el oro. Ambos resultados corresponden a la estimación más conservadora, controlando por calidad institucional, tipo de empresa, año y país. Los errores estándar son robustos y clústeres a nivel de país.

\*p<0,1; \*\*p<0,05; \*\*\*p<0,01

donde las externalidades de información son mayoritarias y aún no se ven limitadas por un agotamiento de las oportunidades de exploración. Por otro lado, los datos dan cuenta de zonas ya maduras, donde cada descubrimiento no genera suficientes externalidades de información para sostener la inversión como es el caso de la zona Asia-Pacífico. Si bien Europa aparece con un coeficiente negativo y mayor en magnitud que el resto, éste no es estadísticamente distinto de cero. Sin embargo, la zona podría agruparse dentro de las zonas maduras preliminarmente debido a que el mayor error de estimación se explica por la menor cantidad de descubrimientos en la región. El caso de América Latina y el Caribe es particular. El coeficiente es negativo pero muy cercano a cero e indistinguible en términos estadísticos. En este caso, pareciera que los efectos de información y agotamiento se encuentran relativamente balanceados.

El análisis geográfico para la inversión de oro muestra diferencias con respecto al cobre, lo que indica que la madurez geológica debe analizarse por cada mineral. En particular, las zonas de Europa y Asia-Pacífico se muestran como emergentes para el caso del oro, mientras que el resto de las regiones mantienen una posición balanceada entre las externalidades de información y de agotamiento, con un coeficiente bajo y no estadísticamente diferente a cero.

Los descubrimientos tienden a concentrarse en un limitado número de países, lo cual permite realizar un análisis más detallado de la etapa o potencial geológico a nivel país, tal como muestra la Tabla 8. El detalle por país se presenta para los 5 principales países en término de número de descubrimientos de cada metal. En el caso del cobre, se aprecia una marcada madurez geológica en China y de manera más leve en Australia. El caso contrario se da en Canadá, donde cada descubrimiento adicional tiene un efecto positivo y significativo, lo que indicaría que el país se perfila con un mayor potencial geológico en términos de cobre. El mayor número de descubrimientos de cobre han ocurrido en Chile y Perú, los cuales muestran un coeficiente levemente negativo pero no distinto de cero. Esto indicaría que ambos países presentan un similar nivel de desarrollo en términos de su potencial geológico, sin que aún dominen claramente los efectos de agotamiento.

La columna (2) de la Tabla 8 muestra los coeficientes del efecto de los descubrimientos para el caso del oro. En este caso, los descubrimientos en E.E.U.U. y Australia presentan un efecto significativo y positivo, lo que los posiciona con un favorable potencial geológico para la exploración aurífera. El resto de los principales países en términos de descubrimientos de oro no tienen una tendencia marcada positiva o negativa, con coeficientes bajo y estadísticamente no diferente a cero.

El análisis a nivel regional y por país entrega valiosas directrices para la competitividad minera. En general, un país aún en la zona positiva o emergente de su potencial geológico tiene espacio para planificar un desarrollo de sus recursos con la expectativa de la atracción de inversión de exploración y el descubrimiento de yacimientos. Por otro lado, el signo negativo que indicaría un incipiente agotamiento de las oportunidades de inversión no debe ser visto como un evento perjudicial e inevitable para los países, sino que como un punto de información para repensar sus políticas mineras. En este aspecto, el modelo considera que la forma cóncava que tomaría la inversión de exploración a medida que ocurran descubrimientos es para un contexto institucional dado. Esto significa que los países pueden recuperar su capacidad de atraer inversión de exploración moviendo la curva (en lugar de moverse a través de ella). En ese sentido, un signo negativo o cercano a cero es un llamado de atención para repensar o actualizar el modelo de desarrollo minero existente.

**Tabla 8:** Efecto de descubrimientos en los presupuestos de exploración temprana o grassroots por país

	Log presupuesto de exploración	
	Cu	Au
	(1)	(2)
$\delta \cdot$ Australia	-0,111 (0,086)	0,304*** (0,041)
$\delta \cdot$ Canadá	0,210*** (0,052)	0,059 (0,027)
$\delta \cdot$ Chile	-0,043 (0,038)	
$\delta \cdot$ China	-0,438*** (0,074)	
$\delta \cdot$ Perú	-0,030 (0,035)	0,014 (0,018)
$\delta \cdot$ México		0,008 (0,056)
$\delta \cdot$ E.E.U.U.		0,101*** (0,028)
N obs	10,168	20,628
R <sup>2</sup>	0,428	0,322
Índice de Estado de Derecho	Si	Si
FE tipo empresa	Si	Si
FE año	Si	Si
FE país	Si	Si

Nota: Los resultados indican la estimación del efecto sobre los nuevos descubrimientos los presupuestos de exploración temprana de cobre y oro por zona geográfica. La columna (1) indica los resultados para el caso del cobre y la columna (2) para el oro. Ambos resultados corresponden a la estimación más conservadora, controlando por calidad institucional, tipo de empresa, año y país. Los errores estándar son robustos y clústeres a nivel de país.

\*p<0,1; \*\*p<0,05; \*\*\*p<0,01

## 6 Conclusiones

La competitividad minera de un país está fundada en la interrelación de su geología y de sus instituciones. Si bien la importancia de ambas variables ha sido destacada en numerosas oportunidades en base a la percepción de inversionistas y operadores, el análisis cuantitativo ha sido comparativamente más escaso. En particular, la discusión sobre el nivel de madurez geológica de un país resulta clave para definir las políticas óptimas para promover el desarrollo minero.

En el presente estudio, proponemos un modelo para analizar el nivel de madurez geológica el cual depende del balance de dos grandes efectos. En primer lugar, en etapas tempranas de desarrollo minero, la información geológica que se genera a través de la exploración genera externalidades positivas que atraen mayor interés. Sin embargo, a medida que estas oportunidades de exploración se vuelven más limitadas con cada nuevo descubrimiento, un efecto de agotamiento comienza a dominar.

El modelo propuesto es puesto en práctica utilizando los datos de descubrimientos de cobre y oro y los presupuestos de exploración temprana respectivos. Según el modelo teórico, cada nuevo descubrimiento revela qué tipo de efecto domina para cada commodity, implicando el nivel de madurez geológica en que se encuentra. En particular, los resultados indican que cada descubrimiento de cobre tiene un efecto no distinto de cero en los presupuestos de exploración temprana, por lo cual las externalidades de información y de agotamiento se encuentran balanceadas. Por otro lado, los descubrimientos de oro indican que cada nuevo descubrimiento tiene un efecto positivo y significativo, lo cual indica que las externalidades de información aún dominan sobre el agotamiento de oportunidades de inversión.

En un nivel más detallado, el efecto por commodity se analiza por período, por tipo de empresa y por zona geográfica. Para el caso del cobre, el efecto neto no aparece como distinto de cero a través del tiempo, lo que indicaría cierta estabilidad del balance entre ambas externalidades previamente mencionadas. Sin embargo, en el caso del oro se aprecia una tendencia a la baja a través del tiempo, lo que podría dar luces sobre un mayor nivel de madurez geológica. En términos del efecto por tipo de empresa, el análisis indica que el efecto de agotamiento es ligeramente menos marcado en las empresas mayor que en las junior, tanto para el cobre como para el oro. En este sentido, podría ser que la menor capacidad financiera entre las empresas limite el acceso a oportunidades de inversión y signifique una baja en su capacidad de explorar.

Finalmente, el análisis geográfico otorga valiosa información sobre zonas geológicamente maduras. En el caso del cobre, Asia-Pacífico se aprecia significativamente más madura que el resto. No obstante, el análisis del oro no indica que alguna zona se encuentra en un mayor nivel de madurez. En ambos casos, la zona latinoamericana presenta un balance entre los efectos de información y agotamiento, sin que uno domine claramente sobre el otro.

El análisis presentado ilustra que la definición de madurez geológica no es estática o única, pues varía a través del tiempo, por tipo de commodity, por tipo de empresa y en los distintos países y regiones. El paso a un mayor nivel de madurez geológica debería ser aprovechado para analizar y proponer mejoras en otras variables que afectan la competitividad de la industria minera, como lo son las instituciones políticas y económicas, que también son un pilar para la atracción de inversión.

## 7 Referencias

- Acemoglu, D., Johnson, S., & Robinson, J. A. (2001). The colonial origins of comparative development: An empirical investigation. The American Economic Review, 91(5), 1369–1401.
- COCHILCO (2013a). Chile: País atractivo para las inversiones mineras. Technical report, COCHILCO.
- COCHILCO (2013b). Factores competitivos para la exploración minera en Chile. Technical report, COCHILCO.
- COCHILCO (2015). Competitividad de la minería chilena del cobre. Technical report, COCHILCO.
- Fraser Institute (2020). Annual Survey of Mining Companies, 2019. Technical report, Fraser Institute.
- Jara, J. J. (2017). Determinants of country competitiveness in attracting mining investments: An empirical analysis. Resources Policy, 52, 65–71.
- Jara, J. J., Delucchi, S., Peters, D., Lagos, G., & Marquardt, C. (2020). Attracting mining investments: the relationship between natural endowments and public policies. Mineral Economics, 33(1), 231–243.
- Jara, J. J., Lagos, G., & Tilton, J. E. (2008). Using exploration expenditures to assess the climate for mineral investment. Resources Policy, 33(4), 179–187.
- Khindanova, I. (2011). Location Factors for Non-Ferrous Exploration Investments. Journal of Applied Business and Economics, 12(1), 38–45.
- Khindanova, I. (2015). Exploration funding and the mineral investment climate. Journal of Finance and Accountancy, 19.
- Libecap, G. D. (1990). Contracting for Property Rights. Cambridge University Press.
- Lynham, J. (2017). Identifying Peer Effects Using Gold Rushers. Land Economics, 93(3), 527–548.
- Mason, C. F. (1989). Exploration information and AEC regulation of the domestic uranium industry. Journal of Economic Dynamics and Control, 13(3), 421–448.
- Mason, C. F. (2014). Uranium and nuclear power : The role of exploration information

- in framing public policy. Resource and Energy Economics, 36(1), 49-63.
- Otto, J., Andrews, C. B., Cawood, F., Doggett, M., Guj, P., Stermole, F., Stermole, J., & Tilton, J. (2006). Mining Royalties. The World Bank.
- Peterson, F. (1978). A Model of Mining and Exploration for Exhaustible Resources. Journal of Environmental Economics and Management, 5(3), 236-251.
- Siegel, D. R. (1985). Estimating Potential Social Losses from Market Failure : Oil Exploration in Alberta. The RAND Journal of Economics, 16(4), 537-552.
- S&P Global Market Intelligence (2019a). Corporate Exploration Strategies. Technical report, S&P Global Market Intelligence.
- S&P Global Market Intelligence (2019b). Strategies for Copper Reserves Replacement. Technical report, S&P Global Market Intelligence.
- S&P Global Market Intelligence (2020). Industry Documents: Gold discoveries — Databook. Technical report, S&P Global Market Intelligence.
- Sturla, G., Lopez, R., Accorsi, S., & Figueroa, E. (2018). The wealth gifted to the large-scale copper mining industry in Chile: new estimates, 2005-2014. CEPAL Review, 123, 99–119. [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43953/1/RVI124\\_Sturla.pdf](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43953/1/RVI124_Sturla.pdf).
- The World Bank (2019). Worldwide Governance Indicators.
- Tilton, J. E. & Guzman, J. I. (2016). Mineral economics and policy. RFF Press, 1st edition.
- Uhler, R. S. (1976). Costs and Supply in Petroleum Exploration : The Case of Alberta. The Canadian Journal of Economics, 9(1), 72-90.

Este trabajo fue elaborado en la  
Dirección de Estudios y Políticas Públicas por:

**Emilio Castillo**

Analista de Estrategias y Políticas Públicas

**Cintia Roa**

Analista de Mercado Minero

**Jorge Cantallopts Araya**

Director de Estudios y Políticas Públicas

Marzo 2021

